

光電子増倍管

PHOTOMULTIPLIER TUBE

その基礎と応用

第3版

光センシングでホトニクスの未来を拓く

HAMAMATSU



▲光電子増倍管



▲光電子増倍管モジュール

はじめに

光による極端領域の計測技術は、より高度な現象の解明への大きな手法となりつつあります。光による計測は、非破壊による物質の分析、高速な現象の計測、高感度検出性などに特長づけられます。特に近年の科学計測分野、医学、高エネルギー物理、分光分析、バイオテクノロジーなどの分野では、光センサの性能の極限化が求められています。

光センサを動作原理から分類すると、外部光電効果、内部光電効果、熱型と大きく3つのタイプに分けられます。外部光電効果は、真空中におかれた金属や半導体に光をあてたとき、表面から真空中に電子が放出される現象です。これを利用した製品としては光電子増倍管があり、高速応答、超高感度（微弱光検出性）に特長があり、医用機器、分析機器、工業用計測機器などに幅広く用いられています。

内部光電効果を利用したものは、光導電型と光起電接合型に分けられます。代表的なものとして、光導電セル、PIN フォトダイオードがあり、高感度かつ小型という特長があり、カメラの露出計、光ディスク、光通信などのセンサに汎用されています。熱型検出器は、感度は低いものの波長依存性がなく、警報機などの温度センサなどに用いられています。

それらのうち、本書は特に光電子増倍管に関する基本構造、諸特性、応用などが記述されています。

本書は、光電子増倍管を使用するにあたり、その性能を十分に生かし、さらにより高信頼性、安定に、かつ適切に動作させるための手引書です。特に、これから初めて光電子増倍管を使おうとする技術者のためのガイダンス、すでに使っている技術者の方のさらなる性能向上のための手引書となるよう期待いたします。

目次

第1章 序

1.1 本書の構成と概要	2
1.2 測光の単位について	4
1.2.1 光の波長による分類と単位	4
1.2.2 光の強度の単位	5
1.3 歴史	10
1.3.1 光電面の歴史	10
1.3.2 光電子増倍管の歴史	11
第1章 参考文献	12

第2章 光電子増倍管の基本原理

2.1 光電子放出	14
2.2 電子軌道	16
2.3 電子増倍部（ダイノード部）	17
2.4 陽極（アノード）	18
第2章 参考文献	19

第3章 光電子増倍管の基本的な使い方

3.1 光電子増倍管の使用に際して	22
3.1.1 選択方法	22
3.1.2 周辺機器	23
高圧電源	23
デバイダ回路	24
ハウジング	26
電源一体型モジュール	27
3.1.3 信号読出（接続回路）	28

第4章 光電子増倍管の特性

4.1 光電面の基本特性	30
4.1.1 光電面の種類	30
(1) Cs-I	30
(2) Cs-Te	30

	(3) Sb-Cs	30
	(4) バイアルカリ(Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs)	30
	(5) 高温用低暗電流バイアルカリ(Sb-Na-K)	31
	(6) マルチアルカリ(Sb-Na-K-Cs)	31
	(7) Ag-O-Cs	31
	(8) GaAsP(Cs)	31
	(9) GaAs(Cs)	31
	(10) InGaAs(Cs)	31
	(11) InP/InGaAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs)	31
	透過型光電面	34
	反射型光電面	35
4.1.2	入射窓材の種類	36
	(1) MgF ₂ 結晶	36
	(2) サファイア	36
	(3) 合成石英	36
	(4) UVガラス(UV透過ガラス)	36
	(5) 硼硅酸ガラス	36
4.1.3	分光感度特性	37
	(1) 放射感度	37
	(2) 量子効率	37
	(3) 分光感度特性の測定法と算出法	37
	(4) 波長範囲(短波長限界, 長波長限界)	38
4.1.4	ルーメン感度	38
	(1) 陰極ルーメン感度	39
	(2) 陽極ルーメン感度	40
	(3) 青感度指数と赤感度比	41
4.1.5	ルーメン感度と分光感度	42
4.2	ダイノードの基本特性	43
4.2.1	ダイノードの種類と特長	43
	(1) サーキュラケージ型	44
	(2) ボックス型	44
	(3) ラインフォーカス型	44
	(4) ベネシアンブラインド型	44
	(5) メッシュ型	44
	(6) MCP(Microchannel Plate・・・マイクロチャンネルプレート)型	44
	(7) メタルチャンネルダイノード型	44
	(8) 電子打込み型	44
4.2.2	収集効率とゲイン(電流増倍率)	45
	(1) 収集効率	45
	(2) ゲイン (電流増倍率)	46
4.3	光電子増倍管の諸特性	48
4.3.1	時間特性	48
	(1) 上昇時間・下降時間・電子走行時間	49
	(2) T.T.S.(Transit Time Spread)	50

	(3) 光電子走行時間差 C.T.T.D.(Cathode Transit Time Difference)	52
	(4) C.R.T.(Coincident Resolving Time)	53
4.3.2	リニアリティ	54
	(1) 陰極リニアリティ特性	54
	(2) 陽極リニアリティ特性	54
	(3) リニアリティ測定法	56
4.3.3	ユニフォミティ	59
	(1) 入射位置によるユニフォミティ	60
	(2) アンギュラーレスポンス	62
4.3.4	安定性	63
	(1) ドリフト (経時変化特性)、ライフ (寿命) 特性	63
	(2) エージング、ウォーミングアップ	64
4.3.5	ヒステリシス特性	65
	(1) 光ヒステリシス特性	65
	(2) 電圧ヒステリシス特性	66
	(3) ヒステリシスの軽減	67
4.3.6	暗電流	67
	(1) 原因	67
	(2) 暗電流の表現方法	71
4.3.7	光電子増倍管の信号対雑音比 (SN 比)	73
4.3.8	アフタパルス	77
	アフタパルスの種類	77
4.3.9	偏光特性	78
第 4 章	参考文献	81

第 5 章 光電子増倍管の使い方および接続回路

5.1	電圧分割 (デバイダ) 回路	84
5.1.1	デバイダ回路の基礎	84
5.1.2	陽極側接地と陰極側接地	85
5.1.3	デバイダ電流と出力直線性	85
	(1) 直流動作時の出力直線性と直線性対策	86
	(2) パルス動作時の出力直線性と直線性対策	88
5.1.4	デバイダ回路の電圧配分	90
	(1) 陽極および後段の電圧配分	90
	(2) 陰極および前段の電圧配分	92
5.1.5	高速応答性を重視する対策	93
5.1.6	実際の高速応答デバイダ回路例	94
5.1.7	高出力直線性デバイダ回路例 (1)	94
5.1.8	高出力直線性デバイダ回路例 (2)	96

5.1.9	ゲーティング回路	97
5.1.10	陽極感度調整回路	98
5.1.11	デバイダ回路製作上の注意点	100
	(1) デバイダ回路に使用する部品の選択	100
	(2) 部品実装上の留意点	101
5.2	高圧電源の選択	102
5.3	外部回路との接続	102
5.3.1	出力信号の観測法	102
5.3.2	カップリングコンデンサの影響	104
5.3.3	光電子増倍管出力の電流・電圧変換	105
	(1) 負荷抵抗による電流・電圧変換	105
	(2) オペアンプによる電流・電圧変換	107
	(3) オペアンプを使用した電荷増幅器	109
5.3.4	高速光電子増倍管の出力回路	111
5.4	ハウジング	113
5.4.1	光の遮蔽	113
5.4.2	電界の遮蔽（シールド）	113
5.4.3	磁界の遮蔽（シールド）	113
	(1) 磁気シールドケースの遮蔽度と磁界の方向性	114
	(2) 飽和特性	116
	(3) 周波数特性	118
	(4) 端末効果	119
	(5) 光電子増倍管の磁気特性とシールド効果	119
	(6) 磁気シールドケースの取り扱い	120
5.5	冷却	122
第5章 参考文献		123
第6章 光子計数法		
6.1	アナログ方式とデジタル(光子計数)方式	126
6.2	光子計数法の原理	127
6.3	光子計数法の動作法と特性	129
	(1) 具体的な回路構成	129
	(2) 光子計数法における基本的特性	129
第6章 参考文献		134
第7章 シンチレーション計数法		
7.1	シンチレータと光電子増倍管	136

7.2 諸特性	139
(1) エネルギー分解能	139
(2) 相対パルス波高値	142
(3) リニアリティ	142
(4) ユニフォミティ	144
(5) 安定性	145
(6) 雑音	146
(7) プラトー特性	148
第7章 参考文献	151

第8章 光電子増倍管モジュール

8.1 光電子増倍管モジュールとは	154
8.2 電源回路の特性	154
(1) 電源回路	154
(2) リップルノイズ	156
(3) セトリングタイム	156
8.3 電流出力型と電圧出力型	157
(1) 接続法	157
(2) ゲイン調整法	157
(3) 電流出力型モジュール	158
(4) 電圧出力型モジュール	158
8.4 フォトンカウンティングヘッド	159
(1) 出力特性	159
(2) 計数感度	159
(3) カウントリニアリティ	160
(4) カウントリニアリティの改善	160
(5) 温度特性	161
(6) フォトンカウンティング ASIC (Application Specified Integrated Circuit)	162
8.5 ゲート機能	163
(1) ゲートノイズ	163
(2) 消光比	164
8.6 CPU+IF 内蔵型	165
(1) フォトンカウンティングタイプ	165
(2) チャージアンプ+ADコンバータタイプ	166
第8章 参考文献	166

第9章 位置検出型光電子増倍管

9.1 マルチアノード型光電子増倍管	169
9.1.1 メタルチャンネル型ダイノードマルチアノード光電子増倍管 ...	169
(1) 構造	169
(2) 特性	170

9.1.2	マルチアノード MCP-PMT	176
9.1.3	フラットパネル型マルチアノード光電子増倍管	176
	(1) 特性	176
9.2	重心位置検出型光電子増倍管	178
9.2.1	メタルチャンネル型ダイノード光電子増倍管 (クロスプレートアノード) ...	178
	(1) 構造	178
	(2) 特性	179
9.2.2	グリッド型ダイノード光電子増倍管 (クロスワイヤアノード) ...	182
	(1) 構造	182
	(2) 特性	182

第 10 章 MCP-PMT

10.1	構造	188
10.1.1	MCP の構造	188
10.1.2	MCP-PMT の構造	189
10.1.3	デバイダ回路とハウジング構造	190
10.2	MCP-PMT の基本特性	191
10.2.1	ゲイン特性	191
10.2.2	時間特性	192
	(1) 上昇／下降時間	192
	(2) 走行時間 (Transit Time)	192
	(3) T.T.S (Transit Time Spread)及び I.R.F(Instrument Response Function) ...	192
	(4) 光電子走行時間差 (Cathode Transit Time Difference)	194
	(5) 各製品の時間差特性	194
10.2.3	温度特性および冷却器について	195
10.2.4	飽和特性	196
	(1) 不感時間 (Dead Time)	196
	(2) 直流動作による飽和	197
	(3) パルスリニアリティ特性	198
	(4) フォトンカウンティング法における飽和利得特性 (波高分布)	200
	(5) フォトンカウンティング法による計数率直線性	200
10.2.5	磁気特性	201
10.3	ゲート付 MCP-PMT	203
10.4	マルチアノード MCP-PMT	205
第 10 章	参考文献	208

第 11 章 HPD (Hybrid Photo-Detector)

11.1	HPD の動作原理	210
------	-----------------	-----

11.2	光電子増倍管との比較	212
11.3	HPDの諸特性	213
11.3.1	マルチフォトエレクトロン分解能	213
11.3.2	ゲイン特性・電子打込みゲインの均一性	213
11.3.3	時間応答特性	215
11.3.4	ユニフォミティ	216
11.3.5	光ヒステリシス特性	216
11.3.6	ドリフト特性（短期安定性）	217
11.3.7	磁気特性	218
11.3.8	温度特性	218
11.4	接続例 (R7110U シリーズ)	219
11.4.1	直流信号を取り扱う場合（トランスインピーダンスアンプとの接続を含めて）	219
11.4.2	パルス信号を取り扱う場合（チャージアンプとの接続例）	220
第 11 章	参考文献	220

第 12 章 電子増倍管とイオンディテクタ

12.1	構造	222
12.2	特性	223
12.2.1	軟 X 線、真空紫外線、電子、イオンに対する感度特性	223
12.2.2	ゲイン特性	227
12.2.3	暗電流 / ノイズ特性	227
12.2.4	リニアリティ特性	230
12.2.5	寿命特性	231
第 12 章	参考文献	231

第 13 章 環境性と信頼性

13.1	周囲温度の影響	234
13.1.1	温度特性	234
	(1) 感度	234
	(2) 暗電流	235
13.1.2	高温用光電子増倍管	236
13.1.3	保存温度および冷却時の注意	239
13.2	湿度の影響	239
13.2.1	動作時湿度	239
13.2.2	保存時湿度	239

13.3	周囲磁界の影響	240
13.3.1	磁気特性	240
13.3.2	高磁界用光電子増倍管	241
13.3.3	磁化	242
13.3.4	非磁性材製光電子増倍管	242
13.4	振動・衝撃	243
13.4.1	非動作時の耐振・耐衝撃性	243
13.4.2	動作状態での耐振動・耐衝撃性（共振）	243
13.4.3	試験方法・条件	245
13.4.4	耐振用光電子増倍管	246
13.5	ヘリウムガスの影響	248
13.6	放射線の影響	249
13.6.1	窓材透過率の劣化	249
13.6.2	窓材発光	253
13.7	気圧の影響	254
13.8	周囲電位の影響	255
13.8.1	実験	255
13.8.2	対策	257
13.9	信頼性	258
13.9.1	経時変化（寿命）特性	258
13.9.2	電流ストレスと安定性	258
13.9.3	信頼度	261
	(1) 故障モード	261
	(2) 故障率	261
	(3) 平均寿命	261
	(4) 信頼度	262
13.9.4	浜松ホトニクスにおける信頼度試験と判定基準	263
	第13章 参考文献	264

第14章 各種応用

14.1	光分析装置	266
14.1.1	概要	266
14.1.2	応用例	267
	(1) 紫外、可視、赤外分光光度計（UV, Visible, IR Spectrophotometer）	267
	(2) 原子吸光分光光度計（Atomic Absorption Spectrophotometer）	268
	(3) 発光分光分析装置（Atomic Emission Spectrophotometer）	268
	(4) 蛍光分光光度計（Fluorospectrophotometer）	269

14.2	医用装置	270
14.2.1	PET (Positron Emission Tomography)	270
14.2.2	ガンマカメラ (Gamma Camera)	273
14.2.3	プラナーイメージング装置	274
14.2.4	X線画像診断装置	275
	(1) X線レントゲンフォトタイマ	275
	(2) コンピューテッド・ラジオグラフィー (CR)	276
14.2.5	検体検査	277
	(1) R.I.A. (Radioimmunoassay)	279
	(2) 発光・蛍光イムノアッセイ	280
	(3) 化学発光免疫測定装置	281
14.3	バイオテクノロジー	282
14.3.1	概要	282
14.3.2	応用例	282
	(1) フローサイトメータ	282
	(2) 共焦点レーザー顕微鏡	283
	(3) DNA マイクロアレイスキャナ	283
	(4) DNA シーケンサ	284
14.4	高エネルギー物理実験	285
14.4.1	概要	285
14.4.2	衝突型実験装置	285
	(1) ホドスコープ	286
	(2) TOF カウンタ	286
	(3) カロリメータ	287
	(4) チェレンコフカウンタ	287
	(5) 陽子崩壊実験・ニュートリノ観測実験	288
14.5	石油探層	290
14.6	環境測定	291
14.6.1	概要	291
14.6.2	応用例	291
	(1) ダストカウンタ	291
	(2) レーザレーダ (LIDAR)12)	291
	(3) 窒素酸化物分析計	292
	(4) 硫黄酸化物分析計	293
14.7	放射線監視装置	294
14.7.1	概要	294
14.7.2	応用例	294
	(1) 携帯型放射線モニタ (Pager)	294
	(2) ドアモニタ	295

14.8	工業計測への応用	296
14.8.1	概要	296
14.8.2	応用例	296
	(1) 厚さ計	296
	(2) レーザスキャナ	297
14.9	宇宙応用	298
14.9.1	概要	298
14.9.2	応用例	298
	(1) X線天文衛星	298
	(2) オゾン計測（太陽光後方散乱放射計）	300
14.10	質量分析 / 固体表面分析	301
14.10.1	質量分析装置 18) 19)	301
14.10.2	固体表面分析装置 20)	302
第 14 章	参考文献	304

第 1 章

序

1.1 本書の構成と概要

本書の各章に記述されている内容についての概略を以下に記します。

第1章 「序」

本論に先立ち、光の波長及び光の強度の単位についてふれます。さらに、光電面、光電子増倍管の開発の歴史について解説しています。

第2章 「光電子増倍管の基本原理」

光電子増倍管(Photomultiplier Tube)を構成する基本要素である光電子放出、電子軌道、電子増倍部(ダイノード部)による電子増倍の原理、陽極(アノード)について解説しています。

第3章 「基本的な使い方」

初めて光電子増倍管を使用される方を対象として、光電子増倍管の選択方法、動作方法、信号の処理方法について解説しています。

第4章 「光電子増倍管の特性」

光電子増倍管の基本特性および諸特性について詳しく解説しています。

第5章 「光電子増倍管の使い方および接続回路」

光電子増倍管を実際に正しく動作させるための基本回路と必要なアクセサリについてその使い方を解説しています。

第6章 「光子計数法」

光の絶対量が少なく極微弱な光の測定に使用されている光子計数法の原理、使用法、特性、利点等について解説しています。

第7章 「シンチレーション計数法」

光電子増倍管をシンチレーション計数法で放射線計測に使用する場合の特性の定義、測定方法、代表的な数値例などについて解説しています。

第8章 「光電子増倍管モジュール」

光電子増倍管をさらに使いやすく、さらに広く使用していただくために開発された光電子増倍管モジュールについて解説しています。

第9章 「位置検出型光電子増倍管」

マルチアノード型光電子増倍管および重心位置検出型光電子増倍管の構造、特性および応用例について解説しています。

第10章 「MCP-PMT」

マイクロチャンネルプレート (Microchannel plate : MCP) を内蔵した高感度かつ超高速光検出器であるマイクロチャンネルプレート内蔵型光電子増倍管 (MCP-PMT) について解説しています。

第11章 「HPD」

電子管に半導体素子を内蔵した新しいハイブリッド型フォトディテクタ (HPD) について解説しています。

第12章 「電子増倍管とイオンディテクタ」

電子増倍管 (Electron Multiplier : EM管) および質量分析装置に最適なイオンディテクタについての構造、諸特性について解説しています。

第13章 「環境性と信頼性」

光電子増倍管の環境性と信頼性に対する特性および使用方法を記述しています。特に、周囲温度、湿度、磁界等の影響とその対策について解説しています。

第14章 「各種応用」

光電子増倍管の応用について解説しています。各種の応用分野で光電子増倍管がどのように使われているかについて解説しています。

1.2 測光の単位について

光電子増倍管の記述をするに先だって、本節では光の量(測光)の単位系について解説します。ここでは、測光領域における光の波長域とその単位及び光の強度の単位系について述べます。ここではそれらの概要のみ記述しますので、詳細は専門書を参照してください。¹⁾²⁾

1.2.1 光の波長による分類と単位

電磁波は γ 線からミリ波まで極めて広い範囲にわたり、光は電磁波のある特定の波長領域と定義されます。

表1-1に、光を波長で分類した時の、称呼領域と単位変換図を示します。一般に光と言われる領域は表1-1に示すように波長域で $10^2 \sim 10^6$ nmあたりを指します。表中、350～750 nmの可視域に対し、波長が短くなると、近紫外線(350 nm以下)、空気の吸収が生じる真空紫外域(200 nm以下)、極端紫外域(100 nm以下)、さらに短波長域は「軟X線、X線」と呼ばれる波長領域(10 nm以下)となります。また、可視域より長波長になると、近赤外線(750 nm以上)、赤外線(数 μ m以上)、遠赤外線(数10 μ m以上)とよばれる領域となります。

波 長	称呼領域	周波数	エネルギー
nm		(Hz)	(eV)
10	X 線 軟X線		
10^2	極紫外域	10^{16}	10^2
200	真空紫外域		10
350	紫外域	10^{15}	
750	可視域		
10^3	近赤外域		1
10^4	赤外域	10^{14}	
		10^{13}	10^{-1}
10^5	遠赤外域		10^{-2}
10^6		10^{12}	10^{-3}

表 1-1 光の波長領域と単位換算図

ここで光量子のエネルギー $E(\text{J})$ は以下の式 1-1 から求められます。

$$E = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-1)}$$

h: プランクの定数 $6.626 \times 10^{-34} (\text{J}\cdot\text{s})$
 ν: 光の振動数 (Hz)
 c: 光速 $3 \times 10^8 \text{m/s}$
 λ: 波長 (nm)

ここで、式 1-1 に E を eV 単位で、波長を nm 単位で、及び定数 h, c をそれぞれ代入すると、式 1-2 のように書き換えられます。ここで $1 (\text{eV})$ は $1.6 \times 10^{19} (\text{J})$ です。

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-2)}$$

これにより、光のエネルギーは波長の逆数に比例して強くなることがわかります。

1.2.2 光の強度の単位

ここでは光の強度の単位とその定義についてふれます。

光の放射量は純物理量であり、ワット (J/S) を単位として定義されます。これに対して測光量はいわゆる心理物理量であり、ルーメンを単位として定義されます。

毎秒 N 個の強さで波長 λ (nm) の光量子があったとすると、 $W = \text{J/S}$ の関係から、式 1-1 は以下の式 1-3 のように書き換えられます。

$$W = NE = \frac{Nhc}{\lambda} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-3)}$$

ここで各定数を代入すると、以下の式が得られます。

$$W = \frac{N \times 2 \times 10^{-16}}{\lambda}$$

上式は、光の放射量 (W) と毎秒あたりの光量子数 (N) との関係を示し、覚えておくと便利な式です。

表 1-2 に放射量と測光量 ([] 内) の単位の比較表を示します。(説明は次節にて)

量	単位名	単位記号
放射束 [光束]	ワット [ルーメン]	W [lm]
放射エネルギー [光量]	ジュール [ルーメン秒]	J [lm·s]
放射照度 [照度]	ワット每平方米 [ルクス]	W/m ² [lx]
放射発散度 [光束発散度]	ワット每平方米 [ルーメン每平方米]	W/m ² [lm/m ²]
放射強度 [光度]	ワット毎ステラジアン [カンデラ]	W/sr [cd]
放射輝度 [輝度]	ワット毎ステラジアン每平方米 [カンデラ每平方米]	W/sr·m ² [cd/m ²]

表 1-2 放射量と測光量 ([]内) の単位比較

1. 放射束 [光束]

放射束は、放射量における単位であり表 1-2 の [] 内に示す光束は測光量における単位を示します。以下の記述において、すべてこの方式に従って区別します。放射束(Φ_e)は、ある面を単位時間あたりに通過する放射エネルギー(Q_e)であり、以下の式 (1-4) で定義されます。

$$\Phi_e = dQ_e/dt \text{ (J/s)} \dots\dots\dots \text{(式 1-4)}$$

他方測光量である、光束(Φ ：単位 ルーメン)は、以下の式により定義されます。

$$\Phi = km \int \Phi_e(\lambda)v(\lambda)d\lambda \dots\dots\dots \text{(式 1-5)}$$

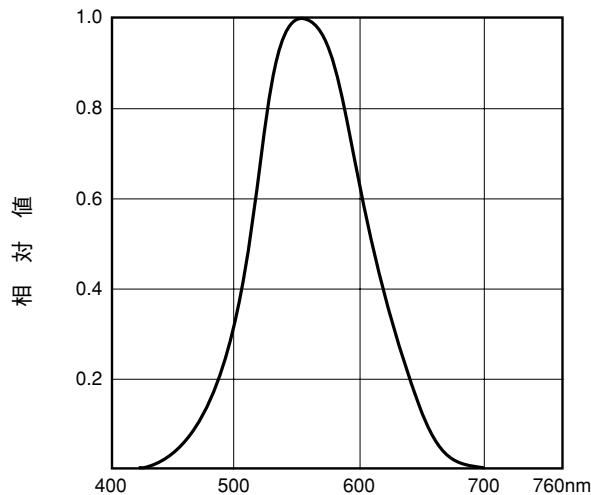
ここで $\Phi_e(\lambda)$: ある放射束の分光放射密度(分光放射束)

km : 最大視感度 (638 lm/W)

$v(\lambda)$: 標準視感度

最大視感度(km)は、放射量と測光量を結び付ける変換係数です。

また $v(\lambda)$ は標準的な人間の目の分光感度分布を表します。図 1-1 及び表 1-3 に国際的に定められた $v(\lambda)$ の分布及び数値を示します。



THBV3_0101JA

図 1-1 標準視感度分布

波長(nm)	標準比視感度	波長(nm)	標準比視感度
400	0.0004	600	0.631
10	0.0012	10	0.503
20	0.0040	20	0.381
30	0.0116	30	0.265
40	0.023	40	0.175
450	0.038	650	0.107
60	0.060	60	0.061
70	0.091	70	0.032
80	0.139	80	0.017
90	0.208	90	0.0082
500	0.323	700	0.0041
10	0.503	10	0.0021
20	0.710	20	0.00105
30	0.862	30	0.00052
40	0.954	40	0.00025
550	0.995	750	0.00012
555	1.0	60	0.00006
60	0.995		
70	0.952		
80	0.870		
90	0.757		

表 1-3 波長別標準比視感度表

2. 放射エネルギー [光量]

放射エネルギー (Q_e)とは、放射束の時間的積分量です。

同様に、光量 (Q)は光束の時間的積分量と定義されます。それぞれ、式1-6、式1-7で示されます。

$$Q_e = \int \Phi_e dt \text{ (W}\cdot\text{s)} \dots\dots\dots \text{(式 1-6)}$$

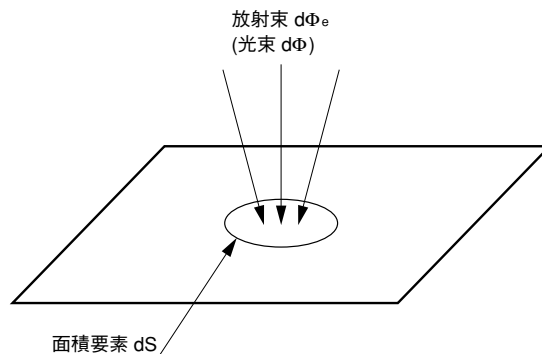
$$Q = \int \Phi dt \text{ (lm}\cdot\text{s)} \dots\dots\dots \text{(式 1-7)}$$

3. 放射照度 [照度]

放射照度 [照度] は、ある面に入射する放射束(光束)をその微小面積で割ったものです。(図1-2参照)それらを式で表すと、式1-8、式1-9のようになります。

$$\text{放射照度 } E_e = d\Phi_e/ds \text{ (W/m}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{(式 1-8)}$$

$$\text{照度 } E = d\Phi/ds \text{ (lx)} \dots\dots\dots \text{(式 1-9)}$$



THBV3_0102JA

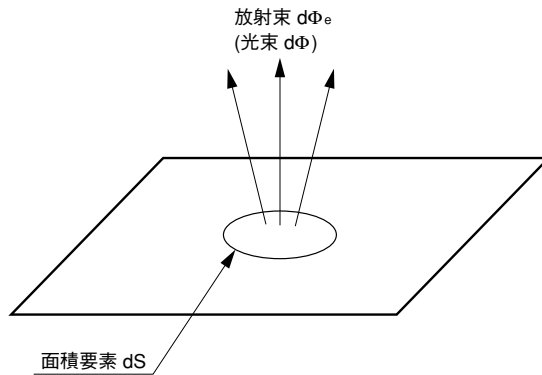
図 1-2 放射照度

4. 放射発散度 [光束発散度]

放射発散度 [光束発散度] は、光を放出する面において、放出される放射束(光量)を、その微小面積で割った量です。(図 1-3 参照)それぞれ、以下の式 1-10、式 1-11 で表されます。

$$\text{放射発散度 } Me = d\Phi_e/ds \text{ (W/m}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{(式 1-10)}$$

$$\text{光束発散度 } M = d\Phi/ds \text{ (lm/m}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{(式 1-11)}$$



THBV3_0103JA

図 1-3 放射発散度

5. 放射強度 [光度]

放射強度 [光度] は、点状の放射源からその微小立体角内に出ていく放射束 (光束) を微小立体角で割った量です。(図 1-4 参照) それぞれ、式 1-12、式 1-13 で表されます。

$$\text{放射強度 } I_e = d\Phi_e/dw \text{ (W/sr)} \dots\dots\dots \text{(式 1-12)}$$

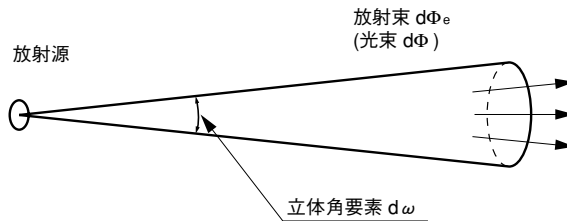
Φ_e :放射束 (W)

w :立体角 (sr)

$$\text{光度 } I = d\Phi/dw \text{ (cd)} \dots\dots\dots \text{(式 1-13)}$$

Φ :光束 (lm)

w :立体角 (sr)



THBV3_0104JA

図 1-4 放射強度

6. 放射輝度 [輝度]

放射輝度 [輝度] は、放射源のある方向への放射において、放射強度 (光度) を放射面の正射影面積で割った量です。(図 1-5 参照) それぞれ、式 1-14、式 1-15 に定義されます。

$$\text{放射輝度 } L_e = dI_e/ds \times \cos\theta \text{ (W/sr}\cdot\text{m}^2) \dots\dots\dots \text{(式 1-14)}$$

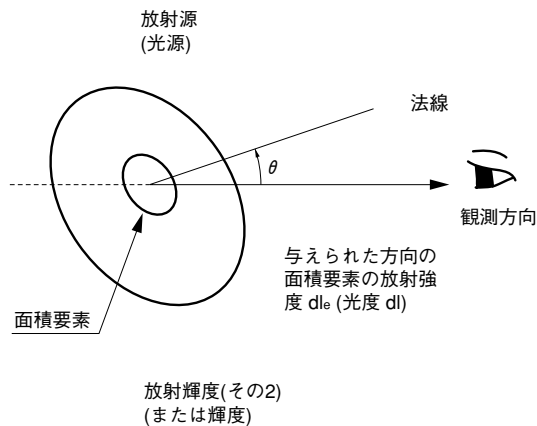
I_e :放射強度

s :面積

θ :観測方向と微小面の法線となす角

$$\text{輝度 } L = dI/ds \times \cos\theta \text{ (cd/m}^2) \dots\dots\dots \text{(式 1-15)}$$

I :光度 (cd)



THBV3_0105JA

図 1-5 放射輝度比較

これまで、基本的な測光の単位についてのべてきました。ここでは、定量的にはSI単位を用いて説明しましたが、場合によっては、SI単位によらない場合もあります。

表 1-4,1-5 に輝度、照度のSI、非SI単位系における比較表を示します。それらの間の変換が必要な時に利用して下さい。

	単位名	記号	換算式
SI単位系	ニト スチルプ アボスチルプ ランベルト	nt sb asb L	$1\text{nt} = 1\text{cd}/\text{m}^2$ $1\text{sb} = 1\text{cd}/\text{cm}^2 = 10^4\text{cd}/\text{m}^2$ $1\text{asb} = 1/\pi\text{cd}/\text{m}^2$ $1\text{L} = 1/\pi\text{cd}/\text{cm}^2 = 10^4/\pi\text{cd}/\text{m}^2$
非SI単位系	フートランベルト	fL	$1\text{fL} = 1/\pi\text{cd}/\text{ft}^2 = 3.426\text{cd}/\text{m}^2$

表 1-4 輝度の単位

	単位名	記号	換算式
SI単位系	フォト	ph	$1\text{ph} = 1\text{lm}/\text{cm}^2 = 10^4\text{IX}$
非SI単位系	フートキャンドル	fc	$1\text{fc} = 1\text{lm}/\text{ft}^2 = 10.764\text{IX}$

表 1-5 照度の単位

1.3 歴史

1.3.1 光電面の歴史³⁾

1887年、Herts⁴⁾は、負電極を紫外線にさらすことで光電効果を発見しました。翌1888年には、Hallwachs⁵⁾によってさらにはっきりとした光電効果が確認されました。1889年には、Elster, Geiter⁶⁾により、アルカリ金属(ナトリウム-カリウム)によって可視光線による光電効果が報告されました。この後、様々な光電子放出の実験や論争が行われ「光電子放出は光子の自由電子への転換を表す」というEinsteinの概念(量子論-1905年)⁷⁾が立証され、受け入れられていきました。このような流れの中で、1913年には、前述のElsterとGeiterにより光電管が作られました。1929年Koller⁸⁾とCampbell⁹⁾らにより、Ag-O-Cs(銀酸化セシウム(S-1))の複合光電子放出面(光電面)が発見されました。この光電面は、以前より使われていた材料よりも二桁程度大きい光電感度比を示し、可視域から赤外域にかけて高い感度が得られました。1930年には、両氏によりこのS-1光電面を持つ光電管が作られました。また、同じ年、日本でも浅尾氏によりS-1光電面の銀増感法が報告されています。これ以降、可視域用バイアルカリ光電面、赤外域まで高感度であるマルチアルカリ光電面、紫外検出用アルカリハライド光電面などがつぎつぎと開発されました^{10)~13)}。

この他に、紫外から近赤外域で高い感度をもつNEA (Negative Electron Affinity) 型構造のGaAs^{14)~19)}、InGaAs²⁰⁾²¹⁾などのⅢ-V族化合物半導体を用いた光電面も開発され、実用化されています。現在では、上記光電面を有する光電子増倍管が、多数揃えられており、目的に応じて使われています。

1.3.2 光電子増倍管の歴史

光電子増倍管の歴史は、光電面に加え二次電子増倍部(ダイノード)の開発とともに発展してきました。

二次電子面の最初の報告は、1902年、Austin²²⁾らによりなされました。これ以降、電子増倍の目的で二次電子面(二次電子放出)が研究されていきました。1935年にはIams²³⁾らにより、光電面と二次電子面を組み合わせた1段のダイノードを持つ3極光電子増倍管が作られ、映画のサウンドピックアップに用いられました。翌1936年、Zworykin²⁴⁾らにより、多段ダイノードを持つ光電子増倍管が開発されました。これは、電界と磁界を利用して電子移動を行うものでした。1939年、ZworykinとRajchman²⁵⁾が、静電集束型(これは、現在の光電子増倍管の基本構造となっている)の光電子増倍管を開発しました。この光電子増倍管には、当初Ag-O-Cs光電面が使われましたが、その後Sb-Cs光電面が使われました。

さらにその後、1949年²⁶⁾、1956年にMorton²⁷⁾らによって改良、開発の加えられた光電子増倍管の構造が発表されました。ダイノード構造に関しては、サーキュラケージ型、リニアフォーカス型、ボックスアンドグリッド型が開発された他、磁界集束増倍器²⁸⁾、透過型二次電子面^{29)~31)}、チャンネル型増倍管³²⁾などもその後開発されました。

浜松ホトニクス(当時浜松テレビー1983年社名変更)では、1953年に、Sb-Cs光電面を持つ光電管を初めとする様々な光電管の製造を開始しました。1959年には、サイドオン光電子増倍管(製品名931A, 1P21, R106: Sb-Cs光電面)を発売し、分光分析用として使われていきました。1962年、Ag-Bi-O-Cs光電面を持つサイドオン光電子増倍管(製品名R132, R136)を発売しました。この光電面は、Sb-Cs光電面に比べて、赤色波長の感度が良いため、分光分析用には当時としては最適でした。さらに1965年より、ヘッドオン光電子増倍管(製品名6199: Sb-Cs光電面)の発売が始まりました。1967年、当時一番小さい光電子増倍管だった1/2インチサイドオン光電子増倍管(製品名R300: Sb-Cs光電面)を発売しました。1969年には、マルチアルカリ(Na-K-Cs-Sb)光電面を持つ光電子増倍管(製品名R446-サイドオン, R375-ヘッドオン)を発売しました。この後、1974年には、赤色波長の感度増強を図った高感度マルチアルカリサイドオン光電子増倍管(製品名R928)を発売しました。この高感度化は、当時、飛躍的な進展でありました。これ以降も世界で最も小型(3/8インチ径R1635)のものから最も大型(20インチR1449, R3600)のものまで、またダイノードにマイクロチャンネルプレートを用いた超高速特性(時間分解能30ピコ秒)を持つマイクロチャンネルプレート光電子増倍管(R3809)、1テスラの高磁場下で 10^5 のゲインを有するメッシュ型ダイノードを用いた光電子増倍管(R5924)、メタルチャンネルダイノードを採用し、TO-8メタルパッケージに内蔵した超小型光電子増倍管(R7400)、位置検出が可能な位置検出型光電子増倍管、フラットパネル光電子増倍管など、多方面の応用にあわせた多種多様な光電子増倍管を作り続け、今日に至っています。

第1章 参考文献

- 1) 照明学会：ライティングハンドブック，オーム社（1987）
- 2) John W.T.WALSH:Photometry, DOVER Publications, Inc.New York
- 3) T.Hiruma: SAMPE Journal, 24, 35 (1988).
A.H.Sommer: Photoemissive Materials, Robert E.Krieger Publishing Company (1980).
- 4) H.Herts: Ann. Physik, 31, 983 (1887).
- 5) W.Hallwachs: Ann. Physik, 33, 301 (1888).
- 6) J.Elster and H.Geitel: Ann. Physik, 38, 497 (1889).
- 7) A.Einstein: Ann. Physik, 17, 132 (1905).
- 8) L.Koller: Phys. Rev., 36, 1639 (1930).
- 9) N.R.Campbell: Phil. Mag., 12, 173 (1931).
- 10) P.Gorlich: Z.Physik, 101, 335 (1936).
- 11) A.H.Sommer: U.S.Patent 2, 285, 062, Brit. Patent 532, 259.
- 12) A.H.Sommer: Rev. Sci. Instr., 26, 725 (1955).
- 13) A.H.Sommer: Appl. Phys. Letters, 3, 62 (1963).
- 14) A.N.Arsenova-Geil and A.A.Kask: Soviet Phys. - Solid State, 7, 952 (1965).
- 15) A.N.Arsenova-Geil and Wang Pao-Kun: Soviet Phys. - Solid State, 3, 2632 (1962).
- 16) D.J.Haneman: Phys. Chem. Solids, 11, 205 (1959).
- 17) G.W.Gobeli and F.G.Allen: Phys. Rev., 137, 245A (1965).
- 18) D.G.Fisher, R.E.Enstrom, J.S.Escher, H.F.Gossenberger: IEEE Trans. Elect. Devices, Vol ED-21, NO.10, 641 (1974).
- 19) C.A.Sanford and N.C.Macdonald: J. Vac. Sci. Technol. B8(6), NOV/DEC 1853 (1990).
- 20) D.G.Fisher and G.H.Olsen: J. Appl. Phys. 50(4), 2930 (1979).
- 21) J.L.Bradshaw, W.J.Choyke and R.P.Devaty: J. Appl. Phys. 67(3), 1, 1483 (1990).
- 22) H.Bruining: Physics and applications of secondary electron emission., McGraw-Hill Book Co., Inc. (1954).
- 23) H.E.Iams and B.Salzberg.: Proc. IRE, 23, 55 (1935).
- 24) V.K.Zworykin, G.A.Morton, and L.Malter.: Proc. IRE, 24, 351 (1936).
- 25) V.K.Zworykin and J.A.Rajchman: Proc. IRE, 27, 558 (1939).
- 26) G.A.Morton: RCA Rev., 10, 529 (1949).
- 27) G.A.Morton: IRE Trans. Nucl. Sci., 3, 122 (1956).
- 28) Heroux, L., and H.E.Hinteregger: Rev. Sci. Instr., 31, 280 (1960).
- 29) E.J.Sternlglass: Rev. Sci. Instr., 26, 1202 (1955).
- 30) J.R.Young: J.Appl.Phys., 28, 512 (1957).
- 31) H.Dormont, and P.Saget: J. Phys. Radium (Physique Appliquee), 20, 23A (1959).
- 32) G.W.Goodrich, and W.C.Wiley: Rev. Sci. Instr., 33, 761 (1962).

第2章

光電子増倍管の基本原理^{1)~5)}

光電子増倍管は一般的にガラス管に封じられた真空管で、入射窓、光電面、集束電極、電子増倍部、陽極より構成されています。その構造を図2-1に示します。

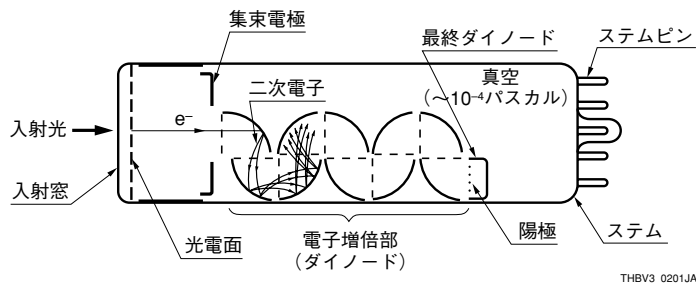


図2-1 光電子増倍管の構造図

光電子増倍管に入射した光は以下に示す過程を経て信号出力されます。

- (1) ガラス窓を透過する。
- (2) 光電面内の電子を励起し、真空中に光電子を放出(外部光電効果)する。
- (3) 光電子は集束(フォーカス)電極で第一ダイノード上に収束され、二次電子増倍された後、引き続き各ダイノードで二次電子放出を繰り返す。
- (4) 最終ダイノードより放出された二次電子群は陽極(アノード)より取り出される。

第2章ではこの光電子放出の原理、電子軌道、そして電子増倍部について記述します。

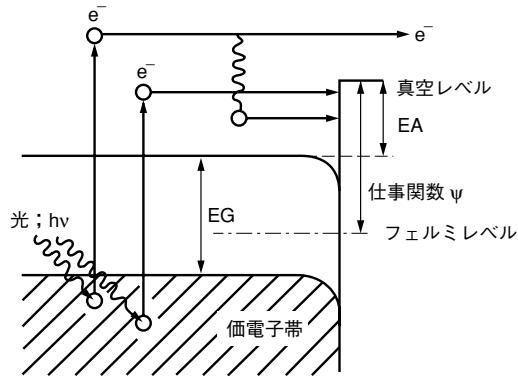
光電子増倍管の増倍部には大別して通常の多段ダイノードを持つものと、マイクロチャンネルプレートのように連続ダイノードを持つものがあり、両者の動作原理はかなり異なっています。本章は、光電子増倍管の基本原理について記述します。マイクロチャンネルプレート内蔵型光電子増倍管については、第10章で記述します。また、各種粒子線、イオン検出器については第12章で記述します。

2.1 光電子放出⁶⁾⁷⁾

光電変換は、真空中への光電子放出で代表される外部光電効果と、光電子を伝導帯へ励起する内部光電効果に大別されます。光電面は前者の機能を持ち、後者においては光導電および光起電力などに応用されます。

光電面は一種の半導体であり、図2-2に示す様なバンドモデルとして考えられます。(1)にアルカリ光電面、(2)にⅢ-V族化合物半導体光電面のバンドモデルを示します。

(1) アルカリ光電面



(2) Ⅲ-V族化合物半導体光電面

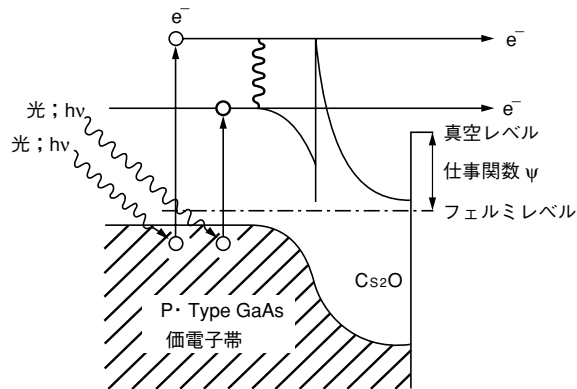


図2-2 光電面のバンドモデル

半導体には、電子が存在することができない禁止帯の幅である『エネルギーギャップ(EG)』と伝導帯と真空準位障壁(真空レベル)の間隔である『電子親和力(EA)』、そしてフェルミレベルと真空準位障壁(真空レベル)との間のエネルギー差である『仕事関係数(ψ)』が存在します。

光電面に光子が入射すると、価電子帯の電子が光子エネルギー($h\nu$)を吸収して励起され、表面に拡散して行きます。拡散した電子は真空準位障壁を越え、光電子として真空中に放出されます。これらはいずれも確率過程で示され、量子効率(出力電子数/入射光子数) $\eta(\nu)$ は次式で与えられます。

$$\eta(\nu) = (1-R) \frac{P\nu}{k} \cdot \left(\frac{1}{1+1/kL} \right) \cdot P_s$$

ここで

- R : 反射係数
- k : 光子の全吸収係数
- P ν : 光吸収のうち、真空レベル以上に励起される確率
- L : 励起電子の平均逸脱距離
- P s : 表面に達した電子の真空中に放出される確率
- ν : 光の振動数

この式において適当な物質を選び、R, k, P ν を決定した場合、量子効率を支配するものはL(励起電子の平均逸脱距離)とP s (電子の真空中に放出される確率)となります。Lは良好な結晶を使用することにより長くなり、P s は電子親和力(EA)に強く依存します。

図2-2(2)に、Ⅲ-V族化合物半導体光電面^{8)~10)}のバンドモデルを示します。このⅢ-V族化合物半導体光電面の表面層にCs₂Oなどを用い、正に帯電させると空乏層ができバンド構造が湾曲します。この湾曲により電子親和力を負にすることができます。このような状態をNEA(Negative Electron Affinity)と言います。NEAの効果は表面に達した電子の真空中に放出される確率(P s)を増大することであり、特に励起エネルギーの低い長波長光での量子効率を高くします。さらに空乏層の影響で励起電子の平均逸脱距離(L)も長くなります。

光電面は、構造により反射型と透過型に大別できます。反射型は通常金属板上に光電面を形成し、光電子は光の入射方向と反対方向に放出されます。透過型は、通常光学的に透明な平板上に薄膜状の光電面を形成し、光電子は光の入射方向と同一方向に放出されます。(図2-3, 2-4, 2-5参照)前者は主に、光電子増倍管の側管部より光を入射するサイドオン型に使われ、後者は円筒管の端面より入射するヘッドオン型に使われています。

また、光電面に使われるアルカリ金属の組合せや製法によって最高感度波長と、長波長側の限界が決まります。世界的には、光電感度¹¹⁾はJEDEC (Joint Electron Devices Engineering Council)に“S”ナンバーで登録されています。この“S”ナンバーは、光電面材料と窓材の組み合わせで現在のところS-1からS-25までが登録されています。しかし現在は一部のもの(S-1, S-11, S-20, S-25)を除いてあまり使われていません。各種類の分光感度特性は、第4章を参照してください。

2.2 電子軌道

光電子、二次電子をダイノードに効率よく集め、さらに電子の走行距離による時間的分散をできるだけ小さくするためには、電子軌道解析^{12)~16)}により最適な電極設計がなされる必要があります。

光電子増倍管内での電子の運動は、電界によって左右されますが、この電界は電極の形状、配置および印加電圧によって支配されています。これらは大容量で高速のコンピュータにより数値解析されるようになってきました。この方法は、解析しようとする領域をメッシュ状に分割し境界条件を与え、ある誤差に集束するまで反復計算することにより近似解を求める方法です。この方法によって求められた電位分布を基に運動方程式を解くことによって、電子の軌道が決まります。

光電子増倍管の設計に当たり、まず光電面と第一ダイノード間の集束部については、光電面の形状(平面形または曲面形)、集束電極の形状、配置、印加電圧を考慮して、光電面から放出された光電子を効率良く第一ダイノードに入射するように配置します。第一ダイノードの収集効率、放出された光電子数に対する第一ダイノードの有効領域に入射した電子数の比で表され、60%~90%の値が得られています。また、用途によっては、電子の走行時間分散を小さくするために、電極形状を最適化するのみならず、電界強度も通常より強く設計する場合があります。

次に、ダイノード部については、通常、曲面状の電極を多段繰り返して配置されます。これらダイノード間の収集効率を良くし、電子の走行時間分散を小さくするために、電子軌道解析により最適な形状と配置が決まります。またダイノードの配置は、後段からのイオンおよび光のフィードバックがないように配置する考慮も必要です。

さらに、コンピュータシミュレーションにより、光電子増倍管の特性算出を行うことも行われています。光電子、二次電子の初期条件の設定にモンテカルロ法を用い、収集効率、ユニフォミティ、電子走行時間特性などの諸特性を算出し、光電子増倍管としての総合的な評価を行うことができます。図2-3、2-4、2-5に、サーキュラケージ(Circular Cage)型、ボックスライン(Box-Line)型およびラインフォーカス(Linear Focus)型光電子増倍管の電子軌道モデル図を示します。

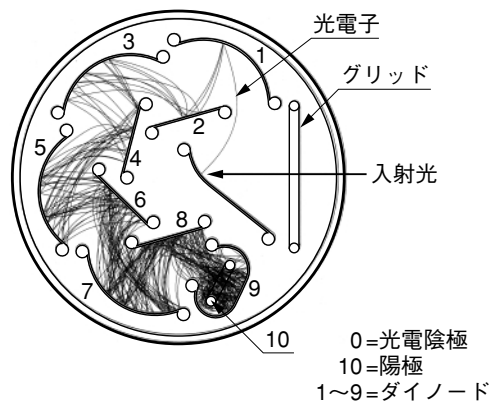
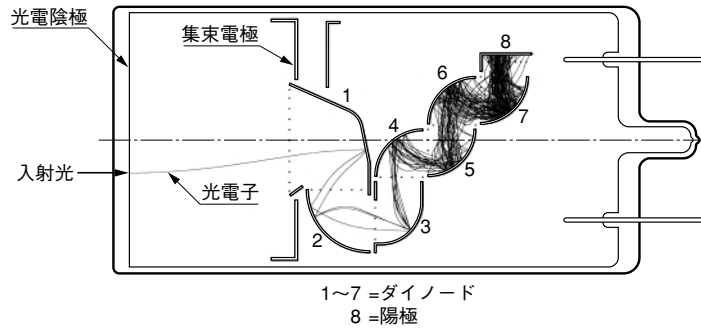


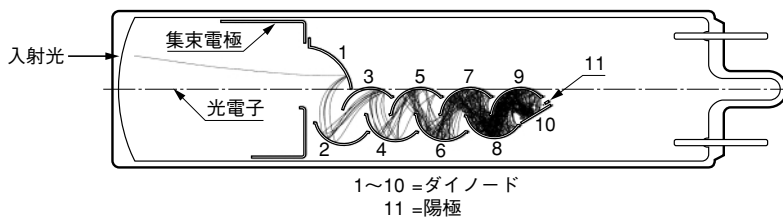
図2-3 サーキュラケージ型

THBV3_0203JA



THBV3_0204JA

図 2-4 ボックスライン型



THBV3_0205JA

図 2-5 ラインフォーカス型

2.3 電子増倍部(ダイノード部)

前記のように光電子増倍管の電位分布と電極構造は最適に設計されており、光電子は、1段から最大19段のダイノードで多段増倍され、10倍から 10^8 倍の電流増倍を得て陽極(アノード)に送られます。

二次電子放出材料^{17)~21)}には、アルカリアンチモン、酸化ベリリウム(BeO)、酸化マグネシウム(MgO)、ガリウムリン(GaP)やガリウムヒ素リン(GaAsP)などが使われていますが、基板はニッケル金属、ステンレス金属やベリリウム銅合金などが用いられます。図2-6に、ダイノードの二次電子増倍機能のモデルを示します。

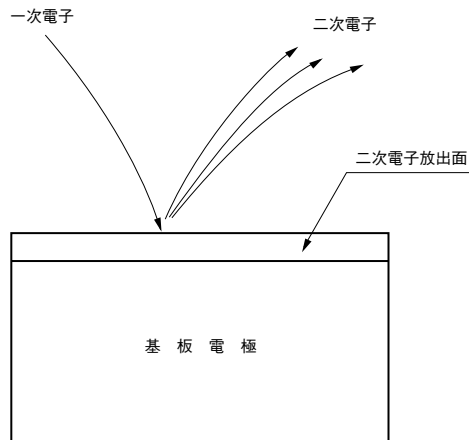
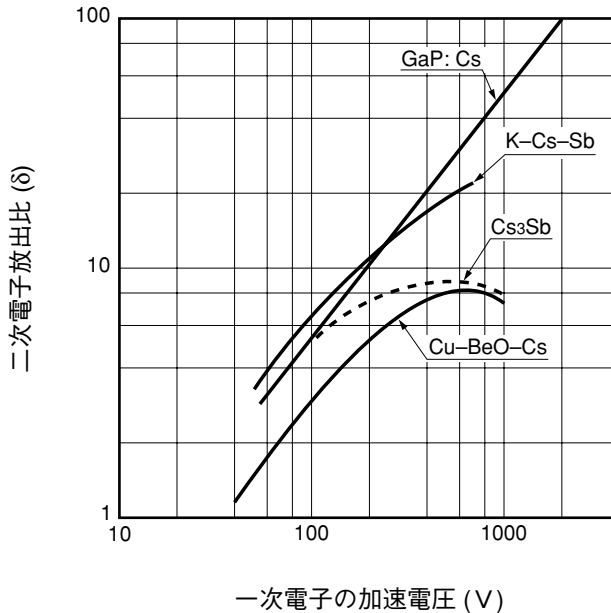


図 2-6 ダイノードの二次電子放出モデル

THBV3_0206JA



THBV3_0207JA

図2-7 二次電子放出比

初速エネルギー E_p を持つ一次電子1個により、ダイノードから δ 個の二次電子が放出されます。この δ を二次電子放出比といいます。図2-7に各種ダイノード材料の加速電圧と二次電子放出比 δ の関係を示します。

ダイノード段数を n 、各ダイノードの二次電子放出比を δ と仮定すれば、ゲイン μ は δ の n 乗として表せます。このゲインの詳細については第4章4.2.2に記述します。

また、ダイノード構造の種類やダイノードの段数などによってゲイン、時間応答特性、直線性（リニアリティ）などが異なり、使用目的に応じて、選択の必要があります。これらの特長は第4章4.2.1に記述します。

2.4 陽極（アノード）

陽極（アノード）とは、多段のダイノードで増幅された二次電子を収集し、外部へ電流として取り出す電極です。

陽極の構造は、前述の電子軌道などにより最適な形状に設計されています。陽極は一般的には線状や平板状あるいは網状電極などで作られています。設計上特に重要なことは、空間電荷効果を防ぐために最終段ダイノードと陽極間に一定以上の電位差を設けてなるべく大きな電流出力を得ることです。

第2章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株): 光電子増倍管と関連製品(2003年11月改訂).
- 2) 浜松ホトニクス(株): 光電子増倍管(フォトマル)の特性と使用法, No. 79-57-03(1982).
- 3) S.K. POULTNEY: *Advances in Electronics and Electron Physics* 31, 39(1972).
- 4) D.H. Seib and L.W. Ankerman: *Advances in Electronics and Electron Physics*, 34, 95(1973).
- 5) J.P. Boutot, et al.: *Advances in Electronics and Electron Physics* 60, 223(1983).
- 6) T.Hiruma: *SAMPE Journal*, 24, 6, 35-40(1988).
- 7) 林 達郎: *分光研究*. 22, 233(1973).
- 8) H. Sonnenberg: *Appl. Phys. Lett.*, 16, 245(1970).
- 9) W.E.Spicer: et al., *Pub.Astrom. Soc. Pacific*, 84, 110(1972).
- 10) 萩野 実, 他: *テレビ誌*. 32, 670(1978).
- 11) 本間 厚: *ぶんせき*. 1, 52(1982).
- 12) K.J.VAN.OOSTRUM: *PHILIPS TECHNICAL REVIEW*, 42, 3(1985).
- 13) K.OBA & ITO: *ADVANCES IN ELECTRONICS AND ELECTRON PHYSICS*. 64B.343.
- 14) YAKOBSON: A.M., *RADIOTEKH & ELECTRON*, 11, 1813(1966).
- 15) BRUINING, H: IN, *PHISICS AND APPLICATIONS OF SECONDERY ELECTRON EMISSION* (1954).
- 16) J.Rodeny and M.Vaughan: *IEEE Transaction on Electron Devices*, 36, 9(1989).
- 17) B.Gross and R.Hessel: *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, 26, 1(1991).
- 18) H.R.Krall: et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-17, 71(1970).
- 19) J.S.Allen: *Rev. Sci. Instr.*, 18(1947).
- 20) A.M.Tyutikov: *Radio Engineering And Electronic Physics*, 84, 725(1963).
- 21) A.H.Sommer: *J.Appl. Phys.*, 29, 598(1958).

メ 毛

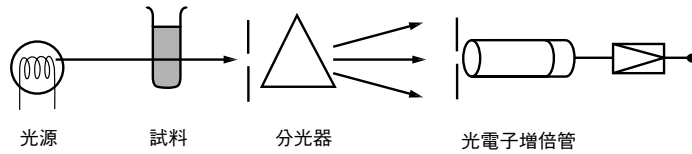
第3章

光電子増倍管の基本的な使い方

本章では光電子増倍管(Photomultiplier Tube … 以後 PMT と略す場合もあります。)を初めて使用する方を対象として、光電子増倍管の選択方法、動作方法、信号の処理方法についての手引기가書かれています。詳細は次章以後を参照してください。

3.1 光電子増倍管の使用に際して

3.1.1 選択方法



THBV3_0301JA

図 3-1 吸光分光光度計への応用

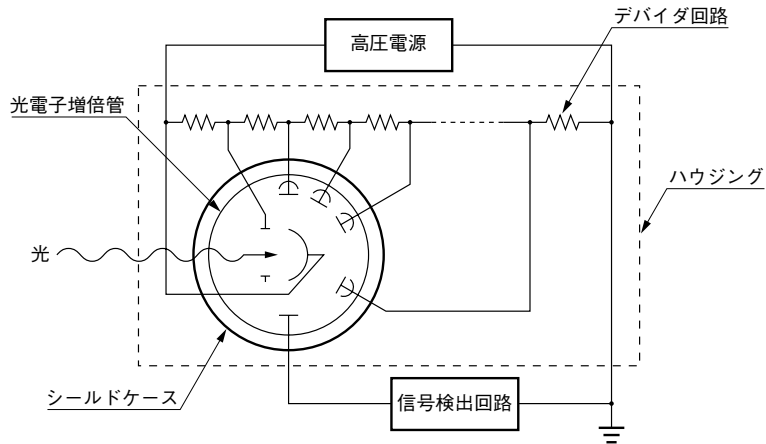
図3-1に示す吸光分光光度計に光電子増倍管を用いる場合を例にとって、どのように光電子増倍管を選択したらよいかの目安を以下の表に示します。

入射する光の状態	選択基準及び動作条件	
	<光電子増倍管>	<回路条件>
光の波長	窓材 光電面の分光特性	
光の強度	ダイノードの段数、種類 ダイノードへ加える印加電圧	信号処理方法 (アナログ法、フotonカウンティング法)
光のビームサイズ	有効径(サイズ) サイドオン型かヘッドオン型か	
光現象の速さ	応答特性	接続回路の周波数帯域

あらかじめ測定すべき入射光の状態を知り、それに適合した光電子増倍管を選び、最適の動作条件を用いることが重要となります。上の表に示すように、入射する光の波長、強度、ビームサイズ、さらに光現象の速さに応じて光電子増倍管の機種を選定、動作条件、回路の構成を考える必要があります。これらの具体的な内容については第4章以後に詳しく述べられます。

3.1.2 周辺機器

光電子増倍管を動作するには図3-2に示すように、高圧電源(通常1 kV～2 kV)、各ダイノードに電圧を配分するためのデバイダ回路、外来光を遮断するハウジング、信号読出回路、そして場合によっては磁界、電界などを遮蔽するシールドケースが必要となります。

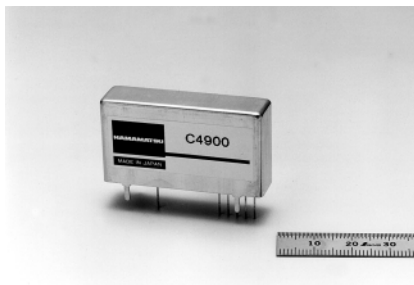


THBV3_0302JA

図3-2 動作方法

高圧電源

通常1～2 kVの負もしくは正の高圧電源が必要となります。具体的には図3-3に示すようなモジュール型、図3-4に示すようなベンチトップ型のものが入手可能です。



C4900
高圧出力：-1250 V
電流出力：600 μ A



C3830
高圧出力：-1500 V
電流出力：1 mA

図3-3 モジュール型高圧電源

図3-4 ベンチトップ型高圧電源

光電子増倍管はゲインが非常に高く、使用する高压電源の安定性によって、ゲインの安定性に影響を与えます。おおよそ、光電子増倍管の出力を1%に安定化させる場合、高压電源の安定度は0.1%以下となるものをお選びください。

デバイダ回路

各ダイノードにそれぞれ異なった電圧を分配する必要があり、通常は抵抗によるデバイダ回路によって高電圧を分割して用います。光電子増倍管の使用の簡便性を考え、図3-5から図3-8に示すような、デバイダ回路内蔵ソケットが用意されています。

(1) D型..... Divider(デバイダ)内蔵型

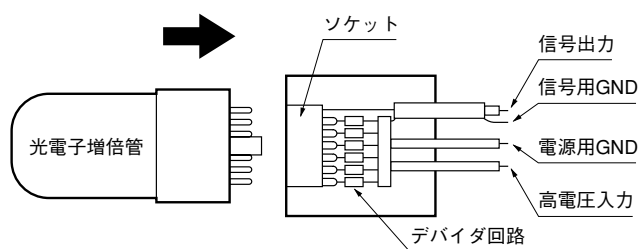


図3-5 D型ソケットアセンブリ

THBV3_0305JA

(2) DA型..... Divider and Amplifier内蔵型

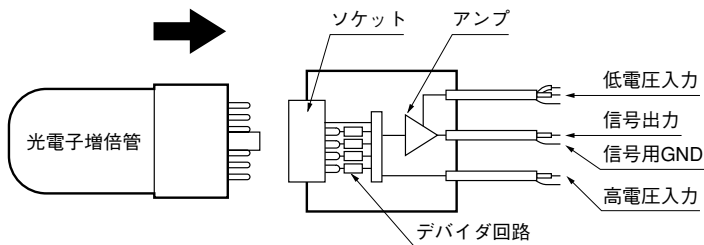
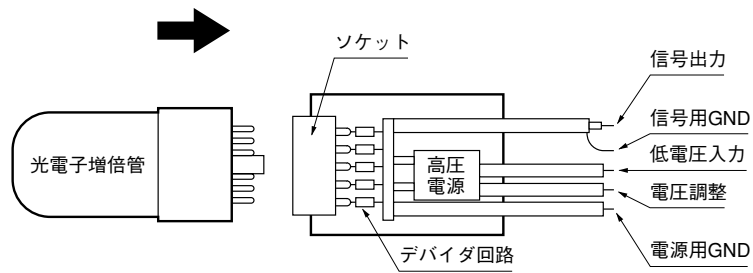


図3-6 DA型ソケットアセンブリ

THBV3_0306JA

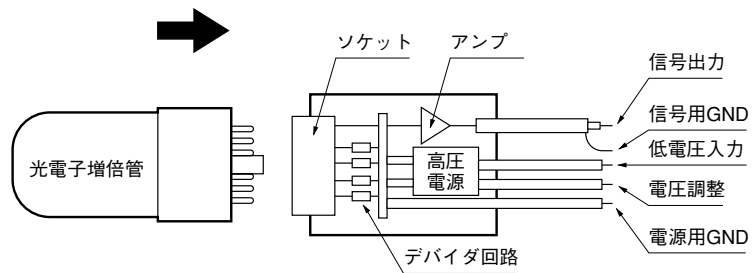
(3) DP型..... Divider and Power Supply 内蔵型



THBV3_0307.JA

図3-7 DP型ソケットアッセンブリ

(4) DAP型..... Divider, Amplifier and Power Supply 内蔵型



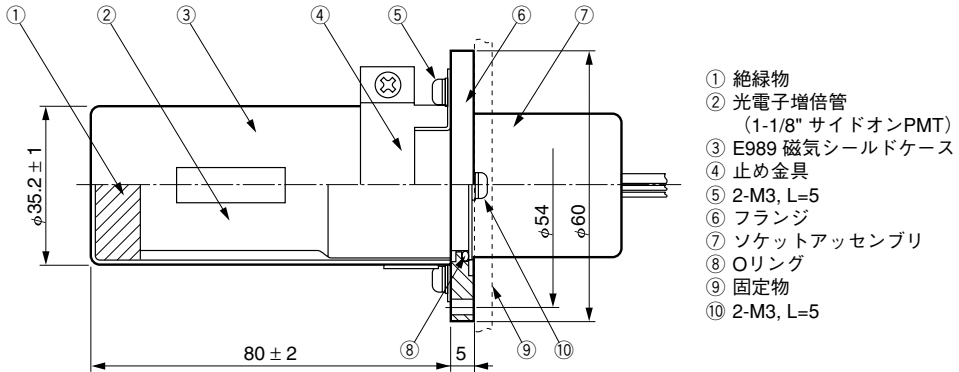
THBV3_0308.JA

図3-8 DAP型ソケットアッセンブリ

ハウジング

光電子増倍管は非常に高感度であることから、測定光以外の外来光を検出してしまい、S/Nを悪化させる要因となるため外来光を遮断するためのハウジングが必要になります。

また、特性は外部から加わる電磁界、温度、湿度によって変化する場合があります。そのため、これらの外的要因から遮蔽するため、ハウジングに磁気シールド、電界シールドケースなどを併用する必要があります。さらに光電子増倍管を安定に動作させるために、温度を一定にする、もしくは低温で用いるように冷却器(クーラー)を用いることがあります。



[固定物へのフランジ固定位置]

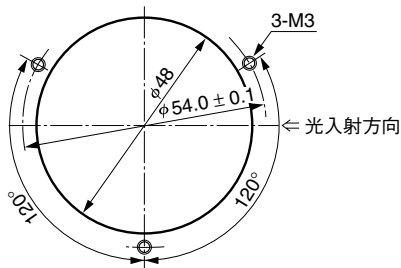
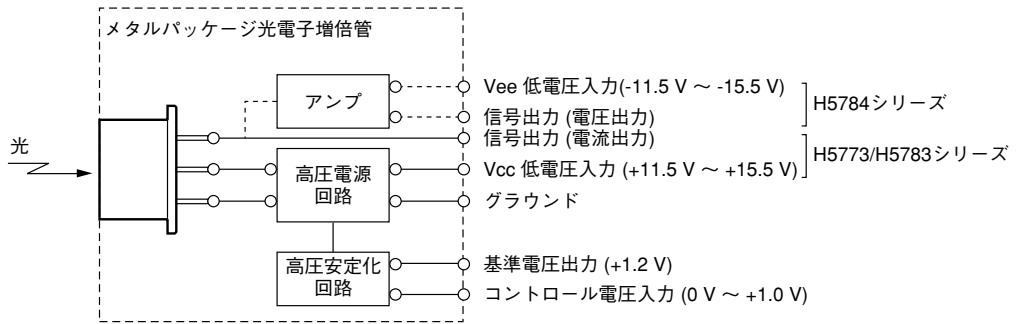


図 3-9 ハウジング (磁気シールド内蔵)

電源一体型モジュール

光電子増倍管をできる限り簡便にご使用いただくため、光電子増倍管及びデバイダ回路、高圧電源、制御回路部をすべて一体化した光電子増倍管モジュールも製品化されています。(図3-10)

光電子増倍管モジュールは、15 Vを入力するのみで扱いやすく、装置の小型化や簡便さにメリットがあります。



THBV3_0310JA



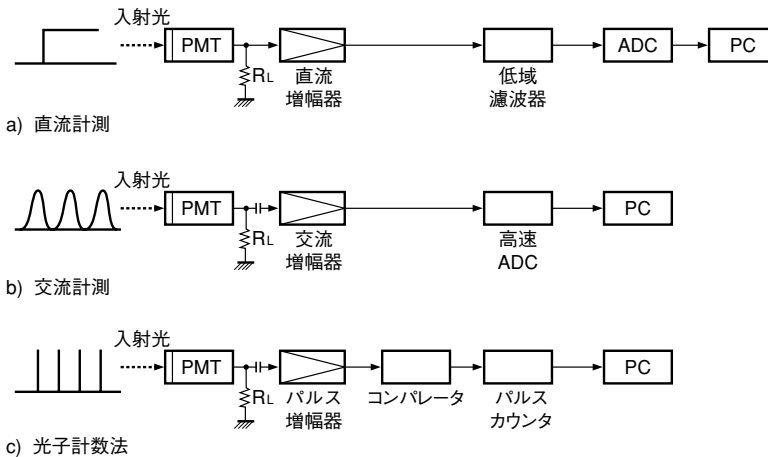
図 3-10 電源一体型モジュール構成図

その他、ゲート回路、光子計数回路、変調回路などを組み込んだ光電子増倍管モジュールもあります。詳しくは第8章をご覧ください。

3.1.3 信号読出（接続回路）

光電子増倍管からの出力は電氣的には定電流源として取り扱うことができますが、入射光の強度、周波数特性に応じて、最適な接続回路を用いることが望まれます。光電子増倍管に入射する光の強度に応じて、図3-11のような光計測回路が一般的に用いられています。光の比較的強い領域とやや弱い領域では、直流方式または交流方式(アナログ方式)が用いられていますが、微弱光領域では、光の最小単位である光子を1個ずつ数える光子計数法(デジタル方式)が効果的に用いられています。

a)に示す直流計測は光電子増倍管からの直流成分を、増幅器、低域濾波器を通して検出する方法です。比較的光量の強い領域で用いられ、従来から広く採用されています。b)に示す交流計測は、光電子増倍管からの出力をコンデンサを通して交流成分だけをとりだし、AD変換器によってデジタル信号を作り出すことができます。特に変調光や光強度のやや弱い領域で、出力信号中の交流成分が直流成分より支配的な場合に用いられます。c)に示す光子計数方式は、光電子増倍管からの出力パルスを増幅、波高弁別後ある波高以上のパルスを計数する方法です。この方式は入射する光子に対応した光電子増倍管の出力パルスとして観測できるため、極微弱光領域ではもっとも効果的な手法です。その他の計測方法に、光学チョッパを併用したロックイン検出法などがあり、低ノイズで微弱光信号を検出するのに使用されています。



THBV3_0311JA

図3-11 光計測方式

光電子増倍管の計測方式、接続回路は、入射する光の強度、変化する時間的速さに応じて最適化することが必要です。特に入射光強度が微弱な場合は、信号レベルが小さいため、後続の回路系のノイズの影響を極力小さくする配慮が必要です。さらに極微弱光の検出には、直流方式に代わってロックイン検出方式、光子計数法などが効果的です。また入射光が時間的に速く変化する場合の検出にあたっては、光電子増倍管のみならず接続回路の周波数特性の広帯域化、それらの接続の高周波域での整合性などの配慮が必要になります。

これらに関する詳細は本書の第5章、第6章を参照してください。

第4章

光電子増倍管の特性

本章では、光電子増倍管の基本特性および諸特性について詳しく解説します。4.1では、代表的な光電面の分光感度特性を述べるとともに、光電感度の定義、測定方法を記述しています。4.2では、ダイノードの種類、構造とその特性例を述べます。4.3では、光電子増倍管の時間特性、安定性、感度均一性、SN比などの代表的な諸特性について、その定義、測定法、具体的な製品の代表例について示すとともに、使用にあたっての留意点についても解説します。

4.1 光電面の基本特性

ここでは現在までに実用化されている光電面の種類および入射窓材の種類を紹介し、光電感度の評価方法である量子効率、放射感度、ルーメン感度などについて説明します。

4.1.1 光電面の種類

光電面^{1)~15)}の多くは仕事関数が低いアルカリ金属を主成分とする化合物半導体でできています。現在までに実用となっている光電面の種類は10種類程あり、しかもそれぞれに透過型と反射型があり特性が異なっています。1940年前半にJEDEC (Joint Electron Devices Engineering Council)が“Sナンバー”と呼ばれるシステムを導入し、光電面と入射ガラス窓の組み合わせによる分光感度を区別しています。現在は、光電面の種類が多くまた、材料名で表されることが多くなり、S-1, S-20など一部を除いてあまり使われていません。以下に光電面材料の主なものの特性を示します。

(1) Cs-I

太陽光に感度がないため「ソーラブラインド」と呼ばれています。200 nm以上の波長に対して感度が急激に低下しており、真空紫外域専用です。入射窓にはMgF₂か合成石英が使われ、波長範囲は115 nm～200 nmです。Cs-I光電面自体は115 nmより短い波長でも高い感度を有していますが、入射窓に使用されるMgF₂が115 nm以下の光を通さないため、115 nm以下の光を測定するためには入射窓をもたない電子増倍管の第一ダイノードにCs-Iを蒸着した開放型(真空中で使用)のものが使われます。

(2) Cs-Te

300 nm以上の波長に対しては感度が急激に低下しており、Cs-I同様、「ソーラブラインド」と呼ばれています。この種の光電面は透過型と反射型では波長範囲は変わりませんが、反射型は透過型に比べて感度が高くなっています。一般に入射窓には合成石英かMgF₂が使われています。

(3) Sb-Cs

紫外線から可視光に感度をもっています。光電面の電気抵抗が後述するバイアルカリより低いため、測定光が強く、陰極に大電流が流れるときや、冷却のため光電面抵抗が大きくなりダイナミックレンジが問題となるなどには有利です。主に反射型光電面に使用されています。

(4) バイアルカリ(Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs)

2種類のアルカリ金属を使うため、「バイアルカリ」と呼ばれます。透過型はSb-Csによく似た分光感度特性を持ち、Sb-Csより高感度、低暗電流です。またNaI(Tl)シンチレータの発光波長とよく一致しているため、シンチレーションカウンティングによる放射線計測に多く使われています。反射型は同じ材料でも製法が異なり、長波長側の感度が増強され、紫外域から700 nm程度の波長範囲を持ったものもあります。

(5) 高温用低暗電流バイアルカリ(Sb-Na-K)

前述のバイアルカリと同じく2種類のアルカリ金属が使われています。分光特性は前述のバイアルカリ光電面とほぼ等しいのですが、感度はやや低くなっています。しかし、他の一般的な光電面の保証温度が50℃に対し、175℃の高温に耐えることができるため、石油探査など高温下での用途に多く使用されています。また、常温では非常に暗電流が少ないため微弱光の検出に有利であり、光子計数法や低ノイズ性を必要とする応用などにも使われています。

(6) マルチアルカリ(Sb-Na-K-Cs)

3種類以上のアルカリ金属を使用した光電面です。紫外から850 nmあたりの広い波長域をもつので分光光度計などに広く使用されています。また900 nmあたりまで伸びた赤外延長型もあり、窒素酸化物用の気相化学発光検出器などに多く使われています。

(7) Ag-O-Cs

透過型は300 nm～1200 nmまでの可視光から近赤外線に感度がありますが、反射型は300 nm～1100 nmと波長範囲がやや狭くなっています。他の光電面に比べると可視域の感度は低いのですが近赤外域に感度をもっているため、一般に透過型、反射型とも近赤外専用として使われています。

(8) GaAsP(Cs)

ガリウムヒ素リンの結晶をセシウムで活性化したもので、透過型光電面として実用化されており、紫外域に感度を持ちませんが、可視域で非常に高い量子効率を得られます。他のアルカリ金属を主体とする光電面と比べ、強い入射光に対し感度劣化を比較的起こしやすいので注意が必要です。

(9) GaAs(Cs)

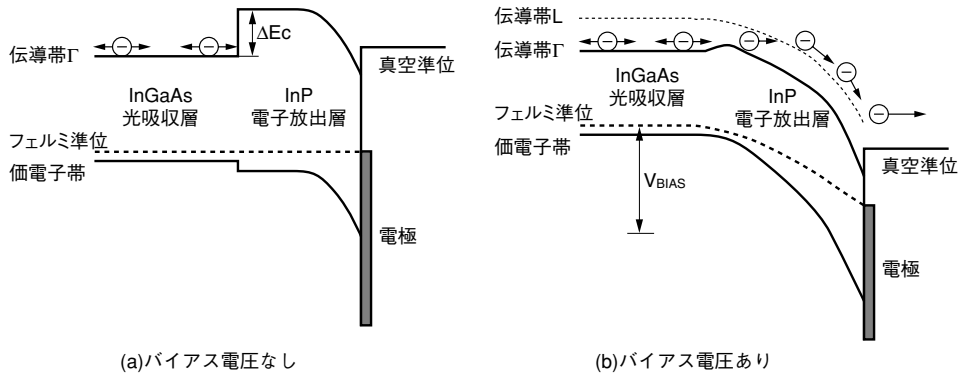
ガリウムヒ素の結晶をセシウムで活性化したもので、反射型および透過型光電面として実用化されています。反射型は紫外から900 nm付近まで感度があり、300 nm～850 nmにわたって高感度でほぼ平坦な分光感度特性を示します。透過型では、短波長は吸収されるため、波長範囲は狭くなります。これら光電面は他のアルカリ金属を主体とする光電面と比べ強い入射光に対し比較的感度劣化を起こしやすいので注意が必要です。

(10) InGaAs(Cs)

GaAs(Cs)より更に赤外側まで感度が伸びています。また900 nm～1000 nm近辺での量子効率がAg-O-Csに比べ、非常に優れています。

(11) InP/InGaAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs)

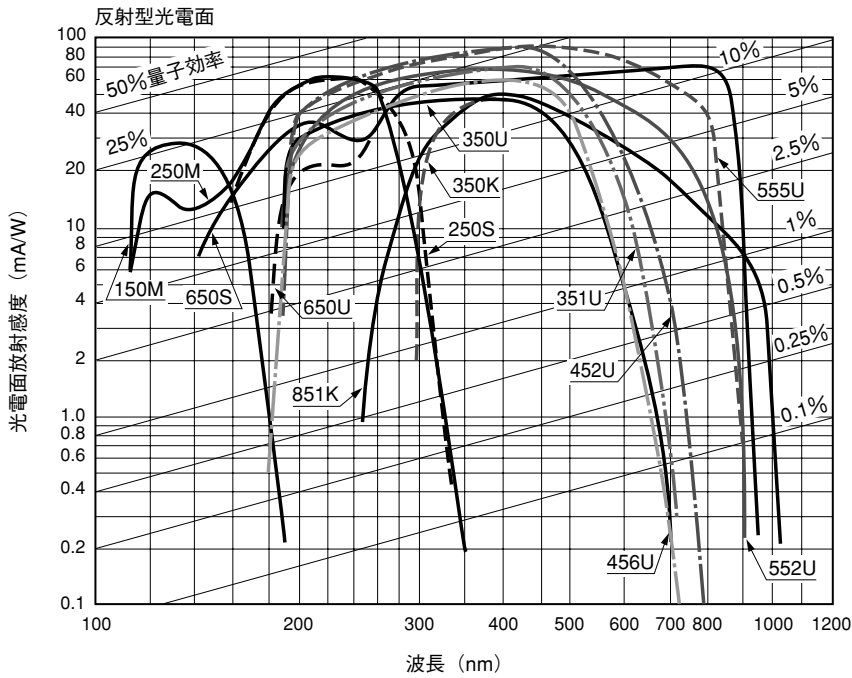
InP基板にInP/InGaAsPまたはInP/InGaAs層を成長させ、P/N接合を用いた電界補助型光電面(Field-assisted photocathode)を形成し、独自の半導体微細加工技術により実用化したものです¹⁶⁾¹⁷⁾。光電面にバイアス電圧をかけ、伝導体障壁を下げることで、従来不可能だった1.4 μmまたは1.7 μmまでの広い範囲で高感度なものが製品化されています。ただ、常温では暗電流が多いため、-60℃～-80℃程度に冷却する必要があります。バンドモデルを図4-1に示します。



THBV3_0401JA

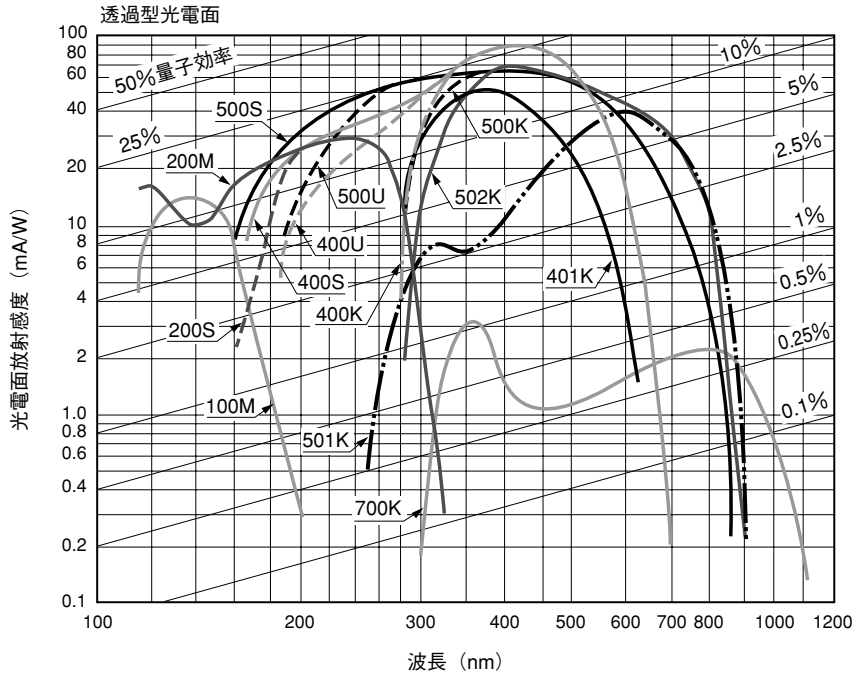
図 4-1 バンドモデル

主な光電面の特性を図4-2、図4-3と表4-1に示します。表4-1には該当するJEDEC Sナンバーも並記されています。図中における光電面放射感度の定義は、4.1.3分光感度特性で説明します。各々の管球ごとに特性のばらつきがあるため実際のデータとは異なる場合もあります。



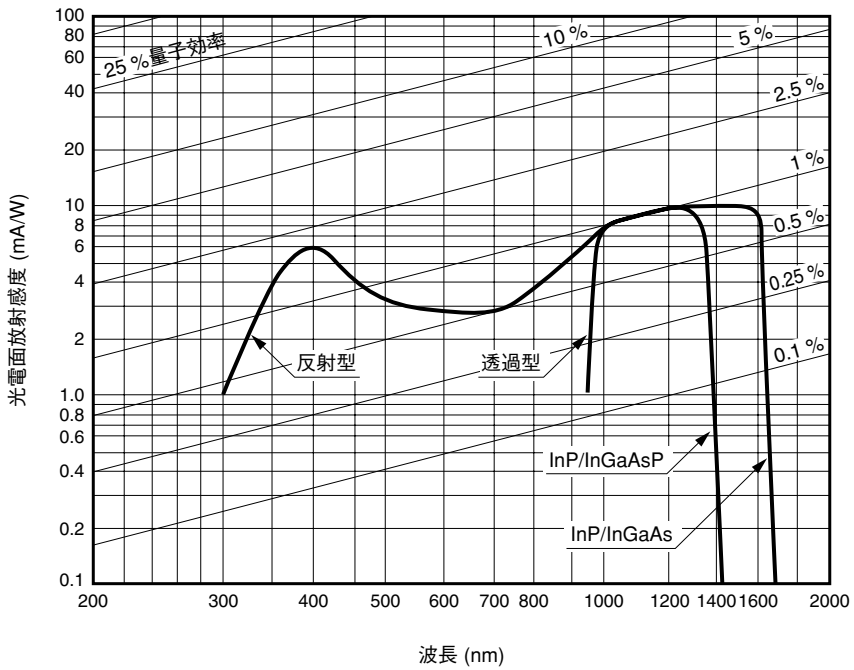
THBV3_0402JAa

図 4-2(a) 反射型各種光電面分光感度特性



THBV3_0402JAb

図 4-2(b) 透過型各種光電面分光感度特性



THBV3_0403JA

図 4-3 InP/InGaAs, InP/InGaAsP の分光感度特性

反射型光電面

分光カーブ (Sナンバー)	光電面	入射窓	ルーメン 感度 (Typ.) ($\mu\text{A/lm}$)	分光感度特性				
				波長範囲 (nm)	ピーク波長			
					放射感度		量子効率	
				(mA/W)	(nm)	(%)	(nm)	
150M	Cs-I	MgF ₂	—	115~200	25.5	135	26	125
250S	Cs-Te	石英	—	160~320	62	240	37	210
250M	Cs-Te	MgF ₂	—	115~320	63	220	35	220
350K(S-4)	Sb-Cs	硼硅酸	40	300~650	48	400	15	350
350U(S-5)	Sb-Cs	UV	40	185~650	48	340	20	280
351U(Extd S-5)	Sb-Cs	UV	70	185~750	70	410	25	280
452U	バイアルカリ	UV	120	185~750	90	420	30	260
456U	低暗電流バイアルカリ	UV	60	185~680	60	400	19	300
552U	マルチアルカリ	UV	200	185~900	68	400	26	260
555U	マルチアルカリ	UV	525	185~900	90	450	30	260
650U	GaAs(Cs)	UV	550	185~930	62	300~800	23	300
650S	GaAs(Cs)	石英	550	160~930	62	300~800	23	300
851K	InGaAs(Cs)	硼硅酸	150	300~1040	50	400	16	370
—	InP/InGaAsP(Cs)	硼硅酸	—	300~1400	10	1250	1.0	1000~1200
—	InP/InGaAs(Cs)	硼硅酸	—	300~1700	10	1550	1.0	1000~1200

表 4-1 分光感度特性一覧(1)

透過型光電面

分光カーブ (Sナンバー)	光電面	入射窓	ルーメン 感度 (Typ.) ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	分光感度特性				
				波長範囲 (nm)	ピーク波長			
					放射感度		量子効率	
					(mA/W)	(nm)	(%)	(nm)
100M	Cs-I	MgF ₂	—	115~200	14	140	13	130
200S	Cs-Te	石英	—	160~320	29	240	14	210
200M	Cs-Te	MgF ₂	—	115~320	29	240	14	200
400K	バイアルカリ	硼硅酸	95	300~650	88	420	27	390
400U	バイアルカリ	UV	95	185~650	88	420	27	390
400S	バイアルカリ	石英	95	160~650	88	420	27	390
401K	高温用バイアルカリ	硼硅酸	40	300~650	51	375	17	375
500K(S-20)	マルチアルカリ	硼硅酸	150	300~850	64	420	20	375
500U	マルチアルカリ	UV	150	185~850	64	420	25	280
500S	マルチアルカリ	石英	150	160~850	64	420	25	280
501K(S-25)	マルチアルカリ	硼硅酸	200	300~900	40	600	8	580
502K	マルチアルカリ	硼硅酸(プリズム)	230	300~900	69	420	20	390
700K(S-1)	Ag-O-Cs	硼硅酸	20	400~1200	2.2	800	0.36	740
—	InP/InGaAsP(Cs)	—	—	950~1400	10	1250	1.0	1000~1200
—	InP/InGaAs(Cs)	—	—	950~1700	10	1550	1.0	1000~1200

表 4-1 分光感度特性一覽(2)

4.1.2 入射窓材の種類

前述した光電面は一般に紫外線に対しても高い感度を持っていますが、入射窓材によっては紫外線を吸収するため、短波長限界は使用する窓材の紫外線吸収特性により決められてしまいます^{18)~22)}。光電子増倍管に使用される窓材としては以下のものがあります。

(1) MgF₂ 結晶

ハロゲン化アルカリの結晶は、紫外線透過率の優れた窓材としてよく知られていますが、潮解性があるのが欠点です。その中でフッ化マグネシウム(MgF₂)結晶はほとんど潮解性がなく実用的な窓材で、115 nm までの真空紫外線を透過します。

(2) サファイア

Al₂O₃ 結晶でできています。紫外領域の透過率はUV透過ガラスと合成石英ガラスの中間位です。ただし、短波長のカットオフは150 nm 付近で合成石英より延びています。

(3) 合成石英

合成石英は160 nm までの紫外線を透過し、熔融石英に比べて紫外域での吸収が少なくなっています。また、石英は熱膨張率がステムピンに使用されているコバル合金と大きく異なるため、ステム部の硼硅酸ガラスとの間に少しずつ熱膨張率の異なるガラスを数種類入れる、いわゆる「段つなぎ」が用いられています(図4-4)。段つなぎ部分は機械的に弱いので取り扱いに注意が必要です。石英はヘリウムガスを透過しやすく、ヘリウムガス雰囲気では使用できません。

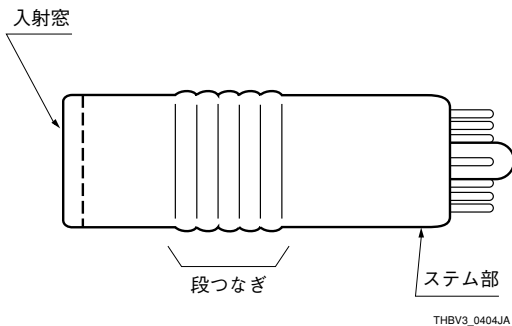


図4-4 段つなぎ

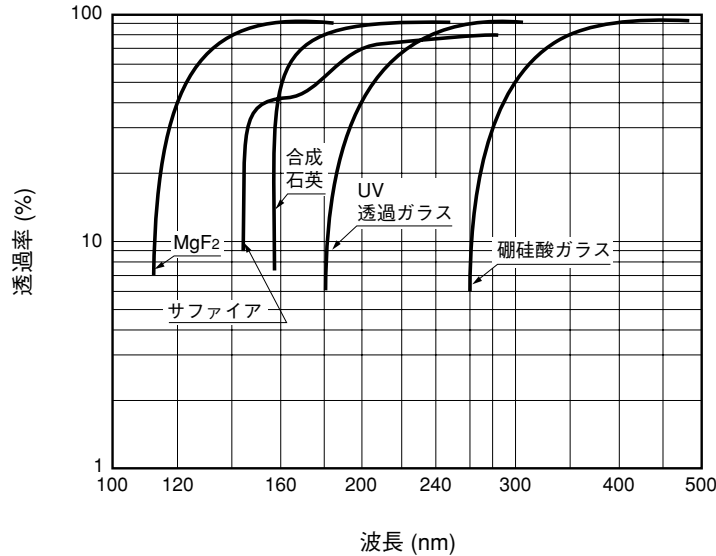
(4) UVガラス(UV透過ガラス)

紫外線(UV)をよく通すことからこの名前があります。透過する紫外線の波長は、185 nm まで延びています。

(5) 硼硅酸ガラス

もっともよく使用される材料で、光電子増倍管のステムの引出し線に使われるコバル合金と熱膨張率が近いので「コバルガラス」とも呼ばれています。300 nm より波長が短い紫外線は透過しないので、これ以下の紫外線の検出には適しません。また、バイアルカリ光電面のヘッドオン型光電子増倍管にはノイズの原因となるカリウム(K⁴⁰)の含有量の少ないKフリーガラスとよばれる硼硅酸ガラスを使用したものがあります。Kフリーガラスは、主にシンチレーション計測用の光電子増倍管として使用され、低バックグラウンドシンチレーション計測に使用されます。K⁴⁰ によるノイズについては4.3.6 暗電流の項で述べます。

図4-5に各入射窓材の分光透過率特性を示します。



THBV3_0405JA

図 4-5 入射窓材の透過率

4.1.3 分光感度特性

光電子増倍管の光電面は入射光子を光電子に変換します。その変換効率(陰極放射感度)は入射光の波長によって異なります。陰極放射感度と入射光の波長の関係を分光感度特性と言います。一般に分光感度特性は、放射感度と量子効率の両方で表されます。

(1) 放射感度

放射感度はある波長における光によって生じた光電流を入射光の放射束ワット (W) で割った値で示されます。放射感度の単位はアンペア/ワット (A/W) で表されます。また分光放射感度の最大値を 100 とし、パーセント (%) 表示したものを相対分光感度とよびます。

(2) 量子効率

光電面から放出される光電子数を入射する光子数で割った値で示します。量子効率は一般に η の記号が使われ、パーセントで表されます。入射光子は光電面物質の価電子帯の電子にエネルギーを与えますが、エネルギーを得た電子が必ずしも光電子として飛び出すわけではなくある確率過程が存在します。波長の短い光子は長いものに比べ光子あたりのエネルギーが高く光電子放出の確率が高くなるため、量子効率の最大値は短波長側にあります。

(3) 分光感度特性の測定法と算出法

放射感度、量子効率の測定法には精密に値付けされた標準光電管、あるいは半導体素子を二次標準として用います。具体的には、まずこの標準光電管あるいは半導体素子で測定したい波長の入射光の放射束 L_p を測定します。次に放射感度を求めたい光電子増倍管を固定し、光電流 I_K を測定します。放射感度 S_k は次の式より求めることができます。

$$S_k = \frac{I_K}{L_p} \text{ (A/W)} \dots\dots\dots \text{ (式 4-1)}$$

また量子効率 η はその波長の放射感度 S_k (A/W) から次式を用いて引き出すことができます。

$$\eta(\%) = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot e} \cdot S_k = \frac{1240}{\lambda} \cdot S_k \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-2)}$$

$$h: 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c: 3.00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$e: 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

ここで h はプランク定数、 λ は入射光波長(nm)、 c は真空中の光の速度、 e は電子の電荷で量子効率 η はパーセントで表されます。

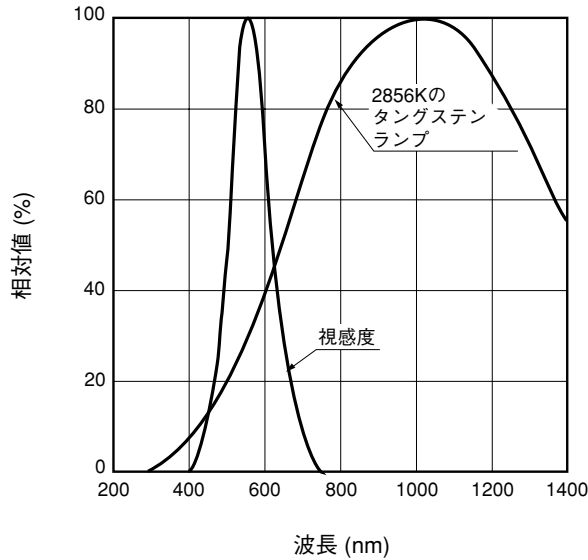
(4) 波長範囲(短波長限界, 長波長限界)

分光感度特性の短波長側でカットオフされる波長を短波長限界、長波長側でカットオフされる波長を長波長限界といいます。短波長限界は入射窓の材質によって決まり、長波長限界は光電面の種類によって決まります。この短波長限界から長波長限界までの波長を波長範囲といいます。

本資料には、光電子増倍管の波長範囲が記されています。浜松ホトニクスでは、短波長限界は窓材の吸収が急激に増大する波長を定義しています。そして長波長限界では次のように定義しています。バイアルカリ系、Ag-O-Cs系の光電面は陰極感度が最大放射感度の1%まで下がる波長、マルチアルカリ系の光電面は最大放射感度の0.1%まで下がる波長です。使用上の限界波長は入射光量、光電面感度、暗電流、測定系のSN比などを総合して決められるものです。

4.1.4 ルーメン感度

分光感度特性の測定は高額な装置が必要であるうえ、測定に時間がかかるため、一般の光電子増倍管の感度の評価はルーメン感度で行われます。1カンデラ(cd)の点光源より、1m離れた所の面の明るさを1ルクス(lux)といい、この照度1ルクスである面上の面積1m²を通過する光束を1ルーメン(lm)といいます。測定には分布温度2856Kの標準タングステンランプが用いられ、この光源の1ルーメンに対する出力電流をルーメン感度といいます。図4-6に視感度と分布温度2856Kのタングステンランプの相対発光分布曲線を示します。



THBV3_0406JA

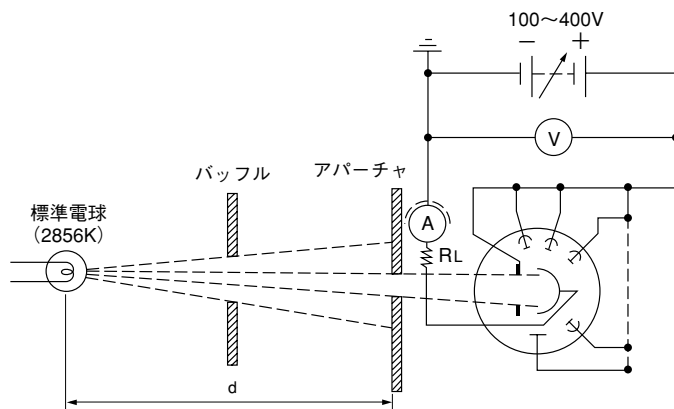
図 4-6 視感度と分布温度 2856K のタングステンランプの発光分布

同一品種内での感度の比較にはルーメン感度を使うと便利です。しかしルーメン (lm) は標準視感度に対する光束なので、これらの値は視感度域(350 nm～750 nm)と異なる分光感度を持つ光電子増倍管には物理的意味はありません。Cs-Te, Cs-I など、タングステンランプの発光波長域に感度のない光電面では、特定の波長の放射感度により比較をします。

ルーメン感度には陰極単体の特性を示す陰極感度と増倍後の特性を示す陽極感度の2種類があります。

(1) 陰極ルーメン感度

陰極ルーメン感度²³⁾²⁵⁾は、分布温度 2856K のタングステンランプからの入射光束に対する光電面からの光電子流(陰極電流)の大ききで表されます。この測定では図 4-7 に示すように各ダイノードを短絡させ同電位にして二極管動作で測定します。



THBV3_0407JA

図 4-7 陰極ルーメン感度測定

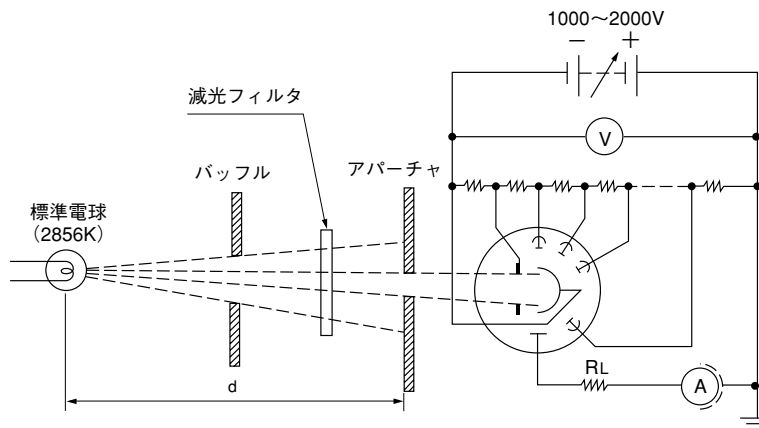
測定入射光量は $10^5 \sim 10^2$ ルーメン程度が使われます。入射光量が大きすぎると光電面の面抵抗による誤差を生じます。従って光電面寸法とその材質によって最適値が決められます。

光電流の測定には微小電流計が用いられますが、この電流値は数nA～数 μ Aと微小なもので、漏洩電流やノイズに対する対策を十分に行う必要があります。またソケットやステムの汚れや周囲の湿度に注意し、しっかりした電氣的なガード対策をほどこす必要があります。

光電子増倍管に印加する電圧は、印加電圧－陰極電流特性が完全に飽和している必要があります、90～400ボルトが印加されます。陰極の飽和特性については4.3.2リニアリティの項で述べます。電流計は陰極に接続し、保護用に $100 \text{ k}\Omega \sim 1 \text{ M}\Omega$ の抵抗(R_L)を直列に付けて測定します。

(2) 陽極ルーメン感度

陽極ルーメン感度²³⁾²⁵⁾は、光電面上の入射光束に対する陽極出力電流の大きさを表されます。この測定では図4-8で示されるように各電極に正規の電圧配分を与えます。光源は陰極ルーメン感度の測定と同じものを用いますが、減光フィルタなどで入射光量を $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{ lm}$ 程度に下げ使われます。電流計は、陽極に接続します。測定に用いる電圧分割抵抗はなるべく偏差のなく温度特性の良いものを使用する必要があります。



THBV3_0408JA

図 4-8 陽極ルーメン感度測定

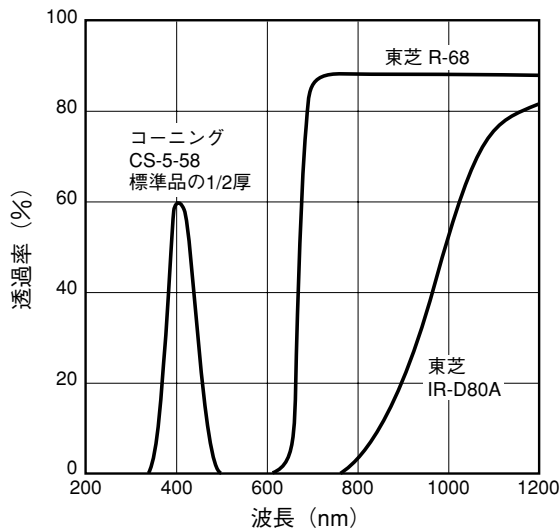
(3) 青感度指数と赤感度比

分光感度の簡単な比較の方法として、ルーメン感度のほか、青感度指数、赤感度比が用いられます。

青感度は、ルーメン感度の測定時に青フィルタを光電子増倍管の前に入れたときの陰極電流をいいます。使用されるフィルタはCS-5-58(コーニング社製)を半分の厚さに研磨したものです。光電子増倍管への入射光は青フィルタを透過した光なので直接的にルーメンで表すことはできません。そのため、浜松ホトニクスでは単位は無名数を用いています。シンチレーションカウンティングにおいてよく使われるNaI(Tl)シンチレータの発光波長(ピーク420 nm)とこのフィルタの透過率とはよく一致しているため、シンチレーション光に対する感度はこのフィルタを使った時の陽極感度と良い相関があります。またこの青感度指数はシンチレーション計測のエネルギー分解能に影響を与える重要な値となっています。詳しくは第7章シンチレーション計数法を参照してください。

次に赤感度比は、分光感度が近赤外域まで伸びている光電子増倍管の特性評価に使用されます。赤感度比は、ルーメン感度の測定と同じ条件で、赤または近赤外用フィルタを入れたときの陰極電流を陰極ルーメン感度で割った値です。使用される赤から赤外フィルタはAg-O-Cs光電面では、IR-D80A(東芝社製)を用い、それ以外では、R-68(東芝社製)を用いています。赤感度比はフィルタの種類が異なれば値も変わります。

これら青感度指数と赤感度比に使用されるフィルタの特性を図4-9に示します。

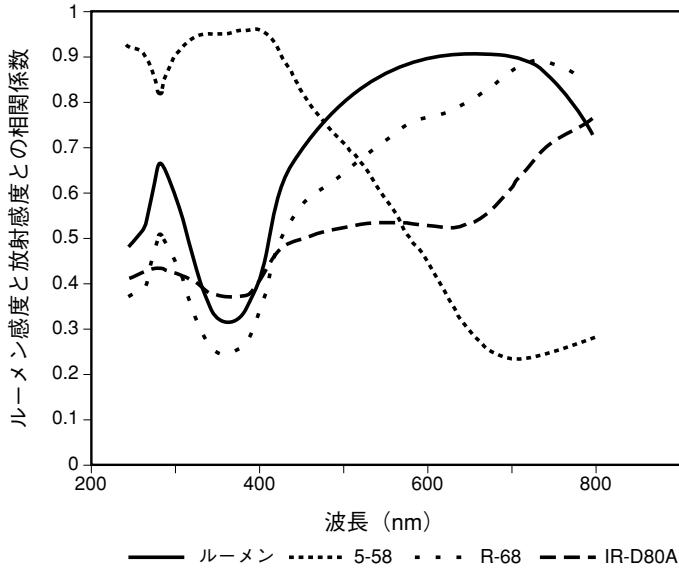


THBV3_0409JA

図 4-9 各種フィルタの分光透過率

4.1.5 ルーメン感度と分光感度

ルーメン感度と分光感度特性は、特定の波長域である程度の相関があります。図4-10はルーメン感度・青感度指数(CS-5-58)・赤感度(R-68, IR-D80A)と各波長での放射感度の相関性を表したものです。



THEV3_0410JA

図4-10 各波長に対する相関関係

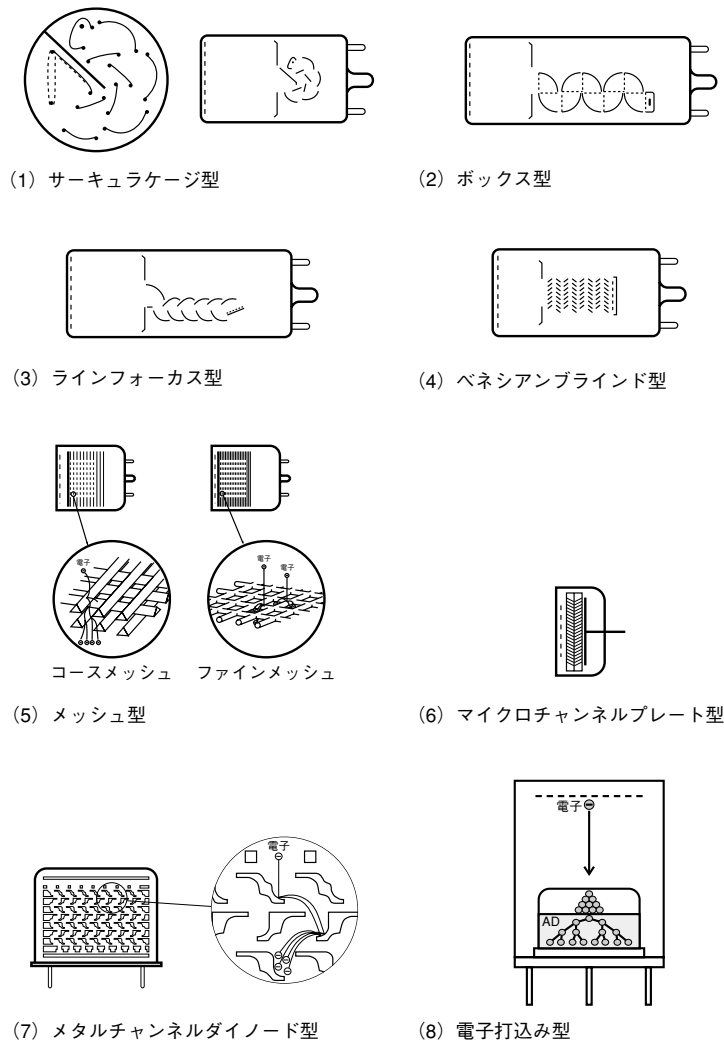
図より光電子増倍管の放射感度は450 nmまでは青感度指数と非常によい相関があり、500 nm～700 nmではルーメン感度、700 nm～800 nmではフィルタに東芝R-68を用いた赤感度、そして800 nm以上ではフィルタに東芝IR-D80Aを用いた近赤外感度と相関性があることが分かります。これらの相関値からある波長で光電子増倍管の感度を選別する場合、あえて分光感度測定を行わなくてもその波長で最も高い相関値をもつフィルタを使用することにより容易に選別することができます。

4.2 ダイノードの基本特性

ここでは、現在までに製品化されているダイノードの種類を紹介し、基本特性である収集効率とゲインについて説明します。

4.2.1 ダイノードの種類と特長

ダイノードには多くの種類があり構造や段数などによってゲイン、時間応答特性、出力直線性（パルスリニアリティ）等特長があるため、使用目的に応じて、選択の必要があります。図4-11にその断面図を示し、以下に各々の簡単な特長を示します。マイクロチャンネルプレートをダイノードとして用いた場合については、第10章で、メッシュ型ダイノードを用いたものについては第9章で詳しく述べます。電子打込み型については第11章で詳しく述べます。



THBV3_0411JA

図 4-11 電子増倍部の種類

(1) サーキュラケージ型

形状が小さいため、コンパクトにできる利点があり、全てのサイドオン型と一部のヘッドオン型光電子増倍管に用いられています。また、時間応答特性にも優れています。

(2) ボックス型

ヘッドオン型光電子増倍管に使われており、光電子の収集効率に優れています。従ってこのダイノードを用いた光電子増倍管は、検出効率が高く出力の一様性（ユニフォミティ特性）に優れています。

(3) ラインフォーカス型

ボックス型と同様にヘッドオン型光電子増倍管に使われます。高速時間応答特性を有し、時間分解能やパルスリニアリティ特性が優れています。

(4) ベネシアンブラインド型

光電子の電界収集が容易で、主として大口径のヘッドオン型光電子増倍管に用いられています。

(5) メッシュ型

メッシュ型はメッシュ状のダイノードを積み重ねた構造をしています。コースメッシュ型とファインメッシュ型があり、リニアリティに優れ、磁界の影響も受けにくくなっています。クロスワイヤアノードやマルチアノードを使用すれば、入射光の位置を検出することも可能です。ファインメッシュ型は高磁界用光電子増倍管に使用されます。(詳しくは第9章を参照)

(6) MCP(Microchannel Plate・・・マイクロチャンネルプレート)型

厚さ1 mm以下のマイクロチャンネルプレート(MCP)を使っているため特に優れた時間応答特性を有しています。また磁界によるゲインへの影響も小さくメッシュ型と同様に陽極を特殊な形状にすることにより位置検出機能を持たせることも可能です。(詳しくは第10章を参照)

(7) メタルチャンネルダイノード型

電子軌道シミュレーションと微細加工技術によって、極薄型の電極を形成し、高精度で積層したものです。ダイノードが近接しているため、小型で時間特性が優れています。

磁界によるゲイン変化も比較的小さくなっています。マルチアノードと組み合わせることで、多チャンネル検出や位置情報を得ることもできます。(詳しくは第9章を参照)

(8) 電子打込み型

光電子を高電圧で加速し、そのエネルギーを半導体素子に与えてゲインを得る方法です。構造が簡単な上、雑音指数が小さく、ユニフォミティ特性、直線性にも優れています。

電気的特性はダイノードの種類だけでなく光電面の大きさやフォーカス系によっても左右されるため一概に言えませんが、ヘッドオン型光電子増倍管各ダイノード別の大まかな特性を表4-2(管径2インチまで)に示します。磁気特性は軸方向磁場で、特性があまり変化しない上限値です。

特性 ダイノード	時間特性 上昇時間[ns]	パルスリニアリティ 特性(2%)[mA]	磁気特性 [mT]	ユニフォ ミティ	収集 効率	特 長
サーキュラケージ	0.9~3.0	1~10	0.1	△	○	コンパクト、高速
ボックスアンドグリッド	6~20			○	◎	高収集効率
ラインフォーカス	0.7~3			△	○	高速、高リニアリティ
ベネシアンブラインド	6~18			○	△	大口径用
ファインメッシュ	1.5~5.5	300~1000	500~1500*	○	△	高磁場用、高リニアリティ
MCP	0.1~0.3	700	1500*	○	△	超高速
メタルチャンネル	0.65~1.5	30	5**	○	○	コンパクト、高速
電子打込み型	内蔵素子に依存		—	◎	◎	高電子分解能

* 管軸方向

**メタルパッケージ型PMT

表4-2 ダイノード別特性例

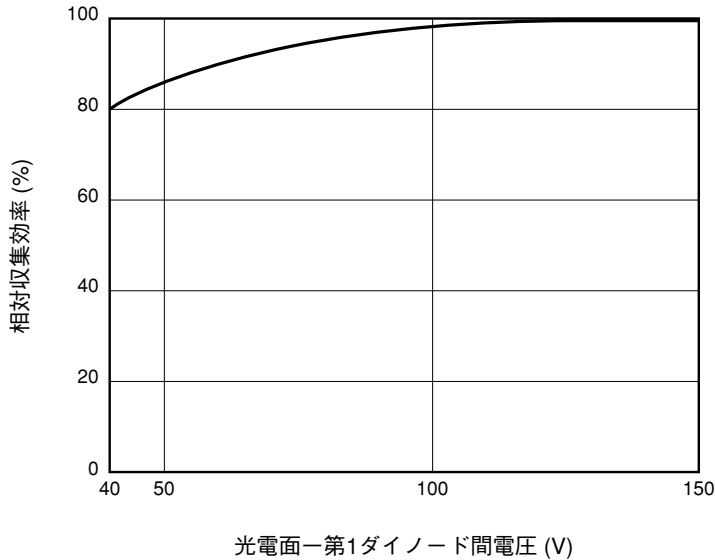
4.2.2 収集効率とゲイン(電流増倍率)

(1) 収集効率

光電子増倍管の電流増倍機構は、電子の軌道を考慮して設計され、効率良くダイノード間で増倍するように考慮されていますが、それでも増倍に寄与しない電子がある程度存在します。

一般に光電子が第一ダイノードの有効部分に入射する確率を収集効率(α)といいます。この有効部分とは第一ダイノードに入射した光電子が第二ダイノード以後で抜けることなく、有効に増倍する部分を意味します。第二ダイノード以後でも増倍に寄与しない二次電子は存在するのですが、後段にいくほど二次電子の数が増えるため収集効率に与える影響は少なくなります。この様に第一ダイノードでの光電子の収集効率が重要な特性です。

図4-12は、28 mm 径ヘッドオン型光電子増倍管R6095におけるカソードー第一ダイノード間の電圧に対する一般的な相対収集効率を表したものです。カソードーダイノード間の電圧が適切でないとき光電子は第一ダイノードの有効部分に入射しないため収集効率に影響があります。特にカソードー第一ダイノード間の電圧が低い場合、第一ダイノードの有効部分に到達する光電子の数が少なくなり収集効率がやや低下します。



THEV3_0412JA

図4-12 相対収集効率の電圧特性

図4-12から電圧を100V程度かけることが望まれます。収集効率はシンチレーション計測を行う際のエネルギー分解能や検出効率、SN比に直接影響を与えます。検出効率とは、微弱光測定において光電子増倍管に入射する信号のうち検出された割合をいい、光子計数法においては光電面の量子効率と収集効率の積で表されます。

(2) ゲイン（電流増倍率）

二次電子放出比 δ はダイノード間の電圧Eの関数であり、次の式で表わされます。

$$\delta = a \cdot E^k \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-3)}$$

ここでaは定数、kは電極の構造・材質で決まり、0.7～0.8の値をとります。

光電面から放出された光電子流 I_k は、第一ダイノードに入射して二次電子流 I_{d1} を放出します。この時の第一ダイノードにおける二次電子放出比 δ_1 は次の式で表されます。

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-4)}$$

さらにこの電子は第一ダイノード→第二ダイノード→…→第nダイノードとカスケード的に増倍されます。第二ダイノード以後のn段目の二次電子放出比 δ_n は次の式で表されます。

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-5)}$$

陽極電流 I_p は、以下の式で与えられます。

$$I_p = I_k \cdot \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_n \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-6)}$$

さらに

$$\frac{I_p}{I_k} = \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_n \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-7)}$$

ここで α は収集効率です。

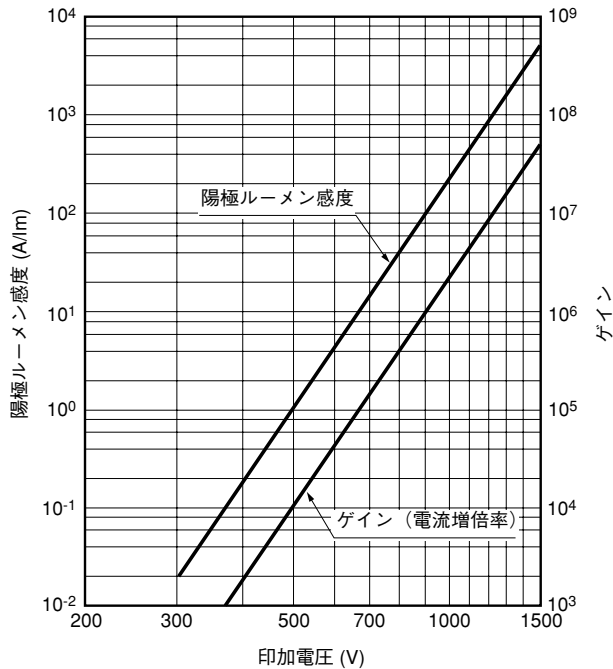
この $\alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n$ をゲイン（電流増倍率）といい、 μ で表わします。

$$\mu = \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n \quad \dots\dots\dots (式 4-8)$$

従って、 $\alpha = 1$ とし、光電子増倍管のダイノードの数を n とすると、等分割デバイダの場合、ゲイン μ の印加電圧 V に対する変化は次の式になります。

$$\mu = (a \cdot E)^n = a^n \left(\frac{V}{n+1}\right)^{kn} = A \cdot V^{kn} \quad \dots\dots\dots (式 4-9)$$

ただし、 $A = a^n / (n+1)^{kn}$ とします。この式から、ゲイン μ は印加電圧の kn 乗に比例することがわかります。代表的な印加電圧対ゲインの様子を図4-13に示します。図4-13は両対数のグラフで描かれているためこの直線の傾きが kn となります。この様に、一般には印加電圧を上げる程、ゲインは高くなります。ゲインは印加電圧の kn 乗により変動するため光電子増倍管に使用する高圧電源のドリフト、リップル、温度変動、入力変動、負荷変動などの安定性は、光電子増倍管のゲインに大きな影響があります。



THEV3_0413JA

図 4-13 ゲインの電圧特性

4.3 光電子増倍管の諸特性

ここでは光電子増倍管を使用するうえで重要となる諸特性とその評価法、使用法について述べます。

4.3.1 時間特性

光電子増倍管は非常に高速の時間特性^{1)23)~27)}を持った光検出器です。これらの時間特性は主として陰極から放出された光電子が陽極まで増幅される間に生ずる走行時間およびその差によって決まります。したがって、高速測光用の光電子増倍管では入射窓の内側に曲率を持たせたり、走行時間差を極力少なくするような電極設計がなされています。

ダイノード別の2インチ径光電子増倍管の時間特性を表4-3に示します。表からわかるように、ラインフォーカス型、メタルチャンネル型が最も時間特性が良く、ボックス型やベネシアンブラインド型のもはそれより劣ります。

単位：ナノ秒

ダイノード	上昇時間	下降時間	パルス幅 (FWHM)	電子走行時間	T.T.S.
ラインフォーカス	0.7~3	1~10	1.3~5	16~50	0.37~1.1
サーキュラージ	3.4	10	7	31	3.6
ボックス	~7	25	13~20	57~70	~10
ベネシアンブラインド	~7	25	25	60	~10
ファインメッシュ	2.5~2.7	4~6	5	15	~0.45
メタルチャンネル	0.65~1.5	1~3	1.5~3	4.7~8.8	0.4

表 4-3 時間特性(2インチ径光電子増倍管)

主に時間特性は電極の構造で決まりますが、印加電圧にも依存します。電界強度を増せば、すなわち印加電圧を上げれば、電子走行速度が速くなり、電子走行時間も短くなります。一般に時間特性は印加電圧の平方根に反比例し改善されます。図4-14に印加電圧対時間特性の一例を示します。

以下に時間特性の定義および測定法を示します。

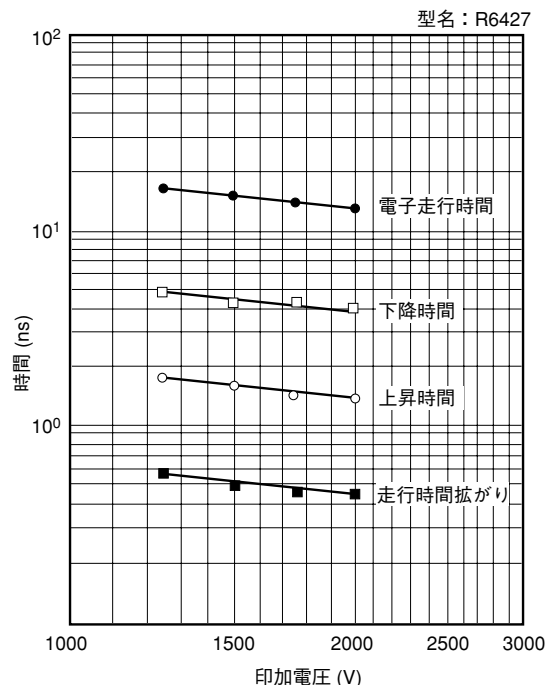
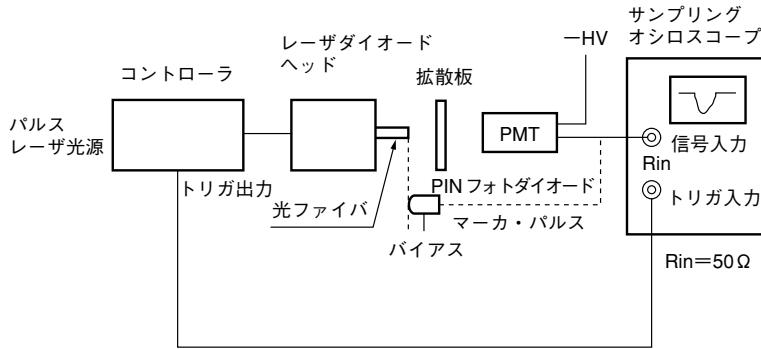


図 4-14 時間特性の電圧依存性

(1) 上昇時間・下降時間・電子走行時間

図4-15に測定系を示します。また図4-16に上昇時間(ライズタイム; Rise Time)、下降時間(フォールタイム; Fall Time)、電子走行時間(トランジットタイム; Transit Time)の一例を示します。

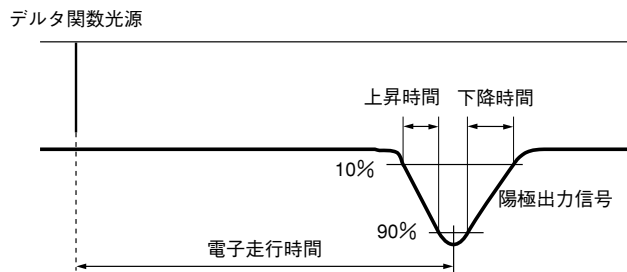


THBV3_0415JA

図 4-15 上昇、下降、電子走行時間の測定系

光源にはレーザダイオードを用います。これは光電子増倍管の時間特性と比べ十分短いためデルタ関数光源と考えることができます。測定は通常サンプリングオシロスコープにて光電子増倍管の出力波形を何回かサンプリングし合成することによって波形を得ます。この出力パルス波形は陰極のあらゆる場所から出た波形が合成されたものです。よって上昇、下降時間は、主として電子走行時間差によって決まり、電極による電界分布および電界強度(印加電圧)にも依存します。

図4-16に示されているように、上昇時間は出力パルス波高値が10%から90%に達するまでの時間、下降時間は逆に90%から10%に戻るまでの時間で示されます。これらが問題になる時間領域の測定では特に波形歪が生じやすいため、インピーダンスの整合をとることが必要です。ダンピング抵抗(第5章参照)の付いたデバイダ回路などを用いることもあります。



THBV3_0416JA

図 4-16 上昇、下降、電子走行時間

図4-17は実測した光電子増倍管の出力波形です。一般に下降時間は上昇時間に比べ2~3倍長くなります。従って繰り返しの多いパルスを計測するときにはパルス同士が重ならないように考慮する必要があります。なお、出力パルスの半値幅(FWHM; Full Width at Half Maximum)はおよそ上昇時間の約2.5倍となります。

電子走行時間は入射光が光電面に入ってから出力パルスが現れるまでの時間です。光電子増倍管の光電面の位置に置き換えたPINフォトダイオードを基準(ゼロ秒)として、そこから光電子増倍管の出力パルスの最大値までの時間差を測定します。この電子走行時間は繰り返しパルスを用いる蛍光寿命測定など測定系の遅延時間を決める上での目安となります。

注) 上昇時間、下降時間はそれぞれ立ち上り時間、立ち下り時間ともよばれますが、ここでは上昇時間、下降時間とします。

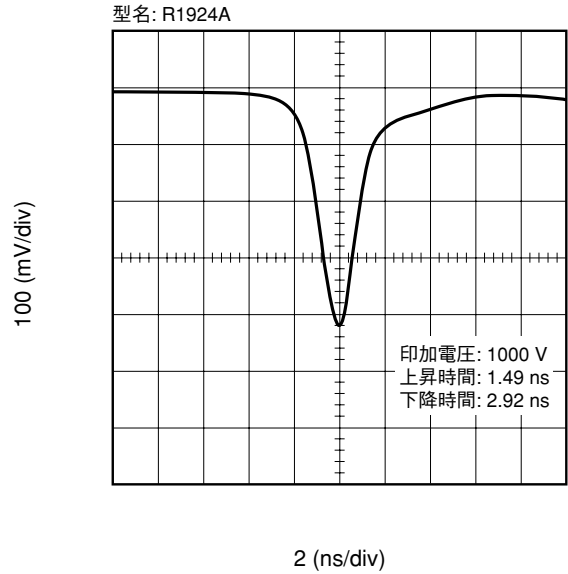


図4-17 出力波形

(2) T.T.S.(Transit Time Spread)

光電面を単一光子により全面照射したときの単一光電子パルスの走行時間のゆらぎをT.T.S.(トランジットタイムスプレッド; Transit Time Spread)と呼びます。測定系を図4-18に測定結果を図4-19に示します。

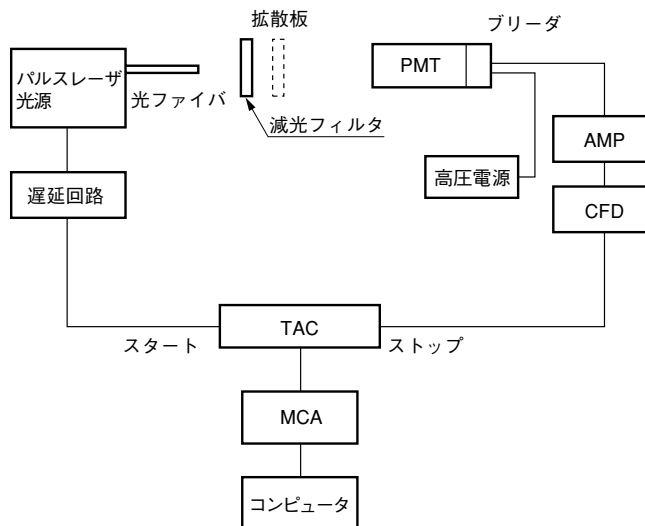
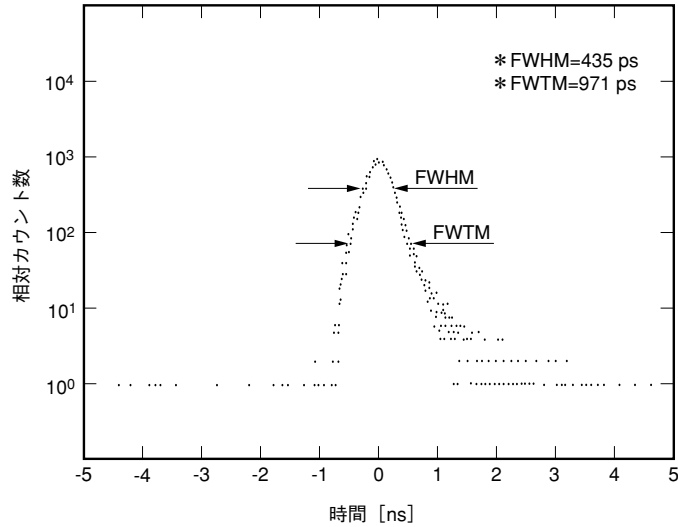


図4-18 T.T.S.の測定系



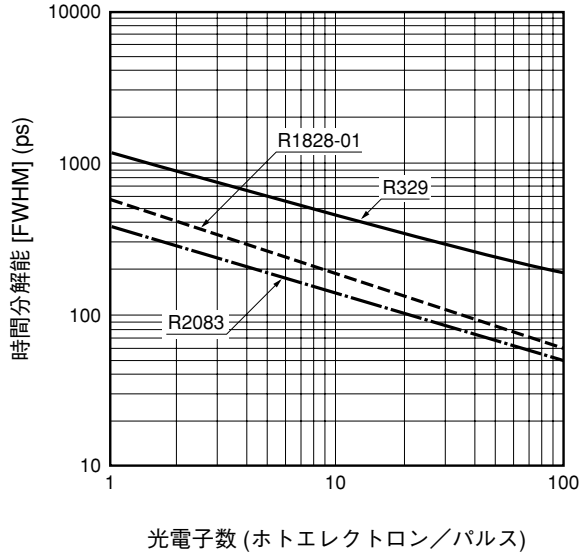
THBV3_0419JA

図 4-19 T.T.S.

パルスレーザ光源からのトリガ信号を遅延回路に通した後、時間差を波高値に変換するT.A.C. (Time-to-Amplitude Converter)のスタート信号に入れ、一方光電子増倍管からの出力信号はパルス波高値の揺らぎに起因する時間ジッタを減少させたタイミング精度の良いディスクリミネータであるC.F.D. (Constant Fraction Discriminator)を通してT.A.C.のストップ信号へ入れます。T.A.C.はスタート信号からストップ信号までの時間に比例した波高パルスを発生し、このパルスはマルチチャンネル波高分析器(M.C.A.; Multichannel Analyzer)に入り波高分析されます。従ってスタート信号からストップ信号までの時間間隔は電子走行時間に対応するため、それぞれの波高値を多数回メモリに積算して得られるM.C.A.上のヒストグラムは電子走行時間の統計的拡がりを示すことになります。

浜松ホトニクスでは通常T.T.S.はこのヒストグラムの半値幅(FWHM)で表しますが、他では標準偏差で表されることもあります。半値幅(FWHM)の値はそのヒストグラムがガウス分布の場合、標準偏差の2.35倍と等価です。また、1パルスあたりの光電子数が増えるとその特性も良くなり、およそ光電子数の平方根に反比例してT.T.S.は改善されます。

この様子を図4-20に示します。

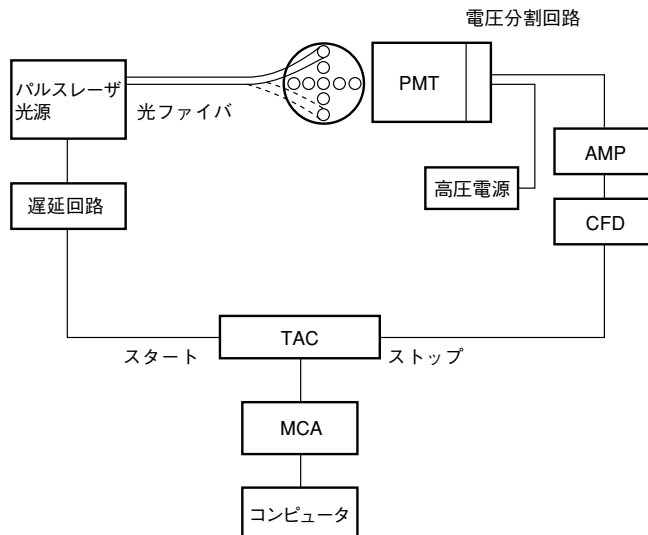


THBV3_0420JA

図4-20 光電子数 対 時間分解能

(3) 光電子走行時間差 C.T.T.D.(Cathode Transit Time Difference)

光電面上にその入射位置を変えたときの電子走行時間の違いをC.T.T.D.(光電子走行時間差)と呼びます。通常時間特性は光電面に全面照射して測定されますが、この測定は図4-21のようにアパーチャを用いスポット光を光電面上に移動させて照射場所ごとに電子走行時間差の測定を行います。



THBV3_0421JA

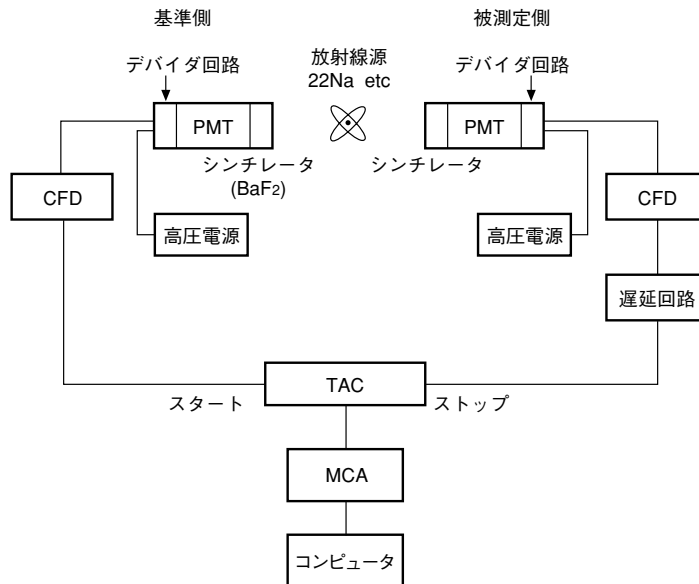
図4-21 C.T.T.D. の測定系

具体的にはT.T.S.の測定系を用い、スポット位置を変えたときに得られる各ヒストグラムのピーク値の移動量(時間差に相当)を測定します。データは光電面の中心に光を照射した時の電子走行時間を基準としたときの各場所での電子走行時間差で示されます。

実際の応用にはこの特性は直接的に必要な規格ではなく、主に光電子増倍管製作上の評価に用いられますが前記の上昇時間、下降時間、T.T.S.、次に述べるC.R.T.特性に影響を与えます。

(4) C.R.T.(Coincident Resolving Time)

これもT.T.S.と同様に走行時間のゆらぎを測定するものですが、ポジトロンCTやT.O.F.(Time of Flight)測定に用いられるのと類似の測定系が使われます。そのため同種の測定に使用する場合、その光電子増倍管の性能を評価する値として実用性が高いといえます。測定系を図4-22に示します。



THBV3_0422JA

図4-22 C.R.T. の測定系

放射線源には ^{22}Na 、 $^{68}\text{Ge-Ga}$ などが、一方シンチレータには基準側に BaF_2 、被測定側には BGO 、 BaF_2 、 CsF 、プラスチックシンチレータなどが使われます。放射線源とシンチレータは用途によって適した組み合わせが用いられます。放射線源は2つの光電子増倍管の真ん中に置かれ、これらの線源からは対向した方向に γ 線が同時に放出されるため2つのシンチレータから同時に発光が起こります。2つの光電子増倍管からの信号の一方を同時計数回路(T.A.C.)のスタート入力に、他方を適切なトリガのタイミングを得るためにディレイラインを通してT.A.C.のストップ入力に入れます。その後T.T.S.と同じ様に多数回の現象をM.C.A.にて波高分析(時間分布)を行います。これはT.A.C.に入った信号の時間的ゆらぎを統計的に示したもので、主に2つの光電子増倍管のトランジットタイムのゆらぎに起因します。図4-14、図4-20の様にトランジットタイムのゆらぎは1パルスあたりの光電子数の平方根に反比例し、また印加電圧の平方根にも反比例します。そのため一般に放射線源のエネルギーが高いほど、印加電圧が高いほどこの特性も改善されます。 τ_1 、 τ_2 を個々の光電子増倍管のトランジットタイムのゆらぎとすれば

$$\text{C.R.T.} = (\tau_1^2 + \tau_2^2)^{1/2} \dots\dots\dots \text{(式 4-10)}$$

で表されます。

4.3.2 リニアリティ

光電子増倍管は光子計数法を含めた極微弱光領域を含め、広い範囲で入射光量に対する陽極出力電流のリニアリティ(直線性)¹⁾²⁴⁾²⁷⁾²⁸⁾がよい光検出器です。すなわち広いダイナミックレンジを有しています。しかし、あまり強い入射光を受けると理想的な直線性からのずれを生じます。この原因は主として陽極付近のリニアリティ特性によりますが、透過型光電面をもつ光電子増倍管を低電圧、大電流で動作させた場合、陰極のリニアリティ特性も影響することがあります。陰極、陽極の双方のリニアリティ特性は印加電圧が一定の場合、入射波長にはよらず電流値にのみ依存します。

(1) 陰極リニアリティ特性

25 °C

光電面の種類	特性項目	波長域(ピーク波長) (nm)	リニアリティの上限(平均電流)
Ag-O-Cs		300~1200 (800)	1 μ A
Sb-Cs		~ 650 (440)	1 μ A
Sb-Rb-Cs		~ 650 (420)	0.1 μ A
Sb-K-Cs		~ 650 (420)	0.01 μ A
Sb-Na-K		~ 650 (375)	10 μ A
Sb-Na-K-Cs		~ 850 (420) 900 (600) 赤外延長型	1 μ A
Ga-As (Cs)		~ 930 (300~700)	(*) 0.1 μ A
Cs-Te		~ 320 (210)	0.1 μ A
Cs-I		~ 200 (140)	0.1 μ A

(*) これ以上流すと劣化が激しい

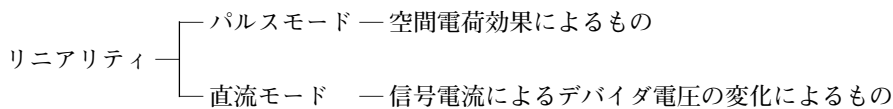
表 4-4 光電面別諸特性

光電面は半導体のため電気抵抗をもちますが、その値は光電面によって異なります。そのため表 4-4 に示すように光電面の種類によって陰極のリニアリティ範囲が異なっています。ただし、この特性は透過型光電面についてのものであって、金属板の上に光電面が作られている反射型光電面では光電面抵抗が十分低いため問題にはなりません。光電面抵抗の影響を軽減し、かつ収集効率を維持するために構造によっても異なりますが一般に光電面—第一ダイノード間には 50 V ~ 300 V 程度の電圧を印加することが望まれます。また光電面は半導体のために温度が下がると面抵抗が増加するため、冷却する場合は光電面抵抗の温度特性についての考慮が必要です。

(2) 陽極リニアリティ特性

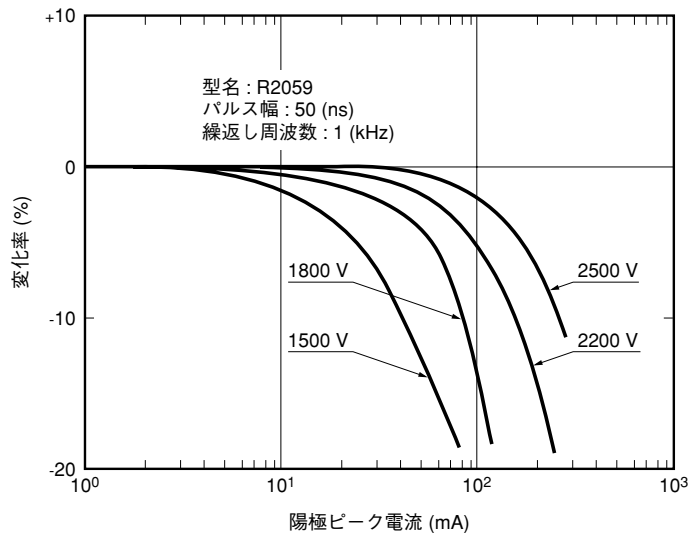
陽極付近リニアリティを決定する要因には、デバイダ回路によるものとダイノード部での大電流による空間電荷効果の影響によるものとの 2 つがあります。

以下に示すように、直流的な用途では主としてデバイダ回路、パルスの用途では空間電荷効果によってリニアリティが制限されます。



デバイダ回路によるものについては第5章で述べます。パルスモードによるパルスリニアリティは主として信号のピーク電流により決まります。強い光パルスが入るとダイノード後段で大電流が流れ、電子の空間電荷密度が高くなるために飽和現象が現れますが、この影響はダイノードの種類によって異なります。ダイノード別の飽和特性を前述の表4-2に示してあります。この空間電荷の影響はダイノード間の電界分布と電界強度で決まります。メッシュ型はリニアリティ特性が非常に優れていますが、これは電極間が狭いために電界強度が高く、ダイノード面積も広く単位面積あたりの信号の電荷密度が低いいため空間電荷の影響を受けにくい構造になっているためです。一般にダイノードの種類によらず、印加電圧を上げるとダイノード間の電界強度が増すためパルスリニアリティ特性は良くなります。

図4-23にR2059型光電子増倍管における印加電圧とパルス入力に対するリニアリティの関係を示します。また電流密度の高くなるダイノード後段の分割電圧を高くしたデバイダ(テーパーデバイダと呼ばれる)を使うことによっても、この特性を改善することができます。この件についても第5章において記述します。テーパーデバイダの分割比は各々のダイノードに合った電界分布と電界強度を作り出す必要があるため、一様でなく複雑な値となります。



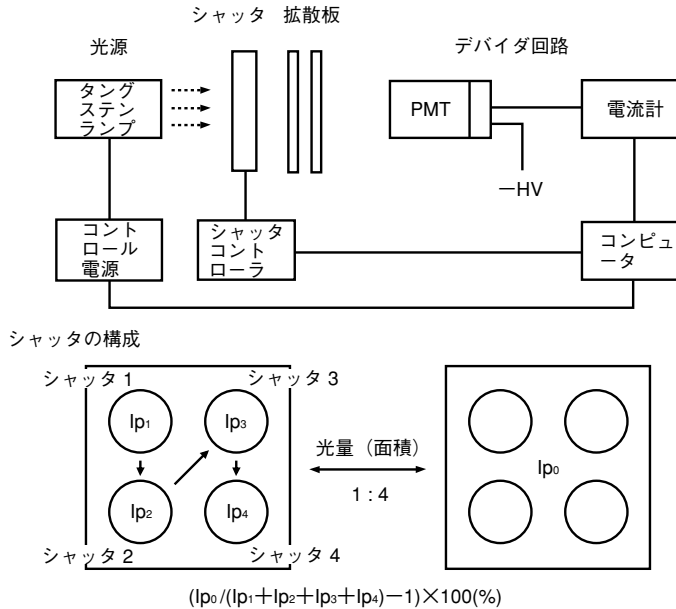
THBV3_0423JA

図4-23 リニアリティの電圧依存性

(3) リニアリティ測定法

測定法には、直流法とパルス法があり、その測定法を次に示します。

(a) 直流法



THBV3_0424JA

図4-24 直流法のブロックダイアグラム

ここでは浜松ホトニクスで使われている方法を紹介합니다。直流法では図4-24のように光源と光電子増倍管の間に4個のシャッタ付アパーチャが取り付けられていて、順次1,2,3,4のそれぞれのアパーチャおよび4つ全部のアパーチャをすべて開けたとき、それぞれのシャッタが開けられ、そのつど光電子増倍管の出力(それぞれ I_{p1} , I_{p2} , I_{p3} , I_{p4} , I_{p0} とする)を測定します。その後 $(I_{p1} + I_{p2} + I_{p3} + I_{p4})$ と I_{p0} の比

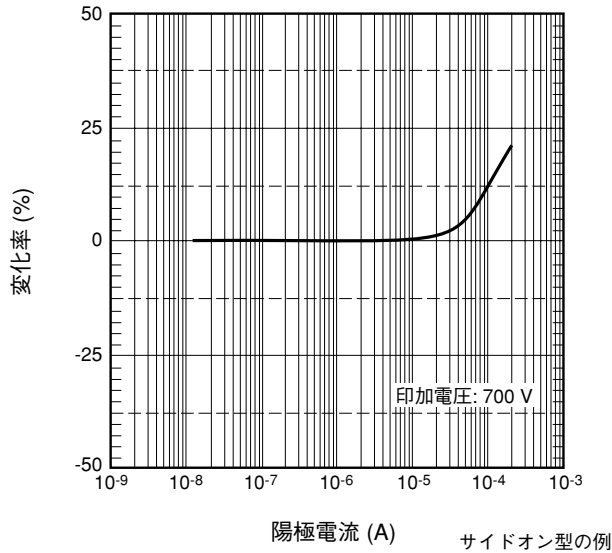
$$(I_{p0} / (I_{p1} + I_{p2} + I_{p3} + I_{p4}) - 1) \times 100(\%) \dots\dots\dots \text{(式 4-11)}$$

をとります。この値が直線性からのずれを表しており、もし直線性があれば

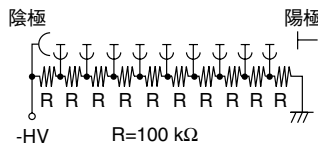
$$I_{p0} = I_{p1} + I_{p2} + I_{p3} + I_{p4} \dots\dots\dots \text{(式 4-12)}$$

になり、この値もゼロすなわち直線性からのずれはないことになります。ランプの光量を変えて、すなわち光電子増倍管の出力電流を変えて測定を繰り返せば図4-25のように出力電流対直線性のずれを知ることができます。この特性は主にデバイダ回路の電流値、構成に大きく依存します。

また、簡易的には、あらかじめ校正された減光フィルタを用い、光量を可変して測定する方法もあります。



○電圧分割比 (1・1・…1・1・1)



THBV3_0425JA

図 4-25 直流法によるリニアリティ

(b) パルス法

測定法を図 4-26 に示します。

強弱2種類のLEDパルス光源を時間的に交互に点灯させますが、それらのおのおののパルスの発光量の比を予めおよそ4:1にしています。十分に低い電流値での強弱それぞれのパルス光に対する出力を I_{p02}, I_{p01} とすると、 I_{p02}/I_{p01} は本来光量に比例するため

$$I_{p02}/I_{p01} = 4 \dots\dots\dots (式 4-13)$$

になるはずですが。しかし光源を近づけ(図 4-26 参照)、電流値が多くなると直線性からのずれを生じ、弱いパルス光(A_1)に対する出力を I_{p1} 、強いパルス光(A_2)に対する出力を I_{p2} とすると、

$$I_{p2}/I_{p1} \neq I_{p02}/I_{p01} \dots\dots\dots (式 4-14)$$

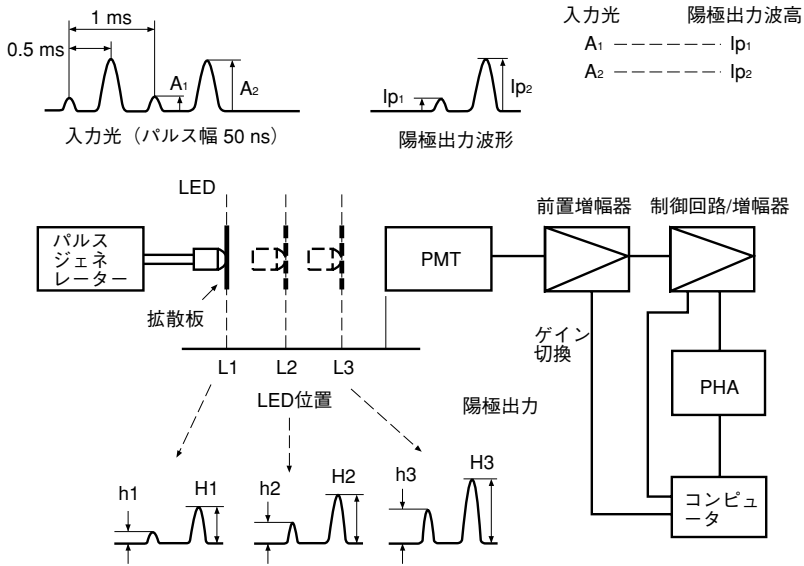
となり、 I_{p2}/I_{p1} の比が4からずれてきます。よってこの2種のパルスに対する光電子増倍管の出力比 I_{p2}/I_{p1} を測定することにより直線性を測定することができます。すなわち

$$\frac{(I_{p2}/I_{p1}) - (I_{p02}/I_{p01})}{(I_{p02}/I_{p01})} \times 100(\%) \dots\dots\dots (式 4-15)$$

が陽極出力 I_{p2} での直線性からのずれとなり、直線性があれば常に

$$(I_{p2}/I_{p1}) = (I_{p02}/I_{p01}) \dots\dots\dots (式 4-16)$$

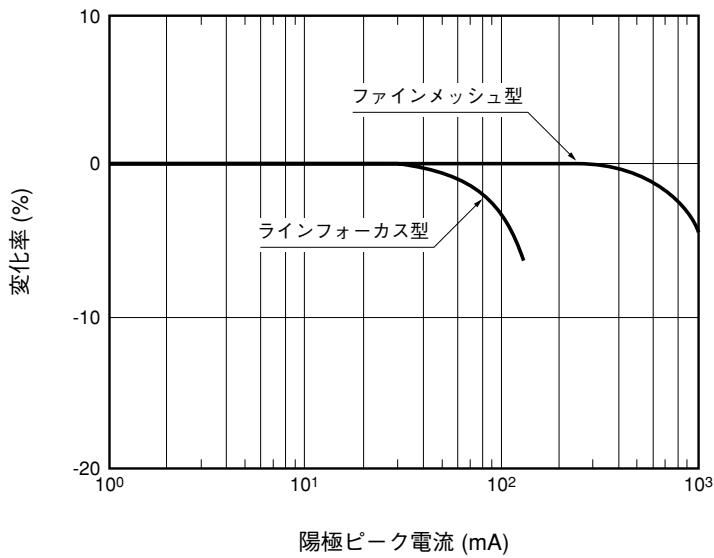
となり式 4-15 の値もゼロとなります。



THBV3_0426JA

図4-26 パルス法のブロックダイアグラム

光源(LED)と光電子増倍管(PMT)の距離を可変することにより出力電流を変えて測定を繰り返すと図4-27の様な特性が得られます。



THBV3_0427JA

図4-27 パルスリアリティ

4.3.3 ユニフォミティ

ユニフォミティとは、光電面の場所の違いによる出力感度の均一性のことです。陽極出力のユニフォミティは光電面と増倍部(ダイノード部)でのそれぞれのユニフォミティの積として考えられます。

図4-28に波長が400 nmと800 nmの時の陽極でのユニフォミティのデータを示します。これは直径1 mm径のスポットを光電面上で走査した時のものです。

(a) 400 nm におけるユニフォミティ

(b) 800 nm におけるユニフォミティ

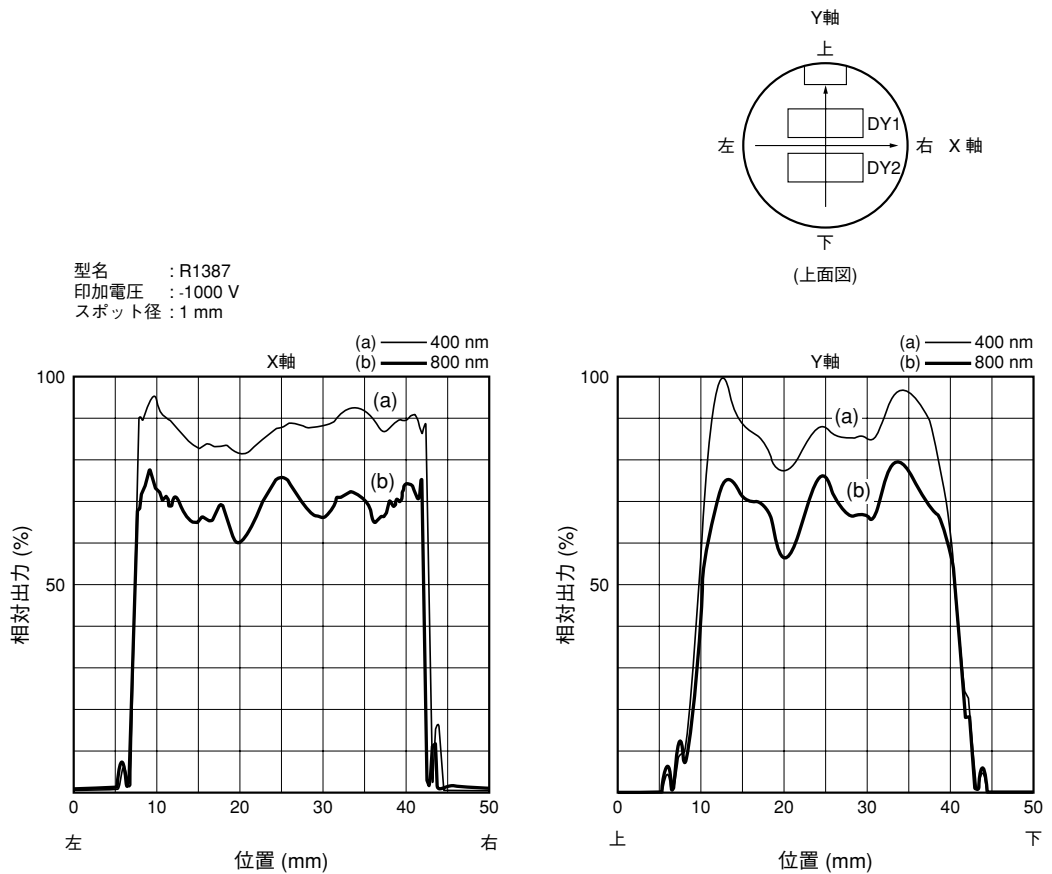
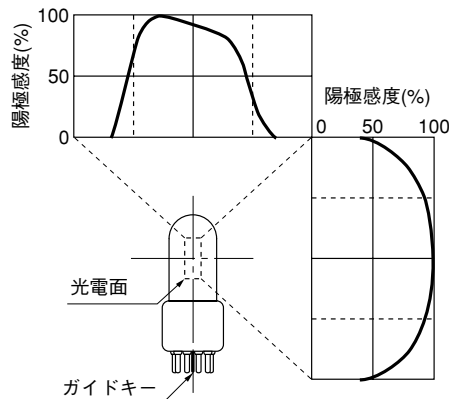


図4-28 波長によるユニフォミティの違い

一般に光電面、陽極とも長波長、特に限界波長に近くなるにつれユニフォミティは悪くなります。これは限界波長に近いと陰極感度は光電面の表面状態に強く依存するようになるため、陰極感度のムラが大きくなるためです。また印加電圧があまり低くなるとダイノード間の電子収集が悪化することがあります。

ヘッドオン型の光電子増倍管はサイドオン型に比べてユニフォミティが優れていますが、医用分野で用いられているガンマカメラのような位置検出用途ではこの特性が装置の性能を左右するので、特に吟味したものが使われます。図4-29にサイドオン型の一般的なユニフォミティのデータを示します。測定方法は上記ヘッドオン形のものと同じです。ダイノード別のユニフォミティ特性は表4-2に示したように、ボックス型やベネシアンブラインド型、メッシュ型が優れています。



THBV3_0429JA

図4-29 サイドオン型光電子増倍管のユニフォミティ

ユニフォミティは、使用法の違いを考慮して入射位置によるユニフォミティと入射角度によるユニフォミティ(アンギュラーレスポンス)によって評価されます。以下に浜松ホトニクスで用いられている測定方法、特性例を述べます。

(1) 入射位置によるユニフォミティ

光電面上の二次元方向にスポット光をスキャンさせた時の出力電流変化をグラフに表したものです。測定系を図4-30に示します。

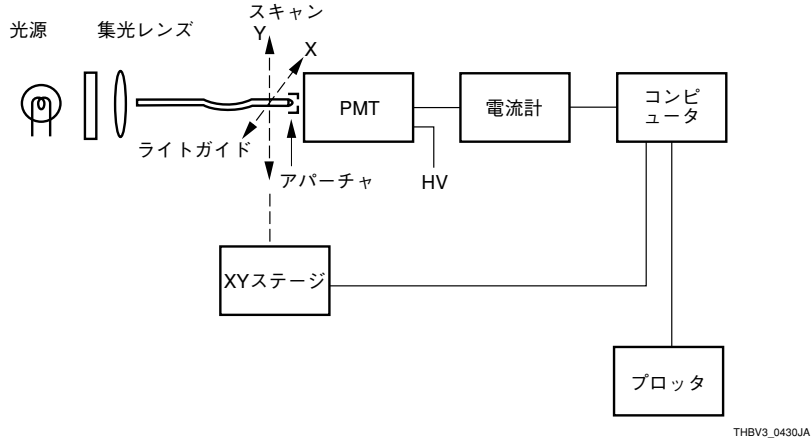


図 4-30 ユニフォミティ測定系

便宜上、X軸、Y軸に分けて走査します。普通このX、Y軸の方向は図4-31に示すように初段ダイノードの向きによって決めています。

図4-31にヘッドオン型のX、Y軸と初段ダイノードの位置関係を示します。ダイノードでの損失電子の割合は、光電子の初段ダイノードへの入射位置に最も左右されます。測定データは図4-28を参照してください。

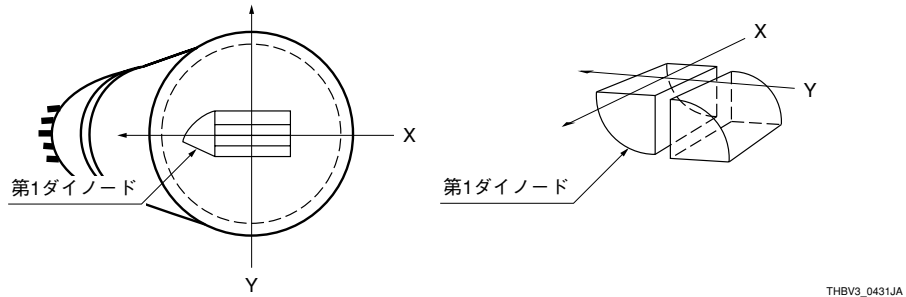


図 4-31 ヘッドオン型のユニフォミティ

光電面上のX、Y軸をスポット光で走査するとき、図4-32のように光電子が初段ダイノードのX、Y軸を移動していると考えられます。

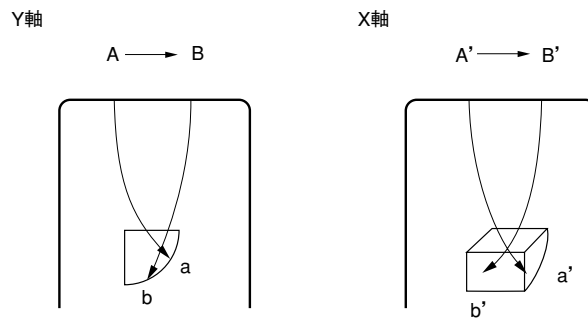


図 4-32 光電子放出の位置とダイノードとの位置関係

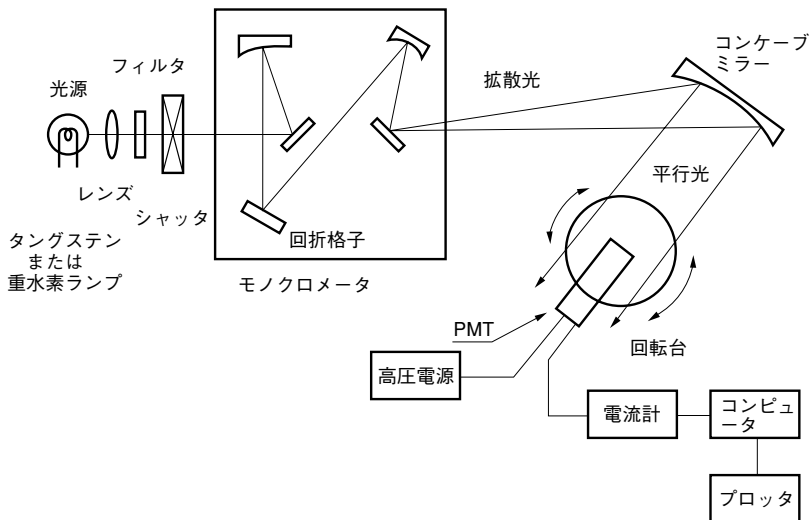
X軸は、ダイノードが管軸に対して対称な方向を横切っているため、一般にY軸と比べユニフォミティ特性が良いのが普通です。

また、光電面を格子状に分割して感度分布を二次元的に表したり、三次元表示をすることもあります。

陽極出力の不均一性は、ヘッドオン型光電子増倍管では20～40パーセント、サイドオン型ではそれ以上になることがあります。このユニフォミティの影響を軽減するには、入射窓の直前に拡散板を置くとか入射窓の表面をすりガラス状にした光電子増倍管を使うなどの方法があります。

(2) アンギュラーレスポンス

入射光が光電面に斜めに入射した時の特性を表すのが入射角依存性で、アンギュラーレスポンス^{28)~30)}と呼ばれています。この測定では、平行光を光電面全面に照射し、光電子増倍管を回転した時の回転角対出力電流で表されます。その測定系を図4-33に、測定データを図4-34に示します。回転台を回転すると光電面の投影面積は減少するため、角度依存性がない場合でも出力電流は入射角のコサイン値で表される曲線となります。普通、入射光が斜めに入ると光電面の感度は上がります。そのため斜めより光を入射させた時、コサイン値($\cos \theta$)の曲線より感度は高くなります。これは斜め入射の場合、入射光が光電面を通過する距離が結果的に長くなるためと考えられます。また波長が長いほどこの変化は大きくなるのが普通です。



THBV3_0433JA

図4-33 アンギュラーレスポンスの測定系

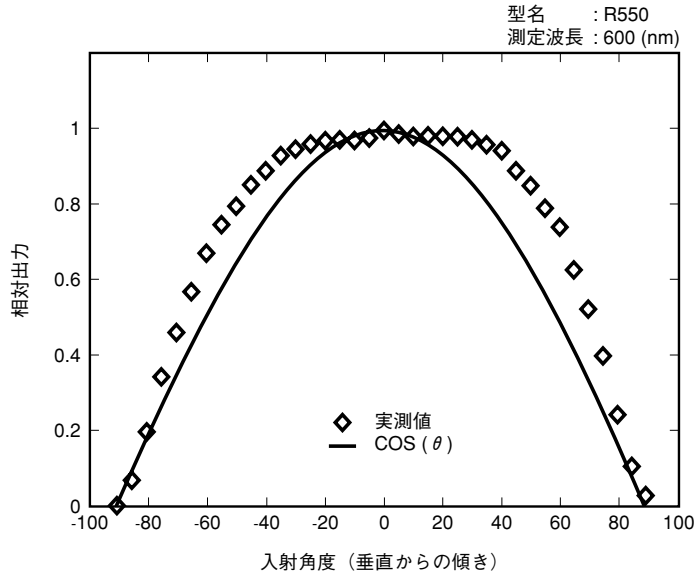


図 4-34 アンギュラーレスポンス

4.3.4 安定性

光電子増倍管の時間経過に対する出力変化特性を一般にドリフト特性、ライフ特性といい、変化の直接の原因となる電圧、電流、温度などのストレスによって受ける劣化は、疲労(fatigue)と呼ばれます。

(1) ドリフト (経時変化特性)、ライフ (寿命) 特性

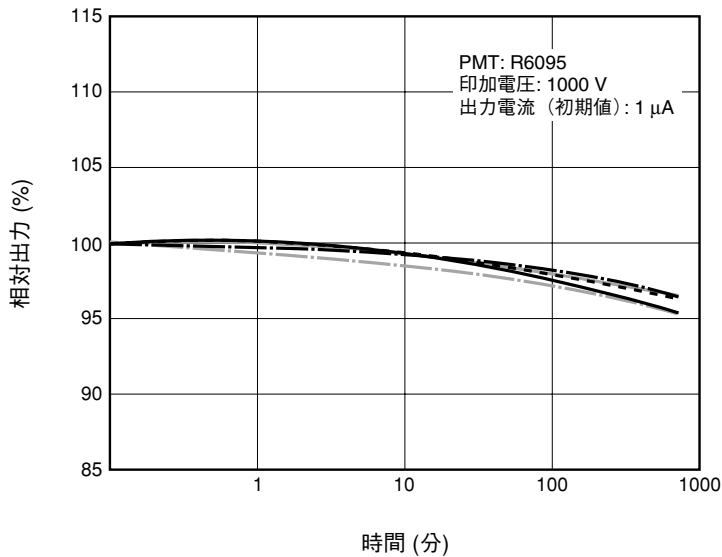
ドリフト¹⁾³¹⁾は主として短時間の経時変化をいい、 $10^3 \sim 10^4$ 時間以上にわたる長時間の変化特性は寿命(ライフ)特性と呼ばれます。光電子増倍管を長時間動作させても陰極感度が大きな経時変化を起こすことはまれで、ほとんどダイノードの二次電子放出比の変化に依存しています。つまりドリフト特性、ライフ特性とは時間に対するゲイン変化の大きさを表す特性とも言えます。

単位時間あたりのドリフト特性は一般に動作時間が長いほど安定性は良くなります。さらに動作後ある短期間非動作放置されていてもこの傾向はある程度存続するため、使用前にエージングあるいは電源電圧を一定時間印加することによってより安定に使用することが可能です。

また、ドリフト特性、ライフ特性は信号出力電流の大きさに強く依存しますので通常は平均電流として数 μ A以下で使用することをお勧めします。

浜松ホトニクスでは、ドリフト特性は通常連続入射光による直流レベルでの出力信号電流の経時変化を記録します。当社の代表的な光電子増倍管のドリフト特性を図4-35に示します。一般に光電子増倍管のドリフトは動作の初期に大きく、時間経過とともに安定する性質があります。またパルス動作または間欠動作(動作、非動作の繰り返し)における光電子増倍管出力の経時変化特性も、平均出力電流値が直流レベルでの信号出力電流値と同じであれば、経時変化のパターンと変化の大きさは連続光によるドリフト特性と変わりません。

この他、シンチレーション計数用光電子増倍管に特有の評価方法がありますが、それらについては第7章シンチレーション計数法の項で触れます。



THBV3_0435JA

図4-35 ドリフト特性の例

(2) エージング、ウォーミングアップ

数%以内の出力安定性が求められる用途では、以下に述べるエージングやウォーミングアップをお薦めします。

(a) エージング

アノード出力電流が最大定格を超えない範囲で数時間から数十時間連続動作を行うものです。これによりドリフト特性がより安定します。また、使用直前には次項のウォーミングアップを併用するとより安定になります。

(b) ウォーミングアップ

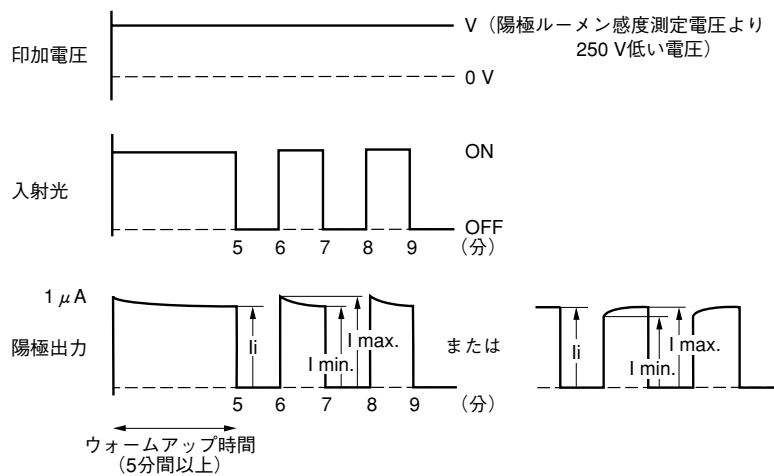
光電子増倍管の使用に際して、数十分程度のウォーミングアップを行なうことを安定な動作を得るためにはお薦めします。このウォーミングアップ時間は特に間欠動作の場合、使い初めは長く、使い込んだ後は短い時間で済ませることができます。陽極電流が大きい場合は短い時間で、小さい場合は長くすることで同じ効果が得られます。一般的には実際の使用で印加する程度の電圧を与え、陽極電流を数 μ A流した状態での数十分程度のウォーミングアップが標準的です。しかし、微小電流動作(平均出力電流で数十nA～数百nA)の場合は、暗中で1時間程度光電子増倍管に電圧を印加しておくだけでも一応のウォーミングアップは可能です。

4.3.5 ヒステリシス特性

入射光、または印加電圧がステップ関数的に変化したとき、出力が同じステップ関数とならないことがあります。この現象をヒステリシス¹⁾³²⁾と呼びます。出力信号が、一度大きく振れてから収束するような特性をオーバーシュートと呼び、低めの値から収束していくような特性をアンダーシュートと呼んでいます。ヒステリシスは測定条件によって光ヒステリシスあるいは電圧ヒステリシスと呼ばれます。光電子増倍管には電極支持板の絶縁物表面に導電性皮膜を処理して、絶縁性をそこなわずに帯電を少なくしヒステリシスを軽減したものもあります。

(1) 光ヒステリシス特性

光電子増倍管に一定電圧が印加されていて、入射光がステップ関数で変化するときの出力波形を、光ヒステリシス特性といいます。標準的な光ヒステリシス特性の測定方法を図4-36に表します。



THBV3_0436JA

図4-36 光ヒステリシス

印加電圧は陽極ルーメン感度測定電圧より250V低い電圧Vを印加し、陽極電流約 $1\mu\text{A}$ で5分間以上ウォームアップし、そして1分間入射光を切り、その後1分間光を入射します。そして再現性を確かめるために、これを二度繰り返します。そのときの再現性のある出力変化割合が、下記の式によりパーセントで表されます。

$$\text{光ヒステリシス } H_L = ((I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}) / I_i) \times 100(\%) \dots\dots\dots \text{(式 4-17)}$$

ここで、 I_{MAX} ：最大値、 I_{MIN} ：最小値、 I_i ：平均値を示します。

表4-5に代表的な光電子増倍管の光ヒステリシスの値 H_L を示します。一般的にこの特性は対策されているため、一部の特殊な品種を除いて $\pm 1\%$ 以内に入るのが普通です。光ヒステリシス特性は、印加電圧の高低にはよりますが、出力電流の違いによりヒステリシスのパターンや値が変わることがよくあります。

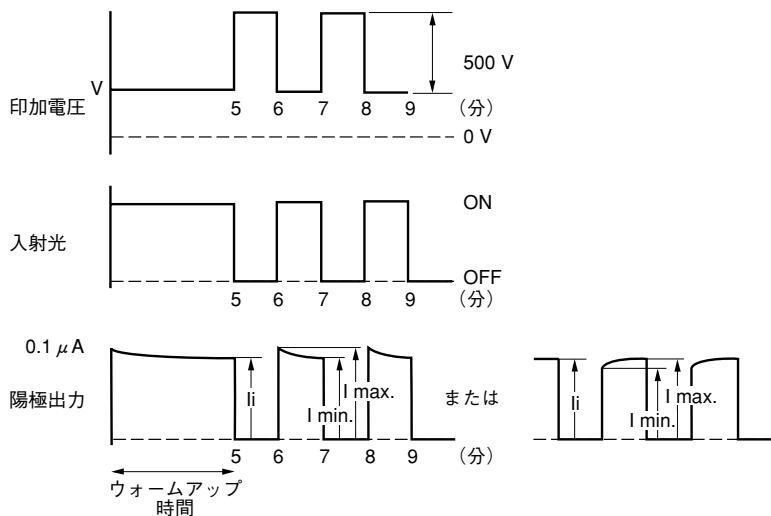
(2) 電圧ヒステリシス特性

入射光の光量がステップ関数的に変化するとき、それに対応するように印加電圧をステップ関数的に変えて、出力を一定にするような帰還回路と共に使われるとき、出力信号のオーバーシュートやアンダーシュートの現象は極力小さくすることが望まれます。これを電圧ヒステリシス特性と呼びます。一般に光ヒステリシスより大きな値を示し、また光ヒステリシスが小さくても電圧ヒステリシスは大きいこともあります。表4-5に代表例を示します。

光電子増倍管	光ヒステリシス (%)	電圧ヒステリシス (%)	管径 (mm)
R6350	0.3	0.5	13 mm サイドオン型
R212	0.2	1.0	28 mm サイドオン型
R928	0.1	1.0	28 mm サイドオン型
R647	0.9	2.5	13 mm ヘッドオン型
R6249	0.4	2.0	28 mm ヘッドオン型
R1306	0.07	0.06	52 mm ヘッドオン型

表4-5 標準的なヒステリシス特性の例

電圧ヒステリシス特性の測定方法を図4-37に示します。印加電圧は陽極ルーメン感度測定電圧より700V低い電圧を用い、陽極電流約0.1 μ Aで5分以上動作させた後、測定します。



THBV3_0437JA

図4-37 電圧ヒステリシス

その後1分間光を遮断して電圧500Vをステップ関数的に増加した後再び電圧と光量を初めの条件に戻します。そのときの再現性のある出力変化割合を、次の式によりパーセントで示します。一般に電圧変化が大きい程、電圧ヒステリシスの値は大きくなります。他は光ヒステリシスとほぼ同じ特性を示します。

$$\text{電圧ヒステリシス } H_V = ((I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}) / I_i) \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-18)}$$

ここで、 I_{MAX} ：最大値、 I_{MIN} ：最小値、 I_i ：平均値を示します。

(3) ヒステリシスの軽減

信号光が長時間遮断されているときは、疑似光を入射して光電子増倍管の出力電流に大きな変化がないようにすることで、光ヒステリシス特性を改善させることができます。電圧ヒステリシスはHAコーティング(第13章8.2参照)を用いることで改善される場合があります。

4.3.6 暗電流

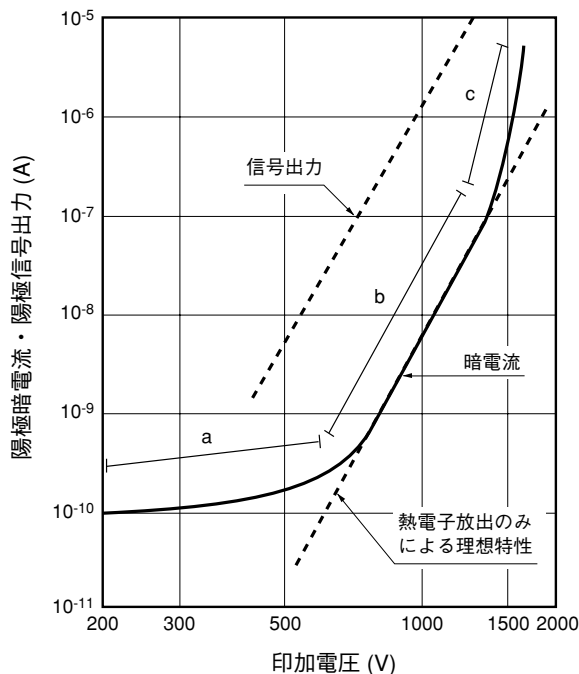
光電子増倍管は光が入射していない状態でもわずかながら電流が流れています。これを暗電流¹⁾₂₃₎₂₅₎₃₃₎といい、微小電流、微弱光を取り扱う光電子増倍管にとって極力小さいことが望まれます。

(1) 原因

暗電流を原因別に分類すると次のようになります。

- (a) 光電面およびダイノード面からの熱電子放出による電流
- (b) 管内の陽極と他の電極間、およびシステムにおいて陽極ピンと他のピン間の漏洩電流
- (c) ガラスや電極支持材の発光による光電流
- (d) 電界放出による電流
- (e) 残留ガスのイオン化による電流(イオンフィードバック)
- (f) 宇宙線やガラス中の放射性同位元素からの放射線や、環境ガンマ線によるガラスの発光に起因するノイズ電流

暗電流は印加電圧の増加に伴って増加しますが、その増加率は一様ではありません。典型的な印加電圧対暗電流の様子を図4-38に示します。



THBV3_0438JA

図 4-38 印加電圧対暗電流特性

この特性は印加電圧によって3つの部分に分けて考えることができます。すなわち低電圧領域(図中a)の部分は漏洩電流に、中電圧領域(図中b)の部分は熱電子放出に、また高電圧領域(図中c)の部分は主として電界放出やガラス、電極支持材の発光に、それぞれ支配されています。一般にbの領域が最もSN比が高いため、この領域の印加電圧範囲で使うのが適切です。

イオンフィードバック³⁴⁾と宇宙線、放射性同位元素によるノイズ³⁴⁾³⁵⁾³⁶⁾はパルス動作の際には問題となることがあります。

また、光電面を室内光に曝らした場合、暗電流は1～2時間暗中に放置すれば元にもどりますが、太陽光など極端に強い光(10,000 lux以上)では回復不可能な損傷を受ける場合がありますので注意が必要です。従って、使用前には暗中に放置しておくことをおすすめします。

浜松ホトニクスでは、30分間暗放置後の暗電流を測定し、その値を検査成績書として添付していますが、これは30分間暗放置すれば、長期暗放置後の暗電流値にかなり近づくことと暗電流測定の作業性を考慮して決められています。そのためさらに長期間暗放置されれば、更に低い暗電流を得ることができます。先に述べた6つの暗電流の原因について以下各原因ごとに説明します。

a) 熱電子放出

光電面やダイノード面は仕事関数の低い物質により構成されているため常温でも熱電子を放出します。この効果はW.Richardsonによって研究され、次式³⁷⁾で表されます。

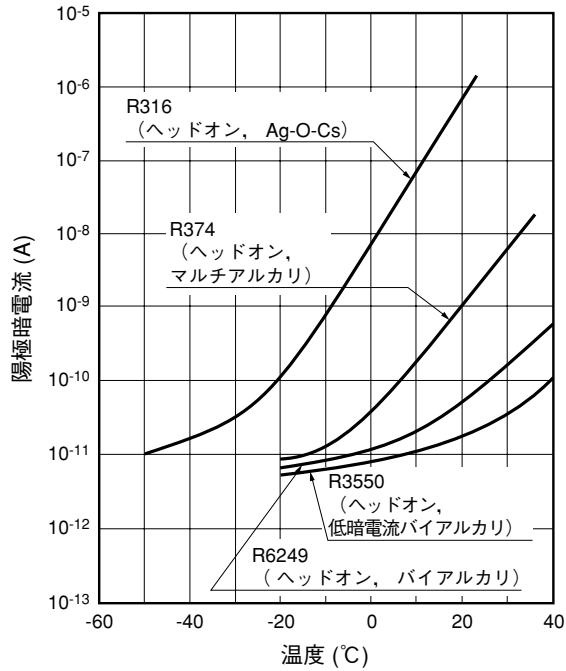
$$i_s = AT^{5/4} e^{(-e\psi/KT)} \dots\dots\dots (式 4-19)$$

ここで、

- ψ : 仕事関数 T : 絶対温度
- e : 電子の電荷 A : 定数
- K : ボルツマン定数

この式によれば熱電子放出は光電面の仕事関数と温度の関数であることがわかります。仕事関数の大小、つまり光電面の種類によって熱電子放出量は決まることになります。光電面の仕事関数が低いとエネルギーの低い光すなわち長波長まで感度は延びますが、熱電子放出も多くなることが上式よりわかります。一般のアルカリ金属を主成分とする光電面では、最も長波長域に感度があるAg-O-Cs光電面(図4-2参照)の暗電流が最も高く、最も限界波長の短い紫外用光電面(Cs-Te, Cs-I)の暗電流が最も低い値を示します。

また上式によれば、温度を下げれば暗電流も下がり、図4-39のように冷却によって大幅に暗電流が下がるのがわかります。

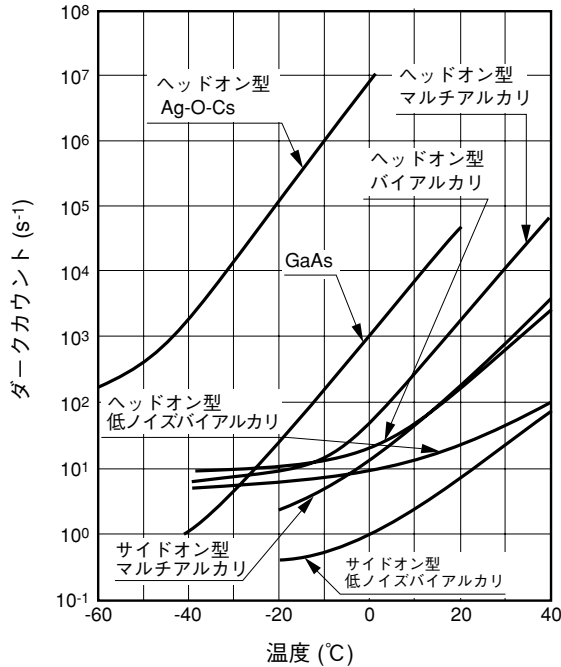


THBV3_0439JA

図 4-39 陽極暗電流の温度特性

しかし冷却によって暗電流が小さくなくても、漏洩電流があるために、限りなく下がるわけではありません。熱電子放出は光電面とダイノードの両方から放出されますが、光電面の表面積が大きいことや、ダイノードでは後段にゆくほど出力への寄与が減ることから、光電面からの熱電子放出の影響が最も大きいものとなります。そのため、印加電圧に対する熱電子放出による暗電流の変化は、ゲインの傾きとほぼ等しくなります。

また、光子計数法で行った暗電流パルスの温度特性例を図 4-40 に示します。これも当然のことながら光電面を冷却すると、暗電流パルス数も減少します。



THEV3_0440JA

図 4-40 暗電流パルスの温度特性

b) 漏洩電流

光電子増倍管は 500 ~ 3000 V もの高電圧で、数 nA ~ 数十 μ A の微弱電流を取り扱うため、使用する絶縁材料の性能が極めて重要になります。たとえば絶縁抵抗が $10^{12} \Omega$ 程度でも、漏洩電流はナノアンペアの単位になってしまいます。絶縁材料からの漏洩電流のため印加電圧との関係は、図 4-38 に見られるように光電子増倍管のゲインとは無関係でオームの法則で与えられる式、電流値(I)=印加電圧(V)/絶縁抵抗(R)によって決まります。一方、熱電子放出による暗電流は印加電圧に対して指数関数的に変化するため、前述のように印加電圧が低くなるほど、相対的に漏洩電流の暗電流に占める割合が増加してきます。

原因は、光電子増倍管内部すなわちアノードとダイノード間で起こる場合と、ステム、ベース、ソケットの陽極ピンと他のピン間で起こる場合があります。特に後者のステム、ベース、ソケットにおける漏洩電流は表面の汚れまたは付着した水分によって増大するため、これらを清浄にしておくことと湿度に対する注意が大切です。汚れは、アルコールで洗浄して除去できる場合が多く、漏洩電流の低減に有効です。

c) ガラスや電極支持材からの発光

光電面やダイノードから飛び出した電子の中には正規の軌道はずれて出力信号に寄与しないものがあります。これらの漏れ電子が側管ガラスに当たるとわずかながら発光します。一般に光電子増倍管の光電面には負の高圧が印加され、外部には接地電位の金属ケースを用いることが多いため、このような衝突現象が起きやすくなりますが、HAコーティングによってこの問題が軽減できます。HAコーティングについては、第13章8.2で述べます。

d) 電界放出

光電子増倍管の印加電圧が高くなり過ぎると、電界により電子が引き出され、暗電流が急激に増加します。これは図4-38のcの部分で示されます、この現象が起きると光電子増倍管の寿命を著しく縮めるため、最大印加電圧が定められています。一般に、この電圧値以下で使用すれば問題はありますが、安全を考慮して最大印加電圧の2～3割程度低い電圧で使用するをお奨めします。

e) 残留ガスのイオン化による電流(イオンフィードバック)

光電子増倍管の内部は $10^{-6} \sim 10^{-5}$ Pa もの高真空ですが、それでも残留ガスの影響は無視できません。このガス分子は電子との衝突によってイオン化され、そのうちの正イオンは比較的前段のダイノード、もしくは光電面に当たって多数の二次電子を発生させ、結果として大きな雑音パルスを出力させます。この雑音パルスは大電流時に光電流より時間的に少し遅れて出力されるのが特長で、そのためパルス動作の際、アフタパルス³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾として測定値に誤差を生じることがあります。

f) 宇宙線、ガラス中の放射性同位元素からの放射線や環境ガンマ線によるノイズ電流

地球には多くの宇宙線が降りそそいでいますが、その中で、光電子増倍管の雑音源となるのは主としてミューオン(μ)です。ミューオンがガラス窓を通るとチェレンコフ放射により多数の光子を放出します。また一般にガラスは酸化カリウム(K_2O)などを含有していますが、カリウムには微量の放射性同位元素 ^{40}K が含まれています。 ^{40}K はベータ線を放出し、雑音源となることがあります。また建築物などに含まれている放射性同位元素が発する環境ガンマ線も雑音源となることがあります。しかし、ここで述べている雑音パルスは頻度が非常に低いため、液体シンチレーション計測などの非常に信号数の少ない特殊な応用を除いて通常は無視できます。

(2) 暗電流の表現方法

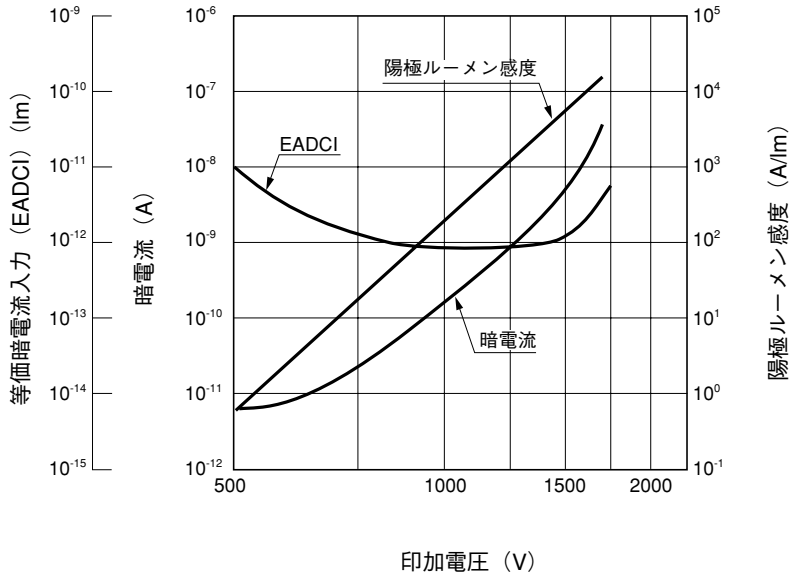
微弱光検出では暗電流が検出限界を決める大きな要因です。暗電流を表現するにはいろいろな方法があり、以下にそのいくつかについて紹介します。

a) 直流的表現

一般に浜松ホトニクスでは、ある一定電圧で測定された暗電流の値を検査成績書として添付しています。また、ある陽極感度を得る印加電圧にて定義する方法もあります。その表現方法として、等価暗電流と、EADCI (Equivalent Anode Dark Current Input)があります。等価暗電流は、ある陽極ルーメン感度の時の暗電流で、通常その陽極感度になる電圧とその電圧での暗電流という形で表します。陽極感度を一定に保った動作状態で使われている時に便利です。EADCIは、暗電流に等しい陽極電流を得るために必要な入射光量をルーメン(lm)またはワット(W)で表したもので、次式から算出することができます。

$$\text{EADCI(lm)} = \text{暗電流(A)}/\text{陽極ルーメン感度(A/lm)} \dots\dots\dots \text{(式 4-20)}$$

ワット(W)で表すときは波長を決めて、その時の陽極放射感度(A/W)で暗電流を割ります。図4-41に実際の等価暗電流特性の様子を表していますが図中には陽極暗電流、陽極ルーメン感度も示してあります。EADCIが小さい値の時の印加電圧領域で使えば良い信号対雑音比(SN比)が得られますが、図より印加電圧が約1000Vの付近で、陽極ルーメン感度が約3桁の範囲でEADCIの値が小さく平坦な部分があるのがわかります。



THBV2_0441JA

図 4-41 等価暗電流特性例

b) 交流的表現

一般に微弱光測定において暗電流は減算できるため、むしろそのノイズのゆらぎ成分により検出限界が決められます。そのような場合、検出限界は ENI (Equivalent Noise Input) で表されます。ENI とはこのノイズ電流と等価な信号電流を得るのに必要な入射光量、つまり SN 比が 1 となる入射光量で、ピーク波長またはある特定の波長におけるワット (W) 数で表す場合には NEP (Noise Equivalent Power) とも呼ばれます。

雑音は回路系の周波数帯域の平方根にも比例し、ENI²³⁾ は下記のように定義されます。

$$\text{ENI} = (2e \cdot I_d \cdot \mu \cdot B)^{1/2} / S \text{ (W)} \dots\dots\dots \text{(式 4-21)}$$

ここで、

- e: 電子の電荷 (1.6×10^{-19} C)
- I_d : 陽極暗電流 (A)
- μ : ゲイン
- B: 回路系の周波数帯域 (Hz)
- S: 陽極放射感度 (A/W)

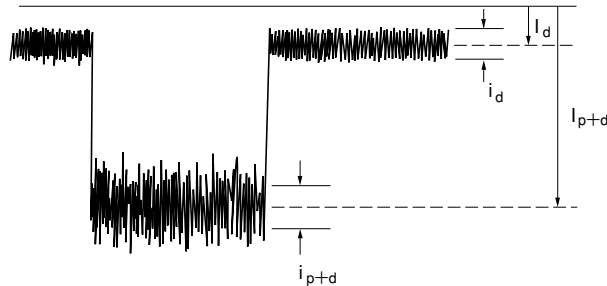
普通 $\Delta f = 1\text{Hz}$ が使われ、ピーク波長で $10^{-15} \sim 10^{-16}$ (W) の値をとります。

4.3.7 光電子増倍管の信号対雑音比 (SN 比)

光電子増倍管の出力波形を観測すると、光入力があっても発生する雑音成分と、信号光により発生する雑音成分が見られます。通常、これらの雑音成分は光電面からの熱電子による暗電流および信号電流によるショット雑音が支配的であることから、ここではこの両者を考えます。

以下の SN 比は電流の実効値で定義し、雑音成分は r.m.s. (root mean square) で表すものとします。

今、図 4-42 に示すような信号、雑音波形から SN 比を求める場合を考えてみます。



THBV3_0442JA

図 4-42 信号対雑音比の特性例

- 雑音成分の平均値 : I_d
- 雑音成分の交流分 : i_d (r.m.s.)
- 信号の平均値(雑音成分含む) : I_{p+d}
- 信号の交流分(雑音成分含む) : i_{p+d} (r.m.s.)

ここで SN 比²⁵⁾⁴¹⁾⁴²⁾は以下の式より求められます。 I_p は信号成分の平均値で、 I_{p+d} から I_d を減算して求めます。

$$\text{SN比} = I_p / i_{p+d} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-22)}$$

今、暗電流 I_d が無視できる ($I_p \gg I_d$) 場合、SN 比は

$$\text{SN比} \approx I_p / i_p \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-23)}$$

ここで I_p は信号成分の平均値、 i_p はその交流分 (r.m.s.) です。 i_p は、光子およびその光電子放出過程での統計的揺らぎによる成分と、増倍過程により発生する成分からなります。

一般的に増倍過程における雑音成分は、一般に雑音指数 F (Noise Figure)⁴²⁾ を用いて表現され、雑音指数は次式で定義され、入出力での SN 比の劣化具合を表します。

$$F = (S/N)_{in}^2 / (S/N)_{out}^2 \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-24)}$$

$(S/N)_{in}$ は光電子増倍管入力側の SN 比、 $(S/N)_{out}$ は光電子増倍管出力側の SN 比を意味します。そして n 段ダイノードをもつ光電子増倍管でのカスケード増倍過程における雑音指数は以下の式で与えられます。

$$F = (1/\alpha) \cdot (1 + 1/\delta_1 + 1/\delta_1\delta_2 + \dots + 1/\delta_1\delta_2 \dots \delta_n) \dots \dots \dots \text{(式 4-25)}$$

ここで α は収集効率(4.2.2 参照)、 δ_1 、 δ_2 、 \dots 、 δ_n は各段の二次電子放出比です。さらに $\alpha = 1$ 、 δ_1 、 δ_2 、 δ 、 \dots 、 $\delta_n = \delta$ とおけば、式 4-25 は以下の式に簡略化されます。

$$F \approx \delta / (\delta - 1) \dots \dots \dots \text{(式 4-26)}$$

したがって、交流分 i_p はこの雑音指数を加味すると以下の式で表現されます。

$$i_p = \mu \cdot (2 \cdot e \cdot I_k \cdot B \cdot F)^{1/2} \dots \dots \dots \text{(式 4-27)}$$

ここで、 μ は電流増倍率、 e は電子の電荷、 I_k は陰極電流、 B は測定系の周波数帯域幅です。これと式 4-25 から

$$i_p = \mu \cdot \{2 \cdot e \cdot I_k \cdot B \cdot (1/\alpha) \cdot (1 + 1/\delta_1 + 1/\delta_1\delta_2 + \dots + 1/\delta_1\delta_2 \dots \delta_n)\}^{1/2} \dots \dots \dots \text{(式 4-28)}$$

一方、平均陽極電流 I_p は以下の式で表されます。

$$I_p = I_k \cdot \alpha \cdot \mu \dots \dots \dots \text{(式 4-29)}$$

式 4-28、式 4-29 から

$$\begin{aligned} \text{SN比} &= I_p / i_p \\ &= \left(\frac{I_k \alpha}{2eB} \cdot \frac{1}{1 + 1/\delta_1 + 1/\delta_1\delta_2 + \dots + 1/\delta_1\delta_2 \dots \delta_n} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

これを式 4-26 で簡略化すると

$$\text{SN比} \approx \left(\frac{I_k}{2eB} \cdot \frac{1}{\delta / (\delta - 1)} \right)^{1/2} \dots \dots \dots \text{(式 4-30)}$$

この式から、SN比は陰極電流 I_k の平方根に比例し、帯域幅 B の平方根に反比例することがわかります。

ショット雑音の影響を少なくし、良好な SN比を得るには以下の点への注意が望まれます。

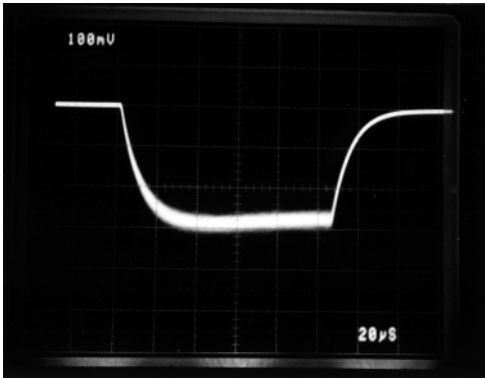
- (1) 使用する波長域で、できるだけ量子効率の高い光電子増倍管を使用する。
- (2) 集光効率を良くし、できるだけ損失のないように光を光電子増倍管に導く。
- (3) 集光に都合の良い形状の光電子増倍管を使用する。
- (4) 観測系に支障のないかぎり帯域幅を狭くする。

ここで式 4-30 に、一般的な光電子増倍管の場合に得られる $\delta = 6$ を代入すると、 $\delta / (\delta - 1)$ は 1.2 となり 1 に近い値を取ります。そのため増倍過程での雑音を無視すれば、およその SN比は以下のように書きかえられます。

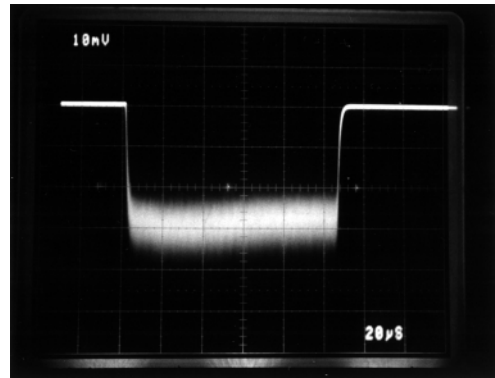
$$\text{SN比} = (I_k / 2eB)^{1/2} \approx 1.75 \times 10^3 \sqrt{\frac{I_k(\mu\text{A})}{B(\text{MHz})}} \dots \dots \dots \text{(式 4-31)}$$

図 4-43 は、ある条件において、光量および負荷抵抗を変えた場合の、出力電圧波形を観察したもので、式 4-31 の関係が確認できます。

(a) $R_L = 20\text{ k}\Omega$



(b) $R_L = 2\text{ k}\Omega$ ((a)に比べ帯域が10倍)



(c) 光量を(b)の10倍にしたとき

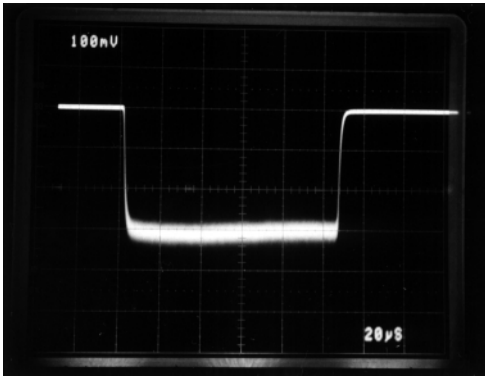


図 4-43 R329 の光量、負荷抵抗を変えたときの SN 比の変化

以上は暗電流を無視した場合であり、本来の SN 比は陰極等価暗電流 (I_d) と増幅器回路によるノイズ電流 (N_A) の寄与を考慮し、式 4-30 は下記のように書き換えられます。

$$\text{SN比} = \frac{I_k}{(2eB \cdot \delta / (\delta - 1) \cdot (I_k + 2I_d) + N_A^2)^{1/2}} \dots\dots\dots \text{(式 4-32)}$$

また増幅器回路のノイズが無視 ($N_A=0$) できるとき、SN 比は次のようになります。

$$\text{SN比} = \frac{I_k}{(2eB \cdot \delta / (\delta - 1) \cdot (I_k + 2I_d))^{1/2}} \dots\dots\dots \text{(式 4-33)}$$

ここで陰極電流 I_k は以下のパラメータを使い、 $I_k = \eta \cdot e \cdot P \cdot \lambda / hc$ で表わされます。

- | | |
|--------------------|---------------------|
| I_k : 陰極電流(A) | e : 電子の電荷(C) |
| λ : 波長(m) | h : プランク定数(J·s) |
| c : 光速(m/s) | η : 量子効率 |
| P : 光量(W) | B : 帯域(Hz) |
| δ : 二次電子放出比 | N_A : 増幅回路のノイズ(A) |
| I_d : 陰極等価暗電流(A) | |

式4-33で $F=(\delta /(\delta -1))$ とおくと

$$\begin{aligned} \text{SN比} &= \frac{I_k}{(2 \cdot e \cdot (I_k + 2I_{da}) F \cdot B)^{1/2}} = \frac{I_k}{(2e(I_{ph} + 2I_{da}) F B \cdot \mu^2)^{1/2}} \\ &= \frac{I_k}{\sqrt{2e(I_p + 2I_{da}) \mu F B}} = \frac{I_k}{\sqrt{2e(S_p P_i + 2I_{da}) \mu F B}} \end{aligned}$$

ただし、 I_p は陽極信号電流、 I_{da} は陽極暗電流

また、 $I_p = I_h \cdot \mu = S_p \cdot P_i$

S_p は陽極放射感度、 P_i は入射光パワー

ここで SN 比 = 1 とおくと

$$S_p P_i =$$

$$(S_p P_i)^2 - 2e(S_p P_i + 2I_{da}) \mu F B = 0 \quad \text{を与える変数 } P_i \text{ を求めると、}$$

$$S_p P_i = \frac{-(-2eS_p \mu F B) \pm \sqrt{(-2eS_p \mu F B)^2 - 4S_p^2(-4eI_{da} \mu F B)}}{2S_p^2}$$

したがって、

$$P_i = \frac{e \mu F B}{S_p} + \frac{\sqrt{(e \mu F B)^2 + 4eI_{da} \mu F B}}{S_p}$$

となり、検出限界が求められます。

これをプロットしたものが図4-44で、暗電流のみを考慮した ENI (式4-21による) と比較すると、特に高帯域で違いが顕著になります。したがって、検出限界は回路系の周波数帯域 B が小さい場合 (約数 kHz まで) については ENI で近似できますが、高周波数領域では信号光に起因するショットノイズ成分が支配的になります。

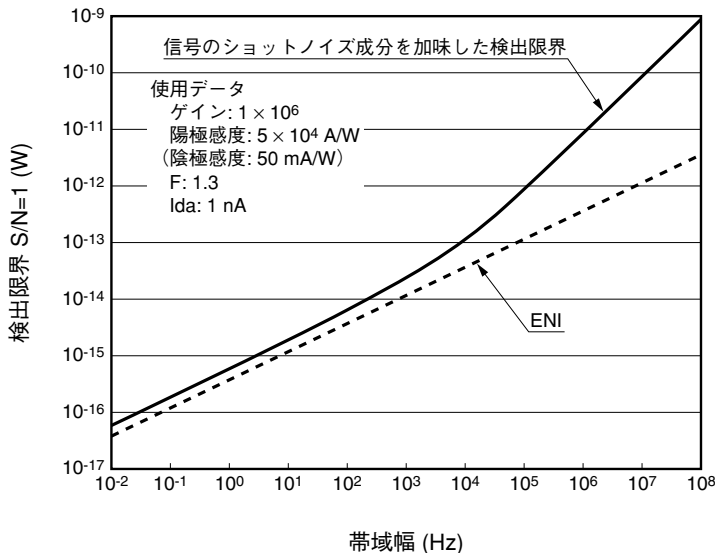


図4-44 信号のショットノイズ成分を加味した検出限界

尚、ENIは回路系の周波数帯域Bが小さい場合(約数kHzまで)については意味を持ちますが、高帯域では信号光に起因するショットノイズが支配的となるため意味を持たなくなります。(第6章 光子計数法 参照)

4.3.8 アフタパルス

シンチレーション光計数やレーザーパルスの検出など、光電子増倍管でパルス計測を行う場合、信号に対応する出力パルスの後に疑似パルスが観測される場合があります。このような出力パルスをアフタパルスと呼びます。これは、強いパルス光の後の微弱な信号を観測する際に邪魔になったり、シンチレーションカウンティング(第7章参照)でのエネルギー分解能の低下、パルス計数測定において誤差となったりします。

アフタパルスの種類

アフタパルスには信号パルス直後(数ns~数十ns後)に発生する速い成分と、更に遅れて数百ns~数 μ sまでに分布する遅い成分があり、各々原因は異なります。一般にアフタパルスというと、主に後者を指します。

速い成分の多くは、第一ダイノードでの弾性散乱電子によって起こるものです。第一ダイノード付近に特殊な電極を設けることで発生確率を約十分の一にした光電子増倍管もあります。しかし一般には時間遅れが小さいので、後続の信号処理回路の時定数に隠れてしまい問題とならない場合が多いのですが、速い蛍光寿命などを時間相関フォトンカウンティング法によって計測しようとするとき、レーザーレーダ(LIDAR)、自己相関法による蛍光計測・粒子計測などでは重要です。

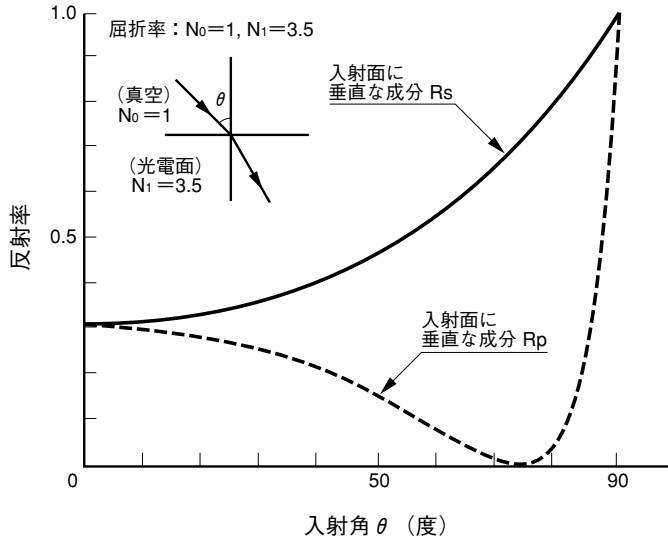
一方遅い成分は、光電子増倍管の残留ガスが電子との衝突によってイオン化され、このうちの正イオンが光電面などに戻る(イオンフィードバック)により、多数の光電子を発生させるために起ります。またアフタパルスの大きさもイオンの種類、発生場所によって異なるため、信号パルスからの遅れも、通常数百nsから数 μ sにわたり、光電子増倍管の印加電圧にも依存します。特にヘリウムガスは石英窓を容易に透過するためアフターパルスの要因になり易く、使用環境に注意が必要です。なお、エージング(第4章4.3.4参照)を行うことで一時的にアフタパルスを減少させることができますが、恒久的なものではありません。

実際の計測では、アフタパルスの頻度あるいは電荷量が問題となることがあります。光電子増倍管の印加電圧、ゲインが高い場合、発生イオン数が同じでも出力電荷量は大きくなる傾向があります。一方、フォトンカウンティングなどのパルス計数法では、あるしきい値を超えたアフタパルスの頻度のみが問題となります。

アフタパルスは信号から遅れて出ますが、電極構造によっては信号の直前に光電面の透過光による疑似パルス(プリパルス)が観測されることもあります。しかし信号に近接しており波高値も小さいため、一般には問題となることはほとんどありません。

4.3.9 偏光特性

光の偏光を測定する場合、光電子増倍管の持つ偏光特性⁴³⁾⁴⁴⁾を考慮する必要があります。これは光電子増倍管が偏光特性を有し、偏光面の違いによって感度が変わることがあるためです。また、一般に分光器などの光学系にて偏光を発生する場合があります。入射光が光電面に斜め入射したとき、偏光成分により反射率が変わるため見かけの感度が変化することが主な原因です。図4-45に入射面に平行な成分(P成分)と垂直な成分(S成分)の入射角を変えた時の反射率を示します。この図では吸収係数はゼロと仮定した時の計算例であるため、実際の光電面ではもう少し複雑となります。



THBV3_0445JA

図 4-45 反射率の角度依存性

いま入射光の偏光面が入射面の垂線に対して角度 θ を持つとき、光電流 I は次式で表されます。

$$I\theta = I_s \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta = \frac{1}{2} (I_p + I_s) \left(1 - \frac{I_p - I_s}{I_p + I_s} \cdot \cos^2 \theta \right) \quad \dots\dots\dots (式 4-34)$$

但し、

- I_s: 光電面に垂直な成分による光電流
- I_p: 光電面に平行な成分による光電流

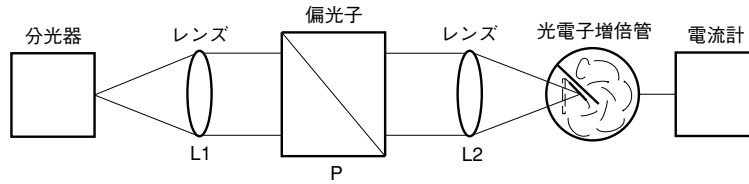
ここで、

$$I_0 = \frac{I_p + I_s}{2}, P = \frac{I_p - I_s}{I_p + I_s} \quad \dots\dots\dots (式 4-35)$$

と置き、上式に代入すると、下式が得られます。

$$\theta = I_0 (1 - P \cdot \cos^2 \theta) \quad \dots\dots\dots (式 4-36)$$

この P は偏光度と呼ばれ、光電子増倍管の偏光特性を表しており、通常図 4-46 のような光学系で測定します。



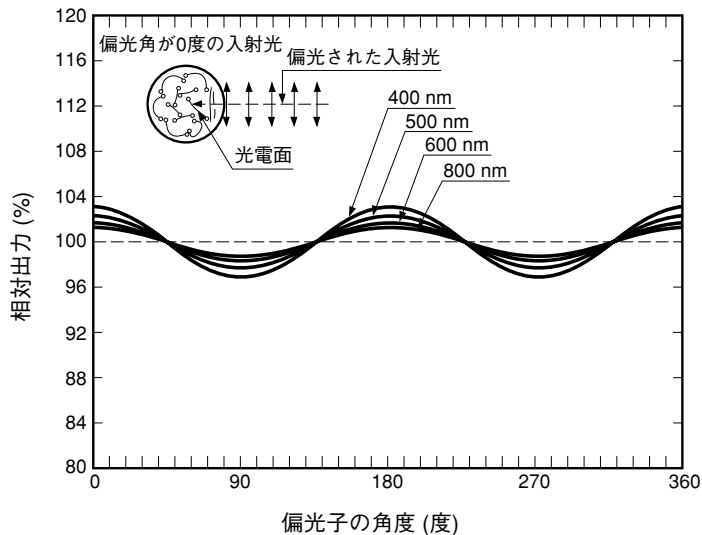
THBV3_0446JA

図 4-46 偏光特性測定回路光学系

分光器からの単色光は L_1 (コリメータレンズ)により平行光となり、偏光子(P)で直線偏光化されます。そしてその光は L_2 (コンデンサレンズ)で集光され光電子増倍管に入射します。偏光特性は、偏光子の回転角に応じた光電子増倍管出力の変化を測定することにより得られます。

この場合、光源の偏光成分を除いておく必要があります。これには偏光子の前に磨りガラスなどの拡散板を入れる方法と、光電子増倍管を光軸に対して90度回転させ、0度と90度の2つの測定値から補償する方法があります。

このような測定法で得られた反射型光電面の光電子増倍管の偏光特性の例を図4-47に示します。原理的には、光電面に対し斜めに入射光が入った時、この特性が生じます。また、透過型光電面に垂直に入射させた時は偏光度Pの値はほとんどありません。



THBV3_0447JA

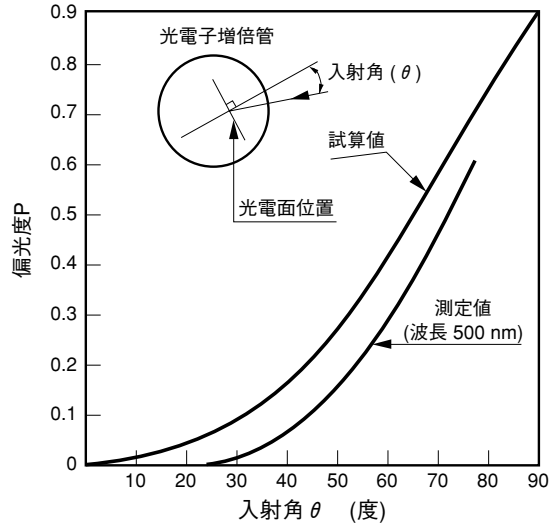
図 4-47 サイドオン型光電子増倍管の偏光特性例

反射型光電面の光電子増倍管の場合、光電面が入射窓とある角度を持って配置されています。そのため通常の光入射では偏光特性が表れます。図4-48に反射型光電面の光電子増倍管の入射方向を変えた時の測定例を示しますが、入射光が光電面に対し垂直に近くなるに従って偏光特性Pは小さくなっていくのがわかります。

反射型光電面の光電子増倍管の偏光特性は一般に10%以下ですが、偏光特性の対策を施したものは3%以下と低くなっています。ガリウムヒ素(GaAs)光電面など単結晶をもつものは反射率が高いため、アルカリ-アンチモン系の光電面と比べると高く、20%前後です。

最大感度を与える方位は管軸に直角な成分(P成分)で逆に感度が最小となる方位は管軸に平行な成分(S成分)で、このことは管球の種類、波長に依存しません。これは図4-45にみられるように、入射光の斜め入射によりS成分の反射率が上がります。一方P成分は減少するためと推定されます。また一般に反射率は波長が長くなるほど小さくなるため、図4-47でみられる様に長波長になるほど偏光度Pは小さくなります。

偏光特性がどうしても無視できない場合には、光電子増倍管の直前に磨りガラスなどの拡散板を入れるか、光電子増倍管の入射窓を磨りガラス状にする方法で影響を軽減できます。



THEV3_0448JA

図4-48 偏光特性の入射角度依存性

第4章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株): 光電子増倍管と関連製品.
- 2) 和田正信: 光電装置. 近代科学社(1970).
- 3) T.Hirohata and Y.Mizushima: Japanese Journal of Applied Physics. 29, 8, August, 1527(1990).
- 4) T.Hirohata, T.Ihara, M.Miyazaki, T.Suzuki and Y.Mizushima: Japanese Journal of Applied Physics. 28, 11, 2272(1989).
- 5) W.A.Parkhurst, S.Dallek, and B.F.Larrick, J.Electrochem.: Soc 131, 1739(1984).
- 6) S.Dallek, W.A.Parkhurst, and B.F.Larrick, J.Electrochem.: Soc 133, 2451(1986).
- 7) R.J.Cook: Phys. Rev. A25, 2164; 26, 2754(1982).
- 8) H.J.Kimble and L.Mandel: Phys. Rev. A30, 844(1984).
- 9) M.Miyao, T.Wada, T.Nitta and M.Hagino: Appl. Surf. Sci. 33/34, 364(1988).
- 10) Tailing Guo, J.Vac: Sci. Technol. A 7, 1563(1989).
- 11) Huairong Gao, J.Vac: Sci. Technol. A. 5, 1295(1987).
- 12) C.A.Sanford and N.C.MacDonald, J: Vac. Sci. Technol. B 6.2005(1988).
- 13) C.A.Sanford and N.C.MacDonald, J: Vac. Sci. Technol. B 7.1903(1989).
- 14) M.Domke, T.Mandle, C.Laubschat, M.Prietsch, and G.Kaindl: Surf. Sci. 189/190, 268(1987).
- 15) D.Rodway: Surf. Sci. 147, 103(1984).
- 16) M.Niigaki, T.Hirohata, T.Suzuki, H.Kan and T.Hiruma: Appl. Phys. Lett.71(17)27,Oct,1997
- 17) 中村公嗣, 久嶋浩之: 応用物理 第67巻 第5号 (1998)
- 18) 作花濟夫: ガラス非晶質の科学. 内田老鶴圃(1983).
- 19) 泉谷徹郎: 新しいガラスとその物性. 経営システム研究所(1984).
- 20) 土橋正二: ガラスの化学. 講談社(1972).
- 21) 森谷太郎, 成瀬 省, 功刀雅長, 田代 仁: ガラス工学ハンドブック. 朝倉書店(1964).
- 22) 作花濟夫, 境野照夫, 高橋克明: ガラスハンドブック. 朝倉書店(1984).
- 23) 電子機械工業会規格 ET-61A 1969.5.8.
- 24) IEEE STD 398-1972.
- 25) IEC PUBLICATION 306-4(1971).
- 26) 久米英浩, 木下勝之, 玉井尚登, 山崎: 分光研究. 38, 5(1989).
- 27) 林 達郎: "PHOTOMULTIPLIER TUBES FOR USE IN HIGH ENERGY PHYSICS"
浜松ホトニクス(株): APPLICATION RES-0791-02
- 28) 浜松ホトニクス(株): シンチレーション用光電子増倍管の使い方, No.77-50 Apr(1977).
- 29) T.H.Chiba and L.Mmandel J: Opt.Soc.Am. B, 5, 1305(1988).
- 30) D.P.Jones: Appl.Opt. 15, 4(1976).
- 31) D.E.Persyk: IEEE Trans. Nucl. Sci. 38, 128(1991).

- 32) 松尾正之：電気工学基礎講座5 電子回路．朝倉書店．
- 33) D.V.O'Connor, D.Phillips 平山 訳：ナノ・ピコ秒の蛍光測定と解析法．108, 学会出版センター (1988).
- 34) G.F.Knoll: "RADIATION DETECTION and MEASUREMENT" John Wiley & Sons, Inc.(1979). 木村, 阪井 共訳：放射線計測ハンドブック第2版．285, 日刊工業新聞社(1991).
- 35) C.E.Miller et al: IEEE Trans. Nucl.Sci.NS-3, 91(1956).
- 36) 田中 他 共訳：微弱放射能測定技術．40, コロナ社(1968).
- 37) 理化学辞典．岩波書店．
- 38) G.A.Morton et al: IEEE Trans.Nucl.Sci.NS-14 No.1, 443(1967).
- 39) R.Staubert et al: Nucl.Instrum. & Methods 84, 297(1970).
- 40) S.J.Hall et al: Nucl.Instrum. & Methods 112, 545(1973).
- 41) 浅井, 稲葉：画像技術7月号．15(1971).
- 42) 林 達郎：分光研究．22, 4, 233(1973).
- 43) S.A.Hoenig and A.Cutler III: Appl.Opt.5, 6, 1091(1966).
- 44) H.Hora: Phys.Stat.Soli Vol(a), 159(1971).

第5章

光電子増倍管の使い方および接続回路

この章では、実際に光電子増倍管を正しく動作させるための基本回路と必要なアクセサリについてその使い方¹⁾の説明をします。

5.1 電圧分割（デバイダ）回路

5.1.1 デバイダ回路の基礎

光電子増倍管を動作させるためには陰極(K)と陽極(P)(アノードまたはプレート)の間に 500 ～ 3000 V 程度の高電圧を印加するとともに、光電子集束電極(F)、ダイノード群、また種類によっては加速電極(ACCELERATOR)に各々電位勾配を持たせた電圧を供給する必要があります。この方法として、基本的には図5-1のように独立した電源を多数用いる形が考えられますが、これは現実的ではありません。

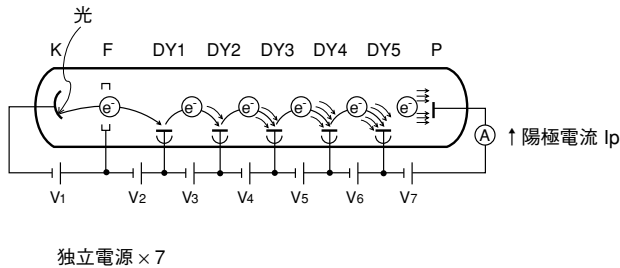
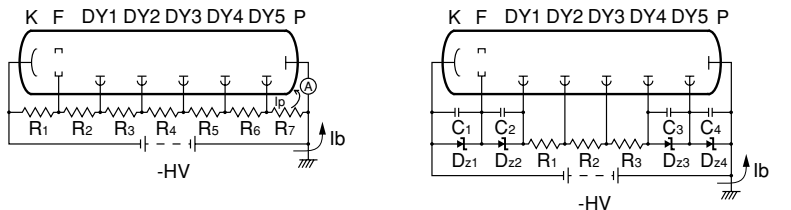


図 5-1 光電子増倍管の動作概念図

THBV3_0501JA

実際には図5-2(1)に示すように、陰極と陽極の間を複数の抵抗（100 kΩ ～ 1 MΩ）により分圧して、各電極に規定の電圧を与える方法がとられます。また、(2)のように抵抗以外にツェナーダイオードを含めて分圧を作る方法もあります。これらの回路を電圧分割回路(Voltage Divider Circuit)、一般的にはデバイダ回路と称します。



(1) 抵抗のみを使用した回路

(2) 抵抗とツェナーダイオードを使用した回路

THBV3_0502JA

図 5-2 デバイダ回路例

図5-2(1)回路中の I_b はデバイダ回路を流れる電流でデバイダ電流と呼ばれ、後述の出力直線性と深い関係があります。 I_b は印加電圧 $V (= -HV)$ をデバイダ抵抗の和で割った値すなわち次式(5-1)で表されます。

$$I_b = \frac{V}{(R_1 + R_2 + \dots + R_6 + R_7)} \dots\dots\dots \text{式 5-1}$$

図(2)中のツェナーダイオード (D_z) は陰極—陽極間印加電圧の大小にかかわらず、ツェナーダイオードの付けられている電極間電圧を一定に保ち、光電子増倍管の動作を安定させるためのものです。式 (5-1) と同じように I_b を求める場合は、

$$I_b = \frac{V - (D_{z1} \sim 4 \text{に発生する電圧の和})}{R_1 + R_2 + R_3} \dots\dots\dots \text{式 5-2}$$

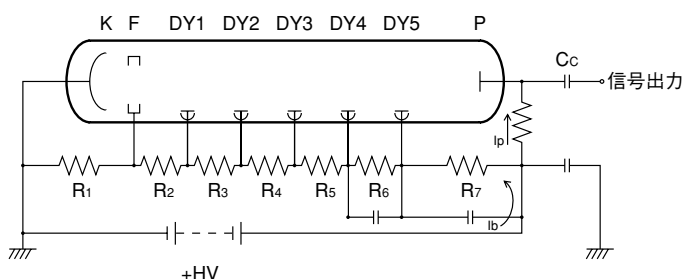
で表されます。

ツェナーダイオードに並列接続されているコンデンサー C_1, C_2, C_3, C_4 はツェナーダイオードが発生する雑音を軽減するためのものです。この雑音はツェナーダイオードを流れる電流が不十分なとき顕著になり、光電子増倍管出力のSN比に影響を及ぼすため注意が必要です。

5.1.2 陽極側接地と陰極側接地

一般的には電流計や、電流・電圧変換用の演算増幅器(以下、オペアンプという)回路をはじめとする外部回路と光電子増倍管の陽極との電位差をなくして接続を容易にするため、図5-2のように陽極側を接地して陰極に負高圧(-HV)を印加する方法がとられます。しかし、この方法において、光電子増倍管の側管に接地電位の金属製ホルダやハウジング、磁気シールドケースなどを接近させたり接触させたりした場合には、光電子増倍管内部の電子が接地電位のガラス側管内壁に衝突して発光し、雑音を著しく増加させることがあります。またヘッドオン型の光電子増倍管の場合、陰極付近の側管あるいは面板を接地すると、ガラスのわずかな導電性のために陰極と接地の間に微少電流が流れて光電面が電気的な変化を受け、著しい劣化を招く危険性があります。このためハウジングの設計や、電磁シールドケースの使用には細心の注意が必要となります。上記の理由により、接地電位の電磁シールドケース内に光電子増倍管を固定する目的で、側管回りにソフトテープなどの緩衝材を巻く場合でも、絶縁性の優れたものを選択することが非常に大切となります。

以上の問題は側管回りに黒色導電性塗料を塗布して陰極電位に接続し、さらに安全のために絶縁被覆を施した「HAコーティング」により解決します。しかしシンチレーションカウンティングにおいては、多くの場合、接地されたシンチレータを光電子増倍管の面板と密着させて使用するため、一般的には図5-3のような陰極側接地・正高圧印加方式が採用されています。その場合には陽極に印加されている正高圧(+HV)と信号とを分離するカップリングコンデンサ(C_c)を使用するために、直流信号を取り出すことは不可能となります。またこの回路をシンチレーションカウンティングなどで使用する場合、計数率が高くなるとベースラインシフトの問題を生じたり、カップリングコンデンサに漏洩電流があると雑音が発生させるため注意を要します。

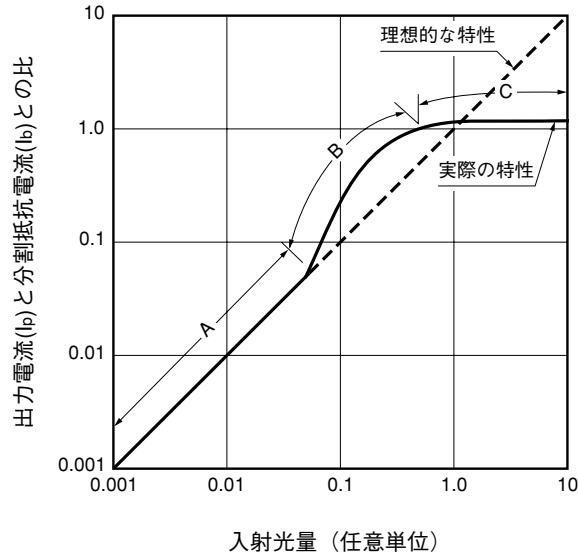


THBV3_0503JA

図 5-3 陰極側接地デバイダ回路

5.1.3 デバイダ電流と出力直線性

陽極側、陰極側いずれの接地法においても、また直流、パルスいずれの動作においても、陰極への入射光量を増加して出力電流を増加させた場合、図5-4のように入射光量と出力電流との関係はある電流値以上で理想的な直線状態から逸脱し(B部)、最終的には飽和を生じます(C部)。

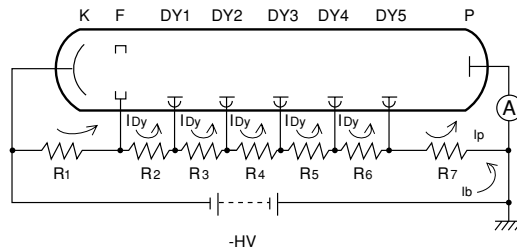


THBV3_0504JA

図5-4 出力直線性

(1) 直流動作時の出力直線性と直線性対策

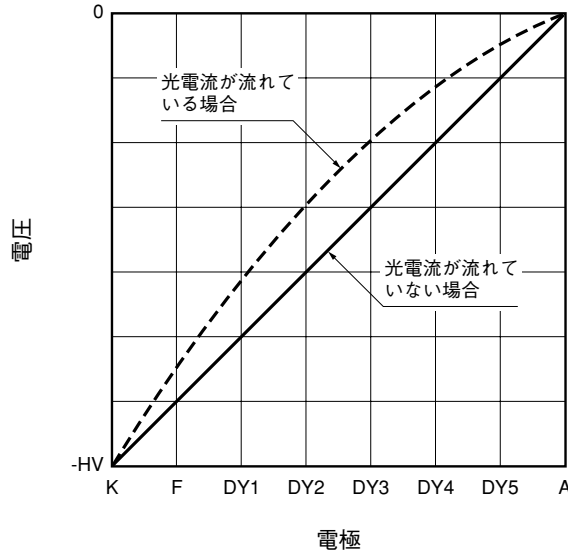
図5-5に示す基本回路を用いて光電子増倍管より直流出力を得る場合、実際にデバイダ抵抗内に流れる電流は、 R_7 に流れる電流で言えば、デバイダ電流 I_b と P - DY_5 - R_7 - P のループを I_b とは逆方向に流れる陽極電流 I_p との差であり、他のデバイダ抵抗の場合には I_b と各ダイノードからデバイダ抵抗に逆方向に流れ込むダイノード電流 I_{Dy} との差になります。この陽極電流やダイノード電流によるデバイダ電流の相殺、そしてそれに伴う電極間電圧の低下は、ダイノード電流の大きな後段になるほど顕著となります。



THBV3_0505JA

図5-5 光電子増倍管の基本動作回路

この効果は陽極出力電流が小さい場合には無視できますが、入射光量が増加して陽極および各ダイノードに流入する電流が増大した場合には、各ダイノードへの電圧配分を図5-6に示されるように大きく変化させます。陰極-陽極間電圧は高圧電源により一定に保たれているため、後段で低下した電極間電圧は結果的に前段の電極間電圧の増加をもたらします。



THBV3_0506JA

図5-6 光電流の各電極電圧への影響

増倍後の電子流による電極間電圧の低下は、最終ダイノード（図5-5の場合は Dy_5 ）と陽極間に最も顕著に現れます。しかし、この部分の電圧は最終ダイノードの二次電子増倍率には寄与しないため、最終段以前への電圧配分のかたよりは、結果として図5-4のB部に見られるように、総合的なゲインの上昇となって現れます。さらに入射光量を増加して陽極電流が増大した場合、最終ダイノードと陽極間の電圧が低下するに伴い、陽極への二次電子収集効率が低下して、図5-4のC部の様な飽和現象を生ずるに至ります。

光電子増倍管の種類およびデバイダ回路によっても異なりますが、直流出力を得る場合、一般的に出力電流の実用最大値はデバイダ電流の $1/20 \sim 1/50$ とされています。±1%以内の直線性が必要であれば、最大出力はデバイダ電流の $1/100$ 以下に抑えなければなりません。

最大直線出力を大きく取るためには、図5-2(2)のように最終ダイノードと陽極間、および必要に応じてその前1～2段にもツェナーダイオードを入れる方法とデバイダ抵抗の値を低くしてデバイダ電流値を大きくする方法とがあります。ただし前者の場合、デバイダ電流が不十分であるとツェナーダイオードから雑音が発生して出力に悪影響を及ぼすことがあります。そのためデバイダ電流を十分大きくとる、雑音吸収用にツェナーダイオードと並列に周波数特性のすぐれたセラミックコンデンサを接続する、後続の回路の帯域を必要最小限に狭めるなどの対策が必要となります。また、後者の場合、デバイダ抵抗が光電子増倍管の直近にあると、抵抗の発熱によって光電子増倍管の温度が上昇し、暗電流を増加させたり出力を不安定にする恐れがあります。さらに高圧電源の容量が高いものが必要になるため、デバイダ電流を必要以上に増やすのは得策ではありません。そのため高い直流出力が要求される時は最終段あたりの数段の抵抗の代わりに独立した電源ブースタを用いることもあります。

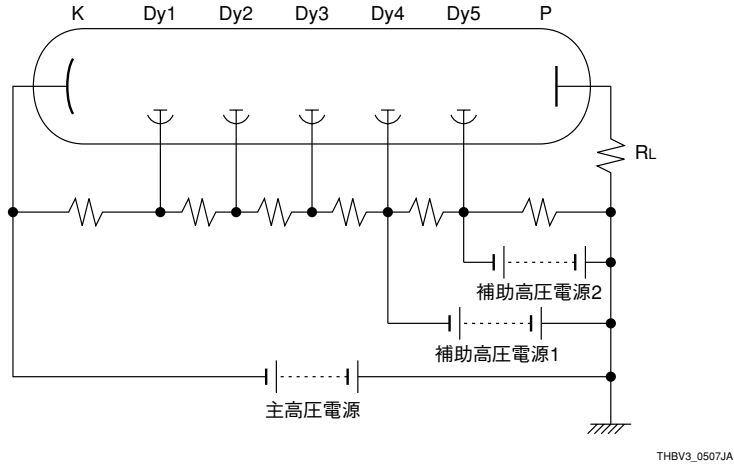


図5-7 ブースタ回路

(2) パルス動作時の出力直線性と直線性対策

光電子増倍管を図5-2(1)あるいは図5-3のような抵抗のみを使用したデバイダ回路でパルス動作させた場合にも、最大直線出力は直流動作時と同様の理由により、デバイダ電流の数十分の1に制限されてしまいます。それに対して図5-8(1)および(2)に示すように、最後の数段にデカップリングコンデンサを接続して、信号パルスの形成期間中に光電子増倍管に電荷を補給し、最終ダイノードと陽極間の電圧降下を抑制すればパルス直線性を大幅に改善できます。パルス幅が十分に短くてデューティ比が小さな場合、この方法によればデバイダ電流には因らず、第4章で述べた光電子増倍管内のダイノードの空間電荷により飽和するピーク電流まで取り出すことができます。そのためデバイダ電流の数千倍以上のピーク出力電流を得ることも可能となります。

デカップリングコンデンサの使用方法には図5-8のとおり直列法と並列法の2種類がありますが、(2)の並列法には高耐圧のコンデンサが必要となるため、一般的には(1)の直列法が用いられます。

ここで図5-8(1)の回路を例にとり、コンデンサの値を求める手順を以下に述べます。

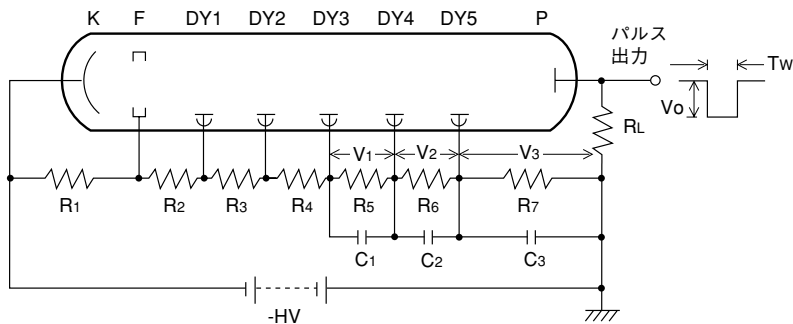
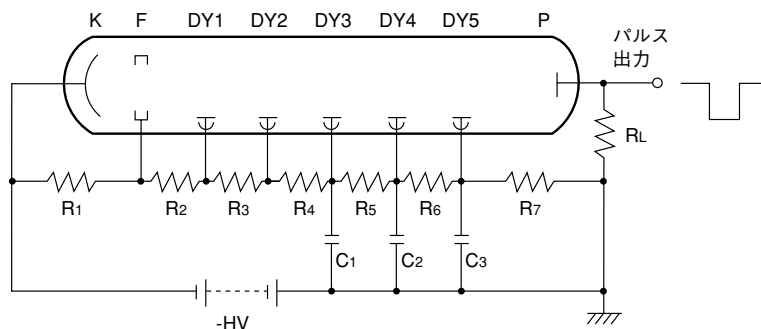


図5-8 (1)直列デカップリングコンデンサを追加したデバイダ回路



THBV3_0508JA

図 5-8 (2)並列デカップリングコンデンサを追加したデバイダ回路

まず必要とするパルス出力のピーク電圧を V_0 、パルス幅を T_w 、負荷抵抗を R_L とすると、1 回当りの出力パルス電荷量 Q_0 は次式(5-3)で表されます²⁾。

$$Q_0 = T_w \frac{V_0}{R_L} \dots\dots\dots (式 5-3)$$

ここで Q_0 を使ってデカップリングコンデンサ $C_1 \sim C_3$ の容量を求めてみることにします。 C_3 に蓄えられる電荷量を Q_3 としますと、 $\pm 3\%$ 程度以上の出力直線性を期待するためには一般的に

$$Q_3 \geq 100 Q_0 \dots\dots\dots (式 5-4)$$

の関係が成立する必要があるため、 $Q=CV$ の関係から C_3 は次式(5-5)で表されます。

$$C_3 \geq 100 \frac{Q_3}{V_3} \dots\dots\dots (式 5-5)$$

次に C_2 、 C_1 の計算をします。

光電子増倍管のダイノード 1 段当りの二次電子放出比 δ は段間電圧を 100 V としますと通常 3～5 ですが、段間電圧が 70～80 V に下がる場合も考慮して、ここでは各ダイノード間の δ を 2 として計算しますと、 C_2 、 C_1 に蓄えられる電荷量 Q_2 、 Q_1 は、

$$Q_2 = \frac{Q_3}{2} \quad Q_1 = \frac{Q_2}{2} = \frac{Q_3}{4}$$

となり、 C_2 、 C_1 の容量は C_3 の場合と同様に次のとおり求められます。

$$C_2 \geq 50 \frac{Q_0}{V_2}$$

$$C_1 \geq 25 \frac{Q_0}{V_1}$$

さらに大電流出力を取り、 DY_3 以前の段にもデカップリングコンデンサを挿入する必要がある場合にも同様の計算を継続すればよいわけです。

ここで一例として、出力パルスのピーク電圧 $V_0=50\text{mV}$ 、パルス幅 $T_w=1\ \mu\text{s}$ 、負荷抵抗 $R_L=50\ \Omega$ 、段間電圧 V_3, V_2, V_1 をそれぞれ $100\ \text{V}$ として各コンデンサの値を求めてみます。まず出力パルス 1 個当りの電荷量は次のように求められます。

$$Q_0 \geq \frac{50\ \text{mV}}{50\ \Omega} \times 1\ \mu\text{s} = 1\ \text{nC}$$

デカップリングコンデンサ C_3, C_2, C_1 に必要な値はそれぞれ次のように計算されます。

$$C_3 \geq 100 \frac{1\ \text{nC}}{100\ \text{V}} = 1\ \text{nF}$$

$$C_2 \geq 50 \frac{1\ \text{nC}}{100\ \text{V}} = 0.5\ \text{nF}$$

$$C_1 \geq 25 \frac{1\ \text{nC}}{100\ \text{V}} = 0.25\ \text{nF}$$

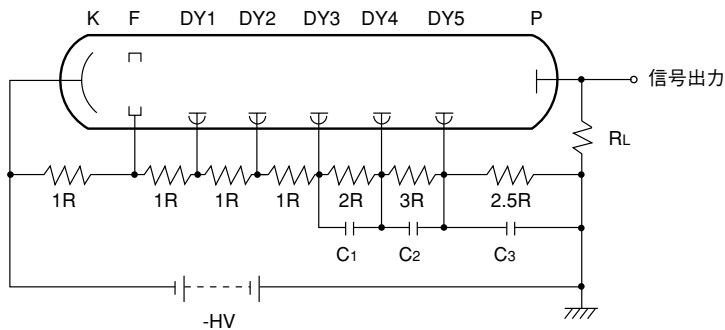
上記のコンデンサの容量は最低限必要な量で一般にはこの10倍ぐらい高い容量のものを使い余裕を持った設計をするのが望ましいとされます。なお、出力パルス電流がさらに大きくなった場合は、 $C_1 \sim C_3$ の値を大きくするとともに、必要に応じてデカップリングコンデンサを接続する段数を増やさなくてはなりません。上記の対策を施しても、直流出力時と同様にパルス動作でも出力電流の平均値がデバイダ電流の $1/20 \sim 1/50$ 以上では出力直線性の劣化を生ずるため、出力ピーク電流が低くても計数率が高い場合には注意を要します。

5.1.4 デバイダ回路の電圧配分

(1) 陽極および後段の電圧配分

デカップリングコンデンサを使用してパルス出力の直線性対策を十分に施した状態でも、段間電圧を固定したままパルス光入力を増加していくと、ある値で出力の飽和が生じます。これは電極間の電子密度が増大して空間電荷の影響が現われ、電子流が妨げられるためです。この飽和電流値は特に光電子増倍管の最終段付近のダイノードと陽極の電極構造、および電極間の印加電圧によって異なります。この効果に対しては、電子密度の高くなる最終の2～4段の電圧を標準電圧配分より高くなるように設定して電極間の電位勾配を高め、空間電荷の影響に打ち勝つようにする対策が必要となります。一般的には前段から後段に向かって段間電圧を上げていく、いわゆる「テーパーデバイダ回路」が採用されますが、電極間耐圧には十分な注意を払わなければなりません。

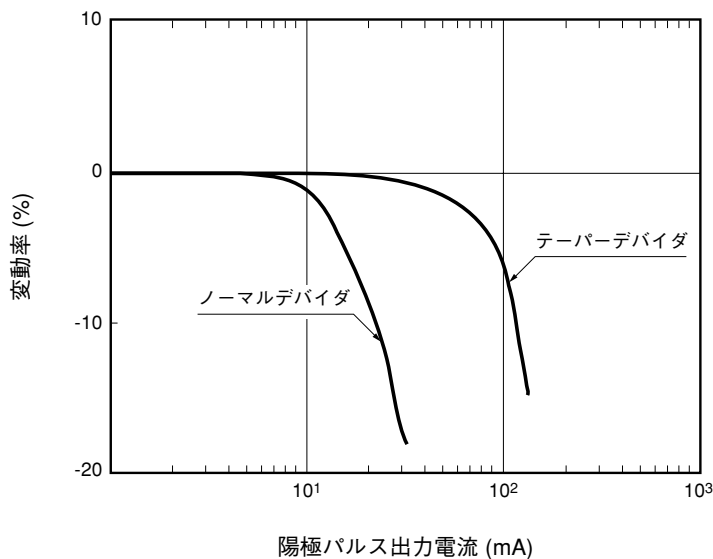
5段ダイノードの光電子増倍管を使ってテーパーデバイダ回路の一例を図5-9に示しますが、 Dy_5 —陽極間の電圧を Dy_4 — Dy_5 間の電圧より低くしてあります。その理由は最終ダイノード—陽極間は一般的に電極間隔が狭く、比較的低電圧でも十分な電位勾配が得られるためです。



THBV3_0509JA

図5-9 デカップリングコンデンサとテーパードバイダ回路によるパルス出力直線性対策

最適なパルス直線（リニアリティ）特性の得られるデバイダ電圧配分比は、光電子増倍管の種類によって異なります。高エネルギー物理学用には高いパルス出力を要求される場合が多いため、高エネルギー用光電子増倍管カタログには推奨の高パルスリニアリティ用デバイダ電圧配分比（テーパードバイダ）と最大出力電流値が記載されています。これらテーパードバイダを用いると通常の（電圧分割回路）デバイダと比べ5～10倍直線性が向上します。図5-10はテーパードバイダと通常のものでパルスリニアリティ特性を測定したものです。テーパードバイダを使用することによっておよそ10倍パルスリニアリティ特性が改善されているのがわかります。また、これらのデバイダを使うと通常のデバイダと比べて陽極感度が1/3～1/5前後に下がるため印加電圧を上げるように調節する必要があります。



パルス幅：50 (ns)
 繰り返し周波数：1 [kHz]
 印加電圧：1500 [V]

THBV3_0510JA

図5-10 テーパードバイダを用いたリニアリティ特性

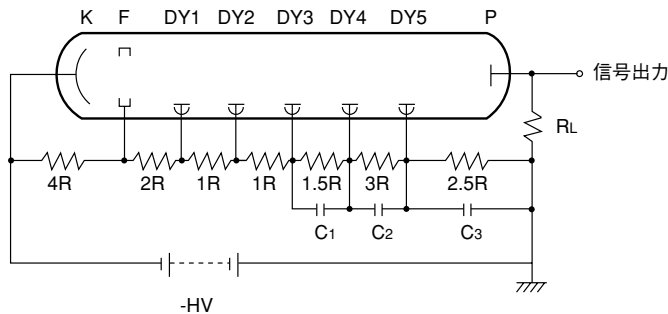
なお、以上のデカップリングコンデンサおよびテーパーデバイダ回路によるパルス出力直線性対策は、陰極側接地・正高圧印加回路にも全く同様に適用できます。

(2) 陰極および前段の電圧配分

前項に述べたように後段および陽極付近の電圧分割比は出力直線性を左右する重要なものです。これに対し、陰極から集束電極および第一ダイノード迄の電圧配分は、光電子の収集効率と第一ダイノードの二次電子放出比に影響を与えます。これらは出力のSN比、シングルフォトン、およびマルチフォトン領域での出力パルス波高の分散、電子走行時間の拡がり(TTS)などを左右する要因となります。その他にも前段の電圧配分は陰極直線性、シンチレーションカウンティングにおいてのエネルギー分解能、磁気特性などに影響を及ぼすため、後段の電圧配分と同様、その設定には十分な注意を払わなければなりません。一般にカタログに記載されているのダイノード前段の電圧配分比は電子収集効率、時間特性、SN比を考慮して決められていますが、これは一般に定格電圧がかけられた時を基準にしています。そのため印加電圧が定格電圧の1/2以下になる時などは、前段の電圧配分比を上げたりツェナーダイオードを挿入し定格電圧を加えるなどが必要となります。なお、光電子収集効率、出力のSN比、その他の諸特性に就ては第4章に詳しく述べられていますのでそちらを参照してください。

図5-9に示されているデバイダ回路の陰極から第一ダイノードまでに上記の対策を施した回路の一例を図5-11に示します。

種々の用途の中でも、ショット雑音が問題となるような極微弱光の測定、単一光子計数法、時間特性が問題となる飛行時間計測(TOF)用トリガカウンタ、ホドスコープなどには陰極、集束電極、第一ダイノード付近の精密に設計された電子レンズ系に適正な電圧を印加することが非常に重要です。



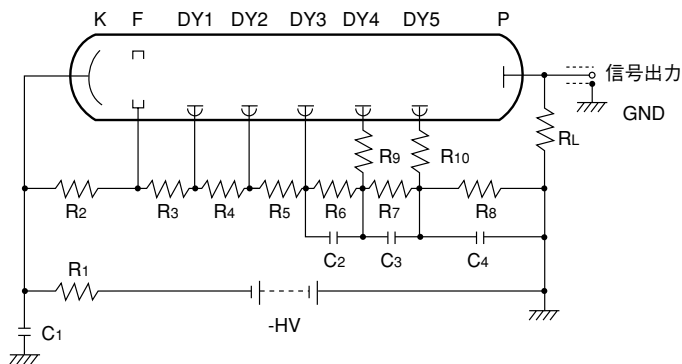
THBV3_0511JA

図5-11 前段および後段をテーパーにしたデバイダ回路

光電子増倍管のカタログに記載されている推奨電圧分割比は、用途を特に指定していない限り、ゲインを重視した一般用のものです。従って、印加電圧が低いとか高いピーク出力電流が要求されている時は用途に合ったデバイダ分割比を選ぶ必要があります。実際に使用する抵抗値については、基本的に光電子増倍管への印加電圧、光電子増倍管の出力電流値、および要求する出力直線性から求めます。しかし抵抗値が低すぎる場合には発熱のため暗電流の増加や出力の温度ドリフト、さらには高圧電源の容量不足といった問題を生ずるため、必要以上にデバイダ電流を流すことは良くありません。

5.1.5 高速応答性を重視する対策

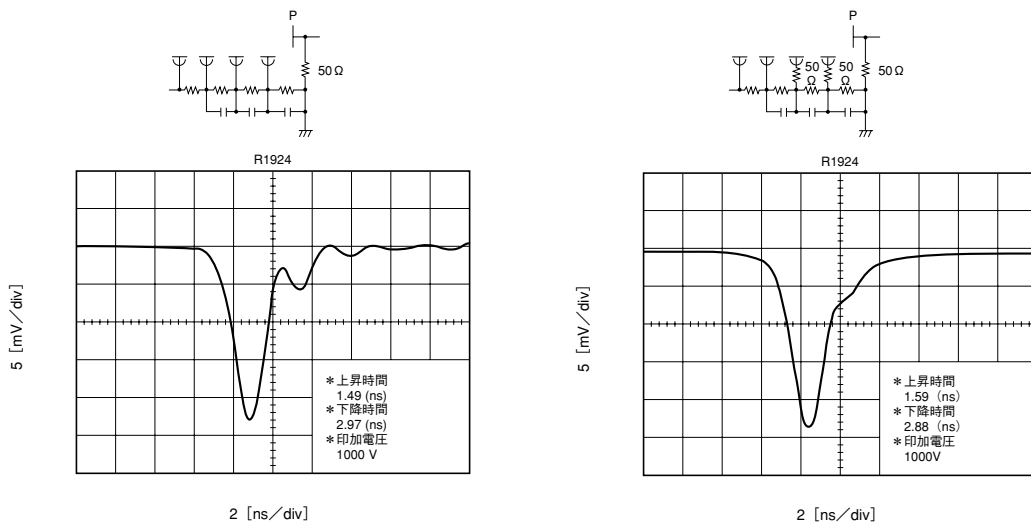
図5-12に示されているように高圧供給回路に R_1 および C_1 より成るローパスフィルタを挿入することも、高圧供給ラインからの雑音を軽減する上で効果があります。通常抵抗には数十k Ω 、コンデンサには0.001～0.05 μF の高耐圧セラミックコンデンサがよく用いられます。



THBV3_0512JA

図5-12 パルス出力直線性対策、リングング対策、高圧電源雑音対策の施されたデバイダ回路

上昇時間10 ns秒以下の高速出力パルスを取り扱う場合は、同図に示されているように、ダンピング抵抗 R_9 ・ R_{10} を最終ダイノードと、必要に応じてその前段のダイノードにも挿入すれば出力波形のリングングを軽減できます。ダンピング抵抗には、10～200 Ω 程度の無誘導型抵抗を用いますが、この値が大きすぎると時間応答特性を劣化させるため、実際に波形を観察して必要最小限の値を決定します。図5-13は通常のデバイダ回路とダンピング抵抗を付けた時の出力波形を観測したもので、ダンピング抵抗を用いることによってリングングが軽減している事がわかります。



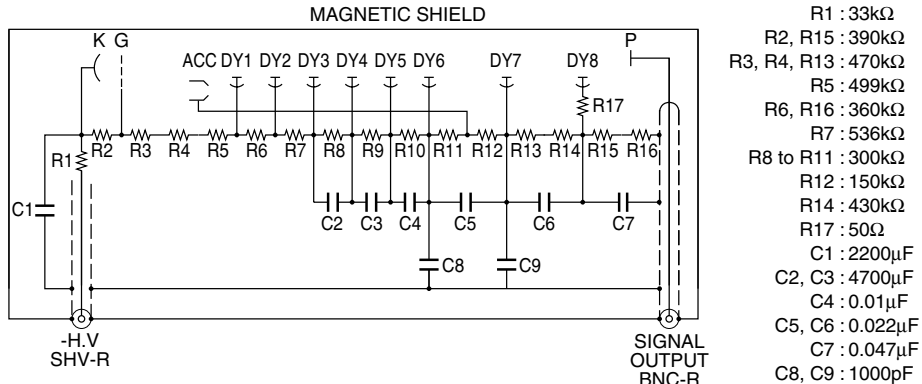
THBV3_0513JA

図5-13 ダンピング抵抗の効果

5.1.6 実際的高速応答デバイダ回路例

5.1.5の説明に基づいて設計した実際的高速応答デバイダ回路の一例として、浜松ホトニクス製ハイブリッドアセンブリ H2431-50の回路を図5-14に示します。

H2431-50の回路図



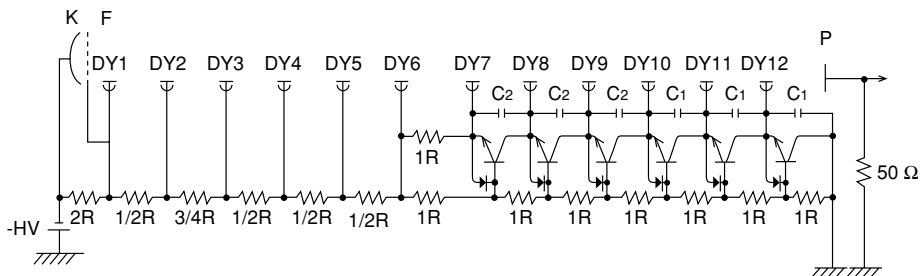
THBV3_0514JA

図 5-14 高速応答デバイダ回路例

5.1.7 高出力直線性デバイダ回路例 (1)

シンチレーションカウンティングなどにおいて、光電子増倍管を高計数率で使用すると、しばしば出力直線性の問題が発生します。この場合、後段にデバイダ抵抗の代わりにトランジスタを使用することにより、デバイダ電流による出力直線性の低下を改善することができます。

一例としてFNAL (Fermi National Accelerator Laboratories)にて考案された³⁾光電子増倍管 R329用のデバイダ回路を図5-15に示します。



THBV3_0515JA

図 5-15 トランジスタを使用したデバイダ回路

図5-15の回路では、まず光電流が流れ、ダイノードに二次電子が流入することによって、ダイノードからトランジスタのコレクタに電流が流れ込みます。その結果エミッタ電位が上昇し、ベース電流とともにコレクタ電流が減少します。この時のコレクタ電流の減少は、ほぼ光電子増倍管に流れる電流に等しく、従って見かけ上トランジスタが光電子増倍管に電流を供給していることになります。

使用するトランジスタには以下の考慮が必要です。

- ・ h_{fe} が大きく、コレクタに十分な電流を流せるトランジスタを選択します。
- ・ 周波数特性の良好なトランジスタを選択します。
- ・ 周波数特性の良好な、大容量のコンデンサを使用します。
- ・ トランジスタを使用する段数は光電子増倍管の使用条件を考慮して決定します。

図5-16には、トランジスタを使用したデバイダ回路の出力直線性を示します。

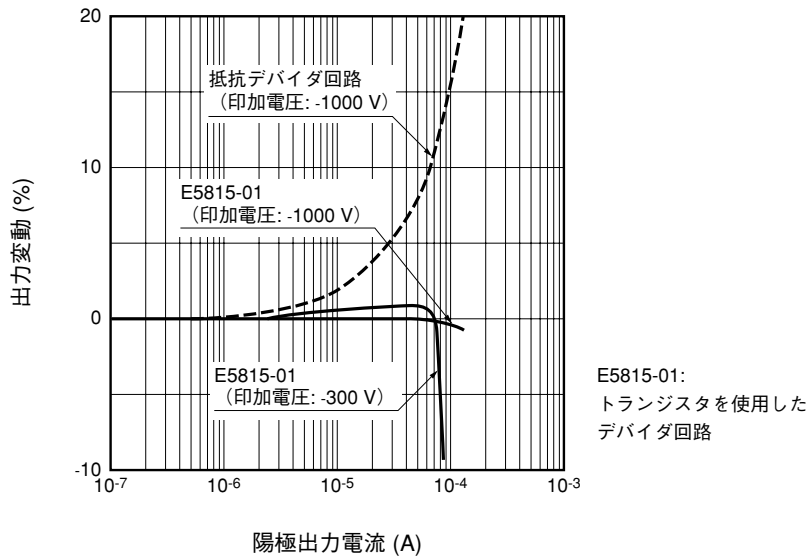
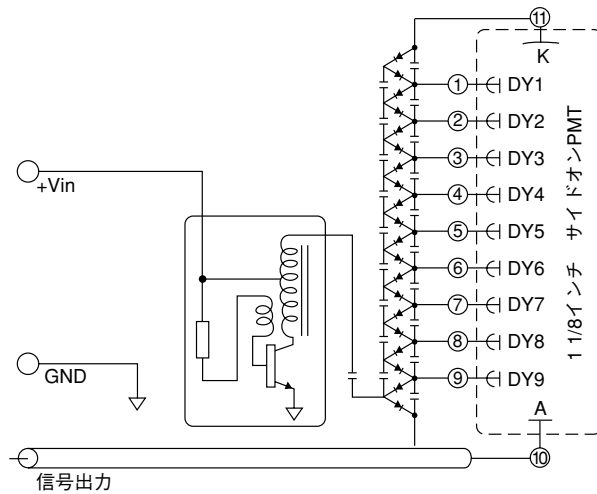


図5-16 トランジスタを使用したデバイダ回路の出力直線性

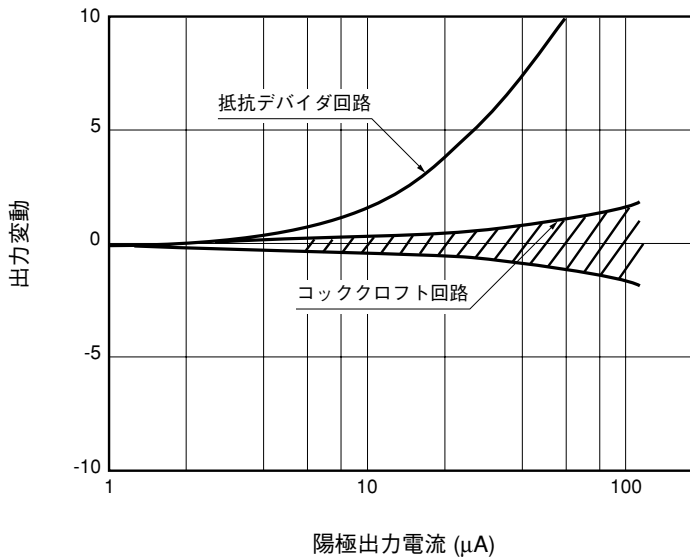
5.1.8 高出力直線性デバイダ回路例 (2)

図5-17に示すコッククロフト (Cockcroft-Walton Voltage Multiplier) 回路はダイオードを直列に接続し、その接続点の一つおきにおのおのの側にコンデンサを一つ一つ直列に積み重ねることにより各ダイノード接続点に基準電圧をVとするとV, 2V, 3V…の電位を与えることができる回路です。したがって、この電源回路は従来の抵抗デバイダ回路の役割を兼ね備え、また低消費電力で高い直流およびパルス直線特性を実現しているためコンパクトな回路実装に有効な手段といえます。又、この回路の特長として図5-18に示すように抵抗デバイダ回路による出力直線性よりも高い直線性を得ることができます。



THBV3_0517JA

図 5-17 コッククロフト回路



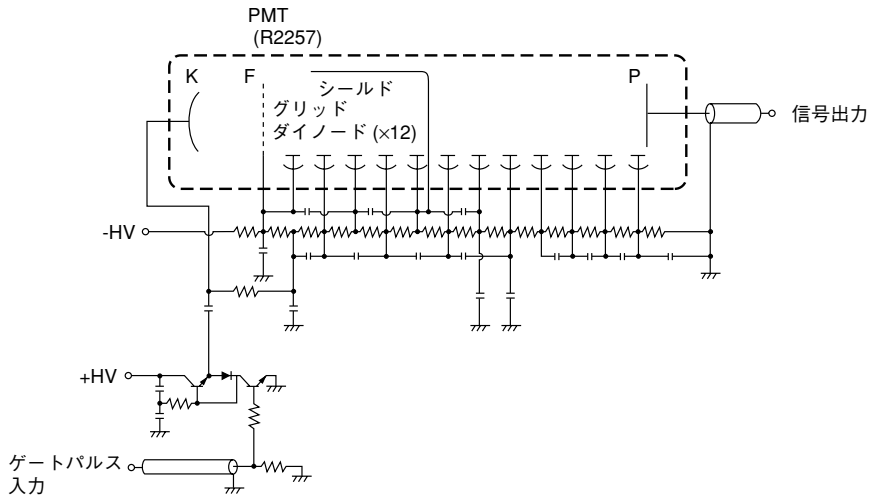
THBV3_0518JA

図 5-18 高出力直線特性

5.1.9 ゲーティング回路

次にデバイダ回路の変形として、ゲーティング回路を紹介します。

一般に蛍光測定、トムソン散乱を利用したプラズマ電子温度計測、ラマン分光、光伝送路の欠損を測定する様な場合、励起光などの一次光レベルに比較して、実際に測定の対象となる信号光は非常に微弱なものとなります。このため検出系の感度は極めて高く設定してあり、一次光の一部といえども迷光となって検出系に入射した場合には過大入力となり、光電子増倍管や後続の回路を飽和させ、それらの特性を劣化させるなどの悪影響を及ぼします。この問題に対しては超高速シャッターにより過大光のみを遮断できればいいのですが現実的とはいえません。実際には「ゲーティング」と称し、電氣的に光電子増倍管をスイッチングして、不必要な期間のみ出力を遮断する方法が採られています。



THBV3_0519JA

図 5-19 C1392 の回路図

図5-19に浜松ホトニクス製のゲーティング回路付ソケットアッセンブリC1392の回路を示します。C1392は光電子増倍管の出力を常時OFFにしておき、ゲート信号入力時にONにするものですが、その逆、つまり常時ON、ゲート時OFFのタイプもあります。

以下C1392の動作を説明します。

今、ゲート入力が0Vで光電子増倍管がOFFになっているとすると、陰極には集束電極と第一ダイノードに対して10V前後の逆バイアスが供給されており、陰極から光電子が放出されても増倍部(ダイノード)には達しません。ここでゲート入力端子に+3~4Vのパルスが加えられますと、ドライバ回路はコンデンサ結合を介して陰極に順方向バイアスを与え、ゲートパルス幅とコンデンサ結合回路の時定数により決定される期間中、光電子増倍管をONにします。この回路でのスイッチングレシオ(消光比)は 10^4 以上です。なお、前段から中段にかけて接続されている多数のコンデンサは、この種の回路で問題となるスイッチング雑音を吸収するためのものです。

5.1.10 陽極感度調整回路

光電子増倍管の陽極感度調整は通常、印加電圧を変えることにより行いますが、一台の高圧電源で複数の光電子増倍管を動作したり、高圧電源、増幅器の可変範囲が狭い場合デバイダ回路内に感度調整回路を設けることがあります。そこで、感度調整回路を設ける方法について図5-20を使って説明します。

図5-20に3つの方法を示します。第1に図中(1)に示しましたが、陰極—マイナス高圧電源間に直列に可変抵抗を取り付けることによって光電子増倍管に加わる印加電圧を変える方法です。この方法では条件によりますが、かなり大きく(~10倍)感度を変化させることができます。ただし、デバイダ抵抗値が大きくなるとこの可変抵抗の抵抗値も大きくなり、場合によっては高抵抗で容量の高いものが手に入らなくなることもあります。一方デバイダ抵抗が小さいと高容量のものが必要となり可変抵抗の接点不良など問題が起こりやすくなります。

また負高圧の時、可変抵抗は高電位となるため筐体などに対し十分耐圧に耐える設計をしなくてはなりません。

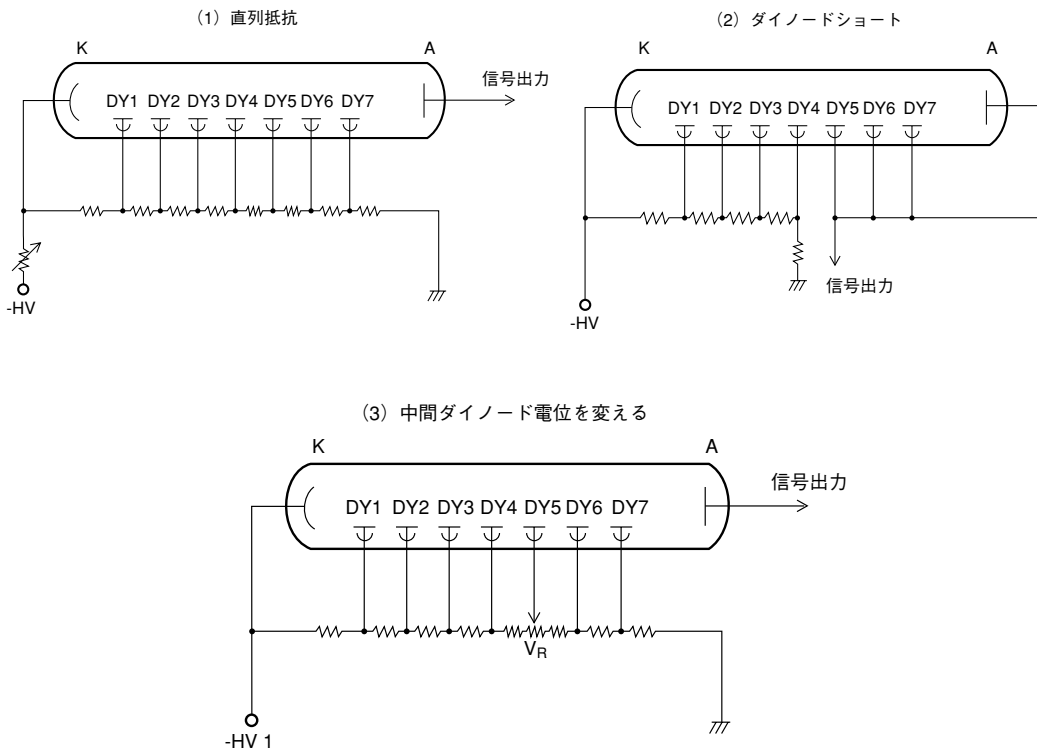
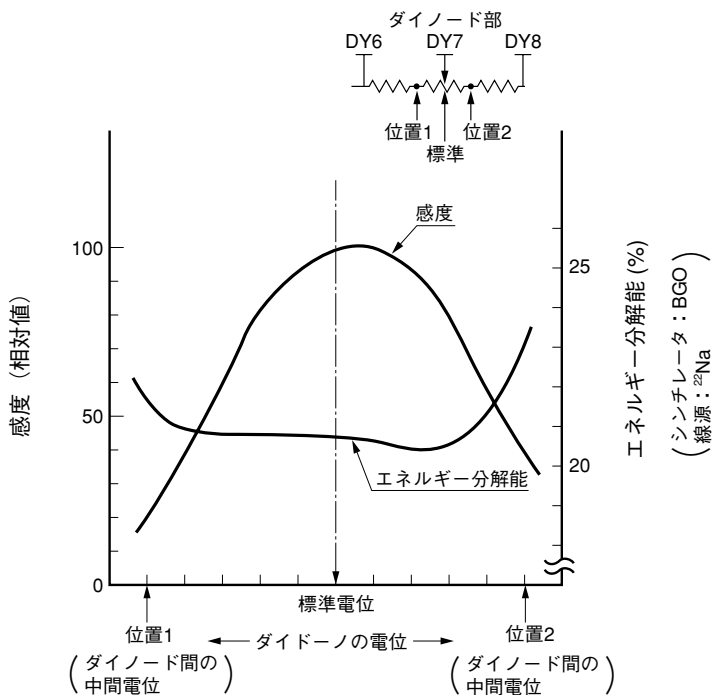


図 5-20 陽極感度調整回路

第2の方法は図5-20(2)の様にダイノード後段と陽極をショートし、中間ダイノードから信号を取り出すものです。光電子増倍管の感度が高いため印加電圧を非常に低くしてしまう場合、ダイノード段間の電圧が低くなり収集効率や二次電子放出比を悪化させます。図の様にダイノード後段をショートし、実質的にダイノードの段数を減らせば段間電圧は高くなりSN比の向上が期待されます。ただしダイノードから出力をとっているためリニアリティ特性は悪くなります。さらに段数が変わることから印加電圧対感度特性が変わり、またこの特性は光電子増倍管によってばらつきを持ちます。



THBV3_0521JA

図 5-21 ダイノード電位変化による感度変化とエネルギー分解能の変化

第3の方法は図5-20(3)の様に、ある中段のダイノードの電位を可変するものです。ダイノードの電位を変えることにより二次電子が減少したり、ダイノード間の収集効率が落ちることを利用しています。ダイノードの電位の与え方は図の様に中間のダイノードの前後のダイノード間に可変抵抗をつける方法がとられます。比較的容易な方法ですが、大きく電位を変化させるとSN比が悪くなる欠点があります。図5-21はダイノードの電位を変えた時の感度変化とエネルギー分解能の様子を測定したものです。感度が50%以下に落ちるあたりからエネルギー分解能も悪化することがわかります。さらにこの特性は光電子増倍管によって様でなく、感度の可変範囲もあまり大きくはとれません。

一般的には(1)または(1)と(3)を併用したものが用いられます。

5.1.11 デバイダ回路製作上の注意点

次に実際にデバイダ回路を製作する上での注意点を述べます。

(1) デバイダ回路に使用する部品の選択

デバイダ回路は光電子増倍管の動作に直接影響を与えるため、慎重な部品の選択が必要です。

抵抗

光電子増倍管は印加電圧および段間電圧の変化に敏感に反応するため、極力温度係数の小さな金属皮膜抵抗を使用します。全て同じ種類の抵抗を使用することが望ましい訳ですが、それが難しい場合には互いに温度係数の近い物を選択します。温度特性については良いものを選ぶ必要がありますが、精度についてはそれ程厳しくする必要はなく±5%程度のもので十分です。これは光電子増倍管のゲインにばらつきがあることと、数V程度の電圧差で電子軌道が大きく変化することはないためです。また電力定格には実際に必要な値の1.7倍以上、耐電圧としては、できれば定格が1.5倍以上の余裕をもたせることが理想的です。一段当たりの抵抗値の目安としては100 k Ω ～1 M Ω が一般的です。ダンピング抵抗や負荷抵抗には高周波用の無誘導型抵抗を使用します。

デカップリングコンデンサ

特に高速の光電子増倍管で出力の上昇時間が10 ns秒以下のパルスを扱う場合、ダイノード間に接続するデカップリングコンデンサには、高周波域でのインピーダンスが十分に低く、耐電圧がダイノード間にかかる最大電圧の1.5倍以上の余裕を持ったセラミックコンデンサを使用します。

高圧入力に接続する電源雑音除去用バイパスコンデンサにも高周波域でのインピーダンスが低く、十分な耐電圧を持ったセラミックコンデンサを使用します。

カップリングコンデンサ

陰極接地・陽極正高圧印加型デバイダ回路で高圧と信号を分離するカップリングコンデンサには雑音源となる漏洩電流が極力少なく、周波数特性に優れ、十分な耐電圧を持ったセラミックコンデンサを一般的には用います。

デバイダ回路用基板

光電子増倍管のソケット上ではなく、プリント基板にデバイダ回路を組む場合、基板にはガラスエポキシ製などの高耐電圧で漏洩電流の少ないものを使用します。両面基板を使用する場合には十分な厚さを持つ物を選択します。

ガラスエポキシ基板の場合、必要なパターン間距離は電位差1kV当たり1mm以上とされています。

リード線

高電圧回路用にはテフロン線、シリコン線などの高耐電圧リード線、またはRG-59B/Uなどの同軸ケーブルを使用します。何れの場合にも線材の耐電圧には十分な注意が必要です。

信号用にはRG-174/Uや、3D-2Vといった同軸ケーブルが適しています。特に高速の回路では、測定機器の入力インピーダンスとマッチングを取るため、50Ω系同軸ケーブルの使用が一般的です。ただし取り扱う電流値が特に微弱なものでなく(数 μ A以上)、リード線の長さが20cm程度以下であれば、特に雑音源が近くでない限り通常のリード線でも実用上問題はありません。

接地用には通常のリード線も十分使用できますが、高電圧部品またはソケットピンと接触する可能性がある場合には高耐電圧のものを使用する必要があります。

(2) 部品実装上の留意点

ここでは部品を実装する上での留意点を述べます。図5-12も同時に参照してください。

デバイダ抵抗

デバイダ抵抗は互いを接触させないように、また放熱を考慮して、抵抗間は十分な間隔を設けます。また特に低抵抗を使用する場合や、温度上昇による暗電流の増加が問題となるような極微弱光測定の場合には、デバイダ回路で発生するジュール熱が直接光電子増倍管に伝達されないように、光電子増倍管のピンやソケットにデバイダ抵抗を直接接続することは避け、ある程度の距離を置くことが必要です。

デカップリングコンデンサ

高速パルス動作用デバイダ回路に使用されているデカップリングコンデンサのリード線は、リードインダクタンスが時間特性やリングングに影響するため、極力短くしなければなりません。デバイダ抵抗を光電子増倍管から離して実装する場合にも、デカップリングコンデンサだけは光電子増倍管のピンやソケットに直接実装する必要があります。

信号出力系

負荷抵抗を含む信号出力系は線長を極力短くし、高圧線や高電圧の印加されている部品から離して配線します。特に高速パルス信号を扱う場合、図5-12に示されているような信号系と電源系の一点接地は不可欠です。微小出力電流を扱う場合には信号経路のシールドや漏洩防止にも配慮しなくてはなりません。

5.2 高圧電源の選択

高圧電源のドリフト、リップル、温度変動、入力変動、負荷変動などの総合的な安定度は、光電子増倍管に要求される安定度より少なくとも1ケタは優れたものを使用することをお勧めします。

高圧電源としてはシリースレギュレータ方式のものが広く使われており、実績もありますが、最近ではスイッチングレギュレータ方式のものも出回っています。スイッチングレギュレータ方式は小型、軽量でも高い電圧、電流の得られるものが多くあります。品種によってはAC入力および高圧出力にスイッチング雑音が重畳するものや、同雑音を周回に放射するものもあるので、微弱光測定や高速の信号処理、あるいはフォトンカウンティングなどを行う場合は機種を選定に十分な注意を払ってください。

高圧電源の最大出力電流は、実際に使用するデバイダ回路に流れるデバイダ電流の1.5倍以上まで余裕をもって供給できるものを採用してください。

以下に高圧電源を選択する際の目安性能を示します。

高圧電源の特性

①入力変動率	±0.1 %以下
②負荷変動率	±0.2 %以下
③リップル/ノイズ	0.05 %以下
④温度係数	±0.05 %/°C以下

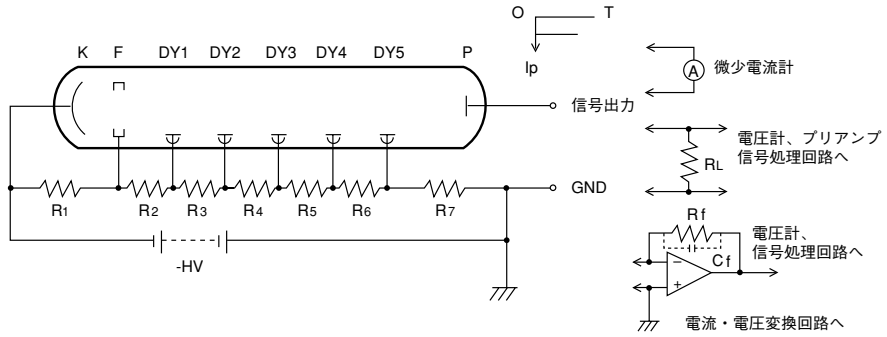
- ①例えば入力電圧が±10%の変化に対し、出力電圧が最大時において出力が変動する割合(%)を示します。
- ②最大出力時(最大負荷接続時)の出力電圧と、出力に負荷を接続しないときの出力電圧との差電圧を出力電圧で割った結果(%)を示します。
- ③リップルとは高圧発生回路の発振周波数で乗る出力のゆらぎ(ピーク値)を示します。特性値はリップルだけでなく、発振周波数以外のゆらぎ成分(ノイズ)も含めています。
- ④動作温度範囲内の出力最大時の出力変化率(%/°C)を示します。

5.3 外部回路との接続

5.3.1 出力信号の観測法

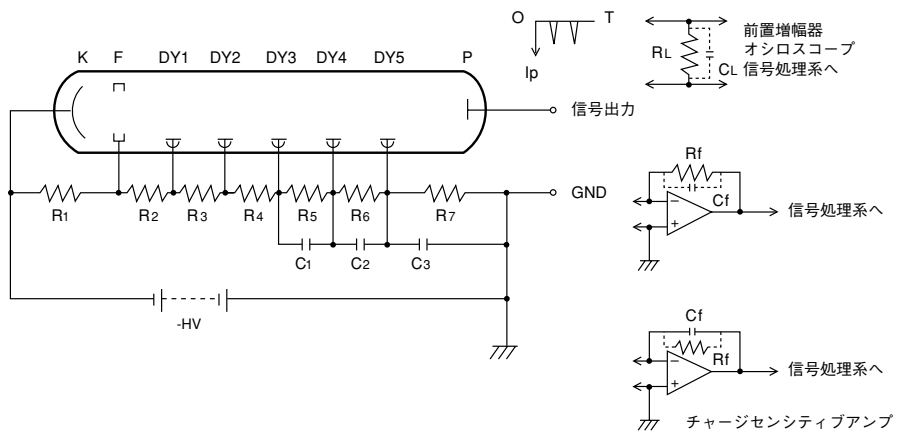
光電子増倍管の出力信号を観測する方法は図5-22、5-23、5-24に示すように、各々の動作状態に応じて異なります。

本章5.1.2項で述べた様にデバイダ回路の動作は陽極側接地法と陰極側接地法の二つがあり、陽極側接地法では図5-22、23のように直流動作とパルス動作の両方が可能です。一方、陰極側接地法では図5-24のように陽極が高電圧となるためカップリングコンデンサが必要となり、よってパルス動作のみ可能です。しかしこの動作の場合、背景光などによる直流分を除去するためパルス動作ではむしろ好都合です。



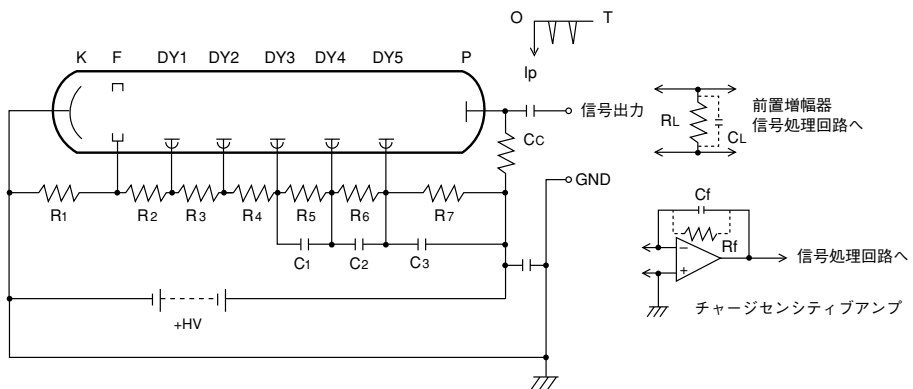
THBV3_0522JA

図 5-22 陽極側接地・直流動作時



THBV3_0523JA

図 5-23 陽極側接地・パルス動作時



THBV3_0524JA

図 5-24 陰極側接地・パルス動作時

後続する増幅回路系に接続する時に注意すべき事は、必ず増幅回路系に接続した後に高圧電源を入れなくてはなりません。デバイダ回路に高電圧がかかるとたとえ光を入れなくても暗電流により陽極に電荷が蓄積されます。この状態で増幅回路に接続するとこの電荷が瞬時に接続回路に流れ込み増幅回路を破壊することがあります。特に後続する回路系の応答速度が速いものほど壊れやすいので注意が必要です。

5.3.2 カップリングコンデンサの影響

陰極接地法ではカップリングコンデンサが必要となりますが、陽極接地でもパルス動作の場合直流分を除去するためにカップリングコンデンサを用いることがあります。ここではカップリングコンデンサを使用した回路を使う上での留意点を述べます。

出力波形

図5-25の回路図において、陽極出力のパルス幅 P_w が回路の時定数 CR (R は $R_a \cdot R_L$ の並列抵抗)より十分短い時、カップリングコンデンサのインピーダンスは無視できるため信号パルス電流は $R_L \cdot R_a$ に分流されます。よってこの場合出力波形はカップリングコンデンサの容量に因らず、入力波形は歪むことなく出力されますが、 P_w が CR に近いとそれより長くなると出力は微分波形となっていきます。このカップリングコンデンサは単に増幅回路との結合素子回路として使われているので、信号は入力波形が歪むことなく出力波形となるためには P_w と比べ CR を数十倍以上長くしなければなりません。高速応答性を持たせるため R_a に 50Ω を付けた時は、時定数 CR が小さくなるため注意が必要です。

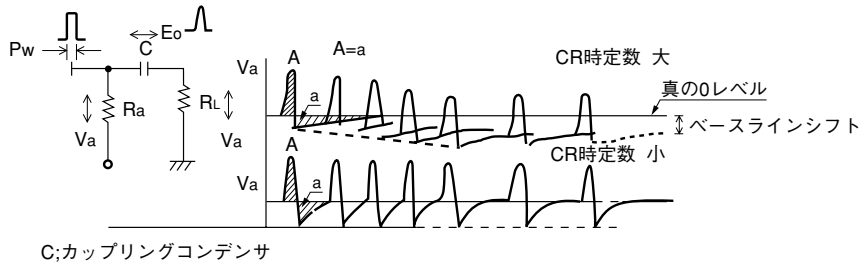
また低周波の場合カップリングコンデンサのインピーダンスが無視できなくなり、そのインピーダンス Z_c は $Z_c = \frac{1}{2\pi f C}$ となるため、周波数が $f = 1/2 \pi CR_L$ の時、信号は3db(波高値が約0.7となる)落ちとなります。

ベースラインシフト

前記の様にカップリングコンデンサを通った信号はその電荷量の分コンデンサに充電されます。充電した電荷 Q によりコンデンサの両端には信号とは逆向きで $E_0 = Q/C$ の電圧が発生し、この電圧 E はコンデンサの容量 C と $R_a \cdot R_L$ の直列抵抗 R で決まる時定数 CR により $V = E_0 e^{-t/RC}$ の様に減衰します。コンデンサ中に誘起した電圧は R_L, R_a で分圧され、出力電圧 V_a は次式(5-6)で表されます。

$$V_a = E_0 e^{-t/RC} \times \frac{R_a}{R_a + R_L} \dots\dots\dots \text{(式 5-6)}$$

ここで信号パルスの繰り返しが高くなると図5-25の様にベースラインは元に戻らず真のゼロレベルよりずれたところに見かけ上のゼロレベルを形成します。これがベースラインシフトですが、 CR の時定数を小さくすればこの影響は軽減できます。光電子増倍管からの出力は電流源であり、コンデンサの容量を小さくすると初期電圧 E_0 は高くなりますが、放電時間は短くなります。抵抗を小さくすると放電時間は短縮されますが、信号電圧も低くSN比が問題となります。抵抗を大きくすると出力が大きいためSN比は良くなる一方、時定数が長くなるためベースラインシフトが起りやすくなります。また R_a が大きいと陽極の電位を押し下げため、直流を含む電流を流す時は注意が必要です。



THBV3_0525JA

図 5-25 ベースラインシフト

結局コンデンサに充電した信号電荷量(図 5-25 A の部分)をどの様な時間で放電(図 5-25 a の部分)するかという問題で、放電の時定数に関係なく図中の A の面積は a と等しくなります。一般に信号のパルス幅に比べ回路の時定数 CR は長いので、この放電による信号の波高値への影響は少なくなります。しかし信号パルスの繰り返しが非常に高い時や、精密な出力波高値情報が必要な時、この影響は無視できなくなります。ベースラインシフトが起きると信号は見かけ上低く観測されるため、回路設計にあたっては信号の繰り返しを増しても波高値の変動のないような最適な抵抗値・コンデンサの容量を決める必要があります。

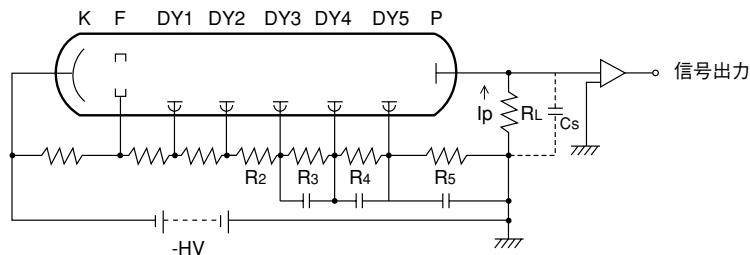
また増幅器を含めた観測系の分解時間内に複数のパルスが入った場合、それらが加算されて一つの大きなパルスとなる、いわゆるパイルアップの問題も生じるので、特に波高弁別器などを使用して出力パルス一つ一つの高さを問題にする場合には、測定系の時間分解能にも考慮する必要があります。

5.3.3 光電子増倍管出力の電流・電圧変換

光電子増倍管の出力は電流(電荷)であり、一方後続の信号処理系は通常電圧信号を対象としているため、微小電流計で出力を直接観測する以外は、何らかの方法により電流を電圧に変換する必要があります。以下、電流・電圧変換の方法とその留意点について述べます。

(1) 負荷抵抗による電流・電圧変換

光電子増倍管の電流出力を電圧に変換する方法としては、まず負荷抵抗の使用が考えられます。光電子増倍管は出力電流の小さい領域では非常に高いインピーダンスを持つ理想的な電流源と考えられ、そのため理論上では負荷抵抗に相当大きな値を用いることが可能です。従って出力電圧としては $I_p \times R_L$ の値が得られます。しかし実際には、抵抗値は次に述べるように、求める周波数特性や出力直線性から制限を受けます。



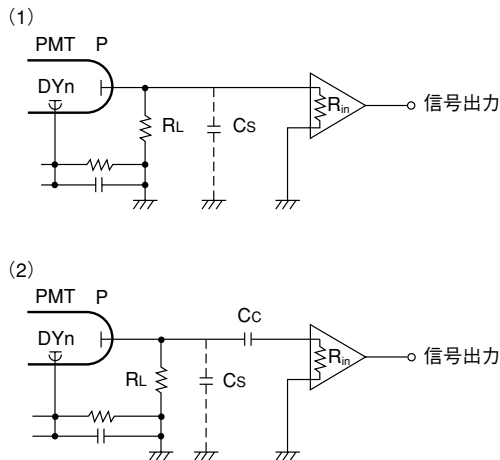
THBV3_0526JA

図 5-26 光電子増倍管と出力回路

図5-26において、負荷抵抗を R_L 、光電子増倍管の陽極と他の電極間の静電容量および配線などによる浮遊容量の総和を C_s とすれば、高域遮断周波数 f_c は次式(5-7)で表されます。

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_s R_L} \text{ (Hz)} \dots\dots\dots \text{ (式 5-7)}$$

即ち光電子増倍管と後続の増幅器が高速であっても、光電子増倍管の信号出力回路で高域遮断周波数が決定されてしまうことになります。また、 R_L をあまり大きくするとそれに比例して陽極電位で $I_p \cdot R_L$ による電圧降下が増大し、最終ダイノード—陽極間電圧を低下させ、空間電荷の影響による出力直線性の劣化の原因となります。従って通常は出力電圧を1V程度以下となるようにします。



THBV3_0527JA

図5-27 増幅器の内部入力抵抗の影響

負荷抵抗の値を決定する場合は、接続された増幅器の内部入力抵抗の影響も考慮しなければなりません。図5-27に等価の回路図を示します。この図から負荷抵抗を R_L 、増幅器の内部入力抵抗を R_{in} とすれば、両者の並列合成抵抗 R_0 は次式(5-8)から計算されます。

$$R_0 = \frac{R_{in} \cdot R_L}{R_{in} + R_L} \dots\dots\dots \text{ (式 5-8)}$$

実質的な負荷抵抗は R_L より小さい R_0 となります。 $R_{in} = \infty \Omega$ とした時の出力電圧 V_0 と R_{in} の影響を受けた時の出力電圧 V_0' との関係は、次式(5-9)で表されます。

$$V_0' = V_0 \times \frac{R_{in}}{R_{in} + R_L} \dots\dots\dots \text{ (式 5-9)}$$

$R_{in} = R_L$ の場合には V_0' は V_0 の半分となります。このことから負荷抵抗の実質的な上限値は R_{in} 程度となり、それ以上に大きくしてもあまり意味を持たないことになります。特に図5-27(2)のように光電子増倍管と増幅器の間にカップリングコンデンサ C_c がある場合、過大の負荷抵抗は障害となります。

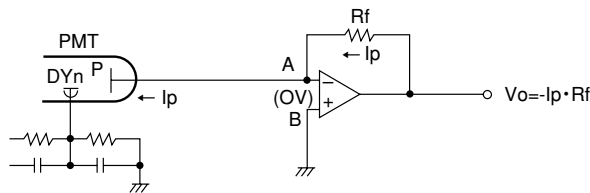
以上、負荷抵抗および増幅器の内部入力抵抗は純抵抗として考えてきましたが、実際にはこれに浮遊容量や、浮遊インダクタンスなどの位相に関する項が付加されるため、扱う周波数の高い時はそれらを考慮したインピーダンスとして考えなければなりません。

以上をまとめますと、負荷抵抗値を決定する時の注意点としては次のとおりになります。

- ・周波数および振幅特性を重視する場合はなるべく小さな値(50 Ω)を使用します。またケーブルなど負荷抵抗と並列に存在する浮遊容量も極力小さくします。
- ・出力振幅の直線性を重視する場合は、負荷抵抗両端に生じる出力電圧が最終段一陽極間電圧の数パーセント以下になるような値とします。
- ・接続する増幅器の入力インピーダンスと同程度以下の値を使用します。

(2) オペアンプによる電流・電圧変換

オペアンプ(演算増幅器)を使用した電流・電圧変換回路とアナログまたはデジタル電圧計との組み合わせを用いれば、高価な微小電流計を使用せずに光電子増倍管の出力電流を精度よく測定することができます。オペアンプを使用した基本的な電流・電圧変換回路を図5-28に示します。



THBV3_0528JA

図 5-28 オペアンプによる電流・電圧変換回路

この場合の出力電圧 V_0 は次式(5-10)で表されます。

$$V_0 = -I_p \cdot R_f \quad \dots\dots\dots \text{(式 5-10)}$$

これは以下のように考えると理解しやすくなります。

オペアンプの入力インピーダンスは非常に高いため、光電子増倍管の出力電流は図5-28のA点でオペアンプの反転入力端子(-)に流れ込むことはできません。ゆえにその大部分は帰還抵抗 R_f に流れ込み、 R_f の両端に $I_p \cdot R_f$ の電圧が発生します。一方オペアンプの増幅率(オープンループゲイン)は 10^5 と非常に高く、反転入力端子(A点)の電位を常に非反転入力端子(B点)の電位(接地電位)と同じに保つように働きます(これをイマジナルショートまたはバーチャルグラウンドと呼びます)。そのためオペアンプは R_f 両端に発生する電圧と同じ電圧 V_0 を出力し、理論的にはオープンループゲインの逆数程度の高精度で電流を電圧に変換します。

前置増幅器を使用した場合、最小測定電流を決定する要因としては、前置増幅器の入力オフセット電流(I_{OS})、 R_f の品質、使用する絶縁物の品質、配線法などがあげられます。

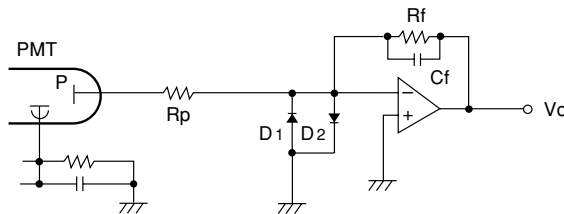
実際にピコアンペア(10^{-12} A)レベルの微小電流を測定するためには前記の他、次の点に留意する必要があります。

- ・信号出力ケーブルには絶縁性の十分高い低雑音型同軸ケーブルを使用します。
- ・コネクタを使用する場合はテフロン製などの絶縁性の十分に高いものを選びます。
- ・光電子増倍管の陽極と前置増幅器の信号入力ピンとの接続はプリントパターンを使用せず、テフロンスタンドオフを用います。
- ・実際の出力は $V_0 = -(I_p + I_{OS})R_f + V_{OS}$ であり、特に R_f が大きな場合に I_{OS} が問題となります。そのため、前置増幅器にはFET入力型などで I_{OS} は0.1pA以下、さらに入力換算雑音と温度ドリフトの極力小さなタイプを選びます。
- ・前置増幅器の出力オフセット調整と位相補償は十分に施します。

- ・帰還抵抗 R_f には温度係数および誤差の小さな金属皮膜抵抗を用い、その取り扱いには清潔なピンセットを用い表面に汚れが付かぬ様注意します。また、抵抗値が $10^9 \Omega$ 以上の場合には漏洩電流の小さなガラス封入抵抗を用います。
- ・精度、温度特性、また種類によっては炭素皮膜抵抗は雑音の問題を与える恐れがあり不適當です。複数の帰還抵抗を使用して電流レンジを切り換える場合は、漏洩電流の極力小さなセラミック製のロータリスイッチや品質の良いリードリレーを、帰還抵抗と前置増幅器出力との間に設けます。帰還抵抗と並列にスチロール型のような漏洩電流の少ない温度特性の良いコンデンサを接続し、必要最大限に周波数帯域を制限します。
- ・基板にはガラスエポキシ製、またはそれ以上の絶縁性を有するものを用います。

一方、前置増幅器の最大出力電圧は供給電圧より $1 \sim 2 \text{ V}$ 程度低い値であるので、測定電流範囲を広げる場合には、通常複数個の帰還抵抗を切り換える方法が採られます。その際、上記の点に注意し、各レンジ毎に非反転入力端子を帰還抵抗と同一の抵抗を介して接地すれば、入力バイアス電流をバランスし入力端子間の I_{OS} を減少させることができます。

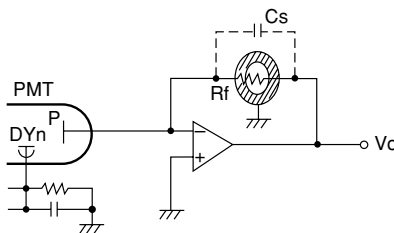
また光電子増倍管は高電圧を印加する電子管であるため、何らかの故障で高電圧が出力された場合、前置増幅器を保護するために図5-29のような保護用抵抗 R_p と保護用ダイオード D_1 および D_2 から成る保護回路を設けておく必要があります。この場合、保護用ダイオードには漏洩電流および接合容量の極力小さなものを使用する必要があり、一般的には小信号増幅用トランジスタのB-Eジャンクションや同FETが用いられています。また図中の R_p は余り小さいと保護用の役に立たず、逆に大きすぎると大電流測定時に誤差を生ずるため、数 $\text{k}\Omega \sim$ 数十 $\text{k}\Omega$ の範囲で選択します。



THBV3_0529JA

図5-29 オペアンプ保護回路

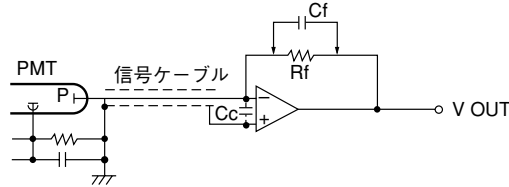
帰還抵抗 R_f に $10^{12} \Omega$ 程度の高抵抗を使用した場合、図5-30のように R_f に迷容量 C_s があると、回路は $C_s \cdot R_f$ の時定数をもち、帯域は減少するため用途によっては不都合を生じます。この対策として、図に示したように中央に穴を開けた接地電位の金属製シールド板に R_f を通せば、この C_s が軽減されて応答特性を向上させることができます。



THBV3_0530JA

図5-30 R_f の迷容量のキャンセル

一方、図5-31のように光電子増倍管の信号出力ケーブルが長くその等価容量が C_c である場合には、 $C_c \cdot R_f$ がオペアンプ回路の帰還ループ内にロールオフを作り、発振の原因となる恐れがあります。この場合には R_f と並列に C_f を入れてロールオフを打ち消せば発振はおさまりませんが、応答速度の低下はまぬがれません。



THBV3_0531JA

図 5-31 信号ケーブル容量のキャンセル

(3) オペアンプを使用した電荷増幅器

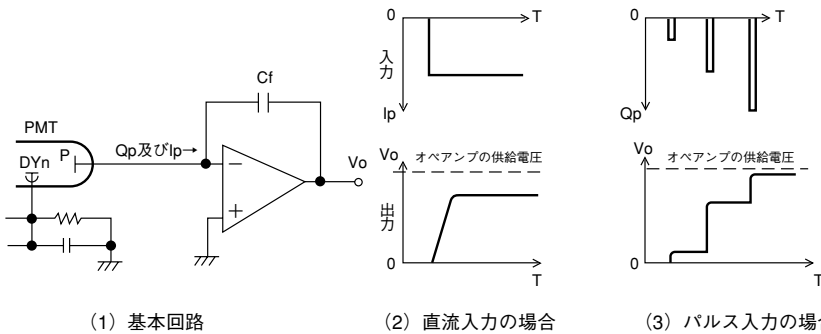
図5-32(1)はオペアンプを使用したチャージセンシティブアンプ(電荷増幅器)の基本回路です。 C_f に光電子増倍管の出力電荷 Q_p が蓄積され、出力電圧 V_o は次式(5-11)で表されます。

$$V_o = -\int_0^t Q_p \cdot dt \quad \dots\dots\dots \text{(式 5-11)}$$

ここで光電子増倍管の出力電流を I_p として次式(5-12)で表されます。

$$V_o = -\frac{1}{C} \int_0^t I_p \cdot dt \quad \dots\dots\dots \text{(式 5-12)}$$

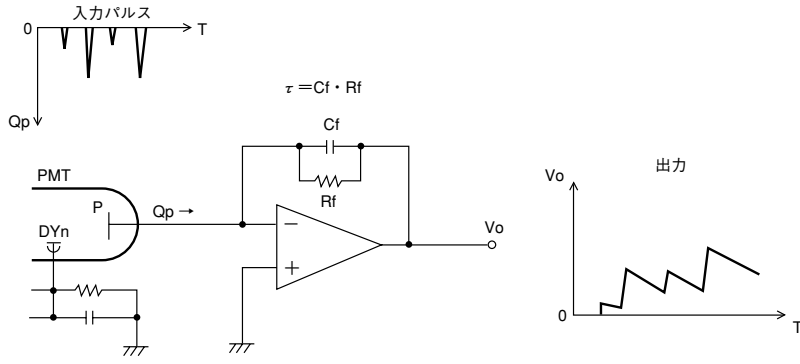
電荷の蓄積を続けると最終的に V_o は図5-32(2)(3)に示すように、前置増幅器の供給電圧付近まで上昇します。



THBV3_0532JA

図 5-32 チャージセンシティブアンプ回路と動作

図5-32(1)で C_f と並列にFETによるスイッチを接続して C_f に蓄積した電荷を必要に応じて放電できるような回路を追加すれば、光電子増倍管の出力が直流であるかパルスであるかに関係なく、必要期間において出力電荷を積分する回路となります。一方シンチレーションカウンティングやフォトンカウンティングなどにおいては、光電子増倍管の出力パルス一つ一つの電荷量を、対応する電圧パルスに変換する必要性から、図5-33のように C_f と並列に R_f を接続し、放電時定数 $\tau = C_f \cdot R_f$ を設けた回路が使用されます。



THBV3_0533JA

図 5-33 パルス入力型チャージセンシティブアンプ

時定数 τ を小さくすると V_0 は入力電流パルス波高値への依存度が高くなり、逆に大きくすると入力パルス電荷量への依存度が高くなり、最終的には $-Q_p/C_f$ に近づきます。シンチレーションカウンティングの場合、回路系の時定数 $\tau = RC$ とシンチレータの蛍光減衰定数 τ_s との関係より出力パルス電圧波形 $V(t)$ は次の式で表されます⁴⁾。

$$V(t) = \frac{Q \cdot \tau}{\tau - \tau_s} (e^{-t/\tau} - e^{-t/\tau_s}) \dots\dots\dots (式 5-13)$$

$\tau \gg \tau_s$ の時

$$V(t) \approx \frac{Q}{C} (e^{-t/\tau} - e^{-t/\tau_s}) \dots\dots\dots (式 5-14)$$

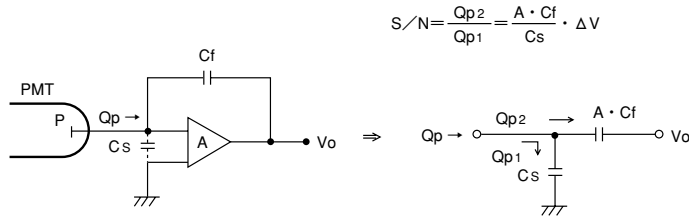
一方 $\tau \ll \tau_s$ の時

$$V(t) \approx \frac{Q \cdot \tau}{C \cdot \tau_s} (e^{-t/\tau_s} - e^{-t/\tau}) \dots\dots\dots (式 5-15)$$

回路系の時定数 τ がシンチレータの減衰定数 τ_s より大きい場合出力波形の上昇は τ_s に、また下降は τ に依存し、その最大波高値は Q/C となります。逆に回路系の時定数 τ が τ_s より小さい場合出力波形の上昇は τ に、下降は τ_s に依存し、その最大波高値は $Q/C \cdot \tau / \tau_s$ となります。一般に高いエネルギー分解能が期待できることから $\tau \gg \tau_s$ で使われることがほとんどですが、これは波高値が高く、雑音やシンチレータの温度特性、および負荷抵抗の変化に影響されにくいからです。しかしこの場合 τ が大きいためパルス幅が長くなり、繰り返しが多いとベースラインシフトやパイルアップを起しやすくなります。そのため高計数率測定が必要なときは τ を小さくすればシンチレータの減衰時間と同程度の出力波形を作ることができますがその場合、波高値は低くなり雑音などにも影響受けやすく、エネルギー分解能は犠牲になります。しかしいずれの場合も出力電圧 $V(t)$ は光電子増倍管の陽極の電荷量に比例することになります。通常、波高値を高く取るため負荷容量は問題のない範囲で小さい値をとり、時定数を変える時は抵抗の値を変えることが多くなされます。NaI(Tl)シンチレータを使用する場合には、通常数〜数十 μs の時定数が選ばれます。

シンチレーションカウンティングにおいて、チャージセンシティブアンプ回路に発生する雑音はエネルギー分解能の劣化を招きます。雑音としては増幅器をはじめとする回路構成素子自体から生ずるもの以外に、図5-34で示す入力ケーブルなどの分布容量 C_S に注意する必要があります。光電子増倍管からの出力電荷は C_f と C_S に分配して蓄積され、それが雑音の原因となります。そのためSN比を向上させるためには $A \cdot C_f / C_S$ を大きくとる必要があります。しかし実際には $A \cdot C_f$ は種々の制約により一定値以上には大きくできず、 C_S を可能な限り小さくしてこの問題に対処する方法が採られています。

一般にシンチレーション測定では主増幅器とは別に前置増幅器を光電子増倍管の近傍に置きケーブルによる容量を少なくしています。



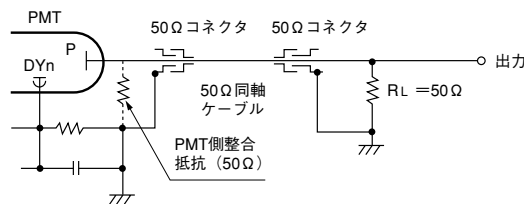
THBV3_0534JA

図 5-34 入力分布容量の影響

5.3.4 高速光電子増倍管の出力回路

高速のパルス光の検出には、光電子増倍管と後続回路とを通常 50Ω の特性インピーダンスを持つ同軸ケーブルを用いて接続します。

この時、信号出力波形を忠実に送受するためには、図5-35のように、少なくとも出力端を同軸ケーブルの特性インピーダンスと同一の純抵抗で終端することが必要になります。それにより、光電子増倍管から見たインピーダンスはケーブルの長さとは無関係に一定となり、観測波形のリングングを軽減することができます。しかし特にMCP内蔵型の光電子増倍管などを使用して、超高速の現象を観測する場合にケーブルを長くしすぎると、同軸ケーブル自体の損失により、信号波形が歪むため注意を要します。出力端においてインピーダンスの不整合がありますと、光電子増倍管から見たインピーダンスが周波数によって異なり、さらにその値が同軸ケーブルの長さによっても影響されるため、出力にリングングを生ずることがあります。この不整合は同軸ケーブルと終端抵抗のみならず、使用するコネクタ自身、あるいは同軸ケーブルの端末処理によって生ずる場合もあるため、コネクタの選択、同軸ケーブルの光電子増倍管やコネクタとの接続にもインピーダンスの不連続点を作らないよう、十分な注意が必要です。



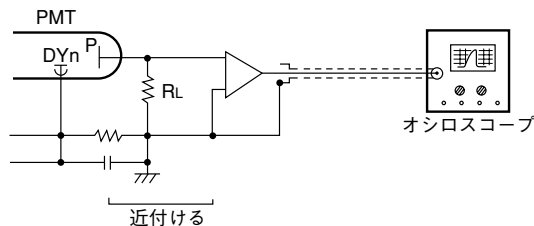
THBV3_0535JA

図 5-35 出力回路のインピーダンス整合方法

同軸ケーブル終端部にインピーダンスの不整合があると、出力信号のエネルギーが出力端で100%消費されず、一部が反射されて光電子増倍管側に帰ってくるようになります。さらに光電子増倍管側に整合抵抗がない場合には、光電子増倍管の陽極は開放端であるため、その信号は陽極で反射されて再び出力端に向かい、主パルスの後に同軸ケーブル内の往復時間分遅れたパルスとして観測されます。さらに信号はその全てのエネルギーが消費されるまで往復を繰り返すため、結果として出力端にリングングを生じます。ある程度の効果が期待できる対策としては、出力端のみならず、光電子増倍管側においても整合をとることですが、この場合、出力端のみの整合の場合に比較して出力電圧は半分になります。さほど高速でない光電子増倍管を使用する場合や、同軸ケーブルが短い場合には、光電子増倍管側の整合抵抗は必ずしも必要としないため、これを取り付けるかどうかは実験によって決定します。なお、光電子増倍管の種類によっては出力インピーダンスが50Ωに整合されているものもあり、その場合には光電子増倍管側の整合抵抗は不要となります。

次にオシロスコープを使用して高速パルス波形を観測する場合を考えてみます。

整合抵抗で終端した同軸ケーブルは、ある程度まではその長さが特性に影響を与えないという利点がありますが、一般的に整合抵抗の値は50Ωと低く、出力電圧もそれに従って非常に低いものとなります。通常はオシロスコープによりその内部インピーダンス(50Ωまたは1MΩ)を用いて直接信号出力波形の測定が可能です。場合によってはゲインの大きな広帯域増幅器を使用する必要があります。しかし、そのような増幅器は雑音も大きく、信号が微弱な場合は測定が困難になることがあります。このような場合はむしろ図5-36に示すように、光電子増倍管と増幅器をできるだけ接近させて浮遊容量を減少させ、その上で周波数特性に影響のない範囲で大きな負荷抵抗を使用し、希望する出力電圧を得るようにした方が有利となります。



THBV3_0536JA

図5-36 増幅器の使用

高速・広帯域増幅器はビデオ用、またはパルス用ICを用いて比較的簡単に製作することができます。しかしICはその便利さと引き換えに、雑音を始めとする様々な問題を生じやすく、使用に際してはその特性を十分に把握して対処する必要があります。

パルスの繰り返し周波数が高くなった場合の注意点として「ベースラインシフト」と呼ばれる現象があります。これは信号回路の一部でカップリングコンデンサを使用して直流分を遮断した時に生じるもので、観測されるゼロレベルが本来の接地レベルではなく、出力パルスを平均したレベルに移動することです。また増幅器を含めた観測系の分解時間内に複数のパルスが入った場合、それらが加算されて一つの大きなパルスとなる、いわゆるパイルアップの問題も生じるので、特に波高弁別器などを使用して出力パルス一つ一つの高さを問題にする場合には注意する必要があります。

5.4 ハウジング

ハウジング(光電子増倍管用ケース)は単に光電子増倍管を収納する箱としての役目の他に、

- ・ 不必要な光の遮蔽
- ・ 外部電界の影響の除去
- ・ 外部磁界の影響の軽減

といった働きがあります。以下、これらの点について考えます。

5.4.1 光の遮蔽

光電子増倍管は非常に感度の高い光検出器ですので、取り扱う信号光は微弱なものです。そのため不必要な光の遮蔽には特に注意する必要があります。例えばコネクタで信号の入出力を行う場合は、コネクタ自体、さらにはその取付け穴やビス穴からの光漏れも考えられます。また、ハウジング構成部品のハメ合いやフタの構造などについても同様に考慮を要します。

この対策として、コネクタその他の部品をハウジングに取付ける場合には、光漏れの可能性のある箇所を黒色シリコンゴムなどを使用して目止めをする必要があります。加えてハウジング構成部品についても、ハメ合い部に黒色ソフトテープやOリングなどで隙間を埋め、内部も光の乱反射を防ぐために黒色艶消し塗装を施しておくことが大切です。

5.4.2 電界の遮蔽 (シールド)

ハウジングはアルミなどの金属で作られるため、接地電位に保っておけば外部電界をシールドできます。ただし、ハウジング内部は乱反射を防ぐ目的で一般的に黒色塗装を施すため、接地線との接続部が接触不良とならないように注意を要します。なお、接地電位が光電子増倍管の側管に近付くと雑音が増大する原因となるので、ハウジングは光電子増倍管に対してある程度大きさに余裕を持たせる必要があります。

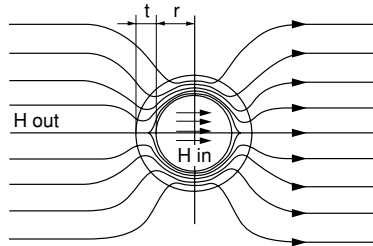
5.4.3 磁界の遮蔽 (シールド)

第13章にて述べられますが、光電子増倍管は磁界に非常に敏感で、地磁気程度でも特性に悪影響を受けます⁹⁾。そのため精密測光、および強磁界中での測光の場合には磁気シールドの使用が不可欠となります。しかし、電界の場合と違って磁界には導体というものがいないため、磁界を完全に遮断することは不可能です。このため高透磁率の金属で回りを囲んで、外部磁界の影響を「軽減する」しか方法はありませんが、シールドは完璧ではないので、弱い磁界、強い磁界、高周波磁界などで適宜シールド材および方法を変えるなどの工夫を要します。

なお一般的な用途にはハウジング全体を高透磁率材料で作る必要はなく、筒形にしてその中に光電子増倍管を包み込めばいいわけです。また、シールド材としては一般的にパーマロイがもっとも優れています。以下、磁気シールドケースについて述べます。

(1) 磁気シールドケースの遮蔽度と磁界の方向性

光電子増倍管は外部磁界の影響を受け易く、特にヘッドオン型は顕著です。そのため地磁気の影響をなくす場合や磁界中で動作させる場合には磁気シールドを施す必要があります。(第13章参照) 透磁率の高い物体中では磁界が弱くなるという性質を利用して、希望するシールド効果を上げることができます。図5-37を使ってシールド材によるシールド効果を示す基準(遮蔽度)を式を使って表現してみることとします。



THBV3_0537JA

図5-37 磁気シールドケースの遮蔽

実際の光電子増倍管用の磁気シールドケースはパーマロイなどの高透磁率材料で作られており、その遮蔽度は次式のようにケースの外と中の磁界の比で表されます。

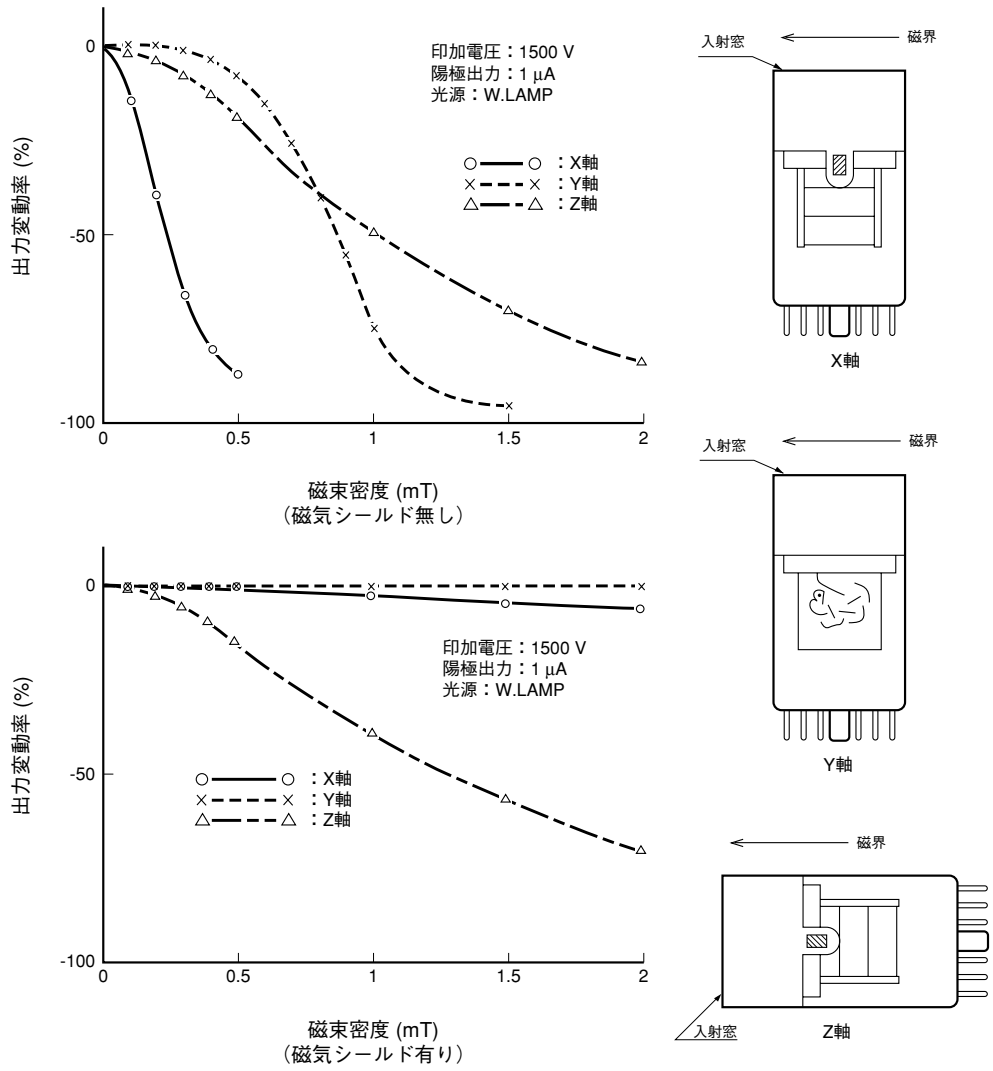
$$S = \frac{H_{out}}{H_{in}} = \frac{3t\mu}{4r} \dots\dots\dots (式 5-16)$$

ここでSは遮蔽度、 H_{out} 、 H_{in} は各々外側、内側の磁界強度、 t は磁気シールドケースの厚さ、 r はその内半径、 μ は透磁率です。内半径の異なる二つ以上の磁気シールドケースを併用する場合の合成遮蔽度 S' は次式のように各々のSの積となり、大きな遮蔽度を得ることができます。

$$S' = S1 \times S2 \times S3 \dots S_n \\ = \frac{3t_1\mu_1}{4r_1} \times \frac{3t_2\mu_2}{4r_2} \times \frac{3t_3\mu_3}{4r_3} \times \dots \times \frac{3t_n\mu_n}{4r_n} \dots\dots\dots (式 5-17)$$

磁気シールドを施すとケース内部にある光電子増倍管にかかる磁界 H_{in} は、 H_{out}/S に減少するため、シールドのなかった時と比べ遮蔽度倍された磁界まで特性が向上することになります。例えば磁気シールドの遮蔽度10、外部磁界3ミリテスラの場合、0.3ミリテスラの磁界中に置かれているのと同じ状態となります。実際には後述する端末効果などで完全に遮蔽度倍された磁界まで特性が向上するというわけではありませんが基本的な考え方としては正しいわけです。

図5-38は1インチの光電子増倍管に0.6mm厚のPC材で作られた磁気シールドを施したものの磁気特性ですが、X・Y軸ともに磁気シールドの効果が現れています。これらの軸では磁気シールドの遮蔽度は同じはずで、シールドのない時の磁気特性がX軸よりY軸の方が優れているため、シールドをした時の特性もY軸の方が良くなっています。また磁気シールドの管軸方向であるZ軸では磁気シールドを施した方がむしろ悪くなっています。これは端末効果の項でも述べていますが、シールドの端面近くで磁界の方向が曲げられているためと考えられます。

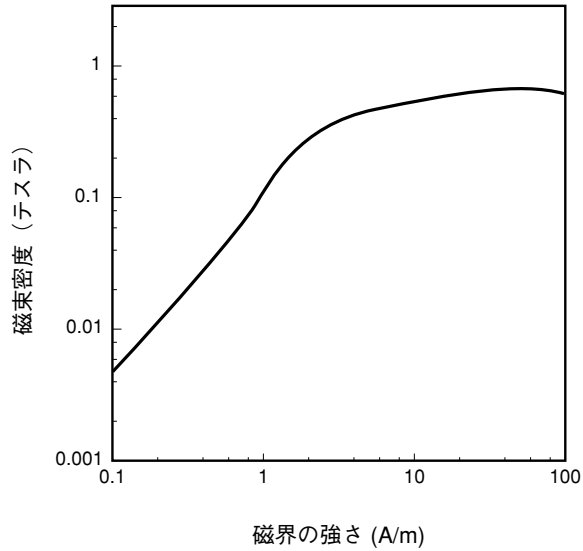


THBV3_0538JA

図 5-38 光電子増倍管の磁気特性

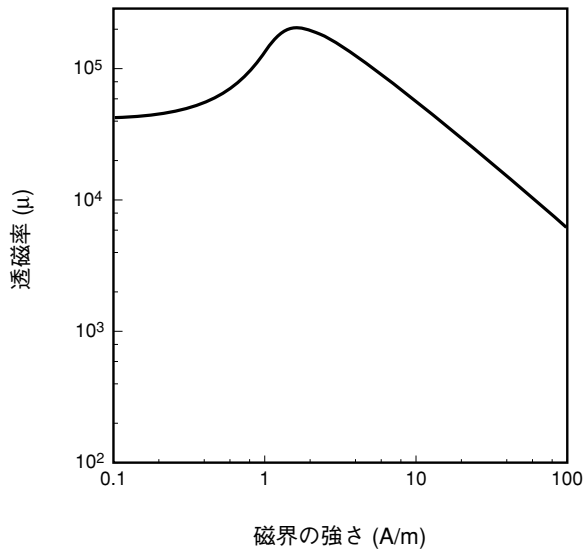
(2) 飽和特性

外部磁界 H と磁性体内部の磁束密度 B との関係 (B - H 曲線) をとると、図 5-39 のような飽和特性を示します。



THEV3_0539.JA

図 5-39 直流磁化曲線

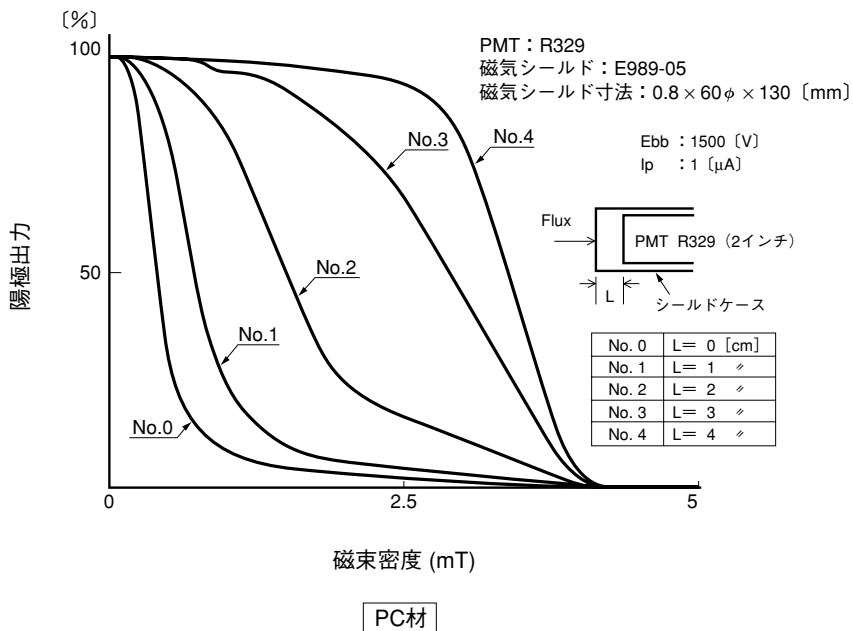


THEV3_0540.JA

図 5-40 外部磁界と透磁率

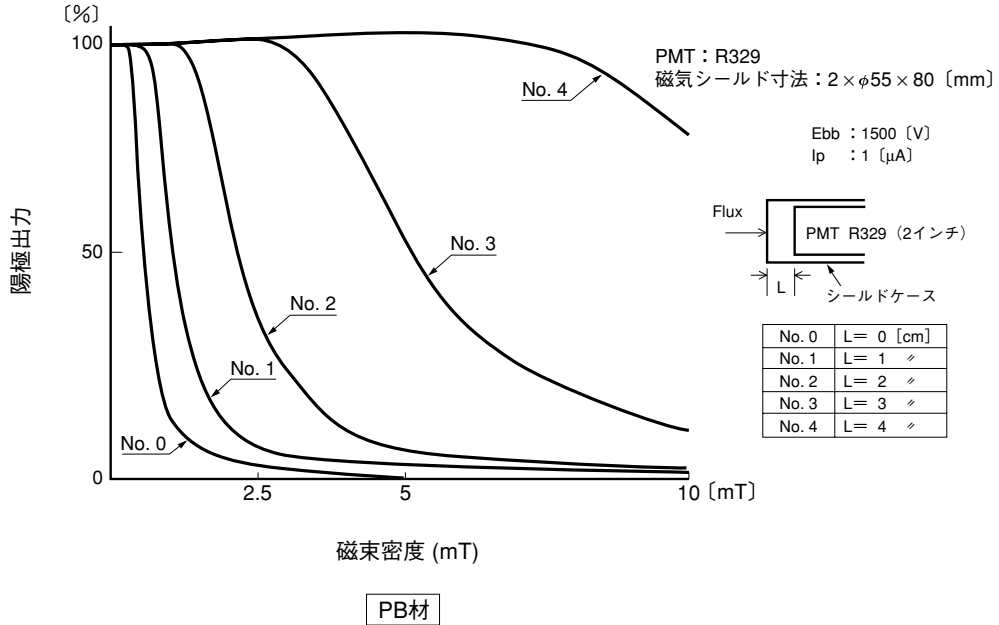
磁性体の透磁率 μ は B/H で与えられるため、外部磁界と透磁率の関係は図5-40のように極大値を持ち、ある磁界強度以上では急激に透磁率と遮蔽度が低下していきます。これらの図は浜松ホトニクス製磁気シールドケースE989(0.8mm厚)で管軸に直角な方向から磁界をかけた時の特性です。

磁気シールドケースにはニッケルの含有量の多いPC材が使われているため、透磁率は非常に高いものの、飽和磁束密度は高くない特性があります。地磁気程度の磁界では遮蔽度はおよそ 10^3 と非常に高く、地磁気のシールドには特に効果があります。ニッケルの含有量の少ないPB材はPC材と比べ透磁率は低いものの、飽和磁束密度は高くなります。図5-41はPC材とPB材を使った時の光電子増倍管の磁気特性の様子を示しています。磁界が高くなるとPC材は急激に出力が落ちますが、PB材は出力の下がり方が緩慢です。特に強い磁界中では飽和磁束密度の高い3～10mm程度の厚手のPB材や軟鉄などの磁気シールド材を併用する必要があります。



THBV3_0541JAa

図 5-41 シールドケース (PC 材) で遮蔽された光電子増倍管の磁気特性

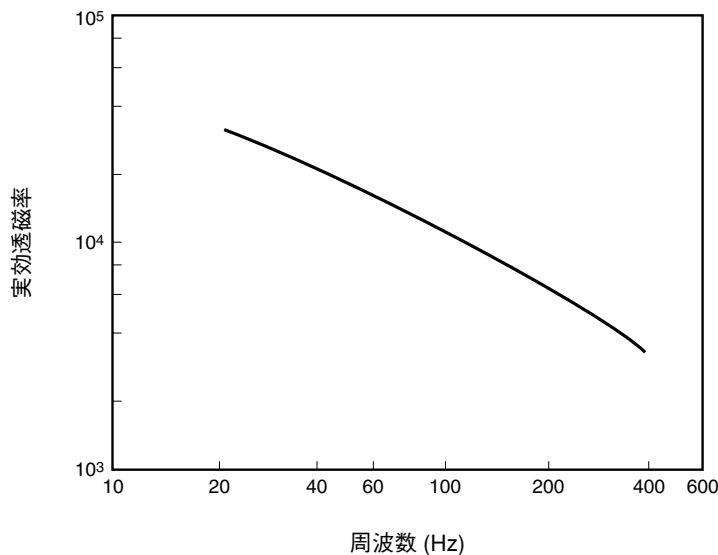


THBV3_0541JAb

図 5-41 シールドケース (PB 材) で遮蔽された光電子増倍管の磁気特性

(3) 周波数特性

以上の磁気シールドケースの特性は全て直流磁界中で示されています。それに対して交流磁界中では、図5-42に示すように周波数が高くなるに従い遮蔽度が低下します。特に肉厚の厚いもの程遮蔽度の劣化が大きいので、1k~10kHzといった高周波磁界中ではむしろ0.05~0.1mm程度の薄い磁気シールド材を使用の方が望ましいでしょう。すなわち磁気シールドケースの厚さは飽和磁束密度と周波数特性との兼ねいで決定されなければなりません。

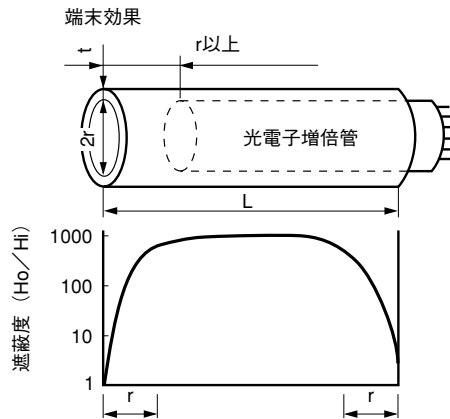


THBV3_0542JA

図 5-42 磁気シールドケース周波数特性

(4) 端末効果

前述の、 $3t \mu / 4r$ で与えられる遮蔽度は、光電子増倍管の全長に対して磁気シールドケースが十分に長い場合でのことです。実際のシールドケースの長さは光電子増倍管より数mm～数cm長いだけであり、その両端では図5-43のように遮蔽度が低下します。磁界の影響を受けやすいのは特に陰極-Dy₁間であるため、この付近の磁気シールドには特に配慮が必要です。実際にはヘッドオン型の場合、光電面を磁気シールドケースの端より半径ないし直径分程度潜り込ませる必要があります。(図5-41 参照)



THBV3_0543JA

図 5-43 端末効果

(5) 光電子増倍管の磁気特性とシールド効果

図5-44に各種光電子増倍管の磁気特性(磁界と陽極出力の関係)、および磁気シールドケース(浜松ホトニクス製E989シリーズ)を使用した場合の遮蔽効果を示します。数mT程度の磁束密度では、磁気シールドケースを使用した場合、磁界の影響は大幅に軽減されることがわかります。

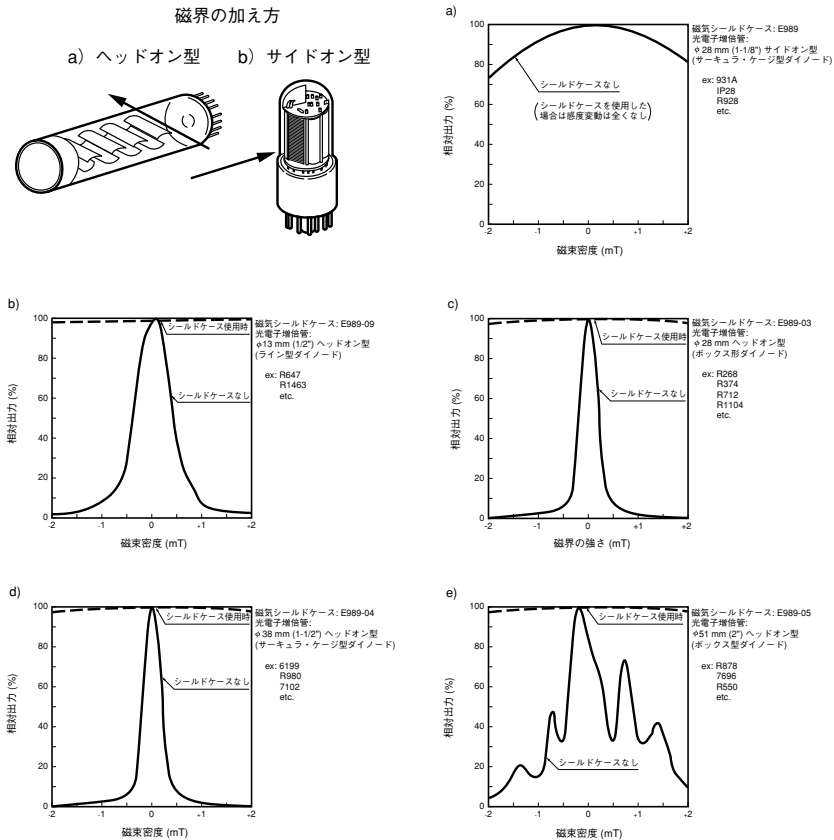


図 5-44 磁気シールドケースの効果

(6) 磁気シールドケースの取り扱い

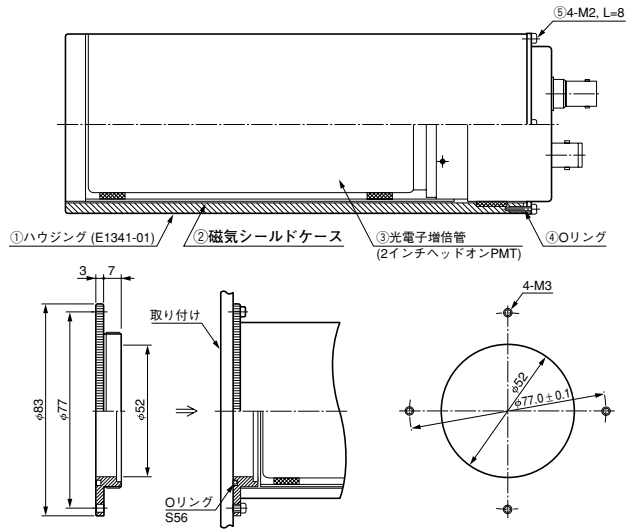
磁気シールドケースは機械的衝撃や変形で容易にその特性が劣化し、一旦劣化すると特殊な焼鈍(焼きなまし)を施さないと回復しません。そのため取り扱いには細心の注意を要し、機械的な衝撃に弱く穴あけや研削などの加工は避けなければなりません。

光電子増倍管は接地電位が側管に接近すると雑音が増加します。このため磁気シールドケースは光電子増倍管の直径に比べて大きめのものを使用しますが、光電子増倍管をその中心部に来るように取り付けないと電気的な問題が起こります。そのため光電子増倍管にソフトテープなどの緩衝材を巻く方法が採られますが、その材料には絶縁性の特に優れた物を使用する必要があります。

HA コーティングタイプ (第 13 章 13.8.2 参照) の光電子増倍管を使用するか、陰極接地・正高圧印加方式の場合には必ずしも必要ではありませんが、その他の場合には磁気シールドケースを安全のため、5~10 MΩの抵抗を介して陰極電位に接続することが雑音対策上望ましいです。ただしこの場合、磁気シールドケースの絶縁に十分注意することは当然です。

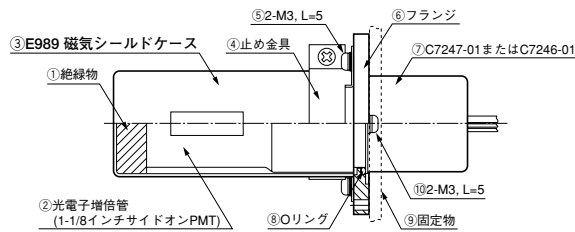
磁気シールドケースの取り付けの参考として、浜松ホトニクス製のハウジングとフランジを例としてその構造を図 5-45 に示します。

ハウジング ヘッドオン型光電子増倍管用



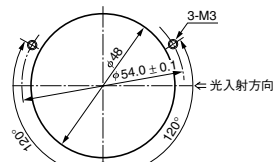
THBV3_0545JAa

フランジ サイドオン型光電子増倍管用



フランジA7709は、①④⑤⑥⑧⑩セットの総称です

【フランジ固定位置】



NOTE A E717-63, E5815-01にも取付可能です。

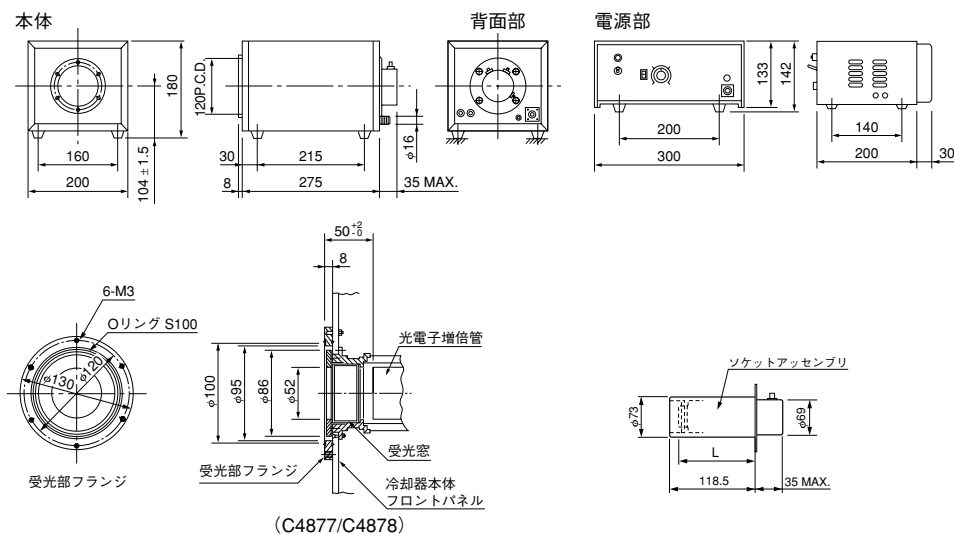
THBV3_0545JAb

図 5-45 ハウジング・フランジに用いられている磁気シールドケースの取り付け例

5.5 冷却

暗電流の主な原因の一つに熱電子放出があることは第4章で述べましたが、一般的な使用電圧の範囲では熱電子放出によるものが支配的になっています。そのため冷却すれば暗電流や雑音パルスを減らすことができ、SN比や検出限界を向上させることができます。しかし冷却にあたっては以下に述べる諸注意が必要です。

光電子増倍管の冷却は通常、暗電流の温度特性により0℃～30℃の範囲で行われることが多いですが、その際入射窓・ステム・デバイダ回路などが結露する事があります。結露を防ぐ方法として冷却したN₂ガスを使用することが好ましいのですが、実際は装置の都合で使用できないことが多くあります。結露によって、入射窓では入射光の損失、ステム・デバイダ回路では漏洩電流の増大などを引き起こします。そのため浜松ホトニクスでは光電子増倍管専用冷却器として冷却器本体の中に入射窓のくもりを防止するために除霜ヒーター付の真空セル型石英窓や気密性を有するソケットアセンブリ⁶⁾を採用した専用冷却器も供給しています。図5-46に電子式(パルチエ)冷却器の1例を示します。

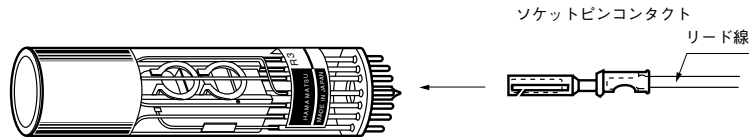


(C4877/C4878)

THBV3_0546JA

図5-46 電子式冷却器 (浜松ホトニクス製)

この冷却器は浜松ホトニクス製でC4877は51 mm (2インチ)径または38 mm (1-1/2インチ)径ヘッドオン型光電子増倍管用、C4878はマイクロチャンネルプレート内蔵光電子増倍管用を示し、いずれも-30℃まで冷却温度を設定できる電子式冷却器です。また冷却時にステム・側管の破壊(クラック)がまれに起こることがありますが、これはソケットと光電子増倍管のステムの熱膨張率の違いによるものです。浜松ホトニクス製の光電子増倍管に他社のソケットが使われた場合にこの現象が時々見られますが、これはソケットとステムとで設計上の違いがあるためです。他の原因としてはステム自体に歪が残っており冷却が引き金になってステムクラックを起こすことがあります。ドライアイスで直接冷却するなどして-50℃以下になる場合、ソケットの使用をやめ直接リード線をステムピンに取り付ける方法になります。この場合図5-47の様にソケットコンタクトを使うと取り付けやすくなります。



THBV3_0547JA

図 5-47 ソケットピンコンタクトによる接続

熱電子は光陰極に限らずダイノードからも放出されますが、後段のダイノードからのものは増倍率が低くなるため、実際に問題となるのは光電面、 Dy_1 、 Dy_2 からのものです。従ってこの部分の冷却だけでもかなり効果があり、またその方がステム、ベース、ソケットの結露による漏洩電流の点からも有利といえます。

また光電子増倍管の内部は真空のため熱がダイノードに伝わりにくく、このため周囲温度が一定になってからおよそ一時間以上放置することにより、暗電流や雑音パルスが一定になってから測定を始めるのが良い方法です。またデバイダ抵抗の発熱によりダイノードが加熱されることもあるためデバイダ抵抗は必要以上に低い値は使うべきではありません。

第5章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株)：光電子増倍管と関連製品。

PHOTOMULTIPLIER TUBES AND RELATED PRODUCTS.

- 2) 宇田新太郎：新版 無線工学 I 伝送編. 丸善(株).
- 3) Ref.to “Kerns-type PM base” Produced by R.L.McCarthy.
- 4) 浜松ホトニクス(株)：シンチレーション・カウンティング用光電子増倍管の使い方.
- 5) 五十嵐 均他：ガンマカメラ均一性におよぼす磁場の影響.

EFFECT OF THE MAGNETIC FIELD TO THE UNIFORMITY OF A GAMMA CAMERA, 核医学 28 巻, 2号(1991).

Ref. to IMPROVEMENT OF 20-INCH DIAMETER PHOTOMULTIPLIER TUBES PUBLISHED BY A.SUZUKI (KEK,Tsukuba) AND OTHERS.

- 6) 浜松ホトニクス(株)：光電子増倍管と関連製品。

PHOTOMULTIPLIER TUBES AND RELATED PRODUCTS.

メ 毛

第6章

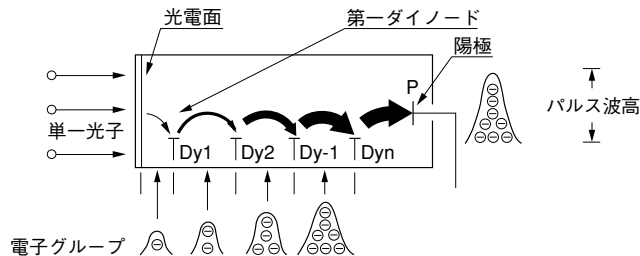
光子計数法^{1) 2) 4) ~ 12)}

ここでは、蛍光分析、化学(生物)発光などのように光の絶対量が少なく極微弱な光の測定に使用されている光子計数法の原理、使用法、特性、利点および代表的な光電子増倍管の特性について記述します。

6.1 アナログ方式とデジタル (光子計数) 方式

光電子増倍管に入射する光の強さと、出力処理回路の帯域によって処理の方法がアナログ方式とデジタル方式に分けて考えることができます。

図6-1に示すように、光電子増倍管に光が入射すると光電面から光電子が放出され、その電子はダイノードでカスケード増幅され(通常 $10^6 \sim 10^7$ 倍)陽極に達し、出力処理回路に接続されます。

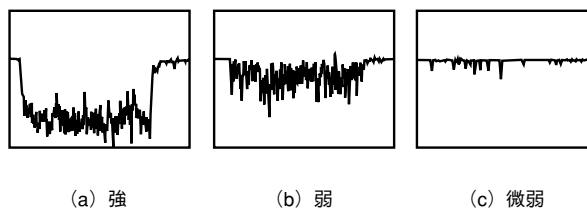


THBV3_0601JA

図 6-1 光子計数法における光電子増倍管の動作

ここで入射する光の強さを変えて光電子増倍管の出力信号をオシロスコープで観測すると(図6-2)、光が強い領域では、光電子増倍管出力信号のパルス間隔が狭いためおのおの重なり合ったアナログ波形となります(図6-2(a), (b))。しかし、光が弱くなると交流分(ゆらぎ)の割合が増え、最終的にはおのおのが離散したパルス状となります(図6-2(c))。このパルス状になったものを二値化して計数する方法をデジタル方式での計測といい、通常光子計数法とよばれています。

アナログ計測では、図6-2(a)の交流成分を含んだ平均値が信号になるのに対し、光子計数法では図6-2(c)における各パルス数が信号になります。後者は波高弁別器(Discriminator)により、ノイズパルスとの分離が可能で、安定性が高いことや、アナログ法に比べ高SN比で測定を行えるという利点があり、特に微弱光領域で大きい効果があります。



THBV3_0602JA

図 6-2 異なる光強度レベルにおける光電子増倍管からの出力波形

6.2 光子計数法の原理

光量が微弱になると光電子増倍管の時間分解能(パルス幅)内に、2個以上の光電子がほとんど存在しない状態になります。これを単一光電子領域といい、光子計数法はこの領域で行なわれます。光子計数法で重要となる量子効率、一個の光子が光電面に入射したときの光電子の発生確率を意味します。単一光電子領域では、1光子あたりの放出電子数は1または0しかないので、単位時間当たりの光電面からの放出電子数と光電面への入射光子数との比が量子効率と考えることができます。光電面より放射された光電子(一次電子)のうち、第一ダイノードに入射し増倍に寄与する光電子の確率を収集効率と呼んでいます。光電子には一部第一ダイノードに収集されないなど、正規の軌道をとらず増倍に寄与しないものもあります。また、光子計数法において計数值(出力パルス数)の入射光子数に対する割合を光子計数領域における光電子増倍管の検出効率または計数効率といい、次式で表わされます。

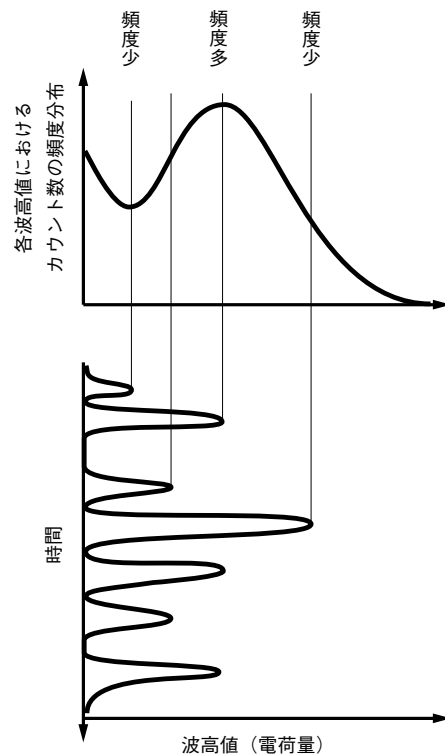
$$\text{光子計数領域における検出効率(計数効率)} = (N_d/N_p) = \eta \times \alpha \quad \dots \text{(式 6-1)}$$

ここで N_d は計数值、 N_p は入射光子数、 η は光電面の量子効率、 α はダイノードの収集効率です。検出効率は二値化する際のしきい値にも大きく依存します。

第一ダイノードにおける二次電子の個数は光電面からの一次電子一個に対して数個程度の離散量になるため広がりをもち、簡易的にはポアソン分布とみなされ、その平均電子数が二次電子放出比 δ となります。

同様のことが、二段目以降のダイノードについてもいえ、最終の電子グループが光電面からの光電子に対応して陽極へ出力として現われます。 n 段のダイノードを持つ光電子増倍管では、光電面からの光電子は、 δ^n 倍にカスケード増倍された一つの電子群となり陽極からパルス出力されます。このとき、陽極での各出力パルスは、各ダイノードでの二次電子増倍比のゆらぎ(カスケード増倍による統計的ゆらぎ)や、ダイノードの場所による増倍率の不均一性や、本来の増倍過程を通らない電子などにより波高値に分布をもちます。陽極からのパルスを時間的に積算し、波高値を横軸に取ったヒストグラムを図6-3に示します。これをパルス波高分布(Pulse Height Distribution)といいます。

図6-3には光電子増倍管出力パルスとの関係も示します。パルス波高分布は放射線計測に用いられるマルチチャンネル波高分析器(Multi Channel Pulse Height Analyzer; MCA)などを使って得ることができます。

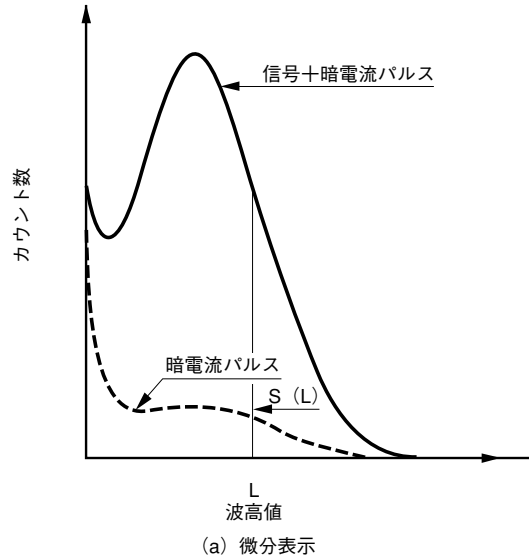


THBV3_0603JA

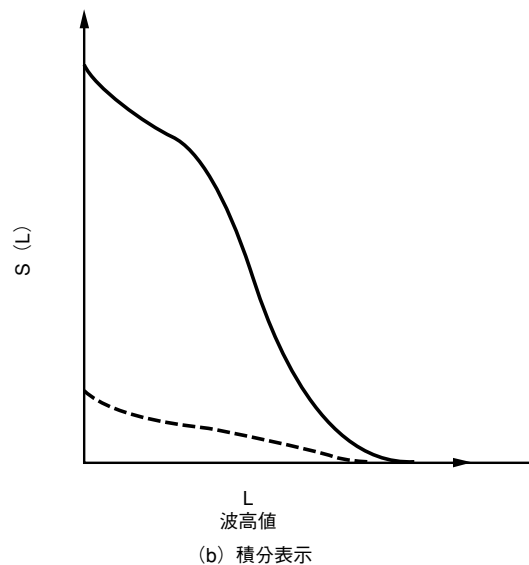
図6-3 光電子増倍管の出力とパルス波高分布

図6-4(a)にあるパルス波高分布の例を示します。光電子増倍管は光が入射していない時でもいくらかの出力(暗電流パルス)を生じています。図の破線は光電子増倍管の暗電流パルスを示したもので、やや低波高部(左側)に偏ったものになります。これは光電面からの熱電子放出の他にダイノードからの熱電子放出があるためです。ダイノードからの熱電子は、光電面からの電子に比べ増倍回数が少ないため、低波高となります。

図6-4(b)は、しきい値 L より大きな波高値をもつパルス全部の計数値 $S(L)$ をプロットしたもので、(a)と(b)は微分と積分の関係にあり(b)は積分曲線です。通常の光子計数装置ではこの積分曲線が得られます。



THBV3_0604JAa



THBV3_0604JAb

図6-4 パルス波高分布の微分表示と積分表示

6.3 光子計数法の動作法と特性

ここでは、光子計数を行う場合の具体的な回路構成、光子計数法による計測上の基本的特性を述べます。

(1) 具体的な回路構成

図 6-5 に光子計数法の回路構成と各回路系におけるパルス波形を示します。

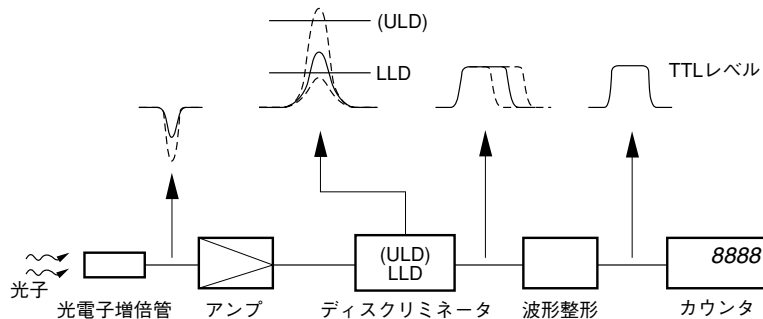


図 6-5 具体的な回路構成

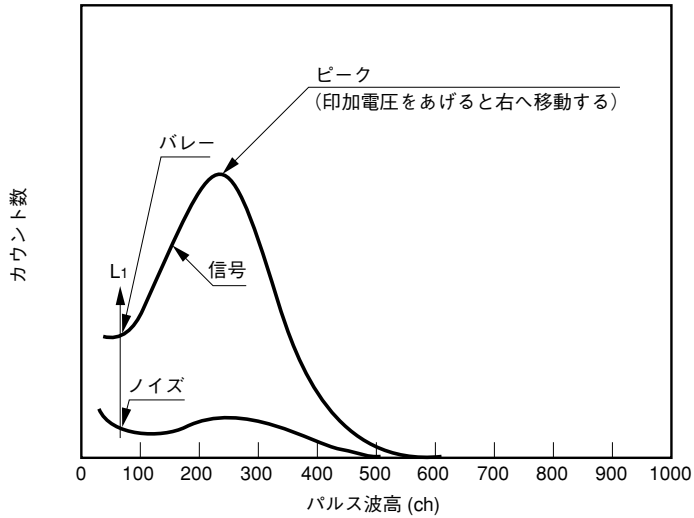
THBV3_0605JA

光電子増倍管からの電流出力パルスは広帯域のアンプで電圧変換、増幅され、波高弁別器(ディスクリミネータとも呼ばれる)、波形整形回路を経てカウンタで計数されます。波高弁別器では、あらかじめ設定された基準電圧(しきい値)と比較して、波高値がそれに満たないものは排除されます。一般には低波高側に基準電圧を設定した LLD (Lower Level Discriminator) を設定します。また、高波高側にも ULD (Upper Level Discriminator) を設けて高波高ノイズを除去する場合があります。カウンタにはゲート回路が設けられ、任意の計数時間が設定できます。

(2) 光子計数法における基本的特性

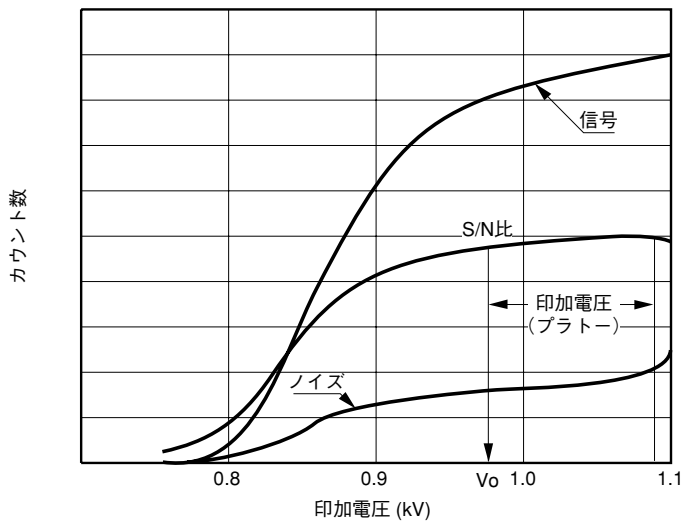
a) パルス波高分布とプラトー特性

マルチチャンネル波高分析器があれば、波高分布から適当な位置にしきい値を設定することができます。図 6-6 にパルス波高分布の具体例を示します。各々のプロットはノイズによるものと信号によるものを示します。通常は、暗電流パルスの波高分布は低波高域に偏っているため、しきい値を波高分布の谷(バレー)(L_d)付近に設定することにより検出効率をほとんど犠牲にすることなくノイズを除去することができます。しかし、実際には波高分析器は一般的ではなく、図 6-5 の回路構成でプラトー特性を求めるのが一般的です。ある電圧にしきい値を設定し、それ以上のパルス波高の総計数を計数し、光電子増倍管の印加電圧を変えて計数の変化を求めると図 6-7 のような特性が得られます。これをプラトー特性といいます。プラトー領域においては、印加電圧に対するカウント数の変化は小さいものとなります。これは、アナログ法においては光電子増倍管のゲイン変化がそのまま出力波高値の変化となるのに対して、フォトンカウンティングでは 2 値化によりパルス数のみを計数するためです。



THBV3_0606JA

図 6-6 パルス波高分布特性



THBV3_0607JA

図 6-7 プラトー特性

b) 光電子増倍管の印加電圧の設定

計測上の観点からSN比は重要な要素になります。ここでは、SN比を信号計数率の平均と、信号およびノイズの計数値のゆらぎ(標準偏差またはr.m.s. (root mean square)で表す)の比と定義します。図6-7に示すSN比のカーブは、プラトー特性を求めたのと同様に、印加電圧を変えた時のSN比の変わりかたを求めた結果です。図から印加電圧は、プラトー領域が始まる電圧(V_0)から使用する光電子増倍管の最大印加電圧の間で設定することが望まれます。

c) 計数率の直線性

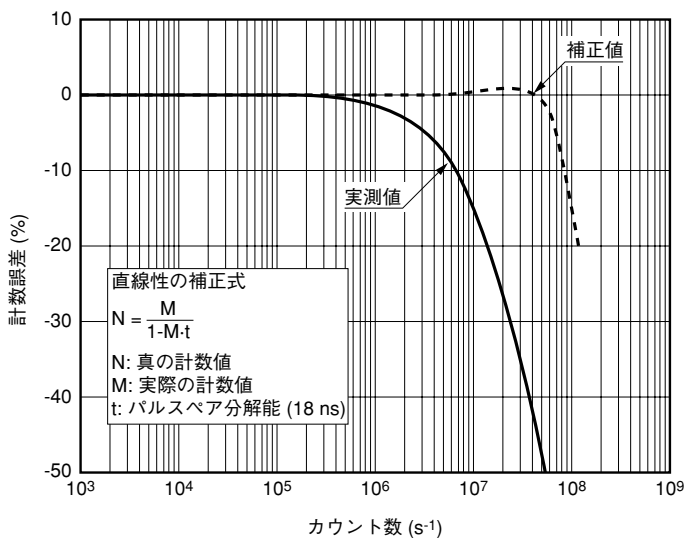
光子計数法は広範囲で良好な直線性を有しています。測定系の計数率の直線性の下限は、暗電流パルス数によって制限され、上限は、最大計数率で制限されます。最大計数率は、パルスペア分解能と呼ばれる特性でまります。パルスペア分解能というのは、パルスを分離できる最小の時間間隔のことです。パルスペア分解能の逆数が、可能な最大計数率となりますが、事象がランダムに起きることが多いので、パルスオーバーラップ(パルスの重なり)のために計数誤差を生じること)の確率を考慮すると、実質上の最大計数率はその1/10程度になります。ここで、真の計数率を N (s^{-1})、計測された計数率を M (s^{-1})、時間分解能を t (s^{-1}) とすると、計数率のロス $N-M$ である一方、パルスオーバーラップによる不感時間は $M \cdot t$ で表されるので、これは $N \cdot M \cdot t$ とも表すことができます。したがって、 $N - M = N \cdot M \cdot t$

これを变形すると、真の計数率は、

$$N = \frac{M}{1 - M \cdot t} \quad \dots\dots\dots (式 6-2)$$

で求めることができ、この関係を使って補正が可能です。

図6-8にパルスペア分解能18 nsをもつシステムの実測値と補正後の係数率直線性の例を示します。この例では、補正後は $10^7 s^{-1}$ を超える計数率においても計数誤差1%以下の精度が得られています。



THEV3_0608JA

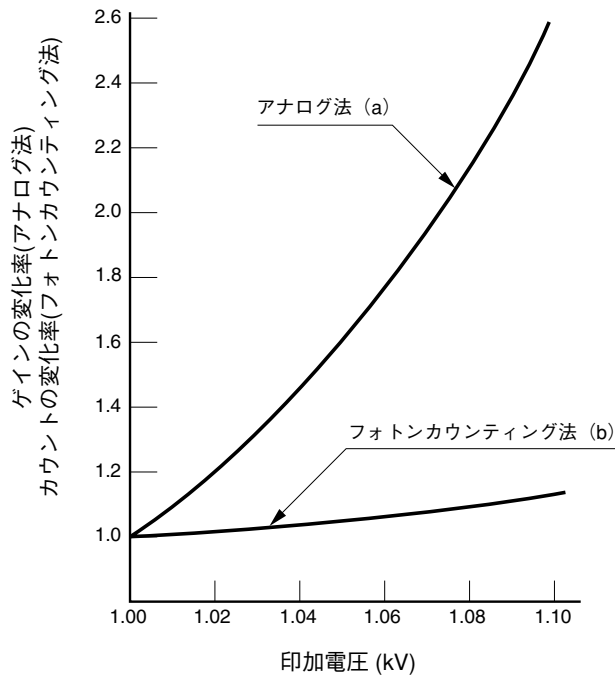
図 6-8 カウントレートの直線性

d) 光子計数法の利点

光子計数法には、アナログ法に比べて、数々の利点があります。ここでは、安定性、SN比について、述べます。

(I) 安定性

光子計数法の利点の一つに、安定性がよいことがあげられます。これは、電圧変動や、光電子増倍管のゲインの変動による影響を受けにくいことを意味します。光子計数法では設定電圧がプラトー領域にあれば、多少電圧が変動しても、出力計数には、あまり影響しませんが、アナログ法では、かなり出力電流が変動してしまいます。光子計数法では、印加電圧の変動に対して安定であるということは、ゲインの変動にも安定であると考えることができます。通常光子計数法は、アナログ法に比べ数倍変動に対して強いといわれています。(図6-9参照)



THEV3_0609JA

図6-9 印加電圧の変動に対する安定性

(II) SN比

信号光が光電子増倍管の光電面に入射すると、光電子が発生しますが、単位時間内の光電子数、ダイノードでの二次電子数はポアソン分布で表される統計的確率事象であるため、ゆらぎ(交流分)をもちます。なお、SN比については、第4章4.3.7でも述べられています。信号に重畳した交流成分の雑音を原因別に分類すると、次のようになります。

- ① 信号光によるショット雑音
- ② 背景光によるショット雑音
- ③ 暗電流によるショット雑音

これらを盛り込んだ光電子増倍管の出力のSN比^{2)~9),11)}は
アナログ法

$$\text{SN比(電流)} = \frac{I_{ph}}{\sqrt{2eNF\{I_{ph}+2(I_b+I_d)\}}} \dots\dots\dots \text{(式 6-3)}$$

I_{ph} : 入射光による信号電流(A)

e : 電子の電荷(c)

NF: 光電子増倍管の雑音指数

I_b : 背景光による陰極電流(A)

I_d : 暗電流による陰極電流(A)

B: 測定系の帯域幅(Hz)

ここで真の信号電流 I_{ph} は全出力電流から ($I_b + I_d$) を減算することで求めることとします。但し、後段の増幅器からの雑音は一般的に光電子増倍管のゲイン μ が十分大きいため無視できるものとします。

光子計数法におけるSN比は以下の式で与えられます。

$$\text{SN比} = \frac{N_s\sqrt{T}}{\sqrt{N_s+2(N_b+N_d)}} \dots\dots\dots \text{(式 6-4)}$$

N_s : 毎秒あたりの入射光による計数

N_b : 毎秒あたりの背景光による計数

N_d : 毎秒あたりの暗電流による計数

T: 計測時間(sec)

ここでも同様に真の信号計数 N_s は全計数から ($N_b + N_d$) を減算することで求めます。

今、一般的な時間と周波数の等価関係 ($T = 1/2B$) から

$B=1$ (Hz)、 $T=0.5$ (sec) とすると

アナログ法

$$\text{SN比(電流)} = \frac{I_{ph}}{\sqrt{2eNF\{I_{ph}+2(I_b+I_d)\}}} \dots\dots\dots \text{(式 6-5)}$$

光子計数法

$$\text{SN比} = \frac{N_s}{\sqrt{2\{N_s+2(N_b+N_d)\}}} \dots\dots\dots \text{(式 6-6)}$$

となり、光子計数法の方が、雑音指数NFに関する分だけSN比がよくなることがわかります。また、暗電流は、光電面からの熱電子のほかにも各ダイノードからの熱電子も含まれるため、暗電流のパルス波高分布は、やや低波高側に偏ったものになります。ここで波高弁別器により信号成分を保ちつつ効果的に暗電流成分を除去できるため、実際にはさらにSN比の向上が期待できます。また交流的なパルスのみを計測するため、直流的なリーク電流の影響も受けません。

第6章 参考文献

- 1) IEC PUBLICATION 306-4(1971).
- 2) 浅井, 稲葉: 画像技術 7月号. 15(1971).
- 3) 林 達郎: 分光研究. 22, 4, 233(1973).
- 4) 稲場文男: オプトエレクトロニクス技術 '89(1989).
- 5) R.Foord, R.Jones, C.J.Oliver, E.R.Pike: Appl.Opt.1975, 8(1969).
- 6) J.K.Nakamura and S.E.Schmarz: Appl.Opt.1073, 7, 6(1073).
- 7) 市村 勉, 稲場文男: 応用物理 39. 9(1970).
- 8) 吉村武晃, 吉川 淳, 鈴木範人: 分光研究. 21, 4(1972).
- 9) 清水慶昭, 稲場文男: 分光研究. 22, 4(1973).
- 10) 松本 元, 桜井健二郎: 計測と制御. 15, 6(1976).
- 11) 浜松ホトニクス(株): フォトンカウンティング(2001).
- 12) 神谷昭文, 中村公嗣, 新垣 実: 分光研究. 52, 4, 249(2003).

第7章

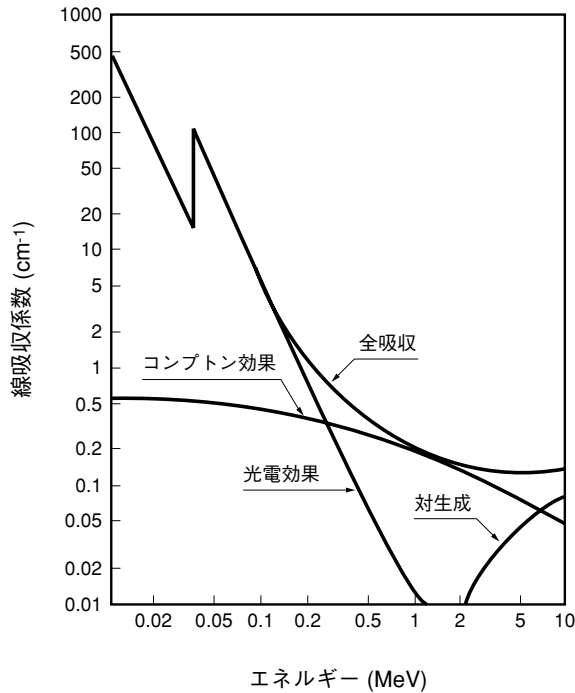
シンチレーション計数法

各種放射線は、医学応用、工学的応用、材料分析などの分野での非破壊検査、診断用として広く用いられており、放射線検出器の果たす役割も重要です。放射線の検出方法¹⁾²⁾³⁾⁴⁾は、気体または固体の電離作用を利用した比例計数管、半導体検出器、物理化学的変化を用いたフィルム、霧箱、シンチレーション計数法を用いた方法などが代表的なものです。

シンチレーション計数法では、シンチレータと光電子増倍管の組合せが一般的で実用上よく用いられています⁵⁾⁶⁾。シンチレーション計数法の利点としては、シンチレータの材質の選択が自由なこと、光電子増倍管の特長を生かした高速応答性、高検出効率、大口径化が可能なことにあります。ここでは光電子増倍管をシンチレーション計数法で用いる時の特性の定義、測定方法、代表的な数値例などについて解説します。

7.1 シンチレータと光電子増倍管

シンチレータに放射線が入射するとシンチレータは短い減衰時間をもった蛍光を発生し、これをシンチレーションといいます。 γ 線の場合次の3つの相互作用によりシンチレータ内に自由電子が発生し、この電子がシンチレータの束縛電子を励起することによって蛍光を発生します。3つの相互作用とは光電効果、コンプトン効果および、電子対生成です。これらの作用の起こる確率はシンチレータの種類と γ 線のエネルギーにより異なります。図7-1にNaI(Tl)シンチレータでの γ 線エネルギーに対するこれらの作用の割合を示します。



THBV3_0701JA

図7-1 NaI(Tl)シンチレータでの γ 線の吸収特性

図より γ 線の低エネルギー域では光電効果が主ですが、エネルギーが高くなると電子対生成が増えてくることが分かります。上の3つの相互作用のうち、光電効果は γ 線の全エネルギーを軌道電子に与えるためこの効果で発生した蛍光量は γ 線のエネルギーに比例します。また光電子増倍管はこの光量に比例した電荷を出力するので、結果的には光電子増倍管の出力パルス波高は放射線のエネルギーに比例します。従ってシンチレータと光電子増倍管を組み合わせ、その出力パルスの波高値と計数率を測定することによって放射線のエネルギー分布とその線量を知ることができます。エネルギー分析の測定方法は光電子増倍管の電流出力を積分型前置増幅器で電圧パルスに変換しP.H.A.(Pulse Height Analyzer)で波高分析²⁾します。この時の様子を図7-2に示します。

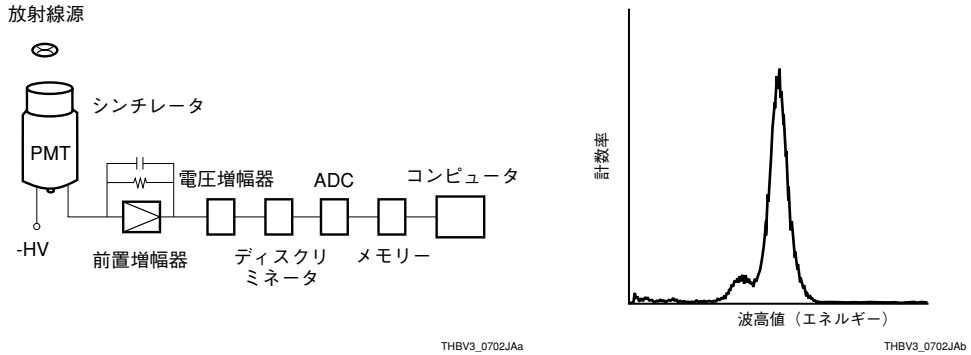


図7-2 シンチレーション計数法の測定ブロック図と波高分布例

一方シンチレータの種類は、無機シンチレータと有機シンチレータに大別できます。無機シンチレータには、ハロゲン化合物が多く NaI(Tl), BGO, BaF₂, CsI(Tl), ZnS などあり、代表的なものが NaI(Tl)です。一般に有機シンチレータと比べ発光効率、吸収係数が高く、光電効果の割合が大きいなどの利点があります。潮解性を持ったり衝撃に弱いなど取り扱いにくい面もあります。最近では、NaI(Tl)シンチレータの代わりとして潮解性が無く密度が高い YAP:Ce や PET (Positron Emission Tomography)用として密度が高くて減衰時間の短いシンチレータとして、LSO:CeやGSO:Ce等が開発されています。

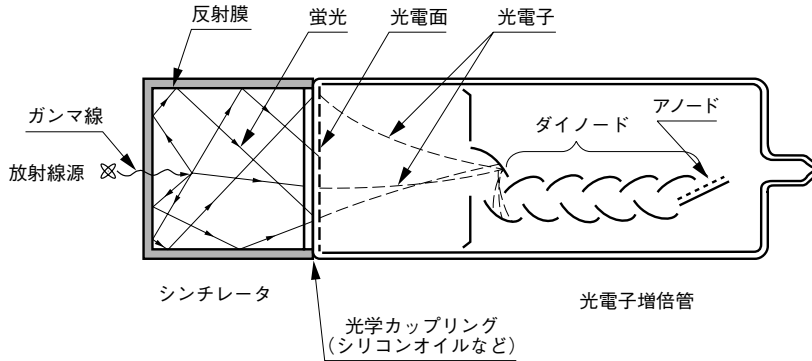
有機シンチレータには、プラスチックシンチレータ、液体シンチレータ、有機結晶であるアントラセンなどがあります。一般に減衰時間が短く潮解性はありません。プラスチックシンチレータは加工が容易なので、特殊な形状や大きなサイズを作る事が出来るし、取り扱いも簡単です。一方 γ 線に対しては、吸収係数が低く光電効果の割合が低いためエネルギー分析には向きません。表7-1に最近までに開発されているシンチレータの代表的な特性および用途を示します。

シンチレータ

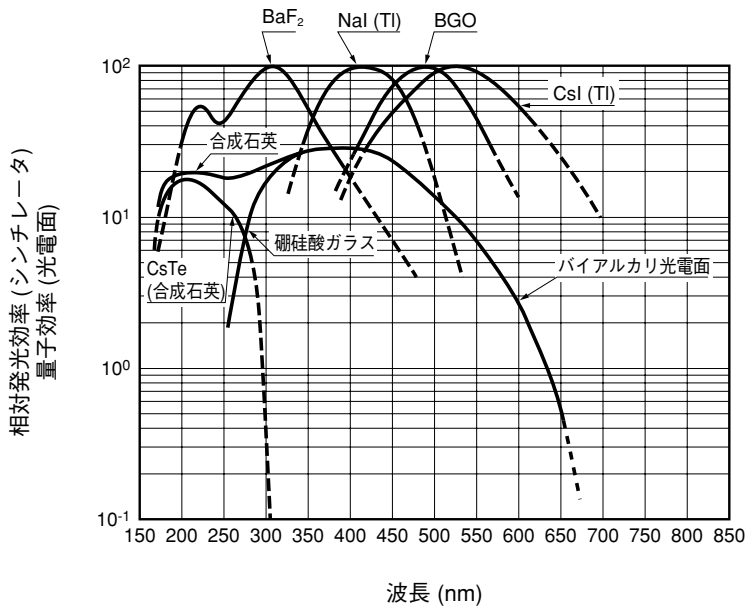
	密度 (g/cm ³)	相対発光 強度(NaI (Tl)を100)	発光時間 (ns)	発光ピーク 波長(nm)	用途
NaI(Tl)	3.67	100	230	410	サーベイメータ、エリアモニタ、ガンマカメラ
BGO	7.13	15	300	480	PET
CsI(Tl)	4.51	45~50	1000	530	サーベイメータ、エリアモニタ
Pure CsI	4.51	<10	10	310	高エネルギー物理学実験
BaF ₂	4.88	20	0.9/630	220/325	TOF PET、高エネルギー物理学実験
GSO:Ce	6.71	20	30	310/430	エリアモニタ、PET
Plastic	1.03	25	2	400	エリアモニタ、中性子検出
LSO:Ce	7.35	70	40	420	PET
PWO	8.28	0.7	15	470	高エネルギー物理実験
YAP:Ce	5.55	40	30	380	サーベイメータ、小型ガンマカメラ

表7-1 シンチレータの代表的な特性および用途

またシンチレータはカップリング材を使って光電子増倍管に密着させます。この様子を図7-3に示します。これにはシンチレータと光電面窓材間の光の損失を防ぐため、空気層の代わりにガラスと屈折率の近いシリコンオイルなどが使われますが、発光波長域で透過率の良いものを用いるべきです。図7-4に代表的なシンチレータの発光スペクトラムと、光電子増倍管の光電面の分光感度特性を示します。



THBV3_0703JA

図7-3 NaI(Tl)の γ 線での発光

THBV3_0704JA

図7-4 光電面の量子効率とシンチレータの発光波長分布

7.2 諸特性

(1)エネルギー分解能

シンチレーション計数法では、波高分析器を使用してエネルギースペクトルを計測するスペクトル法と、波高分析器を用いないカウンティング法（後述）があります。スペクトル法では各種放射線による光電ピーク波高を弁別する事が大切です。この特性はエネルギー分解能として評価されます。エネルギー分解能は、Pulse Height Resolution (PHR) とも呼ばれます。

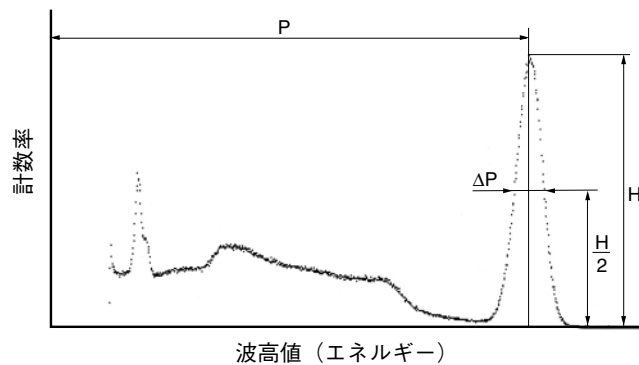
エネルギー分解能の定義を下式と図7-5に示します。エネルギー分解能は、パーセントで表示されるのが一般的です。

$$R = \frac{\Delta P}{P} \dots\dots\dots \text{(式 7-1)}$$

R : エネルギー分解能

P : ピーク値

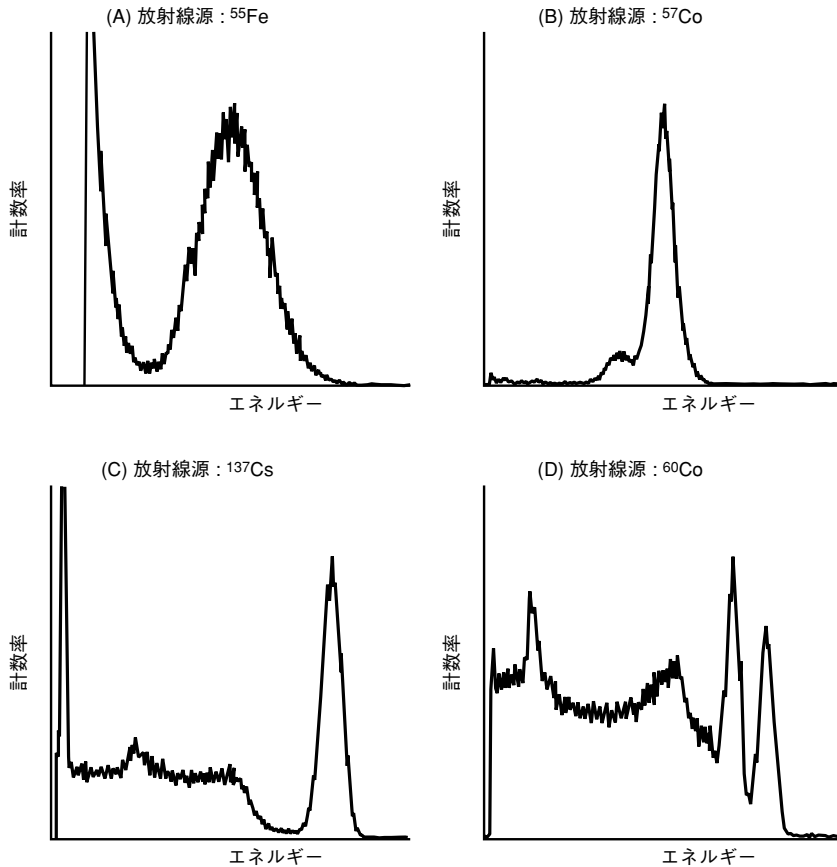
ΔP : 半値幅（ピーク値の高さ(H)の半分(H/2)のときの幅）



THBV3_0705JA

図 7-5 エネルギー分解能の定義

図 7-6 に、 ^{55}Fe の特性 X 線および種々の γ 線 (^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co) と、NaI(Tl) シンチレータによる発光を光電子増倍管で検出した場合の代表的な波高分布を示します(測定方法は図 7-2 による)。



THBV3_0706JA

図 7-6 波高分布の代表例

エネルギー分解能に影響する因子をまとめると、次のようになります。

- (1) シンチレータの発光効率
- (2) シンチレータの固有分解能
- (3) 光電子増倍管光電面への光の収集
- (4) 光電子増倍管光電面の量子効率(η)
- (5) 第一ダイノードへの収集効率(α)
- (6) 光電子増倍管の増倍部ゆらぎ

一般的にエネルギー分解能は次式で示されます。

$$R^2(E) = R_s^2(E) + R_p^2(E) \quad \dots\dots\dots (式 7-2)$$

ここで、

$$R_p^2(E) = \frac{5.56}{N\eta\alpha} \left(\frac{\delta}{\delta-1} \right) \quad \dots\dots\dots (式 7-3)$$

式中、N は単位崩壊あたり光電面に入射する光子数の平均値、 η は量子効率、 α は収集効率、 δ は各々のダイノードの二次電子増倍率です(ここでは、各段等しい値としています)。

$R_s(E)$ はシンチレータに起因する成分、 $R_p(E)$ は光電子増倍管に起因する成分を示し、両者とも入射 γ 線エネルギー(E)に依存します。(Rp²(E)はEに逆比例します。)

R, R_s , R_p の値は2インチ径×2インチ長のNaI(Tl)シンチレータと、2インチ径光電子増倍管(浜松ホトニクス製：R6231)を用いた時、おおよそ以下の値になります。

E = 122 keV (⁵⁷Co)で、R = 8.5%、 R_s = 6%、 R_p = 6%

E = 662 keV (¹³⁷Cs)で、R = 6.5%、 R_s = 5.5%、 R_p = 3.4%

高いエネルギー分解能を得るために光電子増倍管に要求される特性としては、量子効率が高いこと、収集効率が良いことが上げられます。また、発光効率が高く固有分解能の優れたシンチレータを用いる事と同時に、光電子増倍管とシンチレータの結合損失を少なくすることも大切です。このため、通常シンチレータと光電子増倍管の結合面を屈折率が窓材にほぼ等しいシリコングリスでカップリングして用います。

シンチレータが充分厚い場合、シンチレータの発光強度分布は放射線の入射位置に拠らずに光電面上で一定になるので、光電子増倍管のユニフォミティはエネルギー分解能にあまり影響を与えません。しかし、シンチレータが薄い場合、シンチレータの発光強度分布は放射線の入射位置によって変化するので、光電子増倍管のユニフォミティの良否によってはエネルギー分解能に影響を与えます。これを避けるため、シンチレータと光電子増倍管の間にライトガイドを挿入して、シンチレータからの光を拡散し、光電子増倍管の光電面全体に一樣に入射させる方法もあります。しかし、通常のユニフォミティを有する光電子増倍管に対しては必要ではありません。

γ 線源	エネルギー (keV)	NaI(Tl)+PMT	BGO+PMT
⁵⁵ Fe	5.9	40~50%	—
²⁴¹ Am	59.5	12~15%	70~150%
⁵⁷ Co	122	8.5~10%	35~50%
²² Na	511	7.5~9.0%	13~25%
¹³⁷ Cs	662	6.5~8.5%	11~20%
⁶⁰ Co	1,170	5~6.5%	8.5~11%
	1,330	4.5~5.5%	8.0~9.5%

表 7-2 代表的な γ 線に対する NaI(Tl)と BGO でのエネルギー分解能

エネルギー分解能は、ガンマカメラやスペクトロメータなどの放射線計測でもっとも重要な特性の一つであります。これらの用途に用いられる光電子増倍管は通常エネルギー分解能の特性が検査されています。表7-2に代表的な γ 線に対する「NaI(Tl)+光電子増倍管」と「BGO+光電子増倍管」の組み合わせによるエネルギー分解能の値を示します。表に示すように、エネルギー分解能の値は幅をもっていますが、これはシンチレータおよび光電子増倍管の大きさとそれらの個々の性能のばらつきによるものであり、必要であれば特別な仕様を設定して選別することも可能です。

(2)相対パルス波高値

シンチレーション計数において、光電子増倍管への印加電圧および計測回路系の増幅率を一定にした時に、いくつかの光電子増倍管を用いて得られる光電ピーク波高値のバラツキを、相対パルス波高値(RPH:Relative Pulse Height)と呼び、通常はチャンネル数で表されます。これは光電子増倍管のシンチレーション計数におけるパルス波高値のバラツキを表していますが、実際の装置メーカーであるユーザーの測定と良い相関を示すことが多いため、光電子増倍管のゲイン範囲を選択する際に用いられます。NaI(Tl)を用いる場合、その発光波長がコーニングCS 5-58 フィルタと類似しているため、RPH は陽極青感度指数と強い相関があります。(第4章 4.1.5 参照)

(3)リニアリティ

シンチレーション光の発光量に対する光電子増倍管の出力パルス波高値との直線性(リニアリティ)は、重要な特性の一つです。一般的な光電子増倍管のリニアリティについては、すでに前節で述べたので、ここではシンチレーション計数法におけるリニアリティの測定方法を述べます。図7-7にNaI(Tl)と ^{226}Ra による波高分布の測定例および、図7-8に各ピークチャンネルと γ 線のエネルギーとの関係を示します。 ^{226}Ra は10.8 keV ~ 2.2 MeVの範囲で多種類の放射線を出していることから、広いエネルギー域での直線性の測定に用いられています。

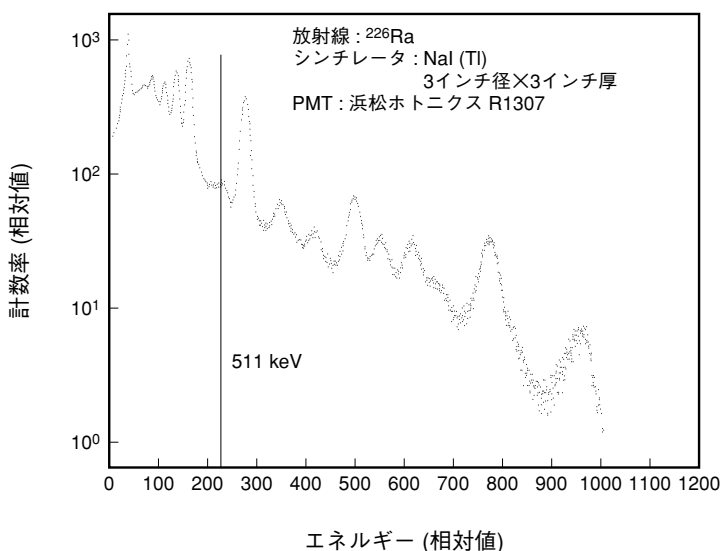
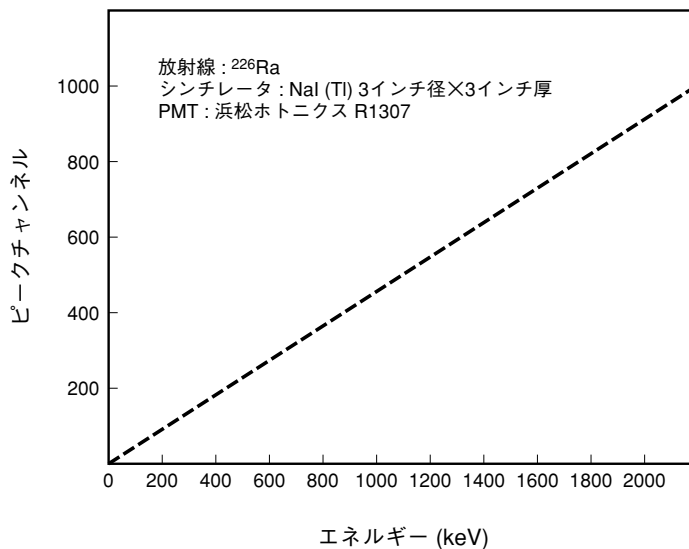


図7-7 ^{226}Ra とNaI(Tl)による波高分布



THBV3_0708JA

図 7-8 ピークチャンネルと γ 線エネルギーの関係

NaI(Tl)からの発光量は、およそ γ 線エネルギー 1 keV あたり光子数で 30 前後なので、 ^{137}Cs の場合の光子数は $662 \text{ keV} \times 30$ で 20,000 個、 ^{60}Co の 1330 keV の場合は約 40,000 個発生します。NaI(Tl)と ^{60}Co の組合せで得られる光電子増倍管の出力ピーク電流値(I_p)は、以下のように求められます。(ただし、光電子増倍管の動作ゲインは 10^6 、NaI(Tl)の減衰時間(τ_s)は 230 ns とします。)

$$\begin{aligned}
 I_p &= \frac{N \times \eta \times \alpha \times \mu \times e}{\tau_s} \dots\dots\dots \text{(式 7-4)} \\
 &= \frac{4 \times 10^4 \times 0.25 \times 0.9 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{230 \times 10^{-9}} \\
 &= 6.3 \times 10^{-3} \text{(A)}
 \end{aligned}$$

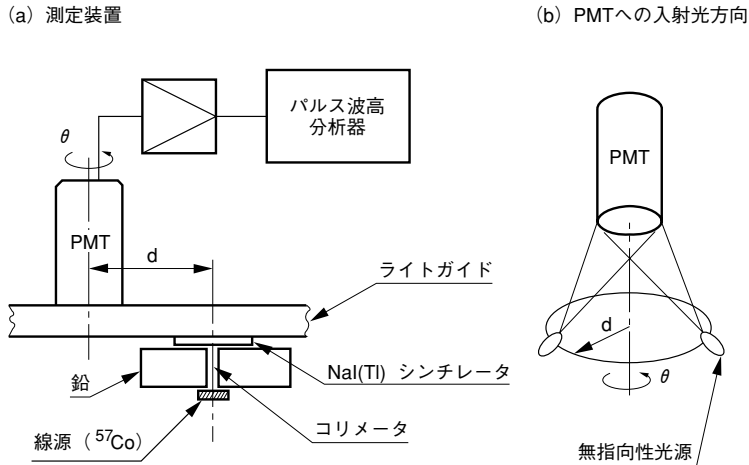
N : シンチレータからの1 イベントあたりの発光量
 η : 光電面の量子効率(25 %と仮定)
 α : 光電子増倍管の収集効率 (90 %と仮定)
 μ : 光電子増倍管のゲイン
 e : 電子の電荷
 τ_s : NaI(Tl)の減衰時間

したがって光電子増倍管はこの時6.3 mA以上のパルスリニアリティがなくてはいけない事になります。特に高エネルギーの放射線については発光量が多くなるため注意が必要です。

(4)ユニフォミティ

シンチレーション計数法を利用したアンダーカメラのような位置検出装置において、光電子増倍管のユニフォミティの良否は装置の性能に影響を与えます。光電子増倍管のユニフォミティとは、通常、光電面にスポット状の光を入れた場合の位置による出力電流の変化として定義されます。

しかし、より直接的に装置へのユニフォミティの影響を推定できる点で、次に示すような評価法が優れています。図7-9にその測定法の概略を示します。

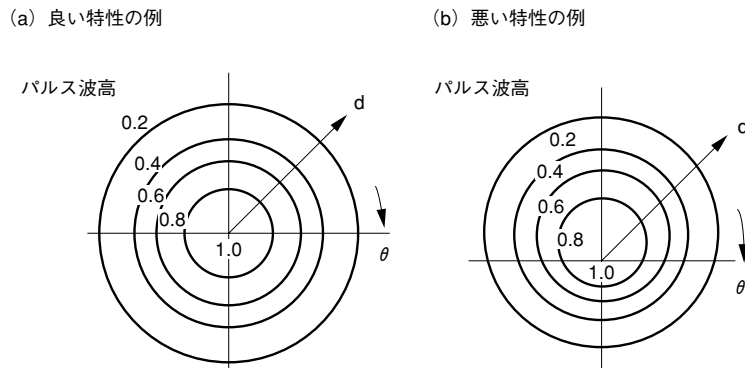


THBV3_0709JA

図7-9 アジマスユニフォミティの測定方法

図中、光電子増倍管と線源間の距離(d)を決め、光電子増倍管のまわりに光源を回転(角度 θ 変化)して、その時の光電子増倍管の出力波高値変化を観測します。次に d を変えて同様の測定をします。等しい出力を与える光源の位置(d 、 θ)をみつけ、それらを結んで図示すると、等高線表示に似た図が得られます。(図7-10)

この評価を特にアジマスユニフォミティ (Azimuth Uniformity) とよびます。



THBV3_0710JA

図7-10 アジマスユニフォミティの例

(5)安定性

シンチレーション計数法で使われる用語にロングタームスタビリティ (Long Term Stability) とショートタームスタビリティ (Short Term Stability) があります。いずれも放射線源に¹³⁷Cs、シンチレータにNaI(Tl)が使われ、パルス波高分析器(P.H.A.: Pulse Height Analyzer)により光電ピーク波高値の変化を測定するものです。特に前節で述べた一般的なスタビリティ (安定性) とは、やや測定方法が異なります。

a) ロングタームスタビリティ (Long Term Stability)

フォトピークドリフト (Photopeak Drift) とも呼ばれ、光電ピークの計数率を 1 ks^{-1} にした状態で1時間ウォーミングアップした後、16時間の光電ピーク波高値(チャンネル)の変動率を測定するものです。

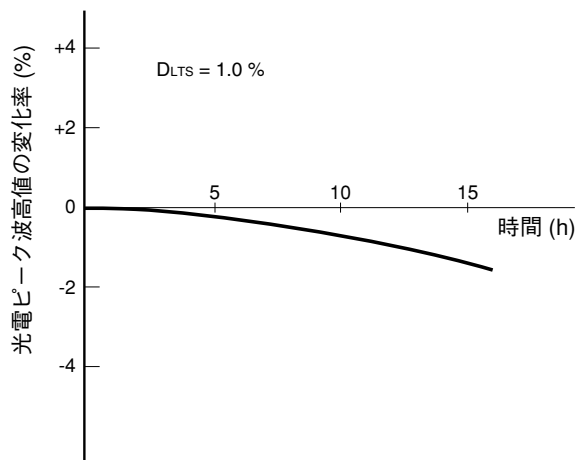
測定は図7-2による方法で、光電ピークを与えるチャンネルの時間的な変動を求めます。式7-5に変化率 (D_{LTS}) の計算方法を、図7-11に代表的な特性例を示します。

$$D_{LTS} = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - \bar{P}|}{n} \cdot \frac{100}{\bar{P}} \dots\dots\dots \text{(式 7-5)}$$

\bar{P} : 光電ピーク波高値(チャンネル)の平均値

P_i : i 番目に測定したピーク波高値

n : 16時間中に測定した回数



THBV3_0711JA

図7-11 代表的な光電子増倍管のロングタームスタビリティ

光電子増倍管の種類によって16時間の時点では、やや増加傾向に転ずるものもありますが、ほとんどは減少値を示し、変化率は多くが±数%以内に収まります。これは前述のドリフト特性と類似したのですが、シンチレーション応用分野において、より実用的な測定法です。数値的に式7-5で定義されますが、これらは平均ピーク波高値に対してピーク波高値の平均偏差をパーセントで表したものです。この値はおよそ1～2%となります。この特性で出力が変化する主な原因としては、ダイノード（特に後段）の二次電子増倍率の時間的な変化があげられます。

b) ショートタームスタビリティ (Short Term Stability)

ショートタームスタビリティは、カウントレートスタビリティ (Count-rate Stability) すなわち計数率依存性とも呼ばれ、光電ピークの計数率を 10 ks^{-1} から 1 ks^{-1} に変えた時の光電ピーク波高値の変化率を測定するものです。すなわち計数率 10 ks^{-1} 時のピーク波高値(チャンネル)を A、 1 ks^{-1} の時を B とすると、変化率 (D_{STS}) は式7-6で与えられます。一般にはこの値は±1パーセント前後となります。

$$D_{\text{STS}} = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots \text{ (式7-6)}$$

この特性で出力が変化する主な原因としては、光電子増倍管の電子増倍部で起こる電子軌道の変化と考えられます。また、計数率が高いために出力電流値が大きくなり、デバイダ電流に余裕の無い場合、後段ダイノード電圧が変動する場合があります。(第5章 5.1.3 参照) この場合、ゲインの電圧依存性(電圧-ゲイン曲線の傾き)の小さい光電子増倍管ほど影響を受けにくいこととなります。その他に光電子増倍管自身のヒステリシス特性(第4章 4.3.5 参照)とも深い関係があります。

(6) 雑音

シンチレーション計測における信号パルスは、一般的には同時に複数個の光電子によって生じるパルスであるので、ディスクリミネータを使用して、暗電流パルスの大部分を占める低波高パルスを除去することが広く行われています。したがって、シンチレーション計測では信号パルスと誤認されるような高波高雑音パルスが特に問題にされます。これらを取り除くには、同時計数法が用いられます。

このような高波高雑音パルスの原因として、建築物や大気中の天然放射性核種による放射線放出に起因する雑音があり、低レベル放射線計測において問題となることがあります。建築物のコンクリート中には Ra、Th や ^{40}K などが、鉄には U、Th や ^{60}Co などが含まれています。大気中には放射性浮遊塵や Rn、Th ガスなどが、またシンチレータ中にも微量の ^{40}K や ^{208}Tl などが存在します。さらに光電子増倍管に使われる硼硅酸ガラス中にはカリウムが入っており、1.46 MeV の γ 線を放つ ^{40}K はカリウム中の 0.118 重量パーセントを占めますので、これも高波高雑音パルスの原因になります。

図7-12 は、R877(5 インチ、硼硅酸ガラス、バイアルカリ光電面)と NaI(Tl)(5 インチ径 × 2 インチ長)を使いバックグラウンドノイズを測定したデータ例です。図中の①は通常の測定、②は下部側部に 100 mm、上部に 50 mm 鉛ブロックでシールドした時、③は光電子増倍管の面板および側管にカリウムの含有量の少ない、いわゆる K フリー(低カリウム)ガラスを使った R877-01 を用いた時のデータです。

^{137}Cs (662 keV)のピークが300チャンネルになるように設定したため、およそ数keV～2.2 MeVのエネルギー範囲を測定していることとなります。このエネルギー範囲で通常の測定では 470 s^{-1} 程あった出力カウントが鉛でシールドすることによって約 $1/20$ の 26 s^{-1} に減少しました。これにより、バックグラウンドノイズはほとんどが環境放射線に起因していることがわかります。さらにKフリーガラス(第4章4.1.2参照)のR877-01を使うとノイズが 16 s^{-1} と減少しますが、特に ^{40}K (1.46 MeV)に起因する計数区間(1.2 MeV～1.6 MeVのエネルギー範囲)では硼硅酸ガラスのR877でノイズが 3.3 s^{-1} だったものがKフリーガラスのR877-01では 0.9 s^{-1} と $1/3$ 以下に減少します。

最近では、高エネルギー物理学実験等において、放射性不純物を極低レベルしか含まない材料を用いたPMTの要求があります。これらの測定は地中深く、天然の放射性不純物が取り除かれた環境下で行われるため、使用されるPMTへの要求が厳しくなります。このようなPMTに使用されるガラスを含めた材料では ^{40}K のみならず、U系列とTh系列の放射性不純物の含有量が吟味されます。

また、普通シンチレータなど光電子増倍管の外部はグラウンド電位となっているため、低レベル放射線計測では陰極側を接地し、アノードに高電圧を印加する陰極側接地法が用いられます。(第5章5.1.2参照)

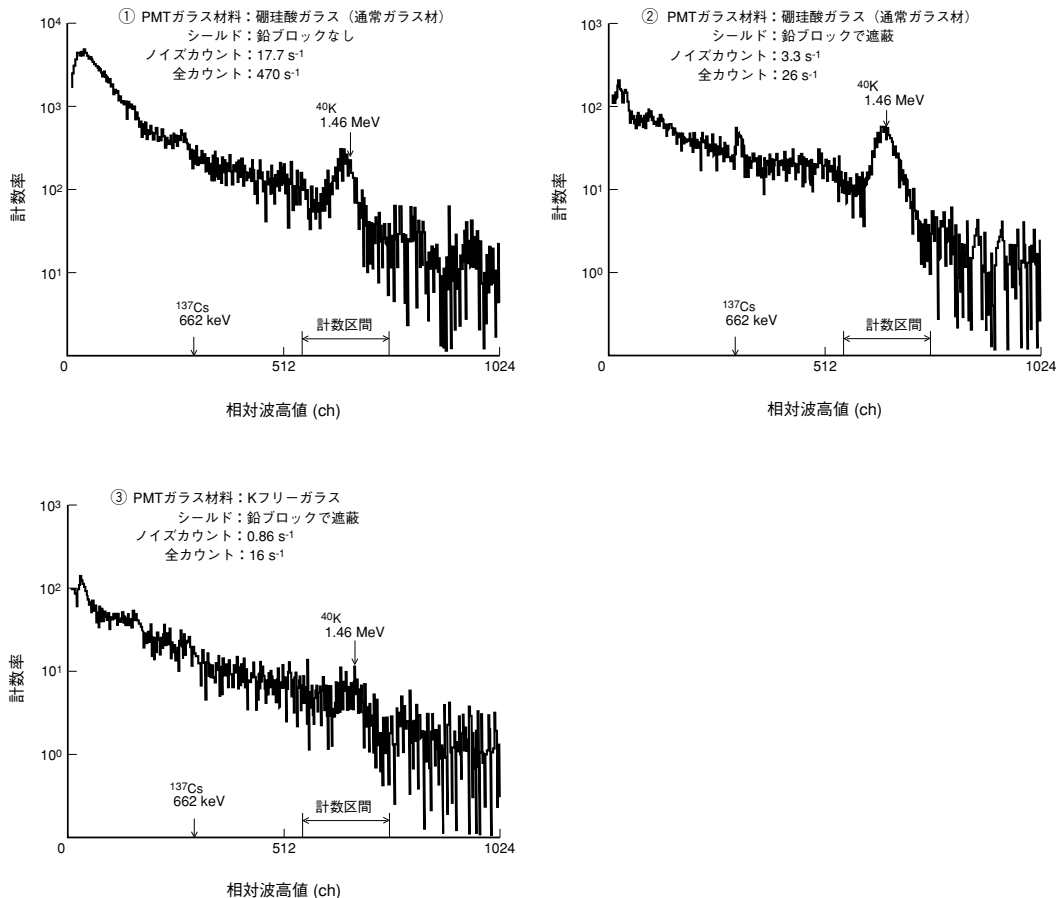
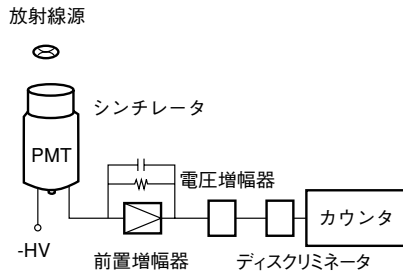


図7-12 5インチPMT+NaI(Tl)によるバックグラウンドノイズ

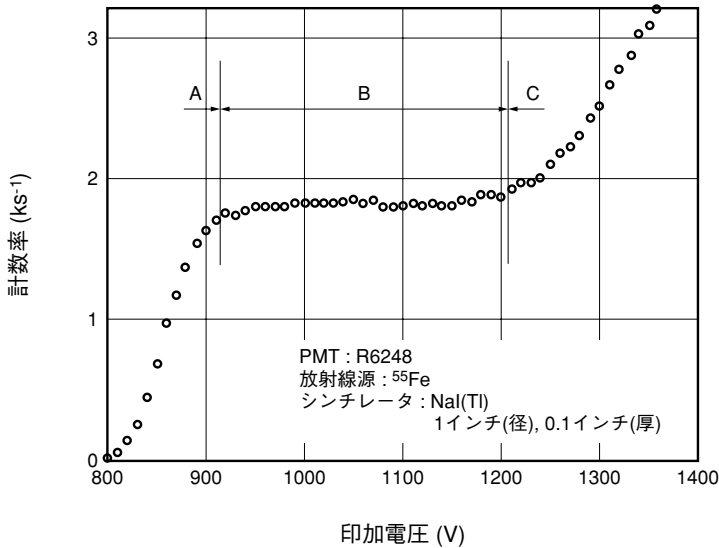
(7)プラトー特性

シンチレーション計数法では、今まで述べてきた波高分析器を使用するスペクトル法と、これから説明する波高分析器を用いないカウンティング法があります。カウンティング法ではプラトー特性が重要になります。プラトー特性は、ディスクリレベルを一定にして、光電子増倍管への印加電圧を徐々に上げながら、ディスクリレベル以上のパルス数を計測して得られます。図7-13(a)にプラトー特性の測定ブロック図、図7-13(b)と(c)に、 ^{55}Fe とNaI(Tl)の組合せでのプラトー特性と波高分布を示します。



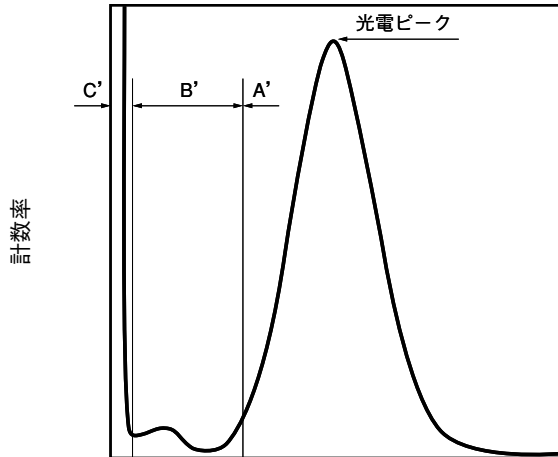
THBV3_0713JAa

図7-13(a) プラトー特性の測定ブロック図



THBV3_0713JAb

図7-13(b) プラトー特性の一例



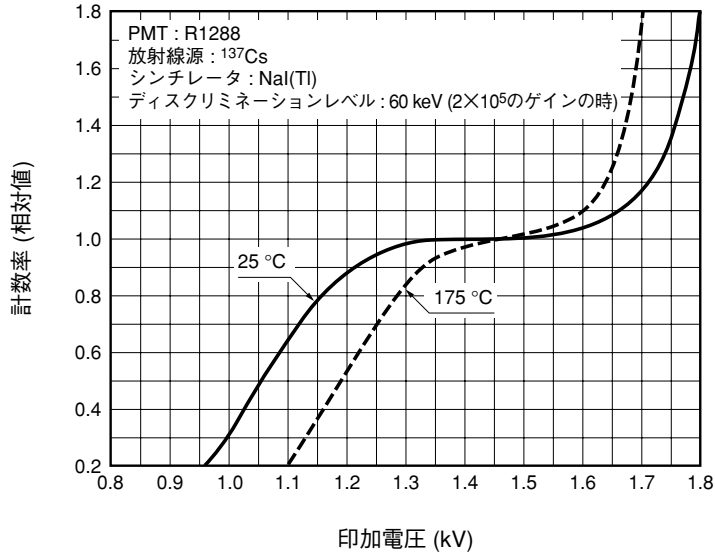
パルス波高 (チャンネル)

THBV3_0713JAc

図 7-13(c) 波高分布 (^{55}Fe と NaI(Tl) との組み合わせ)

ディスタリレベルを一定にして光電子増倍管の印加電圧を上げると光電ピーク、谷部（バレー）、暗電流部の順で計数されます。印加電圧に対し、計数率をプロットすると図 7-13(b) のような特性がえられます。このデータを A、B、C の領域に分けた場合、B の領域をプラトーと呼びます。通常この範囲内に動作電圧を設定しますが、仮に印加電圧が多少変動してもほぼ一定の計数率が得られます。プラトー領域が大きい程、出力や暗電流の変動の影響を受けにくく、このプラトーは図(c)で B' にあたる谷部に対応し、エネルギー分解能の良い程、また暗電流のパルスの頻度や波高値が低い程広くなります。

一つの応用例として石油探層が挙げられます。(第 14 章 14.5 参照) この場合、地層からの散乱線、あるいは自然放射線の数を検出して解析することにより、地層の種類や密度が測定されます。石油探層用光電子増倍管（高温用光電子増倍管）の評価には ^{137}Cs と NaI(Tl) の組み合わせが用いられるのが一般的です。この時のプラトー特性を図 7-14 に示します。



THBV3_0714JA

図 7-14 高温用光電子増倍管のプラトー特性

この測定例では 25 °C の時の特性とともに 175 °C の時の特性も示されています。温度が高くなると光電子増倍管のゲインが下がるため信号の現れる印加電圧が高くなり(7-13(b)のA領域に相当する部分)、一方暗電流は増加するため低電圧で立ち上がる(図7-13(b)のC領域に相当)ようになります。そのためプラトー幅(電圧幅)は高温(175 °C)の時には常温(25 °C)と比べ狭くなります。

第7章 参考文献

- 1) Glenn. F. Knoll: "RADIATION DETECTION and MEASUREMENT (Third Edition)" John Wiley & Sons, Inc. (1999). 木村, 阪井 共訳: 放射線計測ハンドブック(第3版). 日刊工業新聞社(2001).
- 2) 山崎文男: 放射線. 共立出版(1981).
- 3) 河田 燕: 放射線計測技術. 東京大学出版会(1978).
- 4) 岡村勉夫: 放射線測定回路とシステム. 日刊工業新聞社(1978).
- 5) H. Kume, T. Watanabe, M. Iida, T. Matsushita and S. Suzuki: IEEE Trans. Nucl. Sci, NS- 33[1], 364 (1986).
- 6) 久米英浩: 放射線 .16, 11(1989).

メ 毛

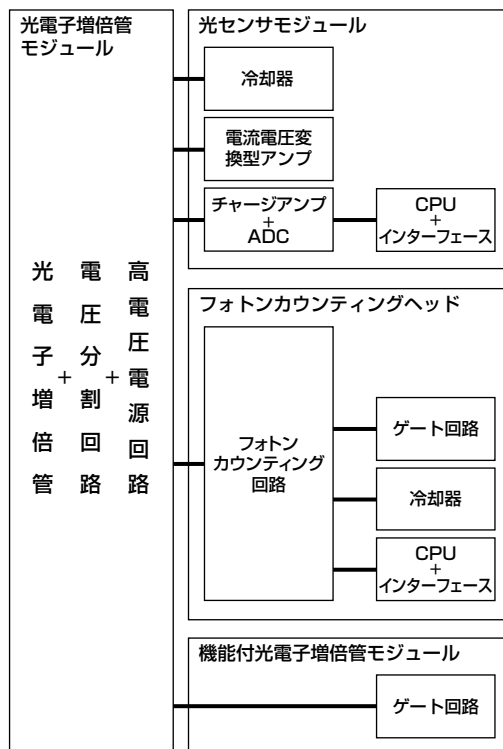
第8章

光電子増倍管モジュール

光電子増倍管とデバイダ回路、高圧電源回路をひとつのパッケージに納めた光電子増倍管モジュールの構成、使い方、特性について説明します。

8.1 光電子増倍管モジュールとは

光電子増倍管モジュールは、光電子増倍管と高圧電源回路、各ダイノードに電圧を配分する分割回路（デバイダ回路）が一体化されているものが基本となっています。その基本構成に、信号変換回路、フォトンカウンティング回路、インターフェース、冷却など機能を1つのパッケージに納められています。光電子増倍管モジュールは、面倒な高電圧の配線をなくし外部から低電圧を入力すれば動作できるため取り扱いが容易です。図8-1に光電子増倍管モジュールの機能を表します。



THBV3_0801JA

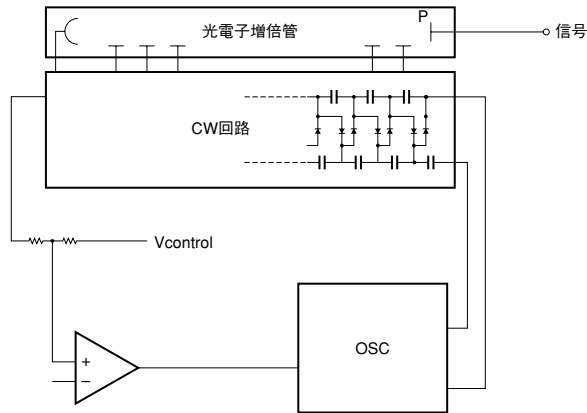
図8-1 光電子増倍管モジュールの機能

8.2 電源回路の特性

(1)電源回路

光電子増倍管モジュールに内蔵されている電源回路は、主に2種類あります。1つは、コッククロフト・ウォルトン回路(CW)、もう1つはコッククロフト・ウォルトン回路とアクティブ型デバイダ回路を組み合わせた回路です。

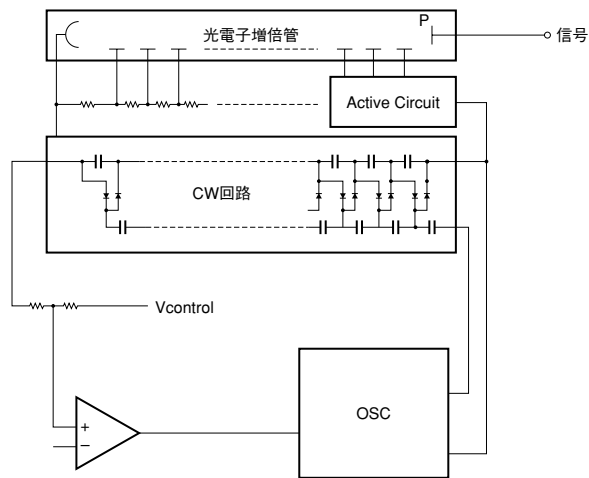
コッククロフト・ウォルトン回路は、図8-2のようにダイオードを直列に接続し、その接続点にコンデンサを1つおきに配置した倍電圧回路で、基準電圧に対して1倍、2倍、3倍と整数倍で昇圧された電位が各ダイノードに与えられます。この回路は、低消費電力で、かつ高い直流及びパルス直線特性が得られ、回路をコンパクトにできるという特長を持ちます。



THEV3_0802JA

図 8-2 コッククロフト・ウォルトン電源回路

コッククロフト・ウォルトン回路・アクティブ型デバイダ回路併用電源回路は、図 8-3 に示すように光電子増倍管全体に印加する電圧をコッククロフト・ウォルトン回路で作成し、アクティブ型デバイダ回路にて各ダイノードへ印加する方法です。アクティブ型デバイダ回路は、ダイノード終段付近の分割抵抗数個をトランジスタに置き換えています。これにより、ダイノード間電圧は光電子増倍管の信号電流の影響を受けないため、デバイダ回路電流の 60%～70% 程度まで良好な出力直線性が得られます。また、コッククロフト・ウォルトン回路だけの回路と比べて、リップルノイズが小さい、セトリングタイムが短いという特長を持ちます。



THEV3_0803JA

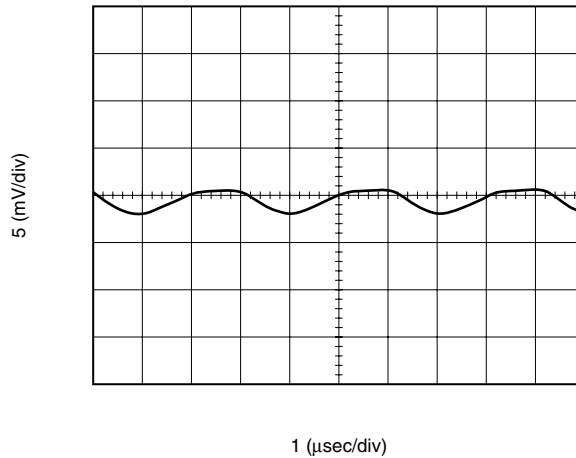
図 8-3 コッククロフト・ウォルトン回路 アクティブ型デバイダ回路併用電源回路

(2)リップルノイズ

モジュールの高電圧電源は、発振回路を使用しているため、発振によるノイズが信号出力に誘導されます。この誘導ノイズをリップルノイズと呼びます。光電子増倍管モジュールの信号ケーブルをオシロスコープに入力し入射光がない状態で電圧レンジを下げてベースラインを観測すると、負荷抵抗 $1\text{ M}\Omega$ で負荷容量 22 pF 、同軸ケーブル長 45 cm の条件において出力が数百 μV から 3 mV 程度で周波数帯域が約 300 kHz の信号が見えます。図8-4にリップルノイズの例を示します。

光電子増倍管モジュールはこのリップルノイズを極力減少するように設計されていますが、すべてをなくすことはできません。リップルノイズの影響をさらに減らすには、以下の方法があります。

- ① ローパスフィルタをモジュールの信号出力の後に入れる。
- ② コントロール電圧を上げ、光電子増倍管のゲインを増やしアンプゲインを下げる。

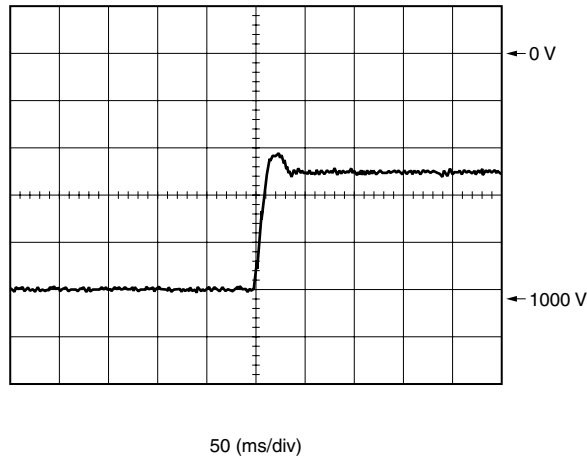


THBV3_0804JA

図8-4 リップルノイズ

(3)セトリングタイム

光電子増倍管モジュールのコントロール電圧の入力電圧を変化させた時、光電子増倍管に印加される高電圧はコントロール電圧に対して応答に遅れを生じます。高電圧が設定した電圧に到達するまでの時間をセトリングタイムと呼び、コントロール電圧を $+1.0\text{ V}$ から $+0.5\text{ V}$ に変化させた時の時間で定義しています。図8-5に陰極に印加される高電圧の様子を示します。



THBV3_0805JA

図 8-5 コントロール電圧を +1.0 V から +0.5 V に変化させたときの陰極電圧の変化

8.3 電流出力型と電圧出力型

(1)接続法

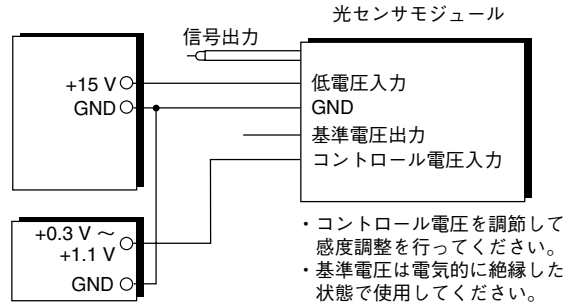
光電子増倍管モジュールは、パッケージ内部に高圧電源とデバイダ回路を内蔵していますので、外部から高電圧を印加する必要はありません。接続図に従って配線し電圧を入力します。一般的な光電子増倍管モジュールは、低電圧入力へ約 15 V、GND 端をグランドへ、コントロール電圧と基準電圧入力はゲイン調整法に従って接続します。

低電圧入力はカタログに記載されている電圧範囲の電圧であれば低電圧電源の出力がある程度変動していても光電子増倍管モジュールの電源回路で光電子増倍管へ印加される高圧電圧は安定化されます。ただし、低電圧電源から大きなパルス状のノイズが発生している場合、光電子増倍管モジュールの異常動作や故障の原因となります。

(2)ゲイン調整法

光電子増倍管のゲインは、コントロール電圧を変えることで調整することが可能です。コントロール電圧の調整法には 2 通りあります。

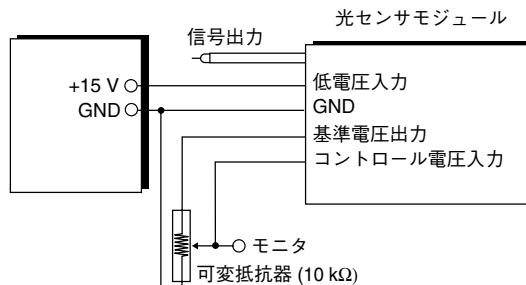
図 8-6 の様に電圧を直接入力する場合、コントロール電圧の入力電圧範囲は必ず最大定格以下の電圧を印加します。基準電圧出力は、端子を無接続の状態にしており、グランドに接続することがないように注意が必要です。



THBV3_0806JA

図 8-6 電圧可変動作による感度調整方法

図8-7は可変抵抗器を使ってゲイン調整を行う方法で、可変抵抗器をコントロール電圧と基準電圧出力の間に接続します。可変抵抗を調整する際には、テスター等でモニターしながらコントロール電圧の値を調整します。



可変抵抗器を使って感度調整を行う場合はコントロール電圧をモニターしながら使用してください。

THBV3_0807JA

図 8-7 抵抗可変動作による感度調整方法

(3)電流出力型モジュール

電流出力型光電子増倍管モジュールは、光電子増倍管の陽極が直接モジュールの出力となっています。後続の信号処理系は、光電子増倍管の電流出力を何らかの方法で電圧に変換することになります。変換には用途や計測の目的によって適切な方法を選ぶ必要があります。

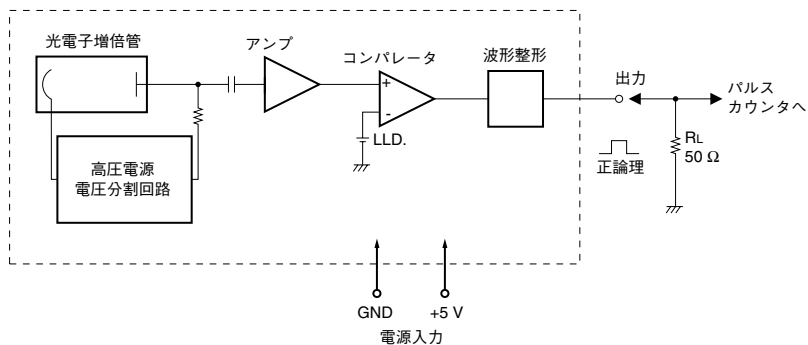
(4)電圧出力型モジュール

電圧出力型光電子増倍管モジュールは、光電子増倍管のアノードに近接してオペアンプを取り付けて、電流を電圧へ変換して出力されています。光電子増倍管の電流出力をケーブル等で取り出す場合と比較して、外来から入り込むノイズが強くなります。測定周波数帯域が数十kHzから数MHzの範囲では外来ノイズの影響が顕著になるためアンプを内蔵することは効果的です。10MHz以上の帯域ではアンプの消費電力が大きくなることが多いので、電流出力型モジュールに外付けのアンプを使用の方が適当な場合もあります。

電圧出力型光電子増倍管モジュールは、電流電圧変換のためのオペアンプが内蔵されていますが、アンプの帰還抵抗とコンデンサがチャージアンプとしても機能しますので、シンチレーションカウンティングの様なパルス計測も可能です。

8.4 フォトンカウンティングヘッド

フォトンカウンティングヘッドは、光電子増倍管に高圧電源、デバイダ回路、フォトンカウンティング回路が内蔵されたモジュールです。図8-8にフォトンカウンティング回路のブロック図を示します。光電子増倍管からの電流パルスを増幅した後、ディスクリミネータである一定のしきい値以上のパルスのみ選択し、パルス整形器で電圧パルスへ変換し出力しています。フォトンカウンティングヘッドは、予めプラトー電圧を求めておき、その高電圧が光電子増倍管へ印加されるよう調整済みのため、外部から低電圧を入力するだけで動作させることができます。



THEV3_0808JA

図8-8 フォトンカウンティングヘッドのブロック図

(1)出力特性

使用されている光電子増倍管の時間特性やパルス波形の違いにより、フォトンカウンティングヘッド内部は回路定数など機種により若干設計が異なります。このため、出力特性は正論理のロジック信号ですが、パルス電圧やパルス幅は個々のフォトンカウンティングヘッドにより出力特性が異なります。

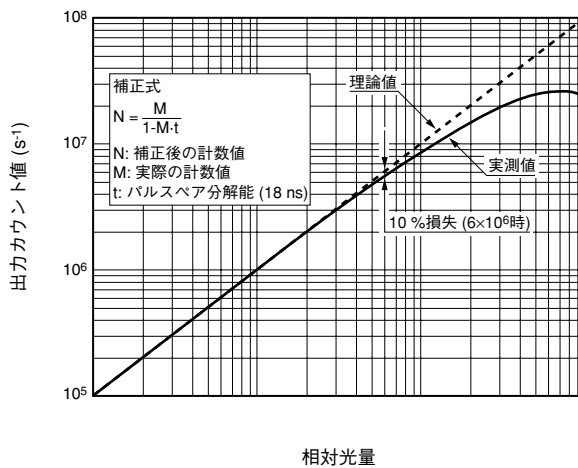
高速の信号を取り扱うため、フォトンカウンティングヘッドの出力インピーダンスは約50Ωで設計されています。このため、フォトンカウンティングヘッドと機器をケーブルで接続する場合、50Ωのインピーダンスのケーブルを使い、機器の入力インピーダンスも50Ωにすることが望まれます。外部回路の入力インピーダンスが50Ωより大きくはずれインピーダンスに不整合を起こした場合、外部回路の入力端で反射したパルスがフォトンカウンティングヘッドに戻りさらに反射してパルスを誤ってカウントすることがあります。また、外部の入力インピーダンスが50Ωの場合、入力端では信号電圧が半分になるため最小入力電圧の仕様に合わせて外部回路を選択する必要があります。

(2)計数感度

計数感度は、ある波長においてある絶対光量(pW)が入射した時にフォトンカウンティングヘッドから得られるカウント値を示しています。従って、計数感度は量子効率と収集効率が直接関わってきます。

(3) カウントリニアリティ

光子1つ1つがフォトンカウンティングヘッドの時間分解能の範囲内で周期的に入射された場合、理論上パルスペア分解能の逆数まで計測できることになります。通常フォトンカウンティング計測は化学発光や生物発光などの微弱光計測に用いられますが、入射光はランダムな事象です。この場合、光量を増やしていてもあるところからカウント値が光量に比例しなくなります。カウントリニアリティは理論値に比べてカウント値がどれほど損失しているのかを表した特性で、10%損失のところで規定しています。フォトンカウンティングヘッドのカウントリニアリティ特性は、内蔵されている回路のパルスペア分解能で決定されますが、高計数率になると回路のみならず光電子増倍管の時間特性も重要な要因となってきます。図8-9はパルスペア分解能18ナノ秒のフォトンカウンティングヘッドのカウントリニアリティ特性で、10%損失のところで $6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ となっています。



THBV3_0809JA

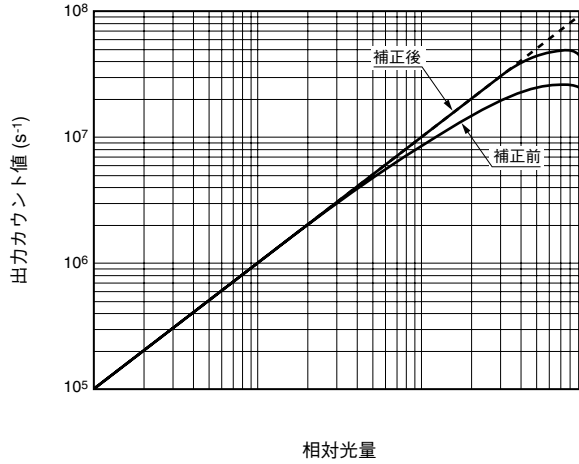
図8-9 カウントリニアリティ特性

(4) カウントリニアリティの改善

フォトンカウンティングで計測されるカウントが 10^6 s^{-1} 以上になるとパルスの重なりによる計数誤差が発生してきます。カウントリニアリティを上げるためには、

- ①回路のパルスペア分解能を上げる
- ②プリスケアラを使って分周する
- ③補正式を用いて近似する

があげられます。図8-10に、補正式を用いて近似した場合のカウントリニアリティ特性の改善を示します。

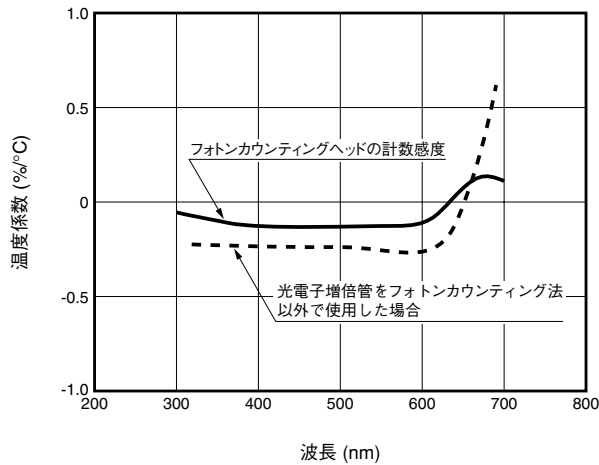


THBV3_0810JA

図 8-10 補正式によるカウントリニアリティ特性

(5)温度特性

フォトンカウンティング法はあるしきい値以上のパルスを計測する手法のため、電源回路の出力変動や周囲温度の変化による光電子増倍管のゲイン変動に対して影響を受けにくいという特長を持ちます。温度変化に対するカウント値の変化を図8-11に示します。光電子増倍管の陽極温度係数と比較してほぼ半分の変化率となっています。

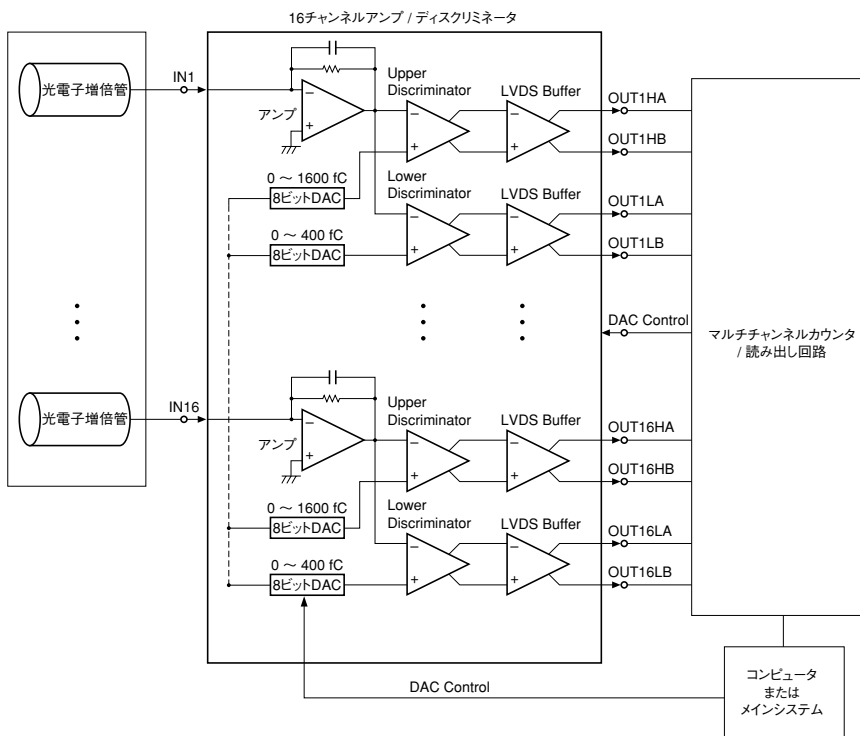


THBV3_0811JA

図 8-11 温度係数の比較

(6) フォトンカウンティング ASIC (Application Specified Integrated Circuit)

フォトンカウンティング回路は多くのICや抵抗器などの部品で作られています。部品や配線の容量やインダクタンスなどにより周波数帯域や消費電力が制限されるばかりか、実装するためのスペースを必要とします。フォトンカウンティングASICは、フォトンカウンティング回路の基本構成であるアンプ、ディスクリミネータ並びにパルス波形回路を、それぞれ16個内蔵した集積回路で16個の光電子増倍管もしくはマルチアノードの光電子増倍管の16個のアノードまでの入力信号を並列に同時に処理しそれぞれの入力に応じたLVDSの電圧パルスを出力します。図8-12にフォトンカウンティングASICの回路構成図を示します。集積化により各チャンネルで 100 Ms^{-1} 以上の計数効率と低消費電力、小型化を実現しています。また、LLDとULDを8ビットDACにより外部から調整できるように設計されており、各光電子増倍管のゲインの差やマルチアノードのアノード間によるゲインのばらつきを補正できます。さらに、光電子増倍管のゲインをASICの入力電荷範囲に合わせることでシングルフォトンカウンティングだけでなくマルチフォトンイベントの計測も可能です。ただし、LLDとULDの入力範囲の間に入ったパルス信号、もしくはLLDのしきい値以上のパルス信号に対してのみ正論理の電圧パルスを1つ出すためタイミングを取るような計測に使えますが波高値の情報は含まれていません。



THBV3_0812JA

図8-12 フォトンカウンティングASICのブロック図

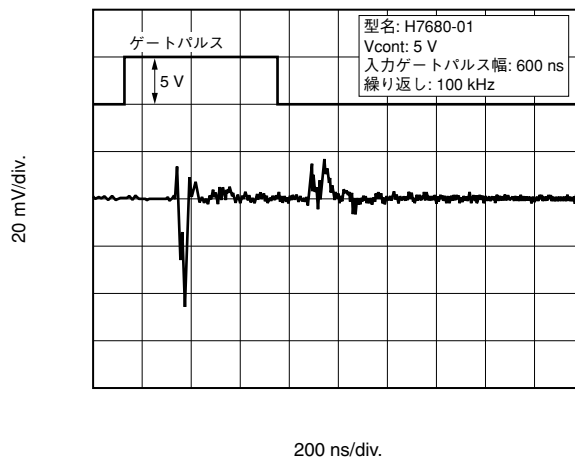
8.5 ゲート機能

レーザやキセノンフラッシュランプなどの励起光が光電子増倍管に入射することにより、信号処理系を飽和させ、測定に影響を与えることがあります。メカニカルシャッタで過大光を遮断する方法がありますが、高速にシャッタを動作させることができない他、製品寿命などの問題があります。これに対して、光電子増倍管のダイノードの電位を変化させることにより、過大光を電子的にゲートさせることができます。電子的なゲートであることから、高速でかつ高い消光比が得られます。ゲート付光電子増倍管モジュール H7680 は、高速応答性の特長を持つリニアフォーカス PMT を採用し、さらに複数のダイノードでバイアスを制御することで、高い消光比と高速ゲート特性を得ています。

ゲートには、光電子増倍管を定常時オフの状態にゲート信号入力時にオンする方法と、逆の定常時オンでゲート信号入力時にオフする 2 通りあり、用途に応じて選択します。

(1)ゲートノイズ

高速でゲート動作を行う場合、高速のゲートパルスを入力する必要があります。ゲートパルスが入力されると、光電子増倍管の電極間に存在する静電容量を通して図 8-13 のように誘導ノイズが陽極信号に誘起されます。これがゲートノイズです。ゲートノイズを減少させるには、ゲートパルス電圧を小さくしたり、ノイズキャンセルなどの方法を用いますが、完全に取り除くことは難しいため、信号出力がゲートノイズより大きくなる様に、光電子増倍管のゲインを増やすか、高ゲインの光電子増倍管を内蔵する必要があります。



THEV3_0813JA

図 8-13 ゲートノイズ

(2)消光比

光電子増倍管の陽極電流が最大定格値を超えたり、外部の回路が飽和したりする強い光が入射していても、ゲートを掛けることで陽極電流値を低く抑えることが可能です。消光比は、ある一定の光量を光電子増倍管に入射してゲート回路でオン・オフさせたときの出力の比を表します。例えば、定常時オフタイプでゲートオフ時の出力が1 nA、オン時の出力が10 μ Aの場合、消光比は1 nA : 10 μ A = 1 : 10⁴と表されます。

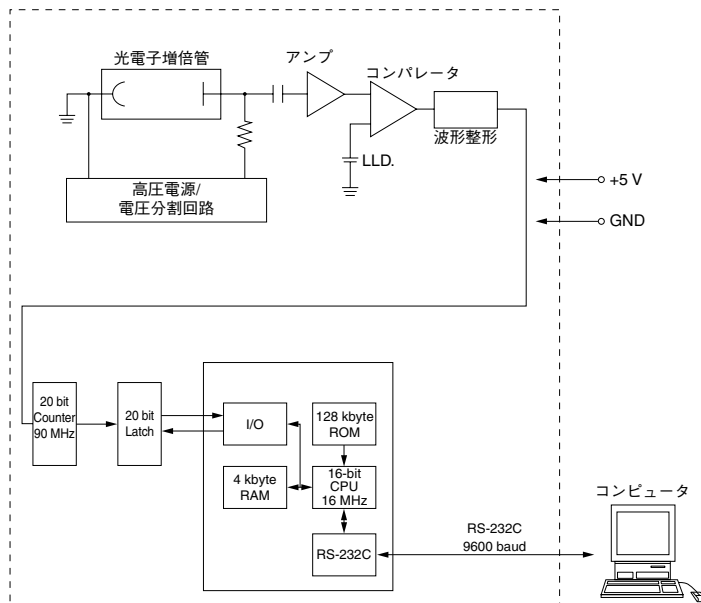
ゲート動作によって電流を抑制している状態でも消光比の比率分の電流が陽極電流に流れます。ゲート動作中であっても、陽極電流が光電子増倍管の最大定格を超えないように注意が必要です。また、レーザのようなエネルギーの強い光が光電子増倍管へ入射された場合は、ゲート動作を行っても光電面の組成自体が破壊されることもあります。強い光が光電子増倍管へ入射しないような工夫が必要です。

8.6 CPU+IF 内蔵型

光電子増倍管は電流出力のため、電流電圧変換アンプで電圧へ変換しさらにADコンバータで波高値をデジタル化したり、フォトンカウンティングの場合は出力パルスをある時間内でカウントしたりします。デジタルデータは外部の処理系へ容易に転送することができ、一方外部からコマンドを送ることで光電子増倍管モジュールを制御することも可能です。このように信号処理回路と制御用のCPU並びにデータ転送用のインターフェースを1つのパッケージに納め、高電圧の取り回しや高速信号を取り扱う上でのノイズ対策、デジタル回路の設計を不要としています。

(1)フォトンカウンティングタイプ

フォトンカウンティング回路の後に20ビットのカウンタで電圧パルスをカウントします。20ビットのカウンタのため設定したゲート時間内で計数可能な最大カウント値は1,048,575となります。光量が比較的多い場合、ゲート時間を長く設定するとカウンタの制限により1,048,575以上計測できません。この場合ゲート時間を短く設定し、複数回データを取るようになります。計測後ソフトウェアで複数回のデータをアレージングすれば、ゲート時間を長く設定した場合と同等の結果になります。図8-14に回路構成図を示します。

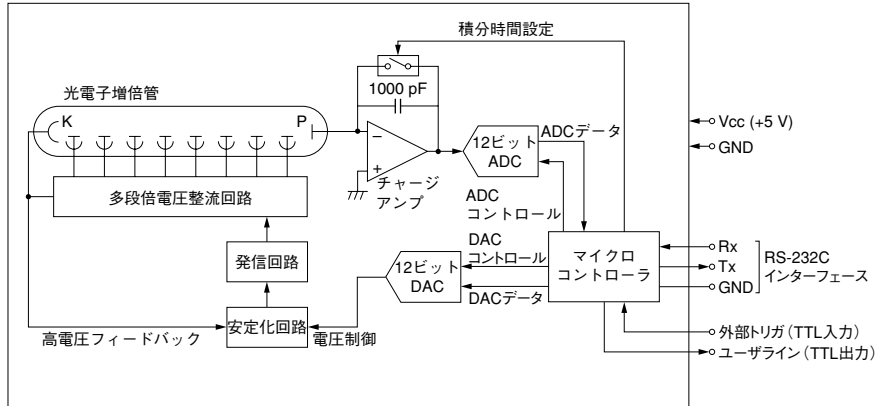


THBV3_0814JA

図8-14 フォトンカウンティングタイプの構成図

(2)チャージアンプ+ADコンバータタイプ

図8-15にチャージアンプとADコンバータを内蔵したモジュールの構成図を示します。光電子増倍管の陽極にチャージアンプを取り付け、陽極から得られる電荷を適当なサンプリング時間の間チャージアンプで蓄積し、その電荷量をADコンバータでデジタル量に変換します。



THBV3_0815JA

図8-15 チャージアンプ+ADコンバータタイプの構成図

第8章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株): 光電子増倍管モジュール (2005年3月)

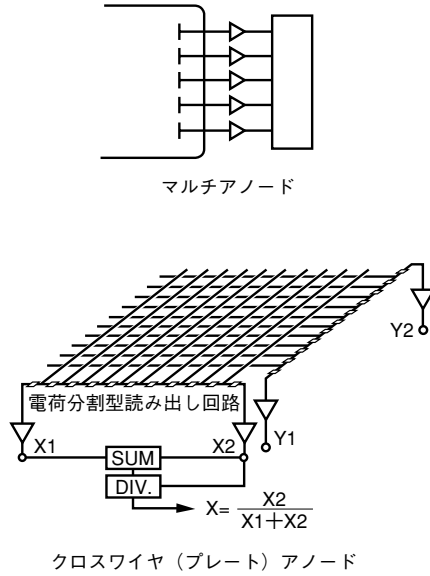
第9章

位置検出型光電子増倍管

光電子増倍管が微弱光計測に適している理由は、その増倍機能を有するダイノードにあると言えます。ダイノードには測定対象光に応じた様々な種類が用意されています。従来型のダイノードとしては、ボックス&グリッド型、リニアフォーカス型、サーキュラー型、ベネシアンブラインド型が汎用され、さらに近年ではMCPも用いられています。

ここで紹介する「メタルチャンネル型ダイノード」、「グリッド型ダイノード」は高ダイナミックレンジ、高ゲインおよび空間分解能の優れたダイノードで、現在、位置検出型の光電子増倍管に用いられています。

位置検出型光電子増倍管の増倍部からの出力電子群を読み出す方法は、図9-1に示すような方法が考えられています。独立した複数の陽極から読み出すマルチアノード、クロスプレート(ワイヤー)方式による電流、電荷分割重心検出などが製品化されています。



THBV3_0901JA

図9-1 位置検出型光電子増倍管の陽極出力の読み出し方法

以下、マルチアノード型光電子増倍管として、「メタルチャンネル型ダイノード+マルチアノード」、位置検出型光電子増倍管として、「メタルチャンネル型ダイノード+クロスプレートアノード」「グリッド型ダイノード+クロスワイヤーアノード」、それぞれについて紹介します。

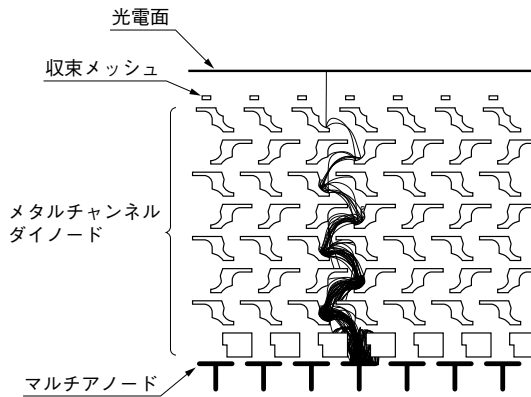
9.1 マルチアノード型光電子増倍管

9.1.1 メタルチャンネル型ダイノードマルチアノード光電子増倍管

(1) 構造

図 9-2 にメタルチャンネル型ダイノードの電極構造及び電子の軌道図を示します。メタルチャンネル型ダイノードを用いた光電子増倍管の特徴に、光電面から放出された光電子が収束メッシュにより1段目の電極に入射後、増倍しながら2段目→3段目→・・・最終段→アノードに至るまで、二次電子のクロストークが他の電極に比べて非常に少ないことがあげられます。

また、ダイノードが薄型であると同時にダイノード間隔も非常に狭く設計されているため、全長が短くコンパクトな形状になります。



THBV3_0902JA

図 9-2 電極構造及び電子軌道図

メタルチャンネル型ダイノードを用いたマルチアノード光電子増倍管としては大別してマトリックスタイプとリニアタイプの2つのマルチアノードを持つ光電子増倍管に分類されます。

タイプ	メタルチャンネル型ダイノードマルチアノード光電子増倍管					
	マトリックス			リニア		マトリックス
	M4	M16	M64	L16	L32	M64
アノード形状						
アノード数	4	16	64	16	32	64
ピクセルサイズ (mm)	9×9	4×4	2×2	0.8×16	0.8×7	5.8×5.8

THBV3_0903JA

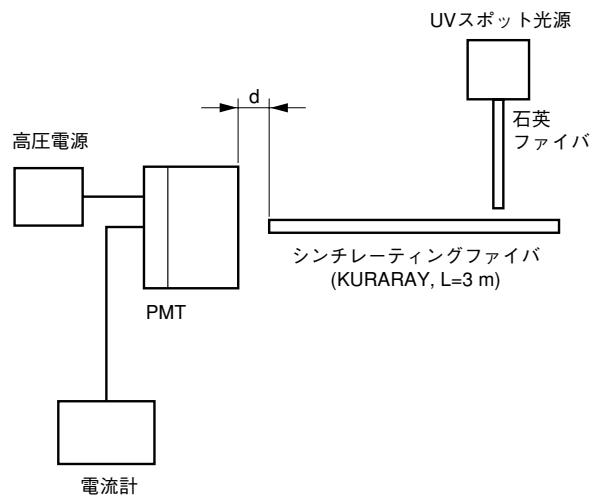
図 9-3 メタルチャンネル型ダイノードマルチアノード光電子増倍管のアノードパターン

(2) 特性

マトリックスタイプのマルチアノード光電子増倍管の基本的な特性として、64チャンネルの「クロストーク特性」、「磁気特性」、「ユニフォミティ特性」について紹介します。

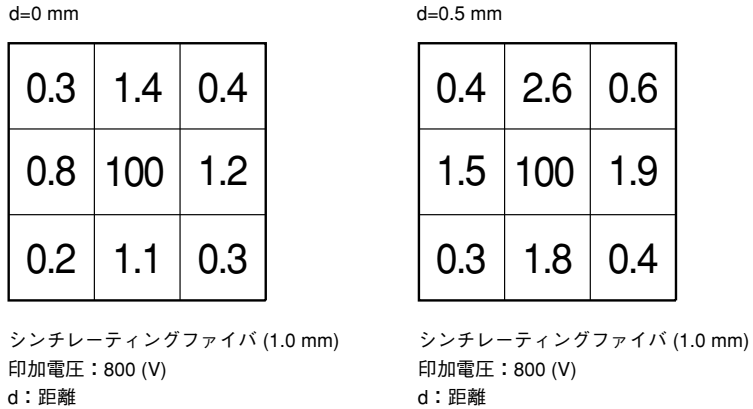
「クロストーク特性」とは、光電面上のある位置に入射した光(信号)が、いかにその位置情報を保って検出されるかを示すものです。これは光が光電子となって電子増倍部で増倍されていく過程で広がりを持ってしまふところに主な原因があります。また、入射面板内部の光の広がりも要因のひとつと考えられています。

図 9-4 にクロストーク特性の測定方法を示し、図 9-5 には測定例を示します。



THBV3_0904JA

図 9-4 クロストーク特性測定方法



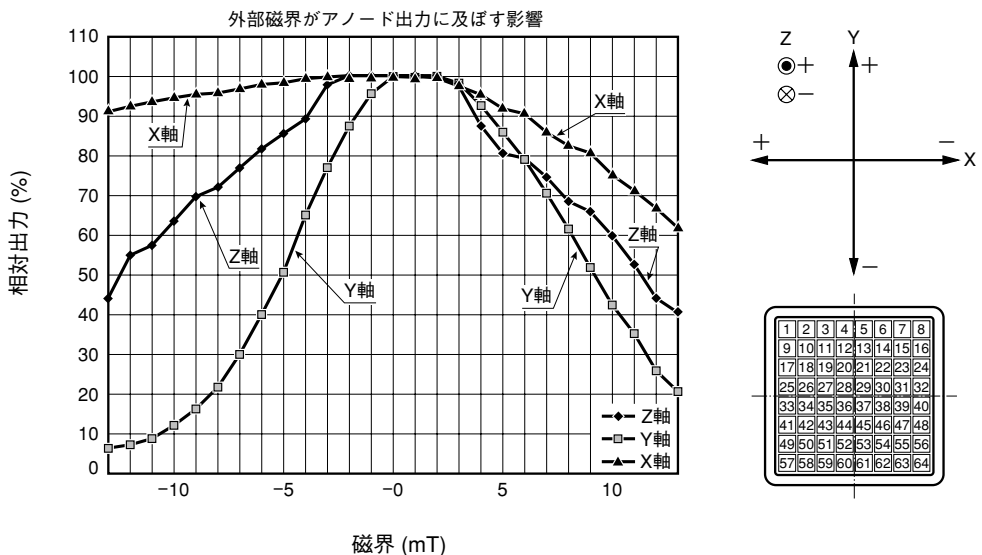
THBV3_0905JA

図 9-5 クロストーク特性測定例

図 9-5はスポット光(信号)を入射したひとつのピクセルのアノード出力を100%として、他の隣接するアノード出力値を相対値で表したものです。直径1mmのファイバーを密着させて測定した結果 (d=0 mm) のクロストーク特性は「0.2%~1.4%」を示しています。しかし、同じファイバーでも面板から0.5mm離すとクロストークは「0.3%~2.6%」と悪くなるのがわかります。この原因はファイバー光の広がりによるものです。シンチレーションファイバーなどを用いた計測を行う場合にはなるべく密着させて使用することが重要です。

次に「磁気特性」について紹介します。マトリックスタイプのマルチアノード光電子増倍管は磁気特性に優れた光電子増倍管です。これは光電面以外が金属パッケージに収められていることや、電子増倍部の電極間距離が近接した構造になっていることが主要因といえます。以下に64チャンネルの磁気特性を紹介します。

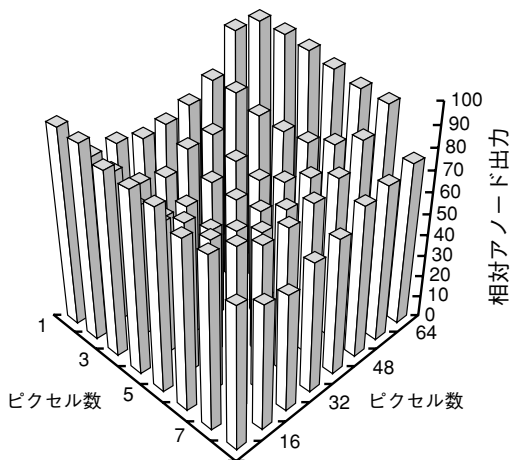
図 9-6に3軸(X, Y, Z)に沿って磁界を加えた場合のアノード出力への影響を示します。磁界を全く加えなかった場合の出力を100%として測定した相対出力値で示されており、これによりX軸方向の磁界に対しては13mTで60%の出力を有していることがわかります。



THBV3_0906JA

図 9-6 外部磁界がアノード出力に及ぼす影響(アノードチャンネル No. 29)

次に、「ユニフォミティ特性」を紹介します。図9-7にアノードでのユニフォミティ特性(代表例)を示していますが、これは64チャンネルの光電面全体に均一な光を照射し、その時のアノード出力を測定したものです。光電面のユニフォミティはほぼ均一であるため、このようなバラツキは二次電子増倍部のゲインのバラツキに起因しています。現状の各アノード間のバラツキは「平均で1:3」程度です。

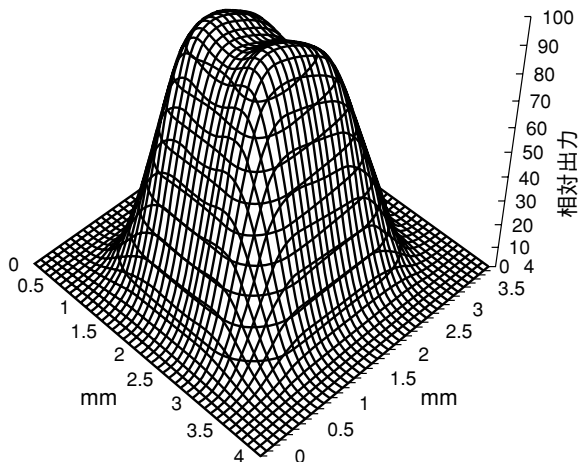


THBV3_0907JA

図9-7 64チャンネルのアノードユニフォミティ

図9-8にひとつのピクセル(アノード)当たりのアノードユニフォミティを示します。

□ 2 mm/ピクセルのアノードに対して直径50 μ mの微弱な直流光を入射し、これを0.1 mmずつ移動させます。



THBV3_0908JA

図9-8 1ピクセル当たりのアノードユニフォミティ特性

次に、リニアタイプのマルチアノード型光電子増倍管の基本的な特性として、「クロストーク特性」と「ユニフォミティ特性」について紹介します。

図 9-9 に 16 チャンネルのクロストーク特性の測定方法を示し、図 9-10 に代表的な測定例を示します。

X-Y ステージ上のアパーチャーから照射される 100 μm スポットを光電面上にスキャンさせた時の 16 チャンネルリニアタイプのクロストークは約 3% です。

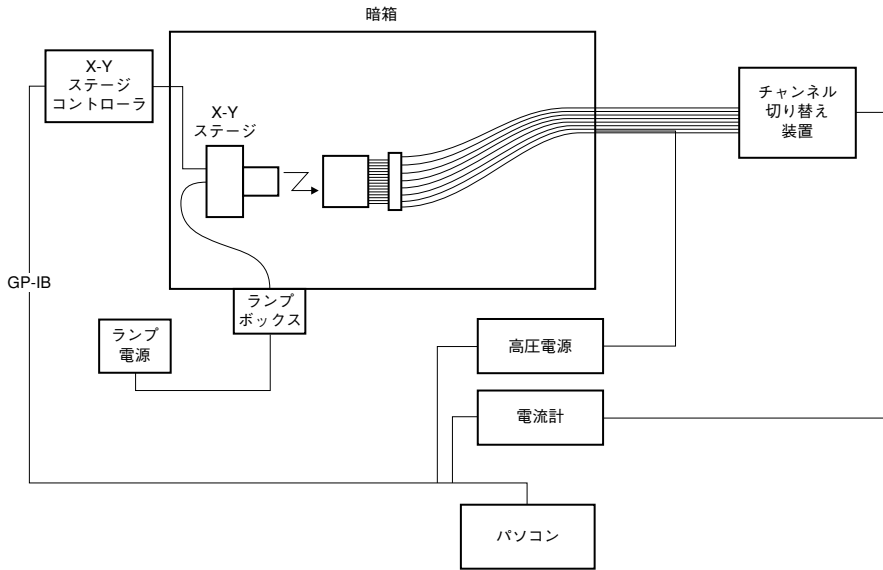


図 9-9 クロストーク特性の測定方法

THBV3_0909JA

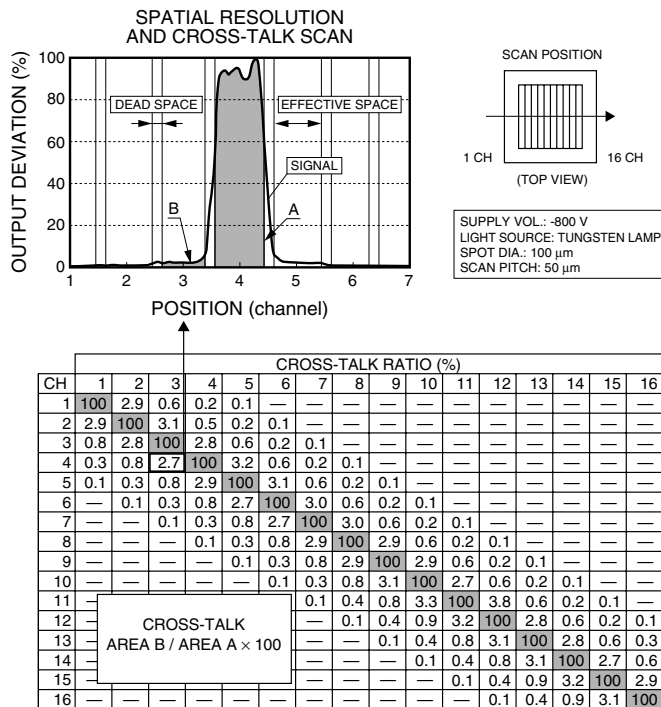


図 9-10 16 チャンネルリニアタイプのクロストーク特性

THBV3_0910JA

更に、16チャンネルや32チャンネルのリニアタイプのマルチチャンネル光電子増倍管では黒色ガラスの仕切りが入った面板や各チャンネルのアノード間に遮蔽壁を設ける電極構造を採用した低クロストークタイプがあります。図9-11に低クロストークタイプのクロストークの値を示します。

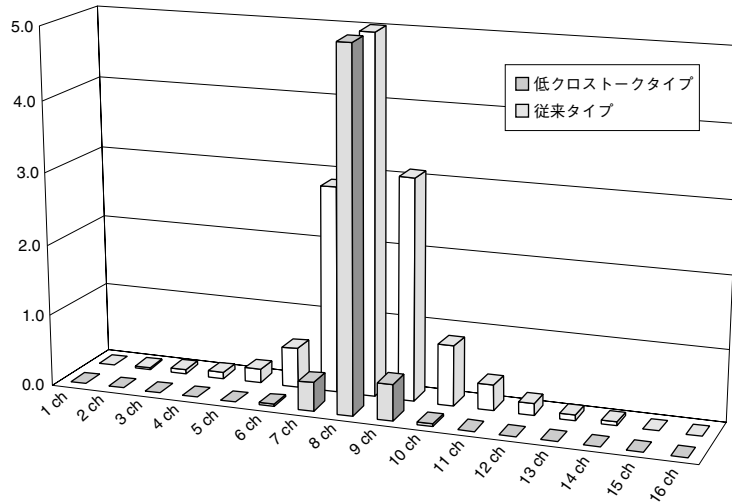


図9-11 16チャンネル低クロストークタイプのクロストーク値

THBV3_0911JA

次に、ユニフォミティ特性を紹介します。図9-12にアノードでのユニフォミティ特性の代表例を示します。これは32チャンネルリニアタイプの光電面全体に均一な光を照射し、その時のアノード出力を測定したものです。マトリックスタイプと同様に、アノード出力のバラツキは二次電子増倍部のゲインのバラツキに起因しており、各アノード間のバラツキは平均で「1: 1.7」程度です。

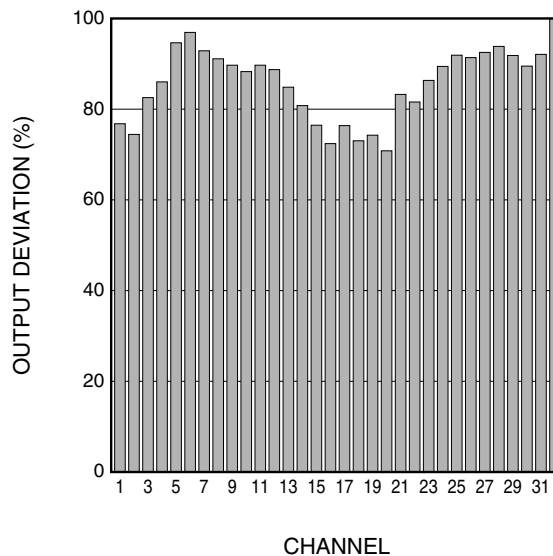


図9-12 32チャンネルリニアのアノードユニフォミティ

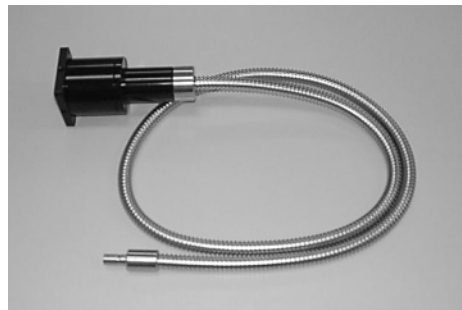
THBV3_0912JA

16チャンネルや32チャンネルのリニアマルチアノード光電子増倍管は一次元アレイの為、主にはマルチチャンネル分光の検出器として用いられます。特に32チャンネルはその形状からグレーティングやプリズムと組み合わせて使われる場合が多く、最近ではレーザスキャンングマイクロスコープに使われています。

また、リニアマルチアノード光電子増倍管の入力面板部分にバンドパスフィルターを貼り付けた製品もあります。この分光方式はグレーティングやプリズムを使う場合のように必要な波長域の光のみを検出することができます。また、グレーティングで分光する時のように入射スリットによる光のロスが少なくなります。しかし、フィルタ面全体に均一にミキシングした光を入射する必要があり、専用のミキシングファイバ+レンズも用意されています。図9-13にバンドパスフィルタ付光電子増倍管と、専用のミキシングファイバ+レンズを示します。



図9-13 バンドパスフィルタ付光電子増倍管



ミキシングファイバ+レンズ

その他の分光方法にダイクロイックミラーを使用したものもあります。図9-14は1つの例で光学系+検出器を非常にコンパクトに仕上げることを可能にしています。

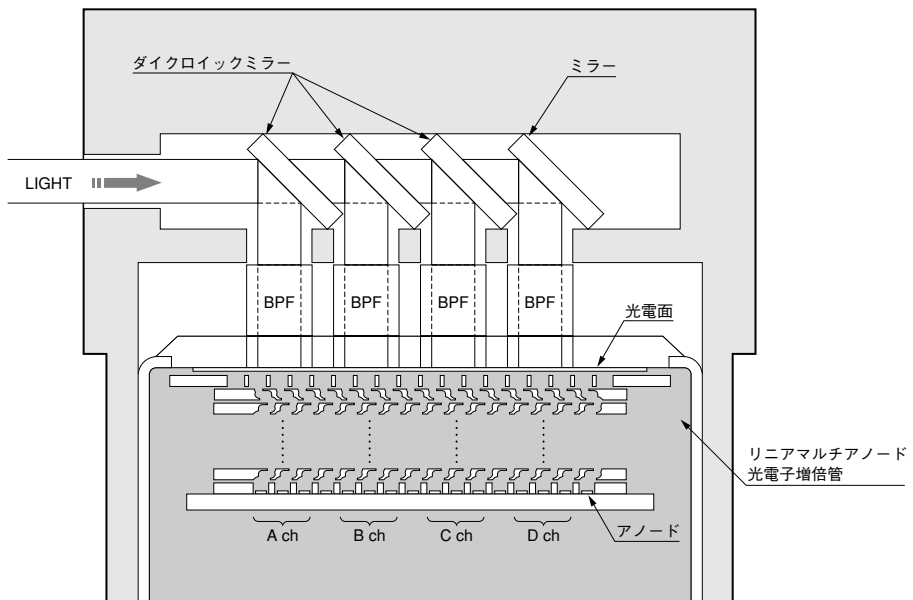


図9-14 ダイクロイックミラー+リニアマルチアノード光電子増倍管

9.1.2 マルチアノード MCP-PMT

第10章 10.4 参照

9.1.3 フラットパネル型マルチアノード光電子増倍管

(1) 特性

メタルチャンネルダイノードを用いたマルチアノード型光電子増倍管には、主に1インチ角型メタルパッケージとフラットパネル(2インチ角)型があり、目的に応じてこれらの光電子増倍管から選ぶことができます。

ここで紹介するフラットパネル型光電子増倍管は、全長が15 mmと短く、図9-15に示すようにもっとも有効面積が大きく、デッドエリアが最も少ないという特長があります。

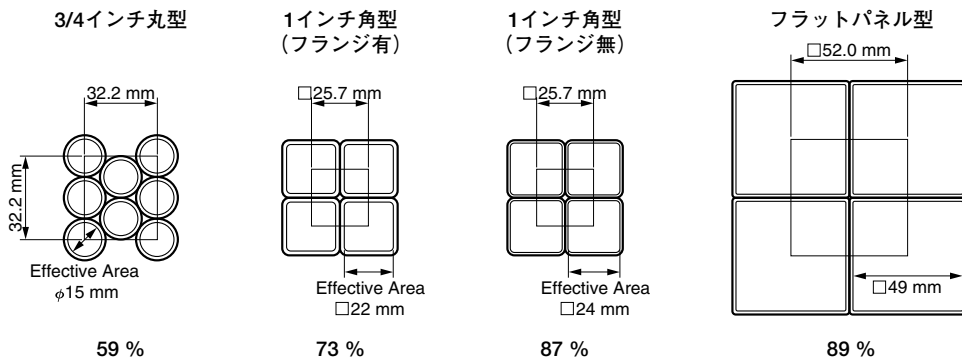
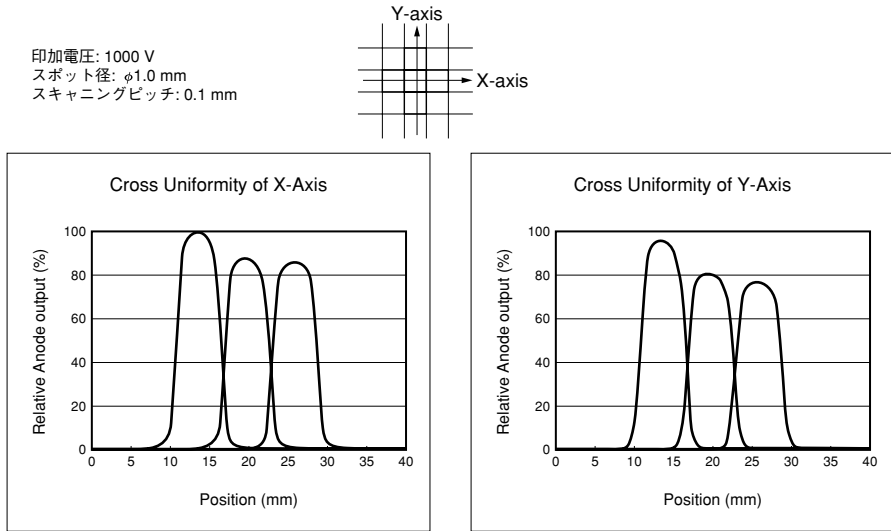


図 9-15 有効面積比の比較

THBV3_0915JA

次に、フラットパネル型マルチアノード光電子増倍管の空間分解能を測定した結果を図9-16に示します。これは、光電面上にタングステンランプから青色フィルタを介したφ1 mmの平行光を入射させ、光電子増倍管の空間分解能(各アノードの出力分布特性)を測定したものです。



THBV3_0916JA

図 9-16 中央アノードの空間分解能

図 9-17 にクロストーク特性を示します。あるアノードの中央に $\square 5$ mm の光を入射（アノードピッチ 6 mm）させ、この時のアノード出力を 100% として、隣接するアノードの出力を相対値で示したものです。

フラットパネル型光電子増倍管においては、中央のアノードで 2%~3% 程度のクロストークがあります。

—	—	—	—	—
—	0.2	1.8	0.2	—
—	1.5	100	2.7	—
—	0.2	2.6	0.3	—
—	—	—	—	—

印加電圧: 1000 V
 光源: タングステンランプ
 スポット径: 5 mm 角

THBV3_0917JA

図 9-17 中央アノードのクロストーク特性

またフラットパネル型マルチアノード光電子増倍管は有効エリアを大きくとるために、周辺アノードにおいて光電面から出る電子をフォーカシングしてダイノードに入射させています。そのため、特にコーナー部分において、クロストークが大きくなる傾向(3%~6%)があります。(図9-18)

100	5.5	—
3.5	0.5	—
—	—	—

印加電圧: 1000 V
光源: タングステンランプ
スポット径: 5 mm角

THBV3_091&JA

図9-18 コーナーのアノードのクロストーク特性

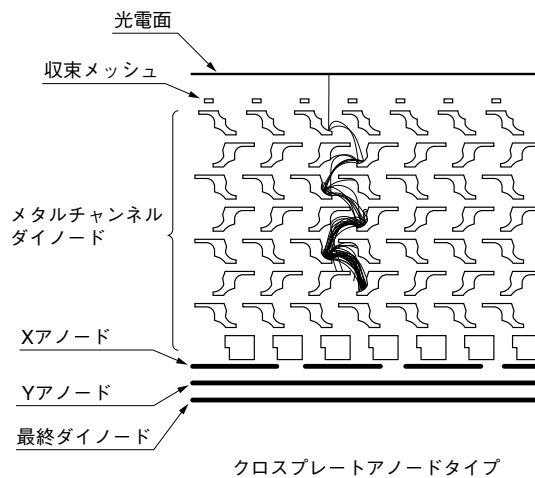
9.2 重心位置検出型光電子増倍管

9.2.1 メタルチャンネル型ダイノード光電子増倍管（クロスプレートアノード）

(1) 構造

図9-19にメタルチャンネル型ダイノード+クロスプレートアノードタイプの電極構造を示します。

光電面からの光電子はダイノード間で増倍され、最終ダイノードからの反射二次電子は二層の直交したプレート型アノード(クロスプレートアノード)で読み出されます。



THBV3_091&JA

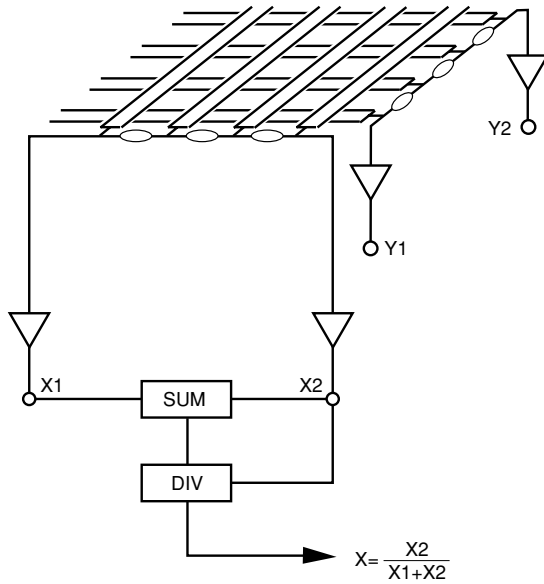
図9-19 電極構造

次に、図 9-20 にクロスプレートタイプの光電子増倍管の重心計測方法について示します。

最終ダイノードからの電子群は、 $X \cdot Y$ 方向のリニアな陽極によってそれぞれ $X1$ 、 $X2$ 、 $Y1$ 、 $Y2$ 方向に分流します。これらの陽極間は抵抗チェーンでつながれており、二次電子がクロスプレートアノードに到着した位置に応じて分流されます。ここで足し算(SUM)、割り算(DIV)回路を通すことによって (式 9-1) により XY 方向の重心位置が求められます。

$$X = \frac{X_2}{X_1 + X_2}$$

$$Y = \frac{Y_2}{Y_1 + Y_2} \dots\dots\dots (式 9-1)$$



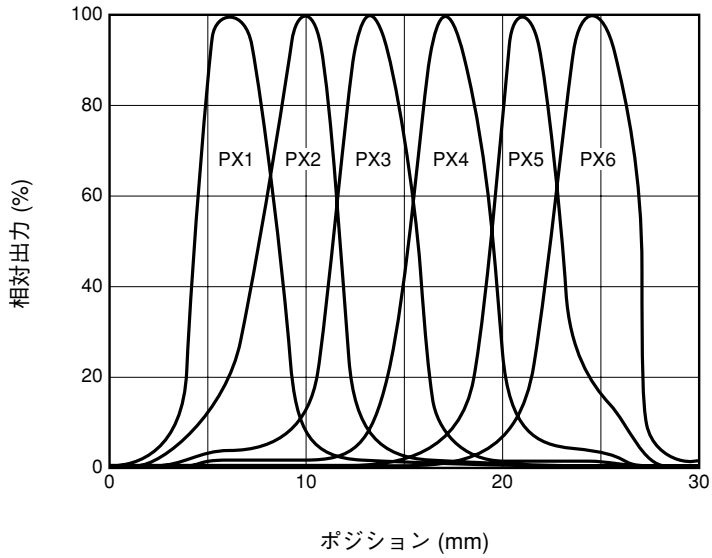
THBV3_0920JA

図 9-20 重心計測方法

(2) 特性

X、Yそれぞれにおけるクロスプレート数が、 $6(X)+6(Y)$ の重心処理法による空間分解能の特性を紹介します。

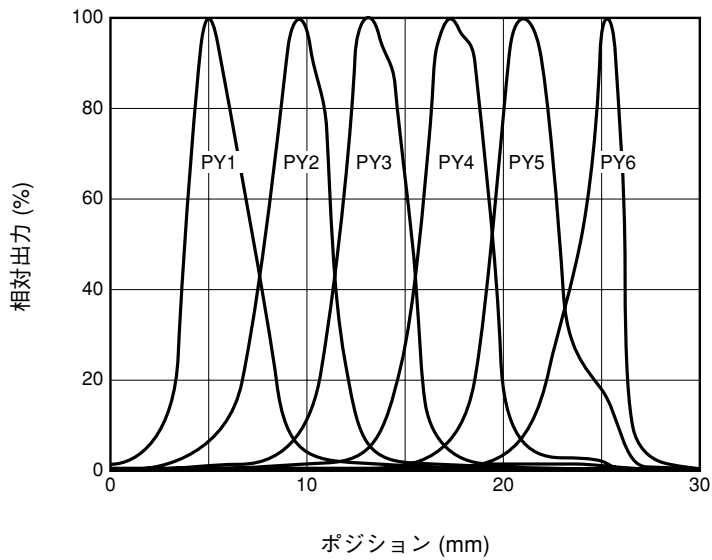
光電面上にタンゲステンランプから $\phi 1 \text{ mm}$ の平行光を入射させ、光電子増倍管の空間分解能(各アノードの出力分布特性)を測定した結果を図 9-21, 22 に示します。



印加電圧 : -800 V
 光源 : タングステンランプ
 スポット径: 1 mm

THBV3_0921JA

図 9-21 X アノードの空間分解能

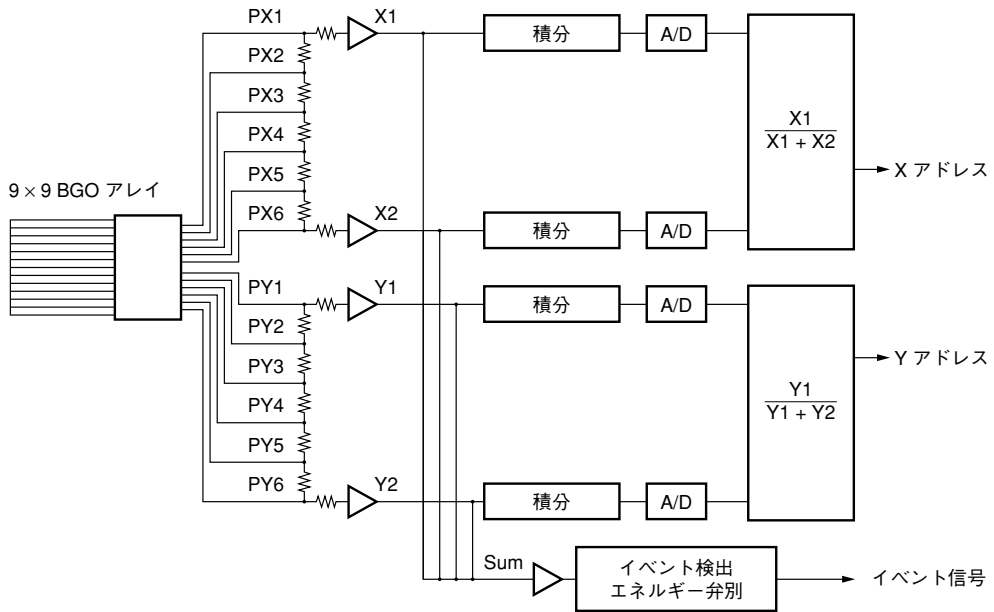


印加電圧 : -800 V
 光源 : タングステンランプ
 スポット径: 1 mm

THBV3_0922JA

図 9-22 Y アノードの空間分解能

さらに6(X)+6(Y)のクロスプレートタイプ光電子増倍管にモザイクシンチレータ(2.2 mm×2.2 mm×15 mmのBGOを9×9=81個配列したブロック)を組み合わせた、511 keVのガンマ線を検出したデータを測定系とともに紹介します。



THBV3_0923JA

図 9-23 モザイク状シンチレータ(BGO)へのガンマ線照射によるシンチレーションイメージング測定系

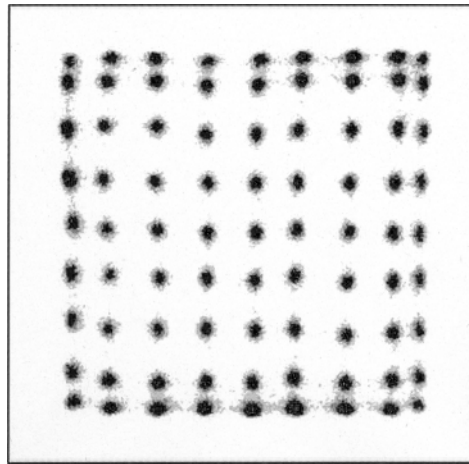


図 9-24 モザイク状シンチレータ(BGO)へのガンマ線照射によるシンチレーションイメージング測定データ

モザイクシンチレータ (2.2 mm×2.2 mm×15 mm) のBGO 9×9=81個を弁別していることがわかります。

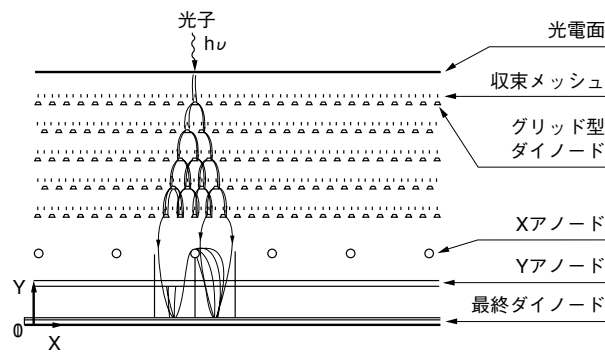
得られたシンチレーションイメージングの周辺部を中心とした歪みもソフトウェアにより補正可能です。

9.2.2 グリッド型ダイノード光電子増倍管（クロスワイヤーアノード）

(1) 構造

図9-25にグリッド型ダイノードの電極構造及び電子の軌道図を示します。通常のボックス&グリッド型の光電子増倍管と違うところは、電子増倍部が平板のグリッド状のダイノードで作られ、二次電子放出機能を持つとともに微細構造のため各段間での二次電子の空間広がり比較的少ないことです。

光電面からの光電子はダイノード間で増倍され（全体ではゲインは 10^5 以上）、最終ダイノード（反射型）からの反射二次電子は二層の直交したワイヤー型アノード（クロスワイヤーアノード）で読み出されます。さらに、光電面と第一ダイノード間は光電子の広がりを少なくするために近接構造となっています。



THBV3_0925JA

図 9-25 電極構造及び電子軌道

(2) 特性

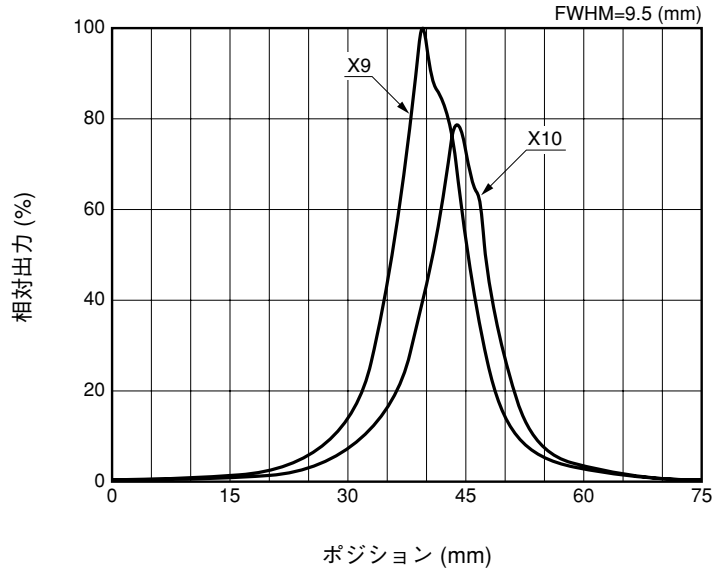
グリッド型ダイノードを12段用いた光電子増倍管のゲインとしては、印加電圧1250Vにて 10^5 以上が得られます。このタイプの光電子増倍管は、3インチ丸型、5インチ丸型のものが製品化されています。

X、Y方向それぞれにおけるワイヤーアノード数は、3インチ丸型（アノードピッチ3.75mm）が $16(X)+16(Y)$ 、5インチ丸型（アノードピッチ4mm）が $28(X)+28(Y)$ です。

次に空間分解能の重心処理法による特性についてふれます。この光電子増倍管は、図9-25に示す光電面から第一ダイノード間及びグリッドダイノード間での電子の広がりによって、空間広がりが生じます。3インチ丸型の場合、光電面上に $50\mu\text{m}$ の径の光スポットを入射した時に、光電面から陽極までの増倍過程によって図9-27のX方向の空間分解能と図9-27のY方向の空間分解能のように、陽極のX方向では9.5mmに広がり、Y方向では8.6mmに広がります。

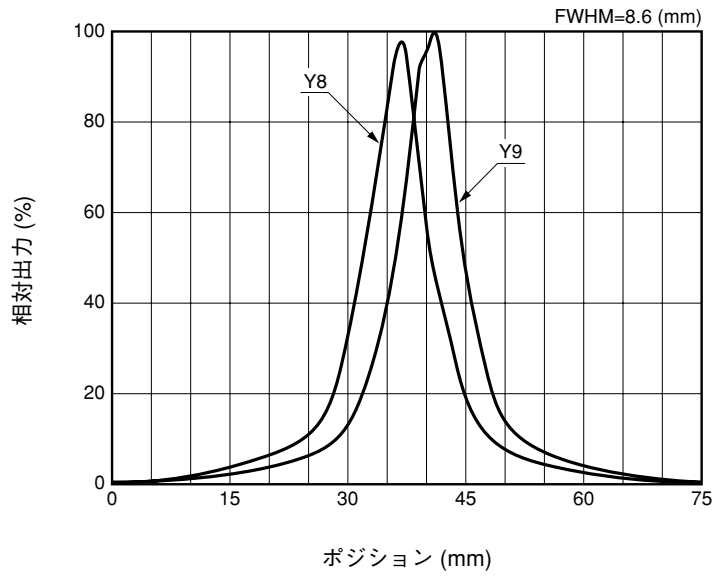


図 9-26 グリッド型ダイノード光電子増倍管



THBV3_0927JA

図 9-27 X 方向の空間分解能

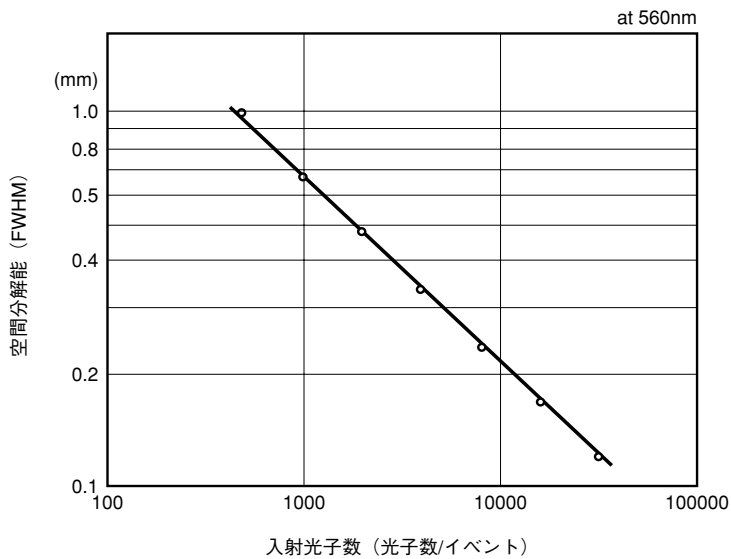


THBV3_0928JA

図 9-28 Y 方向の空間分解能

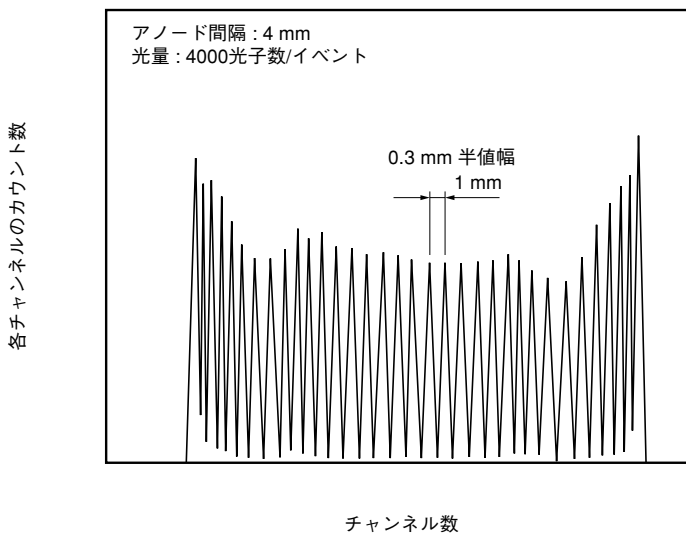
この光電子増倍管の読み出し方法にはメタルチャンネル型ダイノードを用いたクロスプレートアノードで述べた重心計測方法が用いられています。

図9-29にパルス点灯したLEDによってパルス当たりの光量に対する重心の広がり特性を示します。これから、重心の広がりには統計的理論に従ってほぼ入射光量の平方根に逆比例することが分かります。図9-30は、光スポットを1 mm 間隔で移動した時の重心分布の特性を示します。4000光子/パルスの光入射強度で、中央では0.3 mm (半値幅) の分解能があります。周辺ではクロスワイヤーアノードの数の限りのあることからやや歪みを生じています。図9-31は、横軸に光スポットの物理的位置を示し、縦軸は得られた電気的重心の位置を求めた空間リニアリティーの特性を示します。



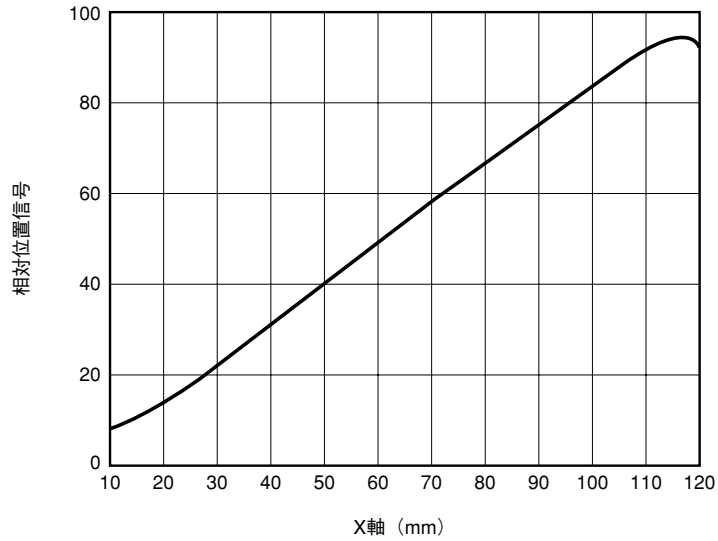
THBV3_0929JA

図 9-29 入射光量と空間分解能の関係



THBV3_0930JA

図 9-30 光スポットの移動による重心分布



THBV3_0931JA

図 9-31 グリッド型ダイノード光電子増倍管の空間リニアリティ

光電子増倍管の周辺ではクロスワイヤーアノードによってすべての電子が収束されず、中央にひきずられた歪みを生じます。しかし、これはルックアップテーブルなどの方法によって十分に補正可能なレベルです。

メ 毛

第 10 章

MCP-PMT

マイクロチャンネルプレート¹⁾(Micro-Channel Plate 以後 MCP)の出現により、フォトンカウンティング動作下でのピコ秒領域までの高帯域計測が可能となっています。ここでは、MCPを内蔵した高感度かつ超高速光検出器である MCP-PMT²⁾について紹介します。

10.1 構造

10.1.1 MCPの構造

図10-1(a)にMCPの構造の一部を示します。MCPは内壁を抵抗体および二次電子放出体とした内径 $6\sim 20\ \mu\text{m}$ のガラスキャピラリ(チャンネル)多数を束ねた板状構造をもち、それぞれのチャンネルは図10-1(b)にその断面を示すような、独立した二次電子増倍器を形成しています。入射した一次電子により壁から放出された二次電子は、MCPの両端に印加された電圧 V_D による電界で加速され、再び壁に衝突し二次電子を放出します。この過程がチャンネル内で繰り返される結果、増倍された多数の電子が出力端より放出されます。

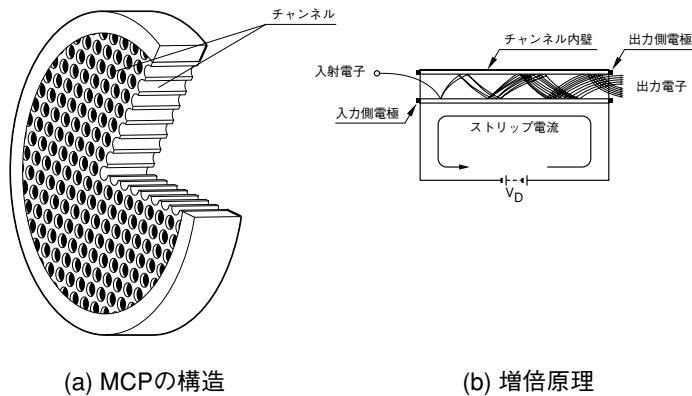


図10-1 MCPの構造と増倍原理

THBV3_1001JA

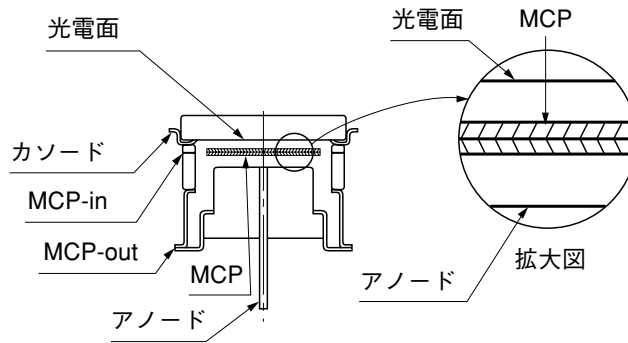
MCPはその材質、構造そして動作原理に基づき、通常の多段形ダイノードとは異なった次のような特長を持っています。

- ① 小型・軽量、高ゲイン
- ② 高速応答
- ③ 二次元、高空間解像度
- ④ 高磁場中で動作可能
- ⑤ 荷電粒子、紫外線、真空紫外線、X線、 γ 線、中性子にも感度を持つ
- ⑥ 低消費電力

MCPのこれらの特長を応用した検出器として、高速応答特性を利用したMCP内蔵型光電子増倍管(MCP-PMT)をはじめ、二次元高感度検出器であるイメージンテンシファイア(I.I)、マルチアノード光電子増倍管、超高速測光ストリーク管、二次元微弱光測光用のフォトンカウンティングイメージ管などがあります。

10.1.2 MCP-PMT の構造

図 10-2 に代表的な MCP-PMT の断面図を示します。MCP-PMT は入射窓、光電面、MCP および陽極から構成されています。光電面より放出された光電子は、MCP の各チャンネル内に入射し、その内壁に衝突して増倍を繰り返し、陽極に取り出されます。光電面と MCP の間隔は約 2 mm の近接構造をしています。通常は十分なゲインを得るため、MCP を 2 枚重ねてあります。図 10-3 に実際の MCP-PMT の写真を示します。また、光電子が入射する MCP 入力面側には、MCP 内部等で発生したイオンが光電面に戻るのを防ぐために、通常はイオンバリアと呼ばれる薄膜が形成されています。



THBV3_1002JA

図 10-2 MCP-PMT の構造図

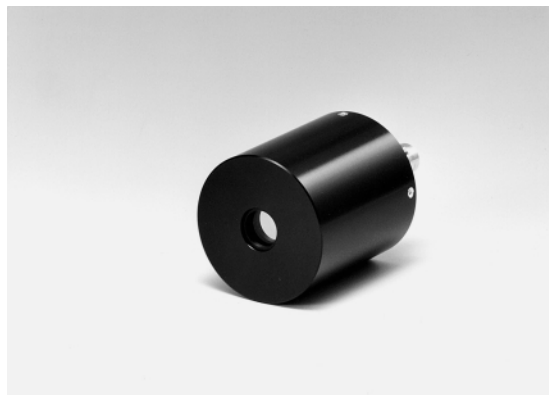


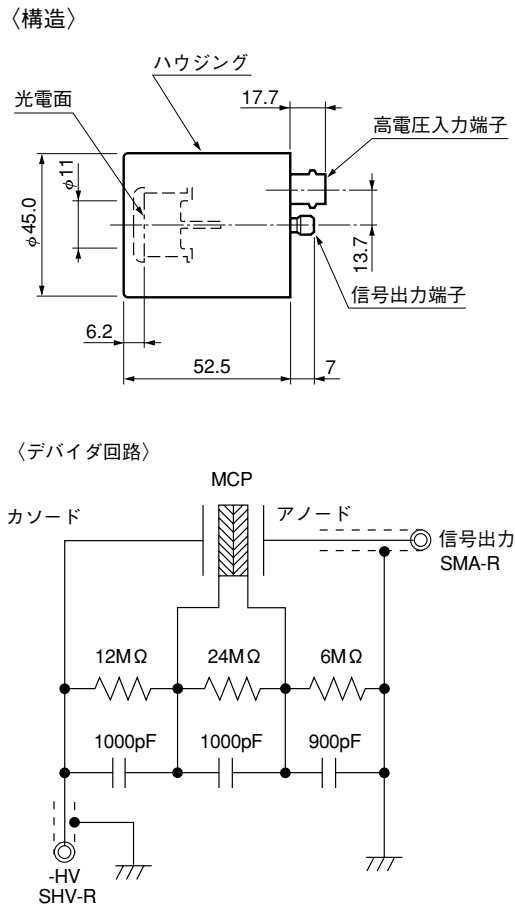
図 10-3 MCP-PMT の外観写真

10.1.3 デバイダ回路とハウジング構造

MCP-PMTの動作のためには、光電子増倍管と同様に各電極に電圧を印加する必要があり、通常は抵抗によるデバイダ回路が用いられます。

図10-4にデバイダ回路の基本的構成(MCP2枚入り)およびMCP-PMTデバイダ回路を内蔵したハウジングの断面図を示します。

通常、光電面に負の電圧を印加し、光電面、MCPin、MCPoutそして陽極の間を抵抗で分割し、高電圧を分圧して、それぞれに電圧を印加します。また、超高速信号波形検出用としてリングング対策を十分考慮した構造・回路設計になっており、それによる出力波形の歪みは最小限に抑えられています。



THBV3_1004JA

図 10-4 MCP-PMT のハウジング構造と動作回路図

10.2 MCP-PMTの基本特性

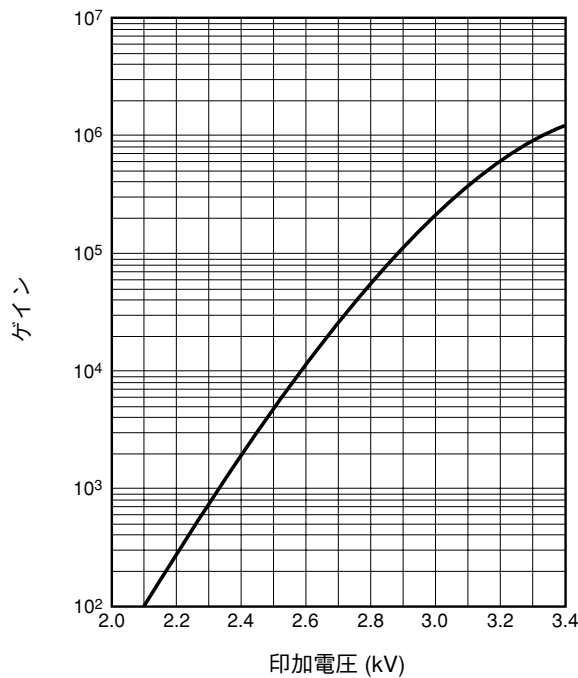
10.2.1 ゲイン特性¹⁾

MCP-PMTのゲインは、内蔵されているMCPの枚数によって決まります。図10-5にMCP-PMTの平均的な印加電圧ーゲイン特性を示します。

MCPのゲイン特性¹⁾(μ)は、チャンネル長(L)とチャンネル径(d)の比で定義される規格化長 $\alpha = L/d$ を用いて、近似的に

$$\mu = \text{EXP}(G \cdot \alpha)$$

で与えられます。Gは利得係数と呼ばれるチャンネル壁の二次電子放出特性です。この利得係数Gは、チャンネル材料固有の特性で、チャンネルの電界強度の関数となります。



THBV3_1005JA

図10-5 MCP-PMTゲイン(MCPは6 μ mタイプを2枚内蔵)

一般的に α を大きくすればゲインの立ち上がりは高電圧側に移りますが、高いゲインが得られるようになります。一方、ゲインが 10^4 を超えるとイオンフィードバックによるノイズが増大し、問題となるため、通常MCP1枚では印加電圧1kVで 10^4 程度のゲインになるように $\alpha = 40$ 前後に設計されています。

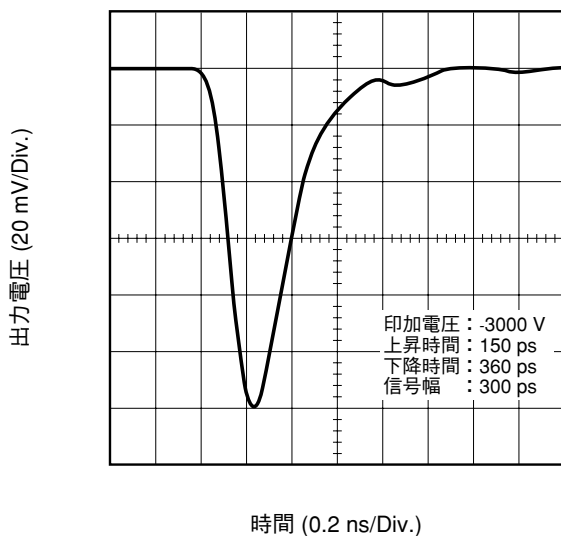
通常、MCP-PMTでは、MCPを2枚重ねて図10-5の様にさらに高いゲインが得られています。この高いゲインにより、フォトンカウンティングによる測定が可能となっています。

10.2.2 時間特性²⁾

通常の光電子増倍管では光電子および二次電子のもつ放出角分布、初速度分布ならびに収束レンズ系の影響により、光電面からアノードに至る増倍過程で信号パルスに時間的広がりを生じやすくなります。MCP-PMTは、光電面—MCPin、MCPout—陽極間にほぼ平行に強い電界がかかっているため光電子の放出角分布や初速度分布もほとんど無視できる程度となります。さらに、MCPをダイノードとして用いるので、二次電子の増倍過程における走行距離が短縮され、かつ、走行時間の広がりも飛躍的に短縮されます。したがって、MCP-PMTは光電子増倍管の中で最も優れた時間応答特性を持っています。

(1) 上昇／下降時間

光検出器の応答時間と比較して十分短いパルスを入射した時の光検出器からの出力波形の上昇(RiseTime)、下降時間(FallTime)のことを表します。この特性は、主に超短パルス光の波形観測などの場合に重要な特性です。測定方法は第4章 4.3.1の時間特性の項を参照してください。図10-6に実際の波形を示します。



THEV3_1006JA

図10-6 MCP-PMT(R3809U-50)のパルス応答波形

(2) 走行時間 (Transit Time)

光パルスが光検出器に入射してから、検出器から出力パルスが発生するまでの遅延時間のことを表します。測定方法は、第4章 4.3.1の時間特性の項を参照してください。

(3) T.T.S (Transit Time Spread)及び I.R.F(Instrument Response Function)

光子1個が光検出器に入射し、光電変換、電子増倍された後の電子群のパルスの走行時間は各光子毎にわずかに異なります。この走行時間の分布を電子走行時間分布(Transit Time Spread: TTS)といいます。特にTTSは、時間相関光子計数法³⁾(Time Correlated Photon Counting)などのようなタイミングを重視するような応用では重要な値です。測定方法は、第4章 4.3.1の時間特性の項を参照してください。

浜松ホトニクスでは、図10-7の様な測定系で電子走行時間分布の測定を行っています。この測定系では、MCP-PMTを含む測定系全体の時間特性として装置応答関数(IRF)の値が得られます。これは測定系において、レーザーのパルス幅が約35psとMCP-PMTのTTS特性と同等のゆらぎ成分を有しているためです。TTSとIRFの関係は次式で表わされます。

$$(IRF)^2 = (TTS)^2 + Tw^2 + Tj^2$$

Tw:レーザーのパルス幅

Tj:その他の測定系のゆらぎ

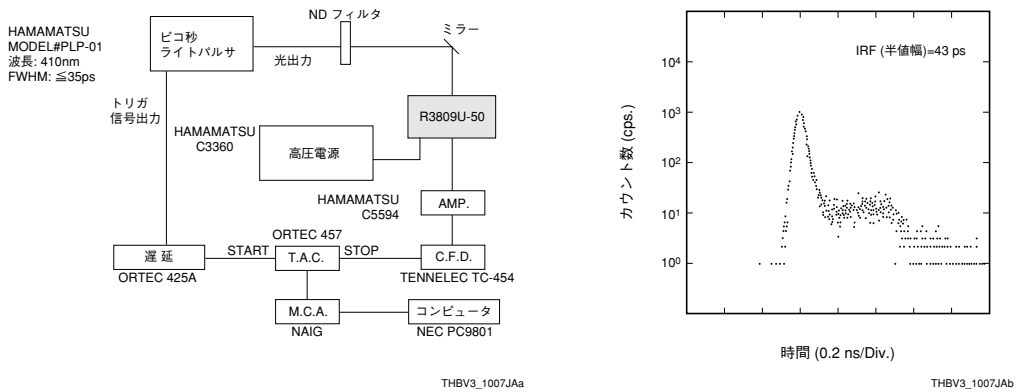


図 10-7 MCP-PMT(R3809U-50)の装置応答関数 (IRF) 測定

また、MCP-PMTのTTSは図10-8の様な測定系により25.0psの値が得られています。この測定系ではレーザーのパルス幅が5psと、MCP-PMTのTTS特性より短い時間であることから、より精密なデータが得られています。

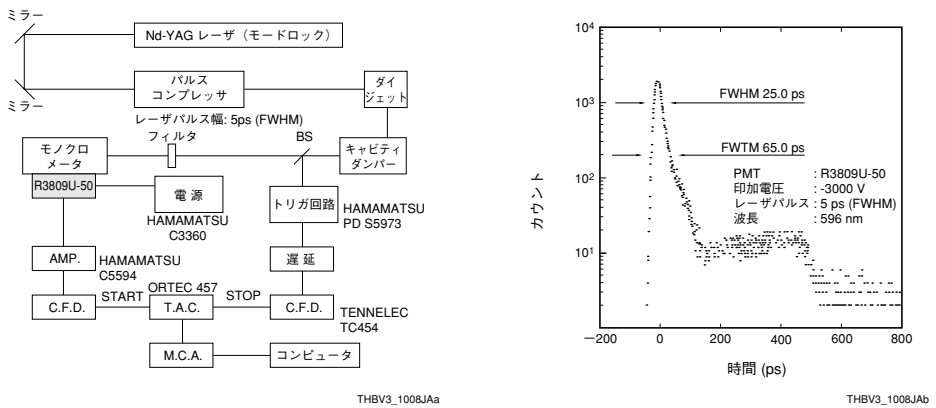


図 10-8 MCP-PMT(R3809U-50)の電子走行時間分布 (TTS) 測定

(4) 光電子走行時間差 (Cathode Transit Time Difference)

光検出器は有限の光入射面をもっていますが、通常的光電子増倍管の場合、光の入射する場所によって電子走行時間が異なります。検出器の光電面に部分的に光を入射し、その場所による電子走行時間の差を (Cathode Transit Time Difference: CTTD) といいます。特にこの値は、TTS に影響を与えます。しかし近接構造をしている MCP-PMT の場合はその影響はほとんどありません。測定方法は、第4章 4.3.1 の時間特性の項を参照してください。

(5) 各製品の時間差特性

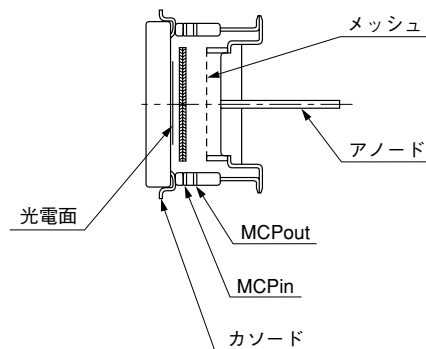
時間特性一覧表を表 10-1 に示します。時間特性は MCP の枚数が少なく、チャンネル径が小さい程電子の増倍過程の距離が短くなり、より高速な時間特性となります。従来のチャンネル径 $12 \mu\text{m}$ の MCP-PMT に比べ、チャンネル径 $6 \mu\text{m}$ の R3809U では上昇時間で 70ps、IRF で 25ps 改善されています。下降時間の違いは MCP と陽極間の静電容量に依るものと考えられています。ゲート付タイプの時間特性は他と比べわずかに劣りますが、陰極近傍とゲートメッシュ電極の電界が弱いため、光電子の放出角や初速度分布の影響を多少受けやすくなるためと考えられます。

MCP-PMT型名	上昇時間	下降時間	走行時間	I.R.F(半値幅)
R3809U-50(6 μm /2枚)	150ps	360ps	400ps	45ps
R5916U-50(6 μm /2枚)	180ps	700ps	350ps	95ps
R7024U(6 μm /2枚)	110ps	120ps	400ps	—

注) 表中の測定値はいずれも標準値で、光源および回路系の全てのジッターを含む値です。
 また IRF 測定には半値幅(FWHM)が 35ps 以下のピコ秒レーザを使用しています。
 R5916U-50 はゲートタイプです。また、R7024U は 3 極管タイプ(図 10-9 参照)です。

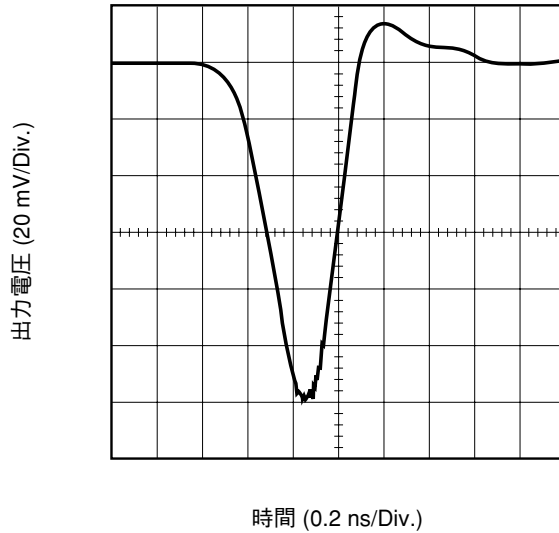
表 10-1 MCP-PMT 時間特性一覧表

ここで、特に上昇時間・下降時間特性を改善した R7024 の紹介をします。図 10-9 に構造を示します。超高速測定用光電子増倍管で、MCPout と陽極の間にメッシュを内蔵し、また信号の取り出しも通常の MCP-PMT とは異なります。MCPout と陽極の間のメッシュは MCP から放出された二次電子が陽極に加速収集される時生ずる変位電流を打ち消す役目をします。図 10-10 に出力波形を示します。上昇時間 110 ps そして下降時間 120 ps の超高速性能が得られています。



THBV3_1009JA

図 10-9 R7024 の構造



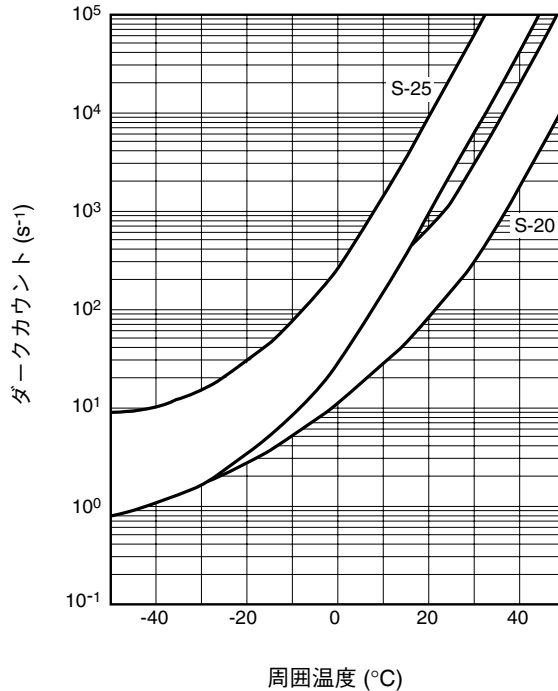
THBV3_1010JA

図 10-10 R7024U の応答波形

10.2.3 温度特性および冷却器について

MCP-PMTの暗電流およびダークカウントは光電面の種類および使用温度によって通常の光電子増倍管と同様に大きく影響を受けます。

赤外光に比較的高い感度を持つ赤感度増強型マルチアルカリ (S-25) 光電面では室温では暗電流およびダークカウントが比較的大きいので、冷却して使用することが必要になる場合があります。



THBV3_1011JA

図 10-11 周囲温度 v.s. ダークカウント

浜松ホトニクスではMCP-PMT専用の電子冷却器およびMCP-PMT用のホルダをオプションにて用意しています。この冷却器およびホルダを使えば容易にMCP-PMTを冷却(-30℃)してご使用いただくことが可能になります。

10.2.4 飽和特性

一般的に、光検出器の飽和は、入射する光強度に対し出力信号量が比例しない現象として定義されます。MCP-PMTでは、通常の光電子増倍管の多段ダイノードの代わりにMCPを用いているため通常の光電子増倍管とは異なります。不感時間によりMCPからの出力電流が制限される飽和特性および空間電荷の影響による飽和特性があり、使用中は前者の飽和が起こらないような注意が必要となります。以下にMCP-PMTの飽和特性の詳細を示します。

(1) 不感時間 (Dead Time)¹⁾

MCPをパルス電子流で照射した場合、放出された電子流に対応して、MCP出力端には正の電荷が帯電し、電位分布が変形し電界強度が弱くなるため、後続の電子増倍が抑制されます。この電荷は、チャンネル壁を流れるストリップ電流により中和されますが、このストリップ電流はMCPが高抵抗であるため小さく、中和するのに長い時間がかかります。この間に入射した信号のゲインは小さくなります。通常この中和に要する時間を不感時間(Dead Time)、あるいは回復時間(Recovery Time)と呼んでいます。チャンネル一本当りの出力電荷量を Q_{out} 、一本のチャンネル当りのストリップ電流を I_s とすると、不感時間 τ_d は次式で与えられます。

$$\tau_d = Q_{out} / I_s$$

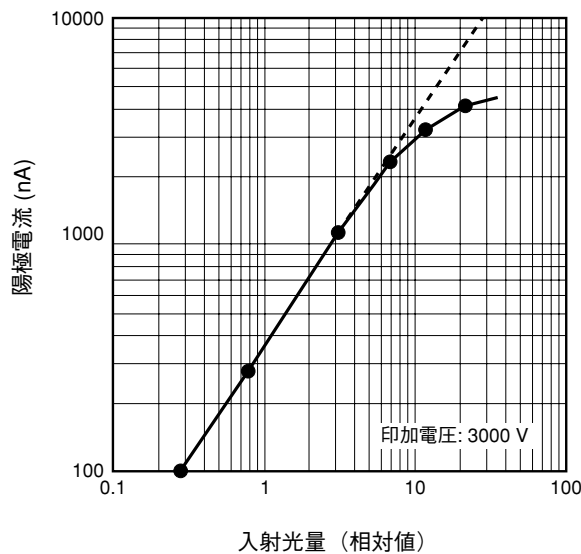
なお、ストリップ電流 I_s の大きい低抵抗MCPを使用すれば、この不感時間を短くすることができ、かつ飽和特性も改善されます。

この不感時間内に次の電子が入射する様な状態でMCP-PMTを動作させますと、以下で述べる種々の飽和が起こる様になります。MCP-PMTが飽和している様な状態ではMCP-PMTの性能が十分発揮できないだけでなく、光電面感度やMCPゲインの劣化が引き起こされますので、十分な注意が必要です。

(2) 直流動作による飽和

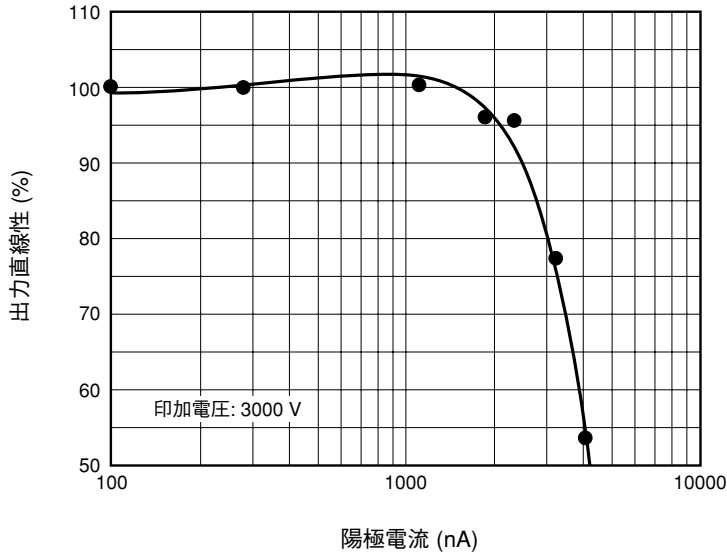
MCPは数十から数百M Ω という抵抗値をもちMCPから取り出すことができる出力電流を制限します。そのために図10-12(a)や(b)に示すように入力電流が増加すると出力電流の飽和を生じます。これは、MCPから取り出された大量の二次電子の放出により帯電が生じ出力端における電位分布が変化し、電界強度の低下によっておこります。

この電界強度の低下は、MCPのチャンネル壁を流れるストリップ電流で中和されます。出力電流がストリップ電流の約7%以上になると、直流動作における飽和が起こりますので注意が必要です。



THBV3_1012JAa

図 10-12(a) MCP-PMT (有効径 ϕ 11 mm / チャンネル径 6 μ m) の直流動作時における飽和特性 (1)

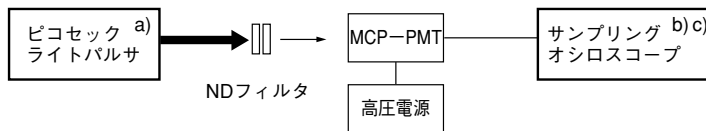


THBV3_1012JAb

図 10-12(b) MCP-PMT (有効径 ϕ 11 mm / チャンネル径 6 μ m) の直流動作時における飽和特性 (2)

(3) パルスリニアリティ特性

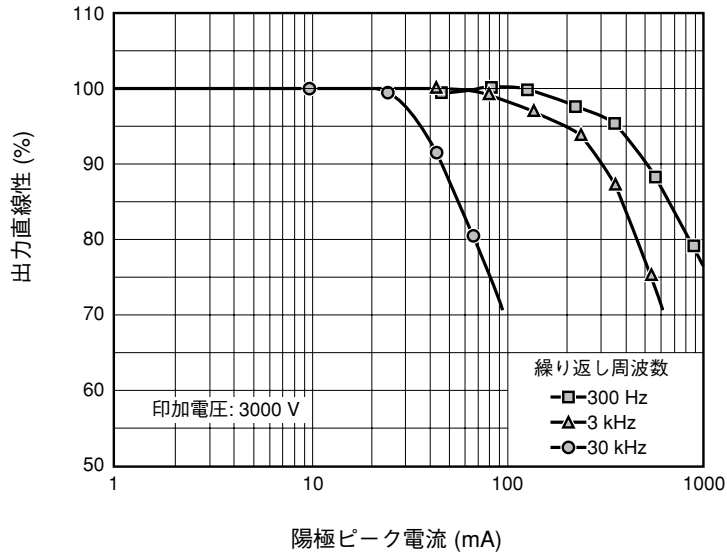
MCP-PMT にパルス光が長い時間間隔 (デッドタイムの影響を受けない) で入射した場合には、MCP-PMT のリニアリティは保たれます。パルス光入射時におけるパルスリニアリティのデータを図 10-13 に示します。



- a) ピコセックライトパルサ PLP-01 (浜松ホトニクス製)
波長: 780 nm 半値幅: 50 ps
- b) サンプリングオシロスコープ 11802 (テクトロニクス製)
周波数帯域: 20 GHz
- c) サンプリングヘッド SD-26

THBV3_1013JAa

図 10-13(a) MCP-PMT パルスリニアリティの測定方法



THBV3_1013JAB

図10-13(b) MCP-PMT (有効径 ϕ 11 mm / チャンネル径 $6 \mu\text{m}$) パルスリニアリティ

図10-13(a)はパルスリニアリティの測定方法です。パルス特性、評価用光源として、ピコセックライトパルサを用いてそのパルス光 (半値幅 50 ps) を光電子増倍管に入射し、その入射強度はNDフィルタによって調節されます。図10-13(b)はMCP-PMTの繰り返し周波数300～30 kHzでのパルスリニアリティの結果を示します。繰り返しが300 Hz以下ではピーク値で約350 mAまでのパルス電流を取り出すことができます。

繰り返し周波数が低い場合の最大パルス電流は、空間電荷効果により制限されている1本のチャンネルから放出できる電子数とチャンネルの本数の積によって決まります。一方、繰り返し周波数が高い場合の最大パルス電流は、パルス当りの電荷量と繰り返しの積で決まる総電荷量に対するストリップ電流の比によって決まります。

繰り返し周波数が高い場合では、不感時間(10.2.4(1))の間に次のパルスが入射してしまい、MCPのゲインが低下することにより飽和が起こります。

(4) フォトンカウンティング法における飽和利得特性 (波高分布)

図10-14にMCP-PMTにおける、フォトンカウンティング法における光電子信号の波高分布、および暗電流パルスの波高分布の例を示します。図にみられるような波高分布となっています。

一般的な光電子増倍管によるシングルフォトン波高分布の形成と異なり、シングルフォトン1個によりMCPのチャンネル内で空間電荷効果による飽和が生じ、パルス波高分布にピークが形成されます。

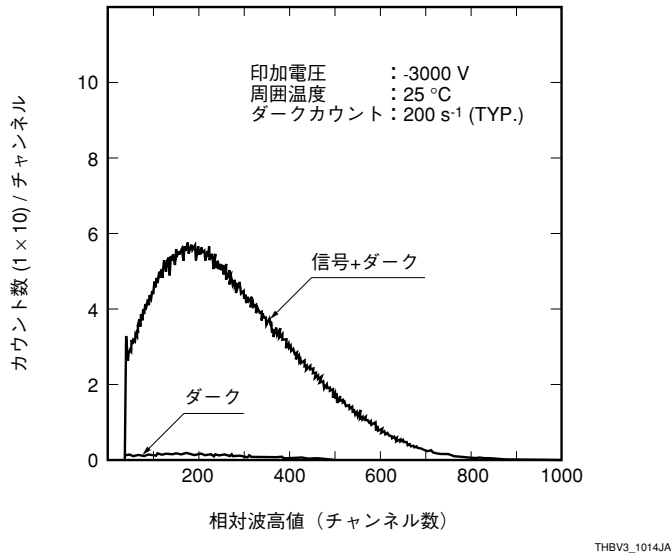


図10-14 シングルフォトンカウンティングにおける波高分布特性

(5) フォトンカウンティング法による計数率直線性

図10-15にフォトンカウンティング法における計数率の直線性の測定方法を示します。光源の強度をNDフィルタで可変し、MCP-PMTおよび接続する計数回路にて、単一光電子パルスを計数し、入射光子数を変えたときの計数率特性を求めます。

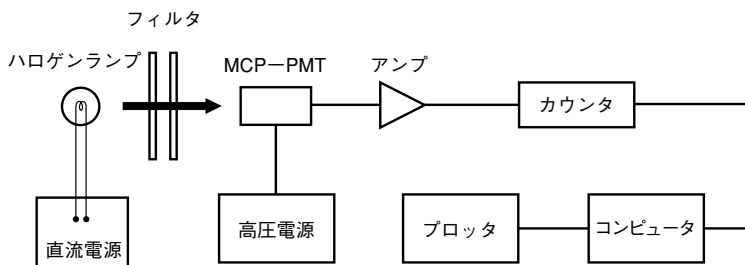
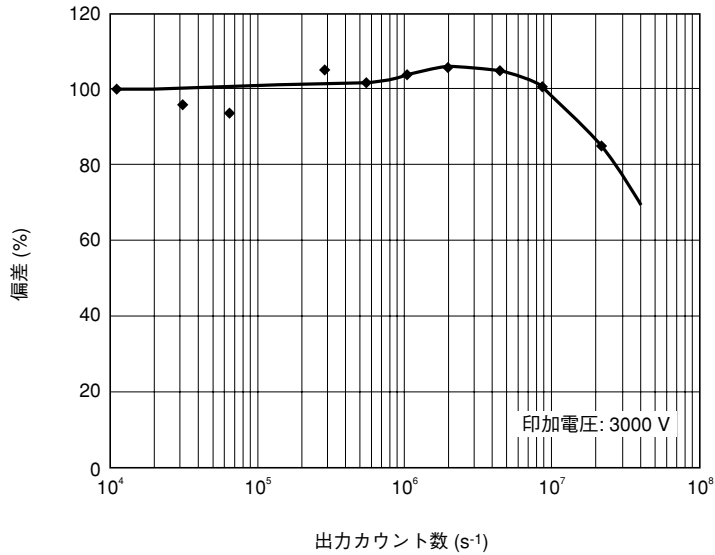


図10-15 光子計数法における計数率直線性の測定方法

図10-16にMCP-PMTのフォトンカウンティング法における計数率の直線性を示します。 10^7 s⁻¹までは直線性が保たれています。



THBV3_1016JA

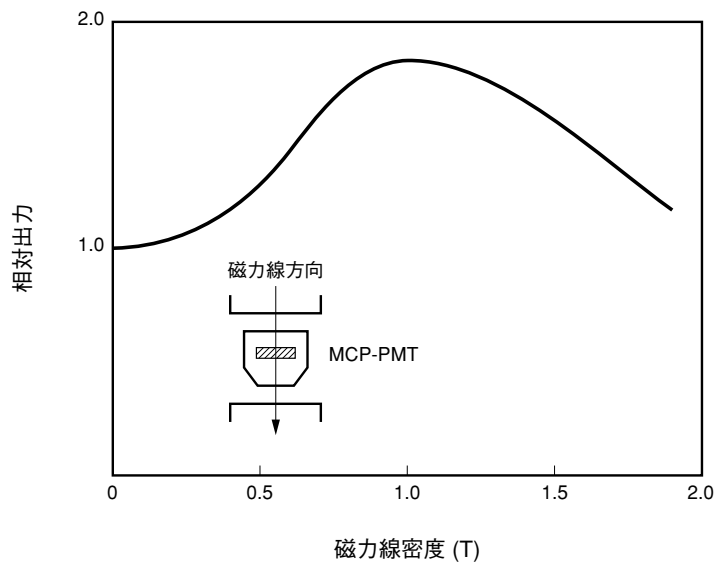
図 10-16 MCP-PMT (有効径 ϕ 11 mm / チャンネル径 6 μ m) のフォトンカウンティング法における計数率の直線性

10.2.5 磁気特性²⁾

磁気特性を良くするためには次の事が必要です。

- (1) 光電面－ダイノード間－陽極間を短くし、電子の走行距離を減らす。
- (2) 電極の電子軌道は収束型でなく光電面に平行電界をかけ管軸に平行に二次電子が走行する様にする。
- (3) 電界強度を上げる。

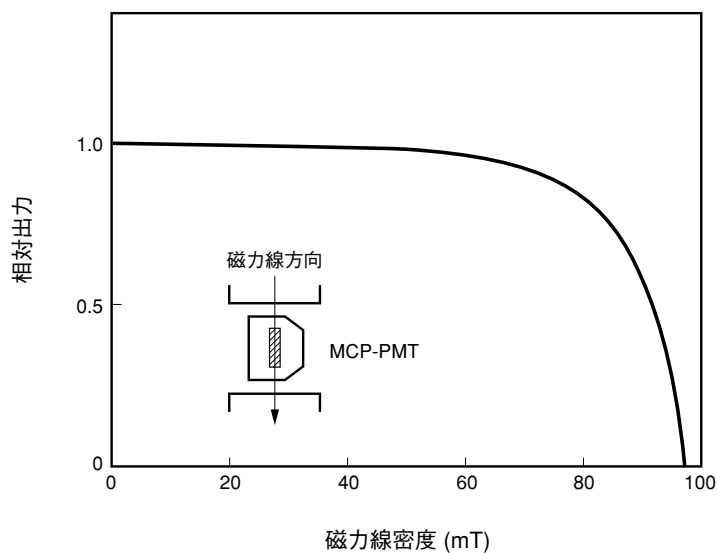
MCP-PMTは上記の全ての特性をそなえているため優れた磁気特性を有します。図10-17にMCP-PMTの磁気特性を示します。影響の程度はMCPの軸に対する磁場の方向によって違います。管軸に平行な磁場の中では2.0 T (20 kgauss)以上でも動作可能です。しかし管軸に直角な磁場中では70 mT (700 gauss)を超えると出力の低下が顕著に現れます。



THBV3_1017JAa

(a) 磁気特性 (磁力線が管軸に対して平行)

図 10-17 MCP-PMT の磁気特性(1)



THBV3_1017JAb

(b) 磁気特性 (磁力線が管軸に対して直角)

図 10-17 MCP-PMT の磁気特性(2)

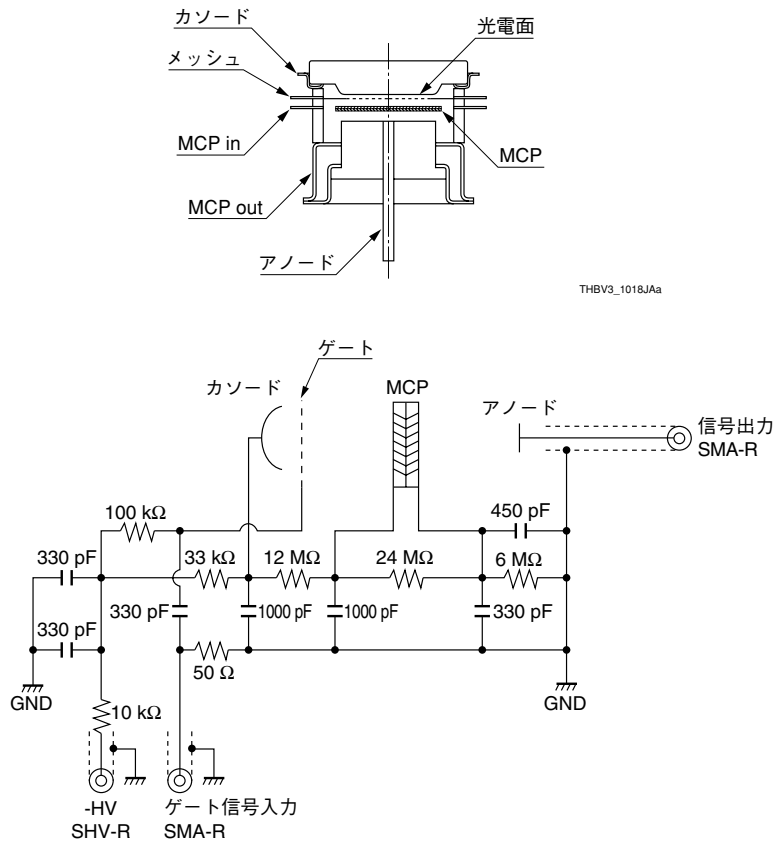
10.3 ゲート付 MCP-PMT²⁾

蛍光寿命、レーザラマン、レーザレーダーなどの応用分野では、種々の理由から光検出器にゲート機能をもたせたい要求があります。ここで要求される機能としては、

- (1) ゲートの立ち上がり、立ち下がりがなるべく速いこと。
- (2) 消光比(ゲート ON/ゲート OFF)の大きいこと。
- (3) スイッチングノイズの少ないこと。

などが求められます。

図 10-18 にゲート付 MCP-PMT(R5916U-50)の構造を示します。基本的な構成としては光電面、ゲートメッシュ、MCP、アノードからなります。ゲート機能は図 10-18 に示すように光電面と近接したゲートメッシュの制御によって行われます。光電面の電位に対しゲートメッシュに逆電位を加えることによってオフモードにし、順電位を加えることによってオンモードとしてゲート動作(スイッチング)させることができます。



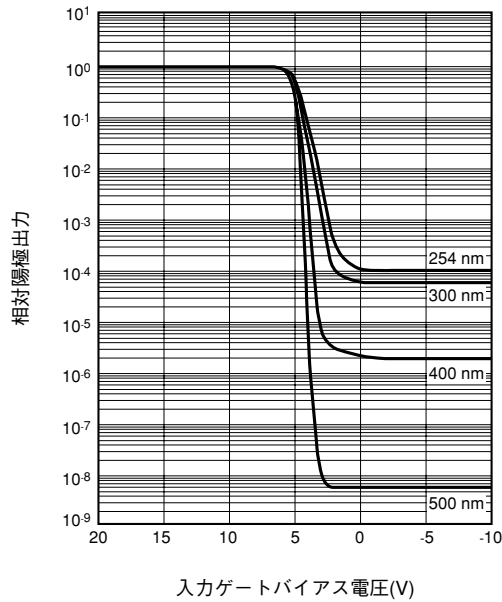
THBV3_1018JAa

THBV3_1018JAb

図 10-18 ゲートメッシュ付き MCP-PMT の構造と動作回路図

図 10-19 に基本的な特性である静的動作下での消光比について測定した結果を示します。光電面の電位を基準とした時に、ゲートメッシュに印加される電圧 (入力ゲートバイアス電圧) と出力の関係です。この結果より消光比が 10^8 以上 (500 nm の入射光) であることがわかります。

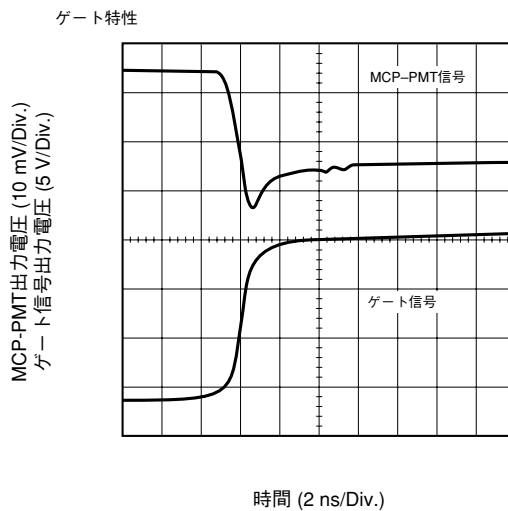
図10-19に基本的な特性である静的動作下での消光比について測定した結果を示します。光電面の電位を基準とした時に、ゲートメッシュに印加される電圧（入力ゲートバイアス電圧）と出力の関係です。この結果より消光比が 10^8 以上(500 nmの入射光)であることがわかります。



THBV3_1019JA

図10-19 静的動作時の消光比特性

図10-20に光電子増倍管に連続的な入射光を入れながらゲートパルスを加え、動的なゲート特性を求めた結果を示します。MCP-PMTの信号は約1 nsで立ち上がります。



THBV3_1020JA

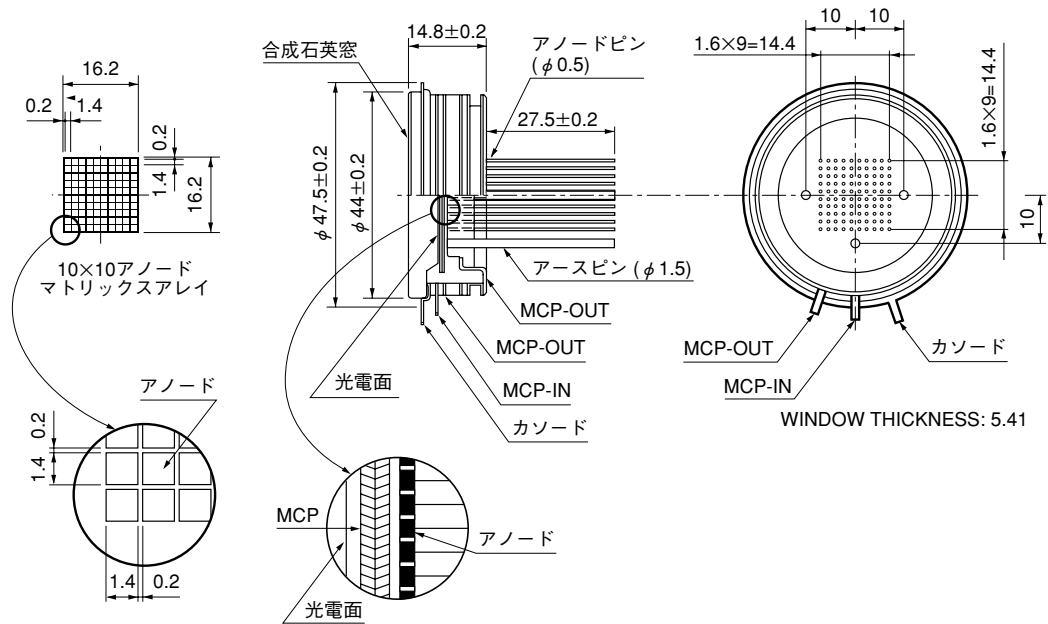
図10-20 動的ゲート特性

以上のようにゲート付MCP-PMTでは従来の光電子増倍管に比べ高速ゲート特性、消光比という点でたいへん優れた特性を持っています。

10.4 マルチアノード MCP-PMT⁴⁾

これまで述べてきたMCP-PMTにおいては1個のアノードが用いられてきましたが、複数個の独立したアノードを配列したMCP-PMT(マルチアノードMCP-PMT:R4110U)が実用化されています。これは高速応答、微弱光検出かつ二次元(一次元)同時計数という特長をもっています。

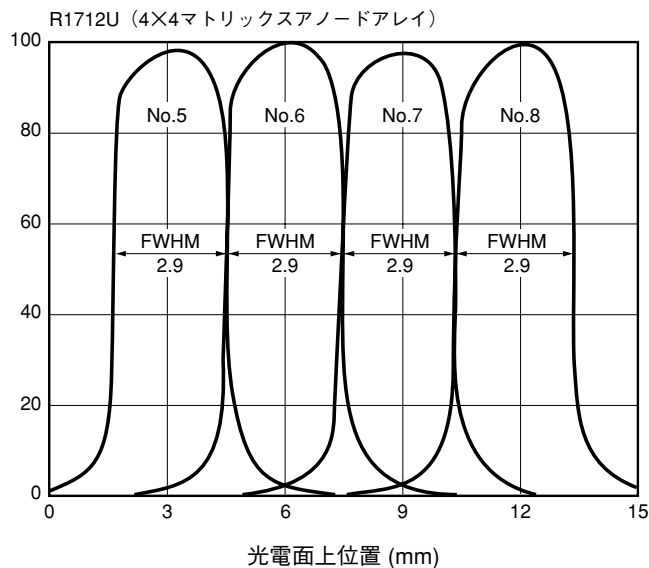
図10-21に代表的マルチアノード MCP-PMTの構造を示します。



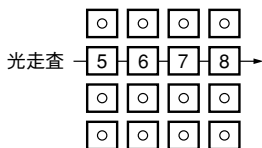
THBV3_1021JA

図10-21 10×10チャンネルマルチアノード MCP-PMT

リニアアノードの空間的な解像度を見るために、直径約20 μm の光スポットを光電面に照射しスキャンした時の各アノードからの出力分布を図10-22(a)～(c)に示します。

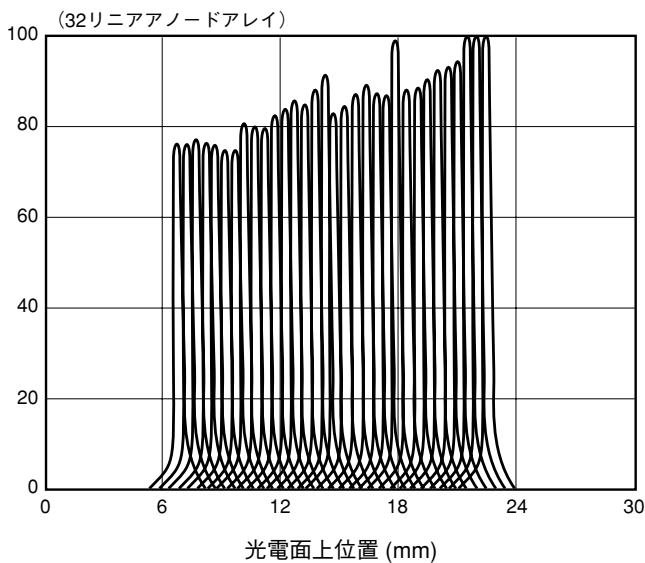


印加電圧 : -2000 V
入射光波長 : 400 nm
光スポット径 : 0.02 mm

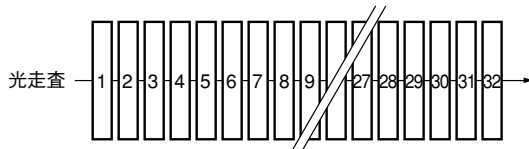


(a) 4×4マトリックス

THBV3_1022JAa



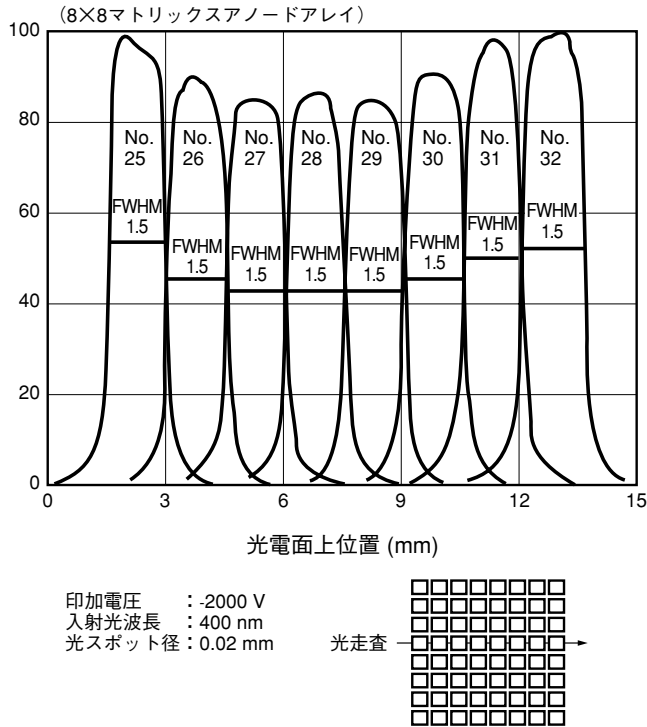
印加電圧 : -2000 V
入射光波長 : 400 nm
光スポット径 : 0.02 mm



(b) 32リニアアレイ

THBV3_1022JAb

図 10-22 空間分解能測定例(1)



(c) 8×8マトリクスアレイ

THBV3_1022JAc

図 10-22 空間分解能測定例(2)

これらのデバイスの特長を生かすことにより

- (1) 空間的に広がりのある発光体に対する二次元同時微弱光計測
- (2) 光ファイバを利用した多チャンネル同時時間分解分光
- (3) シンチレーションファイバの多チャンネル読みだし

などへの応用が考えられます。マルチアノード MCP-PMT の製品群としては、表 10-2 に示すように、4×4アノード(2次元配列)、8×8アノード(2次元配列)、10×10アノード(2次元配列)、32アノード(1次元配列)があります。さらに、マルチアノード MCP-PMT にデバイダ回路、コネクタ、ケーブルをつけて、モジュール化されたものも製品化されています。またこれらのアノード形状は代表的なもので、これら以外にも要望に合わせた形状の物を供給することができます。

アノード形状	
4×4	マトリクスアノード
8×8	マトリクスアノード
10×10	マトリクスアノード
32	リニアアノード

表 10-2 各種マルチアノード MCP-PMT 一覧表

第10章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株): MCP アッセンブリ技術資料, NO.TMCP9001J01.
- 2) 浜松ホトニクス(株): Ultrafast MCP-PMT R3809U(FEB.1992).
浜松ホトニクス(株): Microchannel Plate Photomultiplier Tubes (MCP-PMT), NO. t-112-02 (FEB. 1990).
H.Kume 他: Ultrafast Microchannel Plate Photomultiplier Tubes, Applied Optics Vol. No.27 (Mar. 15, 1988).
- 3) 浜松ホトニクス(株): Application of MCP-PMTs to Time Correlated Single Photon Counting and Related Procedures, NO.ET-03(FEB. 1991).
D.V.O' Connor, D.Phillips(平山 鋭, 原 清明訳): ナノ・ピコ秒の蛍光測定と解析法(時間相関光子計数法). 学会出版センター(1988 出版).
- 4) 浜松ホトニクス(株): マルチアノード MCP-PMT シリーズ, NO.T-1000(FEB. 1989).

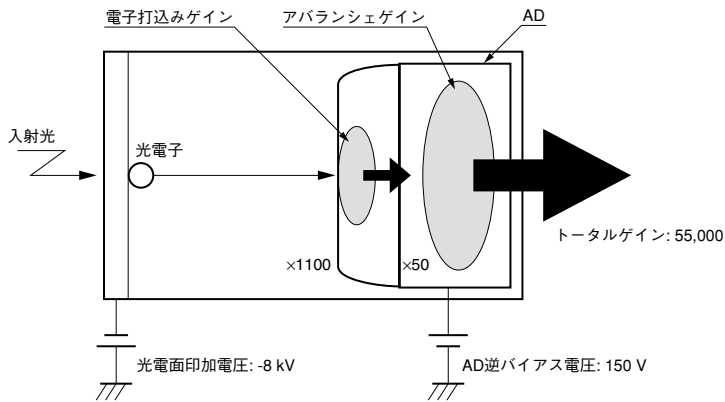
第 11 章

HPD (Hybrid Photo-Detector)

HPD (Hybrid Photo-Detector)は、電子管に半導体素子を内蔵した新しい光電子増倍管で、光電面からの光電子を直接、半導体に打込むことで光電子を増倍しています。増倍揺らぎが非常に少なく、電子分解能や、安定性に優れる等の特長があります。

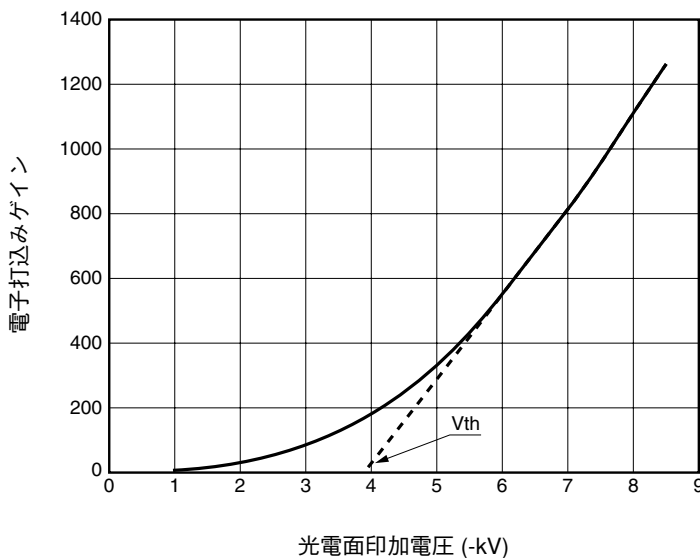
11.1 HPDの動作原理

HPDは、図11-1の模式図に示すように、真空容器の中に光を電子に変換する光電面と、変換された光電子のターゲットである半導体素子(電子打込み用アバランシェダイオード;AD)から構成されています。動作原理は、まず光電面に光が入射すると、入射光量に応じた光電子が放出され、これらは光電面に印加されたマイナス数kV～数十kVの高電界より加速された後、ターゲット半導体に打ち込まれます。すると半導体中では、これら光電子の入射エネルギーに応じた電子正孔対を発生します。これを電子打込みゲインと呼びます。光電面印加電圧と、この電子打込みゲインの関係を図11-2に示します。原理的には光電面印加電圧に対して、打込みゲインは比例します(点線)。しかしながら、実際には半導体素子の表面不感層による打込み電子のエネルギーロスがあるため、低電圧側で比例関係が崩れます。図中の点線と電圧軸との切片の電圧をスレッシュホールド電圧[V_{th}]と呼び、図のように、ある光電面印加電圧以上では、電子の入射エネルギーに比例して打込みゲインが増加します。



THBV3_1101JA

図 11-1 HPDの模式図



THBV3_1102JA

図 11-2 電子打込みゲイン特性

HPDに内蔵されているシリコンアバランシェダイオード(AD)では、およそ3.6 eVの入射電子エネルギーにつき、1対の電子正孔対を発生するため、電子打込みゲイン G_b は、光電面と半導体素子との電位差（光電面印加電圧） $V_{pc}[V]$ 、及び半導体素子で決まるしきい値電圧 $[V_{th}]$ を用いて

$$G_b = \frac{(V_{pc}-V_{th})}{3.6} \dots\dots\dots (式 11-1)$$

とあらわされ、図 11-2 では V_{th} は約 4 kV となっています。

この電子打込みで得られた2次電子群はさらに、半導体（アバランシェダイオード）内部でアバランシェ増倍により、半導体に印加されるバイアス電圧に応じたアバランシェ増倍ゲインを得ます。ここで、アバランシェダイオード(AD)によるゲインを G_t とすれば、HPD全体としてのゲイン G は、

$$G = G_b \times G_t \dots\dots\dots (式 11-2)$$

であらわされます。

製品化されているHPDのR7110Uシリーズでは、光電面電圧が-8 kVのとき、電子打込みゲイン G_b は約 1100 となります。また、ADに適切な逆バイアスを印加した場合、アバランシェ増倍ゲイン G_t は約 50 倍が得られます。従って、トータルゲイン G は約 55,000 となります。

11.2 光電子増倍管との比較

ここでは、微弱光の計測に広く利用されている光電子増倍管とHPDを比較して、特性の違いを示します。HPDの電子打込みによる電子増倍ゲインは、従来型光電子増倍管の第一ダイノードによるゲインに相当します。前述のように、HPDでは約1,100（光電面印加電圧-8kV時）の打込みゲインが得られ、従来型光電子増倍管に比べ格段に増倍率が高いため、増倍揺らぎを非常に小さくできます。このため、数フォトン領域のパルス光を測定する用途では、1～5光電子に相当する波高分布のピークを測定でき、この点において、光電子増倍管より優れます。加えて、増倍機構が単純であるため、定量性・再現性及び、安定性が要求される用途で優位性が発揮されます。表11-1に、各項目別の光電子増倍管との比較を示します。

項目	HPD	解説
波高分解能	極めて良好	HPDは従来型光電子増倍管の初段に相当する電子打込みゲインが高いため、1～5光電子による波高を分離して出力できます。HPDの特性を生かす低ノイズアンプの利用が重要です。
増倍ゆらぎ	極めて小さい	高い電子打込みゲインにより、HPDの電子増倍ゆらぎは理論限界に到達しています。
ドリフト・寿命特性	良好	短期的な出力の変動をドリフト特性、長期的な出力変動を寿命特性と呼びます。HPDはダイノードが無いため、光電子増倍管に比べてドリフト特性・寿命特性に優れます。
光ヒステリシス特性	良好	入射光がステップ関数的に変化したとき、出力が同じステップ関数とならないことがあります。このような現象を光ヒステリシスと呼びます。HPDは光電面より放出された電子がADに入射するだけという単純な増倍過程のため光電子増倍管と比較して光ヒステリシス特性は良好です。
アフターパルス特性	極めて良好	パルス計測を行う場合、信号に対応する出力パルスの後に疑似パルスが観測されることがあります。このような出力パルスをアフターパルスと呼びます。HPDは構造が単純なため、光電子増倍管と比較してアフターパルス特性は非常に少なく、良好です。
リニアリティ特性	良好	HPDは広い範囲で入射光量に対する出力電流のリニアリティ（直線性）が良い検出器です。しかし、極度に強い入射光の場合は理想的な直線性からのずれを生じます。HPDの場合、光電面の電気抵抗とアバランシェ増倍の直線性の2点が制限要因となっています。
ゲイン	低い (5×10^4)	高速で微弱光を検出する用途ではゲインの高い通常の光電子増倍管が有利です。HPDは、光電子増倍管に比べゲインが低いため、低ノイズアンプの利用が必要です。
ゲインのばらつき	極めて小さい	HPDでは、特に、電子打込みゲインのばらつきが小さいという特長があります。
ユニフォミティ	良好	ユニフォミティとは、光電面の場所の違いによる感度の不均一性のことです。HPDでは、電子打込みゲインの入射位置依存性がないため、良好なアノードユニフォミティ特性を示します。
温度特性	ゲインの温度依存性大	内蔵する電子打込み用ADの温度特性に依存します。
耐振性	良好	構造が単純なため耐振性に優れます。
収集効率	極めて良好	HPDでは、光電面から放出した電子は、全て電子打込み用半導体素子に入射するように軌道設計されています。（ただし、素子表面での反射があるため信号とならない電子が若干存在します。）
有効エリア	小さい	現状のHPD有効径は小さいので、大きな面積が要求される用途には向きません。大きな受光面を必要とする場合は通常の光電子増倍管の方が有用です。

表 11-1 光電子増倍管との比較

11.3 HPDの諸特性

11.3.1 マルチフォトエレクトロン分解能

HPDは、従来型光電子増倍管の初段ダイノードのゲインに相当する電子打込みゲインが、約1100（光電面電圧-8 kV時）と非常に高いため、増倍揺らぎの少ない理想的な信号増幅が可能です。例えば、平均3光電子程度が光電面から放出するように光量を調整したパルス光を繰り返し入射して、その出力波高分布をとると、図11-3に示すように、1～5光電子に相当する分布のピークを検出することが可能です。この複数の信号ピークを検出できる理由は、電子増倍揺らぎが非常に小さいためであり、これはHPDの最大の特長となっています。また、増倍揺らぎが小さいため、シングル電子に対する波高分解能（FWHM）が約30%と優れています。

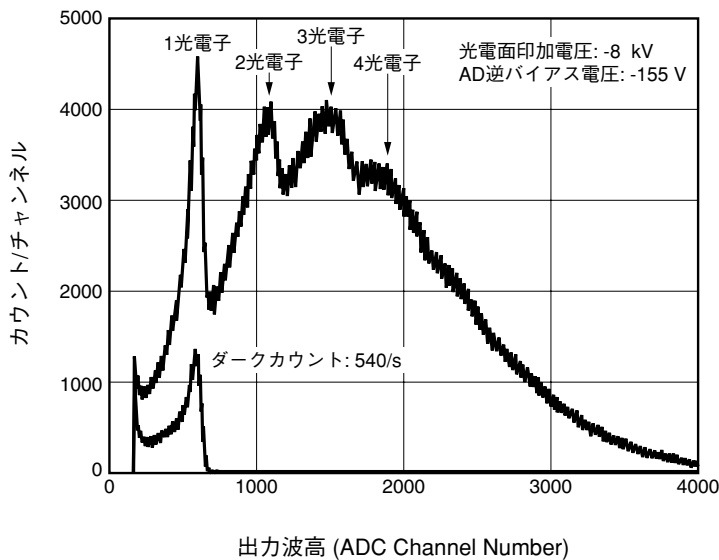


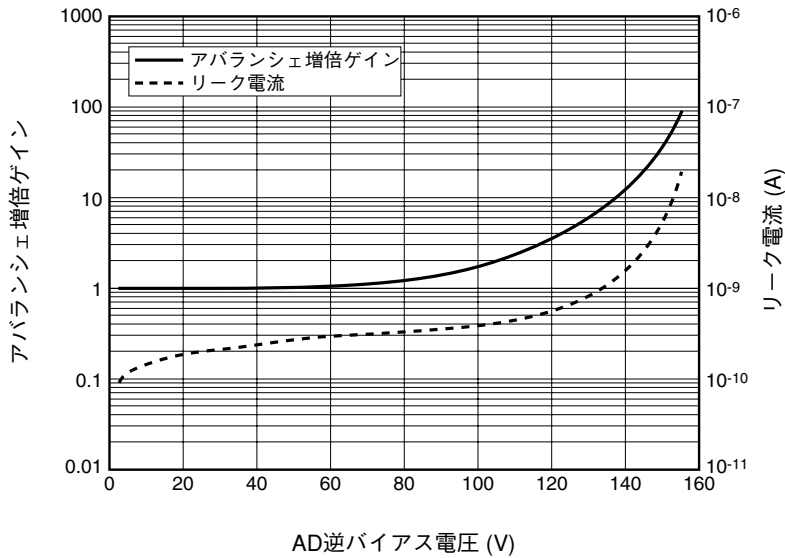
図 11-3 マルチフォトエレクトロンカウンティング特性

THBV3_1103JA

11.3.2 ゲイン特性・電子打込みゲインの均一性

動作原理で説明しましたように、HPDのゲインは、電子打込みゲイン G_b とアバランシェ増倍ゲイン G_t の積で表されます（式 11-2 参照）。図 11-2 で示すように、R7110U シリーズの電子打込みゲインは式 11-1 に従い、あるしきい値を越えると、光電面印加電圧に比例して増加します。また、図 11-4 には、内蔵された AD のアバランシェ増倍特性を示します。アバランシェ増倍ゲインは、AD に印加する電圧が 100 V を越えた辺りから徐々に増加し、ブレイクダウン電圧（リーク電流が $1 \mu\text{A}$ に到達する電圧）に近づくと、急激に増加する特性を示します。ゲインが急激に増加する逆バイアス電圧では安定な動作が難しく、一般的には、アバランシェ増倍ゲイン 50 倍以下で使用します。アバランシェ増倍ゲインは、素子のロットによって多少異なります。図 11-4 で示した素子では 138 V でゲイン 10、149 V でゲイン 30、153 V でゲイン 60 となります。図 11-4 には、AD 逆バイアス電圧に対するリーク電流特性も示してあります。これらのゲイン特性は、R7110U シリーズに共通する特性です。

尚、アバランシェ増倍ゲインは、温度特性を有します。アバランシェ増倍ゲイン等の温度特性は、「11.3.8 温度特性」をご参照下さい。

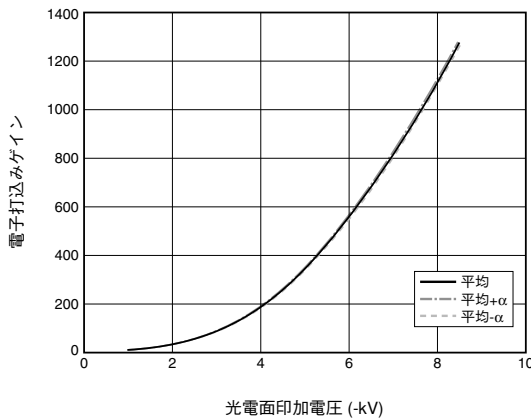


THBV3_1104JA

図 11-4 内蔵ADのアバランシェ増倍ゲイン及び、リーク電流特性

R7110U シリーズの電子打込みゲイン特性の個体差を図 11-5 及び表 11-2 に示します。HPD の電子打込みゲインは、電子の加速電圧、及び、AD 電子入射面の構造に依存しますが、一般的に AD の電子入射面が均質なため、同じ光電面印加電圧における電子打込みゲインの個体差は大変小さいものになっています。この点は、ダイノードを連ねた光電子増倍管との大きな差です。

一方、アバランシェ増倍ゲインは、同じAD逆バイアス電圧でありながら個体間に差がありますので注意が必要ですが、逆バイアス電圧を調整することにより、容易に同一ゲインに調整することが可能です。この場合光電子増倍管と違い、時間特性等への影響は殆どありません。



THBV3_1105JA

光電面印加電圧 (-kV)	平均電子打込みゲイン	標準偏差 (σ)
1	9.3	0.3
2	31.9	0.6
4	181.9	2.4
6	560.0	6.9
8	1118.3	9.9
8.5	1270.7	13.4

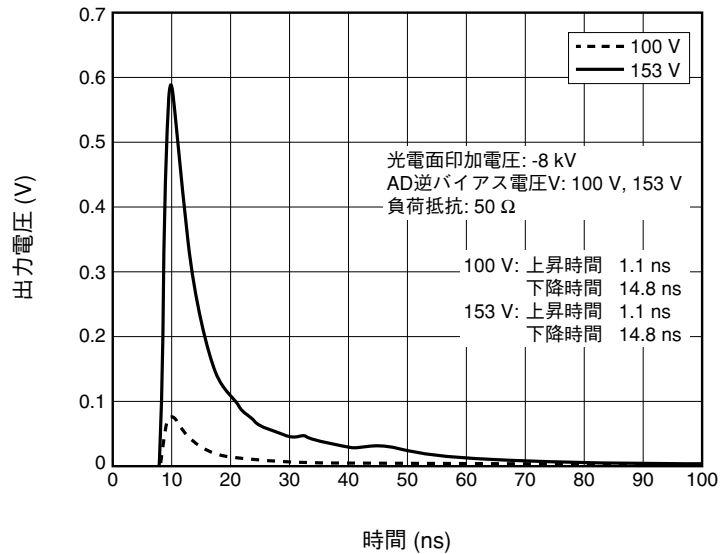
サンプル数: 19

表 11-2 数値データ

図 11-5 電子打込みゲイン特製の個体差

11.3.3 時間応答特性

図 11-6 に R7110U シリーズの出力波形を示します。PLP（半値幅約 60 ps、波長 400 nm の半導体パルスレーザー）光を入射して得られた出力波形です。R7110U シリーズの応答特性は、内蔵した AD の容量（約 140 pF）で決まり、AD が全空乏化する 60 V を越えて電圧を印加すれば、ほぼ一定になります。図 11-6 の AD 逆バイアス電圧 100 V および 153 V におけるピーク波高値の差は、各逆バイアス電圧におけるアバランシェ増倍ゲインの差を表しています。また、単一光電子パルスの走行時間揺らぎ(TTS)は R7110 シリーズの場合、FWHM で約 450 ps です。これらの時間応答特性は、R7110U シリーズに共通する特性です。

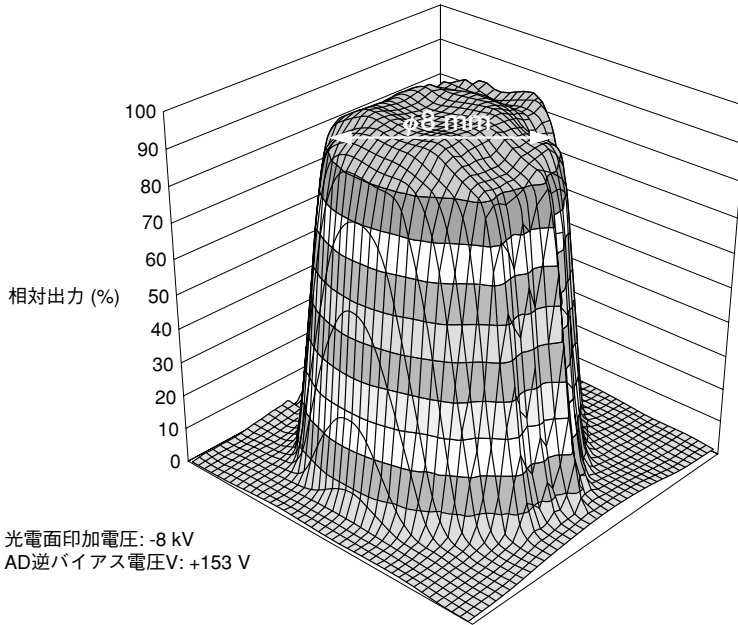


THBV3_1106JA

図 11-6 時間応答波形

11.3.4 ユニフォミティ

ユニフォミティとは、光電面の場所の違いによる感度の不均一性のことです。R7110U-07（有効光電面サイズが $\phi 8\text{ mm}$ タイプ）の代表的なアノードユニフォミティ特性を図11-7に示します。HPDのアノードユニフォミティは、光電面感度のユニフォミティとADのゲインのユニフォミティで決定されます。図より、HPDは非常に感度が均一であることがわかります。

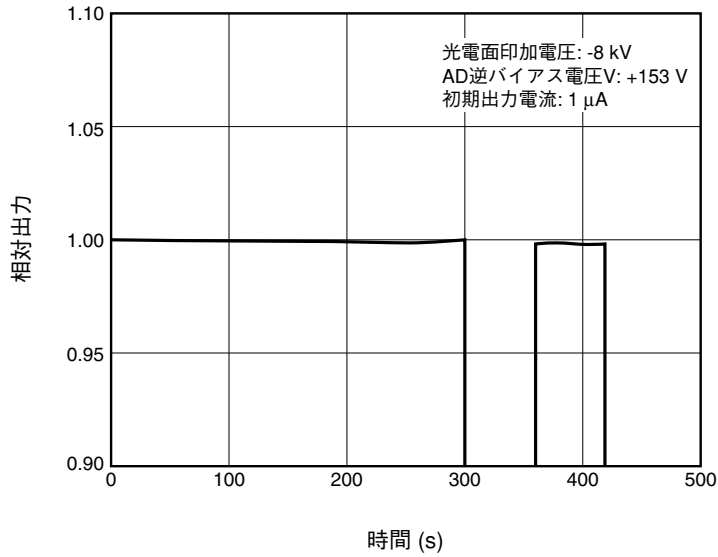


THBV3_1107JA

図11-7 ユニフォミティ

11.3.5 光ヒステリシス特性

入射光がステップ関数的に変化したとき、出力が同じステップ関数とならないことがあります。このような現象を光ヒステリシスと呼びます。R7110Uシリーズの光ヒステリシス特性を図11-8に示します。光電子増倍管の場合には、ダイノードによる増倍が繰り返される過程において光ヒステリシスが生じやすい傾向にあります。一方、HPDでは、光電面より放出された電子がADに入射するだけという単純な増倍過程を持つため極めて良好な光ヒステリシス特性を示します。

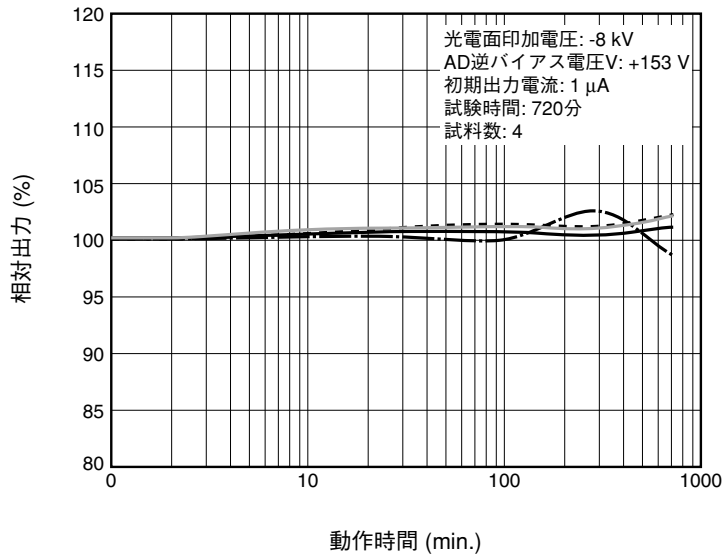


THBV3_1108JA

図 11-8 光ヒステリシス特性

11.3.6 ドリフト特性 (短期安定性)

R7110U シリーズの 12 時間 (720 分) にわたる短期的な出力変動を図 11-9 に示します。光電子増倍管の場合には、ドリフトの主な原因としてダイノードの劣化があげられますが、HPD はダイノードを持たないために、図のような良好なドリフト特性を示します。



THBV3_1109JA

図 11-9 ドリフト特性

11.3.7 磁気特性

HPDは、光電面から放出された光電子を直接半導体に打込むため、電子レンズにより光電子を半導体上に収束するだけのシンプルな電子軌道となっています。そのため、有効光電面領域はターゲットであるADの有効径（R7110Uシリーズでは $\phi 3\text{ mm}$ ）に制限されてしまいますが、ADの有効径と同径もしくはそれ以下のスポットで光電面に入った光に対しては、磁界の向きがHPDの管軸方向と同じである限り、磁界強度にかかわらず出力は理論上変化しないといった特長もあります。

11.3.8 温度特性

R7110UシリーズのADリーク電流の温度特性を図11-10に示します。各逆バイアス電圧において、ADのリーク電流は温度と共に増加する傾向にあります。ここで、後述するように（図11-11参照）、温度の上昇に伴ってアバランシェ増倍ゲインは減少する傾向ですが、それにもかかわらず、リーク電流は温度と共に増加しています。

図11-11には、アバランシェ増倍ゲインの温度特性を示します。 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲でのアバランシェ増倍ゲインの温度係数は、AD逆バイアス電圧138Vで約 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ と大きな変化がありませんが、AD逆バイアス電圧149V、153Vでは、それぞれ約 $-2.1\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 、 $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ と大きくなります。したがって、高いアバランシェ増倍ゲインを得つつ安定に動作させるためには、ADの温度制御が必要になります。また、ADへの逆バイアス電圧を一定にして使用する場合には、温度が下がることによってゲインが極端に上昇しますので、素子が破壊されないように注意が必要です。

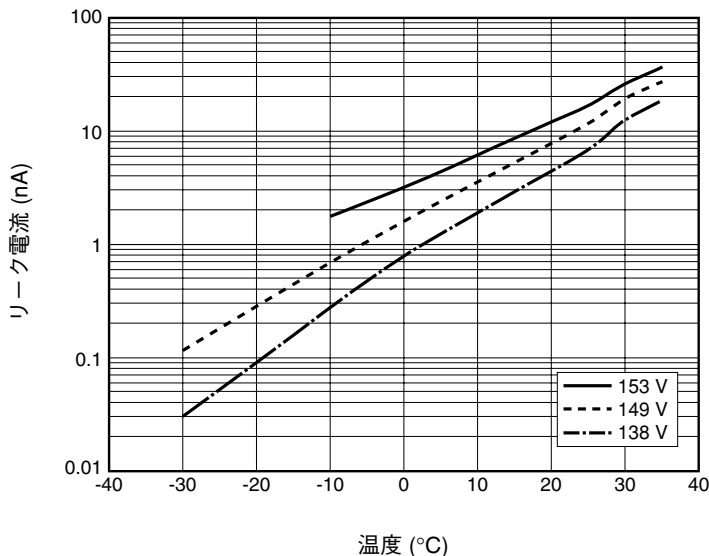


図 11-10 AD リーク電流の温度特性

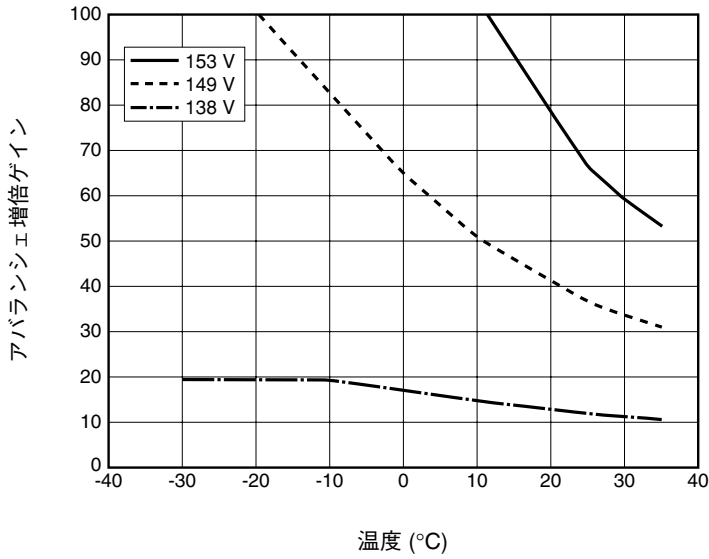


図 11-11 AD アバランシェ増倍ゲインの温度特性

THBV3_1111JA

11.4 接続例 (R7110U シリーズ)

11.4.1 直流信号を取り扱う場合 (トランスインピーダンスアンプとの接続を含めて)

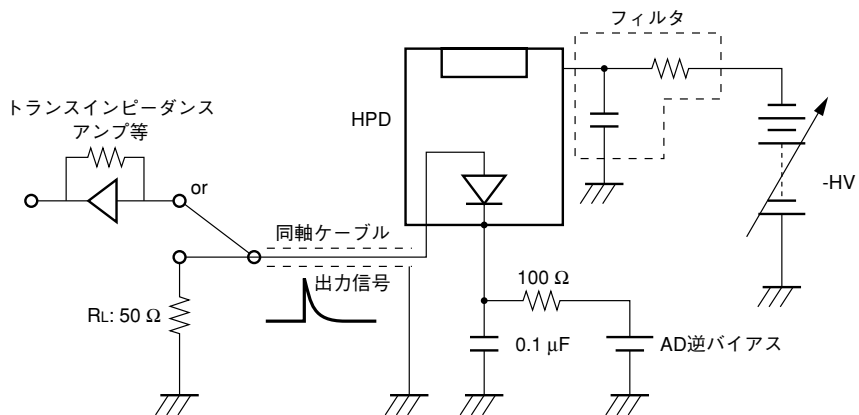


図 11-12 DC モード接続例

THBV3_1112JA

11.4.2 パルス信号を取り扱う場合（チャージアンプとの接続例）

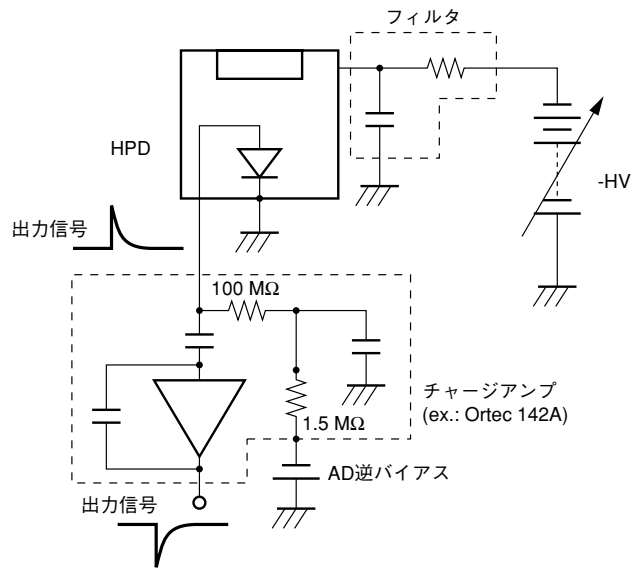


図 11-13 パルスモード接続例

THBV3_1113JA

第11章 参考文献

浜松ホトニクス（株）：Hybrid Photo Detector (HPD) R7110U シリーズ技術資料

第 12 章

電子増倍管とイオンディテクタ

電子増倍管は、軟X線、真空紫外線などの比較的波長の短い光や、電子、イオンなどの荷電粒子を検出する事ができます。また、イオンディテクタは、質量分析装置のイオン検出器^{1), 2), 3)}として、最適な検出ができるよう設計されています。

この章では、電子増倍管とイオンディテクタの構造と特性について解説します。

12.1 構造

電子増倍管は、基本的に光電子増倍管のダイノード部および陽極より構成されています。ダイノードの種類は、必要な特性や形状に応じて選択します（第4章 4.2.1 参照）。図 12-1 に一般的な電子増倍管の外観を示します。

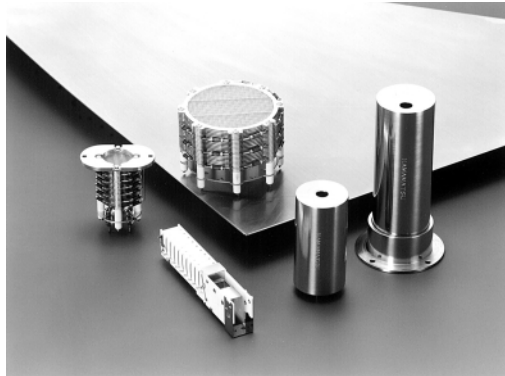


図 12-1 電子増倍管

電子増倍管は真空中で動作させ、検出すべき軟X線、真空紫外線、電子、イオンを第1ダイノードに入射させます。第1ダイノードではそれらの励起により、光電子あるいは二次電子が放出されます。放出された電子は第2ダイノード以後のダイノードで増倍され、二次電子群として陽極に達します。電子増倍管には、各ダイノードに適した電圧を供給する電圧分割用の抵抗（デバイダ抵抗）が内蔵されています。また、電子増倍管を固定するホルダーも組み込まれています。

イオンディテクタは、質量分析装置でのイオン検出器として使われます（第14章 14.10.1 参照）。構成は、電子増倍管と同様に、ダイノード部、陽極、電圧分割用抵抗、ホルダー、および、各種質量分析装置に必要なファラデーカップやコンバージョンダイノードなどを内蔵しています。ダイノードの種類は、ラインフォーカス型が使われています（第4章 4.2.1 参照）。図 12-2 にコンバージョンダイノードを内蔵したイオンディテクタの外観を示します。

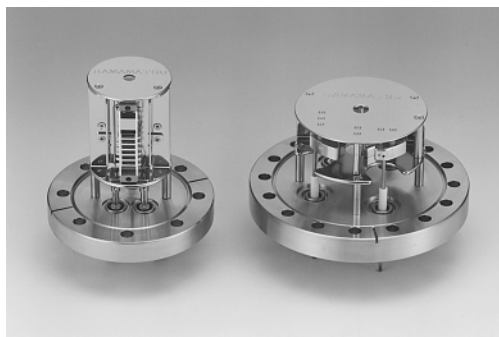


図 12-2 コンバージョンダイノード付きイオンディテクタ

質量分析装置の質量分離部を通過したイオンは、高電圧が供給されたコンバージョンダイノードに入射します。コンバージョンダイノードでは、イオン入射により電子が放出されます。放出された電子は第1ダイノードに入射し、二次電子面より二次電子を放出させます。放出された二次電子はダイノードで増倍され、二次電子群として陽極に達します。イオンディテクタの構造は、これらの変換、増倍が最適化されています。図12-3にコンバージョンダイノード付きイオンディテクタにおけるイオン検出のメカニズムを示します。

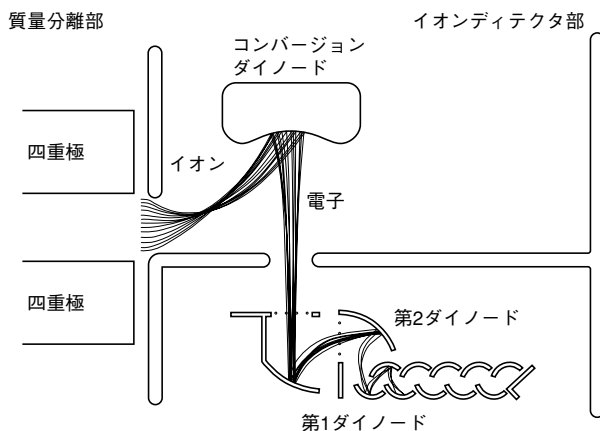


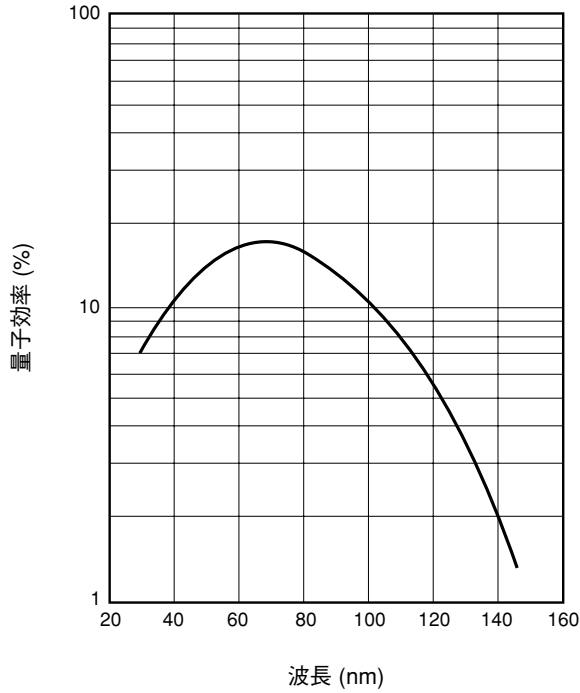
図 12-3 コンバージョンダイノード付きイオンディテクタにおけるイオン検出

電子増倍管とイオンディテクタのダイノードの二次電子面は、ベリリウムを数%含有した銅-ベリリウム電極の表面に特殊な酸化処理を施して作られます。この二次電子面は、軟X線、真空紫外線、電子、イオンの入射により、二次電子を放出します。また、空气中に放置しても特性の劣化が極めて少ない酸化アルミニウムを二次電子面としたダイノードも使われています。

12.2 特性

12.2.1 軟X線、真空紫外線、電子、イオンに対する感度特性

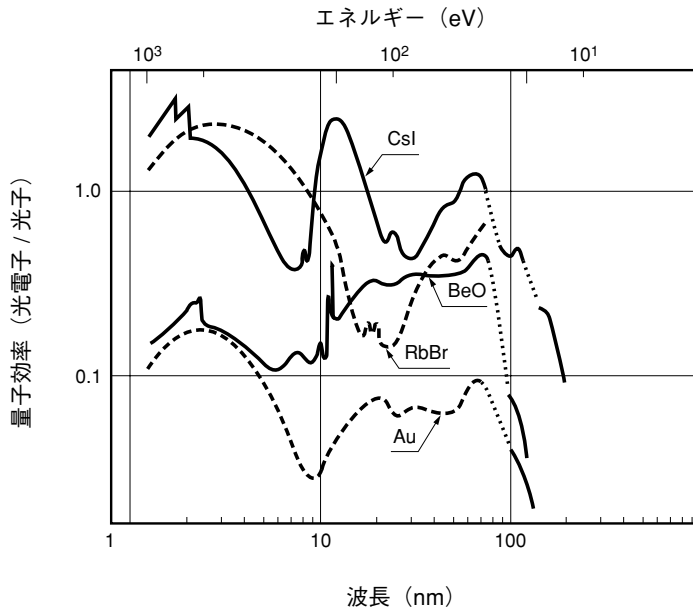
一般的な電子増倍管の第1ダイノードは酸化ベリリウムであるため、軟X線から300 nm 辺りまでの紫外線に感度を有します。そのため、 MgF_2 窓の遮断波長(約115 nm)より短い波長での測定では電子増倍管は有効な検出器となります(第4章 4.1 参照)。図 12-4 に酸化ベリリウムの30 nm ~ 140 nm での分光感度特性を示します。



THBV3_1204JA

図12-4 酸化ベリリウムの分光感度特性

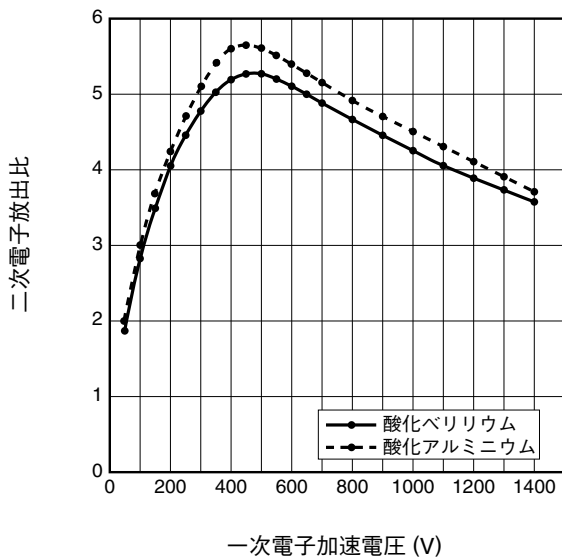
また、電子増倍管の第1ダイノードを使用波長や使用状態によってCsI、CuI、KCl、MgF₂などのアルカリハライド物質を蒸着した物に置き換える事により、さまざまな分光感度特性を得る事も可能です。ただし、これらの物質には潮解性があるため、取り扱いには注意が必要です。図12-5に、CsI、BeO、RbBr、Auの分光感度特性（参考値）を示します。



THBV3_1205JA

図12-5 各種光電面の分光感度特性（参考値）

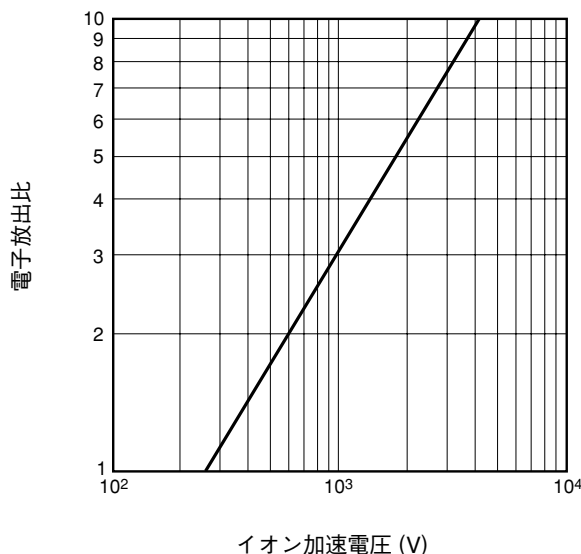
電子増倍管の第1ダイノードは、オージェ電子、二次電子、反射電子などの、エネルギーを持った電子にも感度があります（第2章2.3参照）。図12-6に、酸化ベリリウムと酸化アルミニウムの一次電子加速電圧対二次電子放出比の関係を示します。一次電子加速電圧が約400V～500Vの時、二次電子放出比が最大になります。



THBV3_1206JA

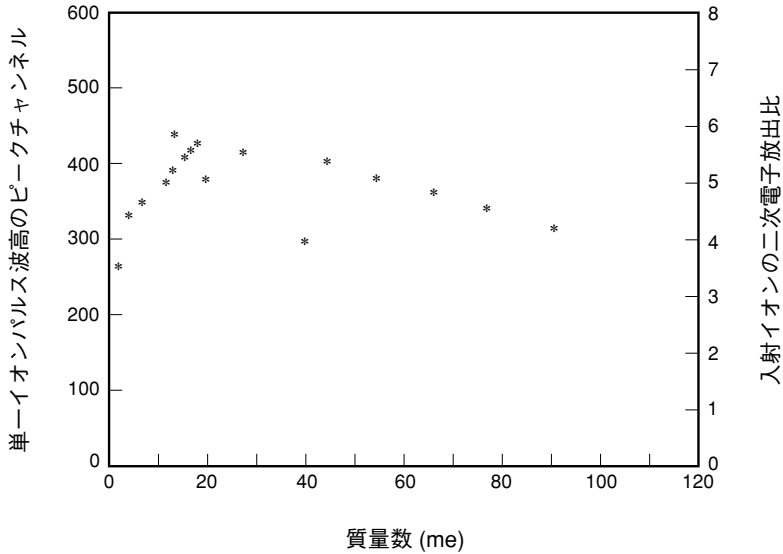
図12-6 一次電子加速電圧 対 二次電子放出比の関係

電子増倍管の第1ダイノードは、イオンにも感度があります。第1ダイノードの二次電子面の状態にもよりますが、一般的に入射イオン1個に対して複数個の電子が放出されます。また、放出される電子の数はイオンの分子量 (m/z)⁵⁾、イオンの加速電圧にも影響されます。図12-7に窒素イオンでの加速電圧対電子放出比の関係を示します。また、図12-8に加速電圧2000Vでの各種イオンの電子放出比を示します。



THBV3_1207JA

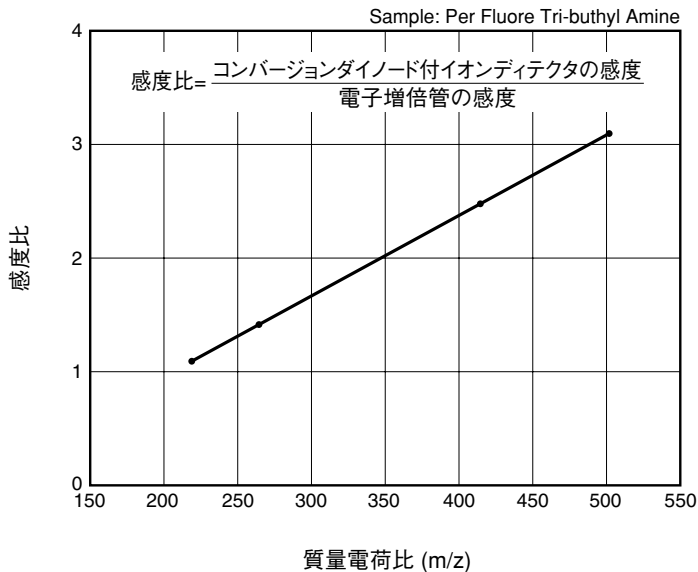
図12-7 窒素イオンによる加速電圧 対 電子放出比の関係



THEV3_1208JA

図 12-8 加速電圧 2000 V での各種イオンの電子放出比

一般的なイオンディテクタでは、第1ダイノードの前に高電圧が供給されたコンバージョンダイノードが配置されています。コンバージョンダイノードは電子増倍管の第1ダイノードと同様に、イオンを電子に変換する役目を持っています。イオンを電子に変換する効率は、そのイオンが変換面に入射する速度に比例しています⁴⁾。したがってコンバージョンダイノードは、イオンの速度を上げ、電子への変換効率を高める効果があります。図12-9に一般的な電子増倍管とコンバージョンダイノードを持ったイオンディテクタの感度の差を示します。コンバージョンダイノードの効果は、質量電荷比(m/z)⁵⁾の大きな領域で顕著に表れていきます。



THEV3_1209JA

図 12-9 一般的な電子増倍管とコンバージョンダイノード付イオンディテクタの感度比

12.2.2 ゲイン特性

電子増倍管のゲインは原理的に、光電子増倍管と同様に以下の式で表されます。

$$\text{ゲイン}(\mu) = A \cdot E_{bb}^{kn} \quad \dots\dots\dots \text{(式 12-1)}$$

E_{bb} : 供給電圧

k : 電極の構造・材質で決まる数値

n : ダイノード段数

この式より、ゲイン μ は供給電圧の kn 乗に比例する事がわかります。図12-10に代表的な電子増倍管の供給電圧対ゲインの関係を示します。

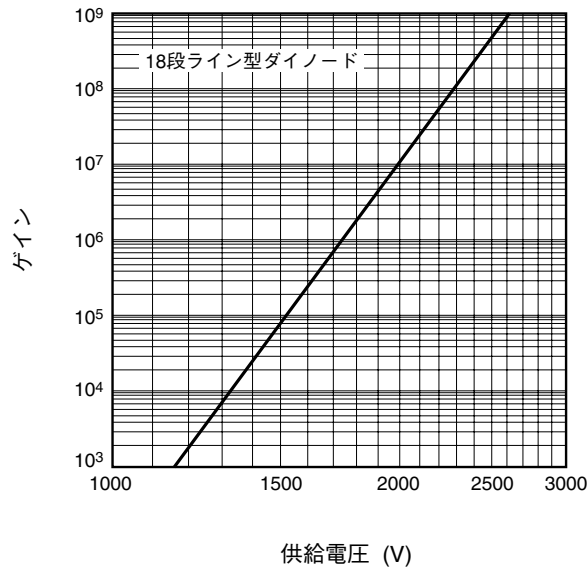


図 12-10 代表的な電子増倍管の供給電圧対ゲイン

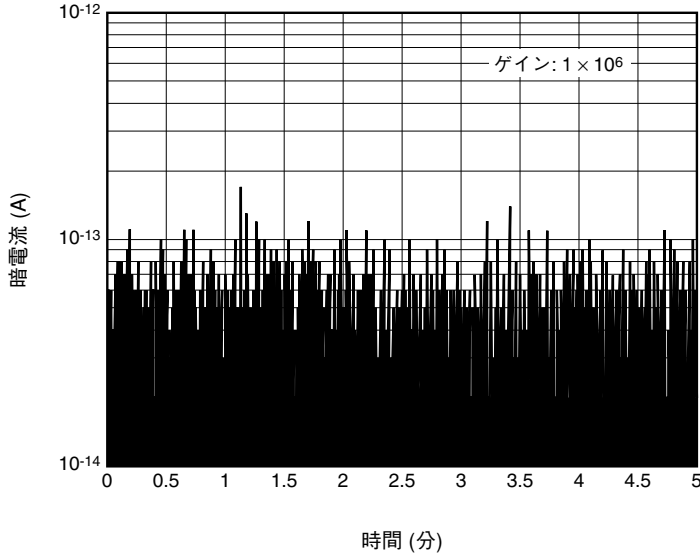
THBV3_1210JA

12.2.3 暗電流/ノイズ特性

一般的な電子増倍管やイオンディテクタのダイノードの二次電子面には、酸化ベリリウムや酸化アルミニウムが使われています。これらの物質は仕事関数が大きいため、暗電流やノイズは非常に小さくなっています。暗電流やノイズの要因としては、以下の3種類が考えられます。

- ①ダイノード二次電子面の熱電子放出による電流
- ②ダイノード保持材などの漏洩電流
- ③ダイノードの電界放出電子による電流

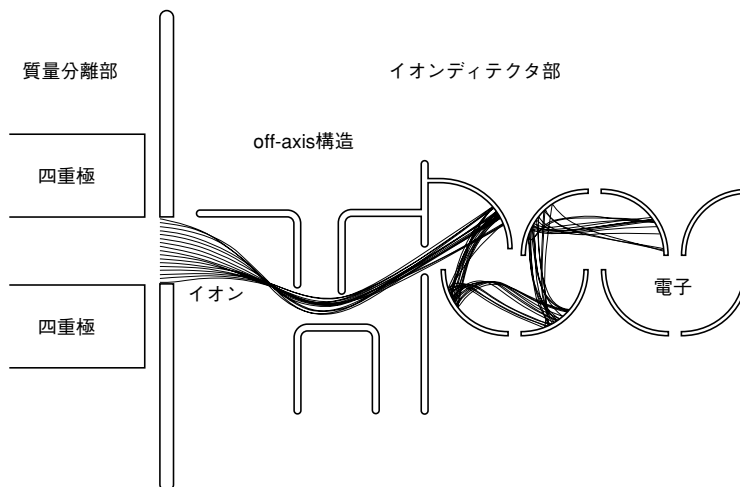
一般的な電子増倍管やイオンディテクタでは、ゲイン 10^6 を得る供給電圧での暗電流は1ピコアンペア以下になります。図12-11に暗電流やノイズの測定結果を示します。



THBV3_1211JA

図 12-11 暗電流 / ノイズ測定結果

質量分析装置のイオン源はサンプルのイオン化を行うと同時に、紫外線やX線などのノイズ成分の生成も行ってしまう。イオンディテクタにはサンプルイオンの他に、これらのノイズ成分も入射し増倍されてしまいます。これらのノイズは本来、イオンディテクタの持つノイズではありませんが、一般的にはイオンディテクタのノイズとして取り扱われます。このイオン源由来のノイズを低減するため、イオンディテクタは第1ダイノードまたはコンバージョンダイノードをイオン入射口からずらして配置し、特殊電極が作り出す電界レンズを使ってサンプルイオンのみを入射する構造 (off-axis 構造) を持っています。図12-12に、off-axis 構造をもったイオンディテクタにおけるイオン検出メカニズムを示します。また、図12-13にoff-axis 構造を持ったイオンディテクタを質量分析装置に取り付けて測定したノイズを示します。イオンが存在しない質量電荷比(m/z)⁹⁾の信号がノイズになり、その値はイオンディテクタの持つ本来のノイズと同程度になっています。



THBV3_1212JA

図 12-12 off-axis 構造をもったイオンディテクタにおけるイオン検出

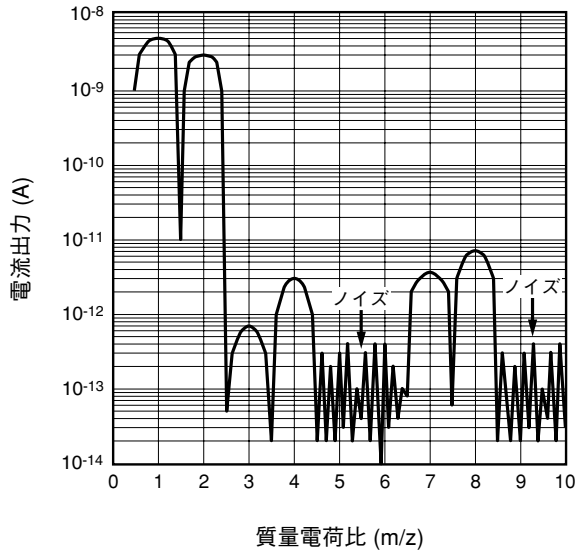


図 12-13 off-axis 構造を持ったイオンディテクタにおけるイオン源由来のノイズ

THBV3_1213JA

電子増倍管やイオンディテクタは真空中で使われるため、そのノイズは圧力の影響を受けます。一般的に、圧力が低い場合（例えば 10^{-5} Pa）はノイズが少なく、圧力が高くなるにつれてノイズは増加していきます。図 12-14 に、一般的な電子増倍管やイオンディテクタの圧力とノイズの関係を示します。

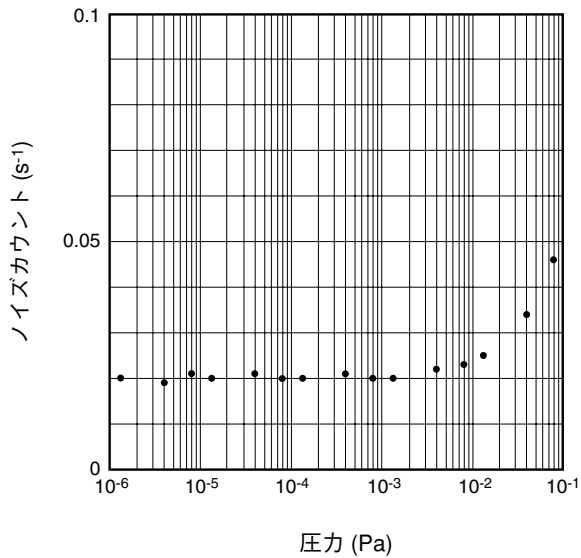
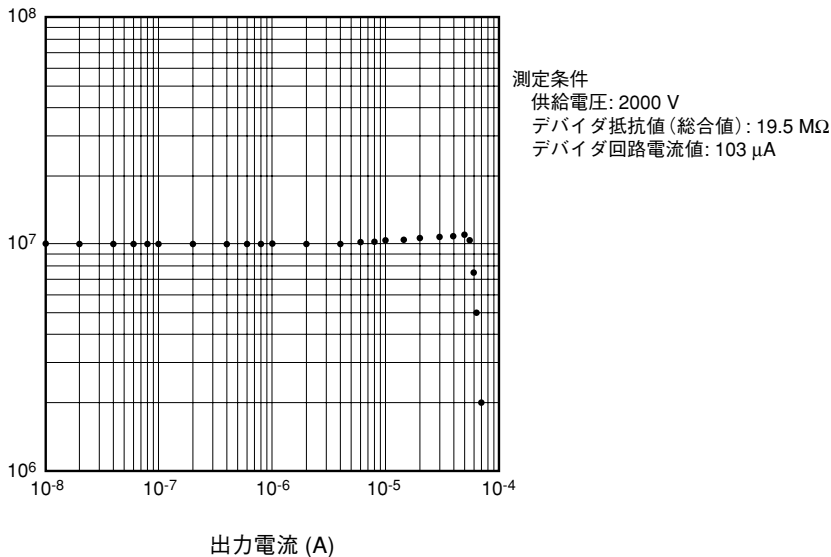


図 12-14 一般的な電子増倍管の圧力とノイズの関係

THBV3_1214JA

12.2.4 リニアリティ特性

一般的な電子増倍管やイオンディテクタのダイノード間には、電圧分割用の抵抗が内蔵されています。内蔵されている抵抗の抵抗値は1個1 M Ω 程度で、総合抵抗値としては20 M Ω 程度になります。そのため、リニアリティの得られる出力電流は、光電子増倍管と同様にこの電圧分割用の抵抗に流れる電流で決まります（第5章 5.1参照）。図12-15に一般的な電子増倍管やイオンディテクタの直流動作時における出力電流のリニアリティ特性を示します。



THBV3_1215JA

図 12-15 一般的な電子増倍管の直流動作でのリニアリティ特性

この曲線は、電圧分割用の抵抗に流れる電流に依存している典型的なパターンです。そのため、リニアリティのある範囲を広げるには抵抗値を小さくする事で対応できます。また、出力電流が大きい時に発生するゲインの増加を抑えるためには、最終段—グランド間の抵抗値を小さくする事で対応できます。

一般的にパルス計数法でのリニアリティ特性は、電子増倍管やイオンディテクタの高速応答性、デバイダ回路電流などにより決まります（第6章 6.2参照）。高い計数率を得る為には、高速応答性の優れたラインフォーカス型のダイノードと電圧分割用抵抗の抵抗値を低くしたタイプが必要になります。

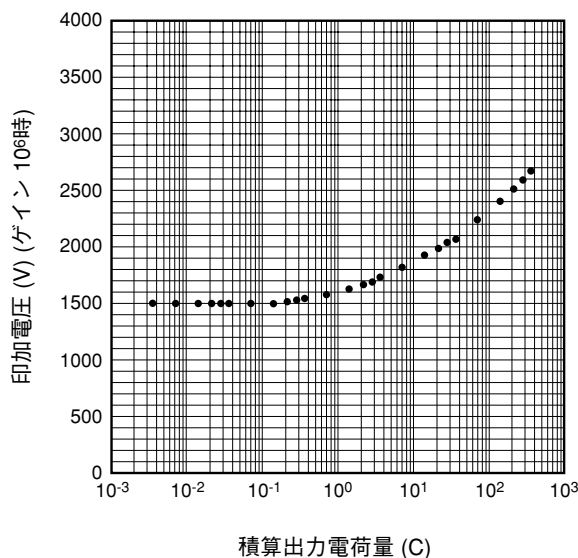
12.2.5 寿命特性

一般的な電子増倍管やイオンディテクタの寿命特性は、動作ゲイン、出力電流、動作圧力により影響を受けます。

寿命特性の一般的なメカニズムとしては、以下の2項目があげられます。

- ①イオン入射による第1ダイノードやコンバージョンダイノードの感度劣化
- ②ダイノード二次電子面への汚れの吸着

図12-16に一般的な電子増倍管やイオンディテクタの寿命特性を示します。図はイオンを入射した場合の寿命特性で、入射イオン量、出力電流量を一定に保ち、設定したゲイン（ゲイン 10^6 ）を得るために必要な供給電圧の変化を測定した結果です。



THBV3_1216JA

図 12-16 一般的な電子増倍管やイオンディテクタの寿命特性

第12章 参考文献

- 1) 荒木 峻：質量分析法 第3版 現代科学シリーズ2. 東京化学同人
- 2) 土屋正彦 大橋 守 上野民夫：質量分析法の新展開 現代化学増刊号15. 東京化学同人
- 3) 上野民夫 平山和雄 原田健一：バイオドジカルマススペクトロメトリー 現代化学増刊号31. 東京化学同人
- 4) 明石知子 高山光男 豊田岐聡 橋本 豊 平岡賢三 平山和雄：マススペクトロメトリーってなあに 国際文献印刷社
- 5) 奥野和彦 高山光男 中田尚男 平岡賢三： マススペクトロメトリー関係用語集 国際文献印刷社

メ 毛

第 13 章

環境性と信頼性

光電子増倍管は、周囲温度・湿度・磁界など周囲環境により、感度・暗電流などの特性が影響されます。そのため、光電子増倍管の性能を十分に発揮させるためには、周囲環境が光電子増倍管に及ぼす影響を知り対応する必要があります。また、安定に使用させるために、経時変化特性などの信頼性についても述べます。

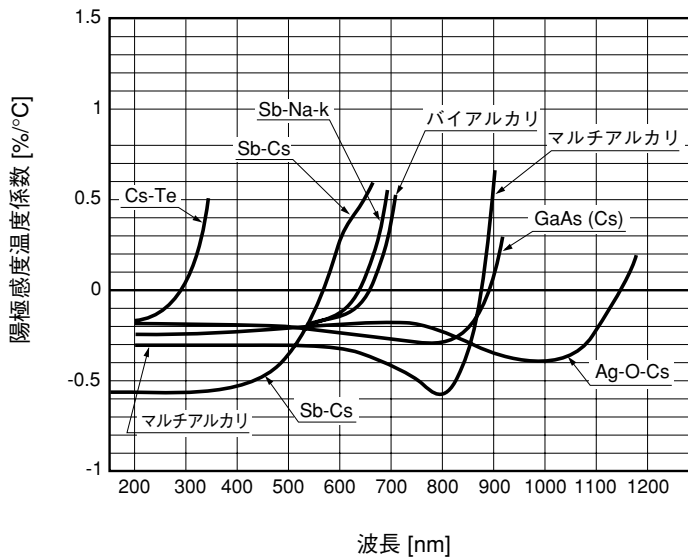
13.1 周囲温度の影響

13.1.1 温度特性

光電子増倍管は、通常の電子部品(抵抗、コンデンサなど)に比べて周囲温度の影響を受け易いため、高精度の計測をする場合には温度コントロールや比較測光法などを行い、周囲温度の影響を低減して使用する必要があります。また、温度制御時においては、光電子増倍管内部は真空のため管内への熱伝導が悪く、周囲温度と同一になり特性が安定するまでには1時間以上の時間が必要です。

(1) 感度

陽極感度の温度特性は、陰極感度(光電面)とゲイン(ダイノード)のそれに分けられます。陰極感度の温度特性は、波長依存性があり光電面の種類によっても異なりますが、一般的に長波長側の限界波長付近で温度係数がマイナスからプラスに変化し大きな値になります。またゲインの温度特性には、波長依存性、電圧依存性はほとんどありません。図13-1に代表的な光電子増倍管の波長対温度係数を示します。

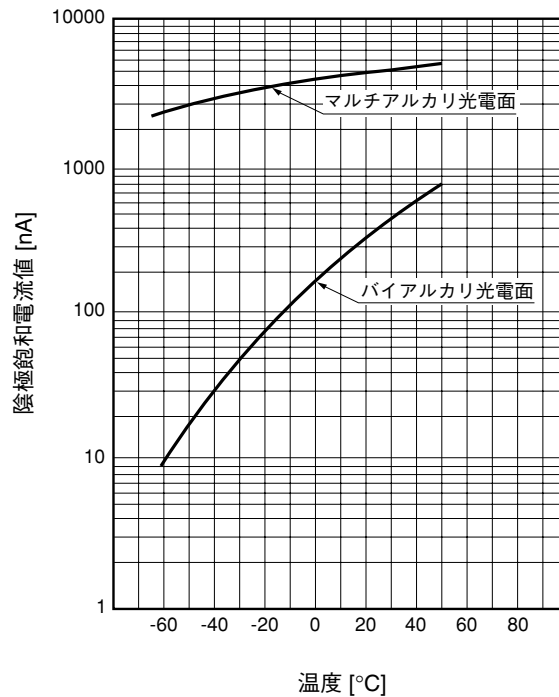


THBV3_1301JA

図13-1 光電子増倍管の光電面の種類による温度係数

透過型光電面の光電子増倍管を低温で使用する場合には、光電面の面抵抗の増加により陰極電流の飽和現象が起こり入射光量に対する直線性が悪くなります。この現象は光電面の種類により差がありますが、一部のバイアルカリ光電面で特に顕著に現れますので注意が必要です。

図13-2に透過型光電面におけるバイアルカリとマルチアルカリの温度対陰極飽和電流の例を示します。

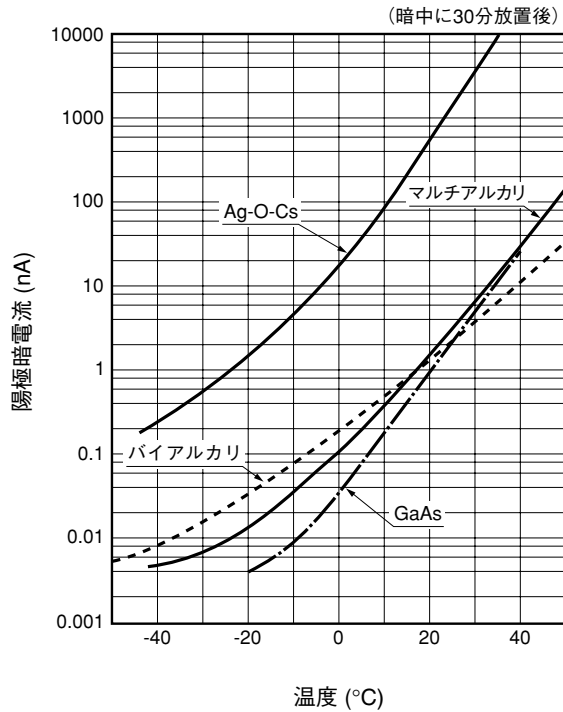


THBV3_1302JA

図 13-2 透過型光電面の温度と陰極飽和電流

(2) 暗電流

光電面は、光電子が放出され易いようにエネルギーギャップと電子親和力の小さな物質からできているために、暗電流は周囲温度に非常に敏感です。このため、微弱な光計測では、特に注意が必要です。また、この性質を利用し、赤感度の高い光電子増倍管は冷却して暗電流を下げるによりSN比を改善して計測する事が可能です。また逆に高温で使用すると、SN比が悪くなることから、特殊な光電面(Sb-Na-K)などの使用を考える必要もあります。図13-3に代表的な光電面をもつ光電子増倍管の温度対暗電流の特性を示します。また、暗電流についての詳細は第4章 4.3.6を参照して下さい。



THBV3_1303JA

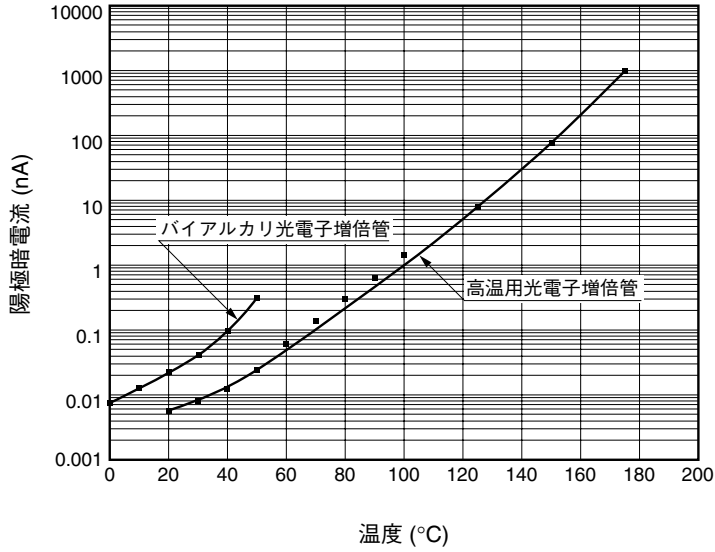
図 13-3 陽極暗電流の温度特性

13.1.2 高温用光電子増倍管

一般的な光電子増倍管は動作保証温度が 50 °C ですが、175 °C の高温に耐えることができる光電子増倍管もあります。

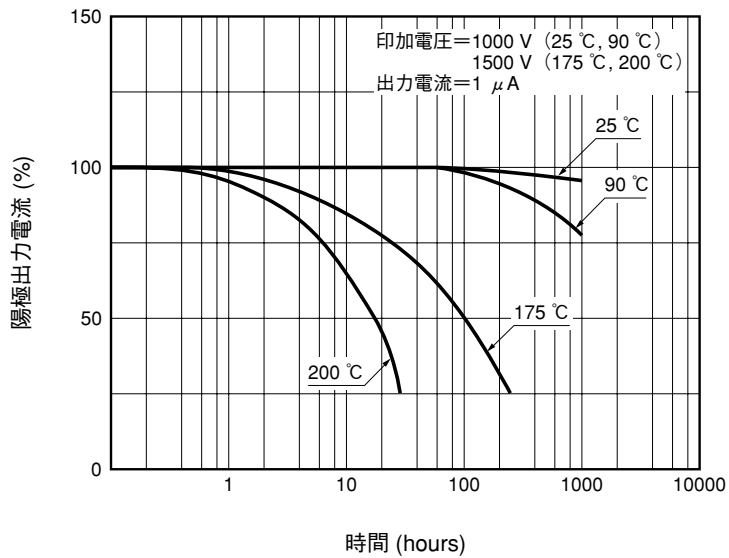
特に高温用低暗電流バイアルカリ光電面が用いられ、増倍部には銅ベリリウム (CuBe) ダイノードを用い、高温中での動作を考慮した設計がされています。

以下に特性の例として図 13-4 陽極暗電流の温度特性、図 13-5 に各温度での陽極電流の経時変化特性、放射線源を用いた特性として図 13-6 に温度に対するゲインおよびエネルギー分解能 (Pulse Height Resolution: P.H.R.) 特性、図 13-7 に温度を変えた時のプラトー特性の例を示します。



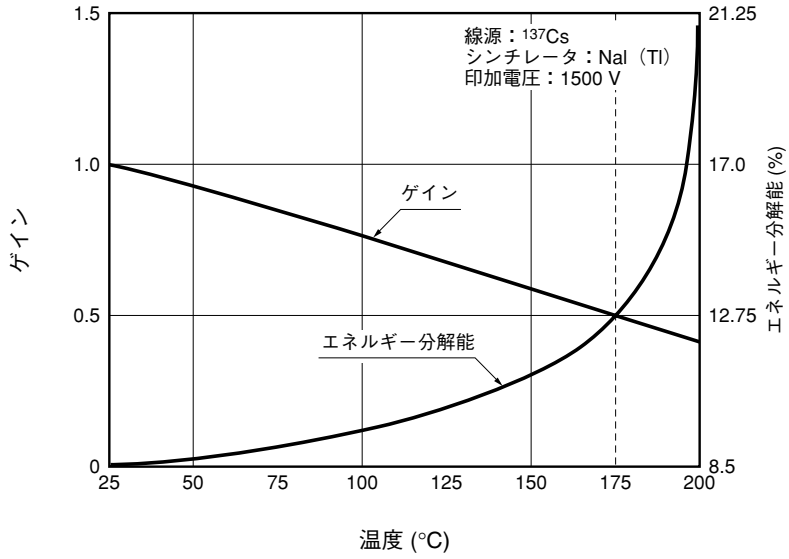
THBV3_1304JA

図 13-4 陽極暗電流の温度特性



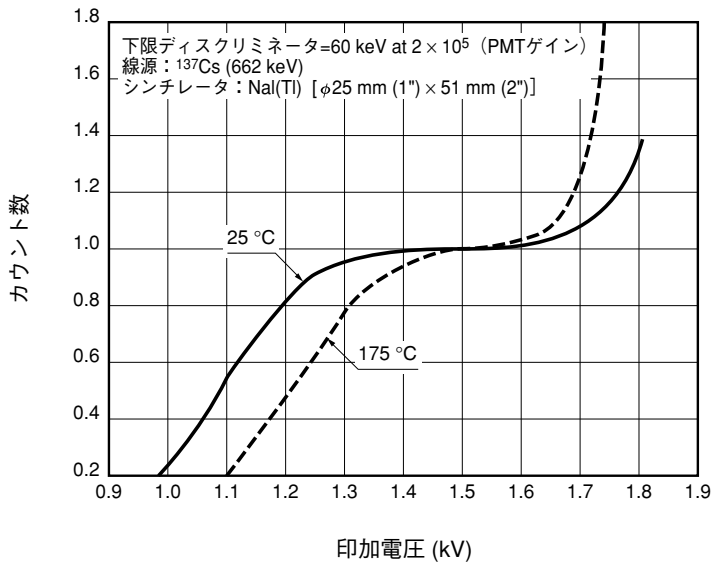
THBV3_1305JA

図 13-5 各温度での陽極電流の経時変化特性



THBV3_1306JA

図 13-6 温度に対するゲインおよびエネルギー分解能特性



THBV3_1307JA

図 13-7 温度に対するプラトー特性の変化

13.1.3 保存温度および冷却時の注意

光電子増倍管の感度は室温中で放置しても多少変化します。これは光電面やダイノード面を活性化しているアルカリの移動によるものと考えられます。そのために高温状態で放置すると、感度変化が加速されるので、保管中は高温にならないような場所で常温での保存をお奨めします。

13.1.1(2)暗電流の項で説明したように、赤感度の高いマルチアルカリ, GaAs(Cs), InGaAs, Ag-O-Csの光電面の光電子増倍管では冷却して使用する事が多くあります。この場合、ガラスとベース、接着剤(エポキシ樹脂)の熱膨張率の違いによりガラスが破損する場合があるため以下の注意が必要です。

- ・-30℃以下に冷却する場合はプラスチックベースタイプの物は使用しないでください。
- ・PMTのピンに無理な力が加わらないようにするため、基板などにデバイダを組み、なるべく細かく柔らかい線でソケットに接続する様にしてください。
- ・急激な温度変化を避けてください。

13.2 湿度の影響

13.2.1 動作時湿度

高電圧でしかも $\mu\text{A} \sim \text{pA}$ オーダの微小電流を扱うために、ピン間のリーク電流が問題になることがあります。このリーク電流の変化は湿度により数桁も増加する事があるため、一般的に60%以下の湿度で使用することをお奨めします。

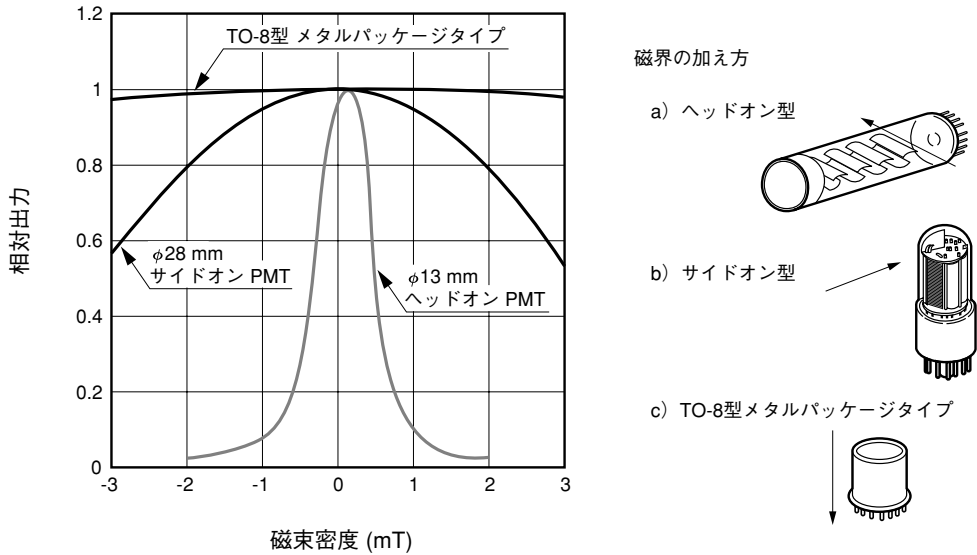
13.2.2 保存時湿度

高湿度のもとに長時間放置すると、ステムガラス表面のリーク電流の増加、ピン表面に錆が発生することによる接触不良、また、UVガラスでは失透による透過率の低下などが生じることがあるため、乾燥した場所に保存する必要があります。また、表面の汚れがリーク電流の増加や錆の発生の原因となりますので、ガラスステム部、ピンやプラスチックベースの陽極ピン回りは、手や指などで直接触れないでください。万一汚れた場合には、無水アルコールなどを使用して洗浄する必要があります。

13.3 周囲磁界の影響

13.3.1 磁気特性

光電子増倍管は真空中を低エネルギー電子が長い距離を走行するため、地磁気程度のほんのわずかな磁界でも電子軌道に影響を与え陽極感度が変化します。感度変化の一番の原因は磁界により電子軌道が変動し光電子が第一ダイノードに収束されなくなることによるためです。そのため光電面と第一ダイノード間の距離が長いもの、光電面に対し第一ダイノードの開口部の小さなものほど磁界の影響を受けやすい構造といえます。一般に大口径になるほど光電面と第一ダイノード間の距離が長くなります。ヘッドオン型光電子増倍管では一部を除いて陽極感度が50%に落ちるのは磁束密度がおよそ数十分の1mT～数mTであり、磁界の方向では光電面に水平な方向(X軸)が最も影響を受けやすくなります。一方サイドオン型光電子増倍管では光電面と第一ダイノードの距離が短いため変動は少なく、感度が50%落ちになるのは ϕ 28mm (1-1/8インチ)型で約3.5mT程度です。メタルパッケージタイプ光電子増倍管R7400シリーズは光電面と第一ダイノード間の距離が短く、磁界に対し優れた特性を有しています。代表的な製品の特性を図13-8に示します。また印加電圧が高い方が磁界の影響をより受けにくくなります。



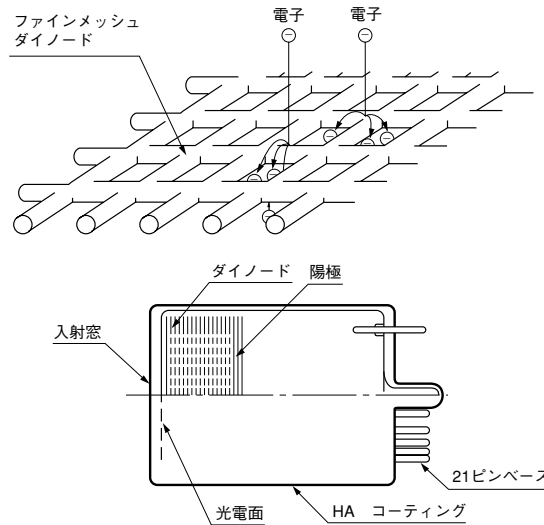
THBV3_1308JA

図 13-8 光電子増倍管の磁気特性

図13-8のように光電子増倍管は磁界に敏感なため、磁界の存在しない雰囲気で使用することが望ましく、特に電源トランスや磁石などと接近して使用するのを避けるべきです。磁界が避けられない時は光電子増倍管に磁気シールドを施す必要がありますが、シールド効果および磁気シールドケースの使用方法については、第5章 5.4に具体的例を上げて記述してありますので参照してください。

13.3.2 高磁界用光電子増倍管

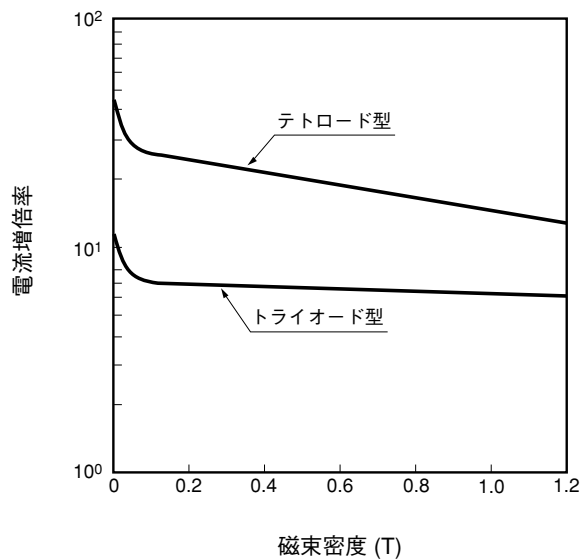
今まで述べた様に通常の光電子増倍管では10 mTの磁界中で少なくとも1桁以上感度が低下します。しかし高エネルギー物理学の分野では1 T以上の磁場中で動作可能な光電子増倍管が求められています。そのために開発されたものとしてファインメッシュダイノード構造の製品があります。それらにはダイノードの段数が1段(トライオード)、2段(テトロード)のもの、高増倍率特性を有する多段(19段)の光電子増倍管があります¹⁾。これらの構造を図13-9に示します。また図13-10にトライオード型とテトロード型光電子増倍管の垂直方向(管軸方向)の磁界に対する陽極増倍率特性と、19段型光電子増倍管の磁界角度と陽極相対出力特性を示します。



THBV3_1309JA

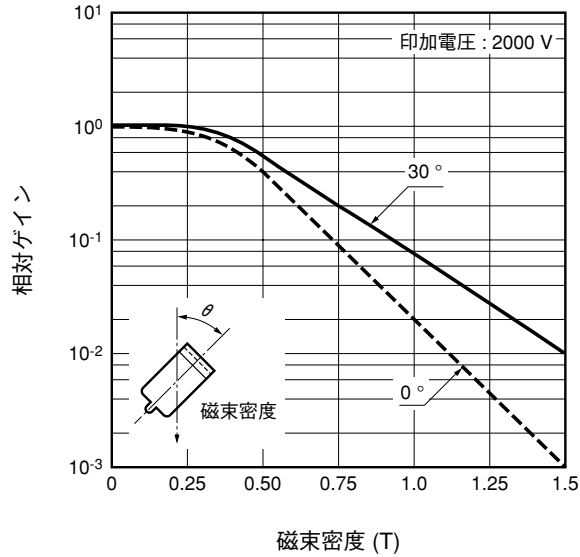
図13-9 高磁界用光電子増倍管の構造

トライオード型、テトロード型光電子増倍管の磁気特性 (管軸)



THBV3_1310JAa

図13-10 高磁界用光電子増倍管の磁気特性 (1)



THBV3_1310JAb

図 13-10 高磁界用光電子増倍管の磁気特性 (2)

13.3.3 磁化

一般のダイノード基板は磁性体であるニッケルで作られている製品もあり、リード線、電極などにも磁性体の金属が使われています。地磁気程度の低磁場では問題はありませんが、磁界が強くなり初透磁率範囲を越えますと、磁場がなくなっても磁化されたままの状態(残留磁化)になります。そのため磁界が加わる前後でゲインが変わってしまいます。磁化されてしまった時には、光電子増倍管に交流磁界を加え、これをゆっくりと減衰させることで磁気を取り除くことができます。

13.3.4 非磁性材製光電子増倍管

高磁界で使用される場合や、上記の管球の磁化を嫌う用途には非磁性材製の光電子増倍管が要求される場合があります。当社ではこの場合、ダイノード材料に非磁性体材料を使うことによってほとんど非磁性体で作ることができます。しかし、それでもステムピンやハーメチック部など一部分はやむを得ず磁性体が使われます。

13.4 振動・衝撃

耐振性、耐衝撃性をいう場合、2つの状態が考えられます。第1は輸送途中など非動作状態に対するもの、第2は実際の装置に組込まれ動作状態での場合です。衛星に搭載したり、地質検層を行うなどの特殊用途を除き、後者は前者よりも振動・衝撃とも一般的に弱いと考えられます。

13.4.1 非動作時の耐振・耐衝撃性

光電子増倍管は一般に数十 m/s^2 の振動や約 1000 m/s^2 の衝撃に耐えることが出来るように設計されています。しかし、過度の振動・衝撃が加わると特性の変化やバルブの破損を引き起こすことがあります。

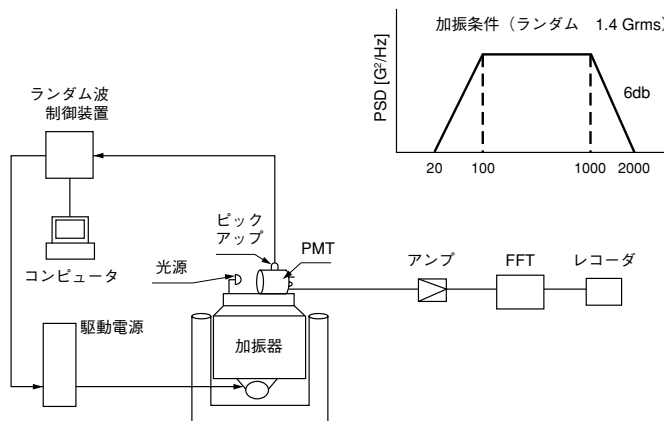
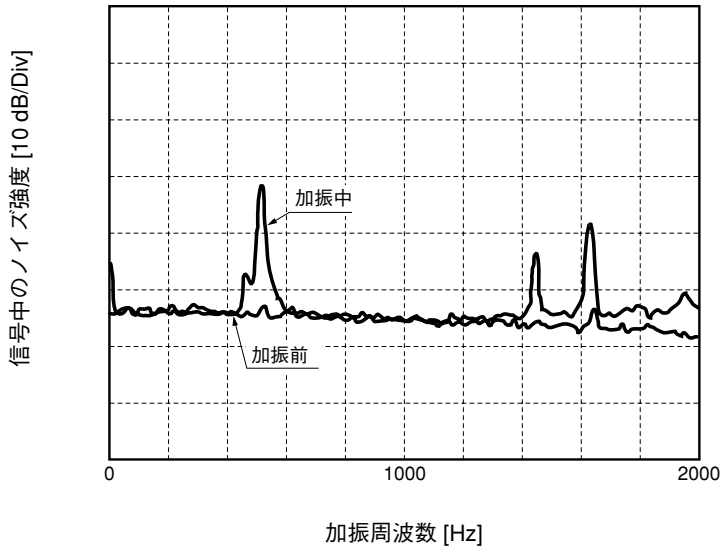
一般に形状の小さいもの、重量が軽いもの、全長が短いものは振動・衝撃に対して強いといえますが、取り扱いには十分ご注意ください。下記に、大きさによる一般的製品の耐振動性および耐衝撃性の最大値を示します。

種 類	耐振動 (m/s^2)	耐衝撃 (m/s^2)
1/2インチサイドオン型光電子増倍管	150 (10 Hz ~ 2000 Hz)	2000 (6 mS)
1-1/8インチサイドオン型光電子増倍管	100 (10 Hz ~ 500 Hz)	1000 (11 mS)
メタルパッケージTO-8型光電子増倍管	100 (10 Hz ~ 500 Hz)	1000 (11 mS)
1/2インチヘッドオン型光電子増倍管	100 (10 Hz ~ 500 Hz)	1000 (11 mS)
1-1/8インチヘッドオン型光電子増倍管	50 (10 Hz ~ 500 Hz)	1000 (11 mS)
2インチヘッドオン型光電子増倍管	50 (10 Hz ~ 500 Hz)	750 (11 mS)
3インチヘッドオン型光電子増倍管	50 (10 Hz ~ 500 Hz)	750 (11 mS)

光電子増倍管はガラス容器でできているので、直接の衝撃には弱く、特に石英窓を持つものは、段つなぎと呼ばれる加工がなされている側管部が衝撃に特に弱く割れやすいため、取り扱いには十分注意する必要があります。また液体シンチレーションカウンティング用によく使われるものの中には面板が約0.5 mm厚と非常に薄く、わずかな衝撃でも破損しやすいものもあります。また真空管は破損(爆縮)するとき、爆発したときのように破片が飛び散ることがありますので、特に ϕ 204 mm (8 インチ) 以上の大型の光電子増倍管を取り扱うときは注意が必要です。

13.4.2 動作状態での耐振動・耐衝撃性（共振）

光電子増倍管は特別なものを除いて、動作中に振動や衝撃のかかることを前提として作られていません。動作中に振動・衝撃を受けると、信号の変動、マイクロフォニックノイズの増加などの問題が発生することがありますので、管球の固定方法や配置には注意が必要です。また、ある周波数で共振点を持つことがあり、その周波数は製品および管球毎にばらつきがあり一定ではありません。この共振点で加振されますと、いっそう上記の不具合現象が増大され、壊れやすくなります。図13-11に振動を加えたときの信号出力の周波数スペクトラムの変化の様子とその測定方法の一例を示します。



THBV3_1311JA

図13-11 振動を加えた時の信号出力の共振ノイズ

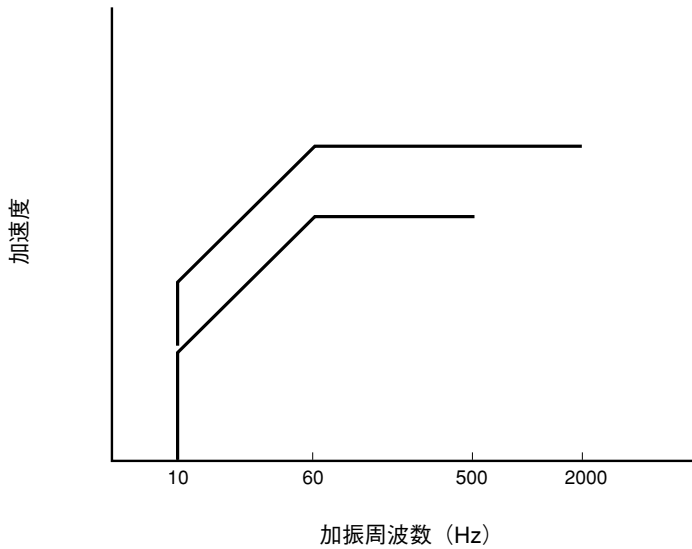
この実験では20～2000Hzのランダム振動(1.4Grms)を加え、出力信号をFFT (FFT: Fast Fourier Transforms)で周波数分析したものです。図13-11では周波数0.5, 1.45, 1.6KHz付近でノイズが増大しているのがわかります。

また非常に微弱光を扱う時は装置をのせている机のわずかな振動もノイズ源となる場合があるため、この場合は装置のしっかりした固定やプリアンプまでのケーブルの長さ・固定などに注意する必要があります。

13.4.3 試験方法・条件

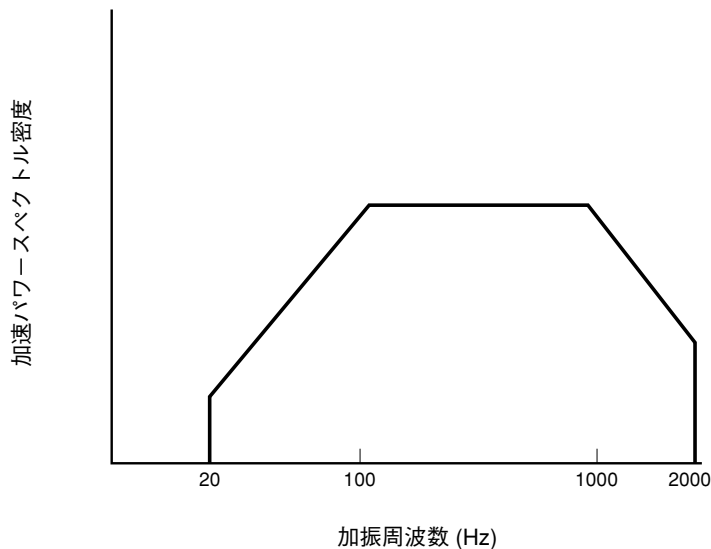
振動試験方法²⁾には正弦波形とランダム波形を加える方法があります。正弦波形は周波数範囲、変位(振幅)、加速度、加振時間、掃引時間などの条件によって決まります。周波数の掃引方法は対数掃引が一般的です。ランダム波形の場合は加振の加速度パワースペクトル密度(G^2/Hz)と加振時間で決り、その加速度はRMS値で表され、実際の環境に近い条件で試験が可能です。図13-12(A)、(B)に正弦波とランダムの振動パターンの一例を示します。

(A) 正弦波振動パターン



THBV3_1312JAa

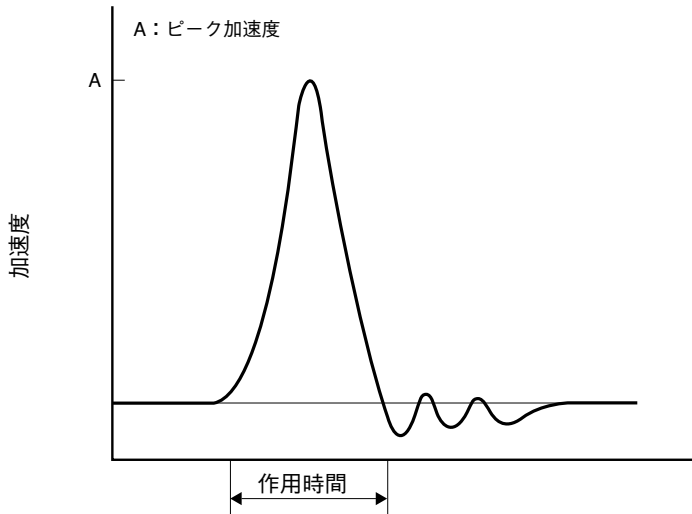
(B) ランダム振動パターン



THBV3_1312JAb

図13-12 振動・衝撃曲線 (1)

(C) 衝撃波形（正弦半波曲線）



THEV3_1312JAc

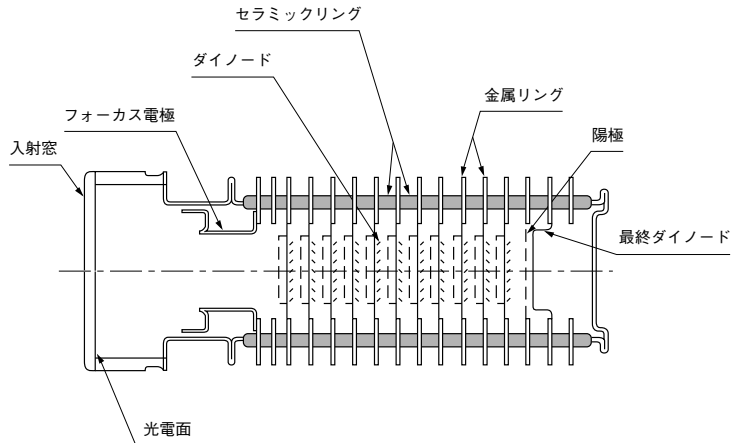
図 13-12 振動・衝撃曲線 (2)

衝撃試験には正弦半波、のこぎり波、台形波パルスなどによる方法がありますが、浜松ホトニクスでは一般的に正弦半波パルスで行なっております。試験条件は、ピーク加速度、衝撃作用時間、回数で決まります。図 13-12(C)に衝撃波形を示します。

振動・衝撃試験の公的規格にはIEC 60068, JIS-C0040(振動), JIS-C0041(衝撃), MIL STD-810E, MIL STD-202F³⁾などがあります。当社でもそれらの規格に準拠した方法にて試験しております。先に述べた耐振動・衝撃の値もこれらの試験条件で試験が行われたものです。例えば、衝撃試験では衝撃作用時間は11 msで互いに直行する3つの軸の土方向に3回ずつ合計18回衝撃が与えられます。よって1000 m/s²の衝撃に耐えると言っても何十回、何百回衝撃を加えても大丈夫ということではありません。

13.4.4 耐振用光電子増倍管⁴⁾

石油探査をはじめとする地質検層や、ロケットに搭載される宇宙探査などの用途では強い耐振動・耐衝撃性が要求⁵⁾されます。そのため、これらの用途には特別に耐振性を持たせたものが作られており、200 m/s²～500 m/s²の耐振性、1000 m/s²～10000 m/s²の耐衝撃性を有しています。口径としてφ 13 mm～φ 51 mm (1/2 インチ～2 インチ) まで各種があり、使われているダイノードも多種多様です。これらのほとんどは通常品をもとに耐振用にスプリング、リード線、ダイノードなどを強化し、耐振構造に作り替えたものです。口径51 mm (2 インチ) までで、通常品をベースに耐振構造に変えたものではおよそ200 m/s²までの耐振性をもたすことができますが、それ以上の性能を要求する場合は、ガラスバルブのかわりにセラミックバルブを用いたものになります。図 13-13 は、その構造を断面図で示したものです。



THBV3_1313JA

図 13-13 耐振用光電子増倍管の構造

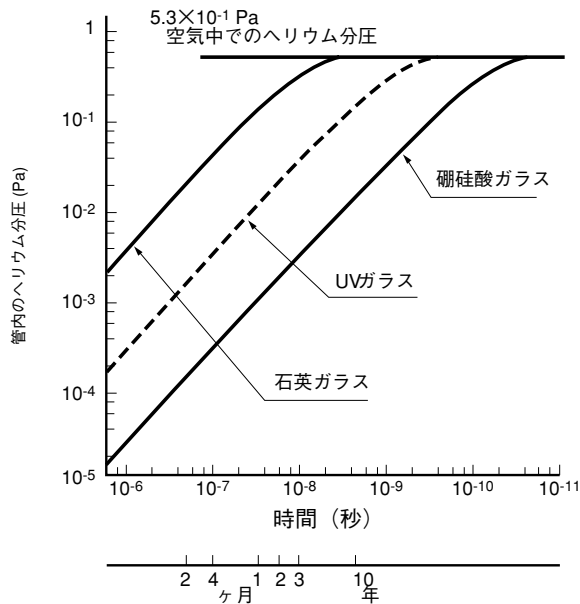
図の様に各々のダイノード電極はセラミックリングで完全に融着され固定されています。そのため振動によりダイノードの変形・はがれが起りにくく、また、リード線、セラミック基板、カソードコンタクト部が不用で、割れやすいガラスの部分も少ないため振動による断線や接触不良、破損が起りにくくなっています。デバイダ抵抗もこの金属リング部の外側に直接つけることができるため、デバイダ回路を付けた後も同様な耐振性を持たせることができます。以下に、口径φ34 mm (1-3/8インチ)、高温用バイアルカリ光電面で12段ダイノードの増倍部をもつ積層セラミック光電子増倍管の耐振性を示します。

耐振動性	500 m/s ²	(50 ~ 2000 Hz)
耐衝撃性	10000 m/s ²	(0.5 ms)

13.5 ヘリウムガスの影響

ヘリウムガスがガラスを透過⁹⁾することはよく知られています。ガラスに対する透過率は、ガラスを構成する成分やその組成、さらには温度などにより異なります。紫外域の波長を対象とする光電子増倍管の窓材には石英が使われます。石英ガラスは他の窓材に比べてヘリウムガスを良く透過するために問題になる事があります。ヘリウムガス中の放置や動作では、管内ガスの増加が生じ、暗電流の増加、耐電圧の劣化へと、進行します。最終的には放電を生じ、光電子増倍管の寿命となります。例えば、1気圧のヘリウムガスの中に石英バルブを用いた光電子増倍管を置いた場合、およそ30分でヘリウムガスの影響によるアフターパルスの急激な増加が見られます。それによって使用できなくなりますのでご注意ください。ヘリウムガスの影響を少なくするには、ヘリウムフリーガス中で保管するのが最善です。ヘリウムフリーガスとしては、Arガス、N₂ガスなどがあります。

ヘリウムガスは地上では約0.5 Paの分圧で存在しています。またヘリウムガスの石英の透過率は特に高く室温で 10^{19} cm²/s (1.013×10^5 Pa 差の時)です。このことから、石英ガラスの表面積と厚さにより時間差はありますが、光電子増倍管内のヘリウム圧力は徐々に増加して最終的には大気中のヘリウム分圧近くまで増加します。例えば、石英バルブを用いたサイドオン型光電子増倍管(φ28 mm タイプ)を大気中に放置しますと、1年後にはバルブ内のヘリウム分圧はおおよそ 9×10^2 Paになります(図13-14 参照)。



THEV3_1314JA

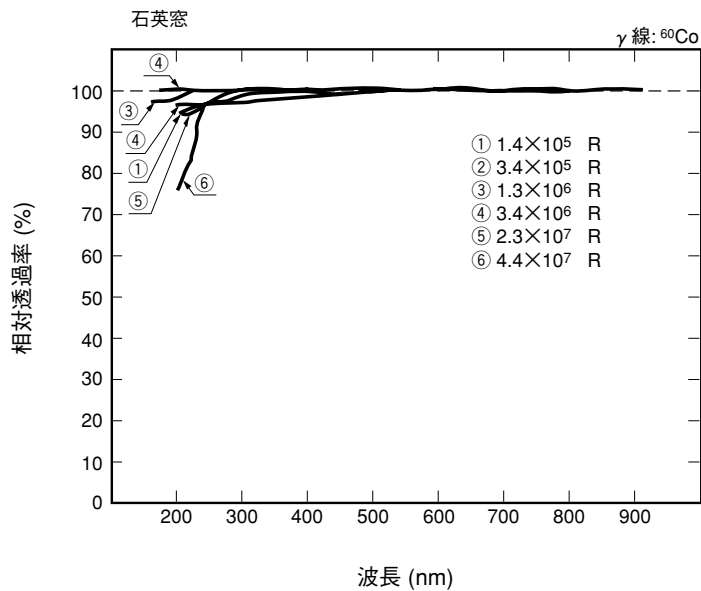
図13-14 バルブ材質と管内のヘリウム分圧の変化

13.6 放射線の影響

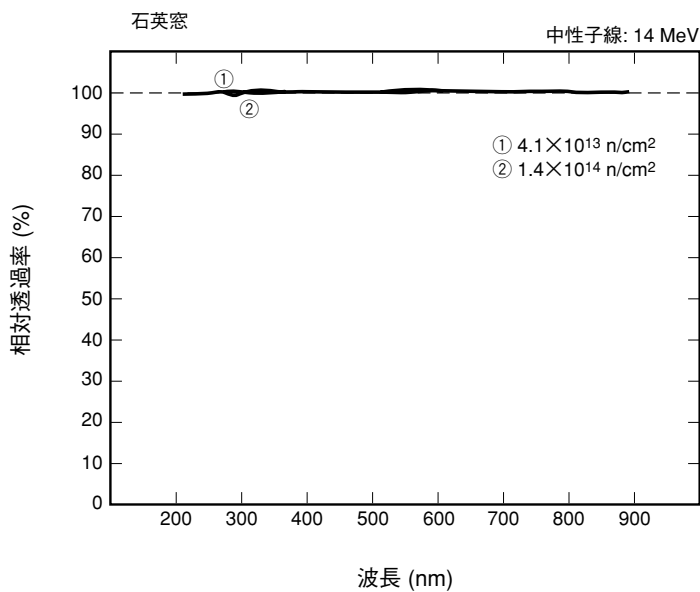
光電子増倍管の用途は、高エネルギー物理学、核医学、X線応用、および宇宙へと拡大しています。こうした環境では放射線(X線、 α 線、 β 線、 γ 線および中性子線など)にさらされることになり光電子増倍管の特性に少なからず影響を与えます⁷⁾。これらの放射線は、光電子増倍管のバックグラウンド信号への影響の他に、光電子増倍管を構成するガラスなどに劣化をもたらす場合があります。

13.6.1 窓材透過率の劣化

放射線の照射によって陰極感度や二次電子増倍率が直接大きく変化することは殆どありません。感度変化は光検出器として欠かせない窓材のガラスの着色による透過率の劣化によるところが主です⁸⁾。⁶⁰Coによる γ 線照射および中性子線(14MeV)照射によりガラス窓の透過率の変化の様子を図13-15～17に示します。

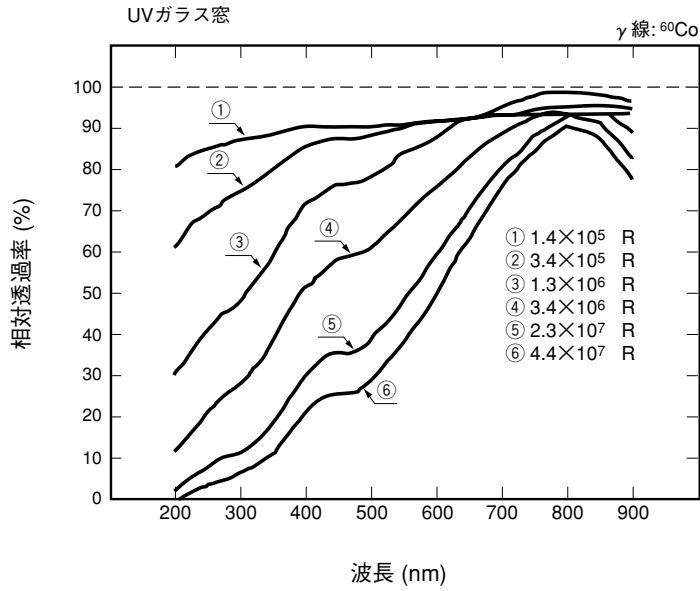


THBV3_1315JAa

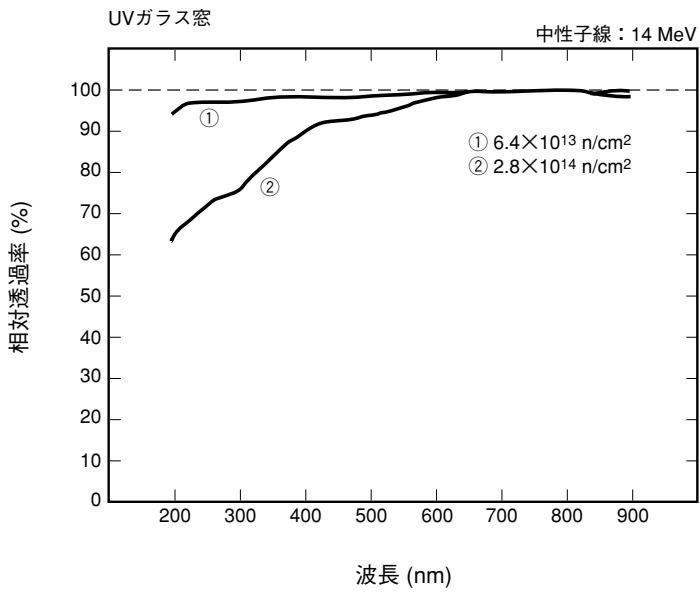


THBV3_1315JAb

図13-15 γ 線、中性子線による石英窓の透過率変化



THBV3_1316JAa



THBV3_1316JAb

図 13-16 γ線、中性子線による UV ガラス窓の透過率変化

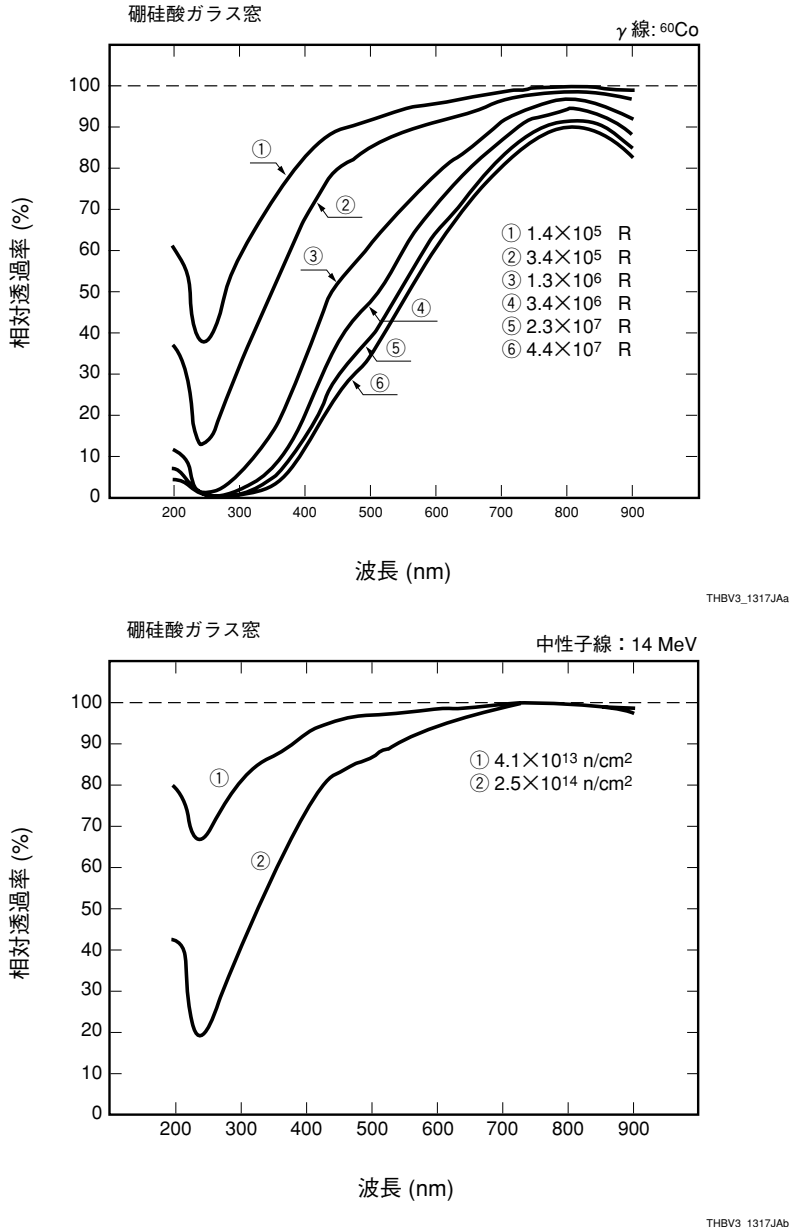
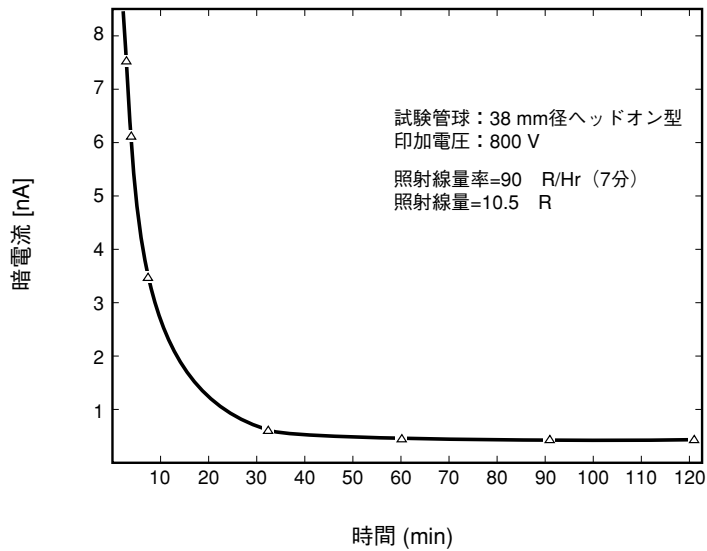


図13-17 γ線、中性子線による硼硅酸ガラス窓の透過率変化

図には石英(合成)・UV・硼硅酸の3種類のガラスのデータを示します。これから透過率は放射線照射により紫外域ほど透過率が劣化しやすいことがわかります。石英(合成)ガラスが最も放射線の影響を受けにくく、 4.4×10^7 レントゲンのγ線および 1.4×10^{14} n/cm²の中性子線放射に対してもほとんど変化は認められません。石英ガラスには大別して合成石英と熔融石英があります、合成石英のほうが優れた耐放射線特性を持っています。γ線照射によりおよそUVガラスで 5×10^4 レントゲン、硼硅酸ガラスでは 1×10^4 レントゲンあたりから透過率の劣化が起り始めます。しかし同種のガラスでも製法によりその組成が異なるためこの特性は一様ではありません。一般に耐放射線性は石英が最も優れ、続いてUVガラス、硼硅酸ガラスの順となります。放射線により透過率が劣化したものでも放置しておくことある程度は回復します。その回復は温度が高いほど効果があります。

13.6.2 窓材発光

また光電子増倍管は放射線にわずかに感度(雑音)を有していますが、これは主として β 線・ α 線に対しては入射窓ガラスの発光に、また γ 線・中性子線に対しては入射窓ガラスの発光と光電面、ダイノードからの電子放出によるものです⁹⁾。このうち入射窓の発光の寄与が最も大きいと思われませんが、ガラスの種類により発光量が異なると考えられます。さらにガラスの発光は放射線照射停止後も引き続き蛍光やリン光を発し続けノイズ源となります。図13-18は γ 線照射後の暗電流の変化の様子を示したのですが、定常値に下がるまでに数10分かかることがわかります。また中性子照射では核反応(n,p)(n,n,p)によりダイノード材などで放射化を引き起こすことが確認されています。



THBV3_1318JA

図 13-18 γ 線照射後の暗電流変化

13.7 気圧の影響

光電子増倍管は 1×10^5 Pa (1気圧)の環境下での使用以外に、減圧環境、航空機、人工衛星などの低圧環境下で使用されることがあります。

大気圧から宇宙空間の真空までの気圧の変化は、光電子増倍管ベース内部のリード線間に放電を起こす可能性があります。これはパッシェンの法則としてよく知られている現象で、放電をおこす必要な最小電圧は電界が一樣で温度が一定ならば、電極間距離と気体の圧力との積の関数として定められるという法則です。

光電子増倍管のベース、およびソケットのリード線部も1気圧の環境下および高真空下では放電を起さない電極リード線間隔に設定されています。しかし周囲圧力が100～1000 Paの気圧で最も放電しやすくなりますので、この領域で使用される場合には、高電圧充電部分の設計、配線には十分な注意が必要となります>(*133 Pa=1 torr)

実使用における注意点は

- (1)十分に真空度が確保されたことを確認の上、高電圧を加えてください。(低電圧から高電圧へ徐々に)
- (2)プラスチックベースタイプの光電子増倍管の場合、ベース内部まで設定真空度になるためには長時間が必要となるため、プラスチックベースに穴を開ける等の加工が必要となります。
- (3)1～0.1パスカルでも暗電流の増加や信号のゆらぎが見られることがあるため、実装条件には注意が必要です。

また、陽子崩壊実験やニュートリノ実験などの高エネルギー物理実験においては光電子増倍管を水中や海中に沈めて使用されることがあります。この場合大気圧以上の圧力が光電子増倍管にかかります。破壊圧力は光電子増倍管の形状、大きさ、バルブの材質などにより異なります。一般的には小型の方がより高い圧力まで耐えることができます。高エネルギー物理実験で多く使用される ϕ 204 mm (8インチ) や ϕ 508 mm (20インチ) の大型の光電子増倍管では、より高い圧力に耐えることができるように球状の形状になっていて、 ϕ 204 mm (8インチ) で 7×10^5 Pa、 ϕ 508 mm (20インチ) で 6×10^5 Paまでの圧力に耐えることができます。

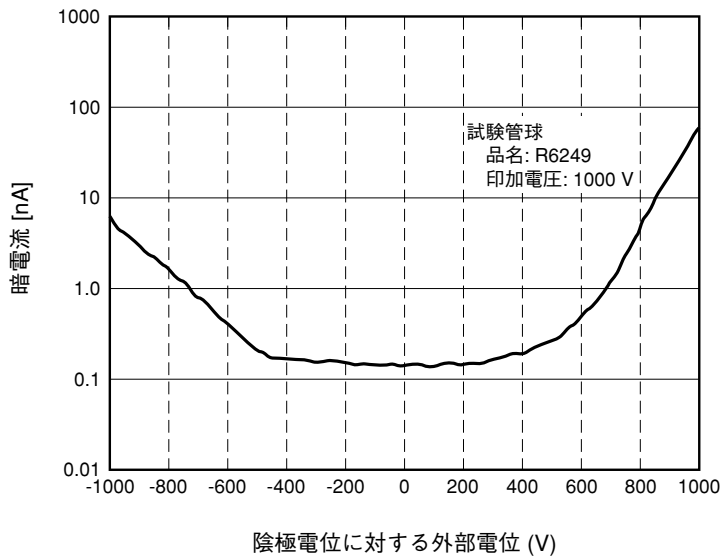
材質の違いにおいては、石英バルブの製品は段シール部分があるため耐圧力が低くなっています。ヘッドオン型光電子増倍管の窓形状には、入射面および光電面が平らなフラット型、入射面が平らで光電面が凸面をしたプラノコンケーブ型、入射面、光電面とも凸面をしたコンベックス・コンケーブ型などがあります。フラット型に比べプラノコンケーブ型やコンベックス・コンケーブ型の方がより高い圧力に耐えることができます。

13.8 周囲電位の影響

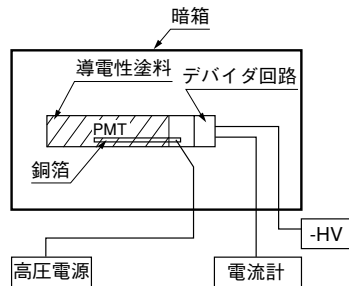
放射線や紫外光でガラスが発光することは第13章13.6.2で述べましたが、ガラスに強電界が加わっても発光を起します。そしてこのガラスの発光は暗電流を増加させることになります。

13.8.1 実験

図13-19は光電子増倍管の側管ガラスに導電性塗料を塗りマイナス高電圧で動作させ、この導電性塗料の電位を陰極の電位に対し変化させた時の暗電流の様子を示したものです。



THBV3_1319JAa

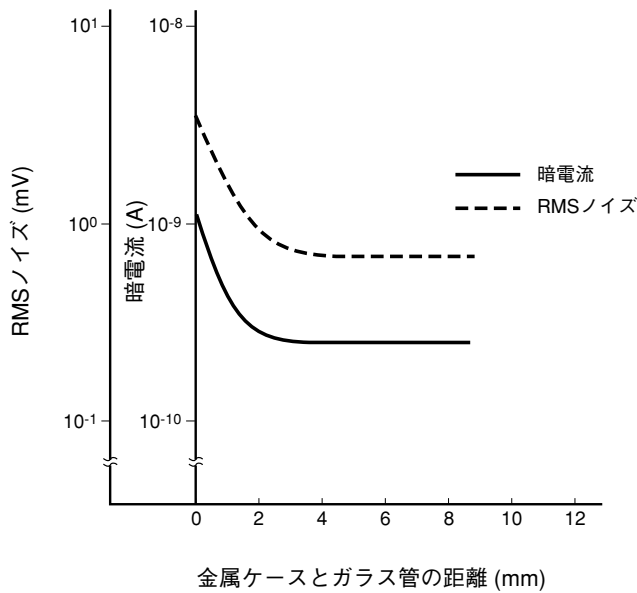
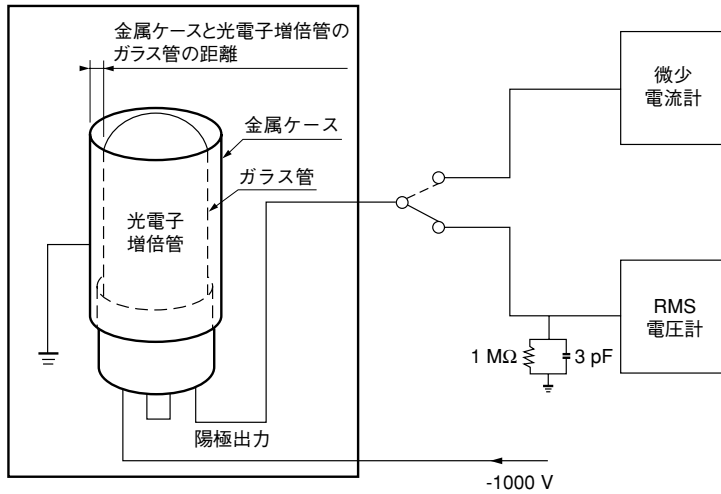


THBV3_1319JAb

図 13-19 外部電位と暗電流

陰極との電位差が大きい程、暗電流が多くなるのがわかります。これは光電子増倍管の構造からわかるようにカソード周辺の側管内壁にはアルミがコーティングされていて、これがカソード電位のため側管外壁がカソードに対し電位差が大きいとこの間のガラスが発光するためです。当然側管で発光した光は反射して光電面に入り暗電流を増加させることになります。

また光電子増倍管のハウジングは一般に金属性で接地されているため、グラウンド電位の導電性物質が光電子増倍管の回りになり、暗電流が増加する場合があります。しかしこのグラウンド電位の導電性物質と光電子増倍管との距離が十分あれば、この影響は少なくなります。図13-20は光電子増倍管とグラウンド電位の距離を変えたときの暗電流の変化を示しますが、4 mm以上離せば暗電流の増加はなくなることがわかります。

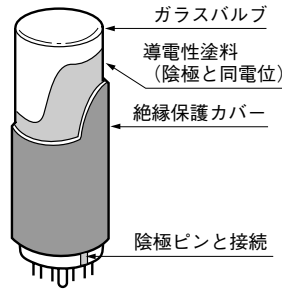


THBV3_1320JA

図13-20 グラウンド電位までの距離と暗電流

13.8.2 対策

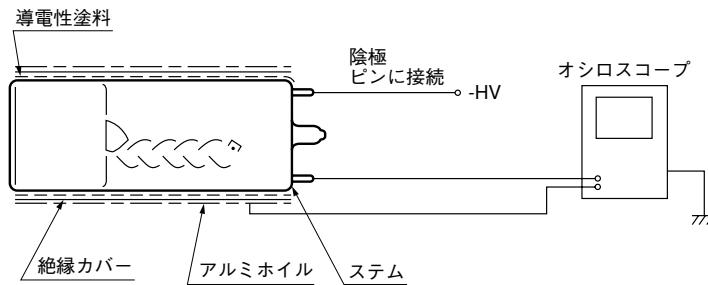
周囲電位の影響は陽極正高電圧にて使用すれば解消しますが、通常は陰極負高電圧で使われます。この場合図13-21の様に側管ガラス外壁に導電性塗料を塗り、陰極電位にする方法が良く使われています。



THBV3_1321JA

図 13-21 HA コーティング

これは当社ではHAコーティングと呼んでいますが、側管外壁が負高圧となるため安全のために外周に絶縁保護カバー(熱収縮チューブ)がほどこされています。HAコーティングをすれば、この周囲電位によるノイズ増加は一応解決されます。図13-22のように、HAコーティングの上にグラウンド電位の金属を巻いたときなど微小ノイズが発生する時もあります。これは絶縁保護カバーの絶縁破壊による微小放電が時々起こり、その時発生する発光が光電面に達するためと考えられます。したがって、HAコーティングタイプであっても負高電圧で使用する場合はハウジングなどの金属ケースに光電子増倍管が直接触れることは避けてください。



THBV3_1322JA

図 13-22 HA コーティング上の外部電位の影響

上記のように側管の場合はHAコーティングによって解決できますが、光電面の入射窓ガラス上にグラウンド電位の導電性物質がある場合は有効な手段はありません。また、入射窓での発光は最も影響が大きく、そのため、たとえ絶縁物でも入射窓に接するのは好ましくありません。どうしても入射窓に接しなくてはならない時はテフロンなど高絶縁性を持っているものにする必要があります。また入射窓上にグラウンド電位の物質があるとノイズの増加だけでなく光電面感度も劣下し、しかも一度劣下すると二度と回復することがないのが普通です。そのため光電子増倍管の支持方法については特に光電面ガラスおよびその周辺は他のものが接触しない様な注意が必要です。

このため可能ならば陽極正高電圧での使用を推奨します。

13.9 信頼性

13.9.1 経時変化（寿命）特性

光電子増倍管の経時変化特性は、光電陰極の種類およびダイノードの材質により、変化パターンに傾向が有りますが、動作条件(特に出力電流)、製造条件や個々の管球毎によってかなり異なります。なお通常の使用における光電子増倍管の陰極電流はピコアンペアオーダの微小電流しか流れていないために、光電面感度劣化はほとんど無視することができ、経時変化特性はダイノードの特性が重要な要素となります。なお図 13-23 に陽極電流 $100 \mu\text{A}$ で光電子増倍管を動作した時の代表的例を示します。なお、陽極電流 $100 \mu\text{A}$ は通常よりかなり過酷な動作条件です。

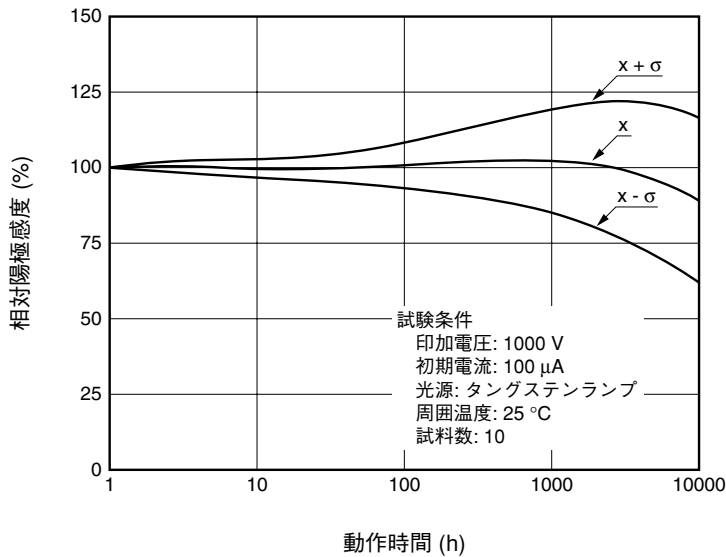
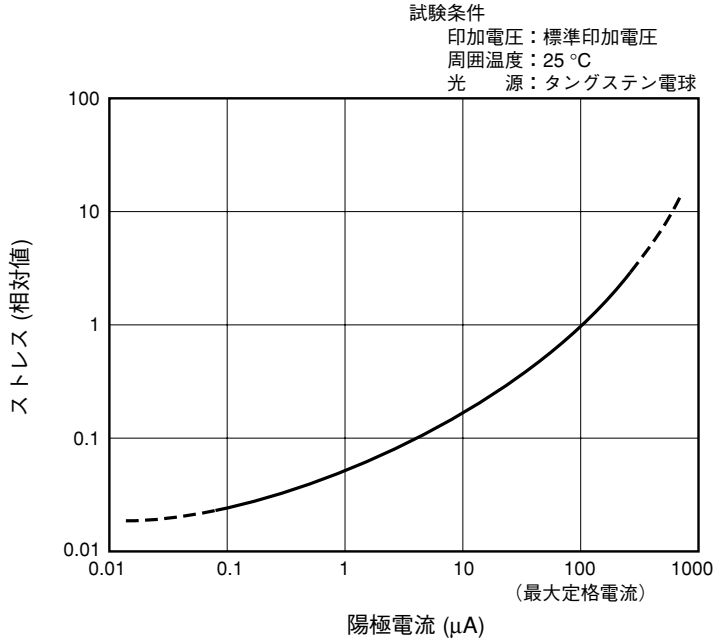


図 13-23 光電子増倍管の経時変化特性

THBV3_1323JA

13.9.2 電流ストレスと安定性

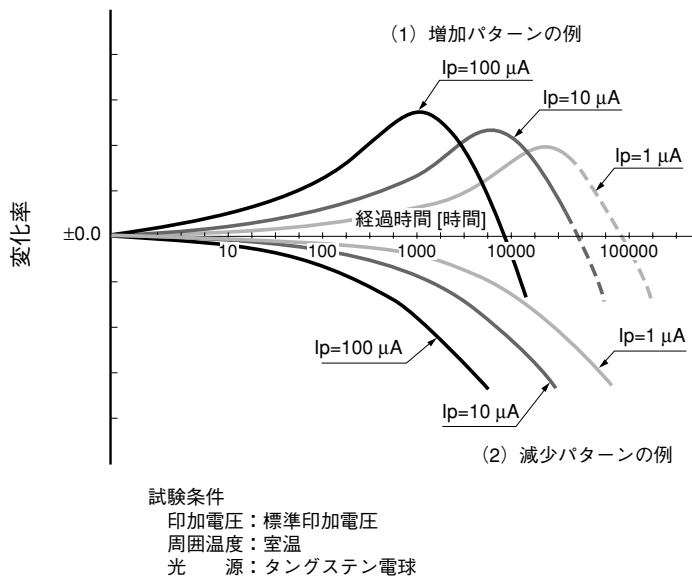
前述のように光電子増倍管は、動作条件にて経時変化特性が変化します。一般的には、電流ストレスが大きいと、早くかつ大きな変動をします。電流に対するストレスを図 13-24 に示します。



THBV3_1324JA

図 13-24 光電子増倍管のストレス変化（陽極電流値による差）

図13-25に動作電流を1, 10, 100 μA と変えた場合の増加および減少パターンの経時変化特性の例を示します。

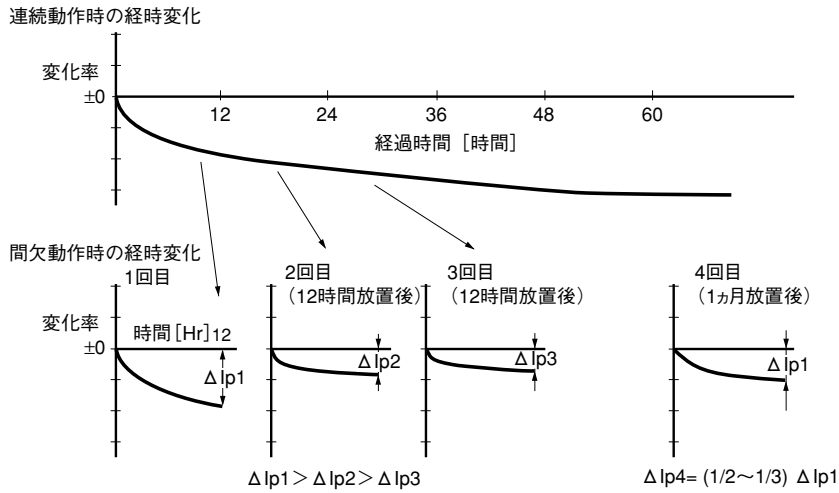


THBV3_1325JA

図 13-25 光電子増倍管の経時変化（陽極電流値による差）

また光電子増倍管の経時変化特性は、エージングを行う事によりある程度改善する事ができます。図13-26に繰り返し動作した時の初期変動の変化を示します。図からわかるように、最初の変動が大きなものでも、2回目以降は半分程に減少しています。

しかし長時間放置しますと元の値に戻りますので、安定性が特に重要な応用には、使用する前にエージングをする事をお奨めします。



THBV3_1326JA

図13-26 光電子増倍管の間欠動作（エージング効果）

13.9.3 信頼度

光電子増倍管の用途は近年シンチレーション計測、高エネルギー物理、核医学機器、X線応用機器、および宇宙・航空分野へ拡大されてきています。こうした分野では1つのシステムあるいは装置に、光電子増倍管が数十本～数百本、時には数千本も使われることがあります。このような用途では特に光電子増倍管の信頼度を予測し、確認することが極めて重要になります。

(1) 故障モード

光電子増倍管の故障モードは大別して劣化故障と破壊故障に分けられ、主な故障モードは劣化故障にあるといえます。劣化故障は陰極感度劣化、ゲインの劣化、暗電流の増加、耐電圧の低下があります。破壊故障にはガラス面板、バルブおよびシステム部分のクラック、微小クラックによるエアリークなどがあげられます。破壊故障は光電子増倍管に致命的なダメージを与え使用不可能になります。しかし製造工程、検査工程で厳重にスクリーニングされていますのでほとんど無視できる値です。なお社内の信頼性試験での結果から、故障モードのほとんどはゲインの劣化(変動)によるため、光電子増倍管がその時点で使用できなくなるものではありません。この場合動作電圧を調整する事により、ほぼ正常に使用することが可能です。

(2) 故障率

故障率¹¹⁾¹²⁾は、単位時間内に故障を起こす割合と定義されています。一般に故障率は概略次の2つの方法によって推定されます。

1. 社内信頼度試験
2. フィールドデータ

このうちフィールドデータから求めた光電子増倍管の実績故障率としては、常温環境、定格動作電圧、陽極出力電流が100 nA程度の動作条件でほぼ $2 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-6}$ 故障/時間の水準にあることが確認されています。また特別にスクリーニングを施したものは概略 5×10^{-7} 故障/時間以下の故障水準であることが予測されます。

(3) 平均寿命

一般にMTBF¹¹⁾¹²⁾(Mean Time Between Failure)またはMTTF (Mean Time To Failure)と呼ばれている信頼度の尺度がありますが、これは簡単に言えば故障するまでの平均時間ということで、平均寿命といわれています。これらの定義や基礎数理は信頼性に関する文献に詳しく述べられていますのでここでは簡単に説明します。故障率(λ)と平均寿命(θ)の関係は指数分布に従う故障分布を持っていることを前提として、次のように定義¹¹⁾¹²⁾されています。

$$\theta = 1 / \lambda$$

したがって、故障率の逆数が平均寿命ということになります。

光電子増倍管の室内環境下で陽極出力電流が100 nA前後の使用条件では、前述の事故率より算出されれば $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$ 時間の平均寿命を持っていると予測されます。また特別にスクリーニングを実施した光電子増倍管では 2×10^6 時間以上の平均寿命を持っています。

(4) 信頼度

信頼度 R は、信頼性の基礎数理によれば、次のように定義¹¹⁾¹²⁾されています。

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad t: \text{時間}$$

したがって光電子増倍管の故障率は $2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-7}$ 故障/時間であるから、信頼度 R は次のようになります。

使用時間	信頼度 $R(t)$	
	$\lambda = 2 \times 10^{-6}$ の時	$\lambda = 2 \times 10^{-7}$ の時
1年(8760時間)	98.3 %	99.8 %
2年(17520時間)	96.6 %	99.7 %
3年(26280時間)	94.9 %	99.5 %
4年(35040時間)	93.2 %	99.3 %
5年(43800時間)	91.6 %	99.1 %

以上の結果は概略の光電子増倍管の信頼度の水準を求める参考になります。したがって良好な使用条件での光電子増倍管の信頼度はかなり高い水準にあるといえます。

13.9.4 浜松ホトニクスにおける信頼度試験と判定基準

社内信頼度試験では次のような信頼度試験と故障判定基準を設定し、試験を行ない故障率を求めています。

信頼度試験条件

イ) 環境ストレス条件

室温(25℃)および高温(55℃)(最大定格+5℃)

ロ) 試験方法

放置および動作寿命

ハ) 動作条件(光電子増倍管)

供給電圧；カタログ標準動作電圧

1000～1250 V

陽極出力電流；カタログ最大定格

10～100 μ A

故障判定基準

イ) 動作寿命時の陽極感度

±50%の変化

ロ) 動作以外(放置)時の陽極感度

±25%の変化

ハ) 陰極感度

いずれの試験でも±25%の変化

ニ) 陽極暗電流(DC)

500倍以上の変化、耐圧不良

ホ) 破壊故障

放電、クラック、陽極漏洩電流など

但しこの判定基準は浜松ホトニクスで評価基準としているもので、この基準からはずれば使用できなくなるといったものではありません。

浜松ホトニクスでは、上記条件により長期にわたって信頼性試験を続けており、光電子増倍管の豊富なデータがあります。その結果、光電子増倍管の最大定格電流を基にした条件での故障率は、 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ 故障/時間、したがって平均寿命では1000～10000時間という結果が求められています。このことから、常温での100 nA程度の陽極出力電流動作時の故障率と、最大定格に基づいた温度・電流(50℃、10～100 μ A)での故障率の比は、約400倍となります。社内の試験条件は、フィールドデータの約400倍の加速係数を持っていることとなります。

第 13 章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株): Technical data sheet No. T-101.
- 2) 電気学会・振動・衝撃の計測調査専門委員会編: 電気電子機器と振動・衝撃. コロナ社.
- 3) IEC Publication 68-2 Basic environmental testing procedures.
JIS C 0040-1999: 環境試験方法(電気・電子)正弦波振動試験方法.
JIS C 0041-1995: 環境試験方法(電気・電子)衝撃試験方法.
MIL-STD-810E: Environmental test methods and engineering Guidelines.
MIL-STD-202F: Test methods for electronic and electrical component parts.
- 4) 浜松ホトニクス(株): Ruggedized High Temperature Photonmultiplier Tubes TPMH0001EA.
- 5) BICRON CORP.(株): Ruggedized High-Temperature Detector Technology.
- 6) J.R. Incandela, S.P. Ahlen, J. Beatty, A. Ciocio, M. Felcini, D. Levin, D. Ficenc, E. Hazen, A. Marin, J.L. Stone, L.R. Sulac, W. Worstell: Nuc. Instrum. & Methods. Phys. Res. A269, 237-245(1988).
永井彰一郎: 新しい工業材料の科学特殊ガラス. 103, 金原出版.
- 7) L.W. Howell, H.F. Kennel: Optical Engineering. 25, 4, 545, APR(1986).
M.M. Brinbaum, R.L. Bunker, J. Roderick, K. Stephenson: AIAA Guidance And Control Conference (1984).
- 8) 作花済生, 境野照雄, 高橋克明: “ガラスハンドブック” 朝倉書店, 825.
- 9) W. Viehamann, A.G. Eubanks, G.F. Pieper, J.H. Bredekamp: Applied Optics. 14, 9, 2104, SEP(1975).
- 10) 塩見 弘: 故障物理入門. 日科技連.
- 11) 真壁: 信頼性工学入門. 日本規格協会.
- 12) 北川賢治: 信頼性の考え方と技術. コロナ社.

第14章

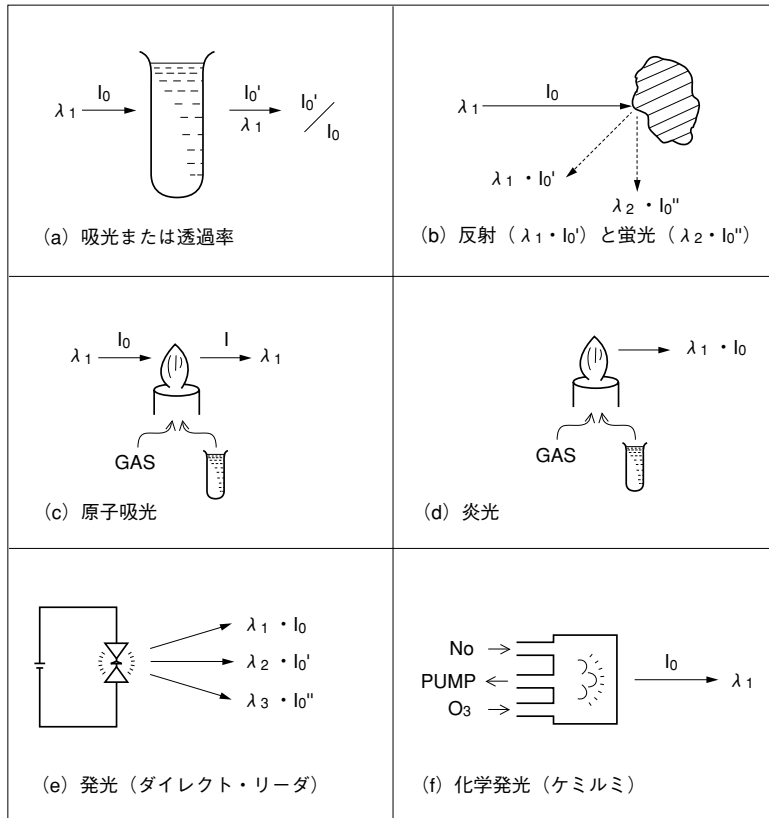
各種応用

光電子増倍管(Photomultiplier Tube: PMT)は、各種計測機器や学術研究用の光検出器として広く用いられています。本章では、計測機器、研究分野における原理および装置、検出方法について解説します。

14.1 光分析装置

14.1.1 概要

光分析装置とは、光を用いて各種物質の分析を行う装置の総称で、特定の波長の吸収、反射、偏光を利用したものと、試料に外部からエネルギーを与え、その発光および吸光を利用したものに大別されます。光電子増倍管がさかんに用いられている分野であり、長い歴史を持っています。光分析装置の代表的なものを図解すると図14-1のように分類されます。



THBV3_1401JA

図14-1 分光分析のいろいろ

具体的な装置としては、

- 1) 可視～紫外分光分析装置(透過、吸光、反射)
- 2) 赤外分光分析装置(透過、吸光、反射)
- 3) 遠紫外分光分析装置(透過、吸光、反射)
- 4) 発光分光分析装置
- 5) 蛍光分光光度計
- 6) 原子吸光分光光度計
- 7) 旋光、円二色測定装置
- 8) ラマン分光光度計
- 9) 濃度計、比色計、色彩計

などがあります。

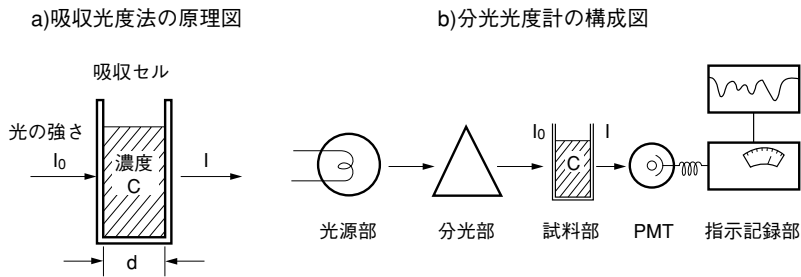
14.1.2 応用例

具体的な応用について、吸収を利用したタイプと発光を利用したタイプに分け、各々代表的なものについて説明します。

(1) 紫外、可視、赤外分光光度計 (UV, Visible, IR Spectrophotometer)

光が物質を通過するとき、物質の電子状態を変化(電子遷移)させたり分子の固有振動を引き起こし、そのエネルギーの一部を失います。これを吸収といい、吸収を利用して定量分析を行います。

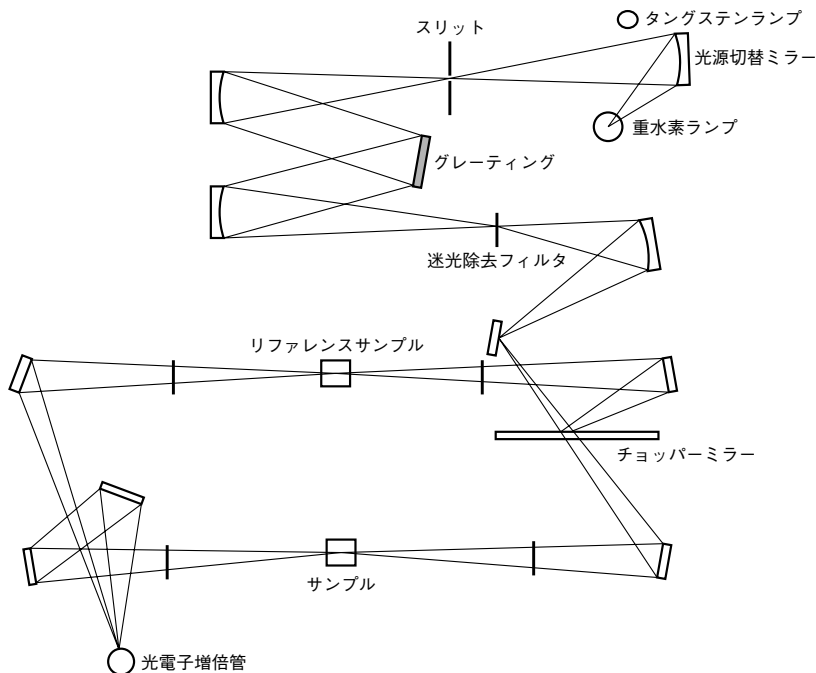
原理図、構成図¹⁾を図 14-2 に示します。



THBV3_1402JA

図 14-2 原理図、構成図

実際に製品化されている分光光度計の中で紫外、可視、近赤外域をカバーする分光光度計の光学系を図 14-3 に示します。



THBV3_1403JA

図 14-3 紫外～可視～近赤外分光光度計の光学系

(2) 原子吸光分光光度計 (Atomic Absorption Spectrophotometer)

分析する元素ごとに専用のホローカソードランプを用い、試料を溶媒に溶かして燃やし、炎の中に光を通します。

試料中の元素の濃度に比例して元素特有の波長の光を吸収するので、あらかじめ測定しておいた標準試料と吸収の度合を比較すれば、試料の濃度を知ることができます。

製品の具体例²⁾を図 14-4 に示します。

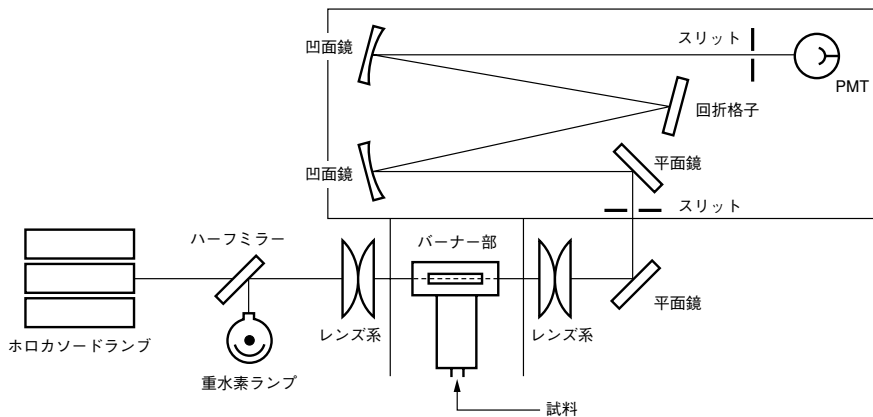


図 14-4 原子吸光装置の光学系

THBV3_1404JA

(3) 発光分光分析装置 (Atomic Emission Spectrophotometer)

試料に外部エネルギーを与えることにより発光させ、放射された光を分光器により元素特有のスペクトル線に分け、その有無と強度を測定することにより試料に含まれる元素の定性、定量を行う方法です。装置の系統図³⁾を図 14-5 に示します。

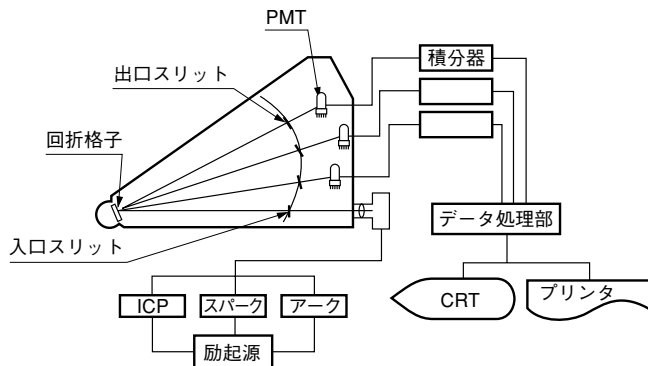
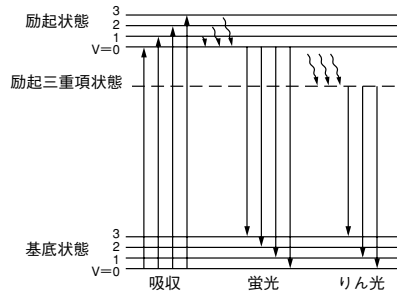


図 14-5 発光分光分析装置の系統図

THBV3_1405JA

(4) 蛍光分光光度計 (Fluorospectrophotometer)

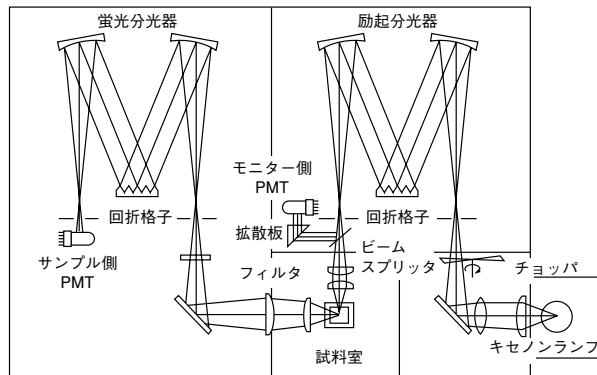
蛍光分光光度計は主に生物化学に用いられ、特に分子生物学で多く利用されています。物質に可視、紫外領域の光を照射すると照射された光よりも長波長側の光を発することがあります。この発光過程⁴⁾を図14-6に示します。この光を蛍光と呼び、光の強度、スペクトルなどを測定して物質の定量、定性分析を行います。



THBV3_1406JA

図 14-6 分子エネルギーの準位の模式図

光電子増倍管を用いた蛍光分光光度計の構造図⁵⁾を図14-7に示します。蛍光分光光度計は、大別して光源部、励起分光器部、蛍光分光器部および蛍光の検出器から構成されています。光源部には広い範囲に連続したスペクトルを有し、輝度の高いキセノンランプが多く使われます。励起、蛍光分光器部には、通常の分光器と同じ回折格子やプリズムが用いられています。



THBV3_1407JA

図 14-7 蛍光分光光度計の構造図

14.2 医用装置

14.2.1 PET (Positron Emission Tomography)

光電子増倍管を用いた核医学診断装置として、後述のガンマカメラやSPECTに加え、PET (Positron Emission Tomography)があります。ここではPETについて具体例をあげて説明します。図14-8にPET装置の概念図、図14-9にPET装置の外観を示します。

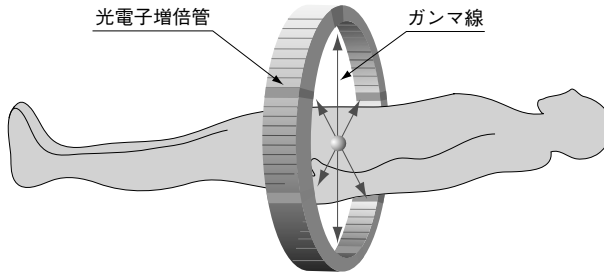


図14-8 PET装置の概念図

体内陽電子放出RIの放出した陽電子が消滅するときに反対方向に放出する2つの511 keVの γ 線を同時計測する



図14-9 浜松ホトニクス製全身用PET装置 SHR-92000 外観

PETは陽電子(ポジトロン)を放出するアイソトープで標識された薬剤を生体に投与して、病変や腫瘍の早期診断、体内動態を断層イメージとして得ることができる装置です。PET計測で使用される代表的な陽電子放出核種には、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F があります。

体内で放出された陽電子は周囲の組織中の電子と結合して消滅する際に、 180° の反対方向に2個のガンマ線を放出するので、体外にリング状に配列された検出器で同時計数法により測定します。得られたデータを角度毎に整理した後、X線CTなどで用いられているのと同様な画像再構成法により断層イメージをつくります。

PETの特長は、生体における代謝や血流、神経伝達といった生理学的・生化学的情報を定量計測できることで、これまで主に脳機能の研究や各器官の機能研究に用いられてきました。現在は臨床診断への利用が活発化し、癌の診断に威力を発揮しています。

PETの検出器には、光電子増倍管がシンチレータと組み合わせられて使用されます。体内から放出される高エネルギー（511 keV）のガンマ線を効率良く検出するため、シンチレータにはBGOやLSOなどの高いガンマ線阻止能をもった結晶が用いられます。

ポジトロン消滅により発生するガンマ線対の飛行時間差を測定して、消滅位置を知る方法も研究されています。これには、高速の光電子増倍管と蛍光消滅時間の短いシンチレータが用いられます。

	密度(g/cm ³)	相対発光強度	発光時間(ns)	発光ピーク波長(nm)
BaF ₂	4.89	5/26	0.8/620	220/320
BGO	7.13	20	60/300	480
LSO	7.35	72	40	420
GSO	6.71	20	60/600	430
Nal(Tl)	3.67	100	230	410

データ中で” / ” で区切られているのは2つのコンポーネントの発光があることを示しています。

表 14-1 各種シンチレータの特性

また、動物用PETの用途としては、人体では実施が困難な研究のための動物実験のほか、薬剤の開発、一般医薬品の薬理効果の判定等に利用されています。対象動物としては、マウス、ラットなどの小型動物からサル、ヒヒなどが用いられています。

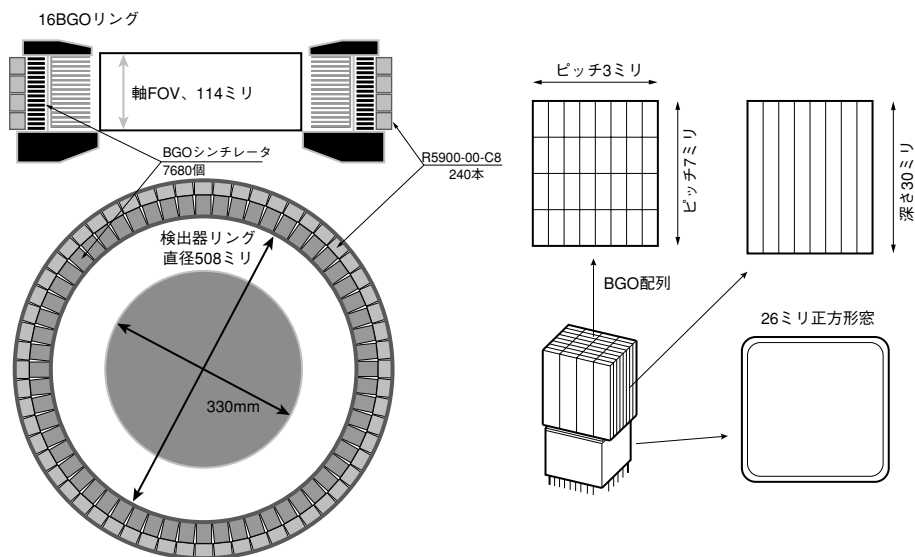
一般に動物の臓器は小さいので、PETの特性として高解像度が要求され、SHR-7700には、BGO(シンチレータ)と位置検出型光電子増倍管を組み合わせたシンチレーション検出器が採用されています。1本の光電子増倍管に32個のBGOを組み合わせて使うため、合計240本の光電子増倍管と7680個のBGOが必要となります。

SHR-7700の性能としては、有効視野φ330mm×114mm 中心解像力2.6mmが得られています。図14-10にSHR-7700の写真を示します。



図 14-10 浜松ホトニクス製 動物用PET装置 SHR-7700

さらに図14-11にSHR-7700 検出器リングと検出部の概要を示します。



THBV3_1411JA

図14-11 SHR-7700 検出器リング断面図

図14-12にSHR-7700を用いて観察した脳(サル)の酸素代謝活動を画像化した写真を示します。

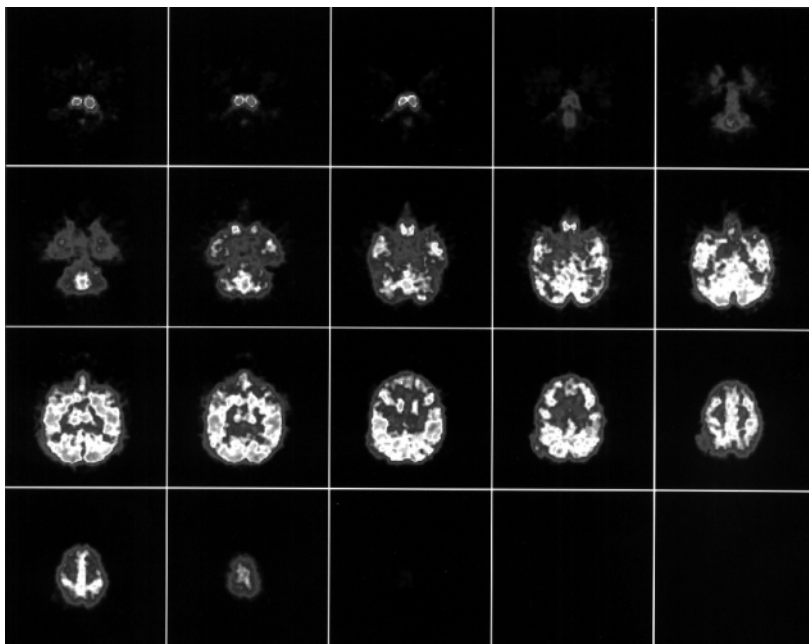
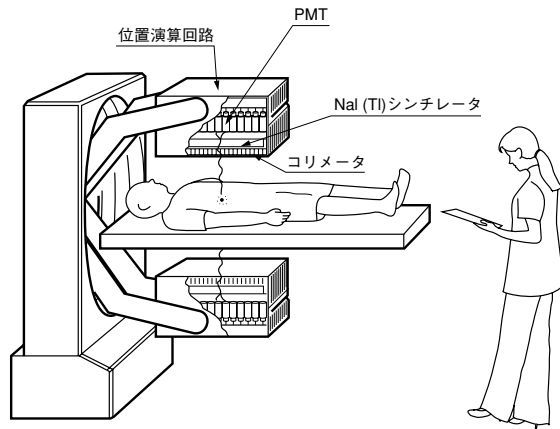


図14-12 脳(サル)の酸素代謝活動画像(ポジトロンイメージング装置)

14.2.2 ガンマカメラ (Gamma Camera)

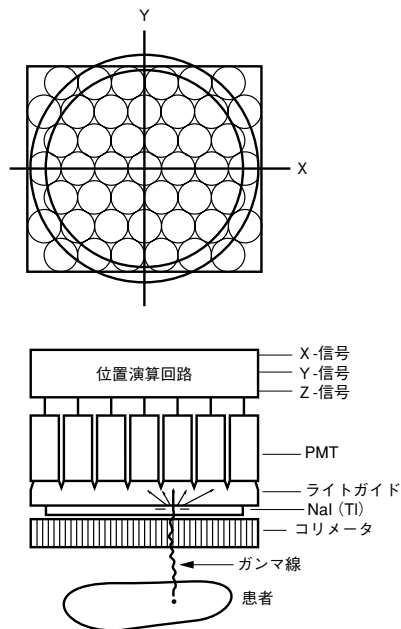
歴史的には、放射性同位元素(RI: Radioactive Isotope)のイメージング装置として、シンチスキャナからはじまり、次第に改良され、Anger(米国)によって開発されたガンマカメラへと発展してきました。また、ガンマカメラを応用したSPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)が開発され普及がすすんでいます。図 14-13 にガンマカメラの外観を示します。



THBV3_1413JA

図 14-13 ガンマカメラの外観

図 14-14 にガンマカメラの検出器の断面図を示します。ガンマカメラにおいて光電子増倍管は、大口径のヨウ化ナトリウム(NaI(Tl))シンチレータと組み合わせ、ガンマ線検出器として用いられています。



THBV3_1414JA

図 14-14 ガンマカメラの検出器の断面図

医用診断に適した γ 線核種医薬品が開発され、位置演算回路の改良による分解能の向上ということもあって、広く普及しています。表14-2に主要核種を示します。

感度を向上するために2カメラヘッドあるいは3カメラヘッドを備えたSPECTも利用されています。

核種	γ 線エネルギー(keV)	半減期
^{99m}Tc	141(β なし)	6.01h
^{133}Xe	81(β :346)	5.243d
^{67}Ga	93(37%), 185(20%), 300(17%)	78.3h
^{201}Tl	70.8(Hg-X), 16.7(11%), 135(2.8%)	72.91h
^{131}I	364(81%)(β :606)	8.04d
^{123}I	159(83%)	13.2h
^{81m}Kr	190(67%)	13s
^{111}In	245(94%), 171(90%)	2.83d

() 内放出率

表14-2 核医学画像診断に使われる主要核種

14.2.3 プラナーイメーシング装置

位置検出型光電子増倍管とシンチレータアレイを結合させた放射線位置検出器を対向配置した構造で、ポジトロン放出核種を用いて2次元イメージングを行うのがプラナーイメーシング装置です。

ポジトロン放出核種を含むトレーサの2次元イメージ及びその時間的変化を計測することができます。

植物、小動物等を生きたままの状態で、その体内の物質の動きを二次元画像として、リアルタイムに近い状態での計測が可能です。また、ポジトロン放出核種である ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O などは生体主要構成元素であり、かつ有機合成の基本物質であるため、多くの標識化合物の利用が可能となります。 $(^{11}\text{CO}_2, ^{11}\text{C-メチオニン}, ^{13}\text{NH}_4^+, ^{13}\text{NO}_3^-, ^{15}\text{O-水など})$

半減期の短いポジトロン放出核種の ^{11}C (20分)、 ^{13}N (10分)、 ^{15}O (2分)などを用いた場合、同一個体を用いた繰り返し計測が可能のため、日周変化の計測や異なる複数条件での計測を、個体差による誤差を除き実施することが可能です。

また、消滅ガンマ線(511 keV)を用いたイメージング手法を用いているため、計測体内部での自己吸収がほとんど無視でき、正確に植物、小動物体内での物質分布計測ができます。画像生成手法がシンプルのため、医療用PET装置と比べた場合、S/N比及び空間分解能が良い画像を得ることが出来ます。

さらに対象が比較的扁平である場合、PET装置のような断層像でなく(疑似)投影像であるため、視覚的認知性の点で優れています。

図14-15にプラナーイメーシング装置の構成と外観を示します。

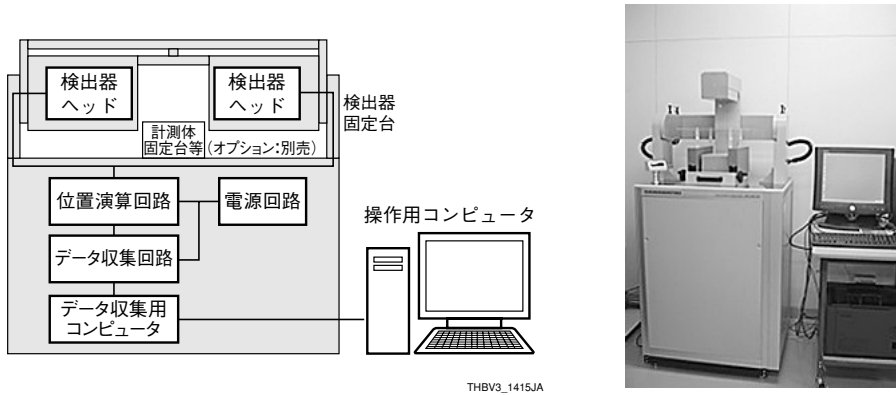


図 14-15 プラナーイメージング装置の構成と外観

14.2.4 X線画像診断装置

X線画像診断装置は多くの医療現場へ導入されています。光電子増倍管は多くのレントゲン装置のX線量の照射時間のモニターに使われていますが、最近ではフィルムレス化の流れの中で、フィルムの代わりとなる特殊な蛍光板の読み取り装置の検出器としても多く使われています。

(1) X線レントゲンフォトタイマ

X線フォトタイマは、X線診断のフィルム撮影でX線照射時間を自動的に制御する装置です。被写体を透過したX線を蛍光体などにより可視光に変え、光電子増倍管で電気信号に変換します。電気量が一定に達したとき、X線は遮断され、希望するフィルム濃度が得られます。

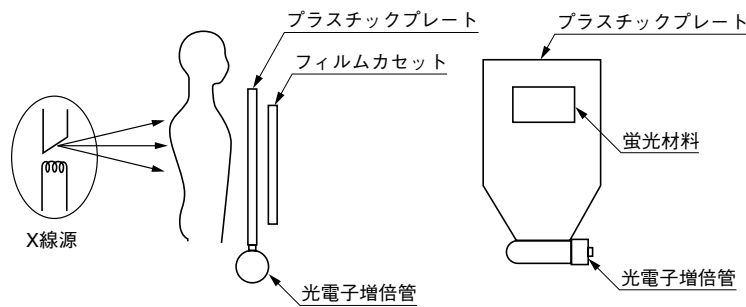


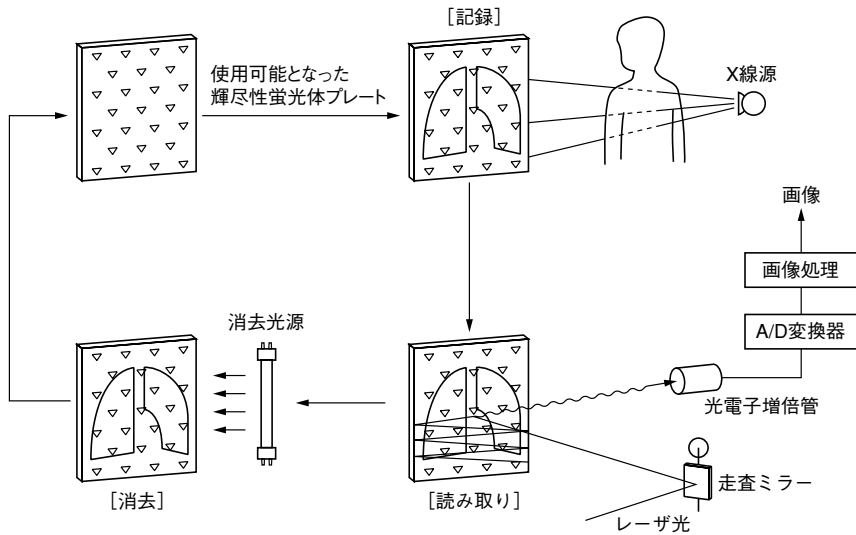
図 14-16 X線フォトタイマ

THBV3_1416JA

(2) コンピューテッド・ラジオグラフィー (CR)

X線画像診断装置には、輝尽性蛍光体という特殊な蛍光プレートを用いたものもあります。この蛍光プレートにX線画像を一時的に蓄積させた後、レーザー光でプレート上を走査(励起)することにより、蓄積されたX線量に対応した可視光を発生します。光電子増倍管はその微弱な可視光を電気信号に変換し、その後各デジタル信号処理を経て画像を構成します。

従来からあるX線フィルム撮像に比べ、撮影時間の短縮や撮影ミスの削減、画像のデジタル化による画像処理・データ解析や高密度保管・簡易検索などが可能となることから、世界的に普及が進んでいます。



THBV3_1417JA

図 14-17 輝尽性蛍光体プレートによる X 線画像の取得

14.2.5 検体検査

血液や尿など生体から取り出したものの成分を分析・検査することを検体検査(in vitro)と言います。検体検査は、健康状態の把握、病気の診断、原因の究明、治療薬の効果測定などの目的に使用され、現代の医療にとって非常に重要なものとなっています。検体検査は表14-3のように分類されます。この中で免疫学的検査の対象となる腫瘍マーカー、ホルモン、薬剤、ウイルスなどは濃度が極めて低いものが多く、非常に高い感度を有する検査装置が必要となり、光電子増倍管がよく使用されます。

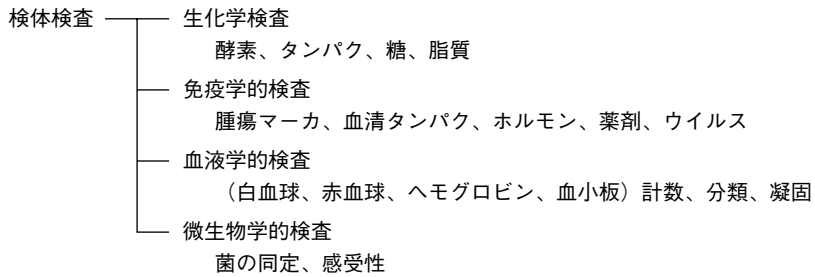
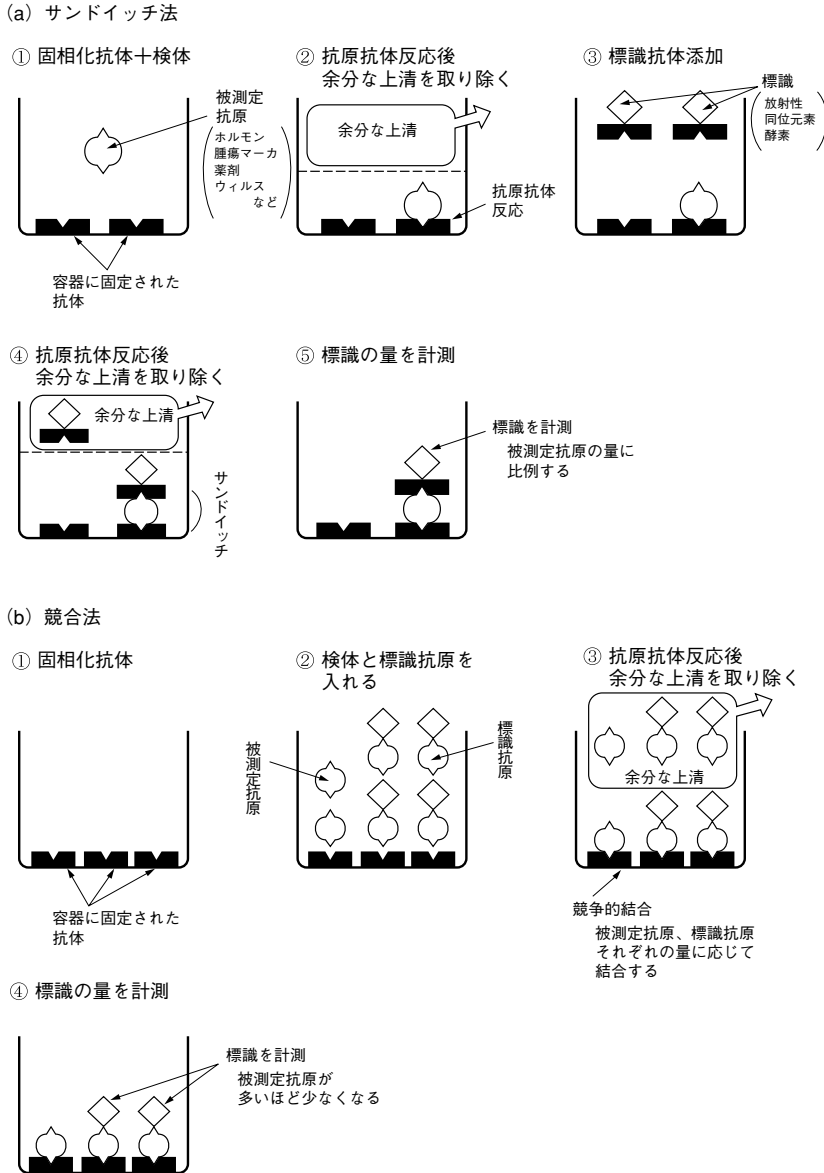


表 14-3 検体検査の分類

免疫学的検査では、抗原抗体反応の特異性を利用した測定法(イムノアッセイ: Immunoassay)が多く用いられます。イムノアッセイの原理⁹⁾を図 14-18 に示します。



THBV3_1418JA

図 14-18 イムノアッセイの原理

図 14-18(a)は、サンドイッチ法と呼ばれる方法です。①被測定抗原(ホルモン、腫瘍マーカーなど)と対応する抗体が固定されている(固相化抗体)容器内に検体をいれます。②抗原抗体反応が起こり、被測定抗原は固相化抗体と結合します。この反応は非常に特異性が高く、違う抗原が結合してしまうことはめったにありません。抗原抗体反応後、抗原と抗体が結合したものを残し、余分な上澄みを取り除きます。③今度は何らかの標識をされた被測定抗原と結合する抗体(標識抗体)を加えます。④再び抗原抗体反応を起こし、被測定抗原をサンドイッチするように結合します。また、余分な上澄みを取り除きます。⑤標識の量を光学的な方法(蛍光など)を用いて光電子増倍管で測定します。

図14-18(b)は競合法と呼ばれる方法です。①被測定抗原と結合する抗体が固定されている容器を用意します。②被測定抗原と同じ抗原に何らかの標識をつけたもの(標識抗原)と一緒に検体を加えます。③抗原抗体反応の特長の一つである競合的結合が起こり、含まれる被測定抗原と標識抗原の量に応じて抗体と結合し、平衡状態となります。抗原抗体反応後、余分な上澄みを取り除きます。④標識の量を光学的方法を用いて光電子増倍管で測定します。サンドイッチ法では、被測定抗原が多いほど多くの標識が残りますが、競合法では、逆に被測定抗原が多いと残る標識の数は減ります。ここに用いられる標識に何を使用するかによって手法が分類されています。

- ①標識に放射性同位元素を用いる
 - ・・・R.I.A. (Radioimmunoassay)
- ②標識に酵素を用いる
 - ・・・E.I.A. (Enzymeimmunoassay)

(1) R.I.A. (Radioimmunoassay)

先に説明した標識として放射性同位元素(RI: Radioactive Isotope)を使用し、試料に残ったその標識からの放射線(γ 線または β 線)をシンチレータと光電子増倍管の組合せで測定し、被測定抗原の定量を行います。標識としてよく使用される放射性同位元素は、 ^3H , ^{14}C , ^{57}Co , ^{75}Se , ^{125}I , ^{131}I などがあります(表14-4)⁷⁾。なかでも標識として多くの有益な特質がある ^{125}I は、非常によく使用されています。 ^3H , ^{14}C 以外は、 γ 線を放射するためシンチレータには γ 線の変換効率が高いヨウ化ナトリウム結晶を使用します。

ラジオアイソトープ	半減期	放射線種類	検出方法
^3H	12.26年	β	液体シンチレーション法
^{14}C	5730年	β	液体シンチレーション法
^{57}Co	270日	γ	シンチレーション・クリスタル
^{75}Se	120.4日	γ	シンチレーション・クリスタル
^{125}I	60日	γ	シンチレーション・クリスタル
^{137}I	8日	$\beta \cdot \gamma$	シンチレーション・クリスタル

表 14-4 ラジオイノムアッセイにおいて標識として利用されるラジオアイソトープ

近年、検査数、検査項目が著しく増加し、装置の自動化が進んでいます。放射性同位元素が放つ放射線の光への変換効率を上げるためヨウ化ナトリウムシンチレータに井戸型の穴が開いており、その穴に標識を含む抗原-抗体複合物が入った試験管が次々に自動挿入され、測定されていく自動ウェルシンチレーションカウンタ⁸⁾が主流になっています(図14-19)。シンチレータ部分を含む検出部は、外来放射線を遮断し、測定精度を上げるため鉛で覆われています。

^3H , ^{14}C も標識として使用されますが、放出する放射線が β 線であり、その量も非常に微弱であるため、液体シンチレーションカウンタで測定します。

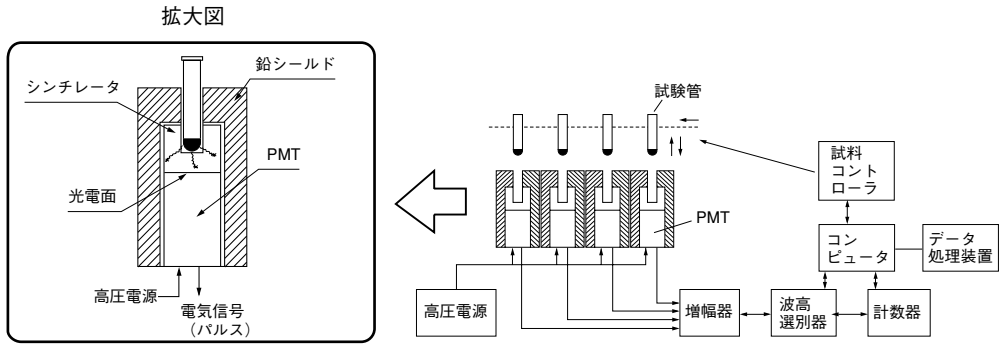


図 14-19 ウェルシンチレーションカウンタの構成例

THBV3_1419JA

(2) 発光・蛍光イムノアッセイ

酵素免疫反応(E.I.A.: Enzymeimmunoassay)と呼ばれる、放射性物質を使用しないイムノアッセイ法が研究・開発されています。

一つは蛍光イムノアッセイで、標識に蛍光物質を使用し、最後に残った抗原—抗体複合物に励起光を照射し、それによって起こる蛍光の強度や波長シフト、偏光度などを計測し、標識の量を知る方法です。感度はE.I.A.より多少高くなります。図14-20に免疫反応測定装置の概要を示します。

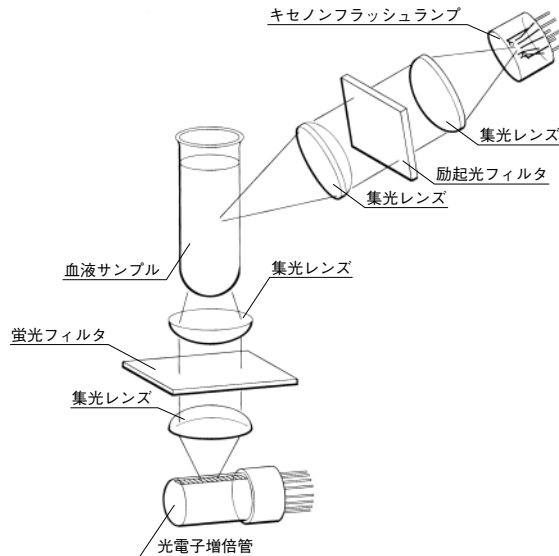


図 14-20 蛍光免疫反応測定装置の概略図

TPMHC0000JA_HB

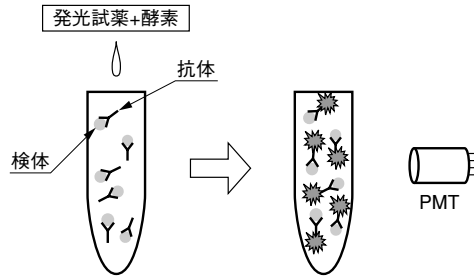
また、非放射性イムノアッセイでR.I.A.なみの高感度を達成するために、発光イムノアッセイの研究・開発が進められています。化学発光性物質、生物発光性物質を標識に使用し、最後に残った抗原—抗体複合物に含まれるこれらの標識をそれぞれの方法で発光させ、その光を光電子増倍管でとらえます。発光イムノアッセイは、以下の3種類に分類されます。

- ① ルミノール誘導体、アクリジニウム誘導体などの化学発光性物質を標識に使用する方法
 - ② E.I.A.における標識酵素の酵素活性に化学発光、または生物発光を用いる方法
 - ③ 生物発光反応の触媒、または補酵素を標識に使用する方法
- ②および③はE.I.A.の一手法であるとも考えられます。発光イムノアッセイは非常に高感度でR.I.A.と同程度の測定濃度範囲を有します。

(3) 化学発光免疫測定装置

化学発光免疫測定装置は、高感度、速い反応、広いダイナミックレンジ、検出用抗原が必要ない、ラジオイムノアッセイのように特別な設備を必要としないメリットがあります。

抗体もしくは抗原に発光試薬が標識され、酵素を加えることで化学反応を起こし、その際発生する発光を検出します。



THBV3_1421JA

図 14-21 化学発光免疫測定装置の原理

14.3 バイオテクノロジー

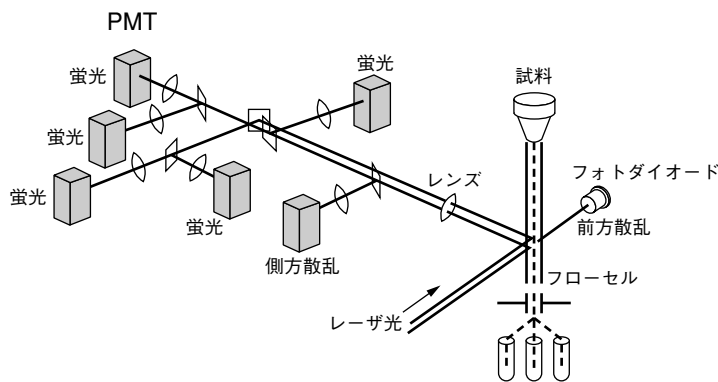
14.3.1 概要

生命科学の分野における光電子増倍管は、主に蛍光や散乱光の検出に用いられています。その主なものにフローサイトメータ、共焦点レーザー顕微鏡、DNA マイクロアレイスキャナなどがあります。

14.3.2 応用例

(1) フローサイトメータ

高速で流れる細胞や染色体の水溶液に光を照射し、細胞などから放射される蛍光と散乱光を解析し、細胞の性質や構造を解明する学問分野をフローサイトメトリと呼びます。この分野において、主に使用される代表的装置として、フローサイトメータがあります。フローサイトメータは、混じり合った細胞の中から蛍光物質によって標識された特定の細胞のみを収集する装置です(図14-22)。



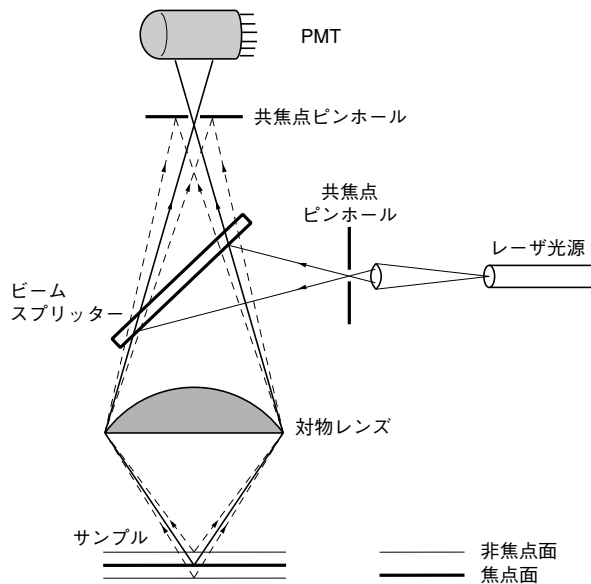
THBV3_1422JA

図14-22 フローサイトメータの主要部分

まず、蛍光プローブと呼ばれる目的に合致した蛍光物質を細胞などに付着させ、ばらばらにして懸濁液にし、細い管の中に流すと、細胞はある程度の間隔でこの管内を移動します。そこでレーザーが強く照射されている微小空間を通り、レーザーによって励起された時に発する蛍光を光電子増倍管で計測します。光電子増倍管は、それぞれの細胞の蛍光分子の数に比例した電気信号を発生します。また、照射レーザーが細胞の通過によって、前方に散乱された光を検出し、細胞の体積に関する情報を得ます。これら2つの信号を処理し、望みの細胞を含んだ部分がちょうど液滴に形成されるときだけ、その液体の流れを帯電させるような電気パルスをつくり、液滴を帯電させます。この特定の帯電した液滴は、偏向電極間を通過するとき落下方向が変えられ、それぞれの容器に分離されます。

(2) 共焦点レーザー顕微鏡

蛍光色素で染色された試料面をレーザービームで二次元的に走査しながら二次元、三次元の蛍光画像を得る顕微鏡です。極微小なスポット光を走査し、共焦点機能を用いることで高解像度の画像を取得できます。(図14-23)。蛍光色素で染色された顕微鏡下の生体試料面を、波長と同程度に細く絞った励起用レーザーで走査しかつ試料ステージを上下させることにより、焦点の合った部位からの蛍光のみをピンホールを通して光電子増倍管で検出します。光電子増倍管からの電気信号を画像処理して、二次元および三次元画像を構築します。主に生体組織の切片や細胞の観察に用います。



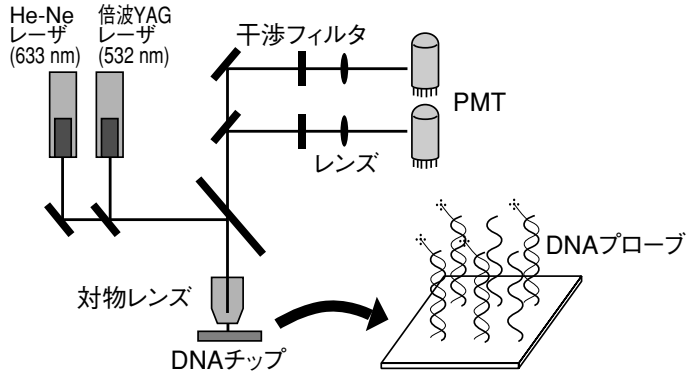
THEBV3_1423JA

図 14-23 共焦点レーザー顕微鏡

(3) DNA マイクロアレイスキャナ

膨大な遺伝子情報を解析する装置に DNA チップがあります。DNA チップは高密度に多数 DNA を配置させた基板のことで、主に半導体フォトリソグラフィ技術を使ったものと、高精度なロボットを使ってスライドガラスに分注する方法があります。DNA チップに蛍光色素で標識された DNA とハイブリダイゼーションさせ、レーザー光をスキャンしてチップ上でハイブリダイゼーションした DNA スポットの蛍光強度を測定することでターゲット DNA 中の対象となる遺伝子情報を得ます。

(ハイブリダイゼーションとは相補的な塩基をもつ 1 本鎖の DNA 同士がお互いに結合し 2 本鎖を形成することです)(図 14-24)。

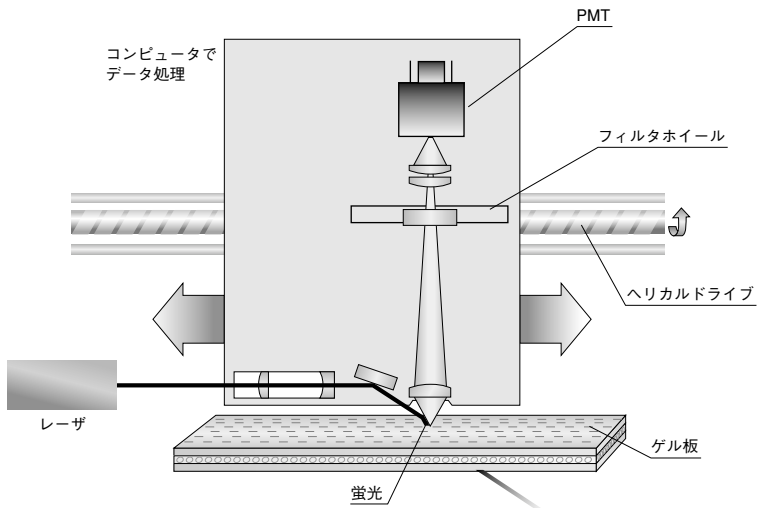


THBV3_1424JA

図 14-24 DNA マイクロアレイスキャナ

(4) DNA シーケンサ

細胞から抽出した DNA の塩基配列の解読を行う装置です。図 14-25 に DNA シーケンサの原理図を示します。抽出された DNA 片は特定の塩基と結合する色素(標識色素)とともに電界のかけられた泳動板のゲルや毛細管(キャピラリ)に注入され、電気泳動にかけられ、ゲル中を下降していきます。DNA 片は、走査ラインに達するとレーザーにより励起され、標識色素がある部分だけ蛍光を發します。この光を分光フィルタを通して光電子増倍管で計測し、蛍光が發した位置をコンピュータで計算し、特定の塩基がどこにあるかを割り出します。DNA シーケンサは、生物の遺伝学上の研究、遺伝病、腫瘍、感染症、成人病の診断や治療法の研究、遺伝子の解読などに使用されています。



THBV3_1425JA

図 14-25 DNA シーケンサの原理図

14.4 高エネルギー物理実験

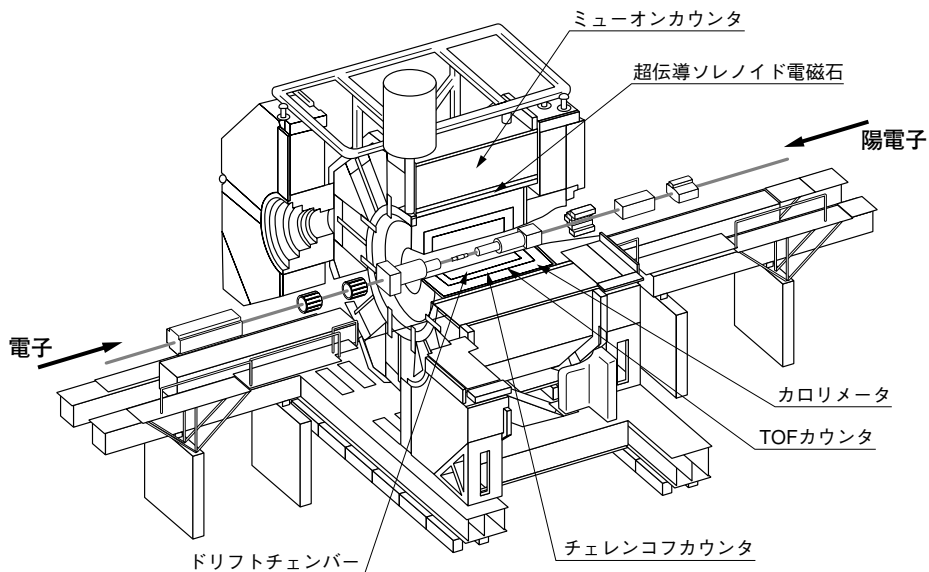
14.4.1 概要

光電子増倍管の応用として高エネルギー物理実験用検出器があります。

高いエネルギーを持った荷電粒子は、シンチレータなどを通過する際にそのエネルギーの大きさに応じた光を発します。その光を検出することにより荷電粒子のエネルギー、速度、方向を知ることができます。これらの検出技術は、常に先端を目指す高エネルギー物理学の分野には欠かせないものとなっています。

14.4.2 衝突型実験装置

衝突型実験装置では、電子や陽子などの一次粒子を加速器を用いて高いエネルギーに加速し、それらを正面衝突させて二次粒子を発生させ、それらの粒子のエネルギー、速度、運動量などを観察します。光電子増倍管を用いた粒子検出方法には、ホドスコープ、TOFカウンタ、カロリメータやチェレンコフカウンタなどがあります。

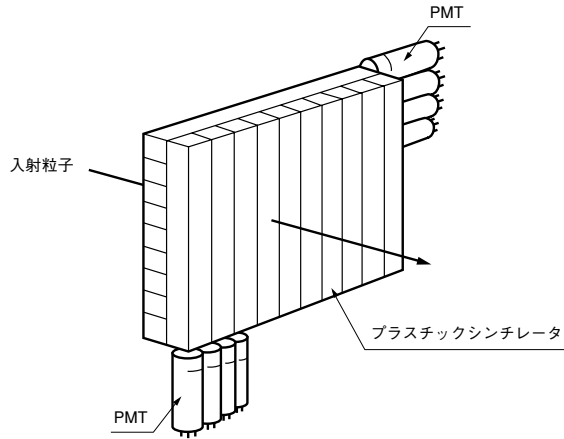


THBV3_1426JA

図 14-26 衝突型実験装置の全体像の一例

(1) ホドスコープ

図14-27はホドスコープの概略図⁹⁾です。図に示すように2層に直交して配列されたプラスチックシンチレータに荷電粒子が通過した時の位置と時間を測定するために光電子増倍管が使用されます。

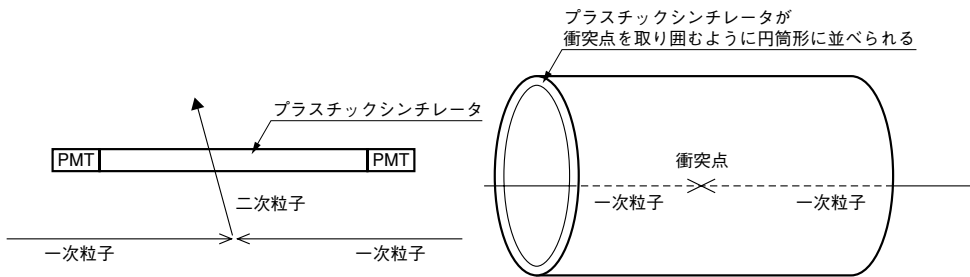


THBV3_1427JA

図 14-27 ホドスコープの概略図

(2) TOFカウンタ

TOFカウンタは粒子の飛行時間(TOF: Time of Flight)を測定し、粒子を識別する検出器です。図14-28に概略図を示します。一次粒子が正面衝突することで二次粒子が生成されます。それら二次粒子が、TOFカウンタを通過するまでの時間を計測し、その粒子の速度を検出します。通常は細長いプラスチックシンチレータの両端に光電子増倍管を配置します。そのプラスチックシンチレータが衝突点を取り囲むように円筒形に並べられます。



THBV3_1428JA

図 14-28 TOF カウンタの構成

図 14-28 TOF カウンタの全体図

(3) カロリメータ

カロリメータは、電子、光子やハドロンなどの二次粒子のエネルギーを測定する装置です。構成を図14-29に示します。TOFカウンタと同様に、衝突点を取り囲むように設置されます。カロリメータでは粒子のエネルギーを物質中に放出させ、これを光や電荷量に変換して計測を行います。通常は無機シンチレータや鉛ガラスと光電子増倍管の組み合わせが使用されます。最近では無機シンチレータの代わりに、鉄や鉛などの重い金属とプラスチックシンチレータを何層も積み重ねた構造のサンプリングカロリメータも用いられています。

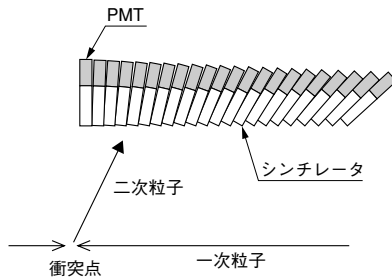
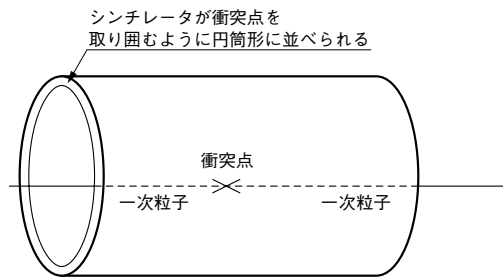


図 14-29 カロリメータの構成



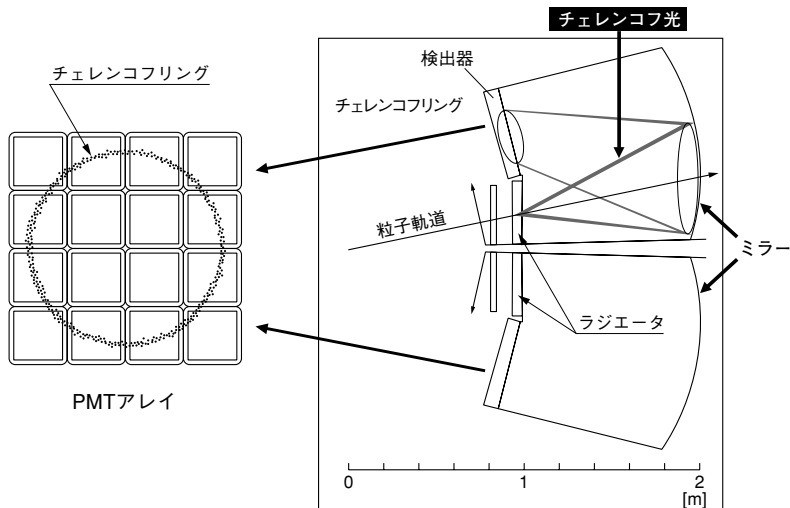
THBV3_1429JA

図 14-29 カロリメータの全体図

(4) チェレンコフカウンタ

ある一定レベル以上の高いエネルギーや速度を持った荷電粒子が、ラジエータ（光透過性の良い物質）と呼ばれる物質に入射すると、チェレンコフ光を発生します。チェレンコフ光は一種のショックウェーブで、発生した光は進行方向にリング状に広がります。このリングの大きさや明るさから、粒子の種類やエネルギーを識別します。

図14-30にチェレンコフカウンタの一種である RICH(Ring Image Cherenkov counter)の概要を示します。一定レベル以上のエネルギーを持つ粒子がラジエータに入射すると、チェレンコフ光を発生します。この光をミラーで反射し、反対側に設置された光検出器のアレイでリングの大きさを計測する装置で、粒子の種類やエネルギーの判別を行います。



THBV3_1430JA

図 14-30 RICHの概要

(5) 陽子崩壊実験・ニュートリノ観測実験

陽子崩壊観測実験は、陽子が崩壊した際に発せられる高エネルギーの荷電粒子によって発するチェレンコフ光を光電子増倍管で捕らえようとするものです。

カミオカンデ

1983年、岐阜県吉城郡神岡町（現在の岐阜県飛騨市）の神岡鉱山の地中に設けられた東京大学理学部の東京大学宇宙線研究所・高エネルギー物理学研究所による核子崩壊観測実験装置（カミオカンデ【KAMIOKANDE; KAMIOKA Nucleon Decay Experiment】）では、世界最大サイズの20インチ径光電子増倍管1,050本が地下1,000メートルに設置された大水槽の内面（壁面、床面、天井）に取り付けられ、陽子崩壊の瞬間を捕らえようと静かに睨み続けることになりました。光電子増倍管の仕様としては、さまざまな角度から飛んでくる極微弱なチェレンコフ光をキャッチしやすいよう、また製法上でも耐水圧上でも都合の良いよう半球状の受光面を持ち、大口径で高感度であるとともに時間特性や光電子の収集効率を重視しています。

1987年1月からカミオカンデは装置を改良し陽子崩壊観測に加え、太陽内部で起こる核融合反応によって発生する太陽ニュートリノの観測も行われるようになりました。これは太陽から飛んでくるニュートリノが3,000トンの超純水を満たした水槽を通過する際に、ごく稀に発するチェレンコフ光をキャッチしようという仕組みで、そのためのセンサとなるのが20インチ径光電子増倍管です。こうしてカミオカンデは、陽子崩壊の瞬間を待ち続けると同時に、約9日に1回の割合で太陽ニュートリノを検出していました。

その後、カミオカンデの大きな成果がニュースとして報じられました。1987年2月23日午後4時35分、17万光年離れた大マゼラン星雲の一角に現れた超新星1987Aからのニュートリノを世界で初めてキャッチしたのです。地球に近いところでの超新星爆発は数百年に一度しか起こらないといわれるものであり、実際、肉眼で見えるものとしては1604年以来の出来事でした。また、その後太陽ニュートリノは予想の46%であること、大気ニュートリノの欠損についての観測結果が発表されました。

スーパーカミオカンデ

1986年には、東京大学から「スーパーカミオカンデ」計画が作成されました。これは、近年の大統一理論の主流が陽子の寿命を10の34乗年と予測していることを受け、カミオカンデの性能を10～100倍にアップさせた陽子崩壊およびニュートリノの観測装置を建設する計画で、スーパーカミオカンデはカミオカンデから約200m離れた神岡鉱山の地下約1,000mに建設されました。直径39.2m、高さ41.4mの巨大水槽は、カミオカンデの約16倍にあたる50,000トンもの超純水で満たされ、使用される20インチ径光電子増倍管11,200本もカミオカンデ用にさらに改良を加えたものとなり、1996年4月より観測が開始されました。1998年には大気ニュートリノ振動（ニュートリノに質量が有る事）を発見し、人工ニュートリノによるニュートリノ振動の精密検証が行われ、人工ニュートリノによる振動も検証され、現在も観測を続けています。

カムランド

東北大学ニュートリノ科学研究センターのニュートリノ実験装置「カムランド」が、2002年1月から実験開始されています。

カムランド実験装置は、カミオカンデ跡地を利用してさらに高精度のニュートリノ検出器として建設されました。純水の代わりに1000トンの液体シンチレータを使ってニュートリノを捕らえます。液体シンチレータ中でニュートリノによる反応が起きたときの発光の強さは、カミオカンデの場合のチェレンコフ光と比べて桁違いに多いため、さらに低エネルギーのニュートリ

ノの検出を可能とします。この液体シンチレータは透明な特殊フィルムでできた直径約13メートルの丸い風船（バルーンと呼ばれている）の中に入っています。さらにこのバルーンは直径18メートル、体積約3000m³のステンレス製球形タンクに入っています。

タンクの内壁は、スーパーカミオカンデ用に改良した20インチ径(有効面17インチ)光電子増倍管が約1900本使用され、さらにその球形タンク外側は純水のタンクで囲まれており、この部分にも20インチ径光電子増倍管が設置されています。カムランドでは、ニュートリノの反応による2回の発光の時間差と光が発生してから光電子増倍管に届くまでの時間の遅れを測定し、ニュートリノ反応がバルーン内のどこで発生したかを知ることができます。

2002年、原子力発電所からのニュートリノに振動があることを発表し、太陽ニュートリノの謎はニュートリノ振動によるものと決定づけられました。日本はニュートリノ研究で世界をリードしていますが、このような優れた実験装置があることがその理由のひとつと言えます。

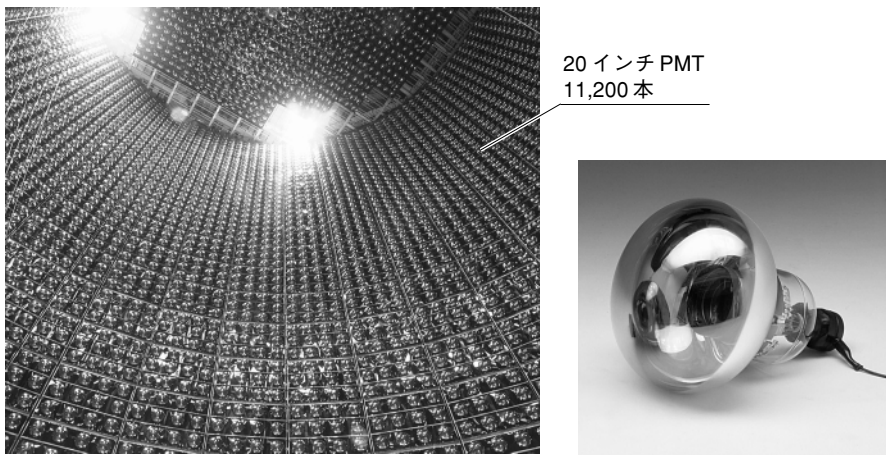
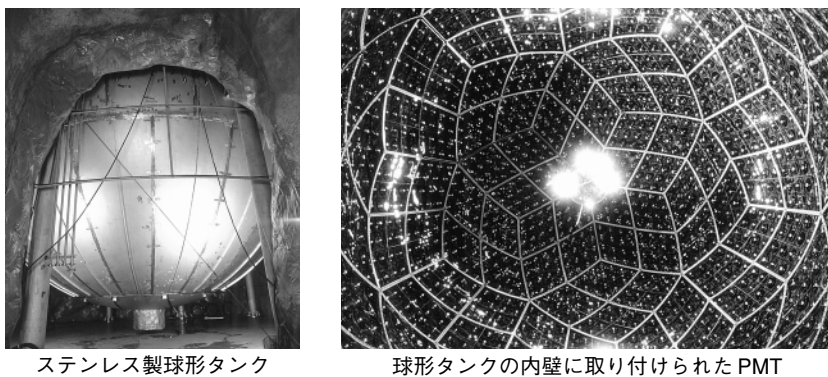


図 14-31 スーパーカミオカンデ内部と 20 インチ PMT



ステンレス製球形タンク

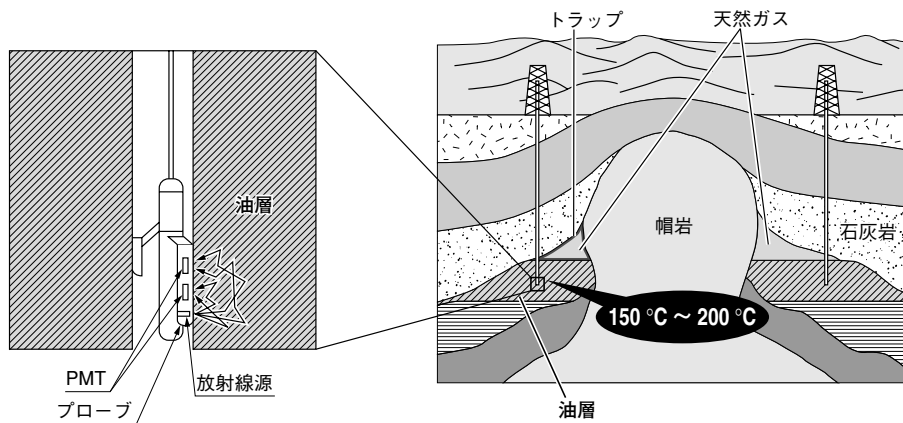
球形タンクの内壁に取り付けられた PMT

図 14-32 カムランド

14.5 石油探層

特殊な環境で使用できる光電子増倍管として、耐高温性、耐振動性を高めたものが開発されています。ここでは、これらの光電子増倍管の応用例として石油探査(Oil Well Logging)について説明します。

油田の位置、規模を知る方法として石油井検層という方法が用いられますが、その中で放射線を利用した密度検層、中性子検層、自然ガンマ線スペクトル検層などの検出器として光電子増倍管が利用されています。これらの検層は試掘された抗井に放射線源およびシンチレーションカウンタを内蔵したプローブを降ろし、地層からの散乱線あるいは自然放射能を検出、解析することにより地層の種類、密度などを知るものです。図14-33に放射線検層の測定方式¹⁰⁾と地層の断面図を表しています。



THBV3_1433JA

図 14-33 放射線検層の測定方式と地層断面図

一般的に試掘抗の深さは数千mにもおよび周囲温度は150～200℃にもなります。さらに衝撃や振動も加わり使用環境は光電子増倍管にとって非常に厳しいものになります。このような使用環境においても十分性能を発揮できる高温用光電子増倍管と呼ばれる製品が開発されています。これらの光電子増倍管は高温中でも雑音の増加の少ない特別な光電面を有し、増倍部には高温に耐えるダイノード材料を用い、また、電極構造は熱膨張や振動を考慮した設計がされています。

14.6 環境測定

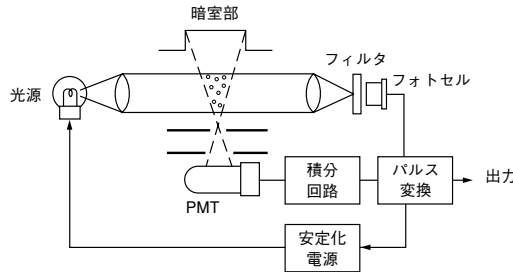
14.6.1 概要

大気中、液体中の粉じんの測定器、原子力施設での放射線の監視など環境計測器の検出器に光電子増倍管が用いられています。ここでは、これらの応用について説明します。

14.6.2 応用例

(1) ダストカウンタ

ダストカウンタは、大気中や室内などに浮遊している粒子の濃度を測定する装置です。測定方法には、光の散乱、 β 線の吸収などを用います。図14-34¹¹⁾は光の散乱を応用したもので、光の通るところに浮遊粒子があれば、光はその浮遊粒子に当たって散乱します。散乱光は浮遊粒子が多いほど強くなり、浮遊粒子の量に比例します。そこで、この散乱光を光電子増倍管で受光し、その信号を積分した後パルス信号に変換し、その出力を粒子濃度に対応させるのです。この方法は、濃度変化にすぐに追従できるので、連続動作させ経時変化をみるような場合に適しています。



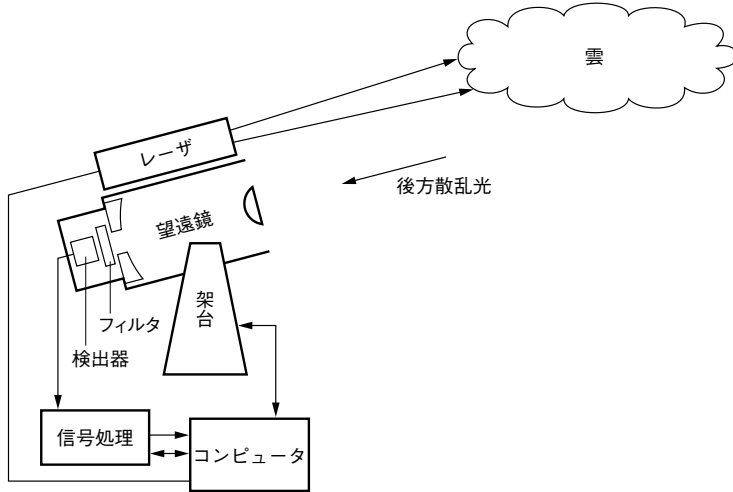
THBV3_1434JA

図 14-34 光散乱方式によるダストカウンタの構造

しかし、粒子濃度が一定でも、粒子の大きさ、屈折率などで散乱光の量が変わってしまう欠点もあります。 β 線の吸収を応用したものは、 β 線が、物質を透過するとき、物質の質量に比例して吸収されることを応用して、ろ紙に浮遊粒子を付着させ、付着させる前と後の β 線の吸収量の差から浮遊粒子質量を求めます。

(2) レーザレーダ (LIDAR)¹²⁾

レーザレーダ (LIDAR) は、パルスレーザ光を空間へ送出し、大気中の浮遊物（大気分子、エアロゾル、雲など）や飛翔体などからの散乱体からの後方散乱光を受光し、散乱体までの距離やその濃度、形状、速度などの情報を得る原理および装置です。レーザ送光部と受光部は同一場所に置かれ、レーザ送出方向を掃引することにより、3次元空間分布を得ることができます。検出器で電気信号に変換された信号はAD変換され、コンピュータにより処理されます。



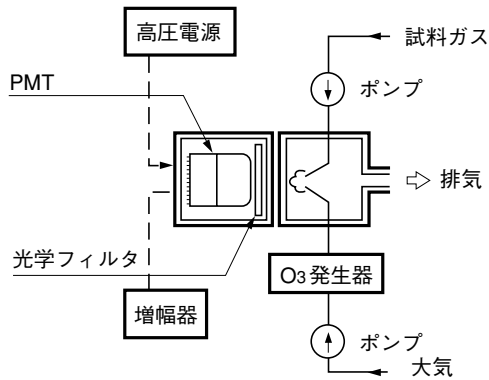
THBV3_1435JA

図 14-35 大気観測用レーザーレーダの構成図

(3) 窒素酸化物分析計

自動車や各種燃焼機関などの排出ガス中に含まれる大気汚染物質の窒素酸化物(NO_x)を測定する装置です。 NO_x は一酸化窒素(NO)と(NO_2)の総称で、これらは大気汚染防止により、その排出ガス濃度が一定の値を越えてはならないと定められています。

化学発光方式として図 14-36 に構成例¹³⁾を示しています。 NO ガスとオゾン (O_3) ガスが反応して NO_2 ガスになるとき、放出される化学発光強度を測定することで NO ガス濃度を知ることができます。この発光強度は NO ガス濃度と比例関係にあり、また排出ガス中に共存する他の成分は光を出さないことから NO ガスのみを選択的に測定することができます。

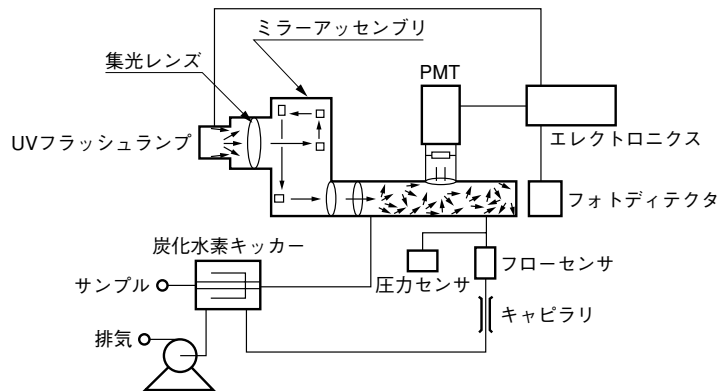


THBV3_1436JA

図 14-36 化学発光方式の構成例

(4) 硫黄酸化物分析計

環境用硫黄酸化物分析計は大気中の二酸化硫黄濃度を測定するための装置で、最近では紫外線蛍光方式が多く使用されています。この方式は大気中の二酸化硫黄に紫外線を照射して励起状態のSO₂を生じさせ、このSO₂が発する蛍光の強度を測定して大気中の二酸化硫黄濃度を求めるものです。この方式の構成例を図14-37に示します。



THBV3_1437JA

図 14-37 紫外線蛍光方式 SO₂ 計の構成例

14.7 放射線監視装置

14.7.1 概要

従来は主に原子力発電所や原子力研究機関における放射線監視に使われていましたが、近年核物質の流失が懸念されており、国境や港、空港などでそのような核物質の検査、検出が重要視されています。光電子増倍管は、そのような核物質から放出される各種放射線にあったシンチレータとの組み合わせにより、さまざまな検査装置、監視装置に使われています。

14.7.2 応用例

(1) 携帯型放射線モニタ (Pager)

携帯型放射線モニタは、税関、沿岸・国境警備等において放射性物質の密輸を監視する目的で使用されています。シンチレータと光電子増倍管を組み合わせた検出器により放射線検出を行います。携帯型であるため光電子増倍管は、小型のメタルパッケージ型が多く使用されています。携帯型放射線モニタの構成図及び写真¹⁴⁾を図14-38に示します。

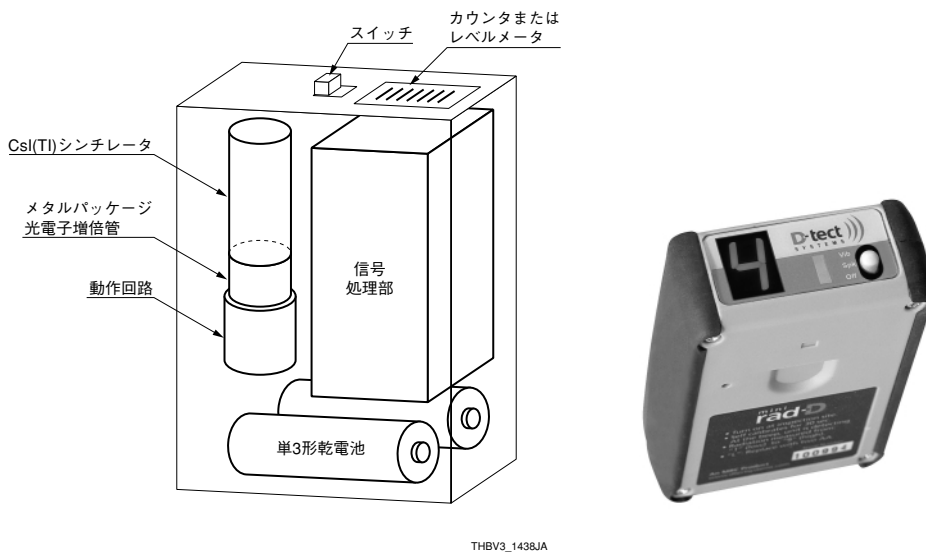
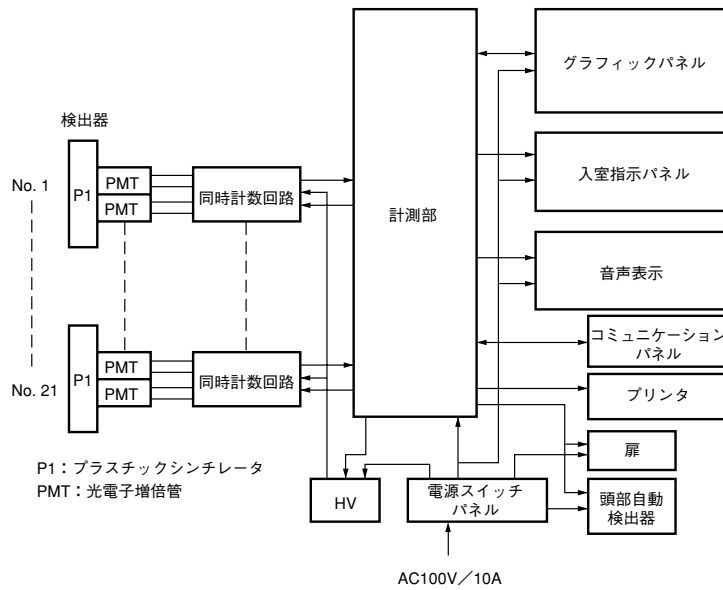


図 14-38 携帯型放射線モニタ構成図

(2) ドアモニタ

ドアモニタは、原子力発電所などの原子力施設の管理区域の出口に設置して、管理区域から外へ出る人の放射性物質による身体の汚染の有無を測定する装置です。放射線をシンチレータと光電子増倍管で検出することにより、放射性物質の有無を測定できます。図14-39はその一例¹⁵⁾で、検出部はプラスチックシンチレータと光電子増倍管を組み合わせてあります。このように、たくさん並べて使うことにより、汚染されている部位と汚染の度合いが同時に分かるようになってきます。また、検出精度を高めるため、液体シンチレーション測定と同じように同時計数回路を使用し、真の信号以外を極力計数しないようにしています。



THBV3_1439JA

図 14-39 ドアモニタのブロック図

14.8 工業計測への応用

14.8.1 概要

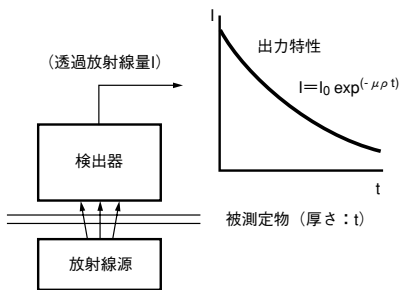
製造ラインにおける製品の非接触計測や、高精度、高品質を要求される用途に、厚さ計、レーザースキャナなどが使われており、それらの装置の光検出器として光電子増倍管が多く使用されています。

14.8.2 応用例

(1) 厚さ計

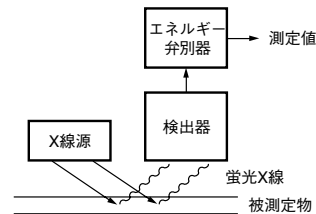
紙、プラスチック、鋼板などの製造ラインにおける厚さ計測用として β 線、X線、 γ 線などの放射線を用いた非接触計測が行われています。

これには大きく分けて2種類あり、 β 線、 γ 線の透過量を測定する方法¹⁶⁾(図14-40)と、蛍光X線量を測定する方法¹⁷⁾(図14-41)があります。



THBV3_1440JA

図14-40 透過型厚さ計の原理図



THBV3_1441JA

図14-41 蛍光X線厚さ計の原理図

強度 I_0 の入射放射線に対する透過放射線強度 I は、以下の式のように関係づけられています。

$$I = I_0 e^{-(\mu \rho t)}$$

厚さ	: t (m)
密度	: ρ (g/m ³)
質量吸収係数	: μ (m ² /g)

これは計数率に比例することから計数率の変化で厚み t が算出されます。面密度(厚さ×密度)が小さいゴム、プラスチック、紙などには β 線、鋼板などの面密度が大きい場合には γ 線が主に用いられます。フィルム、プラスチックなどの測定では赤外線を使用するものも使われています。

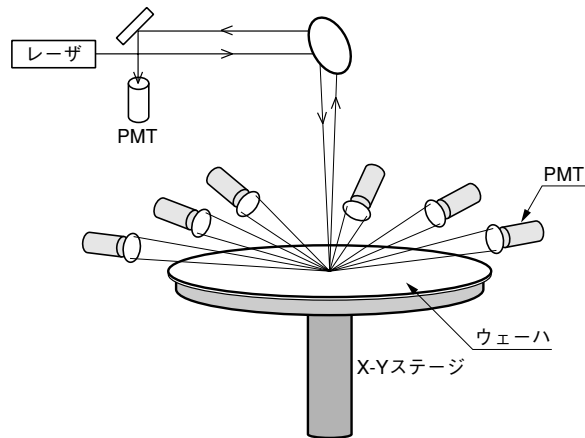
またメッキ、蒸着膜などの膜厚測定には蛍光X線による方法が使われます。蛍光X線とは、物質に放射線を当てた時の励起によって発生する物質特有のエネルギーを持ったX線で、これをエネルギー弁別することで目的の物質を定量的に測定できます。

これらの測定には検出器として比例計数管、光電子増倍管、半導体放射線検出器などが用いられ、光電子増倍管はシンチレータと組み合わせて、主に γ 線、X線の検出に使われます。

(2) レーザスキャナ

レーザスキャナは半導体ウェーハの欠陥検査装置や半導体マスクの位置合わせなどのパターン認識に広く使われています。

半導体ウェーハの欠陥検査装置では、ポリゴンミラーなどでレーザ光をスキャンするものとウェーハ自身をスキャンするものがあり、ゴミ、汚れ、欠陥などによる散乱光を光電子増倍管を用いて検出するものが一般的です(図 14-42)。



THBV3_1442JA

図 14-42 半導体ウェーハ欠陥装置の光学系の構造図

14.9 宇宙応用

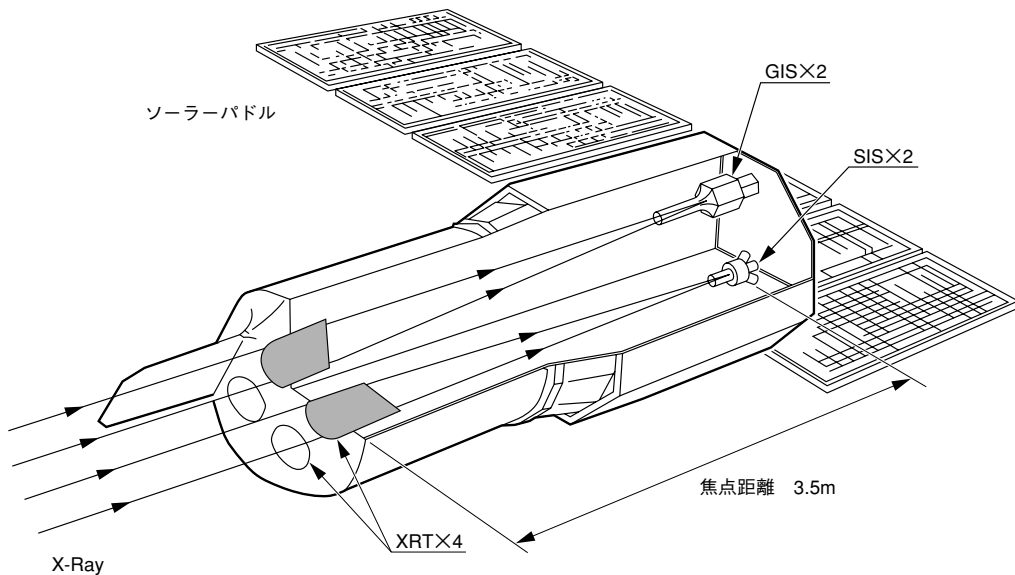
14.9.1 概要

光電子増倍管を用いた宇宙応用としては、X線、恒星観測、太陽観測、大気圏内外の環境計測、オーロラ観測などがあります。宇宙空間、大気圏内外からの各種放射物体のスペクトラム計測、天体X線計測が行われます。

14.9.2 応用例

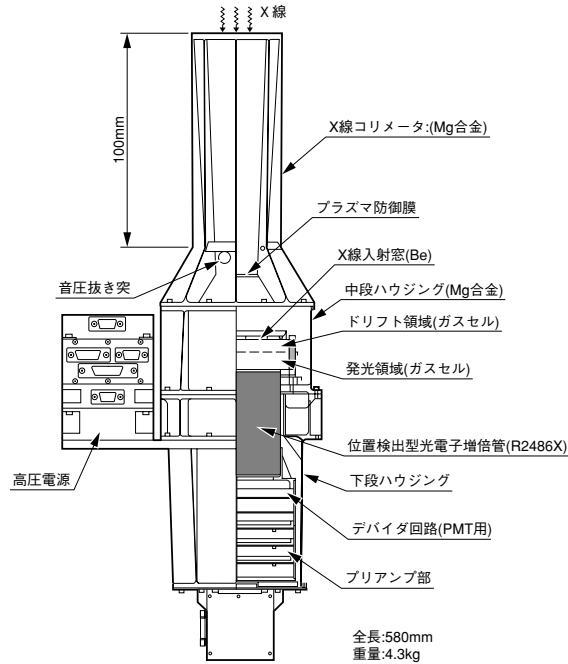
(1) X線天文衛星

図14-43に、1993年2月に軌道投入された我が国4番目のX線天文衛星「あすか」の構造図を示します。その検出部には図14-44に示すようなガスシンチレーション比例計数管に位置検出型光電子増倍管（浜松ホトニクス製：R2486X）を組み合わせた検出器（GIS:Gas Imaging Spectrometer）が用いられました。



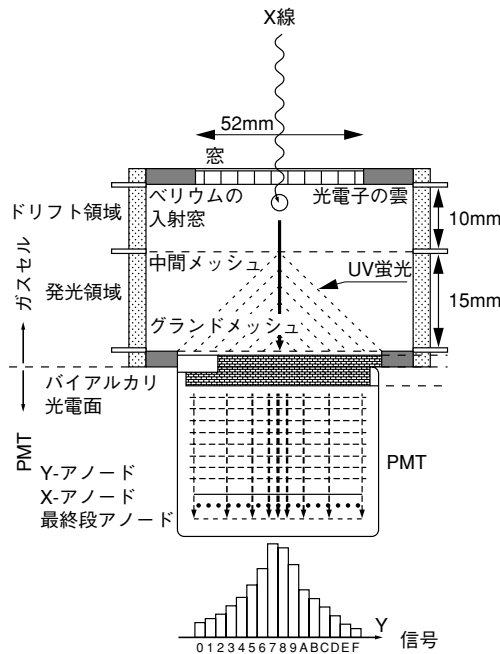
THBV3_1443JA

図 14-43 X線天文衛星“あすか”



THBV3_1444JA

図 14-44 あすかに使用された X 線検出器 (GIS 検出器)



THBV3_1445JA

図 14-45 GIS 検出器の検出原理

あすかは、超新星SN1993JからのX線検出に成功したのを皮切りに、通常銀河中心に低光度中心核の発見、電波銀河からの逆コンプトンX線を世界で初めて検出に成功しました。さらに一番の目的であるCXB（宇宙X線背景放射）の解明につながる発見として低エネルギー側のスペクトルが1keVまで単一の光子指で伸びていることを突き止めました。

(2) オゾン計測（太陽光後方散乱放射計）

大気圏には汚染した空気が膨大にあり、太陽の光と反応してオゾンが発生し、その層は徐々に広がり、太陽光が遮られることで将来的には人間をはじめとした生物に大きな影響が出てくるものと心配されています。写真のオゾン測定器は地球の大気中のオゾン濃度測定用として光電子増倍管を依頼開発されたもので、スペースシャトルから打ち出される人工衛星の分光器に組み込まれました。非常に微弱な光を電気信号に変えて測定するものです。

宇宙分野での光電子増倍管の応用は、打ち上げ時の強い振動に耐え、長期間安定して使用可能なことなど、高い信頼性が要求されますが、米国の国家航空宇宙局(NASA)/NOAAに採用され宇宙より太陽光の後方散乱光を分光計測し、オゾン層の分布を測定するSBUV/2に搭載され利用されています。

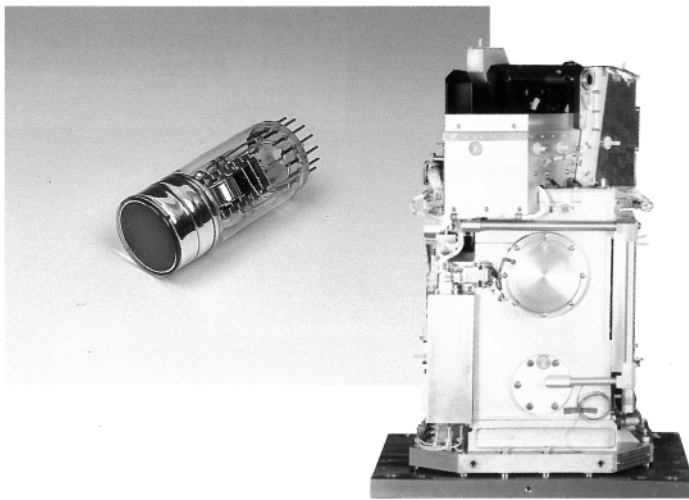


図 14-46 人工衛星 SBUV/2 に搭載された光電子増倍管とオゾン測定器

14.10 質量分析 / 固体表面分析

質量分析は、イオンの形にした試料に、電気や磁気の力を作用させる事により生じる、イオンの質量の違いによる運動の差からイオンの質量を測定し、試料の質量分析、構造解析、微量定量測定を行う分析方法です。

固体表面分析は、試料に電子線やX線を照射し、入射した電子と試料を構成する原子との相互作用により発生する光電子、二次電子、反射電子、透過電子、オージェ電子、X線などから、試料の表面状態を分析する分析方法です。検出器としてはイオンディテクタ等が用いられています。

14.10.1 質量分析装置^{18) 19)}

質量分析装置には、磁気の利用する物（磁石を用いる物）と、利用しない物の2種類に大別できます。現在、実用的に用いられている質量分析計の原理は、次の4種類です。

飛行時間差型 (TOF 型)

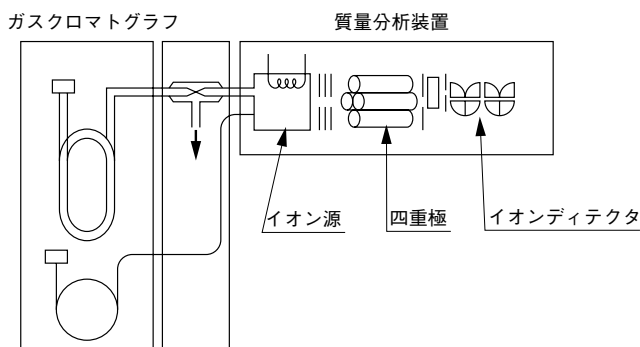
四重極型 (Q-Pole 型、イオントラップ型)

磁場型

イオンサイクロトロン型 (FTICR 型)

これらの質量分析計は、ガスクロマトグラフ、液体クロマトグラフなどと組み合わせてガスクロマトグラフ質量分析装置 (GC-MS)、液体クロマトグラフ質量分析装置 (LC-MS) として、石油、香料、医薬品、生理活性成分、環境汚染物質などの定性・定量、構造解析に使われています。

四重極型ガスクロマトグラフ質量分析装置の構成例を、図 14-47 に示します。



THBV3_1447JA

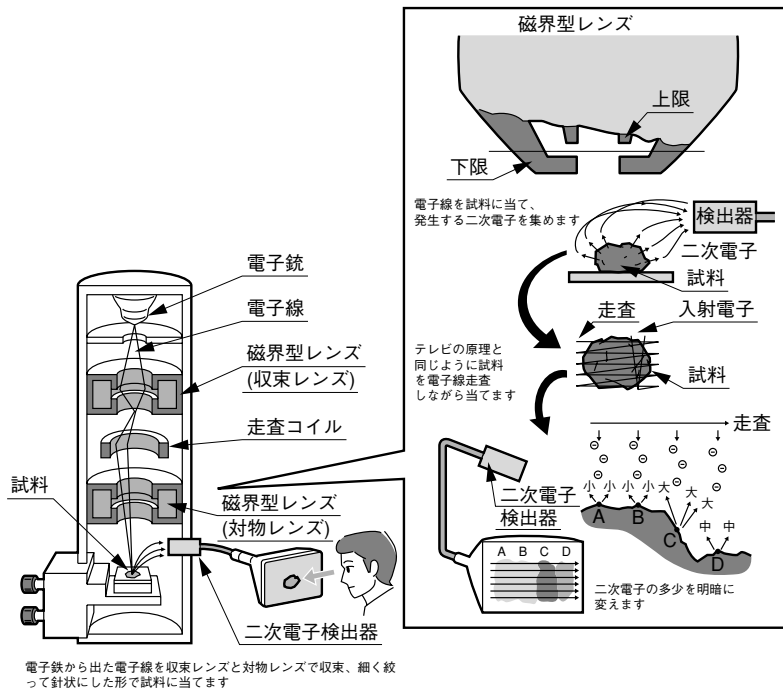
図 14-47 ガスクロマトグラフ質量分析装置の構成例

14.10.2 固体表面分析装置²⁰⁾

固体表面分析装置は、試料に電子を照射する物と、X線を照射する物の2種類に大別されます。現在、実用的に用いられている固体表面分析装置は、以下の4種類です。

- 走査電子顕微鏡 (SEM)
- 透過電子顕微鏡 (TEM)
- オージェ電子分光装置(AES)
- 光電子分光装置 (ESCA)

これらの4種類で、最も多く用いられている走査電子顕微鏡 (SEM) の構成例²¹⁾を、図14-48に示します。

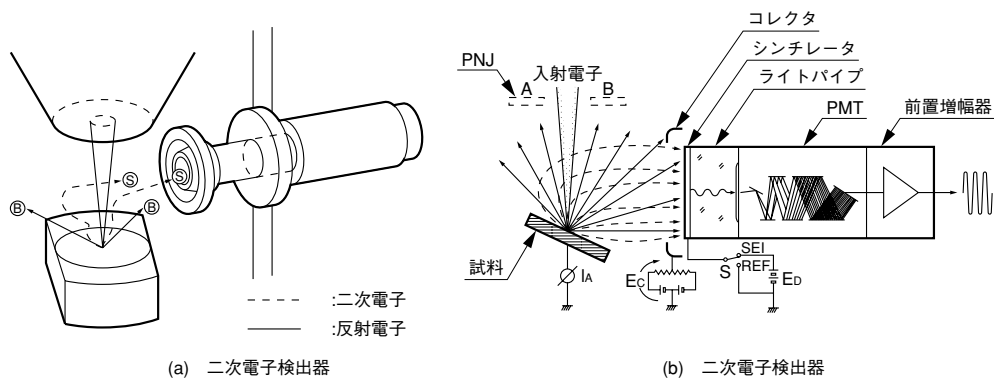


THBV3_1448JA

図 14-48 走査型電子顕微鏡のしくみ

電子銃より放出された電子は、0.5～30 kV程度に加速されます。加速された電子は、集束レンズ、対物レンズの電磁レンズ作用により、最終的に3～100 nm径まで細かく絞られた電子線となり、試料表面に照射されます。電子が照射された試料表面からは二次電子が発生し、それを、二次電子検出器により検出します。電子線は、電磁レンズによって走査する事により、試料表面上のXとYの二次元方向に、予め設定された面積を走査できるため、二次電子検出器の信号と同期することにより、ブラウン管の画面上に二次電子画像を拡大表示することができます。

試料から発生した二次電子を検出する、二次電子検出器の構造例を、図14-49に示します。



THBV3_1449JA

図 14-49 二次電子検出器の構造例

二次電子検出器は、コレクタ電極、シンチレータ、ライトパイプ、光電子増倍管、信号増幅器で構成されています。コレクタ電極とシンチレータには、二次電子を効率良く集める目的で、電圧が印加されています。試料から発生した二次電子は、そのほとんどがシンチレータに入射し、光に変換されます。変換された光は、ライトパイプを通り、光電子増倍管に入射し、検出されます。

第 14 章 参考文献

- 1) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き．第 3 版，37(1986).
- 2) 大道寺英弘：日本分光学会 測定法シリーズ．20, 129, 日本分光学会(1985).
- 3) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き．第 3 版，42(1986).
- 4) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き．第 3 版，45(1986).
- 5) 阿南功一，紺野邦夫，田村善蔵，松橋通生，松本重一郎，渡辺光夫：基礎生化学実験法．4, 32, 丸善(株)(1975).
- 6) 遠藤雄一，宮井潔：蛋白質 核酸 酵素 別冊 31, 酵素免疫測定法．13, 共立出版(株)(1987).
- 7) 川島紘一郎：イムノアッセイ入門．29, 南山堂(1987).
- 8) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き．第 3 版，228(1986).
- 9) T. Hayashi: Photomultiplier Tubes For Use In High Energy Physics(1992).
- 10) 浜松ホトニクス(株)：光電子増倍管をとりまく環境(1986).
- 11) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き．第 3 版，171(1986).
- 12) 竹内延夫他：レーザーレーダ、レーザーハンドブック (レーザー単会編) 第 27 章、オーム社 (1982).
- 13) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き．第 3 版，179(1986).
- 14) D-tect Systems, a division of ATK-mission Reserch.
- 15) アロカ(株)：ゲート表体面モニタ．
- 16) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き．第 3 版，143(1986).
- 17) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き．第 3 版，143(1986).
- 18) 土屋正彦，大橋 守，上野民夫：質量分析法の新展開 現代化学増刊号 15. 東京化学同人
- 19) 上野民夫，平山和雄，原田健一：バイオリジカルマススペクトロメトリー 現代化学増刊号 31. 東京化学同人
- 20) 日本電子：SEM の世界への招待 日本電子株式会社
- 21) (株)日刊工業新聞社：雑誌 解体新書編集部，モノのしくみ／技術のふしぎ編 No.3,42,1996

索引

【A】

Ag-O-Cs	31
Al ₂ O ₃	36
Atomic Absorption Spectrophotometer	268
Au	224
Azimuth Uniformity	144

【B】

BeO	17
BGO	271

【C】

C.F.D (Constant Fraction Discriminator)	51
CR	276
C.R.T. (Coincident Resolving Time)	53
C.T.T.D (Cathode Transit Time Difference)	52
Cockcroft-Walton Voltage Multiplier	96
Count-rate Stability	146
CPU+IF 内蔵型モジュール	165
Cs-I	30
Cs-Te	30

【D】

DA型ソケットアッセンブリ	24
Dead Time	196
DNA シーケンサ	284
DNA マイクロアレイスキャナ	283
DP型ソケットアッセンブリ	25
D型ソケットアッセンブリ	24

【E】

E.I.A. (Enzymeimmunoassay)	280
EADCI (Equivalent Anode Dark Current Input)	71
ENI (Equivalent Noise Input)	72

【F】

Fall Time	49
Fluorospectrophotometer	269

【G】

GaAs(Cs)	31
----------------	----

GaAsP	31
-------------	----

【H】

HA コーティング	257
-----------------	-----

【I】

Immunoassay	277
in vitro	277
InGaAs(Cs)	31
InP/InGaAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs)	31

【J】

JEDEC	15
JIS-C0040 (振動)	246
JIS-C0041 (衝撃)	246

【K】

K フリーガラス	36
----------------	----

【L】

LLD (Lower Level Discrimination)	129
Long Term Stability	145

【M】

MCP (Microchannel Plate)	44
MCP-PMT	187
MTBF (Mean Time Between Failure)	261
MTTF (Mean Time To Failure)	261
MgF ₂	36
MIL STD-202F	250
Multichannel Analyzer	51

【N】

NaI(Tl)	136
NEA (Negative Electron Affinity)	10
NF (Noise Figure)	133

【O】

Oil Well Logging	290
------------------------	-----

【P】

PB 材	117
------------	-----

PC 材	117
PET (Positron Emission Tomography)	270
Photopeak Drift.....	145
P.H.D (Pulse Height Distribution)	127
P.H.R. (Pulse Height Resolution)	139

【R】

R.I.A. (Radioimmunoassay)	279
RbBr	224
Recovery Time	196
Rise Time	49
RPH (Relative Pulse Height)	142

【S】

Sb-Cs	30
Sb-K-Cs	30
Sb-Na-K	31
Sb-Na-K-Cs	31
Sb-Rb-Cs	30
Short Term Stability	146
SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) ..	273
SN 比	73

【T】

T.A.C. (Time-to-Amplitude Converter)	51
T.C.P.C. (Time Correlated Photon Counting)	192
T.O.F. (Time of Flight)	53
TOF カウンタ	286
T.T.S. (Transit Time Spread)	50, 192
Transit Time	49, 192

【U】

ULD (Upper Level Discrimination)	129
UV 透過ガラス	36

【X】

X線画像診断装置	275
X線天文衛星「あすか」.....	298

【あ】

青感度指数	41
赤感度比	41
アクセサリ	83
アジマスユニフォミティ	144
厚さ計	296
アナログ方式	126
アバランシェ増倍ゲイン	213
アフタパルス	77
アルカリ光電面	14
アンギュラーレスポンス	62
安定性	63, 145
暗電流	67

【い】

硫酸酸化物分析計	293
イオンディテクタ	221
イオンフィードバック	71
位置検出型光電子増倍管	167
イムノアッセイ	277
医用装置	270
陰極側接地	85
陰極リニアリティ特性	54
陰極ルーメン感度	39

【う】

ウェルシンチレーションカウンタ	279
ウォーミングアップ	64
宇宙応用	298
宇宙線	71

【え】

エージング	64
液体シンチレーション	279
エネルギーギャップ	15
エネルギー分解能	139
演算増幅器	85, 107

【お】

オゾン計測	300
オペアンプ	107
温度特性	234

【か】

外部回路との接続	102
----------------	-----

回復時間	196
外部光電効果	14
カウントレートスタビリティ	146
化学発光方式	292
化学発光免疫測定装置	281
下降時間	49
ガスクロマトグラフ	301
加速係数	263
カップリングコンデンサ	100, 104
カロリメータ	287
環境性	233
環境測定	291
間欠動作 (エージング効果)	260
ガンマカメラ	273

【き】

気圧の影響	254
規格化長	191
共焦点レーザ顕微鏡	283
共振	243

【く】

空間電荷	54
空間分解能	176
グリッド型ダイノード光電子増倍管	182
クロストーク	169
クロスワイヤアノード	182

【け】

携帯型放射線モニタ	294
ゲーティング回路	97
ゲート機能	163
ゲート付 MCP-PMT	203
蛍光イムノアッセイ	280
蛍光寿命測定	50
蛍光分光光度計	269
経時変化 (寿命) 特性	63, 258
計数効率	127
計数損失	160
計数率依存性	146
計数率の直線性	131, 200
ゲイン	46, 191, 213, 227
原子吸光分光光度計	268
検出効率	46, 127
検体検査	277

【こ】

高圧電源	23, 102
高エネルギー物理実験	285
高温用光電子増倍管	236
高温用光電子増倍管のプラトー特性	150
高温用低暗電流バイアルカリ	31, 236
工業計測への応用	296
抗原抗体反応	277
光子計数回路	27
光子計数法	125
高磁界用光電子増倍管	241
高出力直線性デバイダ回路	95
合成石英	36
高速応答性	93
高速光電子増倍管	111
光電効果	10, 14
光電子走行時間差	52
光電子増倍管の歴史	11
光電子増倍管モジュール	153
光電子放出	14
光電変換	14
光電面	10, 14, 30
故障判定基準	263
故障モード	261
故障率	261
固体表面分析装置	302
コッククロフト	96, 154
コパールガラス	36
コンバージョンダイノード	222
コンピューテッド・ラジオグラフィイー (CR)	276
コンプトン効果	136

【さ】

サーキュラケージ型	11, 16, 44
最大計数率	131
サイドオン型	15
雑音	73, 146
雑音指数	73, 133
サファイア	36
酸化ベリリウム (BeO)	17, 223

【し】

シールド	113
磁化	242
紫外、可視、赤外分光光度計	267
磁界の遮蔽	113
時間相関光子計数法	192

時間特性	48
しきい値の設定	129
磁気シールド	113
磁気シールドケース	114
磁気特性	240
仕事関係数	15
湿度の影響	239
質量分析装置	301
遮断周波数	106
周囲温度の影響	234
周囲磁界の影響	240
周囲電位の影響	255
収集効率	45
重心位置	178
周波数特性	118
出力直線性	85
出力波形	104
寿命特性	212, 231
主要核種	274
ショートタームスタビリティ	146
衝撃	243
消光比	164, 203
上昇時間	49
衝突型実験装置	285
信号出力系	101
信号対雑音比	73
シンチレーション計数法	135
シンチレーションファイバ	171
シンチレータ	136
振動	243
信頼性	258
信頼度	261
信頼度試験	263

【す】

スイッチングレシオ	98
ストリップ電流	196

【せ】

正弦波	245
積層セラミック光電子増倍管	247
石油探層	290
接続回路	28, 83
セトリングタイム	156

【そ】

ソーラブラインド	30
----------	----

走行時間	192
相対パルス波高値	142

【た】

第一ダイノード	13
耐衝撃性	243
耐振動	243
耐振用光電子増倍管	246
ダイノード	43
ダストカウンタ	291
短波長限界	38
ダンピング抵抗	93
端末効果	119

【ち】

窒素酸化物分析計	292
チェレンコフカウンタ	287
チャージセンシティブアンプ	109
チャンネル径	191
チャンネル長	191
長波長限界	38
直線性	54
直流動作時の出力直線性	86
直流法	56
直流モード	54

【つ】

ツェナーダイオード	84
-----------------	----

【て】

テーパーデバイダ回路	90
抵抗	100
デカップリングコンデンサ	88, 100
デジタル（光子計数）方式	126
テトロード	241
デバイダ回路	24, 84
デバイダ抵抗	101
デバイダ電流	85
電圧出力型モジュール	158
電圧配分	90
電圧ヒステリシス特性	66
電圧分割回路	84
電界の遮蔽	113
電界放出	71
電荷増幅器	109
電源回路	154

電子打込み型	44
電子打込みゲイン	210
電子軌道	16
電子親和力	15
電子走行時間	49
電子走行時間分布	192
電子増倍管	221
電子増倍部	17
電子対生成	136
天然放射性核種	146
電流出力型モジュール	158
電流・電圧変換	105
電流ストレス	259

【と】

ドアモニタ	295
等価暗電流	71
透過型	33
透過率の劣化	249
動作時湿度	239
同時計数法	146
導電性塗料	255
トライオード	241
トランジスタを使用したデバイダ回路	95
トランジットタイムスプレッド	50
ドリフト（経時変化特性）	63, 217

【な】

内部光電効果	14
--------------	----

【に】

二次電子	11
二次電子放出材料	17
二次電子放出比	18
二次電子面	11
入射位置によるユニフォミティ	60
入射窓材	36
ニュートリノ観測実験	288

【ね】

熱電子放出	68
-------------	----

【の】

ノイズ	227
-----------	-----

【は】

パーマロイ	113
バイアルカリ	30
バイオテクノロジー	282
パイルアップ	105
ハウジング	113
波長範囲	38
バックグラウンドノイズ	147
発光	253
発光・蛍光イムノアッセイ	280
発光分光分析装置	268
パルス計数法	77
パルス出力直線性対策	91
パルス直線特性	96, 154
パルス動作時の出力直線性	88
パルス波高分布	127
パルスペア分解能	131
パルス法	57
パルスモード	54
パルスリニアリティ	55
反射型	32
半導体ウェーハの欠陥検査装置	297

【ひ】

光計測方式	28
光の遮蔽	113
光ヒステリシス特性	65
光分析装置	266
飛行時間差	301
非磁性材製光電子増倍管	242
ヒステリシス特性	65

【ふ】

ファインメッシュダイノード	241
フォトピークドリフト	145
不感時間	196
フラットパネル型光電子増倍管	176
プラトー特性	148
プラナーイメージング装置	274
フローサイトメータ	282
分光感度特性	32

【へ】

ベースラインシフト	104
平均寿命	261
ヘッドオン型	15

ベネシアンブラインド型	44
ヘリウムガスの影響	248
偏光特性	78

【ほ】

硼硅酸ガラス	36
放射感度	37
放射線監視装置	294
放射線の影響	249
飽和現象	55, 87
飽和特性	116
ポジトロン CT	53
保存温度	239
保存時湿度	239
ボックス型	44
ボックスライン型	17
ホドスコープ	286

【ま】

マイクロチャンネルプレート内蔵光電子増倍管	187
マイクロフォニックノイズ	243
窓材発光	253
マルチアノード型光電子増倍管	169
マルチアノード MCP-PMT	176
マルチアルカリ	31
マルチチャンネル波高分析器	51, 127
マルチフォトエレクトロン分解能	213

【む】

無機シンチレータ	137
----------------	-----

【め】

メッシュ型	44
メタルチャンネルダイノード	44, 176
免疫学的検査	277

【ゆ】

有機シンチレータ	137
ユニフォミティ	59, 144, 170, 216

【よ】

陽極 (アノード)	18
陽極暗電流	67
陽極側接地	85

陽極側接地法	102
陽極感度の温度特性	234
陽極電流	46
陽極リニアリティ特性	54
陽極ルーメン感度	40
陽子崩壊実験	288

【ら】

ラインフォーカス型	44
ラジオアイソトープ	279
ランダム振動	244
ランダム波形	245

【り】

リード線	101
リップルノイズ	156
利得係数	191
リニアリティ	54
リニアリティ測定法	56
量子効率	37

【る】

ルーメン感度	38
--------------	----

【れ】

レーザスキャナ	297
レーザレーダ (LIDAR)	291
冷却	122
冷却器	122
冷却時	239

【ろ】

ローパスフィルタ	93, 156
漏洩電流	70
ロングタームスタビリティ	145

メ 七

「光電子増倍管」 編集委員会

編集長	袴田 敏一
編集委員	久米 英浩
	岡野 和芳
	富山 公之
	神谷 昭文
	吉澤 祐二
	松井 永幸
	大津 一郎
	田口 武司
	河合 克彦
	山口 晴久
	鈴木 一省
	鈴木 誠司
	森田 哲家
編集事務局	内園 大輔

光電子増倍管
—— その基礎と応用 ——

平成5年4月20日初版
平成10年10月20日第2版
平成17年8月1日第3版

著者 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会

編集 有限会社インプロジェクト
〒435-0046 浜松市丸塚町249-1
電話 (053) 467-0108 FAX (053) 467-0109

発行 浜松ホトニクス株式会社
電子管営業部
〒438-0193 静岡県磐田市下神増314番地の5
電話 (0539) 62-5245 FAX (0539) 62-2205

©HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Electron Tube Division 2005
<無断複写・転載を禁ず> TOTH9001J03