

内容梗概

近年、加速器実験の高輝度化に伴い優れた位置分解能・時間分解能・入射許容量を持った検出器の開発が進められている。これまでに開発されたワイヤーを用いた検出器では高頻度入射粒子に対応できないといった限界があるため、この問題を解決するために、マイクロパターンガス検出器の研究が進められている。本研究の対象であるマイクロピクセルチェンバー(μ -PIC)は、マイクロパターンガス検出器の一種でプリント基板技術を用いて製作されているため、大面積・量産化が容易であるという特長を持った検出器である。しかし、 μ -PICでは放電問題が原因となり、MIP粒子検出のために必要な 10^4 程度の増幅率での長時間安定した動作が実現できていない。また、この放電問題の原因を特定する研究が行われていない。そのため、本研究では放電原因の特定を目的として、 μ -PIC放電ピクセルの走査電子顕微鏡(SEM)観察・放電ピクセル堆積物のオージェ電子分析・封入ガスを変化させた場合の強制放電実験を行った。その結果、放電による導電性堆積物が炭素であること、放電回数の増加と共に炭素の堆積領域が増加すること、炭素の堆積は基板物質の沿面放電による炭化の影響よりも、電子なだれのストリーマへの発展から発生する紫外線によるクエンチャーガスのエタンの分解による影響が主たる要因になっていることが示された。

Abstract

Recently conventional detectors equipped with wires, such as Multi Wire Proportional Counter has reached their limitation in its use in dense particle flux environment. To solve this problem, a new type of radiation detectors which is called Micro Pattern Gas Chamber (abbreviated as "MPGC"), which is expected with good position resolution, good time resolution and with high counting ability in dense particle flux has been developed. The μ -PIC is one of these MPGC type radiation detector aimed for versatile usage. Its salient feature is that it is mainly produced with commercial printing circuit board technology. Therefore it is easy to mass produce large volume detector with modest price. But when it would be used in special application like in detecting minimum ionization particles(MIPs), in which gas gain over 10^4 is required, it has been suffered from accidental discharges. But the research to identify the cause of discharge has not been fully done. We can assume that there are three reasons for the origin of those discharge; production accuracy in micro-pattern, chamber gas discharge and surface streamer generated from the triple junction of material on its substrate in dielectric constant. In this study, we have done three experiments to identify the origin of discharge. These are the scanning electron microscope (SEM) observation of discharged pixels, the Auger electron analysis of sedimentary material on discharged pixels and forced discharge experiment generated on a single pixel in various gasses. By these experiments the cause of discharge is studied. One finding is that conductive sediment on damaged pixel is carbon. Moreover when the discharge is forced in Ar+C₂H₆ mixture, the area of carbon sediments increases depending on the number of times of discharge. But, even in gasses without any carbon atom(Ar,N₂), we find small amount of deposits(compared with in case of Ar-ethane mixture) on the surface of dielectric material(polyimide). These findings clearly show that there are two origins in the carbon sediment. One is from ethane mixed in ,for the purpose of quenching, decomposed by ultraviolet photon generated in avalanche streamer and the other is from carbonization of polyimide ,which is used as insulator material, by possibly surface streamer.

目次

| | | |
|-------|--|----|
| 第 1 章 | 序論 | 3 |
| 第 2 章 | ガス増幅の原理 | 5 |
| 2.1 | 電子雪崩 | 5 |
| 2.2 | クエンチャー | 7 |
| 第 3 章 | ガス増幅検出器 | 9 |
| 3.1 | Micro Strip Gas Chamber(MSGC) | 9 |
| 3.2 | Micro Dot Chamber(MDC) | 10 |
| 3.3 | Gas Electron Multiplier(GEM) | 10 |
| 第 4 章 | マイクロピクセル検出器 (μ -PIC) | 12 |
| 4.1 | μ -PIC の構造と動作原理 | 12 |
| 4.2 | μ -PIC の特長 | 13 |
| 4.3 | μ -PIC の電極配置 | 14 |
| 4.4 | 放電問題 | 16 |
| 第 5 章 | 走査電子顕微鏡を用いた μ -PIC 放電ピクセルの観察 | 18 |
| 5.1 | 走査電子顕微鏡(SEM)の動作原理 | 18 |
| 5.2 | 測定方法 | 21 |
| 5.3 | 測定結果 | 22 |
| 5.3.1 | 二次電子像による観察結果 | 23 |
| 5.3.2 | 反射電子像による観察結果 | 26 |
| (1) | COMPO 像 | 26 |
| (2) | TOPO 像 | 27 |
| 5.3.3 | オージェ電子分光法による導電性物質の分析結果 | 30 |
| 第 6 章 | 強制放電実験 | 34 |
| 6.1 | セットアップ | 34 |
| 6.2 | 測定条件 | 36 |
| 6.3 | 測定結果 | 37 |
| 6.3.1 | Ar:C ₂ H ₆ =1:1 ガスにおける測定結果 | 37 |
| 6.3.2 | 3 種類の封入ガスにおける測定結果 | 42 |
| 第 7 章 | 考察 | 47 |
| 7.1 | 電極間放電に伴うピクセル上堆積物の堆積過程 | 47 |
| 7.2 | 放電の基板への影響 | 47 |
| 7.3 | 放電への製作精度の影響 | 48 |
| 第 8 章 | まとめ | 49 |

| | |
|-----------------|----|
| 謝辞 | 51 |
| 参考文献 | 52 |
| 学会発表論文リスト | 54 |

第 1 章 序論

人間は目で直接見ることのできない粒子を「検出器」を用いて発見することによって、原子核のスケールでの極微の世界の現象を捉えてきた。新しい性能をもつ「検出器」が新しい現象の発見へと結びついてきた[1]。レントゲンによる X 線の発見とキュリー夫妻の放射線の研究は 20 世紀の幕開け前夜の出来事であったが、それぞれ写真乾板と電離箱という当時の最も新しい検出器によってもたらされたものであった。

今日に至るまで複雑な素粒子反応を同定して、新しい粒子とそれによる新しい現象を見出す努力が続けられているが、そのためには反応で生まれた粒子の飛跡を精度良く測定してそれぞれの粒子の識別をおこなうことが最も重要となる。これまでに、ガス中でのイオン増幅を利用して粒子の飛跡を検出する種々の新しいデバイスが提案・実現された。中でもフラッシュホドスコープ、放電箱、ストリーマチェンバー等は反応の詳細を調べるための新しい検出器として、その当時注目を集めた。さらに、ガス中での二次電子のドリフト時間から荷電粒子による電子・イオン対の発生点を決めるドリフトチェンバーなどのアイデアが実現し、デジタル化の流れに従って、現在でも飛跡検出器として活躍している。一方、荷電粒子が物質中で放射する光を検出するデバイスは時間分解能の最も優れた測定器として注目され、原子核・素粒子の研究になくてはならない検出器として大活躍してきた。荷電粒子が物質中を通過する際に放射される蛍光を検出するシンチレーションカウンターは光量が多いため歴史的にも最も古くから普及した測定器であり、物質からの発光スペクトル測定やガンマ線カメラ用検出器として使用されており医療分野では良く用いられている。また、半導体検出器は固体の電離箱とも言えるが、非常に小さな検出器の集合体として作成することが可能なため、反応点の近傍で粒子の通過位置を検出するのに有効である。半導体検出器はエネルギー分解能が高いため、X 線検出器などに利用されている[2]。

これらのことから、検出器の発展が素粒子物理など物性物理の発展において大きな役割を果たしていることがわかる。本研究の対象であるマイクロピクセルチェンバー(μ -PIC)は、「物質の根源を追求する素粒子実験」、「宇宙の成り立ちを調べる宇宙物理学における観測」、「放射光実験に代表されるミクロ・高速物性研究」、「医療分野における X 線イメージセンサー」、「微小放射線被爆治療用検出器」など広い応用が可能となる検出器として開発が進められているものである。

京都大学では、 μ -PIC と GEM(Gas Electron Multiplier)を組み合わせた応用研究がなされている[3,4]。神戸大学においては、現在まで、 μ -PIC においての安定性の向上と高増幅率化を中心とした研究が進められており、電極構造を最密構造にした μ -PIC の開発やメッシュ付き μ -PIC などの開発が始められている[5]。これまでの研究により増幅率や安定性は向上しているが、 μ -PIC 単体において電離損失が最小となるような粒子(最小電離損失粒子; Minimum

Ionization Particles (MIPs))を測定するために必要な 10^4 以上の増幅率での長時間安定動作は実現していない。 10^4 倍を超える高増幅率での μ -PIC 単体での動作中においては、まれに放電が起こり、検出器全体が機能を果たさなくなることがある。この放電の原因として、

プリント基板技術を用いた製作精度の問題、絶縁材料の耐放電性の問題、カソード端から放出された電子による基板上の沿面放電、アノード近傍の電子なだれのストリーマへの発展、などが考えられているが、現在までにこの μ -PIC における放電現象の原因の特定に関する研究はほとんど行われていない。特に沿面放電の可能性と検出器に与える影響はMPGDの開発にとって、もしこれがV.Peskov[6]らの言う、避けることのできない問題であるとすると、本質的に明らかにその実証が必要とされることである。

本論文では μ -PICの放電問題の解明を目的として、走査電子顕微鏡(SEM)を用いた μ -PIC放電ピクセルの表面観察を行うことにより放電により μ -PICのピクセルが受けた損傷、耐電圧の悪化などの現象の解明を試みた。

本論文は以下のように構成されている。第2章では、ガス増幅の原理的説明のため、比例計数管を用いたガス増幅検出器の動作原理について述べる。第3章では、我々の用いている μ -PICに至るまでのMPGDの開発の流れと現在の発展の状況について述べる。第4章では、我々の用いている μ -PICの動作原理、特長について述べた後、我々の研究の課題となっている放電問題について述べる。第5章では、複数の放電ピクセル観察による放電のピクセルに与える影響の分析、オージェ分析によるピクセル上の導電性物質の分析、ピクセル上の導電性堆積物の特定の詳細について述べる。第6章では、更に炭素堆積過程を探求する目的で、封入ガスを変化させた場合の強制放電実験を行い、放電によるピクセル上導電性物質堆積プロセスの考察を行った。最後に第7章でこれらの実験結果をまとめ、今後の課題について述べる。

2章 ガス増幅の原理

この章ではガス中での電子・イオンの振る舞いの説明をもとに、ガス増幅検出器の動作原理を述べる。

2.1 電子雪崩

ガス増幅検出器の動作原理を比例計数管(Proportional Counter)を例に説明する。比例計数管の構造は図 2.1 に示すように円筒陰極(カソードチューブ)の中心に数十 μm 径のアノードワイヤーを張ったものである。この電極間の空間には Ar や Ne 等の希ガスが充填されている。アノードワイヤーとカソードチューブ間に高電圧を印加し電極間に電場を形成する。この時、アノードの中心から半径 r における電場は、アノードワイヤーの半径を a 、カソードワイヤーの半径を b 、アノードワイヤーとカソードチューブ間にかかる電圧を V とすると、(2.1)式のようなになる。

$$E(r) = \frac{V}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (2.1)$$

例えば、 $V=3\text{kV}$ 、 $a=20\mu\text{m}$ 、 $b=1\text{cm}$ の標準的構造の場合、アノード表面の電場は 241kV/cm となる。式(2.1)から分かるとおり、電場の強さは、 r の小さくなるアノードワイヤー近傍で非常に強くなる。荷電粒子や X 線などの放射線が検出器内を通過するとガス中の分子は電離作用を受けてイオン化し電子イオン対が発生する。また、一部の原子は励起される。ここで発生した電子を一次電子とする。発生した電子とイオン対はそれぞれ反対方向に流動していく。アノード近傍に到達した電子はアノード近傍に形成された非常に高い電場によりさらに加速され高いエネルギーを得て周りのガス分子をイオン化する。ここで生じた電子を二次電子とする。この過程が繰り返され二次電子がねずみ算的に増加する。このことを電子雪崩と呼ぶ。この電子雪崩によるガス増幅は殆ど電場が強くなるアノード近傍で起こる。これらの電子雪崩によって増加した電子は最終的にアノード電極に到達して増幅された信号として検出される。ガス増幅検出器の性能を評価する要素の一つであるガス増幅率は、二次電子数を一次電子数で割ったものと定義される。

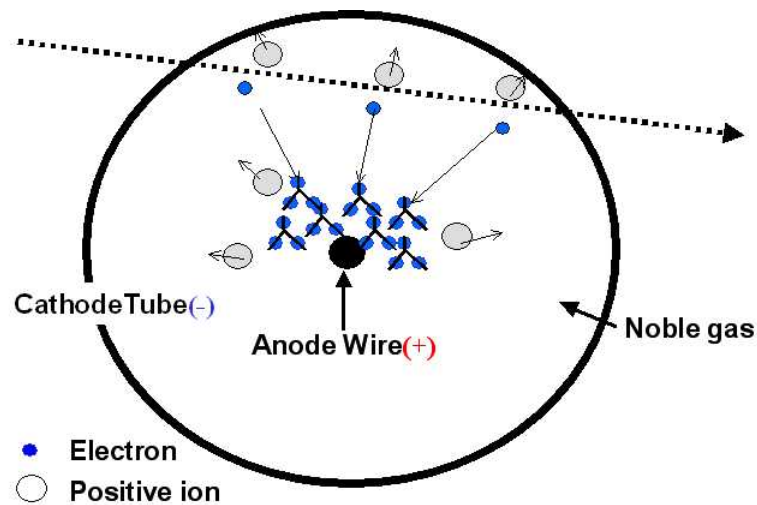


図 2.1 比例計数管の構造

比例計数管の原理を応用した検出器として、マルチワイヤー比例計数管(Multi Wire Proportional Chamber: MWPC)がある。MWPCは比例計数管のアノードワイヤーを複数本設けることで放射線の一次元的な通過位置検出を可能にした。構造を図 2.2 に示す。複数のアノードワイヤーと平行に配置された平板で構成される。これは 1967 年から 1968 年にかけて Charpak[7]によって開発された。それぞれのワイヤーが比例計数管として動作することにより粒子の入射位置を一次元的に求めることができる。位置分解能を向上させるためにはワイヤー間隔を小さくすれば良いが、クーロン力による反発のためにワイヤー配置がずれ電場が歪んでしまう。そのため通常ではアノードワイヤーの間隔を $500\mu\text{m}$ 以下に保つのは困難である。また、本質的にガス増幅の際に生成する陽イオンの滞留による空間電荷効果のために近年の高輝度加速器で要求される $10^4\text{count}/\text{mm}^2\text{sec}$ を超える高頻度入射粒子には対応できない。

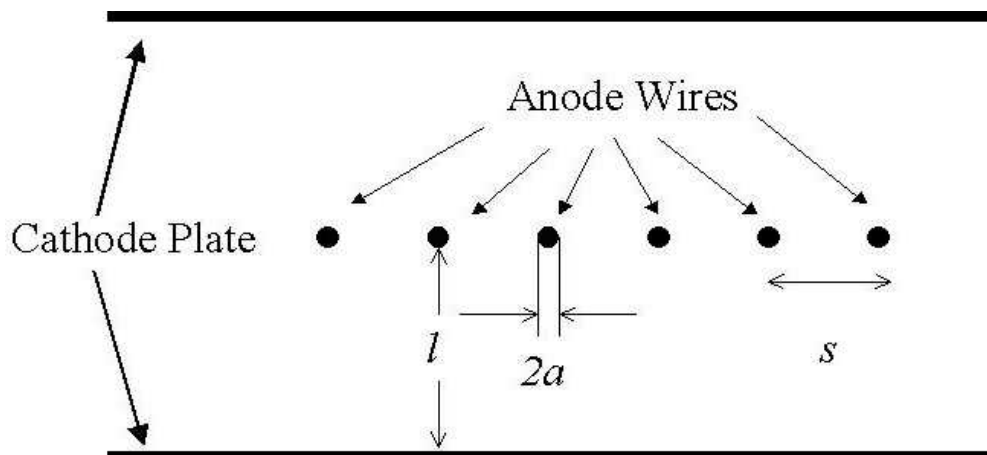


図 2.2 MWPC の構造

2.2 クエンチャー[8]

電子雪崩によりガス中に生成された励起原子は、いくつかの過程によりその励起エネルギーを失う。ある場合は、他の原子と衝突した際に、励起エネルギーを衝突した原子に与え電離させ、自身は他の準位または基底状態に移る。また、アルゴンは自身よりもイオン化エネルギーの低い有機ガスがガス中に存在する場合、有機ガスに自身が保有するエネルギーを与えて有機ガスを解離させ、自身は基底準位に移る。このことをペニング効果 (Penning Effect) と呼ぶ[9]。一般に放電管などではイオン化した陽イオンは陰極に向かってドリフトするが、この陽イオンが陰極付近に到達すると陰極の金属表面にある電子を引き出して中性化する。このとき陽イオンのイオン化エネルギー I から金属の仕事関数 ϕ を差し引いたエネルギーが金属の仕事関数よりも大きい場合、つまり式(2.2)を満たす場合陰極表面からさらに電子が放出される。

$$I - \phi \geq \phi \quad (2.2)$$

$$I \geq 2\phi$$

例えば、 μ -PIC の場合、アルゴンのイオン化エネルギーは 15.8eV、電極の仕事関数は、4.65eV(銅)、5.01(ニッケル)であるので、(2.2)が満たされ、そのままでは陰極からの二次電子放出がおきる。ガス検出器ではこれによって電子放出が繰り返されるのを防ぐために一般に希ガスよりもイオン化エネルギーの低い有機ガスを混合する。このように有機ガスを入れ希ガスイオンとの間のペニング効果を利用することによって陰極からの電子放出を抑えることができる。さらに有機ガスの陽イオンが陰極で中性化した後のエネルギーは有機ガス自身の解離エネルギーになり分解される。

さらに有機ガスのもう一つの作用として優れた紫外線吸収特性が挙げられる。ガス検出器において電子雪崩が生じたときにイオン化した不活性ガスの原子が再び電子と再結合し紫外線を発生する現象が起きる。この紫外線は陰極面で光電効果を引き起こし電子を発生させる。この電子が強い電場のかかっているガス増幅領域に入った場合はさらに電子雪崩によって増幅がおき、連鎖反応が無限に繰り返され、元々の一次電子数に比例しない二次電子群を発生させてしまう。このため比例計数管として動作しなくなる。このため有機ガスを混合することにより紫外線の発生を抑制することは比例計数管の正常な動作にとって非常に重要なことである。これらの働きをするガスをクエンチャーと呼んでいる。クエンチャーガスとして μ -PIC で主に用いられているエタンの紫外線吸収断面積を図 2.3 に示す。Ar:C₂H₆=1:1 の標準状態ガスにおいて $E_{ph}=16\text{eV}(\lambda=75\text{nm})$ の光子の平均自由行程は $2.5\mu\text{m}$ となる。希ガスのおよその吸収断面積 10Mb に比べて、エタンの紫外線吸収断面積が大きく、クエンチャーとして働くことを示している[10]。

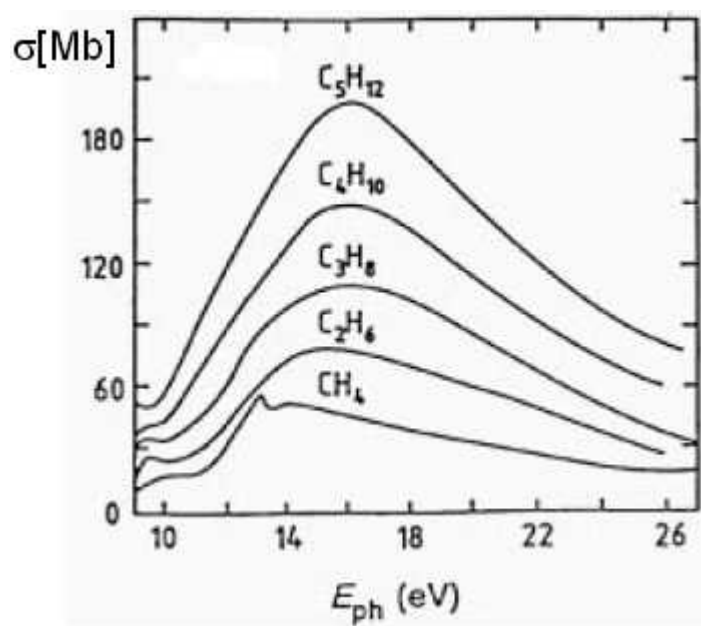


図 2.3 アルカン系炭化水素の紫外線吸収断面積(横軸：紫外線エネルギー、縦軸：吸収断面積)

3章 マイクロパターン検出器

この章では微細加工技術によって製作されているマイクロパターンガス増幅検出器(Micro Pattern Gas Detector:MPGD)を紹介しながら、 μ -PIC の開発に至るまでのMPGDの開発の流れと発展の状況について述べる。

3.1 Micro Strip Gas Chamber(MSGC)

加速器技術の向上による入射粒子密度の増加により、MWPCなどのワイヤーを用いた検出器には個々の入射粒子に対する位置分解能・量産性や高頻度入射粒子に対応できないといった限界がでてきた。この問題を解決するために、1988年にMicro Strip Gas ChamberがOedによって開発された[11]。構造を図3.1に示す。LSIの作成等で用いられるリソグラフィ技術を用いて、絶縁体(ポリイミド)の基板の上にストリップを形成した。それらを陽極・陰極と交互に接続し電場を与えることで、ストリップ上に高い電場を作りガス増幅する。MSGCはアノードストリップの間にカソードストリップを配置し、電極間隔をMWPCでは困難であった間隔以下にすることができ比較的低い電圧でアノード近傍に強い電場を形成することができた。この配置によりMWPCに比べて高い位置分解能を有している。しかしながら、ガス増幅によって生成したイオンの一部が絶縁層に付着してチャージアップを起こすことで表面の電場が弱められること、カソード近傍の電場が強くなり金属中の電子が放出し放電を起こすこと、放電に伴ってストリップが溶けアノード・カソードが導通を起こし電極破壊が起こるといった問題点もあった。

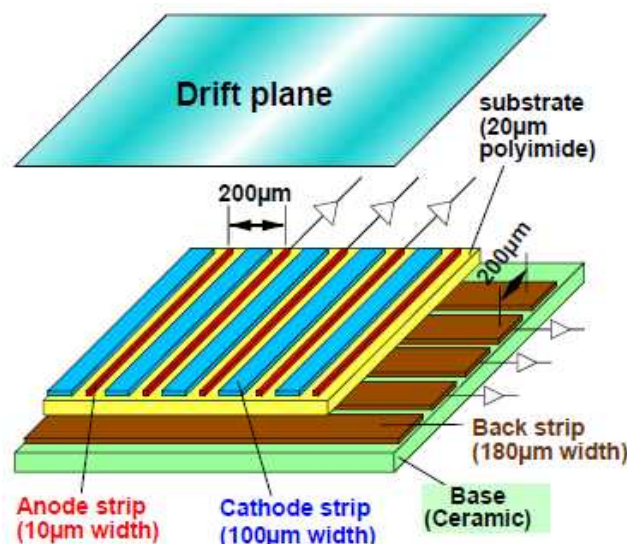


図3.1MSGCの構造[12]。アノードストリップの間にカソードストリップが配置されているため、MWPCに比べて電極間隔を狭くできる。そのため、電子なだれで生じたイオンの大部分をアノードの隣のカソードに集められる。

3.2 Microdot Chamber(MDC)

Microdot Chamber(MDC)は 1995 年にリバプールの S.F.Biagi のグループによって開発された[13]。構造を図 3.2 に示す。基板にはシリコンを用いており、中心にアノードを置いたピクセル型で配置されている。バックプレーン中にアノードをつなぐリードアウト用のアノードバスが $200\mu\text{m}$ ピッチで通っている。カソードはアノードの周りを六角形に取り巻く形で構成されている。ピクセル状の電極はストリップ状の電極に比べて同じ電圧を印加した場合に原理的に増幅率を高くすることができる。また、ある抵抗値を持った層で検出器表面を覆うことでイオンが絶縁層にたまるのを防いでいる[14]。しかしながら、MDC は製作技術に困難が多くサイズが限られることや非常に高価なため実用が難しいとされている。

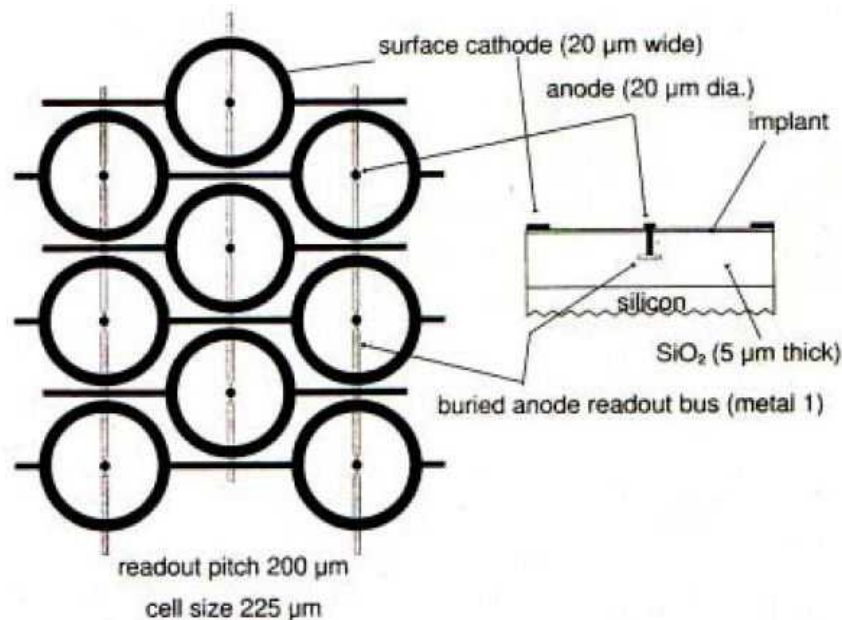


図 3.2 MDC の構造。中心にアノードをピクセル型で配置している。カソードはアノードの周りを六角形に取り巻く形で構成されている。

3.3 Gas Electron Multiplier(GEM)

GEM は 1997 年 F.Sauli らによって発明された[15]。現在 CERN を中心に使われている標準的な GEM の構造を図 3.3 に示す。この GEM は厚さ $50\mu\text{m}$ のポリイミドを厚さ $5\mu\text{m}$ の銅電極で挟んだ構造となっている。表面には直径 $50\sim 70\mu\text{m}$ 程度の大きさのホールが $100\sim 150\mu\text{m}$ ピッチで開けられている。この表と裏の電極間に高電圧を印加することにより電極間に高電場を形成しガス増幅を起こさせ、GEM の下に読み出しパッドを置くことにより、増幅した電子を読み出している。しかし、GEM ホールで放電が起こると、絶縁破壊される

ため GEM 一枚が使用できなくなる。これをさげ、安定した増幅率を得るために一枚あたりのガス増幅率を低くして複数枚の GEM を用いることが一般的になっている。多段構造の GEM では入射粒子により発生した電子が GEM にたどり着くまでのドリフト領域、電子が GEM と GEM との間を移動する領域の Transfer 領域、電子を最後段の GEM から読み出しパッドに導く領域の Induction 領域で構成されている[16]。日本では、GEM の高増幅率を実現するために、プラズマエッチングとレーザーエッチングを用いた厚さ 100 μm の LCP を用いた GEM が開発され、一枚の GEM 構造において、従来の厚さ 50 μm の GEM を 3 枚用いた構造の増幅率よりも高い増幅率を実現している[17]。電子雪崩による二次電子密度が局所的にある臨界値をこえると(Raether 条件)放電ストリーマが誘引されることが知られているが、GEM はこの局所的なガス増幅をさけて多段増幅をとっているのが原理的のメリットである。一方、これは電子雪崩の位置を知る目的のためには位置分解能を犠牲にしたことになり、デメリットでもある。また、GEM は複雑な構造を持たずプリント基板技術によって製作されているため、低コストで大量生産が容易であるというメリットも持つ。

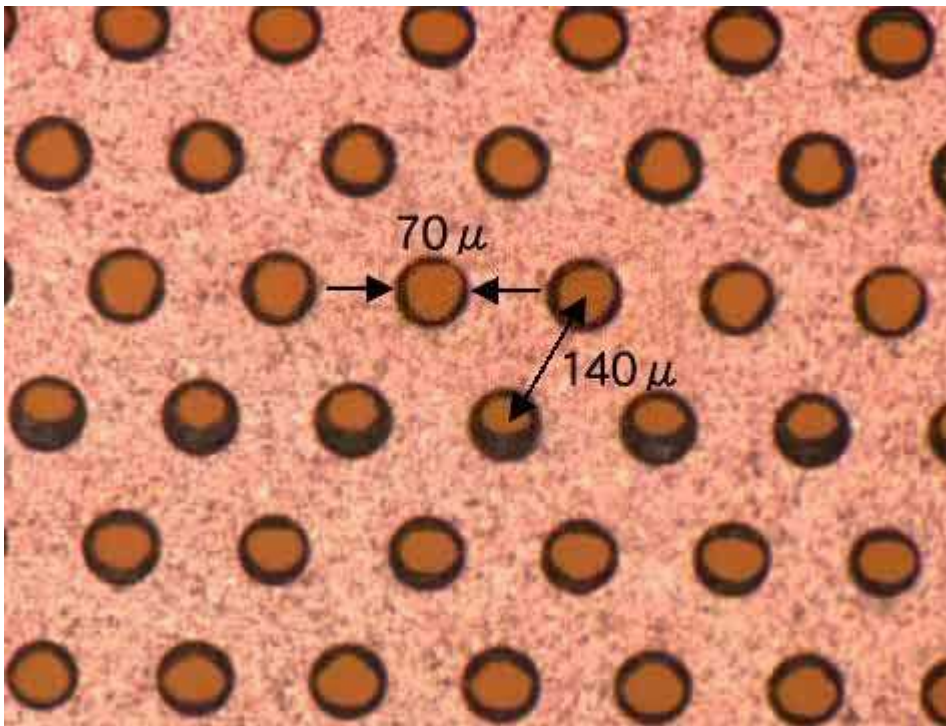


図 3.3 GEM の構造。GEM は厚さ 50 μm のポリイミドを厚さ 5 μm の銅電極で挟んだ構造となっており、表面には直径 50 ~ 70 μm 程度の大きさのホールが 100 ~ 150 μm ピッチで開けられている。この表と裏の電極間に高電圧を印加することにより電極間に高電場を形成しガス増幅を起こさせている。

4章 マイクロピクセル検出器(μ -PIC)

この章では、我々が用いている μ -PIC (マイクロピクセル検出器)の動作原理・特徴について述べる。 μ -PIC は、MSGC の問題点である「放電」と「チャージアップ」による「動作の不安定性」を改善するために開発された検出器である。

4.1 μ -PIC の構造と動作原理

μ -PIC は MSGC に変わる検出器として 2001 年に開発された Micro Pattern Gas Chamber の一種である[18]。その構造を図 4.1 に示す(このピクセル配置を正方配置と呼ぶことにする)。アノードが直径 $50\mu\text{m}$ (公称値)でピクセル状に配置されており、カソードはその周りを直径 $200\mu\text{m}$ (公称値)で取り囲んでいる。ピクセル間隔は $400\mu\text{m}$ である。上部には Drift Plane が配置されている。アノードは絶縁層(ポリイミド)の下でストリップでつながっており、カソードは絶縁層(ポリイミド)の上でアノードストリップとは垂直にストリップでつながっている。この配置により二次元読み出しが可能となっている。カソードを GND として、アノードにはプラスの電圧を、Drift Plane にはマイナスの電圧を印加する。

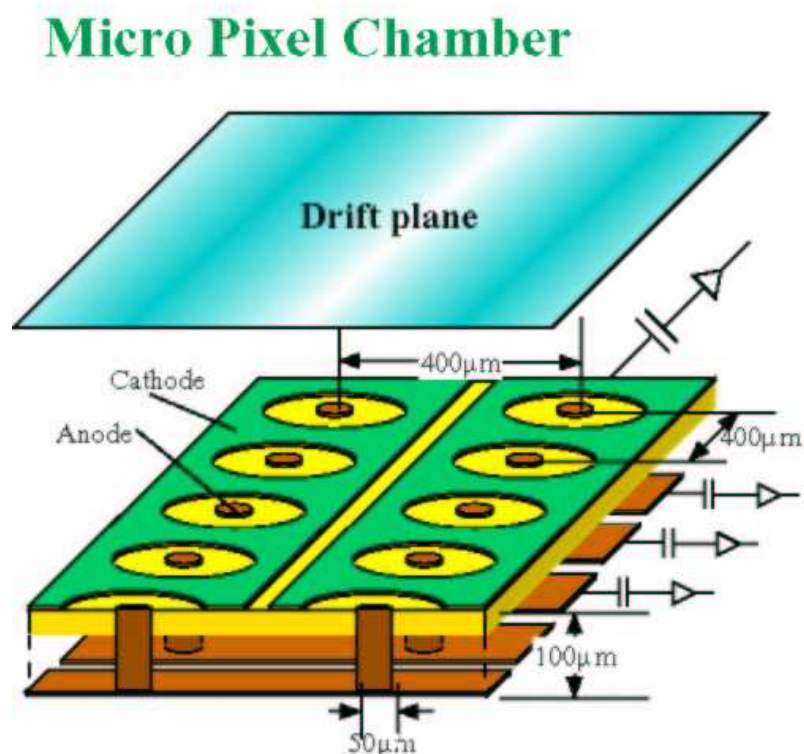


図 4.1 μ -PIC の概念図。表面部分は、直径 $50\mu\text{m}$ のピクセル状のアノードの回りを直径 $200\mu\text{m}$ のカソードが取り囲む形をしている。カソード(緑色の塗りつぶし)を GND として、アノードにはプラスの電圧を、Drift Plane にはマイナスの電圧を印加する。黄色パターンは基板ポリイミドである。

図 4.2 に示されたように、Drift Plane 上部から入射した荷電粒子・放射線はドリフト空間内において電離作用により、電子とイオンの対を発生させる。Drift Plane により形成された電場により、イオンは Drift Plane 方向に電子はピクセル方向に気体分子との弾性散乱を繰り返しながらドリフトする。電子は電極付近に近づくと、アノードカソード間に形成された高電場により電子雪崩を起こす。この時生成された電子群はアノードに到達し、生成したプラスイオンの大部分はカソードに到達し、一部のプラスイオンはドリフト電極にドリフトする。そして、この電子群の強い電場中の速い動きによる静電誘導により電荷信号が負の電圧としてアノードに、正の電圧としてカソードパッドに誘起される。これが電気信号として取り出される。

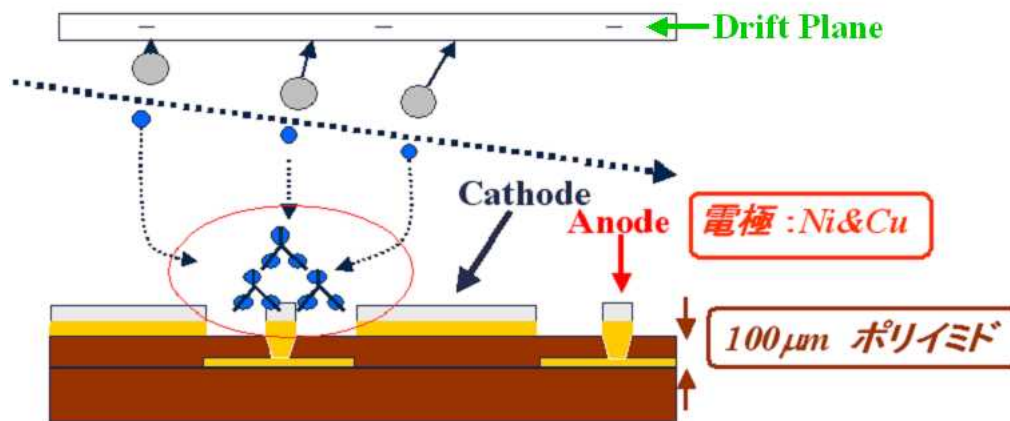


図 4.2 μ -PIC における増幅過程。ガス増幅過程は殆ど同心円状のアノード・カソード電極間部分でおきる。

4.2 μ -PIC の特長

ここでは、我々の用いている μ -PIC の特長について述べる。 μ -PIC は従来の MSGC に比べて優れている点が 3 点ある。

大面積化、及び量産が容易

μ -PIC はプリント基板を製造する際に用いられる PCB 技術を用いて作られている。そのため、リソグラフィー技術を用いて製造されている MSGC に比べて容易に製造でき、大面積化や大量生産が可能である。

高いガスゲイン

電極がストリップ型の MSGC に対して、 μ -PIC はアノードが円形のピクセル状で基板表面に出ている。そのため、ピクセル付近は非常に強い電場が形成され、高い増幅率を得ることができる。また、カソードがアノードをリング状に取り囲んでいるため、MSGC

に比べて放電に影響のあるカソード近傍の電場を弱めることができ、アノードにより高い電圧を印加することが可能になる。これにより、アノード近傍の電場がより強くなり、増幅率が高くなる。

低いノイズ

μ -PIC のカソードはグラウンドに繋がっており、更にリング状にアノードを取り囲んでいる。そのため、プリント基板におけるガードリングの役割を果たすことになり、ノイズは低く抑えられる。

4.3 μ -PIC の電極配置

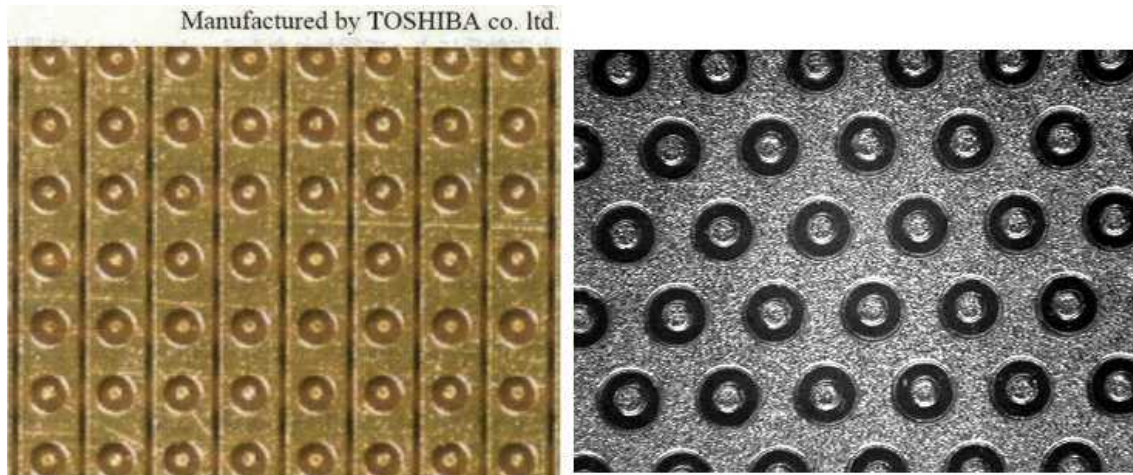


図 4.3 正方配置型 μ -PIC (左；京大で開発)と六方配置型 μ -PIC (右；神戸大の試験器)の電極配置

現在我々が用いている μ -PIC は、電極配置が六方配置型の μ -PIC となっている。正方配置型 μ -PIC と現在の六方配置型 μ -PIC の実体顕微鏡写真を図 4.3 に示した。六方配置型 μ -PIC の概念図を図 4.4 に電極の設計・配置を、図 4.5 と表 4.1 に示す。この電極配置を行うことで、単位面積あたりのアノード電極の数を多くでき、基板が露出する面積を小さくすることができる。これにより、電子の基板への蓄積を抑えることが可能となり、ドリフト電場を強くすることができる。ドリフト電場を強くすることにより、アノードからカソード方向に向かって電磁力線の一部が Drift Plane に向かうため、カソード近傍の電場強度を弱くすることができる[19]。但し、六方配置型 μ -PIC は試験的に製作されているものであり、二次元読み出しを行うことができない構造である。

図 4.6 に六方配置型 μ -PIC の検出器全体写真を示す。検出部分は 3cm x 3cm の大きさで、ピクセルが 300 μ m ピッチで配置されている。ピクセルは縦に 117 ピクセル、横に 101 ピクセル配置されている。アノードピクセルは絶縁基板の裏側で繋がっており、列単位で信号を読み出すことができる。読み出しチャンネル数は 17 チャンネルであり、図 4.6 の右側部

分に読み出しのラインが見える。チャンネルのうち上下外側の 5 チャンネル(1~5ch、13~17ch)は、11 列のアノードピクセルをまとめて 1 チャンネルとして読み出している。真ん中の 7 チャンネル(6~12ch)は 1 列ずつアノードピクセルを読み出している。カソードは読み出しチャンネルが区切られていないため、読み出しチャンネルは 1 つとなっている。

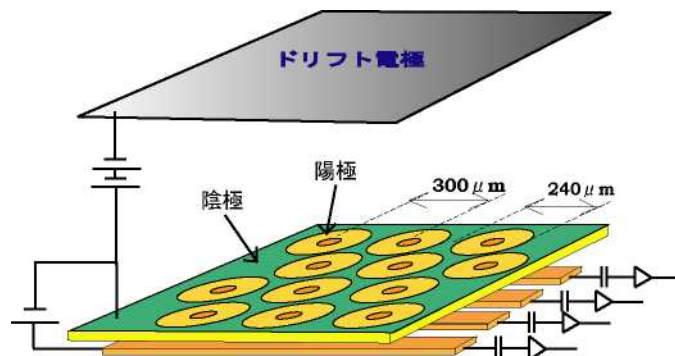


図 4.4 六角配置型 μ -PIC の概念図。緑色はカソードプレーン。アノードは 100 μ m 厚のポリイミド基板の裏側で読み出し電極とつながっている。

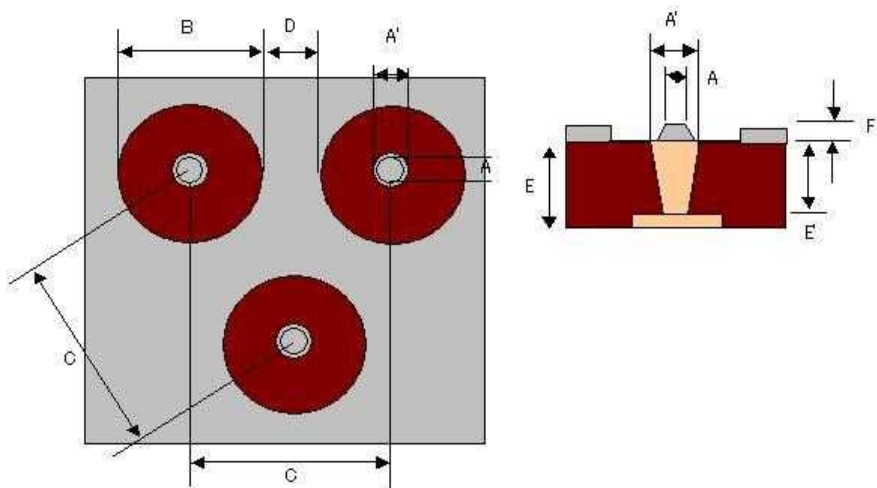


図 4.5 μ -PIC 電極構成設計図。実体顕微鏡の測定によりアノード中心とカソードホールを中心は 12 μ m 程度のずれがあることがわかっている。寸法の詳細は表 4.1 にまとめられている。

表 4.1 μ -PIC 電極の寸法

| | | |
|---------------|----|----------------|
| アノード径 | A | 46.04 μ m |
| | A' | 74.04 μ m |
| カソード径 | B | 236.26 μ m |
| ピクセル間距離 | C | 299.96 μ m |
| 絶縁ギャップ | D | 67.86 μ m |
| ポリイミド厚 | E | 95 μ m |
| | E' | 80 μ m |
| パターン厚(銅+ニッケル) | F | 15 μ m |

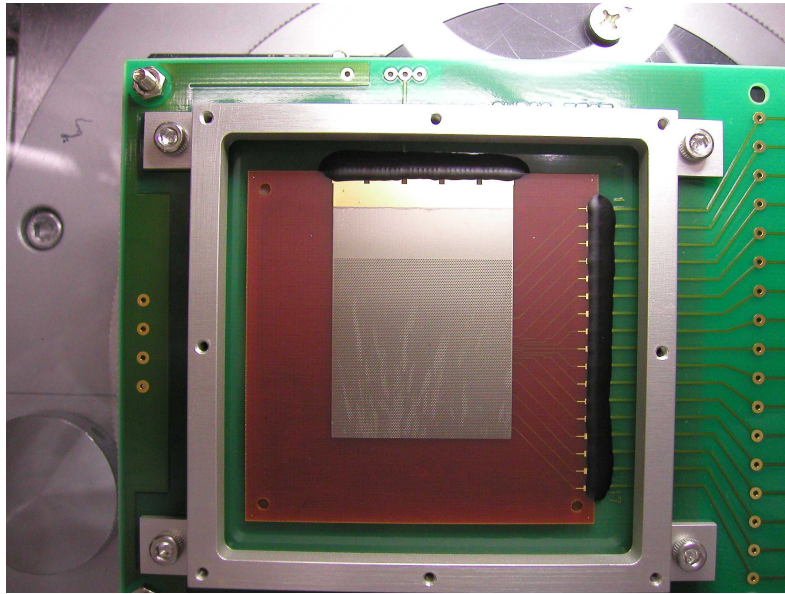


図 4.6 六方配置型 μ -PIC の全体図(検出部分 ; 3cm \times 3cm)。ドリフトプレーンを外した状態。右側の 17 本の引き出し線はアノード読み出しチャンネルである。茶色に見えるポリイミド基板上に金属光沢の μ -PIC ピクセルが構成されている。この金属光沢はニッケルメッキによるものである。

4.4 放電問題

我々の開発中の μ -PIC は、MIP 粒子検出を目的としており 10^4 倍以上の高いガス増幅率が要求される。このため、アノード・カソード間に 500V 以上の電圧を印加する必要がある(アノード側面で ~ 100 kV/cm 以上)。しかし、 μ -PIC においては混合ガスの耐圧以下で時々起こる放電現象の発生が問題となってきた。アノード・カソード間で放電が起こると、アノード・カソード間が高い確率で導通、あるいは耐電圧が下がり、十分な信号の読み出しが不可能になる。このような放電の原因としては、アノード近傍で起こる電子なだれがストリーマに発展して放電を起こすこと、基板、封入ガス、電極の接する境界での、誘電率不連続性に起因する電界増強による電子の放出で引き起こされる沿面放電[20]、製作精度の低さ(アノードの中心のずれ)による電界増強、絶縁材料の耐放電性の問題、が原因として考えられる。放電部分の実体顕微鏡写真の一例を図 4.7 に示す。放電により電極が変色している様子が確認される。この場合、放電のダメージはカソード面上にまで同心円状に広がっている。

しかし、上記の要因の内、どのような要因が放電にかかわる重要なものかについての研究は行われていない。この放電原因を特定することは、 μ -PIC の高い増幅率での安定した動作の実現において重要であると考えられる。放電の主たる要因をつきとめる上で放電の結果ピクセルが受けた影響を形状的、材料的な面から、ミクロなレベルで探索することが重要な情報を与えるものと考えられる。

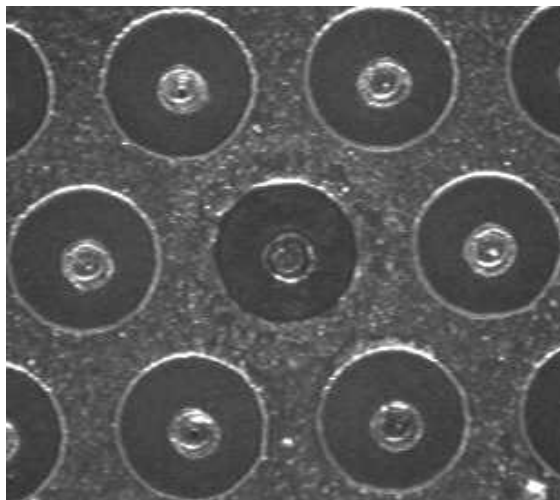


図 4.7 放電が起こったピクセルの実体顕微鏡図(倍率 100 倍) 放電していないピクセルに比べて、放電したピクセルでは、電極部分が変色している様子が観測される。これは信号測定中に起こった極めて激しい連続放電を被った場合である。ダメージの影響が同心円状にカソード面にまで拡がっている様子が見られる。

5 章 走査電子顕微鏡を用いた μ -PIC 放電ピクセルの観察

前章において放電ピクセルの実体顕微鏡写真の一例を示して、ピクセルダメージの概要を示したが、この章においてはこのように実体顕微鏡により観察された放電損傷ピクセルを走査電子顕微鏡(SEM)によりミクロな観察で得た知見について、SEM による観察原理から始めて述べる。

5.1 走査電子顕微鏡(SEM)の動作原理[21]

走査電子顕微鏡は、磁界による電子レンズ効果を用い、光では不可能な微小径に電子ビームを集束し、このスポットビームを探針として試料に照射して、試料から放出される粒子(主に電子)を用いて像を形成する。本実験で使用した走査電子顕微鏡を図 5.1、観察原理を図 5.2 に示す。図 5.2 に示すように電子銃から放出された電子ビームを陽極で加速したのち、電子レンズで試料上に微小径に集束させた電子プローブを二次元走査し、試料から放出される二次電子、反射電子(後方散乱された一次電子)、オージェ電子などの信号量の違いを基に拡大像を得ている。本実験で使用した SEM は、電子源として電界放出型(FE 型)の電子銃を用いている。図 5.3 に FE 型電子銃の構造を示す。FE 型電子銃は熱電子放射型電子銃に比べて、光源の大きさが数 nm と遙かに小さいにも関わらず、その輝度は熱電子銃に比べ約 3 桁も高い。そのため、FE 型電子銃は熱電子銃に比べて分解能が優れている。特に、低加速電圧領域で高分解能を得る目的のためには FE 電子銃はなくてはならないものである。しかし、FE 型電子銃を安定に動作させるためには 1×10^{-8} Pa 程度の高真空が必要であるため、電子銃室に超高真空排気系を直結する構造が要求される。FE 型電子銃では、電子銃内の陰極付近の第一陽極に高電圧を印加することで、陰極に高電界を印加して電子を電界放出させている。放出された電子は第二陽極に印加された加速電圧によって加速され、電子レンズによって集束され、偏向コイルによって軌道を曲げられ試料表面を走査しながら試料表面に照射される。

電子ビームが固体試料に照射された場合、電子はそのエネルギーに依存する深さまで固体中を試料を構成する原子核や電子との相互作用によって弾性散乱やエネルギー損失を伴う非弾性散乱を起こしながら透過していく。試料から放出される電子の典型的エネルギースペクトルの模式図を図 5.4 に示す。領域 A の電子は入射電子のエネルギーに近い弾性散乱電子であり、領域 B の電子は入射電子が多重散乱して大きなエネルギー損失を受けた非弾性散乱電子である。領域 C、D においてオージェ電子を除いた 50eV 以上のエネルギーの電子が反射電子、領域 E の数 eV ~ 50eV 程度までの電子が二次電子と定義されている。また、領域 F の微細なピークはオージェ電子によるものである。一次電子による原子の励起では、励起によって空いた軌道の位置にエネルギーの高い電子が遷移し、そのエネルギー差に相当するオージェ電子、あるいは特性 X 線を放出する。試料表面では、エネルギーの低いオ

ージェ電子が放出される。SEM では、これらの二次電子、反射電子、オージェ電子、特性 X 線を検出し、試料の形状観察、原子の特定を行っている。

本研究では、二次電子による二次電子像(Secondary Electron Image ; SEI)、反射電子による反射電子凹凸像(Topographic Image ; TOPO)、反射電子組成像(Compositional Image ; Compo)による μ -PIC ピクセルの観察やオージェ電子によるオージェ電子分光法(Auger Electron Spectroscopy ; AES)による μ -PIC ピクセル上の堆積物の分析を行った。オージェ電子分析は日東分析センターに依頼して行った。

二次電子像と反射電子像の信号量は主に試料表面の形状(凹凸)と試料の原子番号に依存するが、二次電子は特に試料表面の形状に敏感で、反射電子は特に試料の原子番号に敏感である。一般の試料では、反射電子は組成と凹凸の両方の情報が混ざっているため、これを分離する必要がある。反射電子は二次電子に比べて高いエネルギーの電子を持ち、検出器に直進してくる。そのため、試料の傾斜が検出器側を向いているときだけ信号量が大きくなるので、試料真上に左右対称に置かれた二つの検出器の信号を加算することで組成像(COMPO 像)を、信号を減算することで凹凸像(TOPO 像)を表示し、それぞれの像を分離している[22]。また、反射電子は二次電子に比べて高いエネルギーの電子であるので、二次電子よりも二桁程度深い領域の情報を得ることができる。しかし、検出される信号量は二次電子に比べて少ないため、長い走査時間が必要となるので、リアルタイム観察には二次電子観察の方が適している。観察例として、図 5.5 に μ -PIC の基板の一部で金メッキされた部分(上半分)とニッケルメッキ(下半分)された部分の反射電子組成像と反射電子凹凸像を示す。反射電子は元素番号が大きくなるほど信号量が増えるため、図 5.5 のようにコントラストに差が生じる。

オージェ電子分光法では、試料から発生するオージェ電子のエネルギーを分光することによって、試料表面の元素分析を行っている。オージェ電子のエネルギーが元素固有でありエネルギーが小さく試料中での平均自由行程が 1nm 以下であることから、オージェ電子情報は試料の最表面の元素情報を与える。また、H、He 以外のすべての元素の分析が可能であり、特性 X 線に比べて特に軽元素の分析が得意であるという特徴を持っている[22]。



図 5.1 我々の使用している走査電子顕微鏡(日本電子製 JSM-6000FS)。画像はビデオキャプチャに JPEG 形式で保存され、パソコンのモニターに表示される。

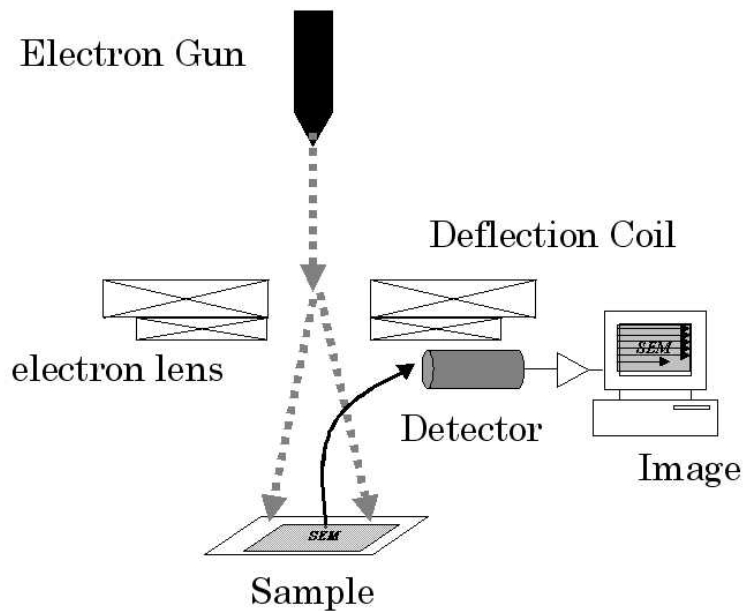


図 5.2 走査電子顕微鏡の観察原理(SEI 像)

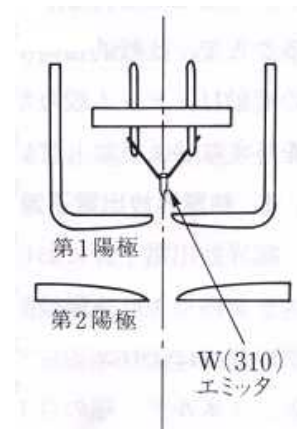


図 5.3 電界放出型電子銃の構造

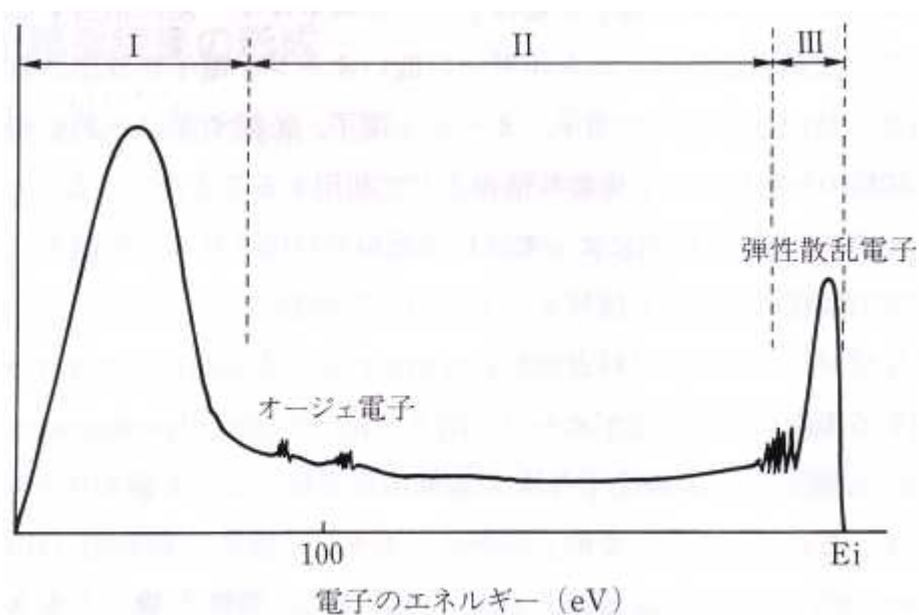
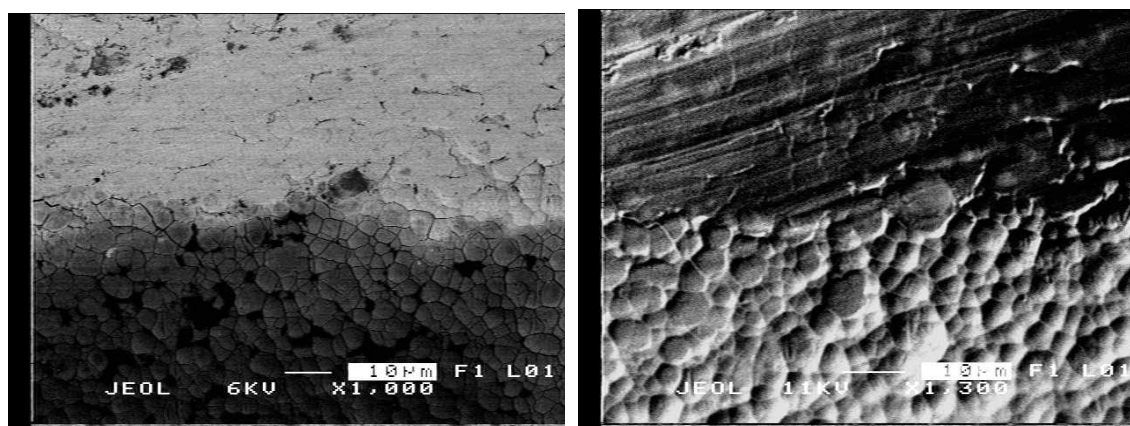


図 5.4 試料から放出される電子のエネルギースペクトルの模式図。領域 I、II においてオージェ電子を除いた 50eV 以上のエネルギーの電子を反射電子、領域 III の数 eV ~ 50eV 程度までの電子を二次電子と定義する。



(a)反射電子組成像(COMPO)

(b)反射電子凹凸像(TOPO)

図 5.5 反射電子像の観察例。(a)、(b)の上半分は金、下半分はニッケルである。反射電子組成像は試料の原子番号が大きいほど信号が増えるために金とニッケルとの違いが(a)で見られるようなコントラストの差として観測される。反射電子凹凸像は試料の凹凸に敏感なため(b)のような表面の凹凸が観測される。金の滑らかさに比べてニッケル面の凹凸が顕著にみられる。これはニッケルに用いられた無電解メッキによるものと思われる。

5.2 測定方法

本研究では、二次電子像(SEI)、反射電子組成像(COMPO)、反射電子凹凸像(TOPO)、オ

ージェ電子分光分析(AES)による μ -PIC ピクセルの測定を行った。SEM で観察できる試料フォルダの大きさが制限されているため、試料寸法が $23\text{mm} \times 6\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 以下となるように放電したピクセルを実体顕微鏡で特定し、ダイヤモンドカッターでの切断を行った。及川氏論文[23(36,37 頁)]によれば、放電ピクセルは、正常ピクセルに比べて電極部分に変色が見られるので、実体顕微鏡観察で電極部分に変色が見られるピクセルを放電ピクセルとみなし、特定作業を行った。特定作業では、 μ -PIC 読み出しチャンネルの 1ch の右上端を原点として位置の特定を行った。本研究で特定した放電ピクセルの実体顕微鏡画像を図 5.6 に示す。図 4.7 で示した放電ピクセルの一例と同様にアノード、カソードの電極部分に変色が確認される。色々な放電状況が考えられるので、放電ピクセルの系統的な分析を目的として、複数個の放電ピクセルの観察を行った。

観察像の保存方法について説明する。観察は本体のブラウン管(CRT)によって行うが、NTSC 方式のビデオ信号として外部出力されている。撮影画像の保存にはこのビデオ信号を用いて行った。ビデオ信号を市販の PC 接続キャプチャ(I-O DATA 製 GV-VCP/PCI)で取り込み静止画として JPEG 形式で保存を行った。JPEG 画像の解像度は VGA(640×480 ピクセル)となっている[24]。

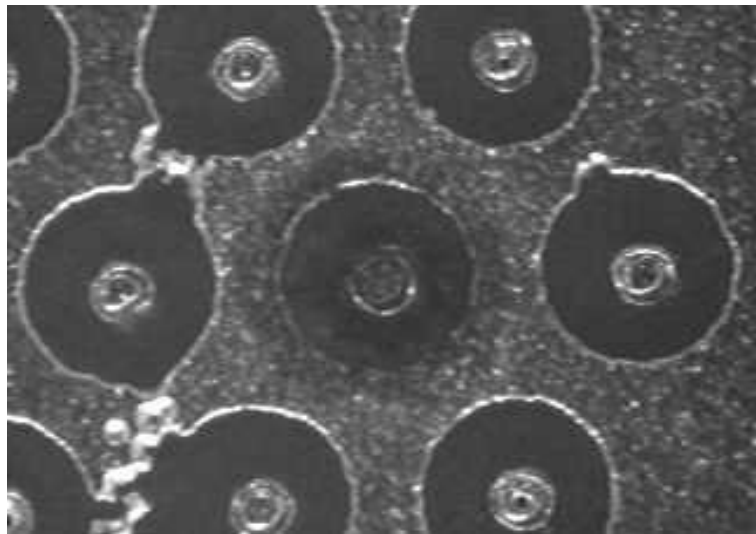


図 5.6 放電したピクセルの実体顕微鏡画像($\times 100$)。放電ピクセルは図の中央のピクセル。アノード・カソード部分が変色していることがわかる。 μ -PIC の製作精度のため、ピクセルはかならずしも完全な円ではない。しかし、形状のくずれているピクセルが放電するわけでもない。

5.3 測定結果

観察した放電ピクセルの一覧を表 5.1 に示す。 ^{55}Fe 線源をあて連続放電した同一基板上の 4 つのピクセルについて SEI、COMPO、TOPO 像の観察を行った。この表以外に比較

のために正常ピクセルの観察も行っているが、正常ピクセルは放電ピクセル1付近(3~4ピクセル離れた箇所)のピクセルを観察したものである。表5.1のメッシュ電圧という項目は、基板の数百 μm 上の位置に配置されたメッシュに電圧印加した特殊な場合で放電ピクセル3以外の場合メッシュは配置されていない。また、メッシュは本実験の放電には影響を与えていないと考えている。

表 5.1 観測した放電ピクセル一覧表

| ピクセル名称 | 読み出しch | 最大印加電圧[V] | | |
|---------|--------|-----------|--------|--------|
| | | アノード電圧 | ドリフト電圧 | メッシュ電圧 |
| 放電ピクセル1 | 1ch | 520 | -2000 | × |
| 放電ピクセル2 | 13ch | 550 | -2000 | × |
| 放電ピクセル3 | 14ch | 500 | -550 | -200 |
| 放電ピクセル4 | 5ch | 520 | -2000 | × |

5.3.1 二次電子像による観察結果

図 5.7 に正常 μ -PIC ピクセルの二次電子像(SEI 像)を示す。図 5.8 に 4 つの μ -PIC 放電ピクセルの SEI 像を示す。いずれの図も電子の加速電圧は $V_{acc}=6\text{kV}$ 、倍率 500 倍である。SEM では、試料にポリイミドのような導電性のない物質がある場合、その物質に入射電子が蓄積し帯電を起こす(この現象をチャージアップと呼ぶ)。帯電を起こすと、後から入ってくる入射電子は減速をうけ、試料表面における入射電子の加速電圧は相対的に低くなる。加速電圧が低くなると、二次電子の放出率が高まり二次電子が多く検出される。その結果、チャージアップ部分の像は異常に白くなる。すなわち、SEI 像では絶縁性物質は、チャージアップが原因となりその部分の像が白く見える。このため、正常な μ -PIC においては、アノードカソード間のポリイミド絶縁面は、図 5.7 のようにポリイミド面は像が白く観察される。正常ピクセル(図 5.7)と放電ピクセル(図 5.8)の SEI 像を比較すると、正常なピクセルのみでポリイミド面上の全面にわたってチャージアップの様子が観測された。図 5.7 の正常ピクセルにおいては本来、ポリイミド表面が完全にチャージアップしなければならないが、アノードやカソード周囲ではチャージアップしていない領域(黒くみえる)がみられる。これは、電極の周囲のポリイミド面では電極に二次電子が吸収されているため、チャージアップの様子が観察されないのではないかと考えている。

放電ピクセルでは、部分的チャージアップ(図 5.8(c)、(d)の右下の白いところ)、チャージアップ領域がない(図 5.8(a)、(b))ものが観測されている。ポリイミド表面に一部チャージアップする領域が観測された放電ピクセル 3、4(図 5.8(c)(d))では、アノードの中心がカソードホール中心にくらべて左上方向にずれていることが分かる。このずれ方向と正反対の方向にチャージアップする領域が観測されたことは、アノードカソード間の距離が狭い領域

において電場が強くなりその領域に放電が偏ることが原因であろう。桂華氏論文[5]によるアノードとカソードの中心のずれによるポリイミド面上での電界強度変化のシミュレーション結果を図 5.9 に示す。アノード中心とカソードホールを中心のずれをそれぞれ $0\mu\text{m}$ (赤)、 $11.2\mu\text{m}$ (青)、 $22.4\mu\text{m}$ (緑)と仮定した計算を行っている。横軸の原点はアノード中心位置ととっている。この計算から中心のずれが大きくなりアノードカソード間の距離が近づくほどアノード端、カソード端の電場が強くなることがわかる。故島氏論文[24]では、本研究で用いた $\mu\text{-PIC}$ のアノード中心とカソードホールを中心のずれの大きさの平均が $12.8\mu\text{m}$ であることが報告されている。これは図 5.9 の青線の電場の形に近い。この場合、シミュレーションでは、アノード近傍の電界強度を超える電界強度がカソード端(140kV/cm)に発生していることが示されている。ちなみに、カソード端で電場が強くなるのは、基板、封入ガス、電極の接する境界で、誘電率が不連続なためである。また、放電ピクセル 3 のチャージアップ領域(図 5.8(c))が図 5.8 の他のピクセルに比べて一番大きいことがわかる。これは、表 5.1 から放電ピクセル 3 に印加されたアノード電圧が一番小さいことから、形成された電場が他のピクセルに比べて弱いために、放電の影響が小さかったためと理解できる。

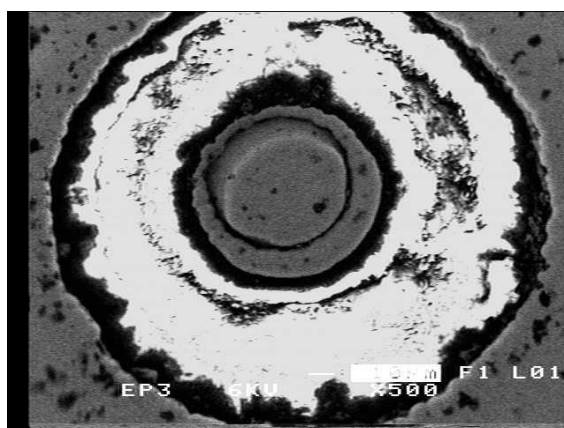
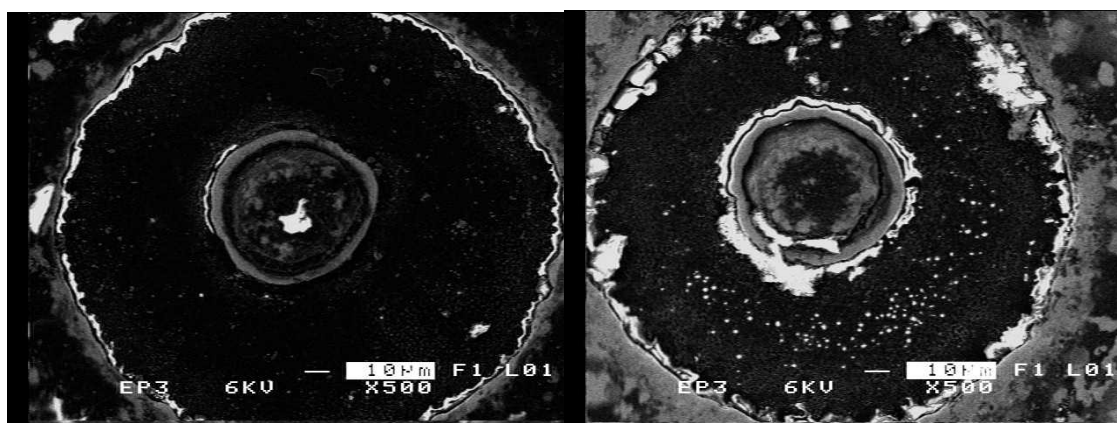
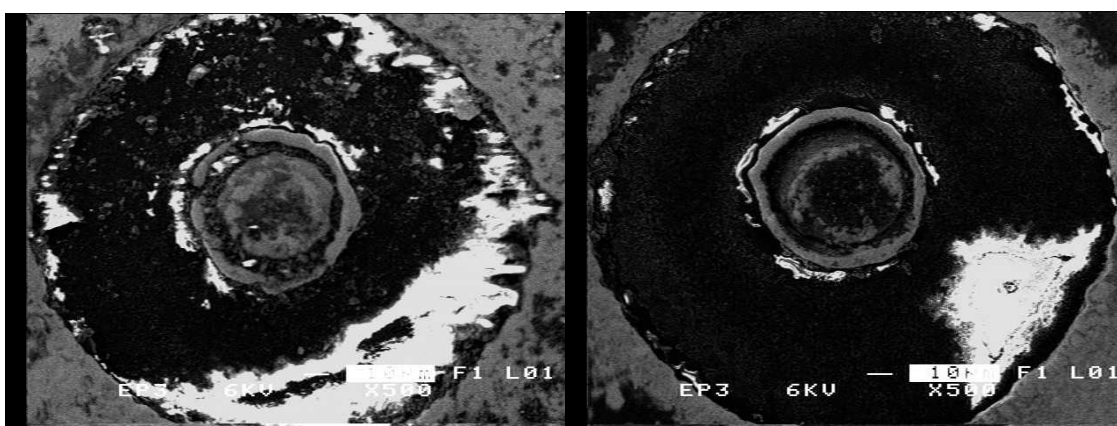


図 5.7 正常ピクセルの SEI 像。アノード周囲やカソード周囲でチャージアップしていない領域(暗い所)が観察されるが、電極によりポリイミド面からの二次電子が吸収されていることが原因と考えられる。すなわち、見かけ上のものである。



(a)放電ピクセル 1

(b)放電ピクセル 2



(c)放電ピクセル 3

(d)放電ピクセル 4

図 5.8 4つの放電ピクセルの SEI 像 図 5.7 の正常なピクセルと比較すると(a)~(d)の全てでポリイミド面にチャージアップしない導電性物質の領域を観測できる。また、(a)(b)ではポリイミド面の全面にわたってチャージアップしない領域が観測されるが、(c)(d)ではチャージアップを起こす領域も観測されている。

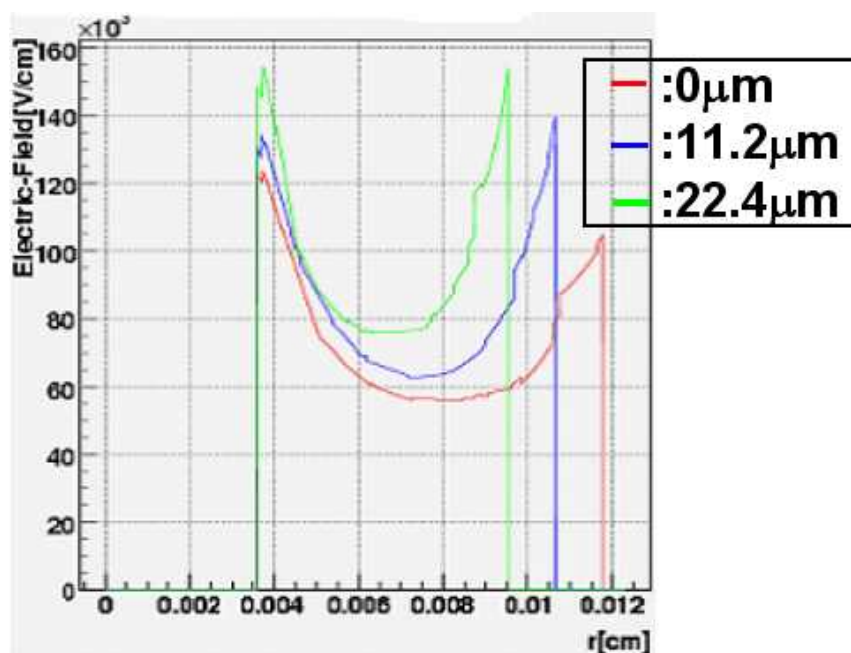


図 5.9 アノード電圧 500V におけるアノードとカソードホールを中心のずれの電場への影響。アノードとカソードのずれ；赤線：0 μm 、青線 11.2 μm 、緑線 22.4 μm 。アノードとカソードホールを中心のずれが大きくなるほどアノード端、カソード端の電場が大きくなっている。

5.3.2 反射電子像による観察結果

(1) COMPO 像

反射電子組成像(COMPO 像)は元素番号の違いによって組成を分析する方法である。ポリイミド面に堆積した導電性物質が電極を構成する銅やニッケルによるものかを調べることを目的に観察を行った。反射電子組成像(COMPO)の結果を正常ピクセル(図 5.10)、4 つの放電ピクセル(図 5.11)に示す。放電ピクセル(図 5.11(a)~(d))のポリイミド表面と正常ピクセル(図 5.10)の電極像のコントラストが異なることから、堆積した導電性物質は電極を構成する銅やニッケルではないといえよう。放電ピクセル(図 5.11(a)~(d))と正常ピクセル(図 5.10)においてアノードコントラストに違いがみられる。また、カソードにおいても正常ピクセルと放電ピクセルにはコントラストの違いがみられる。これは、放電による導電性物質の堆積がポリイミド面のみならずアノード上、カソード上にも及んでいるためではないかと考えられる。これは、アノードカソード間のガス中の電子なだれのストリーマへの発展によって起こっているのではないかと考えられる。正常ピクセルのポリイミド表面に電極と同じような明るい部分がみえるが、これはポリイミド表面に金属があるのではなく、COMPO 像においてもチャージアップの影響がでたのではないかとと思われる。

(2)TOPO 像

TOPO 像は試料の表面形状に非常に敏感なので、ピクセルのポリイミド面の表面形状に関する分析を行った。反射電子凹凸像(TOPO)を正常ピクセル(図 5.12)、放電ピクセル(図 5.13)に示す。加速電圧 $V_{acc}=5kV$ 、倍率 4300 倍(図 5.12)、倍率 5000 倍(図 5.13)で測定を行った。正常ピクセル(図 5.12)からはポリイミド表面の数百 nm の凹凸があることを確認できるが、放電したピクセル(図 5.13)ではポリイミド表面の凹凸が微粒子に覆われて滑らかになっていることが確認される。放電によってポリイミド表面に微粒子状導電性物資が堆積したと考えられる。

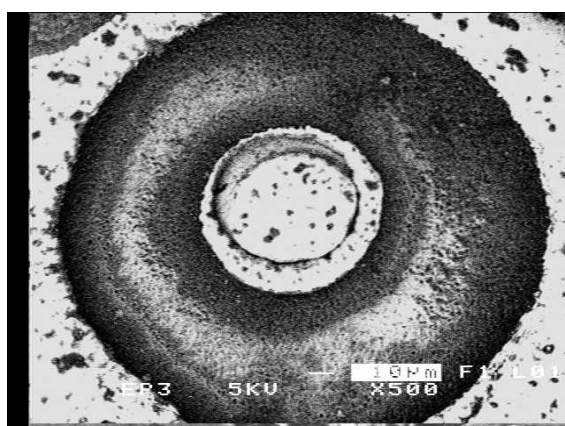
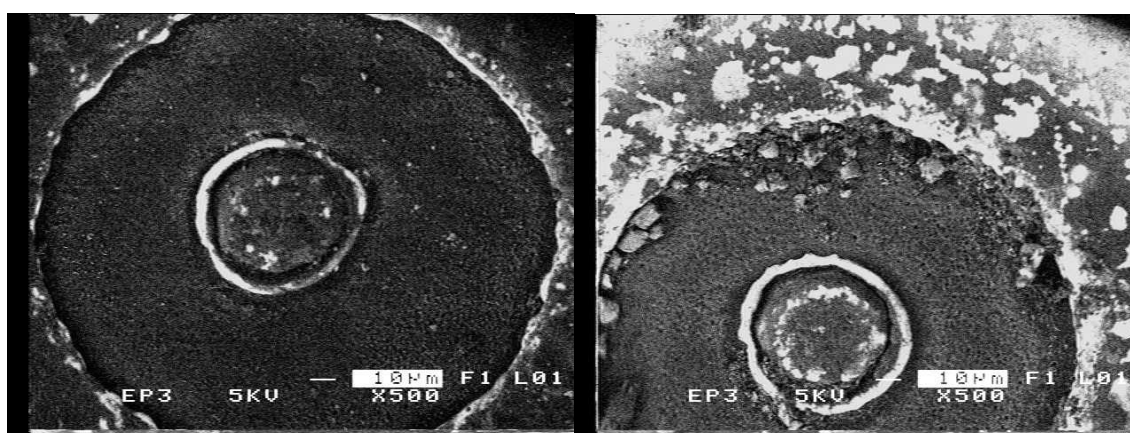
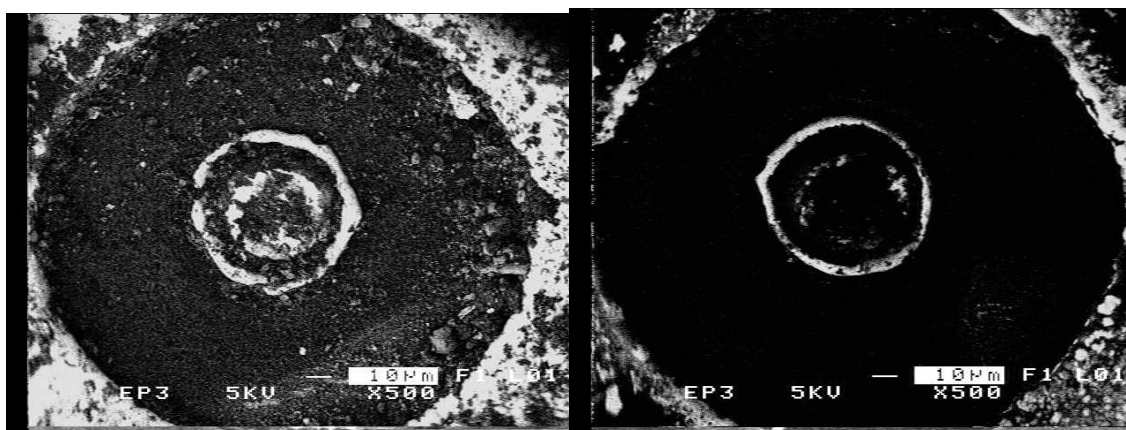


図 5.10 正常ピクセル反射電子組成像



(a)放電ピクセル 1

(b)放電ピクセル 2



(c)放電ピクセル 3

(d)放電ピクセル 4

図 5.11 放電ピクセル反射電子組成像(COMPO)。放電したピクセル(a)~(d)のポリイミド面が正常ピクセルの陽極、陰極(図 5.10 図)のコントラストと異なることから放電したピクセルのポリイミド面上に堆積した導電性物質は電極からの銅やニッケルでないことがわかる。(b)、(d)のコントラストの明暗は実験条件におけるコントラストの設定の違いによる。

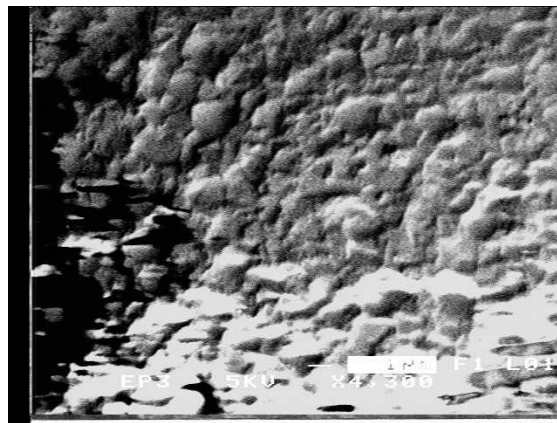
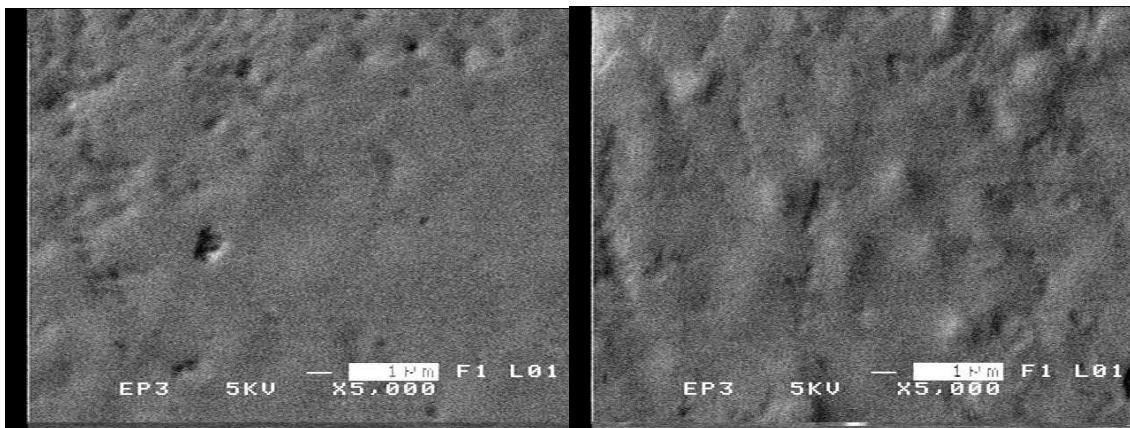
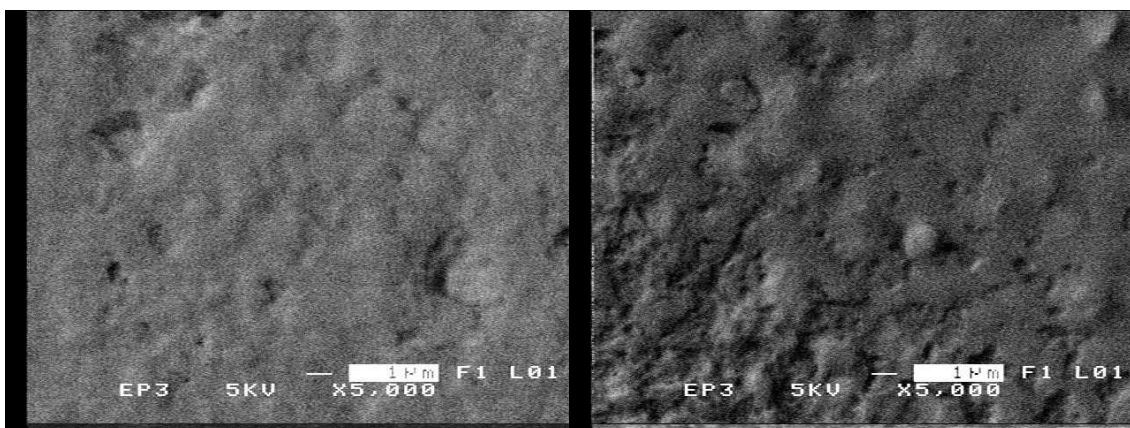


図 5.12 正常ピクセルの反射電子凹凸像(TOPO)



(a)放電ピクセル 1

(b)放電ピクセル 2



(c)放電ピクセル 3

(d)放電ピクセル 4

図 5.13 放電ピクセルの反射電子凹凸像(TOPO)。(a)(b)の正常なピクセルからはポリイミド表面の数百 nm の凹凸があることを確認できるが、放電したピクセルではポリイミド表面の凹凸が正常なピクセルに比べて滑らかになっていることが観測される。

5.3.3 オージェ電子分光法による導電性物質の分析結果

SEM 像を用いた観察により、放電によって μ -PIC ピクセルに導電性物質が堆積していることはわかったが、その物質が何であるかの特定は困難であった。そのため、オージェ電子分光法を用いて、導電性物質の分析を行った。この分析は、日東分析センターに依頼して行った。分析したピクセルは、放電ピクセル1である。その光学顕微鏡図を図 5.13 に示す。図 5.13 中の A、B 点の 2 点でのオージェ電子分光分析を行った。また、図 5.14 に A、B 点付近の SEM 像を示す。

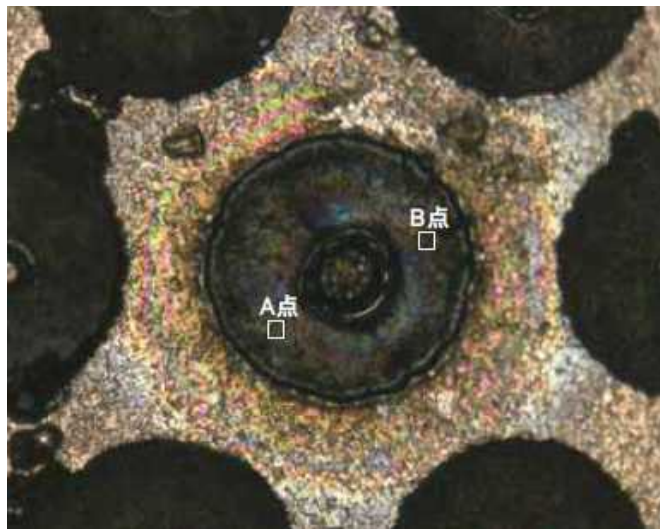


図 5.13 放電ピクセルの光学顕微鏡像。A 点、B 点で示される $10\mu\text{m}$ の正方形のオージェ分析点を示している。

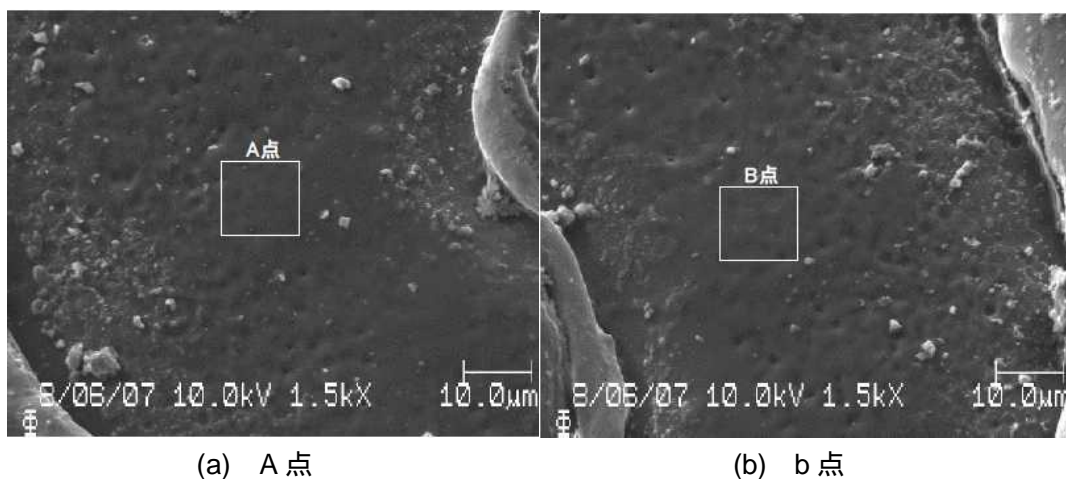
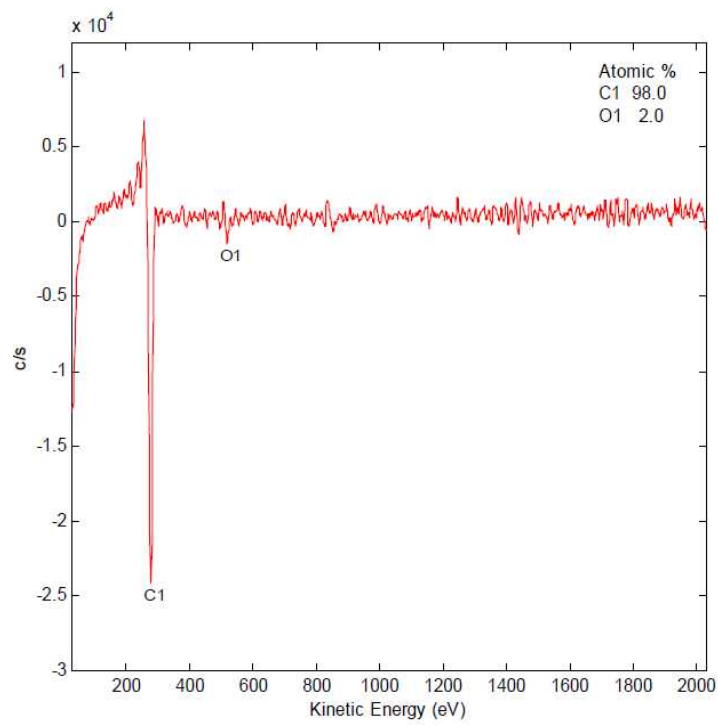
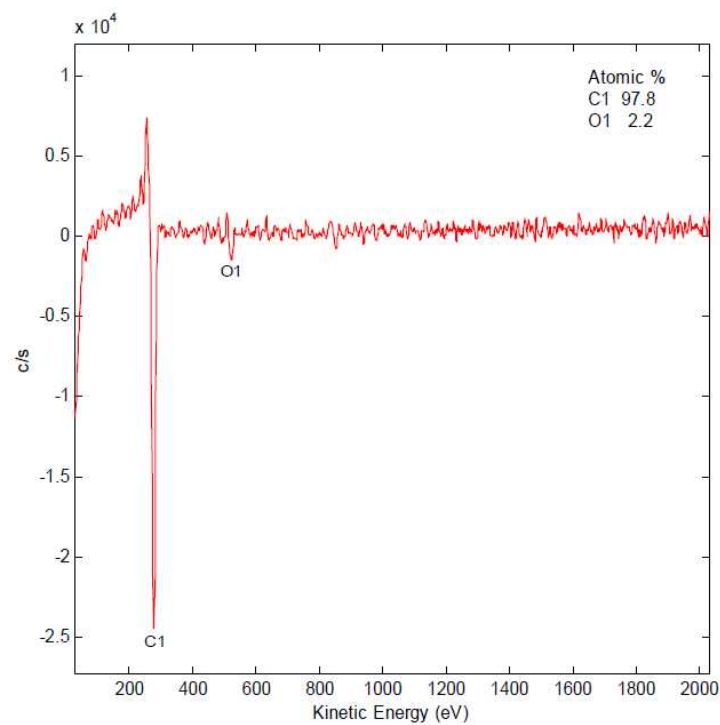


図 5.14 分析箇所拡大像。この写真からも微粒子堆積物がみられる。

正常なピクセルにおいてはチャージアップの影響によりオージェ電子の検出が困難であるため、放電ピクセルのみの分析を依頼した。図 5.15 は得られたオージェスペクトル、表 5.3 は成分分析表である。原子の成分比率として、A 点では 98%の炭素と 2%の酸素、B 点では 97.8%の炭素と 2.2%の酸素となった。今回検出された炭素は、分析点が μ -PIC のポリイミド面上にあるため、堆積した導電性物質ではなく基板ポリイミド分子の成分の炭素が観測された可能性がある。しかし、このオージェ電子分光は、分析位置として微粒子状物質でおおわれている部分を選んでいること、オージェ電子が試料表面に敏感であるため試料の極表面の数 nm 深さの分析を行っていることから、基板のポリイミドではなく堆積した導電性物質からのオージェ電子の寄与が大きいと考えられる。また、図 5.16 のポリイミドの化学的構造[25]より、ポリイミドを観測したならばイミド基に含まれる窒素が検出されなければならない。オージェ分光分析では、試料を構成する原子の数によってピークの強さが変わる。そのため、ポリイミドであるならば、図 5.16 の構造のように炭素と窒素の比率が 11 対 1 の割合で観測されなければならない。しかし、オージェスペクトルからは窒素のピークは検出されなかった。このことから、観測したのは基板のポリイミドではなく堆積した導電性物質であるということが出来る。以上より、放電によって堆積した導電性物質が炭素であるということを確認させることができた。しかしながら、この炭素の堆積が何に起因しているかということの特定は行えていないため、この炭素の堆積の原因として考えられるクエンチャーガスの炭化水素に関する実験を行った。その結果について 6 章で述べる。



(a)A点でのオージェスペクトル



(b)B点でのオージェスペクトル

図5.15 オージェ電子分析結果 A点からは98%の炭素、B点からは97.8%の炭素のピークが検出された。また、窒素は検出されなかった(Nからのオージェ電子は389eVである[26])。このことから、放電によって堆積した導電性物質は炭素であると言える。

表 5.3 元素比率

| 試料名, 分析位置 | | 検出元素 | |
|-----------|-----|------|-----|
| | | C | O |
| 放電ピクセル | A 点 | 98.0 | 2.0 |
| | B 点 | 97.8 | 2.2 |

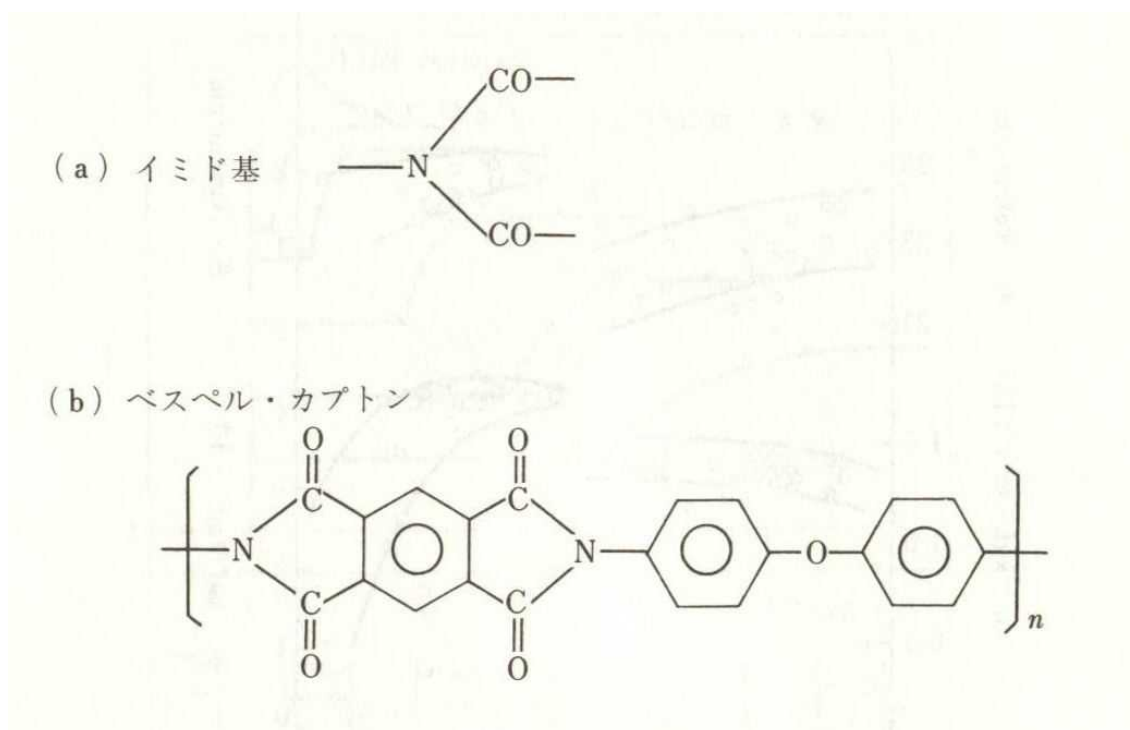


図 5.16 ポリイミドの化学的構造

6章 強制放電実験

この章では、前章までにわかった放電による μ -PIC への炭素堆積の原因を調べるために行った、3 種類のチェンバーガスにおける強制放電実験の結果について述べる。この実験では、正方配置型の μ -PIC を使用している。また、本実験では粒子を入射させずに放電を起こしているため、5 章における放電状況とは異なっている。

6.1 セットアップ

強制放電実験で用いた装置の写真を図 6.1 に示す。装置は、縦 12.3cm × 横 19.2cm × 高さ 4.4cm のプラスチックケース内に μ -PIC(検出部 = 10cm × 10cm)を固定した構造である。図 6.1 の左側のコネクタはガス・インレット、右側の上側のコネクタはガス・アウトレットであり、下側のコネクタは HV 電源に接続されている。ガスを流入させた際に、ガスがケース内部を十分循環するように、ガス・インレット、ガス・アウトレットのコネクタは対角線上に配置している。今回の実験では、放電場所の限定をするために、図 6.2 に示すアノードラインとカソードラインに直接半田付けを行った。しかし、アノードラインが 190 μ m、カソードラインが 350 μ m と細いため、1 ラインにのみの半田付けを行うことができなかった。そのため、カソードはカソードラインが基板上にあるため、カッターで特定のカソードライン以外を切断し、1 ラインの特定を行った。アノードについてはアノードラインが基板の下にあるため、2~3 ラインの特定しかできなかった。そのため半田付けでは、放電場所を 2~3 ピクセルまでしか限定できなかった。しかし、放電に伴う発光を光学顕微鏡で観察することにより、半田付けで特定した 2~3 ピクセル内のどのピクセルが放電したかを特定した。このようにして特定した放電ピクセルを SEM で観察した。また、ガス漏れと空気の混入を防ぐために、図 6.1 のプラスチックケースの左右両端に縦 16.3cm × 横 3.8cm × 高さ 1.9cm の鉄の棒を重りとして乗せている。また、アノードグラウンド間に 2nF のコンデンサーを接続し過渡的な電圧上昇による電源トリップをさけた。逆にピクセルが放電するときはこのコンデンサーの静電エネルギーが放電されることになる。また、本実験では、空気の混入による酸化作用とガスの漏れを抑えなければならない。そのため、酸素濃度計を用いて、プラスチックケース内の酸素濃度の測定を行った。測定は、プラスチックケースから流れ出たガスを酸素濃度計を通して行っている。ガスを流し始めてからの酸素濃度の変化を図 6.3 に示す。ガスを流し始めてから 2 時間で酸素濃度が 0.115%に達し、それ以降この値で変化しなくなったため、本実験は、ガスを 2 時間 30 程度流した状態で行った。

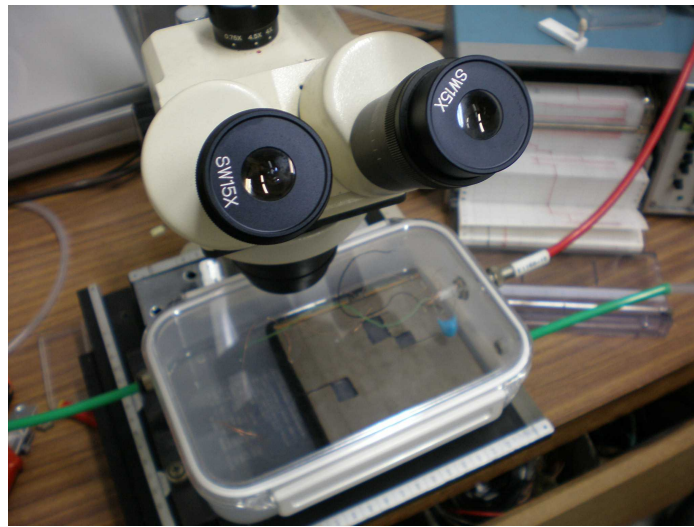
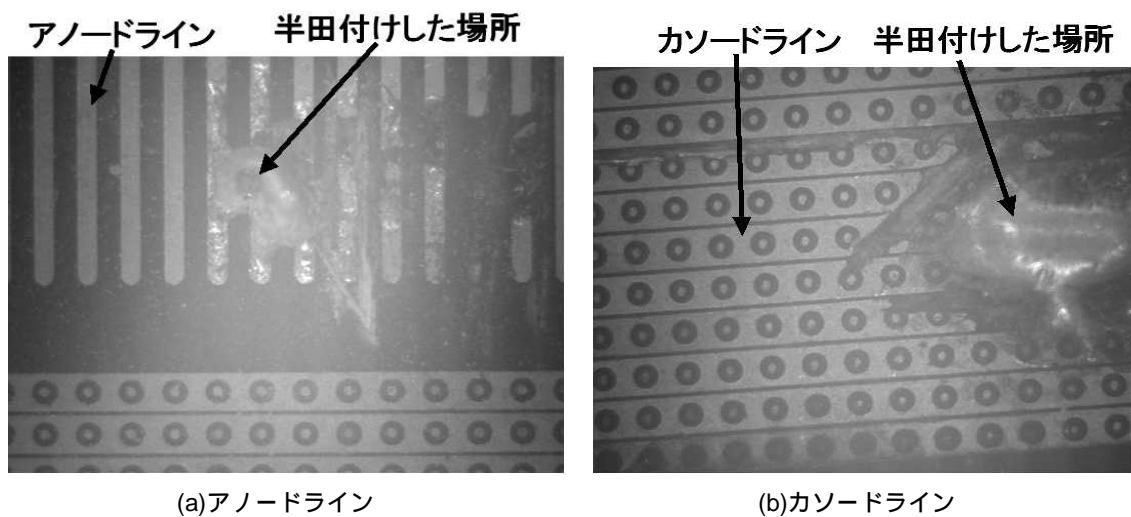


図 6.1 強制放電実験で用いた装置の写真。

1 ピクセルからの放電による発光を実体顕微鏡で観察した。



(a)アノードライン

(b)カソードライン

図 6.2 半田付けを行った電極部分の様子。(a)のアノードライン($190\mu\text{m}$)は基板の下で各アノードにつながっているため半田付けできる最小範囲の 2 ラインの特定しか行えなかった。(b)のカソードライン($350\mu\text{m}$)は基板上にあるため、カッターで他のラインを切断し 1 ラインの特定を行った。

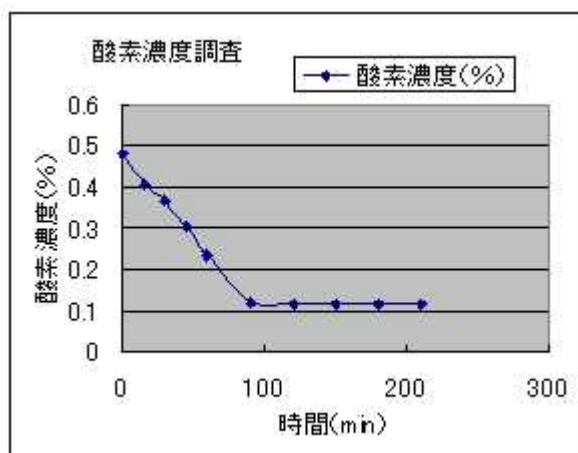


図 6.3 酸素濃度の時間変化。ガスを流し始めてから 2 時間で 0.115% となり、それ以降はこの値で一定となった。

6.2 測定条件

表 6.2 に本実験で行った各ピクセルの放電条件を示す。ここで示す放電回数とは、HV 電源が一回トリップすることを放電回数一回と定義している (HV 電源は負荷電流が 1mA を超えるとトリップするように設定した)。Ar:C₂H₆=1:1 ガスでは、放電回数をコントロールすることによる放電の規模による炭素堆積の影響を調べるために放電回数を変化させている。また、Ar、N₂ ガスでは、ガスの違いによる影響を調べるために放電回数を 200 回と固定している。トリップモードのマニュアルでは一度トリップするとその後はもう一度トリップモードをマニュアルに変更しない限り再度電圧が印加されないがオートは一度トリップした後自動で再度電圧が印加される。

表 6.2 強制放電実験一覧。アルゴンエタン混合ガスで 5 ピクセル、Ar、N₂ それぞれ 1 ピクセルの実験を行った。

| gas | 放電回数 | 放電電圧 | trip-mode | 放電後耐圧 (V) |
|---|------|------|-----------|-----------|
| Ar+C ₂ H ₆ (=1:1) | 5回 | 780 | manual | 720 |
| | 50回 | 790 | auto | 680 |
| | 150回 | 770 | auto | 480 |
| | 200回 | 740 | auto | 430 |
| | 300回 | 770 | auto | 340 |
| N ₂ | 200回 | 760 | auto | 380 |
| Ar | 200回 | 580 | auto | 330 |

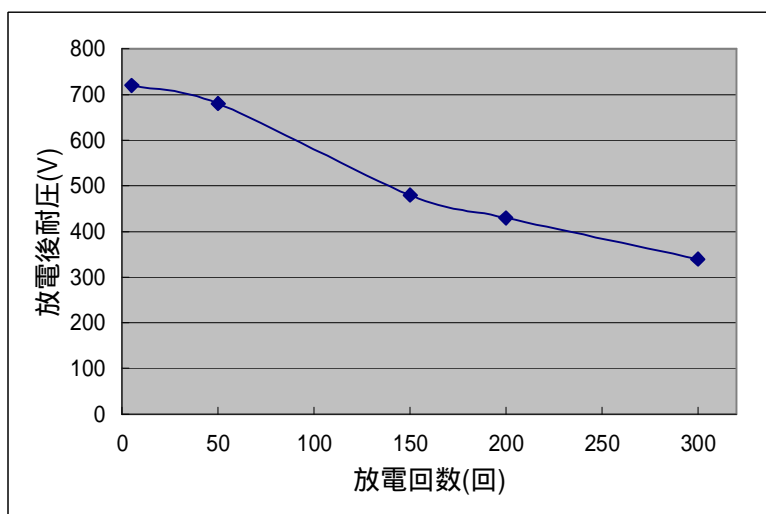


図 6.4 Ar:C₂H₆=1:1 ガス中放電における放電回数と放電後耐圧との関係。放電回数が増加すると放電後の耐圧が下がっていくことが観測される。

6.3 測定結果

6.3.1 Ar:C₂H₆=1:1 ガスにおける測定結果

この実験では、放電回数を増やすことによる放電の炭素堆積への影響を調べるために、放電回数を 5、50、150、200、300 回と増やした強制放電実験を行い、その放電させたピクセルを SEM で観察した。SEM 観察を行うには試料用に μ -PIC を切断しなければならないが、切断を行うとそのピクセルに電圧を印加できなくなる。そのため、放電回数の異なる各ピクセルは、一つのピクセルを観察しているのではなく、5 つの異なるピクセルを観察している。図 6.5 に Ar:C₂H₆=1:1 ガス中放電後の SEI 像を示す。図 6.5 の(a)、(b)、(c)、(d)、(e)でアノードなどの電極形状が異なるのは、それぞれ異なるピクセルを観察しているためである。また、図 6.5 の(a)、(b)、(c)、(d)、(e)のアノードの形状が真円ではなく楕円になり左方向に膨らんでいるのは μ -PIC の製作精度のばらつきにより、このような形状のアノードが存在した。図 6.5 では、放電回数の多いピクセルほどチャージアップしない領域が増えていることがわかる。つまり、炭素の堆積領域は放電回数が多いほど大きいことがわかる。図 6.4 より放電回数が多い場合ほど放電後耐圧が低くなっていることから、一つのピクセルの変化としては放電回数の増加により炭素の堆積領域が増加し、さらに、放電が起こりやすくなり、最終的には電極間の導通に至るのではないかと考えられる。このことから 5 章で SEM 観察を行った放電ピクセルはポリイミド面全面が堆積物でおおわれており(図 5.8; 放電ピクセル 1)大規模な放電であったと考えられる。また、炭素の堆積領域が各ピクセルとも各図の左下のアノード・カソード間を中心としているのは、アノードが左方向に歪んでいるためアノード・カソード間の距離が狭くなり電場が強くなることで、放電が左下部分のアノード・カソード間に偏って起こったことが原因と考えられる。これはピクセルパターンの位置合わせのずれである。また、図 6.5 のチャージアップしない領域に見られる白

い粒は、炭素の堆積が少なくポリイミド表面を完全に覆っていないために、ポリイミドがチャージアップして観測されているものだと考えられる。

図 6.6 に各放電回数の放電ピクセルの 500 倍の TOPO 像、図 6.7 に放電回数 200、300 回の 1600 倍の TOPO 像を示す。図 6.6 は放電ピクセルの全体像であり、図 6.7 は 200、300 回のチャージアップを起こさない領域とチャージアップを起こす領域を拡大したものである。図 6.6 からは、図 6.5 でチャージアップを起こさない領域がチャージアップを起こす領域に比べ表面が滑らかになっていることが観測される。このことは図 6.7 において顕著に観測される。これは、チャージアップを起こす領域はポリイミド面の数百 nm の凹凸が観測されるが、チャージアップしない領域は炭素が堆積することによりポリイミド表面の凹凸が滑らかになるために、このような凹凸の差が生じているのであると考えられる。

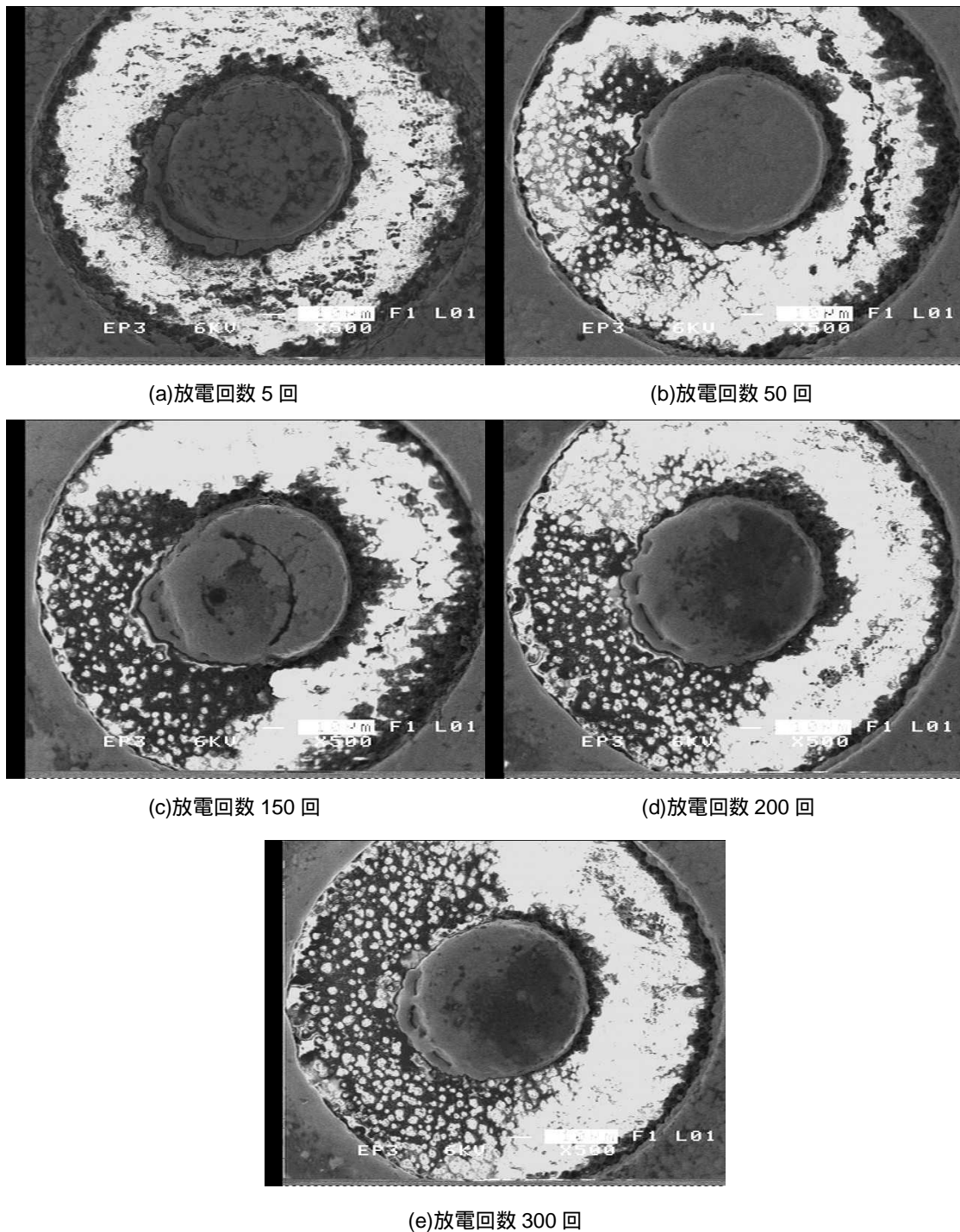
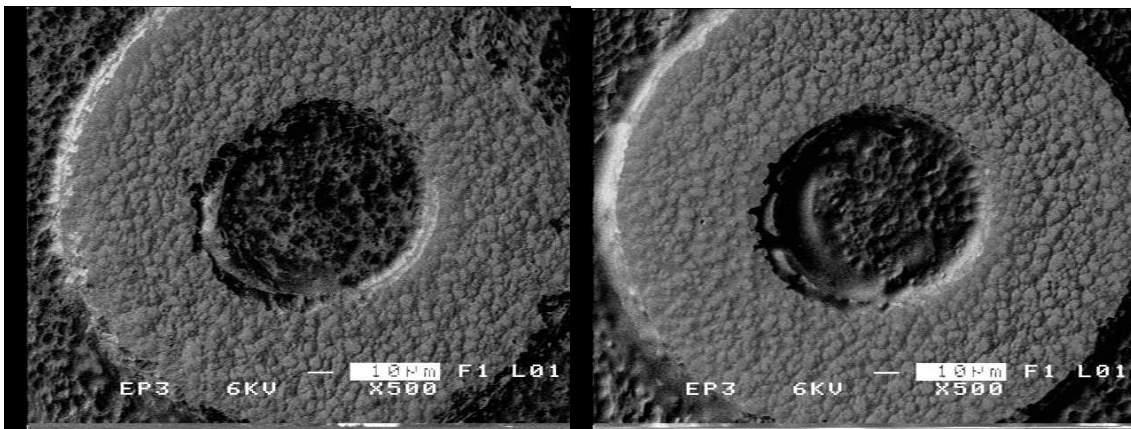
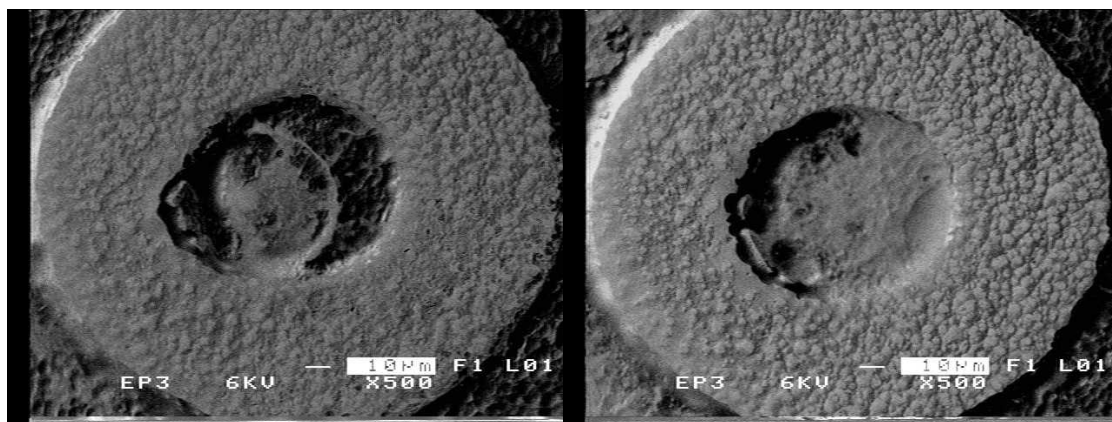


図 6.5 Ar:C₂H₆=1:1 ガスにおいて放電回数を変化させた場合のピクセルの SEI 像。放電回数を増やしていくと徐々にチャージアップしない領域が増えていく。このことにより、放電の回数の増加によって炭素の堆積領域が増加することがわかる。



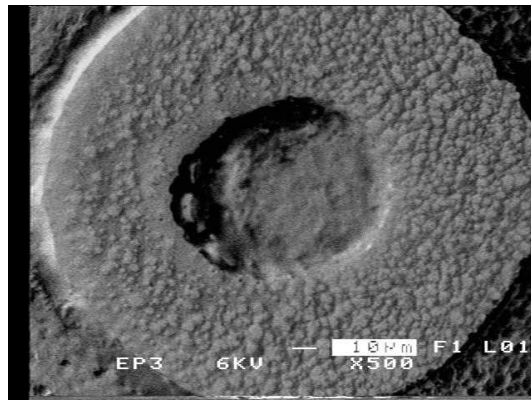
(a)放電回数 5 回

(b)放電回数 50 回



(c)放電回数 150 回

(d)放電回数 200 回



(e)放電回数 300 回

図 6.6 Ar:C₂H₆=1:1 ガスにおいて放電回数を変化させた場合のピクセル全体の TOPO 像。放電回数が 5、50 回ではポリイミド面の全面にほぼ均一な凹凸を観測できるが、放電回数が 150 回以上になると、チャージアップを起こした領域に比べて表面が滑らかになるチャージアップを起こしていない領域(各放電ピクセルの左下側のポリイミド面)がひろがっていることがわかる。

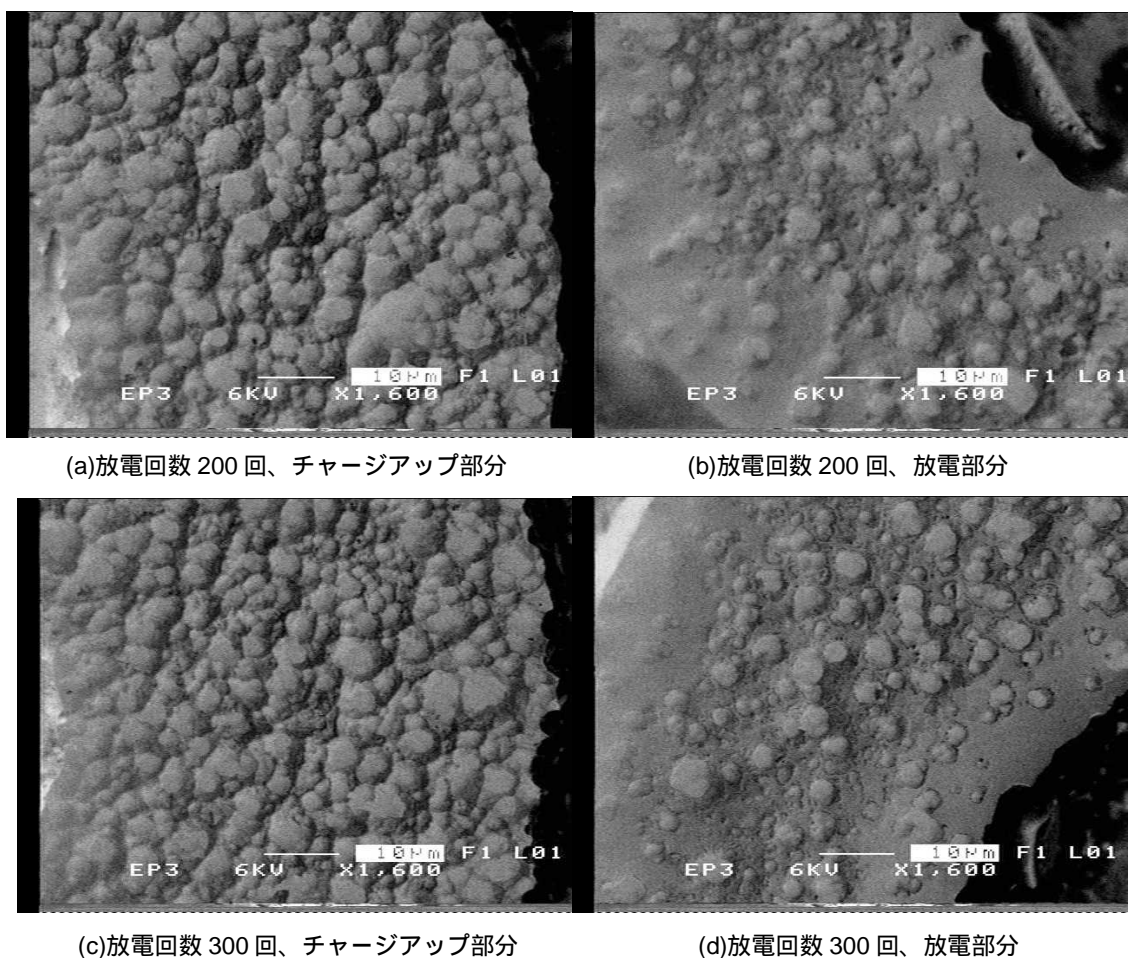


図 6.7 Ar:C₂H₆=1:1 ガスにおいて放電回数を変化させた場合の放電部分とチャージアップ部分を拡大した(1600 倍)ピクセルの TOPO 像。(a)、(c)はピクセルの右上のチャージアップを起こしている場所で、(b)はピクセルの左下、(d)はピクセルの左のチャージアップを起こしていない部分を示している。放電回数 200、300 回の両方とも同じピクセル内の比較においてチャージアップしない炭素の堆積領域がチャージアップする領域に比べて表面の凹凸が滑らかになっていることがわかる。

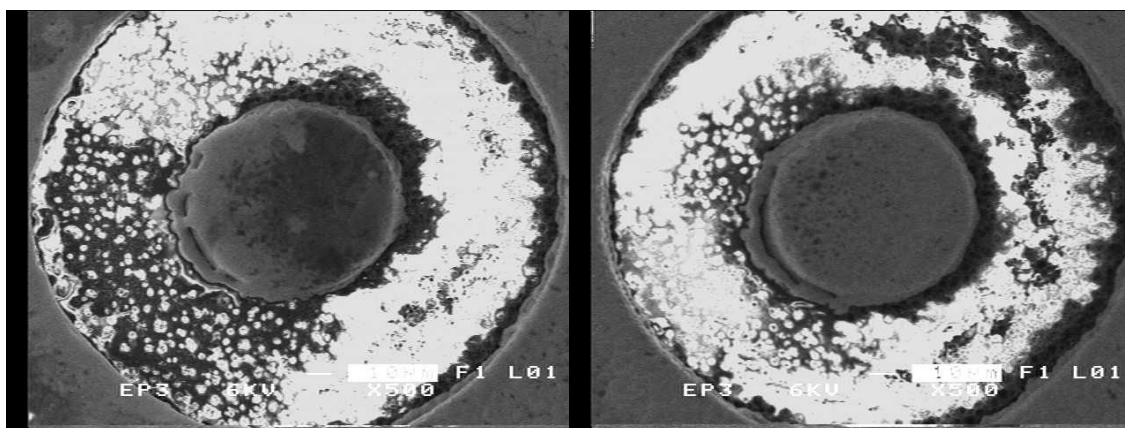
6.3.2 3種類の封入ガスにおける測定結果

この実験では、放電奮闘気ガスの違いによる炭素堆積現象の違いを調べるために、Ar:C₂H₆=1:1、純 Ar ガス、N₂ガスの3種類の封入ガスでの実験を行った。堆積カーボンがクエンチャーC₂H₆によるものであれば、純 Ar、N₂ガス放電において炭素の堆積はみられないと予想される。この実験では比較を明確にするために、どのガス放電においても、放電回数を200回と固定して実験を行った。しかし、表6.1に示したようにガスの耐電圧性からArの放電は500V程度で、他のガスが750V程度に比べて低電圧の放電である。図6.8に3種類のガス中放電にさらされたμ-PICのSEI像を示す。ガス放電は全て図6.8の(a)(b)(c)中の左下のアノード・カソード間で起こった。これは製造工程の関係でアノード中心がすべて左下にずれたためである。Ar:C₂H₆=1:1ガス(図6.8(a))においてチャージアップを起こさない炭素の堆積領域を観測した。また、Arガス(図6.8(b))、N₂ガス(図6.8(c))ではほとんどの領域でチャージアップを観測した。Ar:C₂H₆=1:1ガスとAr、N₂ガスのチャージアップの観測結果に差があることから、エタンの有無が放電の影響に寄与していると考えられる。エタンによる影響として、放電により発生した紫外線がエタンを分解し炭素を堆積させたことが考えられる。しかし、Arガス(図6.8(b))において右上部分のポリイミド表面に暗い領域が観測される。この領域は常に暗いわけではなく、明るくなったり暗くなったりゆっくり変化していた。この原因についてはよくわかっていない。しかし、倍率を5000倍に上げてその部分を観察するとチャージアップを起こすこと、放電領域は左下のポリイミド面上で起こっており放電による影響が考えにくいことから、炭素堆積によるものではないと推定される。

図6.9に3種類のガスにおけるピクセル全体のTOPO像、3種類のガスにおける放電を起こした部分の倍率を上げたTOPO像(Ar:C₂H₆=1:1; 1600倍、Ar; 1500倍、N₂; 1600倍)を示す。図6.9では、どのガスにおいても放電領域の表面が他の領域の表面よりも凹凸が滑らかになっていることが観測された。また、図6.8のArガス、N₂ガスの放電領域のチャージアップが他の領域に比べてわずかに暗くなっていることも観測されていた。表6.2からはArガス、N₂ガスの放電後の耐圧が低下していることが示されている。これらのことから、Arガス、N₂ガスにおいても放電の影響により導電性物質の析出・堆積が起こり、放電領域表面の凹凸が滑らかになったことが考えられる。Arガス、N₂ガスはエタンを含まないため、導電性物質として考えられるのは、電極部分の銅やニッケルの析出とポリイミドの炭化による炭素の析出である。電極部分の析出の可能性を調べるために行ったCOMPO像観察の結果を図6.10(正常ピクセル)、図6.11(Arガス、N₂ガス)に示す。図6.10の正常ピクセルはAr:C₂H₆=1:1ガスの放電ピクセル(図6.8(a))の数個隣のピクセルを観察している。図6.11のAr、N₂ガスの両方とも放電領域のポリイミド面に電極部分のコントラストを観測できないことから、導電性物質は電極部分の影響ではないと考えられる。また、図6.10の正常ピクセルと比べて、アノード・カソードにコントラストの違いが見られないことから放電の影響がアノード・カソード面に及んでいないと分かる。放電の影響がポリイミド面のみ及

んでいることから、放電がアノード・カソード間のポリイミド面上で起こった沿面放電であると推定される。放電の影響として、カソード端からの電子放出をきっかけとした沿面放電により放電経路のポリイミド面が放電の熱で分解され炭素が析出したことが考えられる。Ar、N₂ガスでの沿面放電は Ar:C₂H₆=1:1 ガスでも起こることが考えられる。しかし、200 回放電の SEI 像(図 6.8)において Ar:C₂H₆=1:1 ガスと Ar、N₂ガスのチャージアップの程度に大きな差が生じていたことから、Ar:C₂H₆=1:1 ガスの場合、沿面放電による炭素析出の影響よりも、ガス放電による紫外線のエタンの分解による炭素堆積の影響が大きいと考えられる。

沿面放電では、Ar、N₂ガスの COMPO 像(図 6.11(a)(b))のように放電の影響がアノード・カソード間のポリイミド面以外のアノードやカソード表面までには及んでいない。しかし、5 章の放電ピクセル COMPO 像観察では、放電の影響がアノードやカソード面にまで及んでいることが観測されていた(図 5.10、5.11)。すなわち、カソード面の金属による白ではなく黒くみえていた。これとくらべて Ar、N₂ガスの COMPO 像(図 6.11(a)(b))でカソード面の黒化はみえていない。5 章での放電ピクセルの放電は、ポリイミド面の沿面放電ではなくアノード・カソード間の電子なだれがストリーマへ発展することが原因であると考えられる。そのため、5 章での放電ピクセルへの炭素堆積の原因として、沿面放電によるポリイミドの分解ではなく、クエンチャーガスの C₂H₆が放電による紫外線で分解して放電ピクセルに堆積したことが考えられる。

(a) Ar:C₂H₆=1:1 ガス、放電回数 200 回

(b) Ar ガス、放電回数 200 回

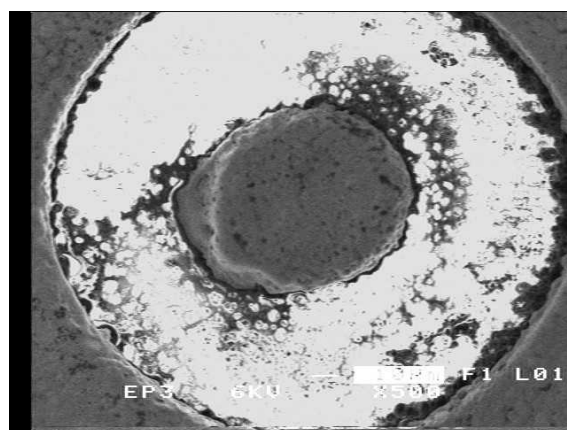
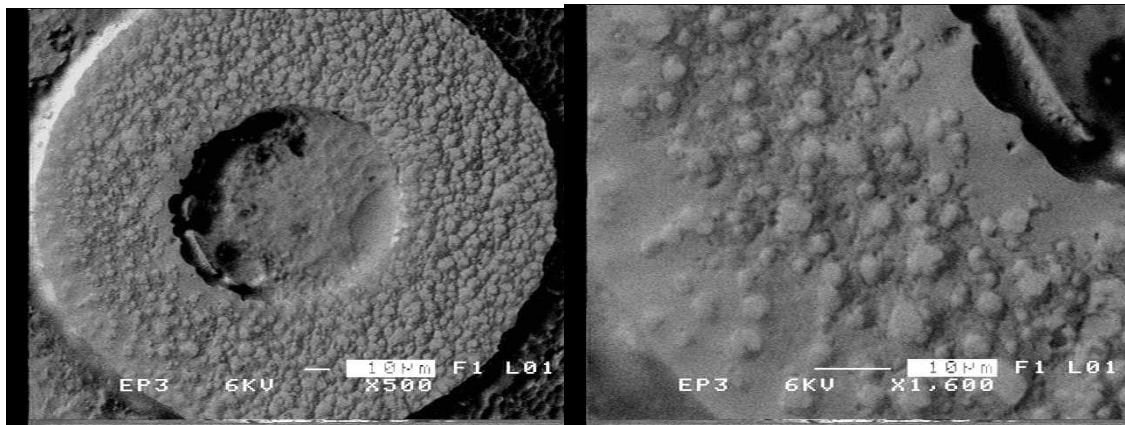
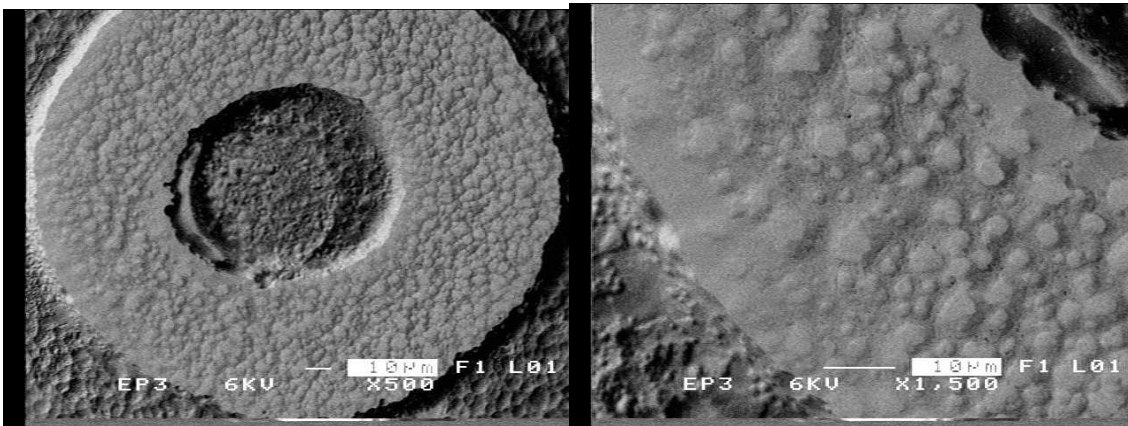
(c) N₂ ガス、放電回数 200 回

図 6.8 3 種の封入ガスにおいて放電を 200 回行った場合の放電ピクセル全体の SEI 像。(a)C₂H₆ を含む場合にチャージアップを起こさない炭素の堆積領域を観測。(b)の Ar ガス、(c)の N₂ ガス；放電を起こした左下のポリイミド面の白さが他の部分に比べて若干暗い。

(a) Ar:C₂H₆=1:1 ガス、全体図(b) Ar:C₂H₆=1:1 ガス、放電部分拡大図

(c) Ar ガス、全体図

(d) Ar ガス、放電部分拡大図

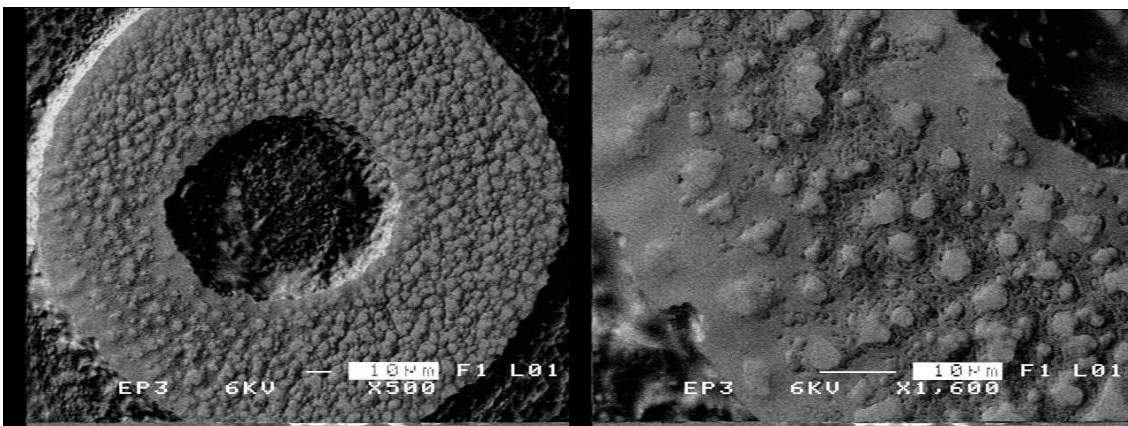
(e) N₂ ガス、全体図(f) N₂ ガス、放電部分拡大図

図 6.9 放電回数を 200 回に固定して封入ガスを変化させた場合の放電ピクセル全体の TOPO 像と放電部分を拡大した TOPO 像。どのガスにおいても、チャージアップを起こさない領域に炭素が堆積し表面が滑らかになっている。

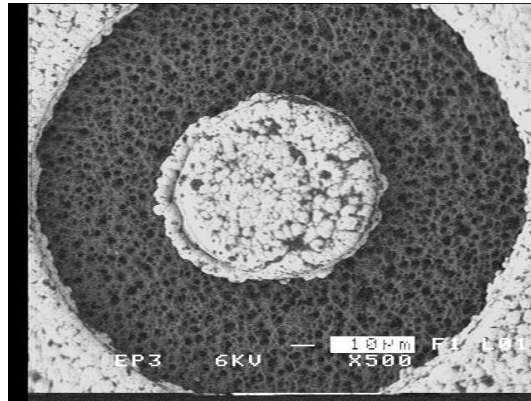
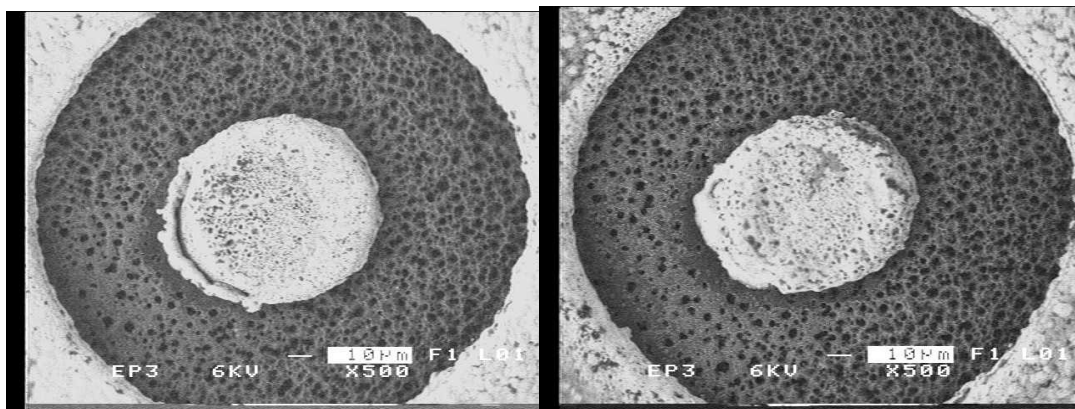


図 6.10 正常ピクセルの COMPO 像。Ar:C₂H₆=1:1 ガス放電ピクセル(図 6.8(a))の数個隣のピクセルを観察している。原子番号の違いにより電極とポリイミド面にコントラストが観測される。



(a)Ar ガス

(b)N₂ ガス

図 6.11 Ar、N₂ ガスにおける COMPO 像。Ar、N₂ ガスの両方とも放電領域のポリイミド面に電極部分のコントラストを観測できないことから、導電性物質は電極部分の影響ではないと考えられる。また、図 6.10 の正常ピクセルと比べて、アノード・カソードにコントラストの違いが見られないことから放電の影響がアノード・カソード面に及んでいないと分かる。

7章 考察

7.1 電極間放電に伴うピクセル上堆積物の堆積過程

これまでの研究により、 μ -PIC の放電ピクセルに堆積した導電性物質が炭素であるということと炭素の堆積がポリイミド面だけでなくアノードやカソード面にまで及んでいることがわかった。さらに、強制放電実験により、炭素堆積に影響を及ぼしている物質がクエンチャーガスであるということがわかった。そのため、ここでは得られた実験結果から放電による炭素の堆積過程に関する考察を行う。炭素の堆積に影響を及ぼしているクエンチャーガスのエタンは、ペニング効果によるカソードからの電子放出の抑制と電子雪崩によるガス増幅の中で発生する紫外線を吸収させるために用いられている。この紫外線吸収過程で得られたエネルギーがエタン自身の分解に使われ、エタン中の C-H 結合エネルギーを少し上回るエネルギーが結合間に与えられ炭素がピクセルのアノード、カソード、ポリイミド面上に堆積し、水素はガスとして検出器内に放出されたのではないかと考えられる。実際に、このような炭化水素の分解を利用して炭素と水素を生成する特許の出願も行われている(発明名称：炭化水素分解装置及び炭化水素分解方法、特許出願公開番号：特開 2005-298286(P2005-298286A))。図 7.1 が炭化水素分解装置の構造である。チャンバ内にメタンと少量のアルゴンを封入し、電極間に超短パルス(この超短パルスは 100μ 秒程度以下の短い場合を指し、ピコ秒までを対象としている)の電圧を印加して、放電を起こしメタンガスを炭素と水素に分解している。

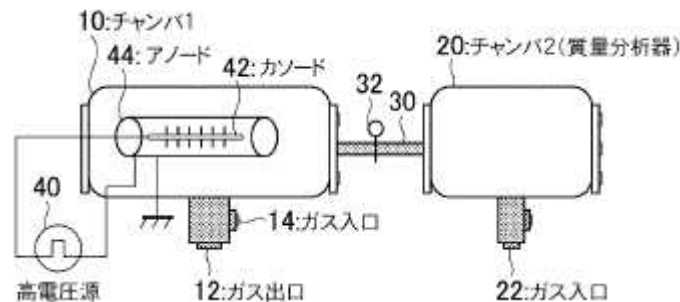


図 7.1 炭化水素分解装置(特開 2005-298286)

7.2 放電の基板への影響

$\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=1:1$ の SEI 像(図 6.5)、TOPO 像(図 6.6)、3 種の封入ガスにおける SEI 像(図 6.8)から炭素の堆積にエタンが大きく影響を及ぼしていることがわかった。しかし、純 Ar、 N_2 ガス(図 6.9(c)~(f))において放電領域のポリイミド表面の凹凸が滑らかになっている、純 Ar、 N_2 ガスの SEI 像(図 6.8(b)(c))においても放電領域のチャージアップの白さが薄くなる、純 Ar、 N_2 ガス中での放電でも放電後の耐圧が下がる(表 6.2)。これらのことより、放

電による影響がエタンの紫外線分解以外にも存在することが考えられる。正常ピクセル、Ar、N₂ガスにおけるCOMPO像(図6.10,11)から放電の影響がアノードカソード面には及んでいないことがわかる。このことから純Ar、N₂ガス中での放電がアノードカソード間のポリイミド面上の沿面放電であると推定される。このポリイミド上の沿面放電により発生した熱によりポリイミド面が分解されて炭素が析出したために、ポリイミド面が導電性を持ち、放電後の耐圧が下がったと考えられる。このため、放電の影響として熱による基板の分解も考えられる。しかし、3種の封入ガスにおけるSEI像(図6.8(a)(b)(c))の比較においてエタンを含む場合にのみチャージアップしない領域が観測されたことから、放電の熱によるポリイミド面の分解よりもエタンの紫外線分解による影響のほうが大きいと考えられる。

7.3 放電への製作精度の影響

動作中放電ピクセルの比較(図5.8)において、放電ピクセル3、4(図5.8(c)(d))で、アノード中心とカソードホールを中心のずれによってアノードカソード間の距離が広がった右下の領域にチャージアップ領域が観測された。これは、アノード中心とカソードホールを中心のずれによりアノードカソード間の距離が狭くなり放電が偏ったことが原因と考えられる。強制放電実験においてもずれが観測された(図6.5)。図5.9に示されるようにアノード中心とカソードホールを中心のずれが大きくなるほどアノードカソード間の距離が狭くなり電場が偏って強くなる。このため、製作精度を上げてアノード中心とカソードホールを中心のずれを小さくし、電場の偏りを緩和することが放電を防ぐ方法の一つと考えられる。

8章 まとめ

本研究では、 μ -PIC 放電ピクセルの SEI、COMPO、TOPO 像を使った表面観察、オージェ電子分光法を用いたピクセル上堆積物の分析、封入ガスの変化させて強制的に放電を起こさせた μ -PIC ピクセルの表面観察を行った。

μ -PIC 放電ピクセルの SEI、COMPO、TOPO 像を使った表面観察

複数の μ -PIC 放電ピクセルを観察した結果、放電したピクセルのポリイミド表面からは正常なピクセルでは見られないチャージアップが観測され、放電によりポリイミド表面上に導電性物質が堆積していることがわかった。組成像観察から導電性物質の堆積がポリイミド面だけでなくアノードやカソード面にまで及んでいることがわかった。また、放電したピクセル間の比較においてチャージアップしない領域に差が生じていることが観測されたが、アノードが円形のピクセルの中心からずれていることによる電界強度の偏りによる影響が考えられる。

オージェ電子分光分析を用いたピクセル上堆積物の分析

μ -PIC 放電ピクセルのポリイミド表面の導電性物質をオージェ電子分光法を用いて分析することにより、放電によって堆積した導電性物質が炭素であると確定することができた。

封入ガスを変化させた場合の強制放電実験

Ar:C₂H₆=1:1 ガスにおいて、放電回数を変化させた場合の放電ピクセルを SEM 観察することにより、放電の回数が増加していくにつれて炭素の堆積領域が増加し、耐圧も低下するこれは導電性物質の堆積とつじつまが揃っている。エタンの存在の影響を調べるため、放電回数を 200 回と固定して封入ガスを Ar:C₂H₆=1:1、Ar、N₂ と変化させた場合の放電ピクセルの SEM 像観察を行った。Ar:C₂H₆=1:1 に比べて Ar、N₂ において炭素の堆積は少なかった。しかし、Ar、N₂ ガスにおいても放電箇所では他の領域と比べるとチャージアップの程度は小さくなっていることが観測された。また、TOPO 像観察からも、Ar:C₂H₆=1:1 のみならず Ar、N₂ ガスにおいても放電箇所のポリイミド表面が放電を起こしていない場所のポリイミド表面に比べて凹凸の滑らかさが観測された。これは、Ar、N₂ ガスでは、放電による熱によってポリイミド表面が分解し炭素が析出したことが考えられる。Ar:C₂H₆=1:1 ガスでは、放電による影響は、ポリイミド表面の分解だけで無く、クエンチャーガスのエタンが放電により分解して堆積したと考えられる。この炭素の堆積過程は、放電により発生した紫外線をクエンチャーであるエタンが吸収した際に得たエネルギーが、エタン内の C-H 結合を切るエネルギーに使われ、水素はガスとして放出され炭素はポリイミド表面に堆積したのではないかと考えられる。

本研究では、 μ -PIC に放電が起きると、放電により発生した紫外線でクエンチャーのエタンが分解されピクセル上に炭素が堆積するということを明らかにした。また、神戸大の μ -PIC における放電がポリイミド面の沿面放電ではなく、アノードカソード間の電子雪崩のストリーマへの発展による放電であることがわかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり，
御多忙の中，御教授賜りました，
本間康浩准教授，理学部粒子物理研究室 越智敦彦助教に深く感謝致します。

特に，本論文の作成にあたり，幅広い御指導を頂きました
本間康浩准教授に心から御礼申し上げます。

本研究を進める上で，実験において多くの協力を頂いた吉田圭一氏，松田慎司氏，小林正治氏，齋藤俊介氏，清水優祐氏，村上浩太氏，加納英朗氏，田辺晃氏に深く感謝致します。
最後に、私の研究活動を手助けしていただいた同研究室の皆様にも深く感謝致します。

参考文献

- [1] 永江知文, 永宮正治. 「原子核物理学」. 株式会社裳華房(2000)
- [2] 政池明. 「素粒子を探る粒子検出器」. 岩波書店(2007)
- [3] T.Nagayoshi, et al. “Development of μ -PIC and its imaging properties”. Nucl. Instr. and Meth A525(2004)20.
- [4] S.Kabuki, et al. “Development of Electron Tracking Compton Camera using micro pixel gas chamber for medical imaging”. Nucl. Instr. and Meth A580(2007)1031.
- [5] 桂華智裕. 「Micro Pixel Chamber(μ -PIC)の安定性向上と高増幅率化に向けた研究」. Master' thesis, 神戸大学,2007
- [6] V.Peskov, et al. “Feedback and breakdowns in microstrip gas counters”. Nucl. Instr. and Meth A397(1997)243.
- [7] G.Charpak, et al. “The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles”, Nucl. Instr. and Meth 62(1968)262.
- [8] Peter rice-evans. “Spark, Streamer, Proportional and Drift Chamber”. The Richelieu Press(1974)
- [9] 林泉. 「高電圧プラズマ工学」. 丸善株式会社(1996)
- [10] 奥村和恵. 「ATLAS 実験に用いる TGC のための検査設備の構築及びガスシステムの開発」.Master's thesis, 神戸大学,2003
- [11] A.Oed. “Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases”. Nucl. Instr. and Meth A263(1988)351.
- [12] A.Ochi. Ph.D thesis, Tokyo Institute of technology, 1998.
- [13] S. F. Biagi, et al. “First experimental results from a microdot gas avalanche detector integrated onto a silicon wafer”. Nucl. Instr. and Meth A366(1995)76.
- [14] S. F. Biagi, et al. “Experimental results from a microdot overcoated with semiconducting layer”. Nucl. Instr. and Meth A419(1998)438.
- [15] F.sauli. “GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors”. Nucl. Instr. and Meth A386(1997)531.
- [16] 門松宏治. 「GEM を用いたガス検出器の基礎研究、および応用開発」.Master's thesis,佐賀大学,2007
- [17] S.Uno, et al.“Performance study of new thicker GEM”. Nucl. Instr. and Meth A581 (2007) 271.
- [18] A.Ochi, et al. “A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber”. Nucl. Instr. and Meth A471(2001)264.

- [19] 永吉勉. 「 μ -PIC の新しい電極配置」. 京都大学,2004.
- [20] T.Nagayoshi. “Development of Micro Pixel Chamber and Systematic Study on the Electrode Structure”.Doctor’s thesis, 京都大学,2004
- [21] 日本電子顕微鏡学会関東支部. 「走査電子顕微鏡」. 共立出版株式会社(2000)
- [22] 日本電子顕微鏡学会関東支部. 「走査電子顕微鏡の基礎と応用」. 共立出版株式会社(1983)
- [23] 及川麻衣子. 「新型微細構造ガス検出器の性能評価」.Master’s thesis, 神戸大学,2006

- [24] 故島陽太. 「マイクロピクセル放射線検出器の電極形状測定とその耐放電特性への影響の研究」.Master’s thesis, 神戸大学,2007
- [25] 大柳康. 「エンジニアリングプラスチック」.森北出版株式会社 (1985)pp195-199.
- [26] Handbook of Auger Electron Spectroscopy Third Edition,Physical Electronics(1995)

学会発表論文リスト

- [1] 「 μ -PIC 放電部分の SEM 観察」
守谷健司
日本物理学会第 62 回年次大会 (2007 年 9 月 21 日~24 日 北海道大学)

- [2] 「マイクロピクセル検出器の電極間放電に伴うピクセル上堆積物の研究」
守谷健司
第 4 回 MPGD 研究会 (2007 年 12 月 14、15 日 大阪市立大学)