

微細加工によるマイクロ光電子増倍管の開発

河原林 順

①

# 微細加工によるマイクロ光電子増倍管の開発

Development of Micro Photomultipliers by Using Micro Machining Technique

指導教官 中沢正治教授  
井口哲夫助教授  
高橋浩之講師

東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻

博士課程 37142

河原林 順

目次

1. はじめに	1
1.1. 微細加工技術について	2
1.2. 放射線位置検出器について	4
1.3. 放射線計測分野で使用されている微細加工技術	6
1.4. 新しい測定対象	9
2. 概念設計	13
3. 電子増倍部 (ピラミッド型)	23
3.1. 計算による各種性能評価	24
3.1.1. 電子増倍度	30
3.1.1.1. ラージモデル	31
3.1.1.2. 100 $\mu$ mモデル	32
3.1.2. 時間応答性	34
3.1.3. 波高値	34
3.1.4. 位置分解能	37
3.1.5. 電子増倍度・位置分解能を悪化させる要因	37
3.2. 製造プロセス	40
3.2.1. ラージモデル	43
3.2.2. 100 $\mu$ mモデル	43
3.3. 各種特性評価実験	53
3.3.1. 電子増倍度測定	53
3.3.1.1. ラージモデル	53
3.3.1.2. 100 $\mu$ mモデル	57
3.3.2. イメージ測定	57
3.4. ピラミッド型まとめ	66
4. 電子増倍部 (斜め穴型)	68
4.1. 計算による各種性能評価	69
4.1.1. 電子増倍度	73
4.1.2. 時間応答性	81
4.1.3. 波高値	81

4.1.4. 位置分解能	84
4.1.5. 電子増倍度・位置分解能を悪化させる要因	84
4.2. 試作製造プロセス	87
4.3. 斜め穴型まとめ	89
5. 読み出し部	94
5.1. 設計	95
5.2. 製造プロセス	98
6. 結論	104

謝辞

論文目録



第一章  
はじめに

近年半導体加工技術を応用したマイクロマシニングの研究が盛んであり、さまざまなセンサ類（ガスフローセンサ、圧力センサ、磁気センサ、加速度センサ等）の小型化が図られている。本論文では、放射線計測に対する応用として、微細な光電子増倍管を作成し、それらを二次元状に配置することにより、高計数率動作可能かつ、位置分解能に優れた二次元放射線位置検出器の作成を目標とした研究を行った。

### 1.1. 微細加工技術について

微細加工技術[1][2][3][4]は、基本的には半導体加工技術から派生した技術である。放電加工やLIGAプロセス[5][6]、ブラックシリコン[7]など、微細加工に特有の技術を生み出し、現在一つの先端加工分野として発展しつつある。その加工法の代表的なものの一覧を表1に示す。この加工技術の応用も徐々に実用化段階を迎えており、加速度センサ開発等の一部の研究成果は実際に実用段階へ移りつつある。また、バイオセンサ[8]などのセンサ開発や、微細光学部品[9]の構成など、センサー以外の分野でも研究が進んでいる。微細加工の研究領域は、センサー、メカロトニクス、光学部品製造、医療分野など、広い専門分野に横断的に広がっていることに特徴があり、分野横断的研究テーマである。本研究では、この広い応用分野中で放射線センサーを研究対象とするため、以下ではセンサー加工について論ずることにする。

この微細加工技術の特徴としては以下のものがあげられる。

#### 利点

1. 数mmから数 $\mu$ mのオーダーの大きさで物体を加工することが出来る。
2. ICプロセス技術から派生してきた加工方法が多くみられ、半導体回路との相性がよい。そのため、小型化したセンサーのインテリジェント化が可能である。
3. マスク転写を基本とするため、小型の構造を作ると同時に、ICプロセス技術と同じく同一構造を大量に作成することが可能である。
4. ICプロセス技術と異なり、ある程度の3次元的な加工が可能である。
5. 加工素材を半導体に限定しない。金属やプラスチックを加工する手法も存在す

名称	エッチング		ブラックシリコン	LIGAプロセス	放電加工	光造形法
	ウェットエッチング	ドライエッチング				
方法	フッ酸やKOHなどの溶液により対象物を溶かして加工する。異方性等方性エッチング及び犠牲層エッチングがある。	反応性のガスにより対象物を溶かして加工する	ドライエッチングによって形成された溝にモールドを行い加工する	X線レジストであるPMMAの厚膜を放射光などの平行性の高いX線により露光し、レジストそのものを加工対象とする。このうち打出し成形などを行う	金属間の放電により電極が削れる現象を利用して加工	紫外線などの光に対して硬化する樹脂を使用。樹脂を徐々に硬化させながら引き上げていくことにより形作る
位置決め方法	マスク	マスク	マスク	マスク	微動台	光スキャン
主加工対象	シリコン シリコン化合物 金属	シリコン シリコン化合物	シリコン シリコン化合物	金属 樹脂	金属一般	光硬化性樹脂
加工可能形状	垂直溝 ピラミッド溝 膜	垂直溝 膜	垂直壁	垂直壁 垂直溝 あるいはこれを重ねたもの 斜めに露光した場合は斜め壁溝	垂直孔	自由
容易性	露光以外は極めて容易	反応炉を使用する必要あり	ドライエッチングに同ずる	露光以外は容易	容易	容易
細点	クリーンルーム、露光装置が必要	クリーンルーム、露光装置が必要	クリーンルーム、露光装置が必要	放射光リングが必要	加工電極が削れてしまい高アスペクト比はむづかしい	引き上げの際に段々が形成されてしまう。

表1 微細加工の一覧表。代表的な加工法のみ表示してある。このなかで、エッチングプロセスは、真空蒸着法などの薄膜生成技術とあわせて使用されることが多い。また、複数のマスクを使用して同じプロセスを繰り返すことにより、より複雑な形状を作成することが可能である。

る。

6. 構造物が小さくなるためスケーリング則が働き、相対的な物理量の比が変わる。このため、時間応答性が速くなる等の影響が出てくると同時に、効率も変化してくる。

#### 欠点

1. 完全に自由自在な3次元形状を形作ることができない。(プロセスによって得意不得意が存在する)これは素材とも関係している。
2. 対象が小さいため人間の手で直接組み立て操作するには難がある。組み立て工程に工夫が必要である。
3. 均一性について難がある。(半導体製造技術での歩留まりの問題と同じ)
4. クリーンルームに準じた施設で加工するのが望ましく、露光装置など特殊な装置が必要となることが多い。
5. 均一性について注意する必要がある。(半導体製造技術での歩留まりの問題と同じ)

以上のような特徴をいかした、新しい原理をもったセンサーの開発が望まれているが、現在のところ通常のセンサーの小型化を目指した研究が多い。マイクロマシン技術の歴史は浅く開発の緒についたところであり、技術のデータ蓄積は浅く体系化もこれから進められていくところである。

#### 1.2. 放射線位置検出器について

現在良く用いられている二次元放射線位置検出器としては、医療、物性研究などの広い分野で使われているイメージングプレート (IP) [10][11][12]、高エネルギー物理実験等で使われているマイクロギャップチェンバー (MGC) [13][14][15]やマイクロストリップチェンバー (MSGC) やMWPC/ドリフトチェンバーなどのガスカウンター、及び真空中の電子デバイスであるマイクロチャンネルプレート (MCP) (+シンチレータ) の三つが代表的なものとしてあげられる。

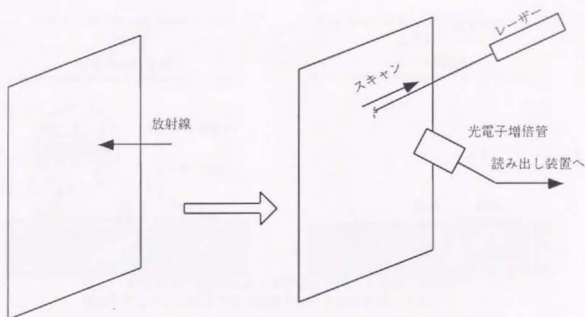


図1-1 IPの概念図。フィルムのように照射した後、レーザーをスキャンさせ発光を光電子増倍管で捕らえる。そのデータは計算机上で二次元像に再構成される。

IPはフィルムのような格好をしており光輝尽性発光材で構成されている[16]。レーザー光で表面をスキャンさせ、その際の発光をPMTで逐次読み取ることにより、X線などの放射線により生成される輝尽発光センターの位置分布を像として読み出すのが通常である(図1-1)。このため、レーザー読み取りに数分程度の時間がかかってしまい、オンライン測定ができないという欠点があった、一方、レーザー光の励起スペクトルの波長と光輝尽発光スペクトルのピーク波長は200nm以上離れているため、高いS/N比を実現できる。また、位置分解能は読み出しの際のレーザースポットの直径により決定され(IP表面の保護層によりレーザー光が散乱されるため100 $\mu$ m程度が限度と考えられている)、感度や信号直線性に優れ、位置による感度の違いも小さいため、放射線のイメージを手軽に取得することができる。

ワイヤを用いたガスカウンターは高エネルギー実験で古くから使用されてきているが、二次元検出器にするためには多線式[16]にしなければならず作成が困難である点や、信号のガス増幅率の位置依存性が出てくるといった欠点があった。現在高エネルギー加速器の分野では、測定対象粒子が高いエネルギーを持っているため信号増幅の必要が特にない場合は、半導体を使用した固体ストリップ検出器[17]に置き換えられはじめている。また、信号増幅機構を持つMGCやMSGC(図1-2)の研究もされており、加速器のトラック検出器やX線イ

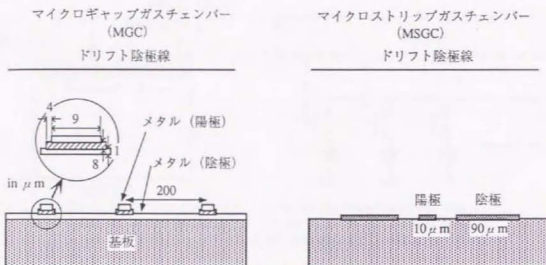


図1-2 MGC[15]とMSGC[14]の概念図。どちらも陽極近傍で電子雪崩を起こすことにより信号増幅を行うことを原理とする。

メージ検出器として使用するための研究がなされている。

MCP+シンチレータは、MCPの増幅度を高く取ることにより、微小な信号を捕らえるのには向いているが、MCPの構造上出力電流を大きくできないという欠点があり、ダイナミックレンジの点に問題が残る。

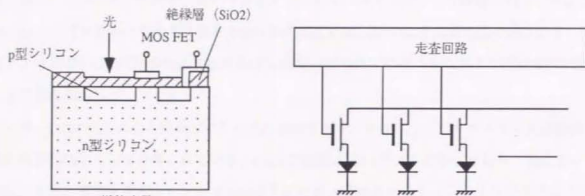
このように、IPはオンライン測定ができず、ガスカウンターは安定性に問題が残り、MCPは高計数率に向かないという欠点があるため、現状では目的に応じて検出器を選択しなければならない。

### 1.3. 放射線計測分野で使用されている微細加工技術

既存の放射線検出器の中で、微細加工技術が使用されているものには、MOSイメージセンサ[18]、電荷結合素子 (CCD)、MCP、MGC、MSGCがあげられる。

MOSイメージセンサやCCDはイメージ型光センサであり、放射線計測でのこれら光センサの使用は、平面状の放射線-光コンバーターと組み合わせ、放射線の画像(一次元の場合は位置)を記録するのが通常である。MOSイメージセンサもCCDも、共に通常の半導体加工技術を使用して作られており、1.2で述べられた検出器とは異なり各ビクセルごとに信号を増倍する機能はない。しかし、バルチエ素子などを利用して-50℃まで冷却することにより、





単位素子

図1-3 MOSイメージセンサー (SSPA; Self Scanning Photodiode Array) の概念図。各ピクセルはpnフォトダイオードとFETにより構成され、それらからの信号は、X-Yアドレス式位置決め方式により読み出しされる。

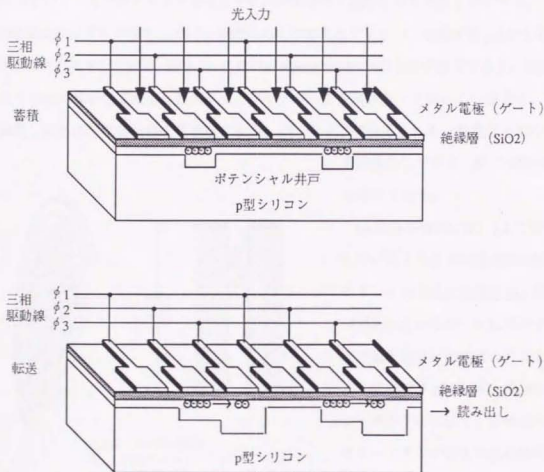


図1-4 CCDの概念図。

ノイズを減らすことができ、長時間露光して信号をためS/N比を向上させることが可能である。

MOSイメージセンサは、MOSトランジスタとpn接合型フォトダイオードを組み合わせたも



のであり、一つのピクセルが一組のトランジスタとフォトダイオードで構成されている。このため、一ピクセルのサイズは数十 $\mu\text{m}$ のサイズとなる。図1-3にその概念図を示す。また、各ピクセルごとにFETを組み込まなければならないため以下に述べるCCDより画素数は少なくなる傾向がある。

一方、CCD[19][20][21]は民生用に広く使用されており、一般的なビデオカメラや天体観測用の冷却型CCDとして使用されている。CCDの構造は図1-4のようになっており、光によって生成される電荷を表面ポテンシャルの井戸にため、これをアナログシフトレジスタによりバケツリレー方式で読み出し電極まで輸送し、そのタイミングと読み出し電極の位置によりイメージを再構成する。構造がMOSイメージセンサよりも簡単なため、様々なサイズのものが作られていて、ピクセルサイズ数 $\mu\text{m}$ でピクセル数 $2k \times 2k$ のものも作成されている。

MCP[22]は鉛ガラス中空ファイバーを束ねたものでありファイバーの径が数 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ のものが市販されている(図1-5)。板厚は0.5mm~1.0mmのものが通常であり、製造方法としてはIC半導体加工技術を使用せず、ファイバーを束ねプレート状にし、中空化、水素還元処理、表面に電流供給用の電導層を設定、のステップで作成される。高真空中での使用

を前提としており、鉛ガラスが主な材料となる。

MGC及びMSGCは、1.2.で述べられているようにガス型の検出器である。その作成には微細加工技術が使われているが、主にデバイスの表面電極及び絶縁層の作成方法として使用されている。電極のエッチング以外にも、絶縁部のチャージアップ防止のためGeなどの半導体をドーブルし電荷を逃がす工夫をしているものが用いられている。

このように、これまでの放射線

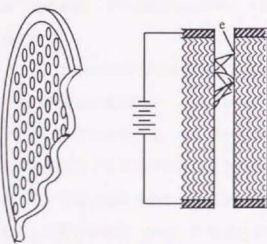


図1-5 MCPの概念図。左図のように多数の穴が空いた板状の構造をしていて、各の穴が右図のように電子増倍を起こす構造をしている。

検出分野における微細加工の応用は、CCDなどのIC半導体製造そのものか、あるいはMGC等の表面電極加工等、簡単な二次元状のものに限られていて本格的な三次元構造が応用されているとは言いがたいのが現状である。MCPの形状も三次元ではあるが、中空ファイバーを束ねるだけの単純な加工法であり、ファイバー製造プロセスを応用しただけである。

#### 1.4. 新しい測定対象

ここで放射線計測分野の一つの測定対象として、次世代放射光[23]などの施設によって作り出される強力X線が新しく登場してきた。この強力なX線は、たんぱく質の結晶解析や医療用イメージングに適用することにより優れた結果が得られるものとして、ヨーロッパではフランスのグルノーブルにESRF(European Synchrotron Radiation Facility)が、アメリカではアルゴンヌにAPS(Advanced Photon Source)が稼働を始めており、日本では播磨にSPring-8(Super Photon ring-8)の建造が進んでいる。しかし、これらのためのX線用イメージ検出器として上記のものは適用が難しい。X線の強度が強すぎてMCPの計数率特性では飽和して測ることが不可能であり、ガスカウンターは解像度が悪く信号処理に時間がかかるため適用困難である。播磨で建造が進んでいるSPring-8では、イメージングプレートで測定する予定で系が組まれている。

ここで、1.1.で述べられた微細加工技術の特徴のうち利点の「3.マスク転写を基本とするため、小型の構造を作ると同時に、ICプロセス技術と同じく同一構造を大量に作成することが可能である。」に注目すると、センサーを小型化しアレイ状に並べることによりイメージセンサを容易に作成することができると思われる。

そこで、広い分野に適用可能であり、かつ実時間で画像が読み出せる二次元検出器の開発を目指して、光電子増倍管(PMT)の微細化二次元配列化の検討を行った。PMTは、計数率特性や時間応答性はこの測定対象にも追従できるほど良好であるが、装置自体が二次元画像を得る構造になっていないので、二次元検出器としてはこれまで使用されていなかった。

ここで微細加工技術を用いることにより、このPMTの微細化を行い、微細化したPMTを二次元状に配列することにより優れた特性を持つ二次元検出器の開発を本研究の目的とした。PMTは放射線測定に限らず光測定の広い分野に適用可能であるので、波及効果も広い範囲に

及ぶものと期待される。ピクセルサイズなどは求められる全体の大きさとピクセル数によって決定される。最終的な目標としては、1PMT当たり $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$ 程度のピクセルサイズを持つ、 $1000\times 1000$ ピクセル程度の検出器を目指している。

## 参考文献

- [1] Technical Digest of The 9th Sensor Symposium 1990, The Institute of Electrical Engineers of Japan.
- [2] Technical Digest of The 10th Sensor Symposium 1991, The Institute of Electrical Engineers of Japan.
- [3] Technical Digest of The 11th Sensor Symposium 1992, The Institute of Electrical Engineers of Japan.
- [4] Technical Digest of The 13th Sensor Symposium 1995, The Institute of Electrical Engineers of Japan.
- [5] A Rogner et al., 'The LOGA technique - what are the new opportunities', *J. Micromech. Microeng.* 2 (1992) 133-140.
- [6] P. Bley et al., 'The LIGA process', *FED Journal Vol.5 Supple. 1* (1994) 34-48.
- [7] R. T. Hown, 'Recent advances in surface micromachining', *Technical Digest of the 13th Sensor Symposium (1995)* pp.1-8.
- [8] U. Wollenberger et al., 'Biosensors for analytical microsystems', *Microsystem Technologiew 1* (1995) 75-83.
- [9] W. Katrhe et al., 'Micro- and Integrated optical devices in glasses and polymers for hybride integrateion into microsystems', *Microsystem Technologies 1* (1995) 59-67.
- [10] M. Takabe et al., 'A wide range of electron energy determination with an imaging plate', *Nucl. Instr. Meth. A 363* (1995) 614-615.
- [11] D. Villers et al., 'The use of an imaging plate as a detecting system in X-ray diffraction', *Nucl. Instr. Meth. B 97* (1995) 265-268.
- [12] M. Takabe et al., 'A particle energy determination with an imaging plate', *Nucl. Inst. Meth A 359* (1995) 625-627.
- [13] J. Bohm et al., 'High rate operation and lifetime studies with micro-strip gas chambers', *Nucl. Inst. Meth A 360* (1995) 34-41.
- [14] W. G. Gong et al., 'Microstrip gas chamber on thin-film Pestov glass and micro gap chamber', *Nucl. Inst. Meth. A360* (1995) 30-33.

- [15] F. Angelini et al. 'A large area, high gain Micro Gap Chamber', Nucl. Inst. Meth. A 362 (1995) 273-276.
- [16] 栗原紀夫 中島栄一、  
「二次元放射能分布検出・定量・画像化システム」、RADIOISOTOPES, 42 (1993), 541-548.
- [17] R. Wheadon 'Radiation damage studies on single-sided and double-sided silicon microstrip detectors', Nucl. Inst. Meth. A 348 (1994) 449-453.
- [18] 森村正直 山崎弘郎 編集、  
"センサ工学"、朝倉書店。
- [19] G.W. Fraser et al. 'The X-ray energy response of silicon', Nucl. Inst. Meth. A 350 (1994) 368-378.
- [20] 大場信弥、  
「固体撮像素子の動向」、レーザー研究 18, 11 (1990) 916-922.
- [21] P. Ottomello et al. 'Hard X-ray imaging with high detection efficiency and high spatial resolution', Nucl. Inst. Meth. A 346 (1994) 379-384.
- [22] G. W. Fraser et al. 'Microchannel plate operation at high count rates: further studies', Nucl. Inst. Meth. A 327 (1993) 328-336.
- [23] A. Andersson et al. 'The MAX II synchrotron radiation storage ring', Nucl. Inst. Meth. A 343 (1994) 644-649.

## 第二章 概念設計



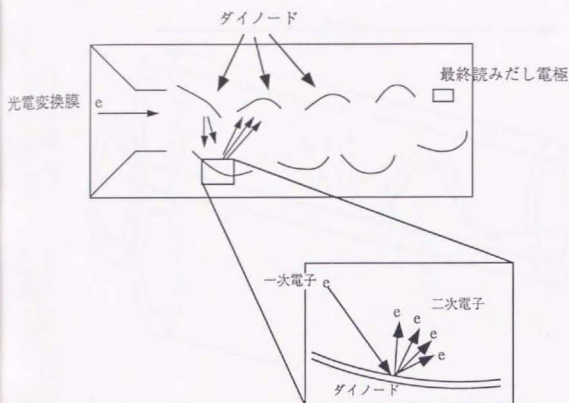
一般に放射線を検出する場合、放射線信号は微弱であり（高エネルギー物理実験を除く）、S/N比が悪く計測自体が困難である。そのため、放射線を検出するのを目的とする検出器には、優れた信号の増倍機構が必要である。特にシンチレータなどからの発光を測定する場合には検出器入射光子が数個から数万個のオーダーであるため、検出器の出力を信号増幅器に接続するだけでは不十分で、検出器それ自体に信号増倍機構を付与するのが通例である。既存の検出器のなかで単光子程度の微小信号の測定が可能である検出器としては、光電子増倍管（photon multiplier; PMT、図2-1）[1][2][3]とマイクロチャンネルプレート（micro channel plate; MCP、図2-2）[4][5][6]が代表的なものとして上げられる。

PMTやMCPは真空中に置かれた物質表面での二次電子放出を原理として電子増倍を行う構造をしている。シンチレータからの光を光電変換膜で電子に変換し、この電子を静電場で数百eVに加速してダイノードと呼ばれる板に衝突させる。ダイノードはMgOやBeOなどの二次電子発生数が多い値を取る素材を表面材として用いて構成されている。ここで生成する二次電子をまた静電場で加速し、次のダイノードに衝突させる。これを繰り返すことにより指数関数的に電子が増倍されていくことになる。

このダイノードが離散的に構成されているのがPMTであり、連続的にダイノードが形成されているのがMCPである。PMTの場合は、段数は通常8段から16段であり、ダイノード形状と求められる信号利得により決定される。一方MCPは、図2-2に示されるように内径数 $\mu\text{m}$ から数 $\mu\text{m}$ の抵抗体の鉛ガラス製中空ファイバーそのものをダイノード材として使用する。このファイバーの、両端に電圧をかけることにより、ファイバー中に連続の電場を形成し電子の二次放出を連続的に起こす構造をしている。信号増倍度は、PMTで $10^4$ から $10^7$ 、MCP1枚で最大 $10^4$ が得られるのが一般的である。

ダイノード構造の違いが、PMTとMCPの特性に与える特徴は、PMTは出力電流を大きくできるという点であり、MCPは高位置分解能という点に集約される。この特徴はお互いに排他的であり、検出器入力信号の強度変動範囲が大きい対象物を測定する場合にはPMTを使用し、測定対象物として高い位置分解能が必要な場合にはMCPを使うのが普通であり、両方の特性を必要とする





信号像信は真空中の固体からの二次電子放出を利用している。  
ダイノード材としては二次電子放出数の大きい物質 (MgO, BeO等)  
の薄膜を金属板表面にコートして使用している。

図2-1 光電子増倍管の概略図。光電変換膜から最終読みだし電極までステップ的に高電圧が外部からかけられる。光電変換膜で変換された電子は、ダイノードに引かれ、二次電子放出を伴う衝突を繰り返しながら増倍されていく。各段は外部から直接電子の供給を受けるため、出力電流特性に優れている特徴がある。

対象をリアルタイムに測定する検出器は現在存在していない。

この理由は、MCPの位置分解能が良いのはMCPは各チャンネルごとに電子増倍を行っているからであり、増倍される電子はチャンネルサイズよりも広がることはないからである。しかし、連続に電場をかけるためにMCP自身が抵抗体で構成されるため、電子の供給性能に制限があり、これが検出器出力電流の制限となって表れてしまう。一般的なMCPの場合、最高出力電流は、MCP

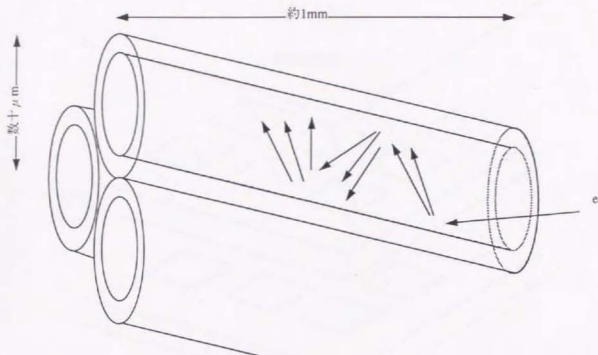


図2-2 MCPの概略図。内部が鉛ガラスで覆われた直径数十 $\mu\text{m}$ の管をたばねたもので、管の入口と出口に高電圧をかけることにより、管内で二次電子増倍を起こす原理をしている。時間応答性や位置分解能、検出効率に優れているが、連続の電場を必要とするため、抵抗体で構成されなければならないが、電子の供給能力が不足する。そのため、出力電流特性に難点がある。

それ自体に加えられるバイアス電流の5%ほどとなり、DCモードで通常数 $\mu\text{A}/\text{plate}$ である。逆に、PMTの出力特性が良いのは、ダイノードとして金属を多段構造にして使用しているので、電子のダイノードへの供給特性が良いのが原因である。出力電流は数mAに達する。しかし、PMTは金属ダイノードの表面から加速された一次電子を打ち込み、打ち込んだ面から放出される二次電子を次のダイノードに導かなければならないため構造が複雑になり、一次電子の入射位置の保存が不可能な構造になってしまう。そのため、二次元位置検出器としては使用不可能である。これを解決するため、ダイノードをメッシュで構成し、近接してメッシュを重ねるタイプのPMTが存在するが、メッシュで電子増倍を起こす際に電子が横方向に広がってしまうため最終電極に重心回路を設定する必要があり、最高でも数百 $\mu\text{m}$ ~1mmの位置分解能が得られるにとどまっている。ま

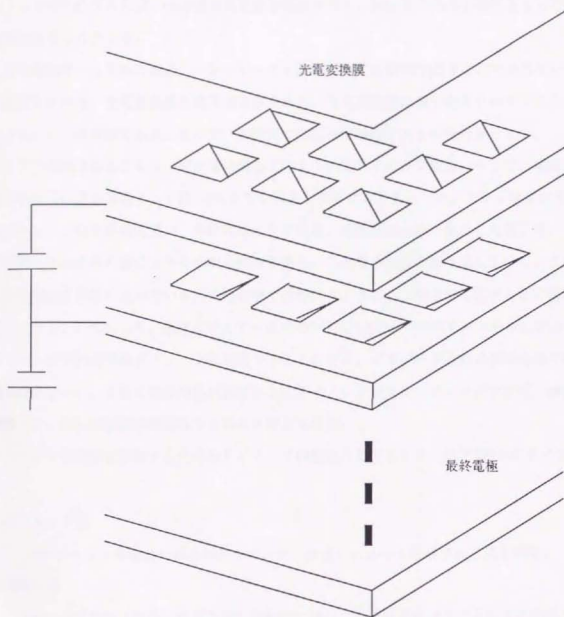


図2-3 電子増倍部の基本構造。光電変換膜で変換された電子は、穴から穴への落ちていくにしたがって、二次電子増倍を起こしていく。

た、多数のPMTを束ね、各PMTの出力の重心を計算することにより二次元画像を作成するガンマカメラという装置があるが、位置分解能は数mmのオーダーである。

このため、位置分解能を持ち、かつ検出器出力特性の良い検出器を作製しようとする場合には、両者の良いところを採用する必要がある。すなわち、チャンネル構造を採用した金属多段ダ

イノードが作成できれば、MCP並みの位置分解能を持ち、PMT並みの出力特性をもった検出器が実現できることとなる。

検出器全体としてみた場合、シンチレータを二次元化する研究[7]はすでになされているため、問題となるのは、光電変換膜と電子増倍部である。光電変換膜は膜であるためすでに二次元デバイスとして使用可能である。そこで、本研究では電子増倍部を主な研究対象とする。

ここで問題となることは、電子増倍部をどのように構成するかである。そこで、本研究では、電子増倍部の基本構造として図2-3のような構造を採用することにした。アレイ状に穴を開けた金属ダイノード板を多段に重ね、各段に電圧をかける。光電変換膜から発生した電子は、ダイノードに開けられた穴の壁に当たりながら転がり落ち、二次電子増倍を繰り返していく。この際に二次電子増倍は垂直に並んでいる穴の列の中で行われるようにし、横方向に広がらない構造を取ることにする。これにより、垂直に並んでいる穴の列がMCPの一つのチャンネルに対応し、各ダイノード板がPMTの各ダイノードに対応することになる。ダイノードそれ自体は金属で構成される必要はないが、十分に抵抗の低い素材の上にダイノード材をコーティングすれば、MCPの際に問題となった出力電流の問題はなくなると考えられる。

このような機構を実現するためのダイノードの構造としてとして、以下の2つのタイプを考案した。

#### (1)ピラミッド型

(100)シリコン単結晶の異方性エッチング（後述）によって形成される穴を利用。（図2-4）

#### (2)斜め穴型

LIGAプロセス（後述）を行う際に放射光に対して斜めに露光することにより形成される穴を利用。（図2-5）

両者とも微細加工技術を利用して加工を行う構造となる。目標となるチャンネルの大きさは数十 $\mu\text{m}$ から数百 $\mu\text{m}$ であり、この大きさは微細加工技術で十分加工可能である。

このようにIC製造技術ではない微細加工技術を使用して、放射線検出器を作製する研究としてマイクロストリップガスチェンバーをLIGAプロセスを利用して行う研究が[8]行われており、また、MCP自体を感光性ガラスを用いて作成する研究[9]が行われている。しかし、本格的な三次元微細

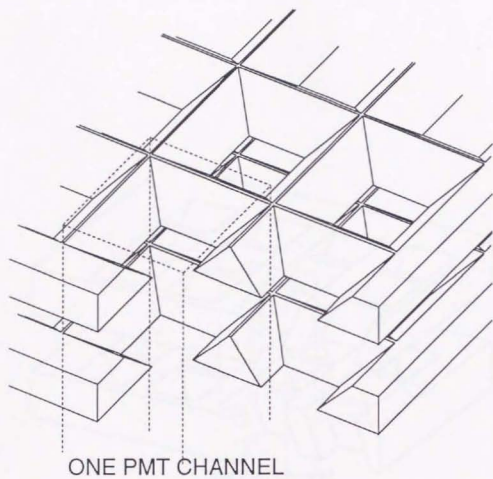


図2-4 シリコン段結晶を異方性エッチングして得られるピラミッド型の貫通孔を利用した、ダイノード部の概念図。

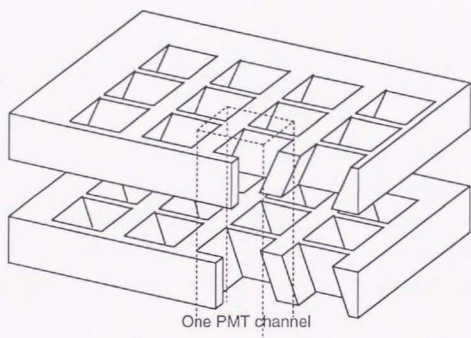


図2-5 LIGAライクプロセスにより形作られる斜め貫通孔を利用した、電子増倍部の概念図。

構造を利用する放射線検出器の開発はまだ行われていないのが現状である。



## 参考文献

- [1] A. Suzuki et al., 'Improvement of 20 in. PMTs', Nucl. Instr. Meth. A.
- [2] F. Takasaki et al.: Development of Multianode photomultiplier tube, Nucl. Instr. and Meth. A 260 447 (1987).
- [3] 江. Kichimi et al.: Timing characteristics of a micro-channel plate and fine mesh photomultiplier tubes in a 1 T field, Nucl. Instr. and Meth. A 325 451 (1993).
- [4] W. B. Feller, 'Conductively cooled microchannel plates' Nucl. Instrum. Meth. A 310 (1991) 249.
- [5] S. Matsuura et al., 'Current status of the micro channel plate', IEEE Transactions on nuclear science, Ns-31, No. 1, 1984.
- [6] T. Calcott et al.: Area detectors for X-ray spectroscopy, Nucl. Instr. and Meth. A 266 (1988) 578.
- [7] Kim et al., 'A New Approach to Monitoring Radon and Radon Progeny Using a Glass Scintillator in a Fiber Bundle Structure Source', Nucl. Instr. and Meth. A, Vol 356, Iss 2-3, pp 537-543 1995.
- [8] P. Geltenbort, 'Recent results with microstrip gas chambers', Nucl. Instr. and Meth. A 353 (1994) 168.
- [9] T. Sakamoto et al., 'Microchannel Plate Using Photosensitive Glass', Technical Digest of The 13th Sensor Symposium, 1995. pp.45-48.

第三章  
電子増倍部  
ピラミッド型



2章で提案された二つの種類の構造のうちピラミッド型について以下で各々検討を加えることとする。

### 3.1. 計算による各種性能評価

パラメータサーベイのため、構造を仮定して空間電場の計算を行い、そのデータを利用して電子の軌道計算を行い、モンテカルロ計算により電子増倍率などの各種性能評価を計算機上で行う。

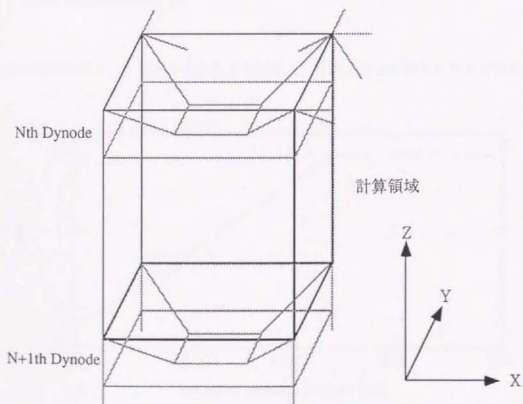


図3-1 計算領域。左右前後には周期境界条件で同じものが無限に続いているものとする。上下には同じく周期境界条件を適用するが、その間には段間電圧に相当する電位差が存在するものとする。

た。

計算ステップとしては以下のように行った。

- (1) まず、計算を行う空間を図3-1のように矩形に設定する。
- (2) 電場を求めるためマクスウェルの方程式を解く。

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

ここで、仮定として電場を真空中の静電場に限定し、ポテンシャルを導入する。そのため解くべき方程式は以下のように簡略化される。

$$\nabla^2 \phi = -\rho/\epsilon_0$$

ただし、空間中の電荷を無視する。

$$\nabla^2 \phi = 0$$

境界条件は周期条件とし、電圧がかかる方向には上下で設定された電圧分の差が存在するように

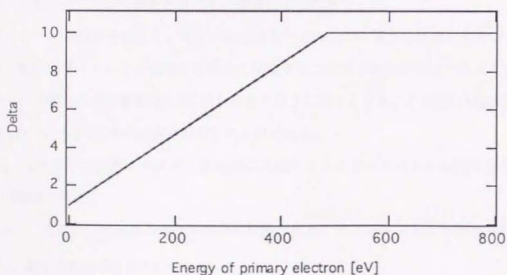


図3-2 入射電子に対する二次電子放出数のグラフ。MgOの値に直線をフィッティングして作成した。

する。また、ダイノード部分は金属で覆われていると仮定するため、常に一定の電圧すなわち

$$\phi = \text{const.}$$

となるようにする。この条件で $\phi$ の空間分布を解けばよい。

実際の計算コードでは、プログラミングのしやすさを考慮し、計算空間を3次元矩形メッシュに切り、3次元の差分法で電場を求めた。

(3) 求めた電場より電子の軌道計算を行う。電子は点電荷とし、ニュートンの運動方程式と(2)によって求められた電場から計算される。

$$\begin{aligned}\vec{F} &= m\vec{a} \\ \vec{F} &= e_{\text{electron}} \vec{E} \\ \vec{E} &= -\nabla\phi\end{aligned}$$

ここで、磁場の影響はないものと仮定する。

実際の計算コードでは時間を差分化し、陽解法で計算を行った。

(4) ダイノードの段数を仮定し、電子の軌道計算を追いながら電子の振舞いのモンテカルロ計算を行う。電子がダイノードに衝突した場合に発生する二次電子の条件は以下のようにした。

- i) 二次電子の発生数は図3-2に示されるグラフに従うとする。この図はMgOの二次電子放出数[1]のグラフを2本の直線で近似したものである。
- ii) 二次電子の初期エネルギーはAgの二次電子エネルギースペクトル[2]に従うとした。それを図3-3に示す。
- iii) 二次電子の初期速度ベクトルの方向依存性は、ダイノード垂直方向からの角度を $\theta$ とし、電子の発生確率をPとすると、

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \cos(\theta)$$

とした。[3]

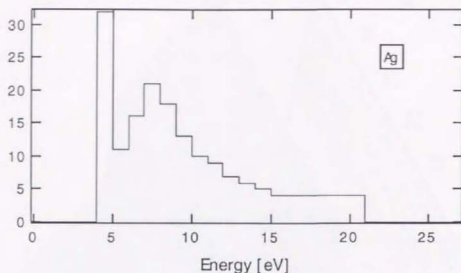


図3-3 Agからの二次電子放出スペクトル[2]。計算簡略化のためエネルギーは1eV単位で量子化してある。

以上の計算の結果を図3-4から図3-5に示す。図3-4は電場計算結果の一例である。図3-1の計算領域をZ-X平面に平行で縦に二分する平面上の電位ポテンシャルの値をプロットしたものである。電界の強い所はウェハのエッジ部分であるが、その強度はこの計算結果では分らない。実際にはエッジのなまりも考慮に入れなければならないからであり、試作を行い放電するまでの電圧をもとめ、そこから評価の必要がある。また、図3-5は電子の軌道計算の結果の一例である。時間差分の計算ステップは $10^{-13}$ sec.とした。

これらの計算結果には、電極間に働く静電引力、外部磁場の影響、空間電荷の影響を考慮していないため、一種の理想的な状態での性能評価である。よってこの計算結果により信号出力直線性の限度など、どのような範囲まで計算結果が適用可能であるかの評価は不可能である。これらの評価には、実際に検出器を作製しその適用限度を実測値をもって評価するのが望ましい。しかし、実際の使用に際してはこれらの仮定が成り立つ範囲で使用すればよいので基本性能評価としては本手法で十分であると考えられる。

この電子のモンテカルロ計算を利用して、電子増倍部の性能を評価すると共に、各性能をバラ

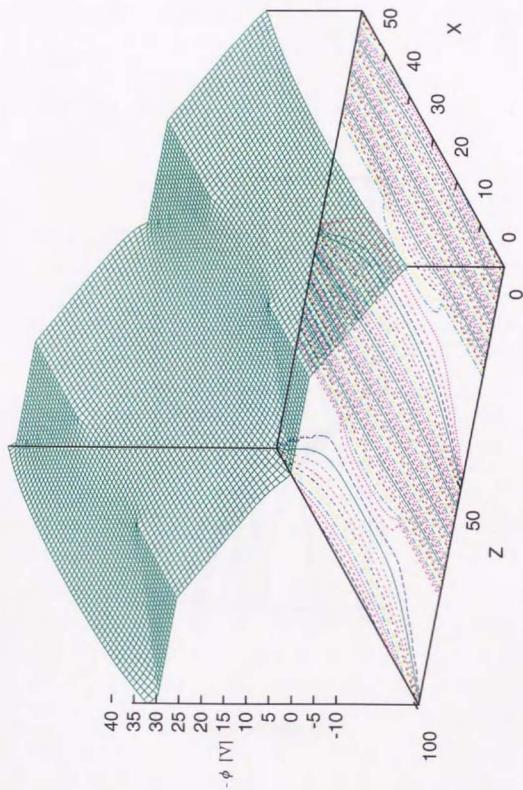


図3-4 ポテンシャルの計算結果一例



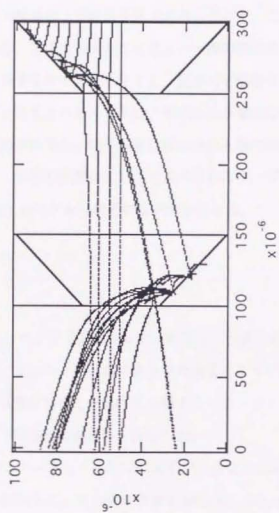


図3-5 電子軌道の計算結果一例。

ンス良く引き出すことの可能なパラメータサーベイを行った。以下にその結果を述べる。

### 3.1.1. 電子増倍度

はじめに最も基本的特性である電子増倍度を求めた。パラメータとしては、ウェハー厚、段間距離、穴の大きさ、穴と穴の間の距離および段間電圧である。ここで、これら5つのパラメータを同時に変化させるのは難しいため、まず穴の大きさとウェハー厚の関係等の形状の最適値を求め、求めた形状の値の比を保ったままサイズを小さくし、望ましい位置分解能が得られる大きさの検索を行った。形状の比を保ったまま小さくすると、形成される電場分布の形が不安なため、段間電圧を形状の大きさに反比例させると、電子軌跡は縮小される前の軌道をそのまま縮小させたものと同じになる。このため、形状の評価は3.1.1.1.1.で述べられるラージモデルでおこなった。そのち3.1.1.2.で述べられる $100\mu\text{m}$ モデルで最終的な評価を行った。

#### 3.1.1.1. ラージモデル

(100) Siウェハーに異方性エッチングで貫通孔を開ける場合、生成されるピラミッド型の穴の斜面の角度は一定値をとるため、ウェハー厚と穴の大きさの関係によりピラミッド型の穴の形状が決定される。この形状の電子増倍度に与える影響を評価するため、ウェハー厚さを一定として穴の大きさを変えた場合の、電子増倍度の振舞いを評価した。

計算体系を図3-6に示す。ウェハー厚として実際に入手が容易な値として $200\mu\text{m}$ を採用した。また、段間距離として $300\mu\text{m}$ を採用した。穴の大きさ $W$ を $300\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 、 $600\mu\text{m}$ 、 $700\mu\text{m}$ と変化させた場合の電子増倍度計算結果を図3-7に示す。穴の大きさがサブミリと比較的大きい値を取っているが、これは後で述べる(3.2.1.3.3.1.1)ように実際に作成を試みた場合に人の手で操作しやすい値として選んだものである。この結果により、穴の大きさ $W$ として $500\mu\text{m}$ が最適値であること、及び段間電圧 $100\text{V}$ の場合に最適になることが示された。この場合電子増倍度は約50倍となり、一段当り1.9倍となる。よって段数を15段重ねることより $10^5$ の増倍度が得られ

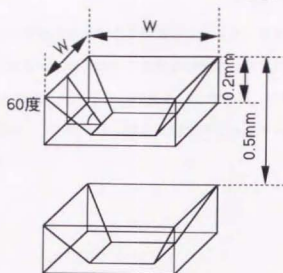


図3-6 計算体系図。板厚 $200\mu\text{m}$ 、段間隔 $300\mu\text{m}$ とし、穴の大きさ $W$ を変化させた場合の電子増倍度結果を求める。

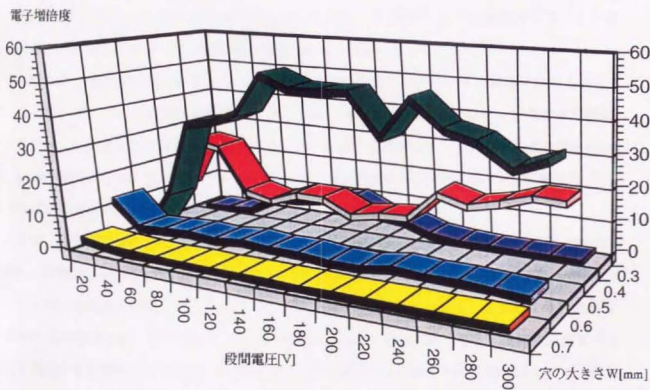


図3-7 上記体系の場合の電子増倍度計算結果。段数6段、二次電子放出数は4コに固定し、段間電圧による二次電子放出数依存性が電子増倍度に与える影響を排除し、形状の違いが与える影響をより顕著にした。

ることになるが、この計算には二次電子放出数の入射電子エネルギー依存性が考慮されていないため、この値そのものは正確ではない。これは、この計算評価には形状の影響を強調するため、二次電子放出数は4で一定と仮定しているからである。しかし、二次電子放出数が4であることはほぼ妥当な数字であり、実際に二次電子放出数の入射電子エネルギー依存性を考慮した場合でもそれほど違いはないと考えられる。

### 3.1.1.2. 100 $\mu$ mモデル

位置分解能はチャンネルの大きさに依存し、チャンネルの大きさは穴の大きさに依存する。実際の位置分解能として100  $\mu$  m以下が目的であるため、穴の大きさを100  $\mu$  mと固定した場合の性能評価を行った。前節の穴の大きさは500  $\mu$  mの場合が最適となったが、これはウェハーとの厚さ比で表すと5:2となる。この値を参考にして、穴の大きさ100  $\mu$  m、ウェハー厚50  $\mu$  mとした。穴の大きさ100  $\mu$  mの場合のウェハー厚の最適値は40  $\mu$  mであるが、その場合ウェハー強度が不足すると考えられるため、既存のウェハーの最小値である50  $\mu$  mを採用した。

その際の計算体系図を図3-8に示す。シリコン単結晶の異方性エッチングを製造プロセスとして用いるため、ダイノード斜面の角度は54.7度となる。また、今回の計算にはラージモデルの計算とは異なり、二次電子放出数の入射電子エネルギー依存性を考慮している。計算結果を図3-9に示す。全体の傾向として、段間電圧を大きくすると共に電子増倍度は大きくなり、段間距離を小さくすれば電子増倍度は大きくなる。

ここで、段間電圧200V以上の部分に注目してみると、電子増倍度は段間電圧200Vから500Vまで上昇し、段間電圧500V以上では電子増倍度は一定値となっている。これは、図3-2で示されるように、二次電子放出数の段間電圧依存性と同じ傾向を示していることが分る。これにより、段間電圧200V以上の領域では、電子増倍度の段間距離依存性はそれほど小さくなく、段間電圧が電子増倍度を決定する主要因となっていることが分る。実用段間電圧と考えられる200Vにおいて、段間距離50  $\mu$  mの場合に約100倍の電子増倍度結果が得られている。この結果は段数6段の場合であるので、段数を倍の12段にすれば10<sup>4</sup>の電子増倍度が得られることになり、十分実用になるものと考え

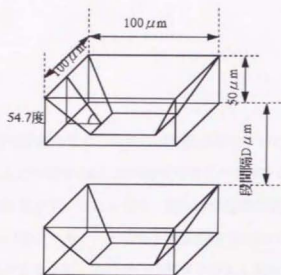


図3-8 計算体系図。一つの計算セルを表す。ウェハー厚 $50\mu\text{m}$ 、チャンネルサイズ $100\mu\text{m}$ 、段間隔を $D$ とした場合である。ダイノード斜面の角度は $54.7$ 度とした。

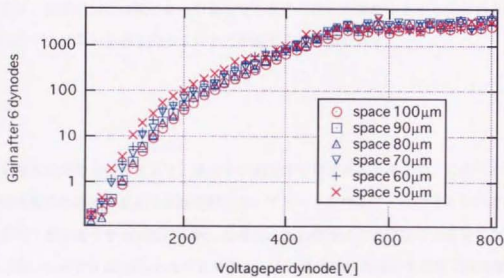


図3-9 ピラミッド型の電子増倍度計算結果。段間距離 $D$ を図中ではspaceとして示している。段間が狭くなると共に電子増倍度はすべての領域において大きくなっていく。



られる。

### 3.1.2. 時間応答性

100  $\mu$  mモデルでの信号応答性評価のため、検出器の時間応答を求めた。モンテカルロ計算の際に、電子に光電変換膜で発生した時間を0とした時間で各電子の軌跡を追い、最終段に到達した電子の時間分布を求めた。その結果を図3-10,11に示す。図3-10は段間距離50  $\mu$  mの場合の結果であり、図3-11は段間距離100  $\mu$  mの場合である。どちらも段数6段の場合であり、実際に使用する場合は段数を12段以上にする必要があるから、この倍の時間がかかると思われる。

図3-10、図3-11ともにほぼ同じ傾向を示している。20psec.あたりに小さなピークを見てとることができるが、これはダイノードに一度も衝突することなく最終段に到達した電子である。各図色違いで段間電圧200Vから800Vまでの場合を面積で規格化して示している。段間電圧を小さくすればするほど時間応答性が良くなる傾向が見られ、立ち上がり時間、電子走行時間共に数百psec.のオーダーであり、段数が倍の12段になった場合でもこの二倍の時間がかかると思われるが、それでもnsec.以下の十分に早い応答を持っていると評価することができる。

### 3.1.3. 波高値

PMTはその優れた信号増倍特性より、単光子の測定が可能である。そこで、このデバイスでどの程度の数の光電子の場合、波高分布測定時においてピークを作ることができるかの評価を行うため、単一から十個の電子を検出器に入射した場合、出力信号はどの程度の大きさになるかの評価を行った。用いたモデルは100  $\mu$  mモデルである。その結果の波高分布を段数10段の場合について図3-12に示す。生成光電子が4個以上の場合にピークを形づくりはじめ、光電子10個でほぼ左右対称のピーク形状となっている。しかし、電子増倍度などを考慮すると、実際の段数はもう少し多くなると予想され、また、計算の際に二次電子放出数の分散を考慮に入れなかったことなどを考えあわせると、この計算結果は参考程度にとどめておいた方がよいと考えられる。



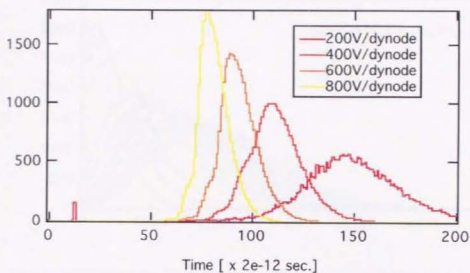


図3-10 段間距離 $50\mu\text{m}$ 、段数6段の場合の、最終段到達電子の時間分布。段間電圧が大きくなればなるほど時間は短くなっていく。

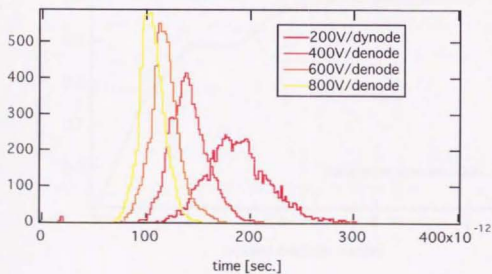


図3-11 段間距離 $100\mu\text{m}$ 、段数6段の場合の、最終段到達電子の時間分布。図3-8と同じ傾向を示しているが、段間距離が大きくなっているため全体として時間がかかるようになっている。

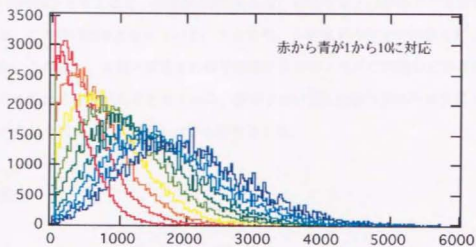


図3-12 段間間隔 $100\mu\text{m}$ 、段間電圧 $200\text{V}$ 、段数10段の場合の検出器出力のヒストグラム。  
入射電子が1個の場合から10個の場合までを示している。

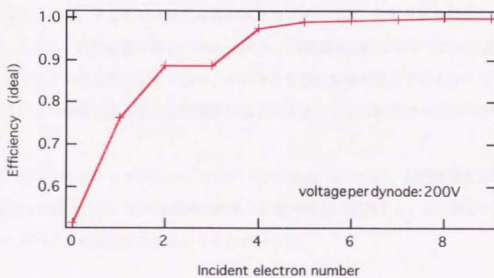


図3-13 図3-10の計算結果を利用して、ディスクリレベルを1に設定した場合の効率の  
初期入射電子数依存性。理想的な系での計算結果である。

入射電子が1個の場合を考えると、波高値が0とならない割合が電子増倍部での効率を表していると考えられる。この値は51%となっていた。すなわち、入射電子の半分が増倍を起ささない結果となっている。この値も、入射一次電子の数や実際の系でのノイズの問題などを考慮すると、参考程度にとどめておく必要があると考えられる。参考までに図3-13検出効率の検出器入射一次電子数依存性のグラフを示す。これは図3-12から計算された。

### 3.1.4. 位置分解能

二次元位置検出器としての動作を目的の一つとしているので、この検出器の位置分解能の計算を行った。100 $\mu$ mモデルで段数6段の場合についての結果を図3-14に示す。図中横軸は段間電圧、縦軸は初期電子を生成させたチャンネルからの出力を全チャンネルからの出力で割ったものである。この値が1になると、出力二次電子はすべて真下のチャンネルへと移動していることになり、二次電子増倍が一つのチャンネルで行われているという望ましい結果となる。実際の計算結果は、実用電圧領域と考えている400V/dynode以下の領域で、段間距離がこの性能に大きな影響を与えるという結果となった。すなわち、段間距離が狭ければ狭いほど、位置分解能は良くなる傾向となっている。しかし、段間距離が最大の100 $\mu$ mでも、段間電圧200Vにおいて80%が真下のチャンネルから出てくるという結果になっており、それほど位置分解能の劣化を考えなくても良いといえるであろう。この段間距離および段間電圧の場合の各チャンネル位置での出力の分布を図3-15に示す。

以上の結果、チャンネルサイズ100 $\mu$ m、ウェハー厚50 $\mu$ mの場合には、段間距離を50 $\mu$ mから100 $\mu$ mに変化させた場合には、電子増倍度の結果と位置分解能の結果より、段間隔は70 $\mu$ m以下であれば優れたデバイスが形成されるということが分った。

### 3.1.5. 電子増倍度・位置分解能を悪化させる要因

以上の計算は、チャンネルが完全にまっすぐに構成された理想的な場合の議論結果である。し

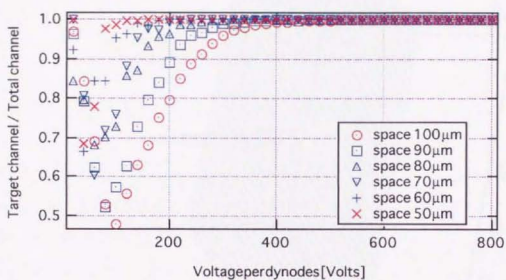


図3-14 位置分解能の段間電圧依存性の図。段間距離 $D$ を図中ではspaceと示している。  
縦軸は一次電子入射位置えの出力を全体での出力で割った値である。段間電圧が  
大きくなればこの位置分解能は改善され、段間距離を縮めることによっても改善さ  
れる。

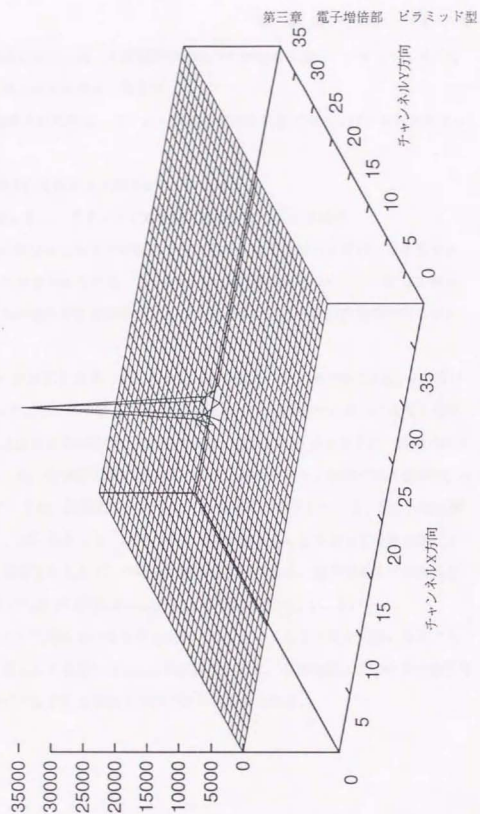


図3-13 各チャンネル位置での検出器出力のグラフ。真ん中に鋭く立っているのが入射チャンネルでの出力である。

かし、実際のデバイスの作成においては、加工精度や組み立て精度の影響で、どうしても寸法などの数字に誤差が生じてくると考えられる。例えば

- 1) ダイノード板の組み上げの際に、ダイノード板がずれた状態で取りつけてられてしまった場合
- 2) ダイノード板に開けた穴のサイズが異なっている場合
- 3) ゴミなどを挟んでしまい、ダイノード間距離に誤差が生じている場合

などが上げられる。上記3)の場合はこれまでの計算で段間距離を変えた場合に相当する事態であり、それほど影響がないことが分かっている。2)もそれほどの影響は与えないことは計算で確かめられている。ところが、1)の場合は相当影響が大きいことが以下に述べる計算結果で明らかとなった。

図3-16に段間に水平方向へのずれを考慮した場合の計算体系図を示す。モデルは $100\mu\text{m}$ の場合である。段間距離は $100\mu\text{m}$ とした。この場合の計算結果を図3-17,3-18に示す。図3-17は電子増倍度の計算結果であり、図3-18は位置分解能の計算結果である。図3-17から分かるように、段間の水平方向のずれが大きくなると、電子増倍度の値が悪くなる傾向があり、段間ずれの量が $30\mu\text{m}$ を越えたと段間電圧 $200\text{V}$ で一けた、段間電圧 $600\text{V}$ で二けた増倍度が劣化している。図3-18は位置分解能を表すものであるが、こちらからも、段間のずれの量が増えるにしたがって性能は悪化している。この傾向は特に段間電圧を大きくした場合に顕著に表れており、電子増倍度では段間電圧 $120\text{V}$ 以上の領域で、位置分解能では段間電圧 $240\text{V}$ 以上の領域で悪化している。

これらの結果より、組み立て工程においては横方向のずれを少なくする工夫が必要となることが予想される。この際に必要となる精度は $10\mu\text{m}$ 以下が要求される。この精度は人間の手では不可能であり、組み立て用のガイドなどある種の工夫が必要となるであろう。

### 3.2 製造プロセス

ピラミッド型の穴を形成する方法として、単結晶シリコン(100)の異方性ウェットエッチングを採用した。これは、単結晶シリコンにおいて結晶方位によりエッチングレートが著しく異なる



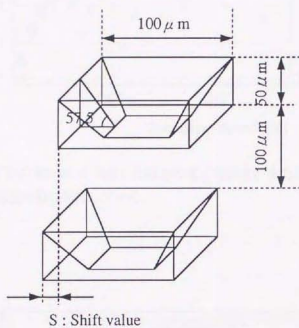


図3-16 ずれを考慮した場合の計算体系図。

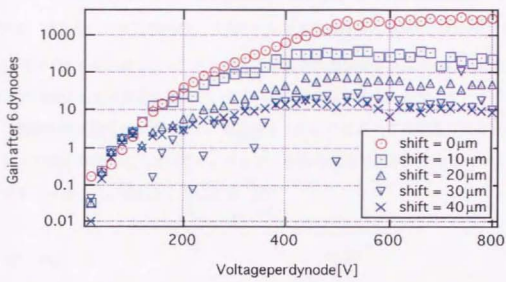


図3-17 ずれの量(shift)を考慮した場合の電子増倍度計算結果。ずれるにしたがって増倍度の値は劣化していく。

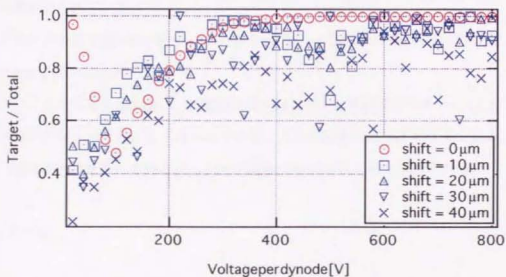


図3-18 ずれを考慮した場合の位置分解能計算結果。ずれるにしたがって悪化する傾向にある。

エッチング液が存在することを利用して、具体的なエッチング液として、水酸化カリウム水溶液(KOH)やテトラメチルアンモニウム水酸化物水溶液(tetramethyl ammoniumhydroxide; TMAH ( $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ ))が上げられる。この二つの内、マイクロマシンの微細加工の際に一般に広く使われているKOHは水溶液中のKイオンがトランジスタなどの半導体に悪影響を及ぼすため一般的にクリーンルームでの使用はあまり歓迎されない。そのため、今回はTMAHを採用した。このエッチングで得られる構造の模式図を図3-19に示す。異方性エッチングにおいては結晶方向 $\langle 110 \rangle$ 方向のエッチングレートが他の方向に比べ遅いため、ウェハー表面の結晶方位を(100)としておくと(110)面が残り、ピラミッド型の穴が掘れることになる。[4]

### 3.2.1. ラージモデル

プロセス図を図3-20に示す。プロセスとしては、ウェット酸化により酸化膜を生成し、この酸化膜に対してリソグラフィを利用してパターン転写をおこない、酸化膜をマスク材として異方性貫通ウェットエッチングをTMAHでおこなった。その後にダイノード材となるAgMgを真空蒸着法により生成し、ガラスとの陽極接合を繰り返して段数4段のデバイスを作製した。ガラスには電極取り出し用の溝が切られている。

ウェハーレイアウトの図を図3-21に示す。中央部を4分割し、各領域に開ける穴の大きさをそれぞれ300,400,500,650  $\mu\text{m}$ とした。

作成されたデバイスの写真を図3-22に、断面図を図3-23に示す。断面図をみると、3.1.5で悪性要因となる段間水平方向へのずれが若干はいつている。これは陽極接合でデバイスを組み上げていった場合に、位置合わせを行った軸とウェハーが垂直でなかったためと考えられる。

### 3.2.2. 100 $\mu\text{m}$ モデル

プロセス図を図3-24に、ウェハー一枚の概念図を図3-25に示す。プロセスは、まずウェハーの

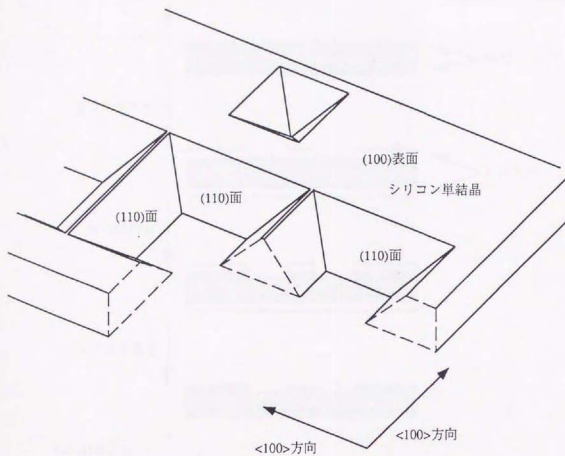


図3-19 表面が(100)面である単結晶シリコンにおける異方性エッチングの様子。(110)面が残る。このため、結晶方位に合わせてマスクを設置しておく、ピラミッド型の穴を掘ることができる。

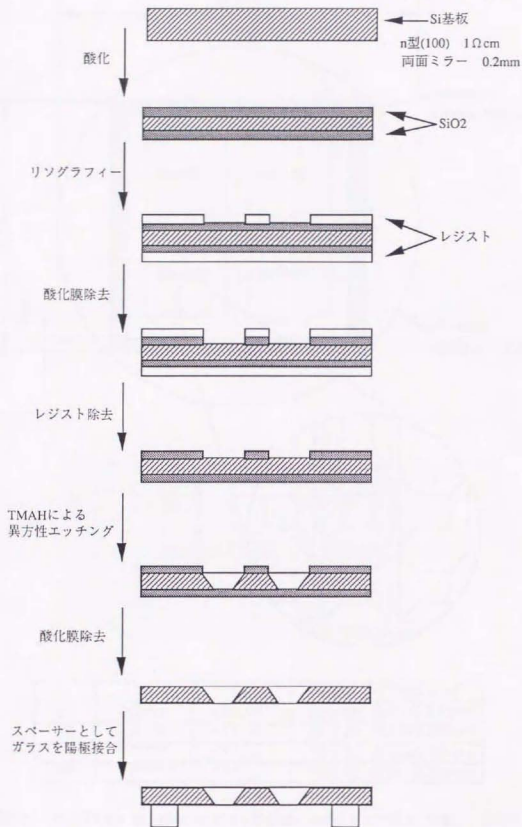
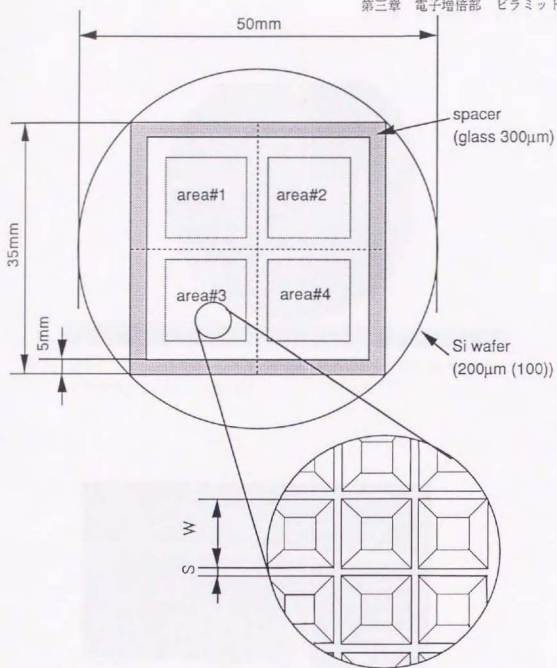


図3-20 ラージモデルの製造プロセス図。酸化膜をマスク材としてTMAHによる貫通ウェットエッチングとガラスの陽極接合により作成される。



	W	S	Pixels (Total size)
#1	0.3mm	<10 $\mu$ m	32 x 32 (9.91x9.91mm)
#2	0.4mm	<10 $\mu$ m	24 x 24 (9.83x9.83mm)
#3	0.5mm	<10 $\mu$ m	19 x 19 (9.68x9.68mm)
#4	0.65mm	<10 $\mu$ m	15 x 15 (9.89x9.89mm)

図3-21 ラージモデルウエハーレイアウト外観図。中央を4つの領域に分割し、各領域を表に示すように設定した。ダイノード材は真空蒸着法で塗布され、その後、陽極接合によりスペーサーであるガラスが接合され積層された。



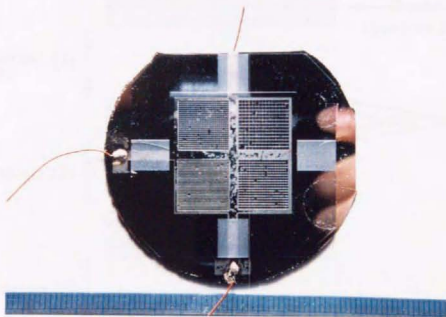


図3-22 作成されたラージモデルの写真。中央4つの領域がそれぞれ300,400,500,650 $\mu\text{m}$ の穴の大きさに対応している。

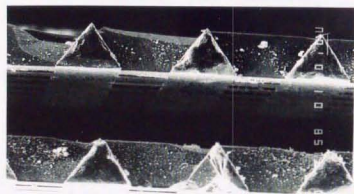


図3-23 ラージモデルの断面写真。

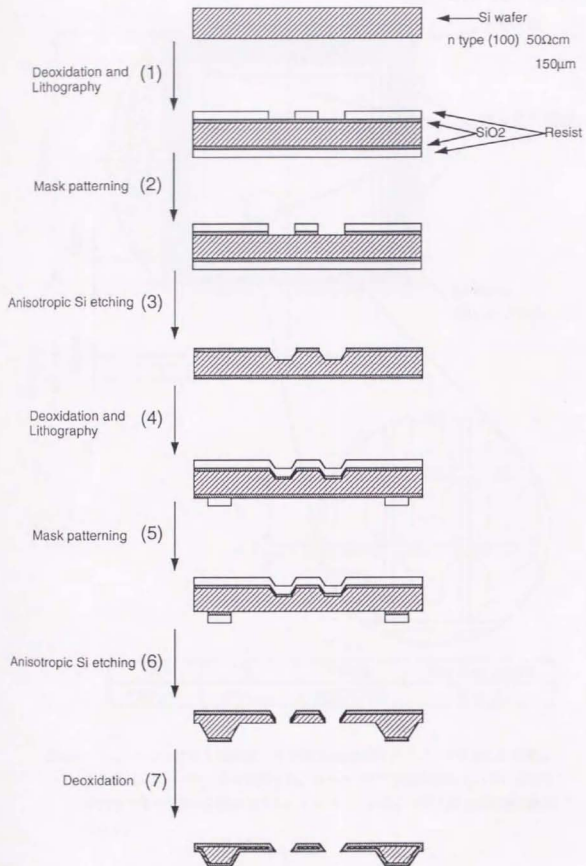
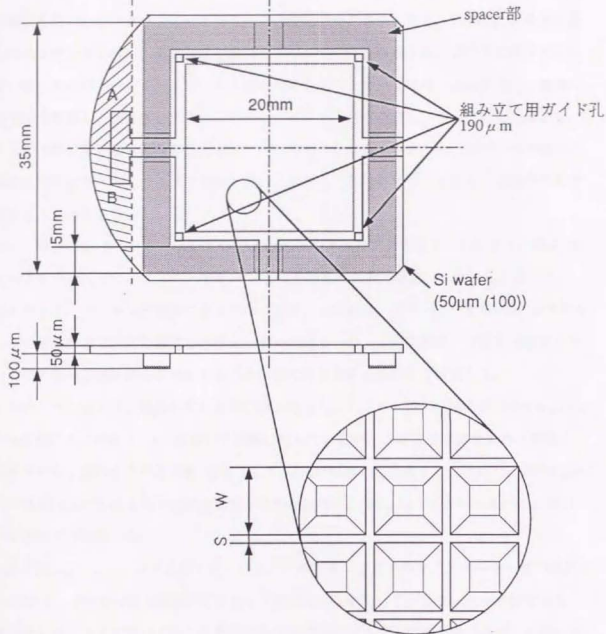


図3-24 ピラミッド型貫通孔の製造プロセス図。酸化膜をマスク材としてTMAHによる貫通ウェットエッチングにより形作る。



W	S	Pixels	Bonding space
100 μm	<10 μm	182×182	A or B

図3-25 ウェハーレイアウト概観図。中央部20mm領域にダイノード貫通孔を配置し、その周囲にスペーサー部を設置する。エッチングで構造を構成した後、全体を酸化膜で覆い電氣的に絶縁をする。ダイノード材はこの後に真空蒸着法で塗布される。

ウェット酸化を行い、リソグラフィを行う。この酸化層をマスクとして、TMAHによる単結晶シリコンのエッチングを行い、貫通孔及び段間のスペーサー部を作成する。この際に図中に記入していないが、配線パターンを引きずり出すための溝をスペーサー部に彫り込んでおく。最後に全面に酸化膜を形成し、絶縁体とする。この後にダイノード材を蒸着し、組み上げて完成となる。組み上げの際に重要項目となる段間水平方向へのずれを少なくするため、ピラミッド型の穴を開ける際に同時にガイド孔を四隅に設置した。このガイド孔にワイヤーを差し、位置をあわせながら積層することになる。

作成には、厚さ $150\mu\text{m}$ のウェハをもちい、 $100\mu\text{m}$ のエッチングを施すことにより、厚さ $50\mu\text{m}$ のダイノード部を作成した。ウェハ厚を $150\mu\text{m}$ のものを採用した理由は、これ以上薄いウェハは壊れやすく、プロセスが困難になるからである。この結果、スペーサー部は $100\mu\text{m}$ の厚みとなる。この値は計算で求めた最適なパラメーターではないが、この実験は、作成の実証及びデバイスとしての動作原理検証を目的とするため作成の容易さを基準にして設定した。

また、スペーサー部には、電極引き出し用の溝を切った。ここで、最初は溝の深さを $100\mu\text{m}$ とし、図3-24に置けるプロセス(6)において同時に刻んでいたが、この方法ではウェハが脆くなってしまうため、途中からマスクを1枚追加して $5\mu\text{m}$ の溝深さとなるように改めた。溝 $100\mu\text{m}$ のウェハは3.3.1.2における電子増倍度測定実験の際に用い、溝 $5\mu\text{m}$ のウェハは3.3.2におけるイメージ測定の際に用いた。

図3-26及び図3-27にエッチングの終了したウェハの写真の表裏を示す。スペーサー部の溝深さは $100\mu\text{m}$ である。中央 $2\text{cm}$ 角の領域がピラミッド型の貫通孔が開いているダイノード部であり、その周囲四隅にガイド孔が開いている。貫通孔を肉眼で確認することは不可能だが、光源に透かすと漏れてくる光を肉眼で確認することができる。その周りをスペーサーとなる部分が取り巻いており、さらにその外側に配線用の取り出し部分が設置されている。これに、ダイノード材であるAgとMgを真空蒸着したものを図3-28に示す。最終的には、これらのウェハを多段に重ね、電極を付けて完成となる。完成品の一例を図3-29に示す。



図3-26 エッチングの終了したウェハー表

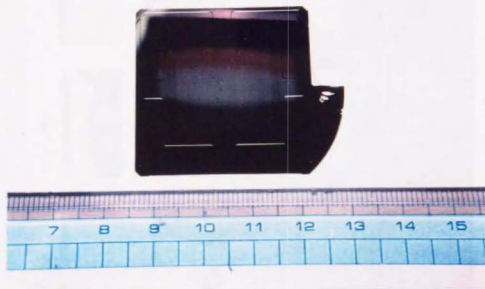


図3-27 エッチングの終了したウェハー裏

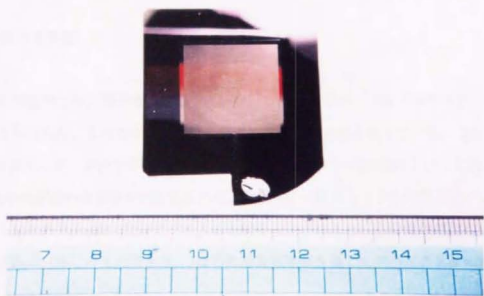


図3-28 ダイノード材を真空蒸着したあとの写真。手前に見えるのは取り出し電極についた銀ペースト。

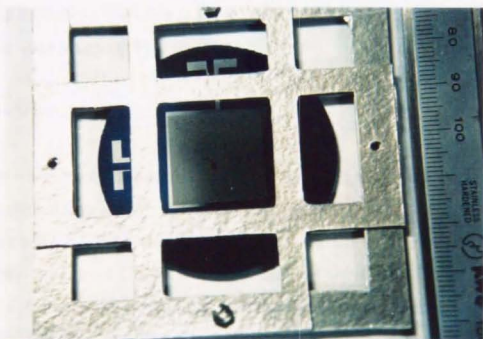


図3-29 10枚重ねた写真。人造マイカ板で押さえて固定している。



## 3.3. 各種特性評価実験

## 3.3.1. 電子増倍度測定

電子増倍の確認のため、電子増倍度測定実験を行った。電子ソースはタングステンワイヤーからの熱電子を利用した。このため電子増倍度は直流モードでの値となっている。この実験の体系図を図3-30に示す。ターボ分子ポンプを接続した真空チェンバー内に組み上げられたデバイスを設置し、GRAND電位の金属箱中に固定される。金属箱に一部スリットを設置して、ここを通じてフィラメントからの電子(図3-31)がデバイスに入射するようにした。この際の電位の様子を図3-32に示す。電子銃は自作したものであり、3枚の静電集束電極を通じてデバイス正面に設置されている。

電子増倍度は、各ダイノードに流れる電流を測定し、その電流収支より求めた。電流計が二つしかないため、一つは最終段の出力専用とし、残りの一台を各ダイノードにつきなぎ変えて測定を行った。この二つの電流計の出力をグラフにプロットすると、一つの直線に乗る。この直線を最少二乗法による直線のフィッティングによりもとめ、この直線の傾きにより各段に流れる電流を求めた。その一例を図3-33に示す。

## 3.3.1.1. ラージモデル

図3-34にラージモデルでの電子増倍度の実験結果を示す。段数を3段とした場合である。段間電圧200V、穴の大ききさ500 $\mu$ mで最大の電子増倍度3.2を得た。電子増倍度に対する穴の大ききさ依存性は、500 $\mu$ mで最適となる計算結果とほぼ同じ傾向を示した。しかし、電子増倍度の値そのものは、計算の値の半分となってしまっている。この原因はいくつか考えられるが、

1. ダイノード材を蒸着した後に陽極接合を行ったためダイノード材が過度の酸化を起こしてしまいダイノード表面に電荷がたまってしまった。
2. 段間水平方向へのずれが若干はいつているため。

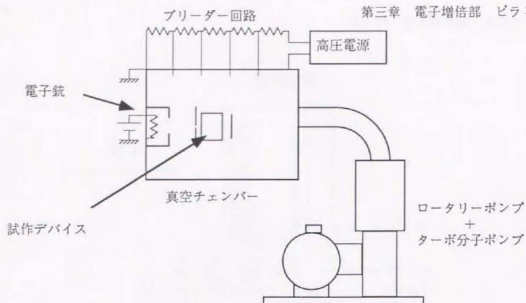


図3-30 実験の体系図。真空チェンバーはターボ分子ポンプに接続され、 $10^{-6}$ Torrのオーダーの真空度に保たれている。自作した電子銃からの熱電子をデバイスの電位を+にすることにより引きずり出し、一次電子ソースとして使用している。

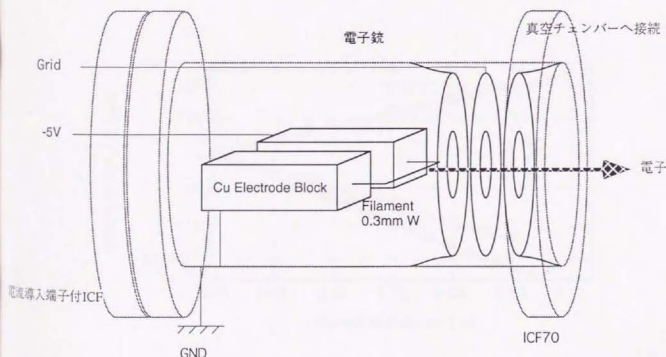


図3-31 自作した電子銃の概念図。 $\phi 0.3\text{mm}$ のタンガステンワイヤーをフィラメントとして使用する。電極として銅のブロックを使いある程度の発熱に耐えられるようになっているが長時間の運転は不可能である。全体は $\phi 70\text{ICF}$ に接続されているニップルの中に置かれ、真空チェンバーへとつながれている。

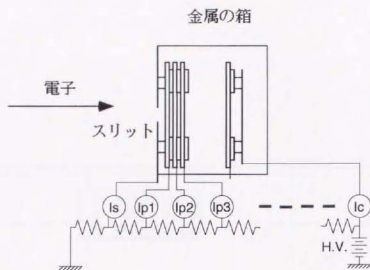


図3-32 各段はブリーダー回路からの電圧を供給されている。ブリーダー回路は等抵抗により等しく分割されている。

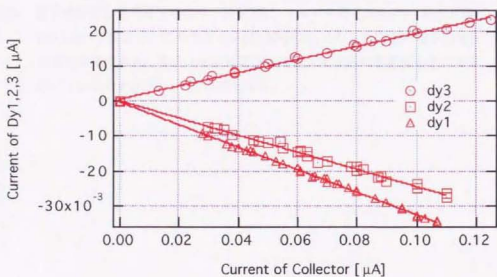


図3-33 各段に流れる電流の測定値。最少二乗法により直線はフィッティングされている。横軸は最終電極、縦軸は各ダイノードに流れる電流である。

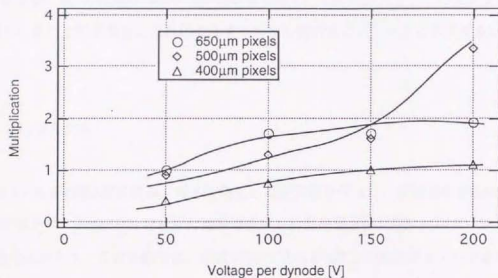


図3-34 電子増倍度の段間電圧依存性。段数3段、ウェハー厚さ200 $\mu\text{m}$ 、段間距離300 $\mu\text{m}$ 、で固定し、穴の大きさを650,500,400 $\mu\text{m}$ とした場合の電子増倍度の測定結果である。電子ソースはWフィラメントからの熱電子をそのまま用いているためDCモードでの値となる。

の二つが上げられる。この原因1を避けるために、以下の $100\mu\text{m}$ モデルでは陽極接合を採用せずにウェハーを重ね、おさえて固定する方法を採用した。

図3-35に、穴の大きさ $500\mu\text{m}$ の場合に、a)  $\phi 1.7\text{mm}$ スリット後方 $2\text{mm}$ の位置に $0.6\text{mm}$ ピッチのマルチワイヤーを設置し電子の位置分布を測定、b)  $\phi 1.7\text{mm}$ スリット+ラージモデルデバイスの後方 $2\text{mm}$ の位置での電子分布を測定、の結果を示す。a) では電子が広がっている様子を見てとることができるが、b) では電子の広がりが押さえられていて、ほぼスリットの大きさになっていることを見てとることができる。これによりチャンネル間のクロストークはあまりないと考えられる。

### 3.3.1.2. $100\mu\text{m}$ モデル

$100\mu\text{m}$ モデルを段数3段に組み、電子増倍度の測定実験を行った。段間電圧を $50\text{V}$ から $150\text{V}$ まで変化した場合の、段数が2段のときの電子増倍度を計算結果と共に図3-36にプロットした。なぜ2段の場合かという、この実験では、段数が3段であるが3段目の最終ダイノードから次への最終電極への電場が弱いため、最終ダイノード板上では電子増倍が起きていないような結果になってしまったからである。電子増倍度の値はほぼ計算と同じ結果となった。段間電圧 $150\text{V}$ の場合に最大電子増倍度 $2.62$ が得られた。これにより段数12段で $3.2 \times 10^2$ の電子増倍度が得られると予想される。

これにより、この形状でほぼ計算通りの電子増幅が起きることが確認された。段数を増やしさえすれば、十分な電子増倍度が得られると考えられる。

### 3.3.2. イメージ測定

各ビクセルにおいて電子が一樣に増倍されているかを評価するために、デバイス後方にMCP+蛍光面を配置し、電子の分布を調べた。その際の実験体系を図3-37に示す。用いたデバイスは $100\mu\text{m}$ モデルで、スパーサー部の溝深さ $5\mu\text{m}$ のものを6段重ねて用いた。その結果を図3-38に示す。

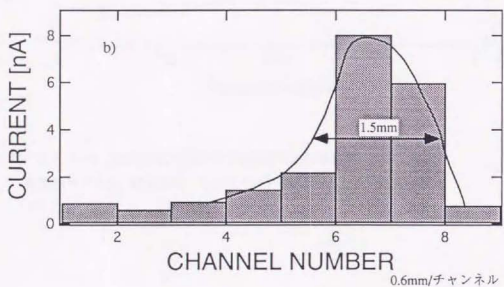
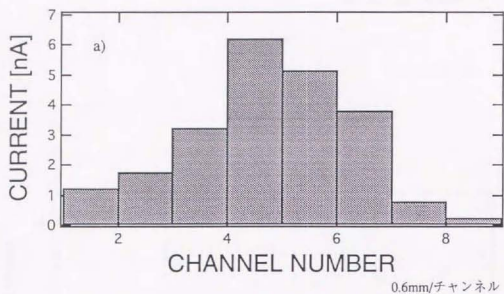


図3-35 a)  $\phi 1.7\text{mm}$ のスリット後方2mm位置での電子位置分布を0.6mmピッチのマルチワイヤ9チャンネルで測定した結果。電子が広がってしまった。  
 b)  $\phi 1.7\text{mm}$ スリット+ラージモデルデバイス後方2mm位置での電子分布測定結果。広がりが押さえられている。



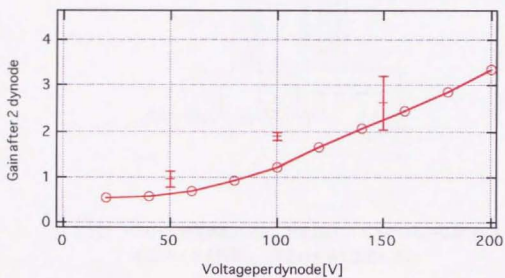


図3-36 ダイノード二段での電子増倍度の実験結果と計算結果。図中+印が実験結果である。計算結果はこれまで6段で求められたものの三乗根をとった。

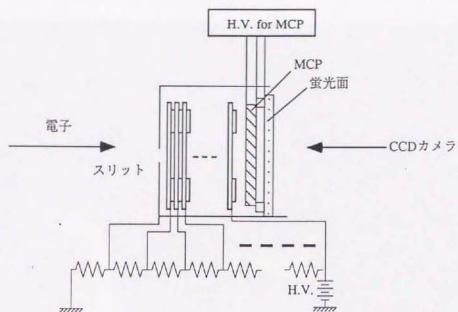


図3-37 イメージ測定実験体系図。100 $\mu$ mデバイスの後ろ側にMCP+蛍光面+CCDカメラを設置し、電子の分布を測定した。

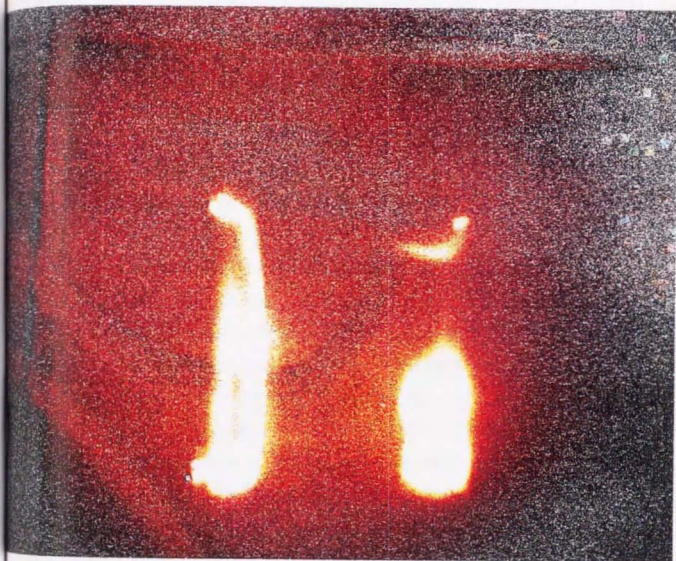
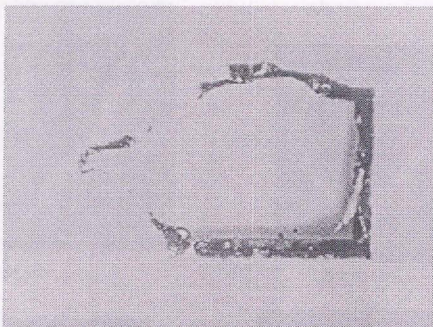


図3-38 イメージ測定結果。中心部に $2\times 2\text{cm}$ の領域に電子を入射したが場所により不均一な出力結果となった。

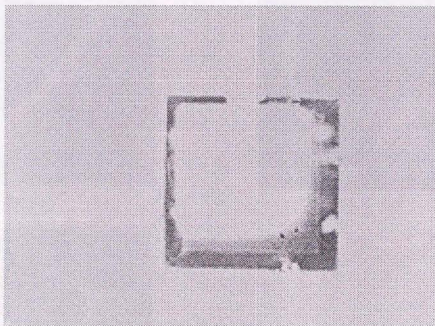
スリットを $2 \times 2 \text{ cm}$ の正方形としているため、四角い像が得られるはずであるが、実際の結果では場所により不均一性が認められる結果となった。この理由は「水平方向へのずれ」があったためと考えられる。3.3.1.2.の電子増倍度測定では、光にデバイスをかざすと光が透けて見えるのが肉眼で確認されたが、本実験では確認されなかった。これは、実験の際に組み立てガイドを設置して組みつけを行ったのだが、その際にウェハーに空けられたガイド孔の壁をガイドを取り除く際に破壊してしまったのが原因であると考えられる。ガイド孔の壁は異方性エッチングで開けられているためピラミッド型をしており、エッジ部分は非常に脆いと考えられ、また、何回か組み立てに失敗し、組立て直しを行った際に破壊されたものと考えられる。図3-39にガイド孔部分の状態を示す。

また、この結果は段間電圧 $80 \text{ V}$ での結果である。そのため、電子増倍度はあまり良い状態ではない。段間電圧 $80 \text{ V}$ までしか掛けられなかった理由は、スパーサー部の電極引き出し溝深さが $5 \mu \text{ m}$ であったため、段間のリーク電流が溝深さ $100 \mu \text{ m}$ のものに比べ非常に大きくなってしまったためである。3.3.1.2.の電子増倍度測定実験の場合は、リーク電流は測定限界以下であったが、本実験ではリーク電流が不安定に表れたため、段間電圧 $80 \text{ V}$ までしか掛けられなかったと同時に、各段の電流値がリーク電流のため測定不能になり、電子増倍度の測定も不可能であった。

そこで、スパーサー部の電極引き出し深さ $100 \mu \text{ m}$ のものを使用し、段数2段の場合の実験を行った。その結果を図3-40に示す。それぞれ段間電圧 $0 \text{ V}$ 、 $50 \text{ V}$ 、 $100 \text{ V}$ 、 $150 \text{ V}$ 、 $200 \text{ V}$ の場合の結果である。各段間電圧で、電子ソースであるフィラメントの温度のコントロールが不十分であったため、各々の場合で入射電子数は異なっている。そこで、それぞれの段間電圧での電子広がりを評価するため画像の分散を算出した。算出の方法を図3-41に示す。計算区間を一定範囲にし、ピークからの距離の2乗和を各画素ごとに足しあわせていったものである。分散の算出結果を図3-42に段間電圧に対してプロットしたものを示す。段間電圧が大きくなると共に分散は小さくなっていく傾向がある。この結果は、図3-14のspace $100 \mu \text{ m}$ の場合に対応し、定性的には同じ傾向を示していると同様に評価することができる。



a)ガイド孔拡大図 (破壊)



b)正常なガイド孔拡大図

図3-39 a) 破壊されたガイド孔の拡大図。本来図b)のようにピラミッド型のエッジが見られなければならないのにガイドにより削り取られて垂直孔に変化している。





段間電圧0V



段間電圧50V



段間電圧100V



段間電圧150V



段間電圧200V

図3-40 段数2段、段間電圧を0Vから200Vまで変化させた場合の電子の位置分布測定結果。





$$\sigma^2 = \frac{\sum_{xy} z l^2}{\sum_{xy} z}$$

図3-41 分散の算出方法。ピークからの距離の二乗和を求める。計算区間はピーク位置から相対的に決定した。

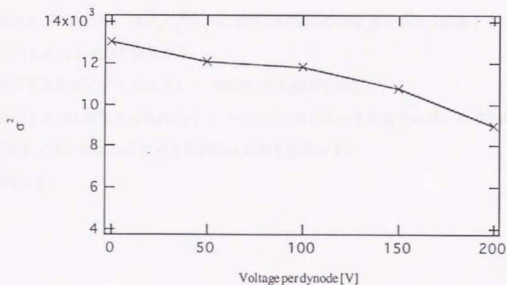


図3-42 分散の段間電圧依存性。段間電圧が大きくなると分散は少なくなる傾向がある。

## 3.4. ピラミッド型まとめ

以上の結果により、

- 1) ピラミッド型の貫通孔を採用した電子増倍デバイスは原理的に電子増倍デバイスとして動作可能であることを示すことができた。チャンネルサイズとウェハー厚さの比は5:2が最適である。また、チャンネルサイズ $100\mu\text{m}$ 、ウェハー厚さ $50\mu\text{m}$ とした場合、計算では段数12段、段間電圧200V、段間距離 $50\mu\text{m}$ で約 $10^4$ の電子増倍度が、段間距離 $100\mu\text{m}$ で $1.4 \times 10^3$ の増倍度がえられることが計算により示された。
- 2) 実験では段数2段で、段間電圧150V、段間距離 $100\mu\text{m}$ で2.62倍の値が得られた。これにより段数12段で $3.2 \times 10^2$ の電子増倍度が得られると期待される。
- 3) このデバイスは位置情報を保持しながら電子増倍を起こすと計算により予想され、二次元位置検出器として適用可能であると考えられる。
- 4) 実験により段数2段の場合に得られた画像をもとにして、出力電子の位置分布の分散を算出し、段間電圧が大きくなるにしたがって分散が小さくなることを段間電圧0Vから200Vの範囲で確認した。すなわち段間電圧を大きくするにしたがって位置分解能は改善される。
- 5) 組み上げの際には、各ダイノードに開けられる穴を精度良く垂直に配置する必要がある、そのための工夫が必要となる。
- 6) ガイド孔とガイド方式はウェハーが脆いため適用は難しい。
- 7) デバイスの大面積化は単結晶ウェハーのサイズによって決定される。そのため、現状では8インチぐらいの直径のデバイスが作成可能と思われる。

の知見が得られた。

参考文献

- [1] 電気工学ハンドブック、電気学会、S53、p.524
- [2] E. Rudberg, 'Inelastic Scattering of Electrons from Solids', physical review, 50, p.138-150 (1936).
- [3] K. Kuroda et al., 'New Type of Position Sensitive Photomultiplier', Rev. Sci. Instrum. 52(30), p.337-346 (1981).
- [4] S. M. Sze, 'Semiconductor Devices, Physics and Technology', Wiley (1985).

第四章  
電子増倍部  
斜め穴型

2章で提案された二つの種類の構造のうち斜め穴型について以下で各々検討を加えることとする。

#### 4.1.計算による各種性能評価

パラメータサーベイのため、構造を仮定して空間電場の計算を行い、そのデータを用いて電子の軌道計算を行い、モンテカルロ計算により電子増倍度などの各種性能評価を行った。計算ステップは第三章でピラミッド型の際に使用したものと同一である。

体系形状を図4-1に示す。LIGAライクプロセス(後述)を採用しているため、板に開ける斜め穴の角度は自由に設定できる。そこで、角度を60度と45度の二つの場合について計算を行った。

まず、図4-2,3に電場の計算例を示す。60度の場合の計算形状は、図4-1のパラメータを $T=100\mu\text{m}$ 、 $G=100\mu\text{m}$ 、 $W_y=20\mu\text{m}$ 、 $W_x=56.7\mu\text{m}$ 、 $C_y=80\mu\text{m}$ 、 $C_x=100\mu\text{m}$ とし、45度の場合は、 $T=100\mu\text{m}$ 、 $G=100\mu\text{m}$ 、 $W_y=20\mu\text{m}$ 、 $W_x=100\mu\text{m}$ 、 $C_y=80\mu\text{m}$ 、 $C_x=100\mu\text{m}$ とした。図4-2,4,3とも、yz平面に平行な面で計算セルを二等分する面での電位分布を示している。この図より、電界強度は段間で強く、貫通孔内では弱くなる傾向をみてとることができる。もっとも電界強度が大きくなる部分は斜め穴のエッジの部分であるが、プロセスの際にこのエッジがどの程度の丸みを帯びるかにより放電耐圧性が決定付けられる。これは、プロセス精度により決まるため計算では評価不可能である。

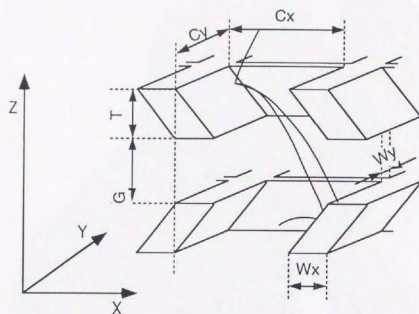


図4-1 斜め穴計算体系図。斜めの穴の方向を互い違いにするため、ダイノード二段分を一つの計算セルの中に組み込んだ。境界条件は第3章での計算条件と同じく周期境界条件とした。



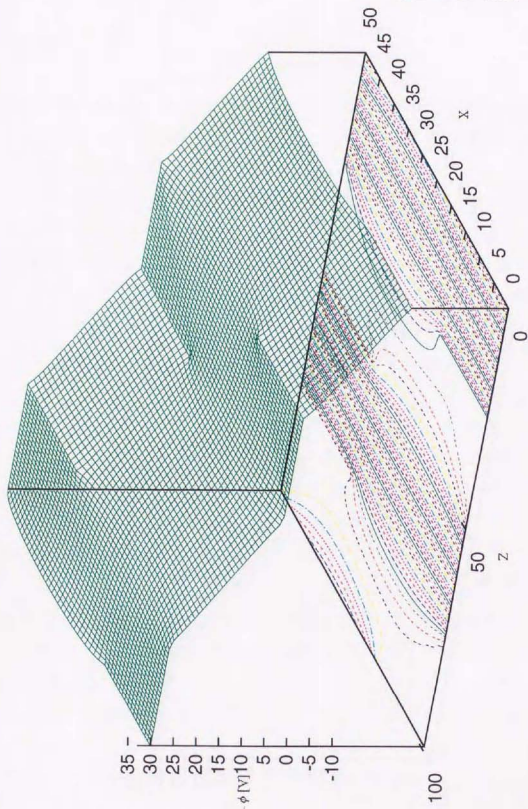


図4.2 斜め穴の角度60度の場合の電場の計算結果一例。XZ平面に平行な面で計算セルを二等分する平面での電位分布である。

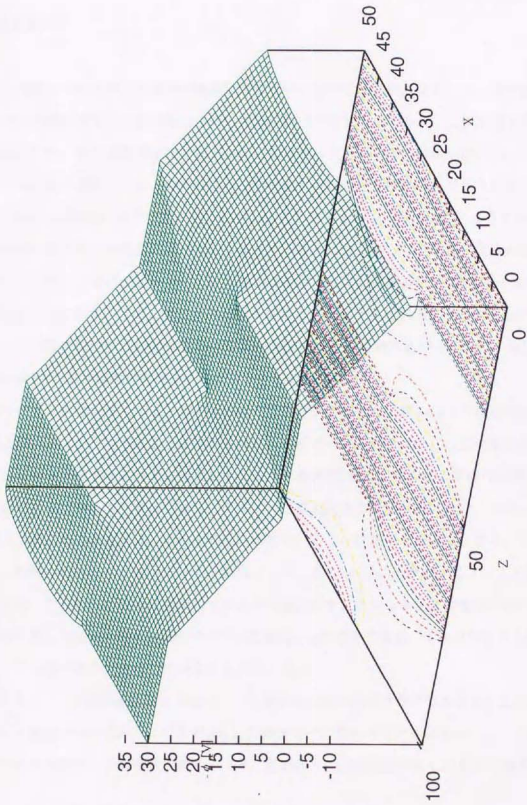


図4.3 斜め穴の角度45度の場合の電位分布計算結果。図4.2と同じ平面での電位分布を表している。

## 4.1.1. 電子増倍度

これらの電位データを用いて電子の軌道計算を行い、電子増倍度計算を行った。その軌道計算結果の一例を60度の場合と45度の場合について図4-4,4-5に示す。ところが、この形状で各パラメータを振っても、電子増倍度が10を越えることは無かった。そこで、図4-6に示すような段間の水平方向へのずれを導入した。このずれは、第三章で述べたずれとはほぼ同様の考え方に基づき、奇数段と偶数段との間でshift量だけ互い違いにずらすことを考える。第三章ではこのような水平方向へのずれが存在すると電子増倍度の値は著しく劣化する結果になったが、こちらの斜め穴型ではこの量がないとかえって増倍が起きないという逆の結果となった。段数6段の場合の電子増倍度の計算結果を図4-7,4-8に示す。ずれの量には最適値が存在し、それぞれずれ量 $40\mu\text{m}$ ,  $80\mu\text{m}$ であった。また、その際の増倍度は角度60度で段間電圧200Vのときに約32倍となっていて、12段重ねることにより約 $10^3$ の信号増倍度を得ることができると予想される。

このようにずれの量を導入すると電子増倍度が改善される理由は、図4-4,4-3の軌道計算でも見て取ることができるが、以下のように推測される。ダイノード上段で生成した二次電子が、下の段に移動していき下段ダイノードに衝突をする。ずれ量が0の時は、その際の衝突の位置がダイノード貫通孔上部になってしまっており、ダイノード貫通孔中の電場は弱いため、ダイノード貫通孔上部で生成した二次電子は、その次の段に抜けていくことは難しくなってしまう。このため、電子の増倍が起きにくくなっていると推測される。図4-9,4-10に上段のダイノードで生成された二次電子が、次段のどの場所に衝突しているかの図を示す。どちらも60度の場合であり、図4-9は段間のずれ無しの場合、図4-10は段間のずれの量 $40\mu\text{m}$ の場合である。ずれが存在する場合の方がダイノード下部に電子が衝突していることが分かる。

図4-11にダイノード面の各場所で発生した二次電子の次段への抜けやすさを示す。これは角度60度段間ズレ無しの場合であり、ずれが $40\mu\text{m}$ の場合でもこの結果と大差はなかった。この図より、次段への最も抜けやすい場所はダイノード下部であり、上記推論が正しいものと考えられる。

図4-12に角度60度の場合の段間ズレありと無しの場合の軌道計算の一例を示す。ずれがある方

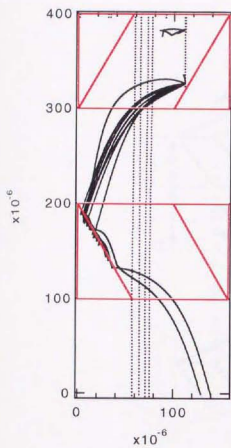


図4.4 角度60度の場合の軌道計算結果の一例

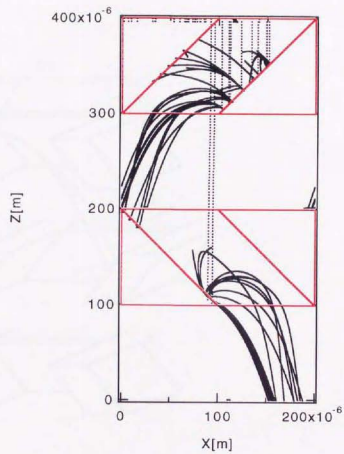


図4.5 角度45度の場合の電子軌道計算結果一例。

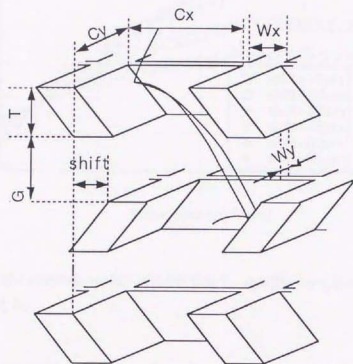


図4-6 奇数段と偶数段の間にshift量だけのずれを導入する。



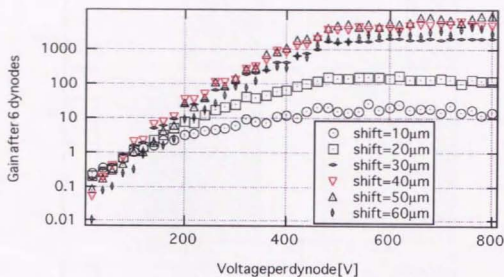


図4-7 斜め60度の場合の電子増倍度計算結果。shift量40 $\mu\text{m}$ で最適値をとる。

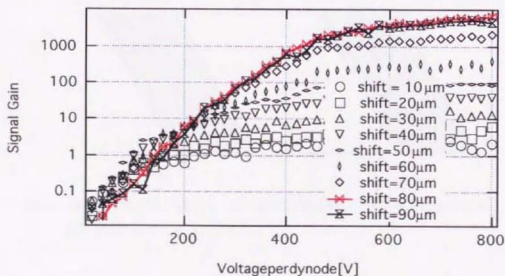


図4-8 斜め45度の場合の電子増倍度計算結果。shift量80 $\mu\text{m}$ で最大となる。ただし、段間電圧が低い場合はこの限りではないが、そのような場合は増倍度が低すぎるため実用とはならない。



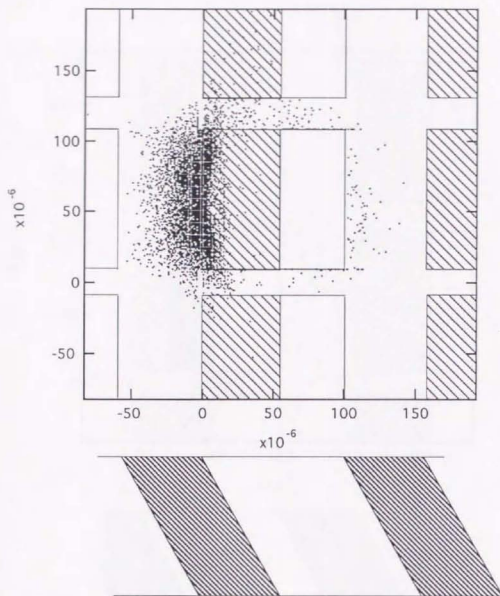


図4-9 段間にずれがない場合の、電子衝突位置分布。ダイノード斜面の上部に電子が当たってしまっている。

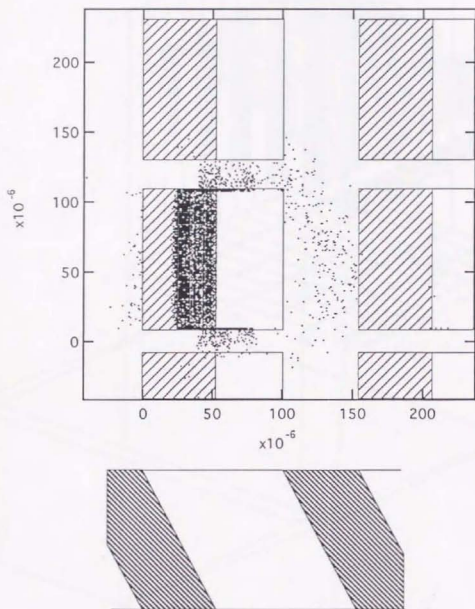


図4-10 段間のずれ量shift=40 $\mu$ mの場合の電子の衝突位置分布。ダイノード斜面下部に電子が当たっていることを見てとることができる。

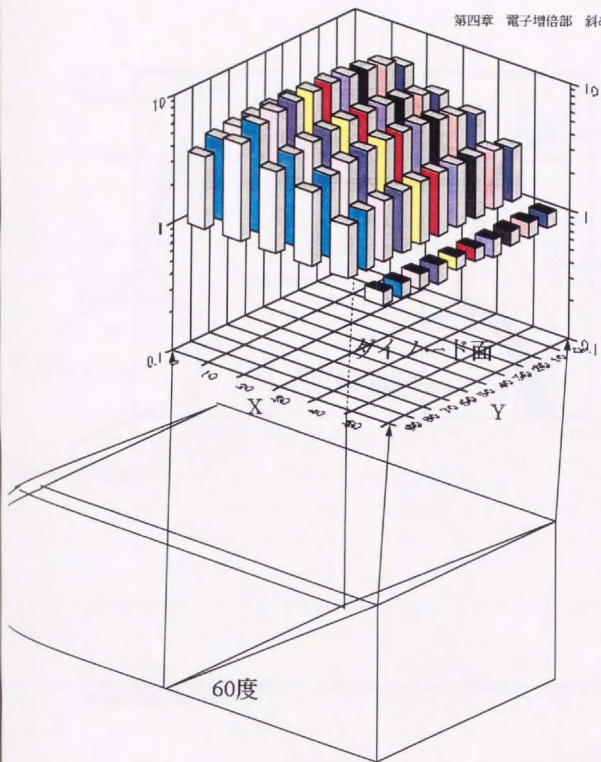


図4-11 タイノード斜面の各位置での電子の下段到達確率の分布。縦軸は確率 $\times 10$ の値を表示している。

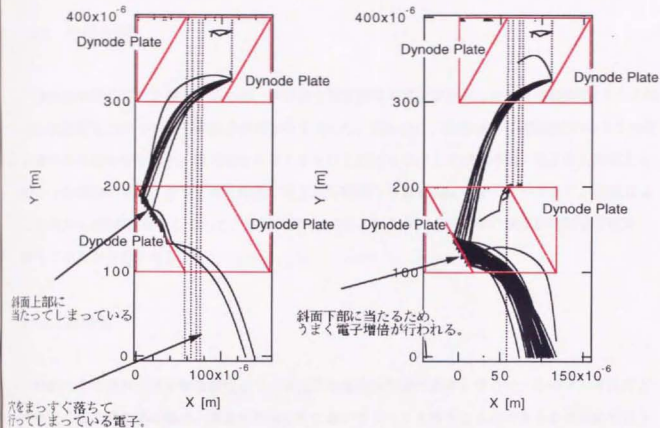


図4-12 角度60度の場合の電子軌道計算の一例。左図はshift=0  $\mu$ mの場合。右図はshift=40  $\mu$ mの場合。段間電圧は共に400V/plate。

がダイノード下部に当たっていることが示されている。

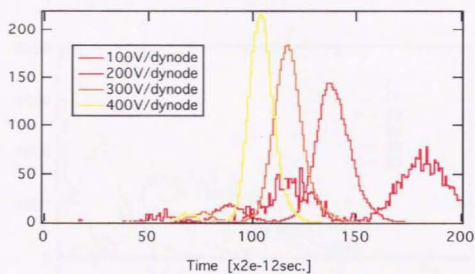
#### 4.1.2. 時間応答性

検出器時間応答性を評価するため、検出器光電変換膜で電子が発生したときの時間を0とした場合の検出器出力段での電子の到達時間分布を求めた。図4-13に、段数6段、角度60度の場合と45度の場合の時間分布を示す。段間電圧を強くするにしたがって立ち上がり時間、電子走行時間とも短くなる傾向がある。立ち上がり時間、電子走行時間とも数百psec.のオーダーであり、実際にはこの倍から3倍の段数となるため、時間は倍から3倍となるが、十分に早い検出器時間応答性を持っていると思える。

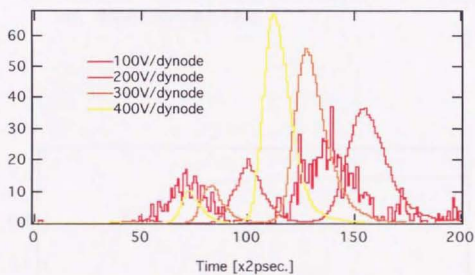
#### 4.1.3. 波高値

PMTはその優れた信号増倍特性より、単光子の測定が可能である。そこで、このデバイスでどの程度の量の光電子の場合、波高分布測定時においてピークを作ることができるかの評価を行うため、単一から50個の電子を検出器に入射した場合、出録信号はどの程度の大きさになるかの評価を行った。その結果の波高分布を角度60度、段数10段の場合について図4-14に示す。入射電子個数が10個以下では左右対称なピークを形図来るまでには至っていない。第三章でのピラミッドタイプでは10個の場合ではほぼ対称なピークを形作っているのとは対照的である。これは電子の増倍度が低いため電子増倍の際の揺らぎが大きいためと考えられる。

図4-15に一次入射電子に対する効率の結果を示す。この計算では、ディスクリレベルを1としてあり、ノイズのない理想的な場合についての議論である。一次電子数が20以上でようやく効率は1に近づいている。第三章の結果と比べると効率は悪いものと考えられるため、実際の使用において、効率を求めるのならばピラミッド型を採用すべきという結論になる。しかし、この計算は様々な検出器出力へのノイズの寄与を無視しているため、参考程度にとどめるべきであり、実際に測定して優劣を決定すべきであろう。また、実際の測定においてシンチレーターの発光量は相



60度の場合の最終段信号到達時間分布



45度の場合の最終段信号到達時間分布

図4-13 角度60度と45度の場合の検出器出力位置での電子の到達時間分布。



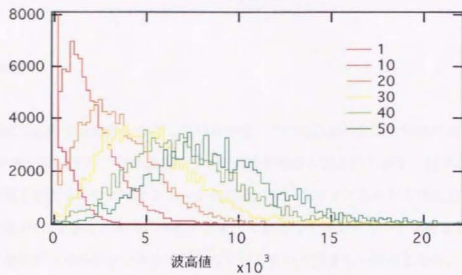


図4-14 入射電子数1,10,20,30,40,50の場合についての出力ヒストグラム。段数10段、段間電圧200Vの場合である。

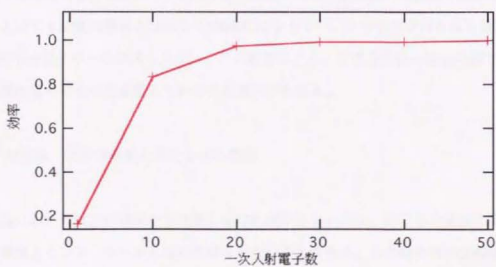


図4-15 図4-14の場合の検出効率のグラフ。理想的な場合であり、実際の使用においてはこれと異なると思われる。

当多く、場合によっては肉眼で確認できるほどであるため、実用上それほど問題にはならないと考えている。

#### 4.1.4. 位置分解能

二次元位置検出の動作を目的の一つとしているので、この検出器の位置分解能の計算を行った。段数6段、角度60度45度の二つの場合についての結果を図4-16,4-17に示す。図中横軸は段間電圧、縦軸は初期電子を生成させたチャンネルからの出力を、全チャンネルからの出力で割ったものである。この値が1になると、出力二次電子はすべて真下のチャンネルへと移動していることになり、二次電子増倍が一つのチャンネルで行われているという望ましい結果となる。

角度60度の場合は、最大電子増倍度を与える段間のずれ量 $40\mu\text{m}$ の場合の計算結果において、値は100%とはなっていないが、実用段間電圧200Vにおいて95%以上となっており、段間電圧をさらに上げればほぼ100%となっている。このため十分な性能が得られると考えられる。図4-18にこの場合のチャンネルごとの出力を示す。

一方角度45度の場合は、段間のずれ量 $50\mu\text{m}$ 以上でこの値が劣化してしまうという結果となった。最大電子増倍度を与える段間のずれ $80\mu\text{m}$ の場合には段間電圧200Vにおいて90%ほどであり、段間電圧を上げて60度の場合とは異なり100%にはならない。十分な値が得られる段間ずれ量 $50\mu\text{m}$ では、電子増倍度が十分に得られない。この結果により、位置分解能の性能の面では、角度45度よりも角度60度の方が優れていると結論付けられる。

#### 4.1.5. 電子増倍度・位置分解能を悪化させる要因

実際の製造において以上の結果から注意しなければならない点は、第三章の場合と同じく段間のずれ量を精度よくコントロールしなければならないことである。この斜め穴60度の場合では、奇数段と偶数段を $40\mu\text{m}$ ずらす必要があり、 $10\mu\text{m}$ のずれでも性能に明確に影響が表れてしまう。人間の手で $10\mu\text{m}$ の精度を出すのは難しいため、第三章で述べられているように、実際のプロセス

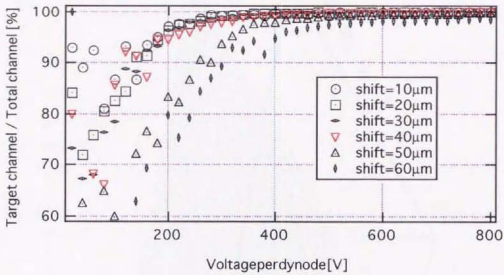


図4-16 角度60度、段数6段の場合の位置分解能のグラフ。横軸は段間電圧、縦軸は電子入射チャンネルの出力を前出力で割ったもので、この値が1になれば電子増倍は一つのチャンネル内で完結していることになる。

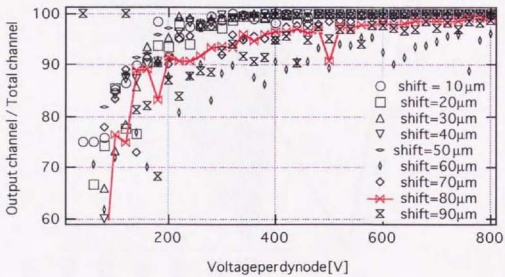


図4-17 図4-16と同じ条件で、角度を45度に変えたもの。

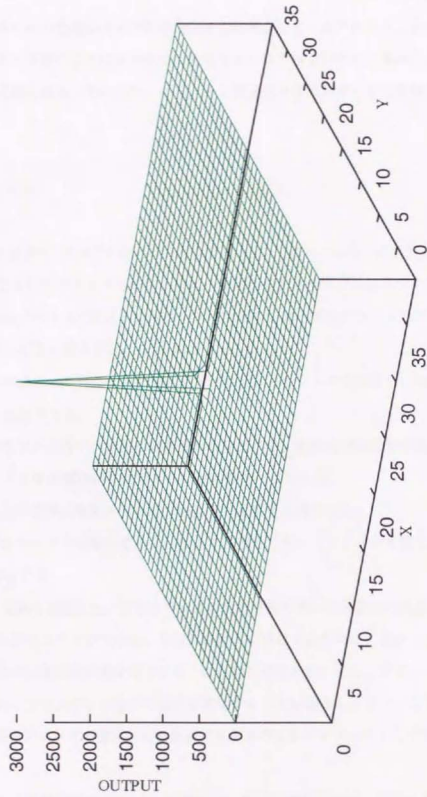


図4-18 角度60度段数6段段間電圧200Vの場合の出力チャンネル分布。

において位置あわせのためのガイド孔を設定する必要がでてくるであろう。とくにこの形状においては、ピラミッド型のようにまっすぐに設定するわけではないので、貫通孔そのものをガイドとするのは不可能である。そのため、ダイノード貫通孔とは別なガイド孔を端に設置しておく必要がある。

#### 4.2. 製造プロセス

この斜め孔の生成にLIGAプロセスの一部を使用した。LIGAプロセスは放射光などの強力なX線源を用いて加工を行うプロセスである。その一般的な加工ステップは以下のようになる。[1][2]

- 1) PMMA (ポリメチルメタクリレート) などのX線感光性のフォトリソを金属基盤の上に必要な厚さに塗布する。今回は $100\mu\text{m}$ となる。
- 2) このレジストの前にタングステンなどで形作ったマスクを設置し、放射光を照射し、レジストを感光させる。
- 3) エッチングを行い、感光した部分のみ除去する。放射光は直進性が高く、60以上の高アスペクトレシオの構造が作成できるのが特徴の一つである。
- 4) 除去した部分に電気メッキ法でNiなどの金属を堆積させる。
- 5) 未感光レジストを除去することにより、感光したレジスト部分と同じ構造をした金属の部品が完成する。
- 6) この金属を金型とし、プラスチックの成形技術を用いて大量の完成品を作り出す。

以上が一般的な加工ステップである。今回は斜め穴を構成するために、ステップ2)において基盤に垂直でなく斜め60度に放射光を当てるように基盤を設置した。また、ダイノードは高真空中で使用されるため、プラスチックなどの物質を使用することは望ましくない。そこで、5)のプロセスを省略し、4)のステップで構成される金属部分をそのままダイノードとして採用することにした。

今回のプロセスの図を図4-19に示す。実際には、金属を堆積した後、水平を出すために表面研磨を行った。また、レジストを完全に除去するためウェットでエッチングを行った後、ドライで

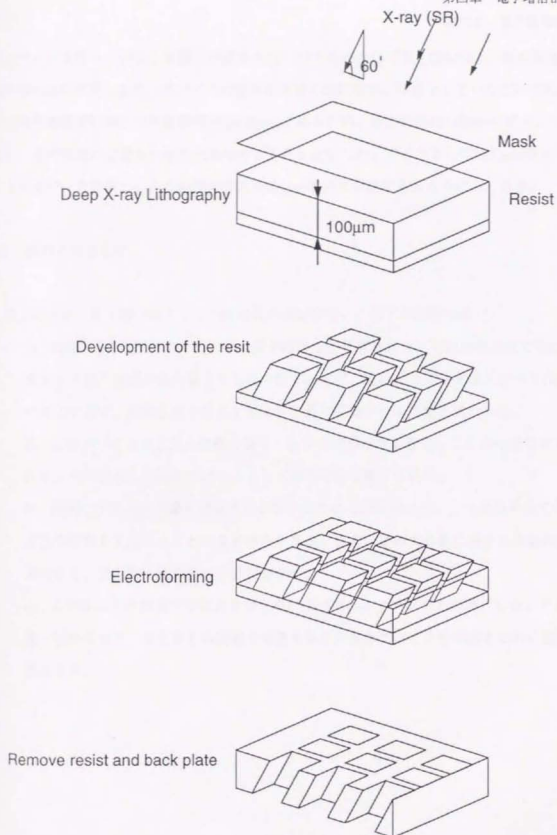


図4-19 斜め穴のダイノードを形成するのに使用したLIGAライクプロセス。  
LIGAプロセスの途中までを使用。今回のプロセスの特徴として斜めに  
X線を露光し、斜めの構造を成形することがあげられる。



エッチングを行っている。実際に作成されたデバイスの全体写真を図4-20に、斜め貫通孔の拡大図を図4-21に示す。また、デバイスの設計図を図4-22に示す。作成をしていただいた住友電工の放射光照射装置では最大の照射領域が $10 \times 20 \text{mm}$ であるため、中央に約 $10 \times 10 \text{mm}$ のダイノード部を設置し、その両側に位置あわせのためのガイド孔を設定した。ガイドとして $125 \mu\text{m}$ のシングルモードファイバーを使用し、かつ段間のずれを $10 \mu\text{m}$ 単位で設定できるようにしてある。

#### 4.3. 斜め穴型まとめ

以上により、電子増倍部としての斜め孔の検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 12段、段間電圧 $200 \text{V}$ で約 $10^3$ の電子増倍度が予想される。これは第三章で求められたピラミッド型の構造の最大値よりも低い値であるが、値はピラミッド型と比べて1けた落ちているにすぎず、段数を増やすことにより容易に解消される問題と思われる。
- 2) このデバイスは二次元情報を保存しながら信号増倍を起こすことが可能であると考えられる。そのため、二次元デバイスとして適用可能と考えられる。
- 3) 段間のずれという量を設定する必要があることが分かった。これは組み立ての際のガイド孔の位置を工夫することにより解決される。また、このずれ量に対する性能の変化が比較的大きく、注意深く組み立てる必要がある。
- 4) この斜め孔の製造プロセスそのものが長時間のエッチングを必要としないため、加工精度に優れており、歩止まりの問題を考慮すると大きなデバイスを作成するのに優れていると言えよう。

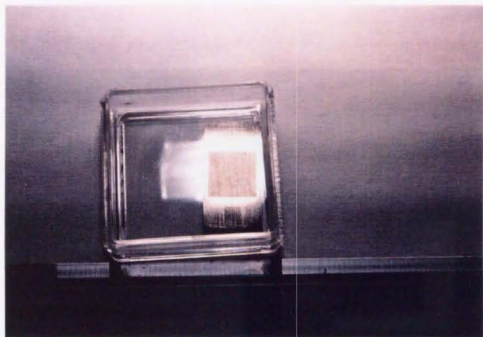


図4-20 試作したデバイスの写真。大きさは1cm×2cmである。

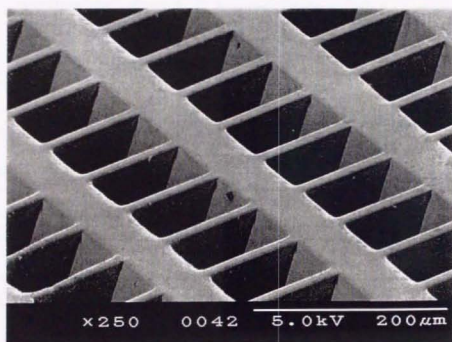


図4-21 ダイノード部拡大図。

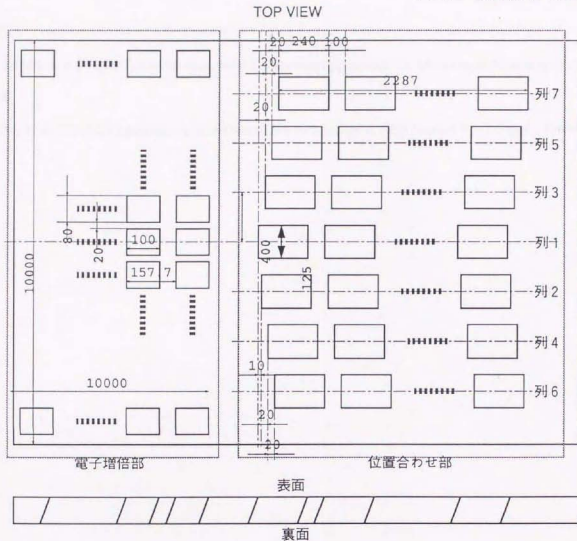
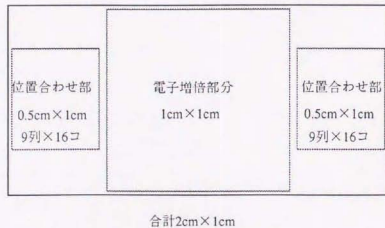


図4-22 デバイスの概念図。位置合わせ部と電子増倍部に分けて設定されている。  
全体的には以下の図のように配置される。



参考文献

- [1] A. Rogner et al., 'The LIGA technique - what are the new opportunities', J. Micromech. Microeng. 2 (1992) 133-140.
- [2] P. Bey et al., 'The LIGA process - a microfabrication technology -', FED Journal Vol.5 Suppl.1 (1994)

第五章  
読み出し部



これまでの章では、図5-1に示すように、検出器を構成する各部分において、ダイノード部について述べてきた。そこで、この章では最後の部分となる読み出し部分について述べることにする。

### 5.1. 設計

最終的な読み出し部として要求される性能としては、

- 1) リアルタイムで信号が取り出せる
- 2) パルスカウンティングが可能
- 3) 位置分解能は $100\mu\text{m}$ 以上
- 4) 速い信号処理時間
- 5) 二次元位置読みだしが可能

があげられる。以上の要求をほぼ満たすものとしては、

- A) 各チャンネルごとに個別に読みだし線を引く。
- B) 遅延線方式をもちいてX方向Y方向でそれぞれ位置を求める。[1]
- C) 電荷分割方式をもちいてX,Y方向で位置を求める。
- D) CCDやMOSイメージデバイスを用いる。

の四つの手法が考えられる。(図5-2)

手法A)は要求を完全に満たしているが、チャンネル数が増えると電極の数や必要なアンプの数も増えてしまうという欠点がある。例えば、 $100\mu\text{m}$ の分解能で100チャンネル×100チャンネルのデバイスを作る場合には、 $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ の領域から1万個の電極を引き出さなければならなくなる。X方向Y方向ともに独立にしても、200個の電極を引き出す必要がある。これの実現は難しく、B) C)D)のように位置エンコード回路を導入する必要がある。

一般的に放射線場で使用されているエンコード回路としてはB)ライン、C)抵抗、D)半導体回路、を利用の三つがあげられる。この中で、D)は半導体回路のため位置分解能が非常に良く(数 $\mu\text{m}$ )あまり強力でない放射線場では十分使用可能であるが、たまたま信号を読み出す逐次読みだし方式の

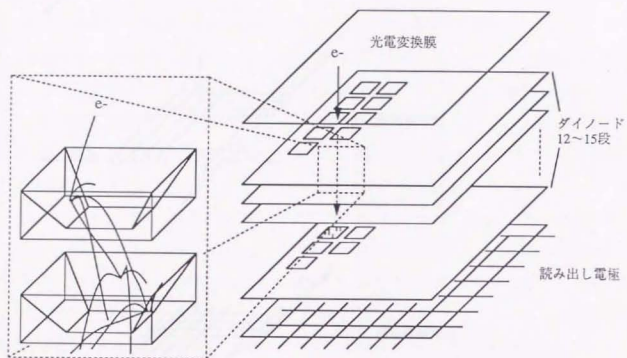


図5-1 検出器全体図。第三、四章ではダイノード部を述べてきたので、ここでは最後の読みだし電極を扱うことにする。

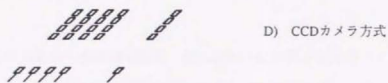
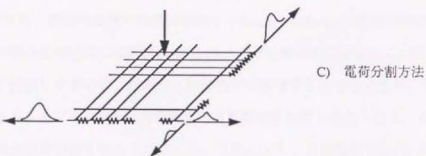
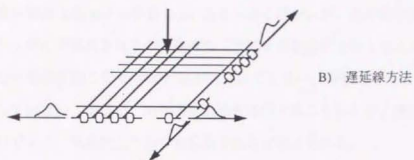
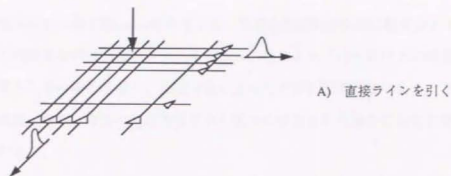


図5-2 各種位置読みだし方式。

ため、読み出し時間に数msec.かかるため、要求1)の時間分解能に難点がある。また、大面積のデバイスを作成するのは困難を伴う。もちろん対象によってはそれほどの時間分解能やトータル面積を必要としない場合も有り、測定対象によって十分に適用可能である。また、半導体は放射線に直接感度があり、今回の様に増倍された電子の検出を行う場合には放射線のシールドを考慮する必要が有る。

手法B)C)はともにガスカウンターで位置検出をする際に従来から良く用いられている方式であり、位置分解能は数cmから数百 $\mu\text{m}$ とあまり高くはないが、光や放射線に対して不感であり、ラインを引くだけで構成されるので微細加工技術との相性がよいと考えられる。時間分解能を考えると、C)の電荷分割方式ではRC回路が組まれてしまい、平面上で位置情報をエンコードする場合には適していない。そこで、B)の遅延回路を採用することにした。遅延回路はただ単に線を長く引くだけでよく、微細加工としても容易であると考えられる。

この方法は、遅延線回路の両端から出力される入射パルスの時間差から位置を測定する方法であり、位置を時間に変えて測定している。一般に、ラインをパルスが進む速さは1mあたりほぼ5nsec.であり、外部の装置の時間分解能から1nsec.~0.5nsec.の遅延時間が必要であるので、ある地点と隣の地点との区別には約20cmから10cmの遅延線があればよいことになる。一方、遅延線をあまり長く設定しすぎると、読み出しに時間がかかりすぎることになり、要求4)を満たすことができなくなる。そこで、X,Y方向で独立の遅延線回路を用いることにし、かつ各方向とも100本単位で一つの遅延線回路を組むことにした。これにより、各遅延線回路は100nsec.以下で動作するため、全体の検出速度も100nsec.以下ということになる。

## 5.2. 製造プロセス

図5-3に作成した読み出し部の概略図を、図5-4,図5-5に作製されたデバイスの写真を示す。第三章で試作されたデバイスと共通性を持たせるために、電極領域は $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ となっている。その領域の外側に幅1cmのディレイラインが組まれた領域がある。X方向、Y方向ともに独立に引かれており、その間には $0.5\mu\text{m}$ 厚の窒化膜がはられている。製造プロセスとしては、酸化膜生成、Xパ

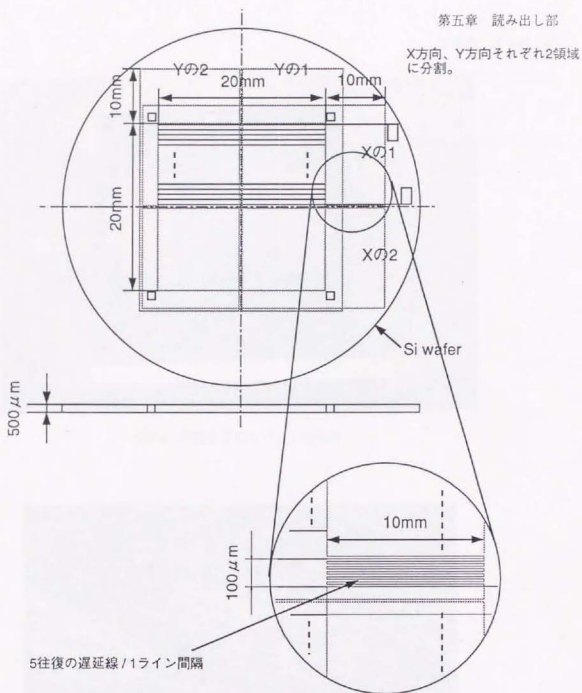


図5-3 試作した位置読みだし電極の概略図。2cm×2cmの領域を測定するため、X方向Y方向ともに二領域に分割してある。

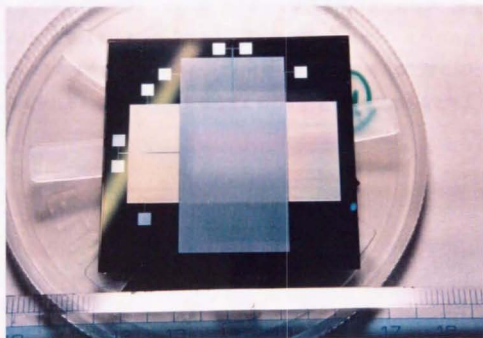


図5-4 作製されたデバイスの写真

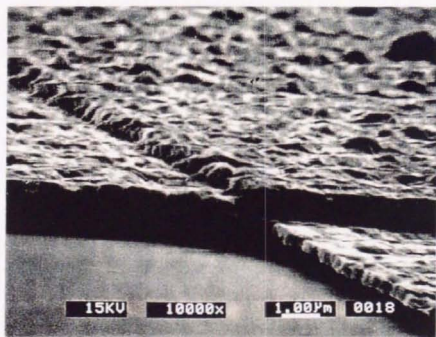


図5-5 XラインとYラインの交差する点の電子顕微鏡写真



ターニング、窒化膜生成、Yパターンニング、Yパターンの透き間の窒化膜除去、酸化膜除去のステップをふんだ。電極はアルミニウムである。実際に作成されたデバイスの各遅延回路間に、図5-6に示されるようなリークが認められた。これは第一層のアルミ層と第二層の間に表面電流が流れるためと考えられる。これらの短絡をなくすための工夫をする必要があると考えられる。

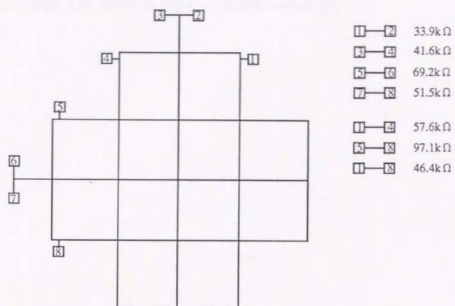


図5-6 電極間の抵抗値。パターン第一層と第二層との間にリーク電流が認められる。

参考文献

- [1] S. Beghini et al., 'A compact parallel plate detector for heavy ion reaction studies', NUCLEAR INSTR. AND METH. IN PHYS. RES. SECT. A 362(2-3) 15-AUG-95:526-531

## 第六章 結論

微細加工を使用して、微細なPMTを形作り、PMTアレイを構成することの検討を行い、以下の結論を得た。

PMTダイノードの具体的な形状を決定し、2種類の構造を提案することができた。一つはピラミッド型と名づけたもので、シリコン単結晶の異方性貫通エッチングにより形成されるものである。実際に一チャンネル100 $\mu$ mのサイズのプロトタイプの試作を行い、電子増倍を起こすことを実験で確認した。2段で2.6倍が実測され、12段で $3.2 \times 10^2$ の電子増倍度が得られると予想される。また、計算により、チャンネル間のクロストークは20%以下に押さえられると予想され、実際にウェハー二枚の場合の出力電子の位置分散の段間電圧依存性を測定し、計算結果と同じ傾向を示すことを確認した。また、計算により、単一光子の測定も可能と考えられる。全体としての大きさは、シリコン単結晶のエッチングにより作られるため、ウェハーの取り扱いに注意をすれば大面積化は容易に達成できると考えられる。

もう一つは斜め穴型で、プロトタイプの試作に成功した。計算では12段で最大 $10^2$ の増倍度が得られる結果となった。また、計算により、チャンネル間のクロストークは5%以下に押さえられると予想され、単一光子の測定も可能と考えられるので、ピラミッドタイプより良い結果が得られると予想される。この斜め穴は、大面積のものを作成するには原理的な困難は無いが、プロセスを工夫する必要がある。即ち、この試作では、LIGAライクプロセスを使用しているため、ダイノード一つ一つに対し放射光で露光を行う必要があった。これは不経済であるため、本当のLIGAプロセスで製造できるように工夫する必要がある。

以上のデバイスのプロセスにおいて注意する点としては、デバイス組み上げの際の横方向の精度を上げる必要があることである。

また同時に、読み出し電極の試作も行い、遅延線型で二次元の位置エンコード部の試作に成功した。製造プロセスとしてはそれほど難しいものは使用していないが、広い面積にわたって欠陥がないことが求められるため、歩留まりの問題さえ解決されれば大面積化は簡単に達成できると考えられる。

これらにより、実際のデバイスとして組み立てプロセスにおいて、12段から15段と多段にする際に何かしらの問題がなければ、検出器デバイスとして十分構成可能と結論付けられる。

これらのデバイスの応用分野としては、その出力特性からガンマカメラの小型化やSR光

を用いた人体イメージングなどの医療分野が考えられると共に、高エネルギー物理実験などで用いられるファイバー型トラックディテクター用のマルチ読み出し光電子増倍管など、高エネルギー物理分野への適用など、光計測分野への応用も可能と考えられる。



謝辞

本博士論文は、指導教官である中沢教授や井口助教授、高橋講師の指導のもと、様々な方々にお世話になりながら完成しました。まずは古巣の卒論のときお世話になった炉材研究室の米岡さん。他の研究室に移ってからもなお、様々なパーツをたかりに行くと共に実験装置の製造や工作にいろいろご助言をいただくという、厚かましいお願いにも苦笑をされつつも快話をいただき有難うございました。

また、ピラミッド型の製造を担当していただいた住友精密工業の高橋さん寅屋敷さん佐藤さん。とても薄くもろいウェハーの工作限界を探っていただき感謝の念に耐えません。またLIGAプロセス出の斜め穴の製造をしていただいた住友電気工業の平田さん沼澤さん。いろいろな文献まで貸していただき有難うございました。

本研究室でお世話になった細野技官、高田助手。日常の細かい常識から研究室にどのようなパーツがあるかまでいろいろ教えていただき有難うございました。また秘書さんの斎藤さん紺谷さん。事務手続きいろいろお世話になりました。それから研究室で一緒に研究をし遊んだ院生の皆さんいろいろな刺激あるいは出来事を与えていただき感謝いたします。

田中教授、上坂助教授、藤田教授には論文審査でいろいろな助言をいただきありがとうございます。

最後に、指導教官である中沢教授、井口助教授、高橋講師に感謝の意を表してお仕舞いにしたと思います。皆様ほんとうに有難うございました。

では。

論文目録

論文

1. 題目 「微細加工によるマイクロ光電子増倍管の開発」

2. 印刷公表の方法及び時期

1) 平成6年8月 KEK Proceedings 94-7

"A New Array Type Electron Multiplier Using Micro-Machining Technique" (微細加工を用いた新しいアレイタイプ電子増倍管の試作)

(H. Takahashi, T. Iguchi, M. Nakazawa, A. Takahashi, R. Tokue と共著)

2) 平成6年12月 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 353

"New array type electron multiplier as a two dimensional position detector" (二次元位置検出用の新しいアレイタイプ電子増倍管)

(H. Takahashi, T. Iguchi, M. Nakazawa, A. Takahashi, R. Tokue と共著)

3) 平成7年1月 放射線 Vol.21 No.1

「微細加工技術の放射線計測分野への応用による二次元検出器の概念設計」

(高橋浩之、井口哲夫、中沢正治、高橋歩、徳江林三と共著)

4) 平成8年 東京大学工学部紀要(B) Vol. XLIII No.3

"Design and Fabrication of an Array Type Electron Multiplier for Radiation Imaging by Micromachining Technique" (微細加工技術による放射線イメージセンサー用のアレイタイプ電子増倍管の設計)

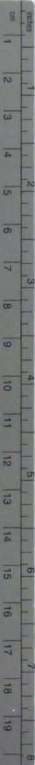
(H. Takahashi, T. Iguchi, M. Nakazawa, A. Takahashi, R. Tokue, Y. Hirata と共著) 公表予定

3. 冊数 1編

平成8年3月17日

氏名 河原林 順





# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/Color	Black
[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]
[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]	[Patch]

# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

