

Title	ストロボ走査電子顕微鏡による集積回路の波形観測に関する研究
Author(s)	中前, 幸治
Citation	大阪大学, 1982, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1368
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

甲-2824

ストロボ走査電子顕微鏡による集積回路
の波形観測に関する研究

昭和57年3月

中 前 幸 治

ストロボ走査電子顕微鏡による集積回路
の波形観測に関する研究

昭和57年3月

中 前 幸 治

内 容 梗 概

本論文は、ストロボ走査電子顕微鏡（ストロボSEM）による集積回路の波形観測に関する研究をまとめたものであり、論文は6章から構成されている。

第1章においては、ストロボSEMによる半導体集積回路の波形観測に関する問題点と研究の現状とについて述べ、本論文の位置づけを行っている。

第2章においては、ストロボSEMの原理と装置を概観し、集積回路の波形観測を容易にするために施した二つの改良点について述べる。一つは、波形観測を効率的に行う場合、位相を電氣的に精度よく変化させることが必要である。そのためのPLL型移相器を試作し、付加したことである。他の一つは、検出波形のS/N比の改善と観測時間の短縮のための信号処理の機能を付加したことである。

第3章においては、MOS構造における低エネルギー照射電子の異常透過の測定について述べる。具体的には、パッシベーション膜付MOSトランジスタに低エネルギー電子を照射し、その時生じた臨界電圧(V_{TH})の変化からゲート酸化膜中に吸収されるエネルギーを求める。この結果、電子の飛程とそのストラグリングを考慮しても説明できない深い部分でエネルギー吸収が生じていることが示される。

第4章においては、SEMで電位を定量的に測定するとき問題となる局所電界効果についての理論解析と実験を述べる。解析及び実験は通常のSEM検出系と引き出し電界を持つ分光器検出系とについて行う。解析結果と実験から局所電界効果は引き出し電界を大きくすれば、ゆるやかに減少すること、局所電界効果の電極寸法への依存性は引き出し電界への依存性と等価であることが示される。

第5章においては、バイポーラIC、LSIとMOS LSIの波形観測の実例を示し、素子の故障箇所、動作限界の原因の追求などにストロボSEMが有効であることを示す。

第6章においては、得た成果をまとめ、今後の課題について述べる。

目 次

第 1 章 序 論	1
第 2 章 波形観測用ストロボ SEM 装置	6
2.1 まえがき	6
2.2 ストロボ SEM の原理	6
2.3 ストロボ SEM 装置の構成	8
2.4 PLL 型移相器の試作	11
2.5 信号処理	16
2.6 むすび	18
第 3 章 MOS 構造における低エネルギー照射電子の異常透過の測定 ..	19
3.1 まえがき	19
3.2 MOS ゲート酸化膜でのエネルギー吸収率 f_D	19
3.3 実験方法	20
3.4 結果と検討	21
3.5 むすび	23
第 4 章 局所電界効果の理論解析と実験	24
4.1 まえがき	24
4.2 理 論	24
4.2.1 解析法	24
4.2.2 解析モデル	25
4.2.3 解析モデル A : 通常の SEM 検出系	28
4.2.4 解析モデル B : 平行平板減速電界型分光器検出系	32
4.2.5 解析モデル C : 高分解能分光器検出系	38

4.3	実験	40
4.3.1	通常のSEM検出系	40
4.3.2	平行平板減速電界型分光器検出系	42
4.4	検討	47
4.5	むすび	51
第5章	ストロボSEMによる集積回路の波形観測	53
5.1	まえがき	53
5.2	バイポーラ素子への応用	53
5.2.1	6回路内蔵D型フリップフロップICの故障診断	53
5.2.2	1024ビットPROM LSIの観測	57
5.3	MOS素子への応用	62
5.4	むすび	68
第6章	結論	69
付録1		70
付録2		72
謝辞		74
参考文献		75
関連発表論文および資料		82

第 1 章 序 論

走査電子顕微鏡 (SEM) は電子ビームを $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ に絞り、これを試料に照射、走査したときのレスポンスを CRT 上に表示する。レスポンスとして二次電子を用いると、二次電子放出比が試料の材質や形状に依存するため、材質や形状の違いによってコントラストを生じる。さらに、試料表面に電位分布があるとき、二次電子の軌道が偏向され、検出二次電子電流が変化する。これを電位コントラストと呼ぶ⁽¹⁾。

この SEM の電位コントラストは半導体集積回路の静的な検査、たとえば配線の断線個所の確認に用いられている⁽²⁾⁽³⁾。SEM の持つ機能の上に時間を分解する機能を持ったストロボ SEM は、G. S. Plows and W. C. Nixon⁽⁴⁾ に提案され半導体集積回路の動的な検査に用いられている⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾。特に、ストロボ SEM 波形モード⁽⁸⁾ は、集積回路上のある点の電位の時間変化 (内部動作波形) を観測出来る。従来、波形観測には機械プローブが用いられて来た。機械プローブの時間分解能はプローブ自身のもつ容量 (最小 2 pF)^{(12), (14), (15)}、検出器までの配線の容量などで決まる。たとえば、全体で 10 pF の容量を持つプローブで $10 \text{ k}\Omega$ のインピーダンスを持つ部分の波形を測定しようとする、この測定系の時定数は 100 ns になる。したがって、これ以上の速い立ち上り、または立ち下り特性をもつ波形を正しく測定することはできない。また、機械プローブの空間分解能はプローブの物理的大きさで決まり、数 μm 程度である^{(12), (14)}。これに比較して、電子ビームプローブはピコ秒の時間分解能、サブミクロンの空間分解能が可能で、かつ位置決めが容易である。このことから、最近ますます高速化、高密度化されつつある集積回路 (IC, LSI) の内部動作波形観測にストロボ SEM は非常に有用な装置となって来ている^{(13), (14), (15), (18)}。

ストロボ SEM 波形モードを用いて集積回路内部の動作波形を精密に測定する場合

1) 電子ビーム照射に伴う素子特性の変化 (電子ビーム照射効果)

2) 電位コントラスト信号の定量性

が問題となる。

電子ビームを物質に照射すると電子-正孔対が発生する。この対を作るのに要するエネルギーはSiでは $3.75\text{eV}^{(19)}$ 、 SiO_2 では $18\text{eV}^{(20)}$ とされている。したがって、keV程度の電子ビーム照射に対しては照射電子数の約 10^3 倍の電子-正孔対が発生することになる。

照射部分がAl電極などの金属やSiなどの半導体の場合には、このような発生があっても、それは過渡的なものであり電子ビームを切ることによりただちに消滅する。また、素子電流に寄与することもない。しかし、発生部分がpn接合部ならば、照射電流の約 10^3 倍の電流が接合部を流れることになる。照射電流は条件にもよるが平均電流で 10^{-11}A 前後である。この程度ならば、特殊な場合を除いて素子の動作特性に影響を与えることは少ないと考えられる。

照射部分が SiO_2 の場合には、 SiO_2 -Si界面に存在している正孔トラップ(トラップは照射中にも新たに発生する)に正電荷が蓄積され、これはビームを切っても消滅しない。この正電荷の蓄積によって、バイポーラ素子の場合には電流増幅率 h_{FE} が減少したり、コレクタからベースへのリーク電流が増加したりすること、MOS素子の場合には臨界電圧 V_{TH} が減少することが報告されている^{(21)~(25)}。

このような電子ビーム照射効果は問題となる SiO_2 膜に吸収されるエネルギーによって評価される。この際、T. H. Everhart and P. H. Hoff⁽²⁶⁾が実験的に求めた飛程 R_G とエネルギー吸収関数がよく用いられる。ストロボSEM波形モードでは電子ビーム照射は点照射で行うため、照射線量(単位面積当りの照射量)は非常に大きくなる。そのため、飛程よりもさらに深い所にある素子にもビーム照射は影響を及ぼし得る。したがって、飛程よりも深い所でのエネルギー吸収を知ることはストロボ観測の際、実験条件を決定する上で非常に重要になる。Everhartらが求めたエネルギー吸収関数は $1.1 R_G$ よりも深い所では用いることはできない。また、ストラグリング(stragglng)などによって少量の電子が、飛程を越えて深くまで浸入することは予想できる。しかし、その大

きさ、すなわちエネルギー吸収の大きさを定量的に検討したものは報告されていない。

第2の電位コントラスト信号の定量性とは、測定電極電位と電位コントラスト信号との間の関係が一对一に対応することを意味する。この関係が線形であれば、それが最善であるが、線形でなくても一对一に対応さえしていれば、予め測定し校正することで実用上は何ら差し支えない。この一对一の対応関係を妨げる要因として、

- A. 試料表面の電位分布の変化による一次ビームの着地点の変化
- B. 試料の汚染による二次電子放出特性の変化
- C. 照射点の材質と形状の差による二次電子放出特性の差
- D. パッシベーション膜のあるときの表面電位分布と内部電極電位との対応関係
- E. 局所電界効果

が挙げられる。

要因Aは、加速電圧が1 kV以上の電子ビームで数Vの電極電位を測定する場合無視出来る⁽²⁷⁾。要因Bはオイルフリーの真空系を用いることによって防ぐことができる。要因Cの効果は電位コントラスト信号の分離^{(28), (29), (30)}、規格化⁽³¹⁾の操作により小さく出来る。要因Dについては、完全にパッシベーション膜を突き抜ける電子ビームを用いると表面電位は内部電極電位に対応すると報告されている⁽³²⁾。それで、要因Eの局所電界効果が最っとも重要な要因となる。

局所電界効果とは、試料上の電位差によって生じた局所電界が二次電子の軌道を変化させ、その結果、検出二次電子電流を変化させることを意味する。ここで、局所電界効果を第一種と第二種の二つに分類する。第一種局所電界効果は、測定電極自身が零電位でないことから生じるもので、第二種は隣接電極が零電位でないことから生じるものである。従来、局所電界効果を減少させるために試料表面に強い二次電子引き出し電界を印加し、分光器を用いることが行われて来た^{(30), (33), (34), (35), (36), (37), (38)}。この際、二次電子のエネルギー分布は測定点

の電位に応じて線形に移動することを前提としている。分光器はこの移動を測定するために用いられる。この移動の大きさから測定電極電位を知るものである。

G. S. Plows⁽³³⁾ と A. P. Janssen et al⁽³⁸⁾ らは局所電界が存在する場合の二次電子の軌道を計算したが、検出二次電子電流へ及ぼす影響について定性的に論じたのみであった。局所電界が存在する場合の検出二次電子電流の理論解析も、その実験的検証も現在まで報告されていない。

以上のような問題点に鑑みて、本論文ではまず、MOS構造における低エネルギー電子照射による電子飛程を越えた領域でのエネルギー吸収、つぎに局所電界効果について検討する。さらに、ストロボSEM装置の若干の改良とそれを用いて集積回路の波形観測の実例について述べる。

第2章では、ストロボSEMの原理と構成を概観し、集積回路の波形観測を容易にするために施した二つの改良点について述べる。一つは、波形観測を効率的に行う場合、位相を電氣的に精度よく変化させることが必要である。そのためのPLL型移相器を試作し付加したことである。他の一つは検出波形のS/N比の改善と観測時間の短縮のため信号処理を施したことである。第3章では、SiO₂膜 1.4 μm (パッシベーション膜 0.87 μm 、層間絶縁膜 0.53 μm)、ポリシリコンゲート電極 0.43 μm 、ゲート酸化膜 0.085 μm からなるMOSトランジスタを用いて、低エネルギー電子のゲート酸化膜中に吸収されるエネルギーを測定する。この結果、電子の飛程とそのストラグリングを考慮しても説明できないほど深い部分で、エネルギー吸収が生じていることが示される。第4章では、ストロボSEMで電位を定量的に測定するとき問題となる局所電界効果について述べる。局所電界が存在する場合の検出二次電子電流を解析する手法を示す。解析の対象は通常のSEM検出系、引き出し電界を持つ減速電界型分光器検出系と引き出し電界を持つ高分解能分光器検出系の三つである。次に先の二つのモデルについて実験的に検証する。この結果、局所電界効果の引き出し電界への依存性は強くなく、また局所電界効果の電極寸法への依存性は引き出し電界への依存性と等価であることが示される。第5章では、第2章のストロボSEM

装置を用いて、バイポーラ IC、LSL と MOS LSI を観測する。MOS 素子の場合の観測条件は第 3 章の結果を考慮して決められている。第 6 章では、本論文で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べている。

第2章 波形観測用ストロボSEM装置^{(39),(40),(41)}

2.1 まえがき

本章では、まず、ストロボSEMの原理(2.2)と実際の構成(2.3)を概観する。集積回路の波形観測を容易にするため、従来の装置に加えた改良点は次のとおりである。

- 1) 波形観測を効率的に行うためには位相を電氣的に精度よく変化させることが必要である。このため、PLL型移相器を試作し、付加した(2.4)。
- 2) 検出信号のS/N比を改善したり、観測時間を短くしたりするのに有効な信号処理の機能を付加した(2.5)。

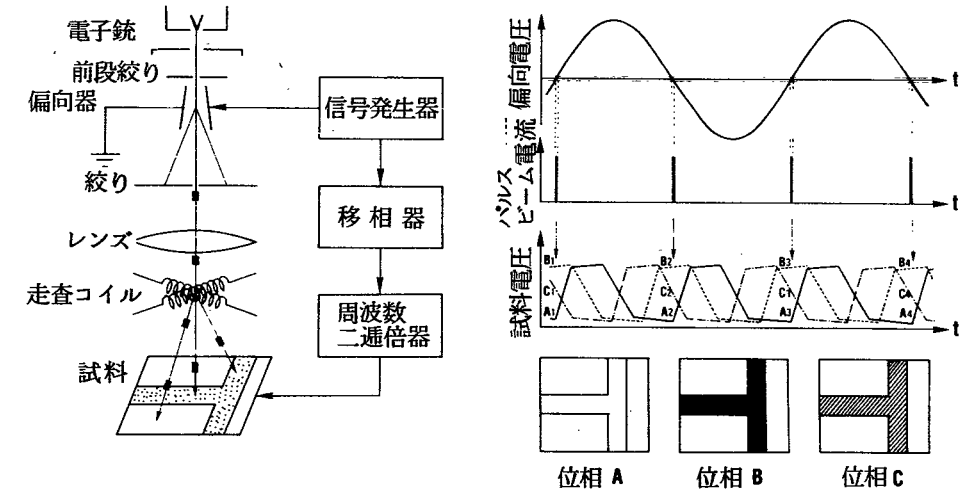
2.2 ストロボSEMの原理

ストロボSEMの原理について述べる前に、通常のSEMで二次電子信号を検出する場合の時間分解能の限界について考えてみる。

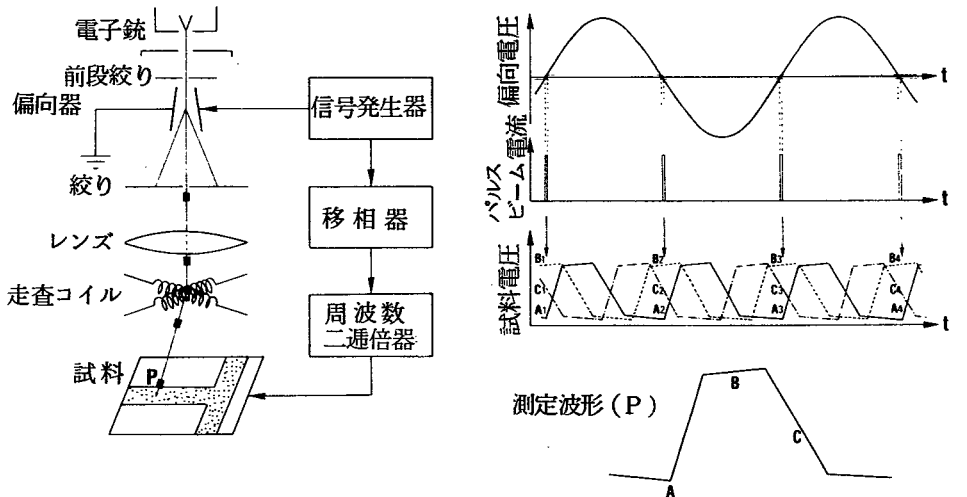
SEMは通常は二次電子検出器としてシンチレータと光電子増倍管を用いているが、各部分時間応答は次のとおりである⁽⁶⁾。i) 試料表面より放出される二次電子の時間応答：1 ps 以下⁽⁴²⁾、ii) 試料面からシンチレータに至る放出二次電子の走行時間差：20~40 ns、iii) シンチレータの時間応答：1~2 ns、iv) 光電子増倍管の時間応答：1~2 ns。したがって、SEMの時間分解能はii)の走行時間差によって制限される。さらに、商用のSEMには光電子増倍管の出力に信号増幅器が組み込まれており、検出器全体としての帯域幅は数MHz程度となる。よって、時間分解能は数100 ns程度が限度である。この検出器をそのまま用いて、ナノ秒以下の速い周期時間現象を観測するために考案された装置がストロボSEMである⁽⁴⁾。

ストロボSEMの動作モードには、周期時間現象のある特定の位相における空間情報を得るための像モード(図2-1(a))とある特定の場所における

時間情報を得るための波形モード（図2-1(b)）とがある。まず、像モードについて原理を説明する。



(a)



(b)

図2-1 ストロボSEMの原理 (a) 像モード (b) 波形モード

図 2-1(a) に示すように、一つの信号発生器からの正弦波信号を分岐して、一方を偏向器へ、他方を移相器、周波数二通倍器を通じて試料に入力する。電子銃から出た電子ビームは偏向器によって図の絞り板上で直線状に振られる。その結果、偏向器の入力信号一周期に二つのパルス電子ビームが発生する。試料励振の周波数は偏向器入力信号のその丁度二倍であるから、パルスビームは試料励振と同期する。いま、測定試料である IC 電極上の電位が図 2-1(a) 右上から三段に示すように周期的に変化しているものとする。このとき、たとえば、位相 A の電位は時刻 $t = A_1, A_2, \dots$ というように必ず繰り返して現われる。位相 B、C についても同様である。そこで、パルスビームを位相 A (したがって、時刻 $t_1 = A_1, A_2, \dots$) の瞬間だけ繰り返し照射すると、このレスポンスは位相 A の電位のみに対応するものとなる。このパルスビームで試料上を二次元的に走査すると、CRT 上には図の右下段の左端に示すように位相 A における二次元電位分布像が描かれることになる。パルスビームと試料励振との同期関係が満足されている限り、検出信号はこの位相での情報のみしか含まないわけであるから、時間現象がピコ秒の超高速現象であっても、通常の SEM 検出系で十分測定できることになる。他の位相、たとえば、B、C の電位分布像を観測するためには、移相器を調節して、図の右上から二段と三段に示すようにパルスビームと試料励振との位相差を変化させてやればよい。

像モードでは、位相を固定してビームを走査するが、波形モードでは逆に、図 2-1(b) に示すようにビームを試料上の一点に固定したままで、位相を変化させる。CRT の横軸に移相器の移相量、縦軸に検出二次電子信号を入力すると、その点での電圧波形が得られる(図 2-1(b) 右下段)。これが波形モードである。

測定の時間分解能は、パルスビームのパルス幅と、試料励振とパルスビームの同期の精度によって決まる。

2.3 ストロボ SEM 装置の構成

ストロボSEM装置の構成を図2-2に示す。装置は、鏡体、表示部および走査制御部からなる通常のSEM(JSM-35)にパルスゲート部、同期回路系およびマイクロコンピュータ系を付加することによって構成されている。図に示されているスイッチを切り換えることにより、像モードと波形モードのどちらのモードでも動作させることができる。もちろん、通常のSEMとしても動作する⁽⁴³⁾。以下、簡単に各部を説明する。

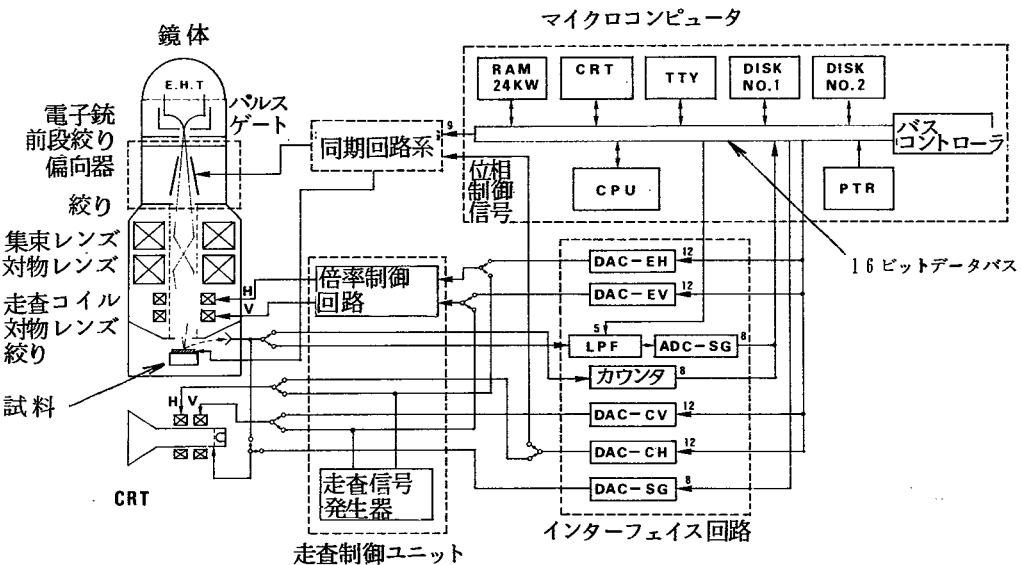


図2-2 ストロボSEM装置の構成

パルスゲート部は、前段絞り、偏向器および絞りから構成されている。偏向器として平板型静電偏向器を用いている。前段絞りは偏向器への空間入射条件を決定し、パルスビームの空間および時間特性に影響を与える^{(43), (44), (45)}。偏向器の下に位置する絞りは、本来ビームを切り取りパルス化するためのものであるが、通常のストロボ動作時にはビームは対物レンズ絞りで切り取られる。しかし、鏡体壁面へのビームの衝突を減少させる効果は大きい。

偏向器への電力供給は、偏向器の持つ静電容量と付加した同調コイルで共振回路を形成し、その共振周波数を偏向用信号の周波数と同調させることに

よって効率的に行なわれる。動作周波数の変更は同調コイルを交換することによって行なわれる。

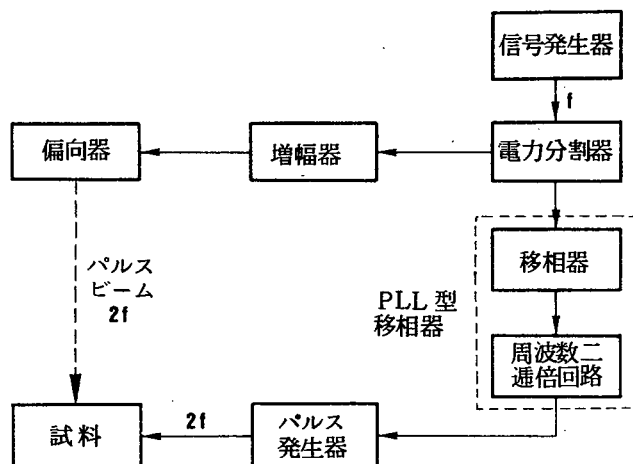


図 2 - 3 同期回路系の構成

同期回路系の構成を図 2 - 3 に示す。標準信号発生器から正弦波信号は電力分割器によって二分岐される。一方は電力増幅器を経て偏向器へ入力される。他方は移相器、周波数二通倍器、試料励振用パルス発生器のトリガ端子を通じて試料に入力される。一つの偏向器を用いて電子ビームを直線偏向し、パルスビームを発生させているため、正弦波の一周期に対して二個のパルスが発生する。そのため、周波数二通倍器が必要となる。さらに、波形観測の際、位相を電気的に変化させることが必要である。この二つの要求を満足するものとして、位相同期ループ (PLL) 回路をもちいた PLL 型移相器が備えられている。

マイクロコンピュータ系は図 2 - 2 に示すようにマイクロコンピュータ、SEM とのインターフェイス回路、位相制御回路などから構成される。その機能は次のとおりである⁽⁴⁶⁾。

- 1) プローブの位置決め、すなわち電子ビームを試料上の任意の検査点に正確に照射する。

- 2) 信号波形を測定し、これをRAM、あるいはフロッピーディスク(DISK)に記憶、保存する。
- 3) S/N比の改善を図るために信号処理を施す。
- 4) 観測波形をCRT上に表示する。
- 5) 波形を数値情報としてCRT上に表示またはタイピュータ(TTY)に印字する。

2.4 PLL型移相器の試作

PLLとは位相同期ループ：Phase Lock Loopの頭文字をとったものである。PLL回路には一つの発振器があり、その発振器の周波数および位相がつねに入力信号の周波数・位相に一致するように位相差を検出してフィードバックにより制御する回路構成をさす。

図2-4にPLL回路の基本構成を示す。位相検出器(PD)は二つの入

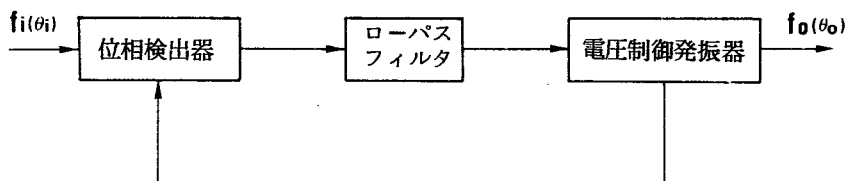


図2-4 PLL回路の基本構成

力信号の位相差を検出し、電圧に変換する。ローパスフィルタ(LPF)はPD出力を積分・平滑化し位相差に比例する電圧成分を取り出す働きをする。電圧制御発振器(VCO)は与えられた制御電圧によって発振周波数が制御される発振器である。フィードバックループの安定状態、すなわちロック状態では

$$\begin{aligned}
 f_o &= f_i \\
 \theta_o &= \theta_i
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

となり、出力信号の位相および周波数が入力信号のそれと一致する。

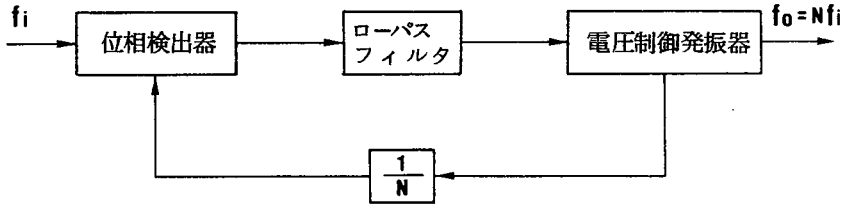


図 2 - 5 周波数 N 通倍 PLL 回路

図 2 - 5 に示すように、フィードバックループに $1/N$ 分周器を挿入すると

$$f_o = N f_i \quad (2-2)$$

なる状態でロックする。すなわち、入力信号を N 通倍した信号を出力として取り出せることになる。したがって、 f_i の位相を変化させれば、周波数が N 倍され、しかも位相が入力信号の位相に追従して変化する信号を得ることができる。これが PLL 回路を利用した周波数 N 通倍移相器の原理である。

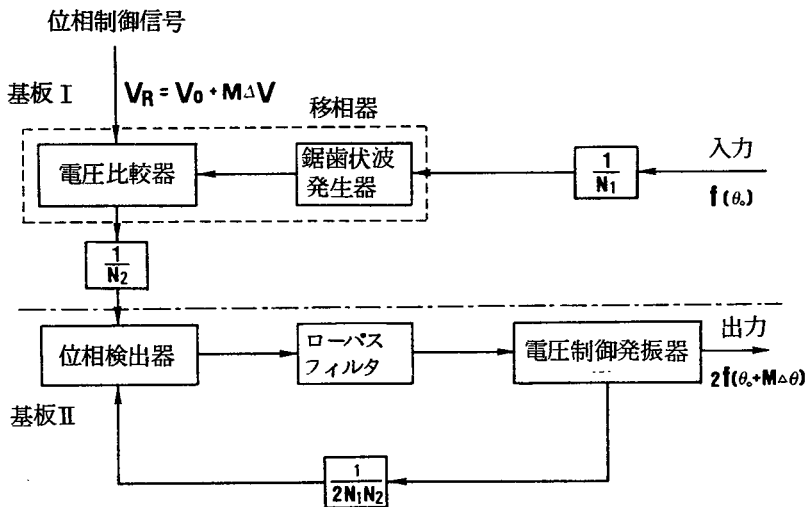


図 2 - 6 周波数二通倍 PLL 型移相器の構成

PLL回路を用いた周波数二通倍移相器の構成を図2-6に示す。図2-6は図2-5に移相回路を付加したものである。移相回路では入力信号に同期させて鋸歯状波を発生させている。これとコンピュータからの位相制御電圧 V_R との交点でパルス信号を発生させることによって位相を変化させている。鋸歯状波の直線性を良くするため、 f_i を $1/N_1$ 分周し周波数が低い領域で鋸歯状波を発生させている。電圧比較器の出力を $1/N_2$ 分周しているが、これはPLL素子 (Signetics社 NE562) の入力としてデューティ比50%の信号を必要とするからである。

実際に試作した回路を図2-7に示す。基板Iは移相回路部分で、基板IIはPLL回路部分である。ただし、回路定数は $f_i = 5\text{MHz}$ のときのものである。以下、信号の流れにそって動作を順次説明する。

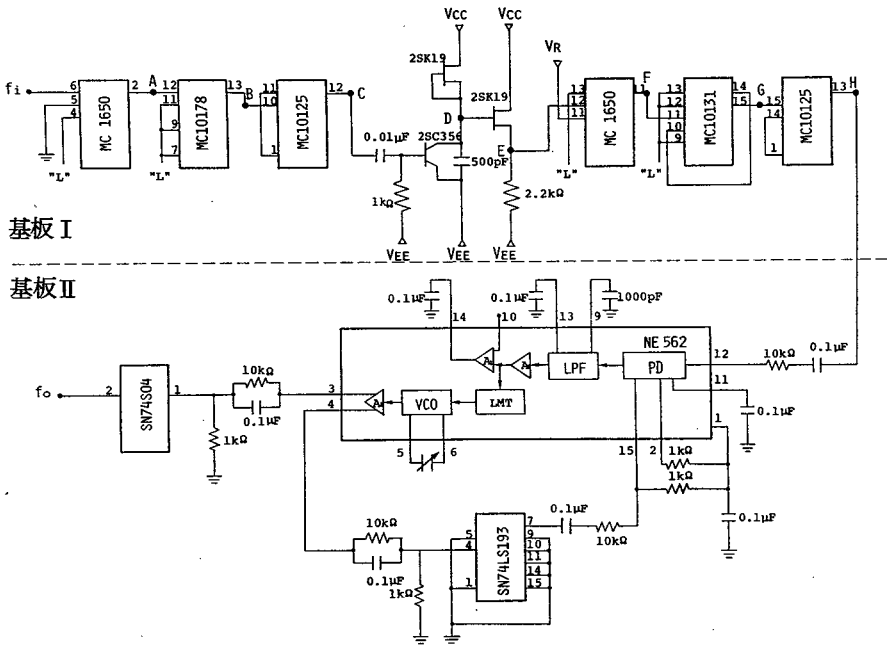


図2-7 周波数二通倍移相器の試作回路

ただし、PD、LPF、LMT、VCOはそれぞれ位相検出器、ローパスフィルタ、リミッタ、電圧制御発振器を示す。

まず、基板Ⅰについて説明する。MC 1650 (MCはMotorola社のECL素子であることを示す)は電圧比較器である。これにより正弦波入力信号 f_i をECLレベルの矩形波に変換する(図2-7、A点)。MC 10178はカウンタで $1/2^n$ 分周器として動作する。本回路では $n = 2$ で $1/4$ 分周器として用いている。すなわち、 $N_1 = 4$ である(B点)。MC 1025はECLレベルの“H”、“L”をTTLレベルの“H”、“L”に変換する(C点)。これにつづくアナログ回路部分がFET二つ(2SK19×2)とトランジスタ一つ(2SC356)で構成される鋸歯状波発生回路である。最初のFETは定電流源として用いられている。トランジスタがシャ断状態のときは、500 pFのコンデンサがFETによって充電される。その結果、コンデンサ両端の電圧は時間とともに線形に上昇する。トランジスタが導通状態になるとコンデンサは放電する。このようにして、D点には f_i に同期した鋸歯状波が発生する。これにつづくFETは鋸歯状波の電圧レベルを圧縮し、位相制御電圧 V_R (0~3V)のレベルに合わせるために用いている。これにより、鋸歯状波のより直線性のよい部分のみを利用できる(E点)。つぎのMC 1650は、鋸歯状波電圧と V_R とを比較し、 V_R より大きいときにはECLレベルの“H”、小さいときには“L”を出力する(F点)。したがって、 V_R を0から3Vまで順次変化させることによって、MC 1650の出力信号の位相は、入力に対して順次遅れていく。次のMC 10131はMC 1650の出力信号をデューティ比50%のパルスにするために用いている。MC 10131は正エッジトリガD型フリップフロップであるから、周波数は $1/2$ 分周されることになる。すなわち、 $N_2 = 2$ である(G点)。次のMC 10125はECLレベルの信号をTTLレベルの信号に変換する(H点)。これはPLL素子であるNE 562がTTLで動作するためである。以上の回路構成により、入力 f_i に対して周波数が $1/N_1 N_2 = 1/8$ で、かつその位相を外部から任意に制御できる信号を基板Ⅰの出力として得ることができる。なお、図2-7のA点~H点までの波形を図2-8に示した。

基板ⅡはPLL回路である。PLL素子としてNE 562を用いている。

この素子は図 2-4 に示した PLL 回路の基本構成の全てを含んでいる。

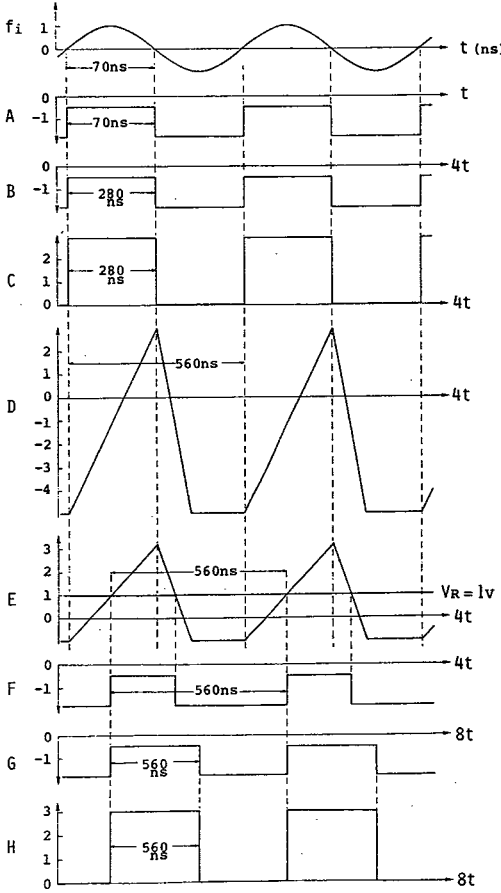


図 2-8 図 2-7 の A~H 点における波形

0.2 ns であった。コンピュータによって制御される位相制御電圧 V_R はデジタル-アナログ変換器 (DAC) の出力 0~3V を、 $\Delta V = 4.88\text{mV}$ ずつ 614 ステップ変化させて得ている。この ΔV に対して、 $f_0 = 2f_i = 10\text{MHz}$ のとき出力信号は 0.19ns 遅延された。この結果、全移相量は 120ns で約 1.2 周期分が得られる。

なお、このコンピュータ制御の PLL 型移相器を用いた、一観測点あたりのサンプル時間 t_S は次式で与えられる。

$$t_S = (191N + 112)M \quad (\mu\text{s}) \quad (2-4)$$

ただし、N は各位相点での平均化回数、M は位相刻み数である。たとえば、

VCO は外付けのタイミングコンデンサ C_0 の値を変えることにより動作周波数が

$$f \text{ (MHz)} = 300 / C_0 \text{ (pF)}$$

$$(2-3)$$

に従って変化する。最高動作周波数は 30MHz である。SN74LS193 (SN は Texas Instruments 社の素子を示す) はカウンタで、1/16 分周器として用いている。これにより、周波数二通倍の移相器が得られる。

試作した移相器の時間分解能は、主として PLL 回路のロック状態のジッタによって決定される。オシロスコープによるジッタの測定から、この移相器の時間分解能は $f_0 = 2f_i = 10\text{MHz}$ で

$M=600$ の時、 $N=1$ で $t_S=0.2s$ 、 $N=10$ で $t_S=1.2s$ 、 $N=100$ で $t_S=11.2s$ となる。

2.5 信号処理

信号処理は i) 検出器出力をローパスフィルタ (LPF) を通してアナログ-デジタル変換器 (ADC-SG) に取り込むサンプル前の過程、ii) 平均化処理を行いながらサンプルする過程、iii) サンプルの終わった波形情報に平滑化処理を施す過程、の三つの過程からなっている。それぞれの効果を実験例をあげて説明する。

テスト信号として用いた繰り返し周波数 11.2 MHz 、振幅 3.4 V のダブルパルス信号のオシロスコープ写真を図 2-9 に示す。実験はこの信号をバイポーラ IC の入力端子に印加し、この端子で波形観測を行なった。実験条件は、加速電圧 25 kV 、平均ビーム電流 $2.8 \times 10^{11}\text{ A}$ 、ビームパルス幅 0.4 ns 、移相ステップ幅 0.2 ns である。

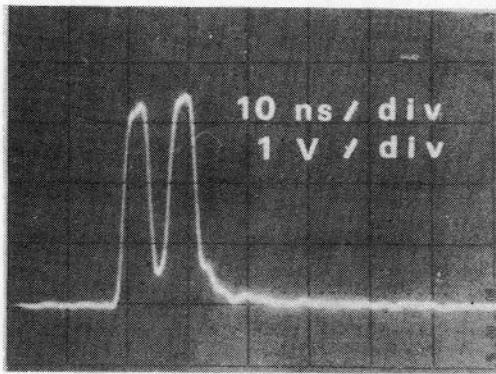


図 2-9 テスト用ダブルパルス信号のオシロスコープ写真

i) と ii) の効果を図 2-10、2-11 に示す。LPF の時定数 T と信号平均化回数 N が増加するにつれて S/N 比が改善されていく様子がわかる。

真の情報をできるだけそこうことなく、ランダム雑音を除去するのに有効な信号処理法として、前後 $(n-1)/2$ 点の信号にそれぞれ適当な重みをつけて移動平均操作をする n 点平滑化処理が知られている⁽⁴⁷⁾。 N 回の平均化

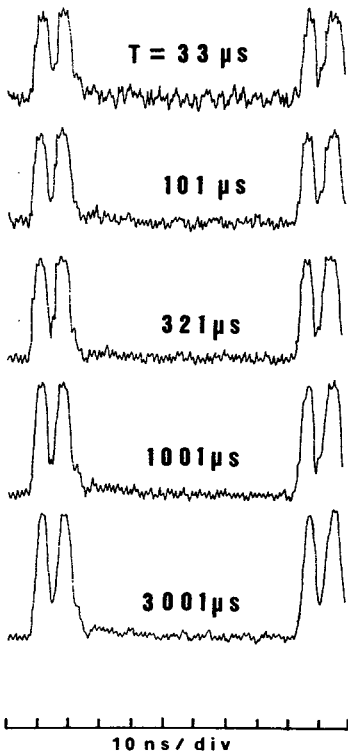


図2-10 LPFの時定数Tと
ストロボ観測波形
の関係 (N=1)

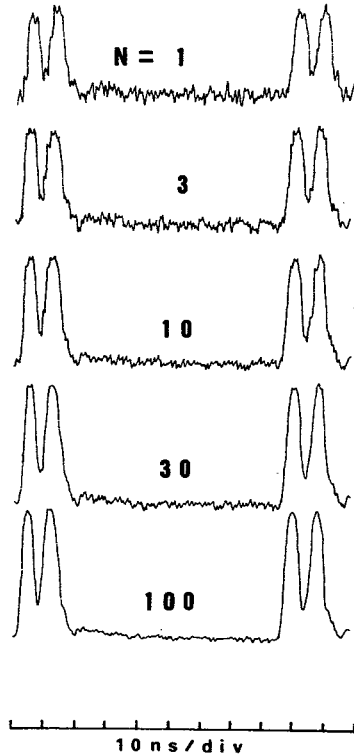
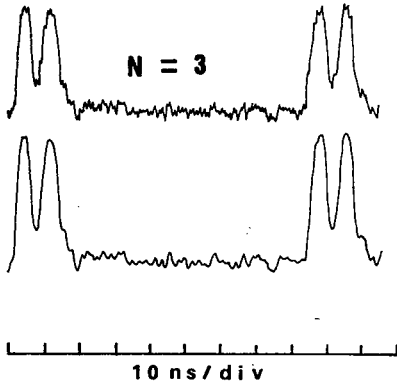


図2-11 平均化回数Nとストロボ
観測波形の関係
(T=33 μs)

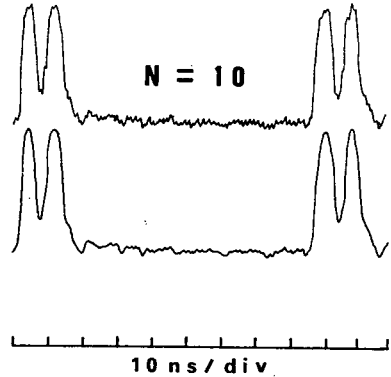
処理とn点平滑化処理を併用すると、S/N比は \sqrt{nN} 倍改善され、サンプルに要する時間を短かくできる。たとえば、S/N比を10倍改善したいとき、平均化処理だけで行くとN=100を必要とするが、平滑化処理を併用すると、N=8、n=13で同じ効果が期待できる。したがって、波形観測に要する時間は約一桁短くなる。図2-12は13点平滑化処理(表2-1にその重み係数を示す)の効果を示したものである。

表2-1 13点平滑化処理の重み係数

位相点	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
重み係数	-11	0	9	16	21	24	25	24	21	16	9	0	-11
規格化因子	143												



(a)



(b)

図 2 - 1 2 13点平滑化処理の効果

(a) $N=3$

(b) $N=10$

2.6 むすび

本章では、ストロボSEMの原理と装置を概観し、装置の若干の改良について述べた。改良点は次のとおりである。

- 1) 電氣的に位相を精度よく変化させることができ、また周波数二通倍器の機能をも兼ね備えたPLL型移相器を試作した。この移相器による時間分解能は、入力周波数5MHz（出力は10MHzになる）で0.2nsであった。また、最高動作周波数は30MHzである。
- 2) 検出波形のS/N比を改善するローパスフィルタ、平均化及び平滑化の三つの処理からなる信号処理を施した。特に、平均化処理と平滑化処理を併用すると同じS/N比の改善に対して平均化処理のみで行うよりも観測時間を短縮できることを示した。

第3章 MOS構造における低エネルギー照射電子の異常透過の測定 (48), (49), (50), (51)

3.1 まえがき

本章では、電子ビームをSiO₂膜 1.4 μm(パッシベーション膜 0.87 μm、層間絶縁膜 0.53 μm)、ポリシリコンゲート電極 0.43 μm、ゲート酸化膜 0.085 μmからなるMOSトランジスタに照射し、その結果生じる臨界電圧(V_{TH})の変化からゲート酸化膜中に吸収されるエネルギーを測定する。まず、ゲート酸化膜中に吸収されるエネルギーの入射電子ビームエネルギーに対する割合、エネルギー吸収率を定義する(3.2)。次に実験方法を示す(3.3)。実験から得られた結果を示し検討する。

3.2 MOSゲート酸化膜でのエネルギー吸収率 f_D

MOS構造において、ゲート電極に正電位が印加されているものとする。このとき電子ビームが照射され、電子がゲート電極をつきぬけてゲート酸化膜SiO₂に達すると、SiO₂中に電子-正孔対が発生する。正孔の一部はSi-SiO₂界面近くに存在する正孔トラップに捕獲され、他の一部は電子と再結合するか、あるいはSi中へドリフトして行く。

正孔トラップに捕獲された正孔の数が増加するにつれて、臨界電圧(V_{TH})が減少するが、この変化ΔV_{TH}は吸収線量(ゲート酸化膜中に吸収されたエネルギー)が小さい間は吸収線量Dに比例する すなわち

$$\Delta V_{TH} \propto D \quad (3-1)$$

ここで、入射電子の照射電荷面密度をQ(C/cm²)とすれば

$$D = E_B f_D Q \quad (3-2)$$

の関係がある。E_Bは入射電子ビームのエネルギー、f_Dはゲート酸化膜中でのエネルギー吸収率(the fraction of deposited energy)である。式(3-1)と(3-2)からΔV_{TH}とQの関係はCを比例定数として

$$\Delta V_{TH} = C E_B f_D Q \quad (3-3)$$

と書ける。比例定数 C の中には後方散乱電子の効果も含まれる。後方散乱係数は Al のような軽元素においては、 $2 \sim 30$ keV の範囲内で入射電子のエネルギーに依存しないことが知られている⁽⁵²⁾。この式から、照射条件（ビーム電流、照射時間、照射面積）によって決定される Q を知り、ビームエネルギー E_B を変化させたときの ΔV_{TH} を測定することにより、各 E_B に対する f_D の相対値を求めることが出来る。比例定数 C はある特定の E_B に対する f_D が与えられれば決定される。

3.3 実験方法

実験に用いた試料は図 3-1 に示す n チャネルエンハンスメント型 MOS トランジスタである。深さ方向の構造は図 3-2 に示す通りである。ゲート酸化膜は $20 \Omega \text{ cm}$ 、 P 型 $\langle 100 \rangle$ 方向 Si 基盤上に熱酸化によってつくられ、厚さは $0.085 \mu m$ である。ポリシリコンゲート ($0.43 \mu m$) および層間絶縁膜 ($0.53 \mu m$) は CVD 法によってつくられ、 $1000^\circ C$ でアニールされている。 Al 電極を蒸着した後、試料は $400^\circ C$ でアニールされている。パッシベーション SiO_2 膜 ($0.87 \mu m$) は CVD 法でつくられている。ゲート酸化膜の厚さは、エリプソメトリーにより $\pm 5\%$ の精度で測定されている。他の三つの層の厚さは、標準格子で倍率更正された SEM による断面観察により $\pm 6\%$ の精度で測定された。

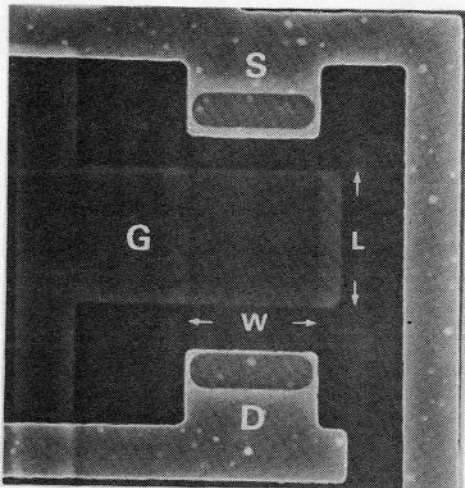


図 3-1
実験に用いた MOS トランジスタの SEM 写真。チャンネル長 (L)、チャンネル幅 (W) はともに $25 \mu m$ である。D, S, G はそれぞれドレイン、ソース、ゲートを示す。

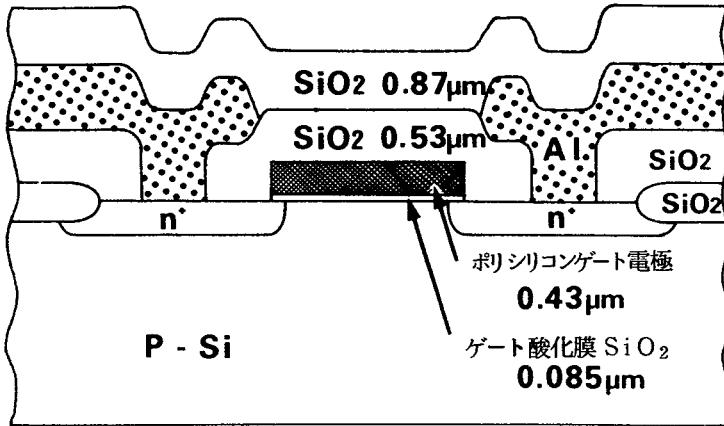


図 3-2 実験に用いたMOSトランジスタの深さ方向の構造

照射実験に用いたSEMの加速電圧は、電子銃フィラメントに接続されている精密抵抗を流れる電流をデジタルマルチメータで読み、±1%の精度で更正した。ただし、図3-4以外は、文中でも図でもビームエネルギーを公称値で表示している。更正値は公称値の1.07倍である。

実験は、ゲート電極を+4.0Vに保ち、ソース(V_S)、ドレイン(V_D)および基盤(V_{SUB})を接地した状態で行った。電子ビーム照射は図3-1に示すようなゲート電極を含む領域を走査することによって行った。ビーム電流はファラデーカップで測定し、10pAに設定した。

臨界電圧 V_{TH} の測定はSEM鏡体中にもうけたスイッチ用磁気コイルを用いてビーム電流を切った状態で行った。 V_{TH} は $V_D = 5V$ 、 $V_S = V_{SUB} = 0V$ のときに、ドレイン電流が丁度 $1 \times 10^{-6}A$ 流れるときのゲート電圧とした。

3.4 結果と検討

MOSトランジスタは5~18keVの範囲の電子ビームエネルギー E_B で照射された。照射電荷面密度 Q は 2×10^{-9} から $2 \times 10^{-3} C/cm^2$ と六桁の大きさにわたって変化させた。 E_B をパラメータとする $Q-\Delta V_{TH}$ 特性の測定結果を図3-3に示す。図から、各 E_B に対して照射量が小さい間は予期した通り ΔV_{TH} は照射電荷面密度 Q に比例していることがわかる。

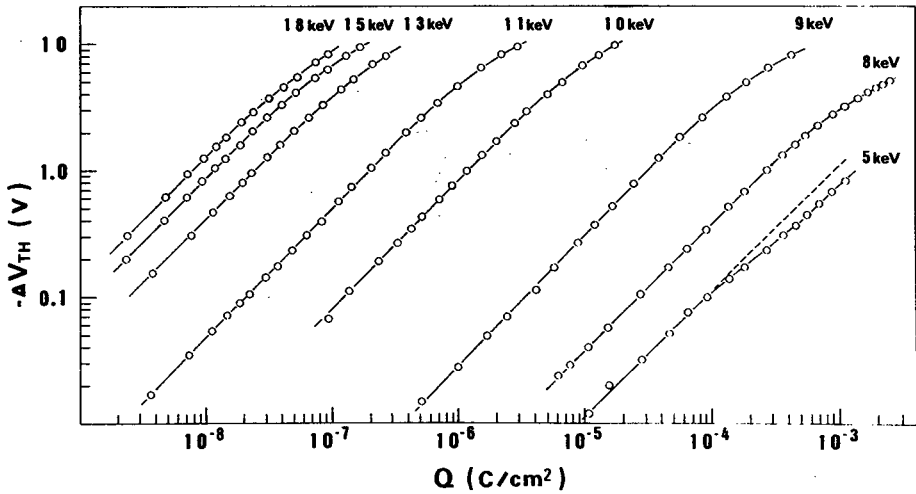


図 3-3 パッシベーション膜付MOSトランジスタの $Q - \Delta V_{TH}$ 特性

曲線の直線部から、各 E_B に対する f_D の相対値が決定できる。式(3-3)の比例定数 C を決定するためには、特定の E_B に対する f_D の値を知る必要がある。もし、入射電子のエネルギーがゲート酸化膜を完全に通過できるほど十分大きい場合、比例定数 C を決定するためにT. H. Everhart and P. H. Hoff⁽²⁶⁾が求めたビーム飛程とエネルギー吸収関数を用いることが出来る。 SiO_2 と Si の密度をそれぞれ 2.2gr/cm^3 、 2.3gr/cm^3 とすると、パッシベーション膜と層間絶縁膜およびゲート電極の合計の厚さは、 SiO_2 に換算して $1.85\ \mu m$ となる。18 keVの電子に対しては、Everhart and Hoffのビーム飛程は $2.8\ \mu m$ となり、18 keVの電子は十分にゲート酸化膜に達すると考えられる。そこで、18 keVに対する f_D をEverhart and Hoffのエネルギー吸収関数から計算し、式(3-3)に代入して C が決定される。結果を図3-4に示す。ただし、この図では試料表面からゲート酸化膜までの距離を $1.85\ \mu m$ ではなく、 $1.60\ \mu m$ にとっている。これは、この値を用いれば、 $E_B - f_D$ 曲線が18 keV以外の他の二点でもEverhart and Hoffによる計算値と実験値がよく一致するからである。

図からわかるように、Everhart and Hoffによる計算値は12.3 keVで

臨界値 E_{BC} を持つ。しかし、実験結果では E_{BC} の近傍では落ち方は比較的

急であるが、5 keV に到るまでゆっくりと裾を引いている。この $E_B - f_D$ 曲線の裾の部分の内、 E_{BC} の近傍の落ち方の急な部分はストラグリングによると考えられる。しかし、 E_{BC} から離れた低エネルギー部分はストラグリングとは考えられず電子ビーム照射によって発生したX線などの二次的効果を考えざるを得ない。いま、低エネルギー部分の f_D を電子ビームによって発生した特性X線 ($SiK\alpha$ 、 $OK\alpha$ の臨界励起エネルギーはそれぞれ 1.8 keV、0.5 keV である)⁽⁵³⁾ と考えて付録 1 に示すように概算した。結果を図に波線で示した。

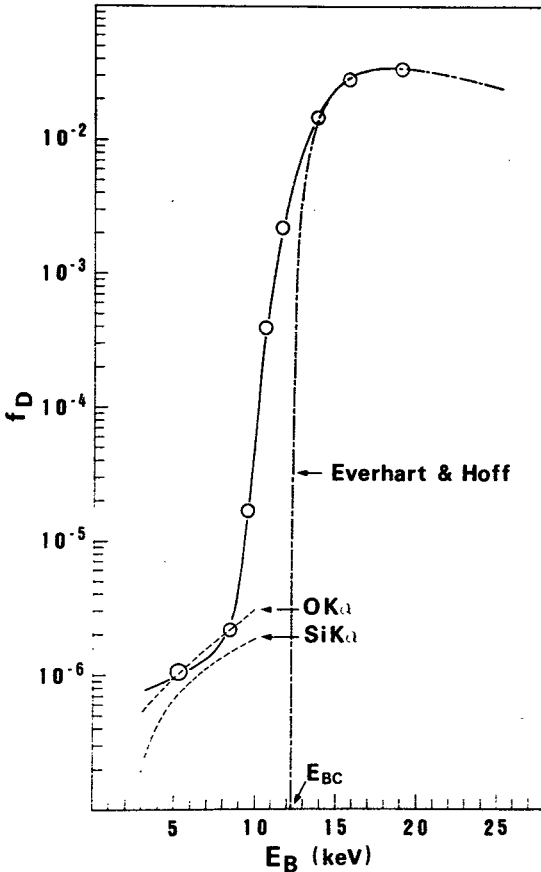


図 3-4

$E_B - f_D$ 曲線

3.5 むすび

SiO_2 膜 $1.4 \mu m$ (パッシベーション膜 $0.87 \mu m$ 、層間絶縁膜 $0.53 \mu m$)、ポリシリコンゲート電極 $0.43 \mu m$ 、ゲート酸化膜 SiO_2 $0.085 \mu m$ の n チャンネルエンハンスメント型 MOS トランジスタを用いて、5 keV ~ 18 keV の入射電子ビームエネルギーに対して、ゲート酸化膜中で吸収されるエネルギーの割合 f_D を測定した。この結果、Everhart and Hoff の飛程にさらにストラグリングを考慮しても説明できないほど深いところまで、エネルギー吸収が生じていることがわかった。この原因として、電子ビーム照射によって発生した特性 X 線などの二次的効果が考えられる。

第4章 局所電界効果の理論解析と実験^{(54),(55),(56),(57),(58)}

4.1 まえがき

本章では、まず局所電界が存在する場合の検出二次電子電流を解析する手法とその若干の例を示す(4.2)。ただし、解析の際電位分布は二次元とし、二次電子のエネルギー分布を仮定する。三つのモデルが解析される。モデルAは通常のSEM検出系である。モデルBは引き出し電界を持つ減速電界型分光器検出系である。モデルCは引き出し電界を持つ高分解能分光器検出系である。次に、モデルAとモデルBについて実験を行い(4.3)、解析結果と比較検討する(4.4)。

4.2 理論

4.2.1 解析法

二次電子の初期エネルギーを eW とする。Ta, W, Mo, Ag などの金属に対する二次電子のエネルギー分布は図4-1のように R. Kollath⁽⁵⁹⁾ によって測定されている。これによく適合する形として、二次電子のエネルギー分布 $N(W)$ を Maxwell 分布ではなく、次のものをとる。

$$N(W) = 1.5W \exp\left(2 - \sqrt{(8/3)W}\right) \quad (4-1)$$

これは図4-1に破線で示されている。

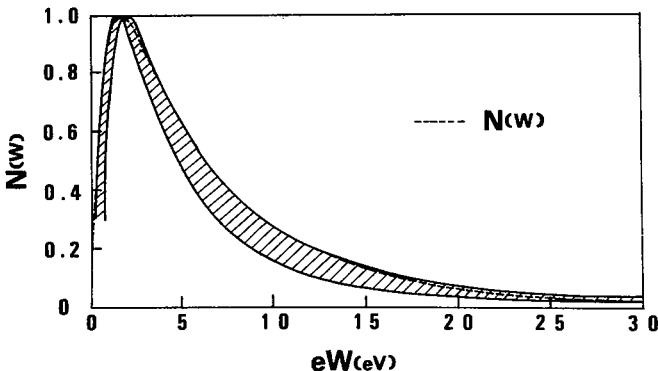


図4-1

金属からの二次電子放出のエネルギー分布⁽⁵⁹⁾

二次電子放出も電位分布と同様に二次元的放出をし、Lambert の余弦則が成立するものとする、検出器に収集される電流 I は次のように書ける。

$$I = \iint eN(W) \cos \theta \, dW d\theta \quad (4-2)$$

ただし、 θ は二次電子の出射角である。この積分は検出器に到着できる二次電子に対してなされる。二次電子の発生領域が試料の測定電極の幅に比べて十分小さいとすれば、二次電子の軌道は初期エネルギー eW と出射角 θ によって決まる。そこで、検出器に到達するか否かを $eW-\theta$ 座標系の中で表現するのが便利である。図 4-2 はそれを概念的に示したもので、斜線の中の領域の軌道が検出器に到達する。このような図をアクセプタンス図と呼ぶ。このアクセプタンス図は与えられた検出系の電子光学的特性を表わす。軌道解析はこのアクセプタンス図を計算すればよいことになる。

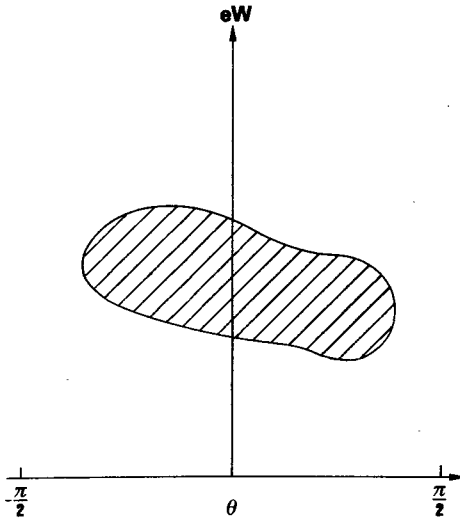


図 4-2

アクセプタンス図の説明

4.2.2 解析モデル

以下、試料表面上の電位分布と電子の運動を二次元と仮定する。図 4-3 は通常の SEM 検出系の断面図である。モデル A はそれを二次元化したも

のである。図4-4は引き出し電界を持つ平行平板減速電界型分光器検出系である。これがモデルBである。図4-5はモデルBの分光器のかわりに高分解能分光器(たとえば、同心球型静電分光器)を持つ検出系、モデルCを示す。各モデルの形状を表4-1に示す。

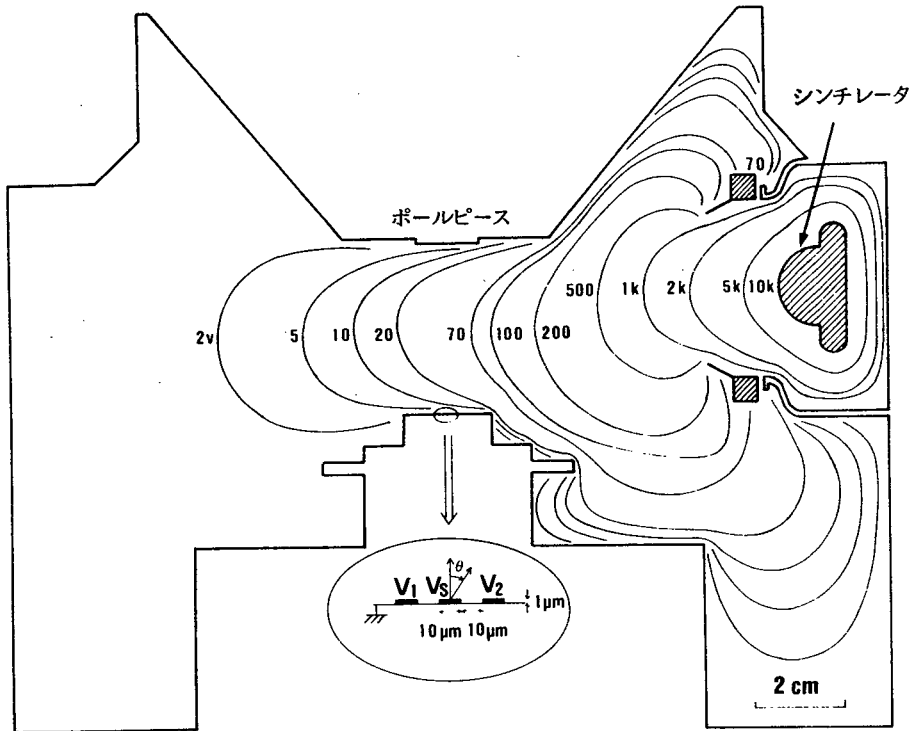


図4-3 通常のSEM検出系の断面図：モデルA

試料上の電極間の電位分布は直線的に変化し、モデルBやCの電極メッシュは十分細かくメッシュ表面は等電位であると仮定する。他の仮定は次のとおりである。

- (1) 二次電子放出源の大きさを無視する。
- (2) 対物レンズからの漏洩磁界を無視する。
- (3) 対物レンズ磁極に後方散乱電子が衝突したときに発生する二次電子の寄与を無視する。

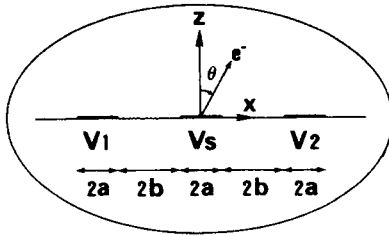
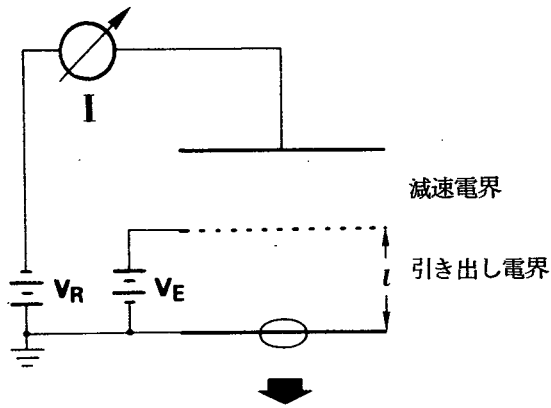


図 4-4

平行平板減速電界型分光器

検出系：モデルB

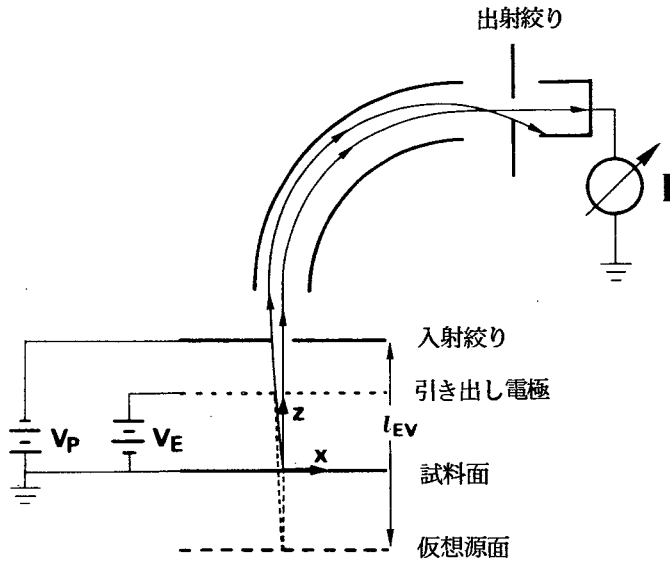


図 4-5 高分解能分光器検出系：モデルC

表 4-1 各モデルの形状

モ デ ル		A	B	C
引き出し電界 (V/mm)		4	6 2.5と6 2 5	6 2 5
引き出し電極と試料との距離 (l) (mm)		—	1.6	1.6
試料電極の寸法 (μm)	高 さ	1	0	0
	幅 ($2a$)	10	8	8
	間隔 ($2b$)	10	12	12

4. 2. 3 解析モデルA：通常のSEM検出系

差分法により計算した電位分布を図4-3に示す。ただし、試料電極の寸法が $10\mu m$ であるので、計算のさい、領域の大きさと分割メッシュ寸法を表4-2に示すように順次小さくして差分法で計算した。なお、試料電極の高さは第2段階までは0とした。これより、試料近傍での引き出し電界は約 $4V/mm$ に相当することがわかる。図4-6に測定電極電位 $V_S=5V$ 、隣接電極電位 $V_1=V_2=0V$ （以後 $(V_1, V_S, V_2)=(0, 5, 0)$ のように書く）のときの試料近傍の電位分布を示す。図より、電極前面に、最小値 $4.32V$ の電位障壁が生じていることがわかる。

表 4-2 差分法計算時の領域の大きさとメッシュ寸法

段 階	領 域 の 大 き さ	メ ッ シ ュ 寸 法
1	$200\text{ mm} \times 164\text{ mm}$	1 mm
2	$40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$	0.2 mm
3	$400\mu m \times 400\mu m$	2 μm
4	$80\mu m \times 80\mu m$	0.4 μm

二つの軌道解析例も、また図4-6に示されている。電位障壁よりも小さいエネルギーを持つ電子は試料に追い戻され、より大きいエネルギーを持つ

電子が電位障壁を通り抜けることができる。

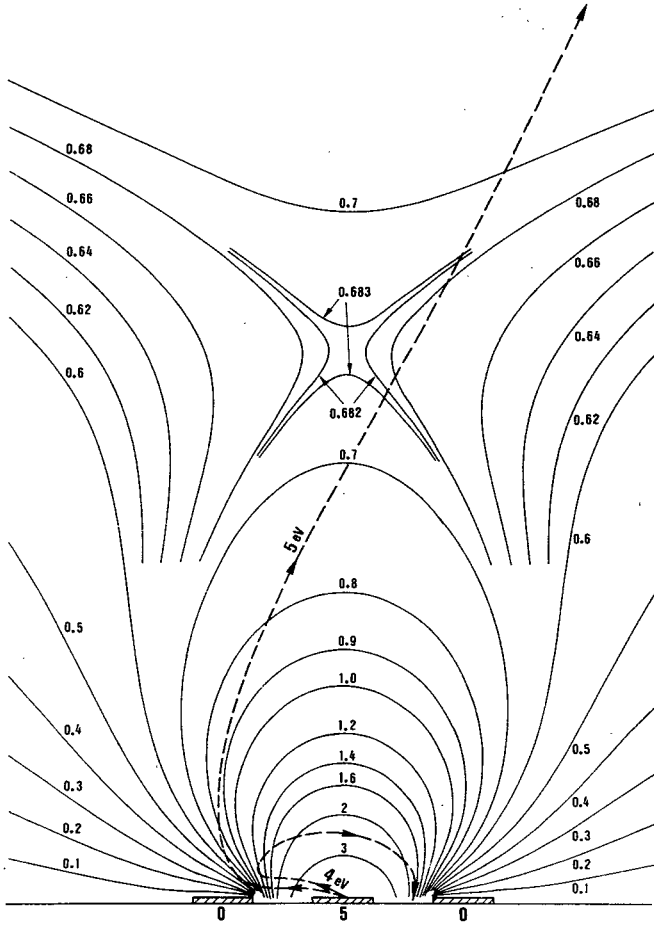


図 4-6 モデル A の試料近傍の電位分布と軌道の計算例

図 4-7 はモデル A に対するアクセプタンス図である。実線、破線、点線、一点鎖線で示されている曲線はそれぞれ $(V_b, V_s, V_2) = (0, 0, 0)$, $(0, 5, 0)$, $(5, 0, 0)$, $(5, 5, 0)$ の場合を示す。曲線で囲まれている領域内の二次電子のみ検出器に到達できる。すべての曲線で左上の領域がかけているのは、 $\theta < 0$, eW の大きい二次電子が対物レンズ磁極片に衝突してしまうことによる。 $V_s = 5V$ と $V_s = 0V$ のアクセプタンス図を比較すると、 $V_s = 5V$ のそれは電位障壁のため低エネルギー領域が欠けている。

これは第1章が定義した第一種局所電界効果に対応する。

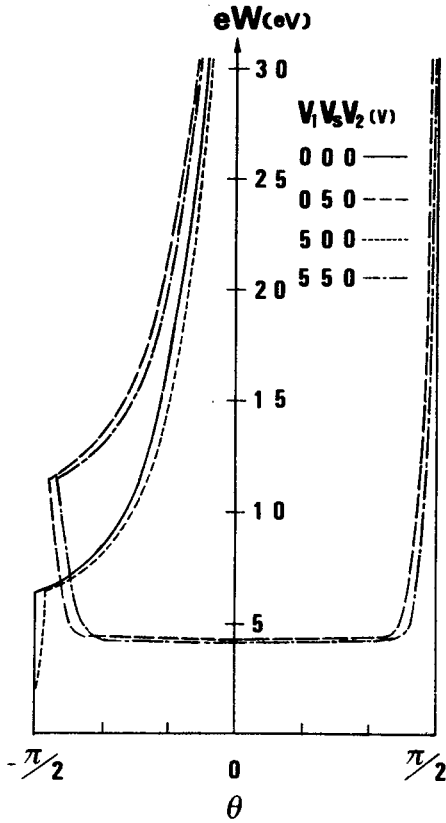


図 4-7

モデルAのアクセプタンス図

$V_1 \neq 0V$ のアクセプタンス図は $V_1 = 0V$ のそれとは若干異なっている。この差が第二種局所電界効果を意味する。 $V_1 = 5V$ のアクセプタンス図は $V_1 = 0V$ のそれに対して右側へ移動している。これは検出器に遠い方の隣接電極 V_1 に電位を印加することによって、二次電子の軌道を左側（検出器に対して遠い側）へ偏向させ、対物レンズ磁極片に衝突する二次電子の数を増加させるためである。この結果、検出二次電子電流は若干減少する。 $(V_1, V_S, V_2) = (5, 5, 0)$ のアクセプタンス図の水平となっている部分のエネルギーは $(0, 5, 0)$ のそれよりも低くなっている。これは、電位障壁が若干小さくなったためである。この結果、検出二次電子電流は少し増加する。

図 4-8 は図 4-7 の縦軸 eW の代りに $e(W - V_S)$ をとったものである。

これより、エネルギーの高い領域では電極電位への依存性が少なくなっていることがわかる。この種の電位コントラストは“trajectory-contrast”と呼ばれる⁽⁶⁰⁾。図4-1に示したように金属に対する二次電子のエネルギー分布は1.3~2.5 eVに最大値をとるため、第一種局所電界効果が主にこの二次電子検出系における電位コントラストに寄与するものと考えられる。

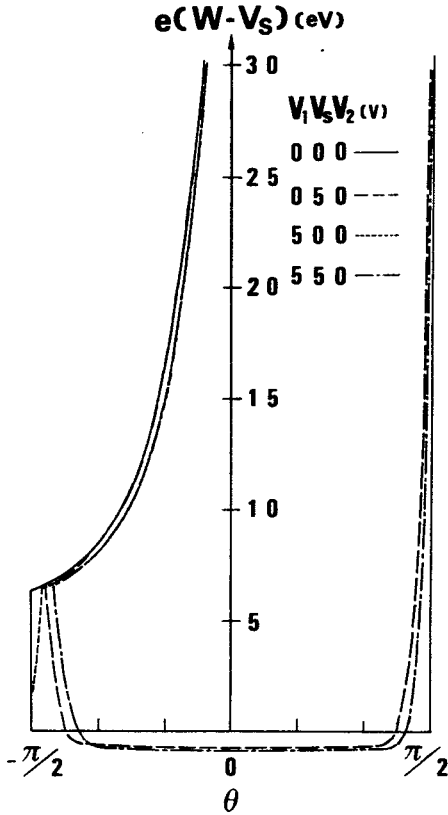


図4-8

縦軸を $e(W-V_S)$ にとつたモデルAのアクセプタンス図

これらのアクセプタンス図と式(4-2)を使って計算した検出二次電子電流を図4-9に示す。横軸が測定電極電位 V_S 、縦軸が検出二次電子電流である。 $V_1 \neq 0V$ あるいは $V_2 \neq 0V$ の時の検出二次電子電流が $V_1=V_2=0V$ の時のそれと異なるのは、第二種局所電界効果による。図から、 $(V_1, V_S, V_2) = (0, V_S, 5)$ に対する検出二次電子電流(以後、 $I(0, V_S,$

5)と書く)は $I(5, V_S, 0)$ より大きく、また $I(5, V_S, 0)$ は $I(0, V_S, 0)$ より大きいことがわかる。

試料電極間の電位分布が電極のところで不連続に変化する(階段近似)場合についても検出二次電子電流の計算を行ったが、結果は上記の場合とほとんど同じであった。

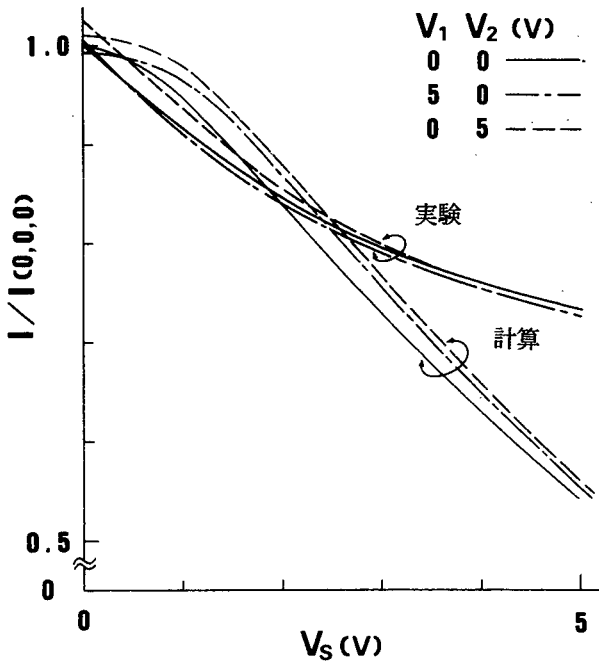


図 4-9

計算と実験の検出二次電子電流と測定電極電位 V_S の関係

4.2.4 解析モデルB：平行平板減速電界型分光器検出系

モデルBやCでは試料電極の高さを零とした。そうすると、試料表面上の電位分布は次式のように解析的に与えられる⁽⁶¹⁾。

$$\Phi(X, Z) = \frac{V_E}{L} Z + V_S f(X, Z) + V_1 f\left(X + 1 + 2\frac{b}{a}, Z\right) + V_2 f\left(X - 1 - 2\frac{b}{a}, Z\right)$$

$$f(X, Z) = \frac{Z}{2\pi} \frac{b}{a} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{(1+M^2)(1+N^2)}{(1+P^2)(1+Q^2)} + P \tan^{-1} P + Q \tan^{-1} Q + \right. \\ \left. M \tan^{-1} M + N \tan^{-1} N \right] \quad (4-3)$$

$$M = \frac{X+1}{Z}, \quad N = \frac{X-1}{Z}, \quad P = \frac{X+1+2b/a}{Z}, \quad Q = \frac{X-1-2b/a}{Z}$$

$$X = x/a, \quad Z = z/a, \quad L = \ell/a$$

ただし、試料電極間の電位分布は直線的に変化すると仮定した。軌道方程式は次式で与えられる。

$$X'' = \frac{1+X'^2}{2\phi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial X} - X' \frac{\partial \phi}{\partial Z} \right) \quad (4-4)$$

$$\phi = \Phi + W - V_S$$

ただし、 eW は2次電子の初期エネルギーであり、 $X' = dX/dZ$ である。

初期エネルギー eW を持ち、試料電極電位 V_S から出発した二次電子は図4-4に示す引き出し電極すなわち均一減速電界への入射面では $e(V_E + W - V_S)$ のエネルギーを持つ。この面での勾配を X'_E とする。均一減速電界に逆ってコレクタに到達するには、 z 方向の運動エネルギー成分が $e(V_E - V_R)$ より大でなければならない。すなわち

$$\frac{1}{1+X'^2_E} (V_E + W - V_S) \geq V_E - V_R \quad (4-5)$$

ここで、 X'_E は軌道解析により求める。

図4-10と4-11はそれぞれ $V_E = 100V$ と $V_E = 1000V$ の場合の電位分布と軌道例を示す。破線は $(V_L, V_S, V_2) = (0, 0, 0)$ の場合の軌道を、実線は $(V_L, V_S, V_2) = (0, 5, 0)$ あるいは $(0, 0, 5)$ の場合の軌道を示す。図4-10では、引き出し電界が $6.25V/mm$ と小さいため電位障壁を生じているが、図4-11では引き出し電界が $6.25V/mm$ と大きいため電位障壁は生じていない。しかしながら、図4-11から強い引き出し電界が存在する場合でも局所電界が二次電子の軌道に影響を及ぼすことがわかる。

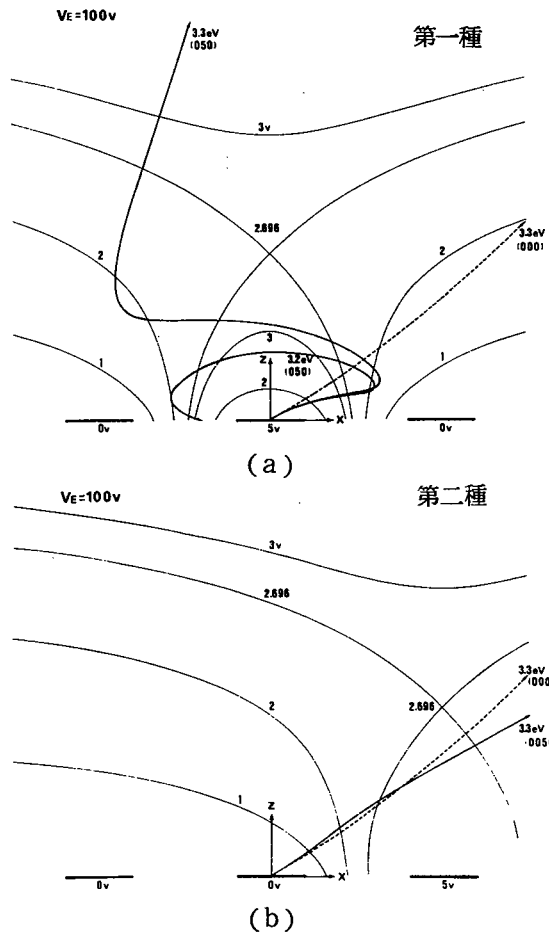


図 4-10 モデルBの試料近傍の電位分布と軌道の計算例 ($V_E = 100\text{V}$)
 (a) $(V_1, V_S, V_2) = (0, 5, 0)$
 (b) $(V_1, V_S, V_2) = (0, 0, 5)$

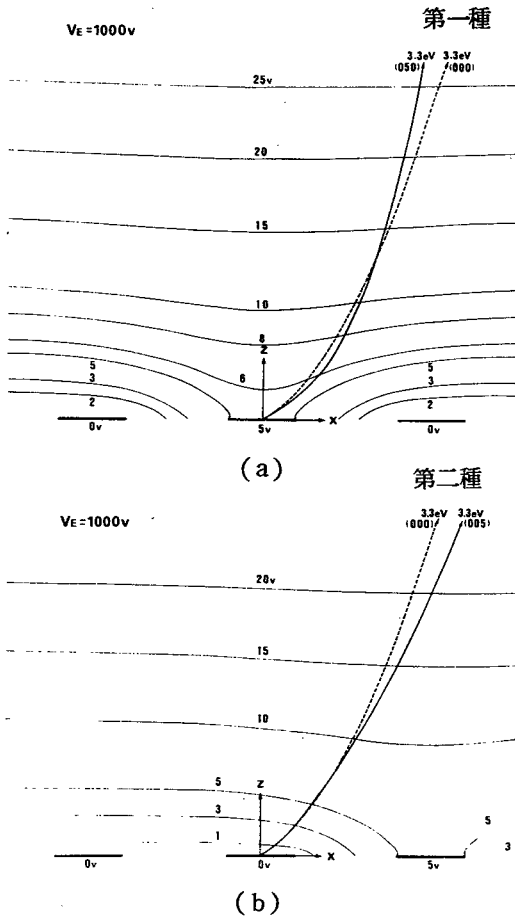


図 4-1 1

モデルBの試料近傍の電位分布と軌道の計算例

(a) $(V_1, V_S, V_2) = (0, 5, 0)$

(b) $(V_1, V_S, V_2) = (0, 0, 5)$

図 4-1 2 はアクセプタンス図で、(a)は $(V_1, V_S, V_2) = (0, 5, 0)$ と $(0, 0, 0)$ 時を、(b)は $(V_1, V_S, V_2) = (0, 0, 5)$ と $(0, 0, 0)$ 時を示す。破線と実線の曲線はそれぞれ局所電界がない場合と存在する場合に対応する。曲線より上のエネルギーを持つ二次電子のみ検出器に到達できる。図 4-1 2(a)では、実線の曲線は破線のそれよりも下に位置している。これは、図 4-1 1(a)に示されているように二次電子が局所電界により集束作用を受けているためである。図 4-1 2(b)では、実線の曲線は二次電子の出射角 θ に関して非対称になっている。これは図 4-1 1(b)のように二次電子の軌道が局所電界により偏向されるためである。

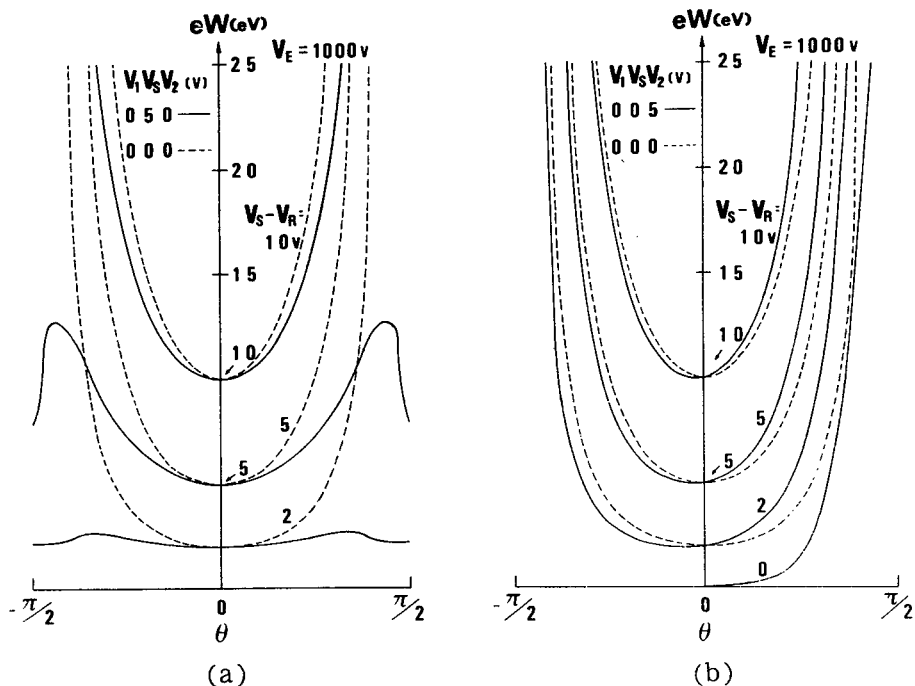


図 4-12 モデルBのアクセプタンス図 ($V_E = 1000V$)
 (a) $(V_1, V_S, V_2) = (0, 5, 0)$ と $(0, 0, 0)$
 (b) $(V_1, V_S, V_2) = (0, 0, 5)$ と $(0, 0, 0)$

図 4-13 に $V_I = 0V$ 時の検出二次電子電流を $(V_S - V_R)$ の関数として示す。ただし、最大検出電流 I_0 で規格化している。破線と一点鎖線がそれぞれ $V_2 = 0V$ と $5V$ 時の計算した検出電流である。もし局所電界効果がなければ、各 V_S に対する曲線は互いに重なるべきものであるが、局所電界効果により分離している。破線の曲線間の分離は第一種局所電界効果を示している。同じ V_S に対する破線の曲線と一点鎖線のそれとの差が第二種局所電界効果を示している。この図より、引き出し電圧を $100V$ から $1000V$ へ十倍大きくしても、第二種局所電界効果はそれほど改善されないことがわかる。

図 4-14 は $V_E = 1000V$, $V_R = 0V$ 時の第二種局所電界効果を b/a ($2a$: 試料電極幅、 $2b$: 試料電極間隔) の関数として示している。た

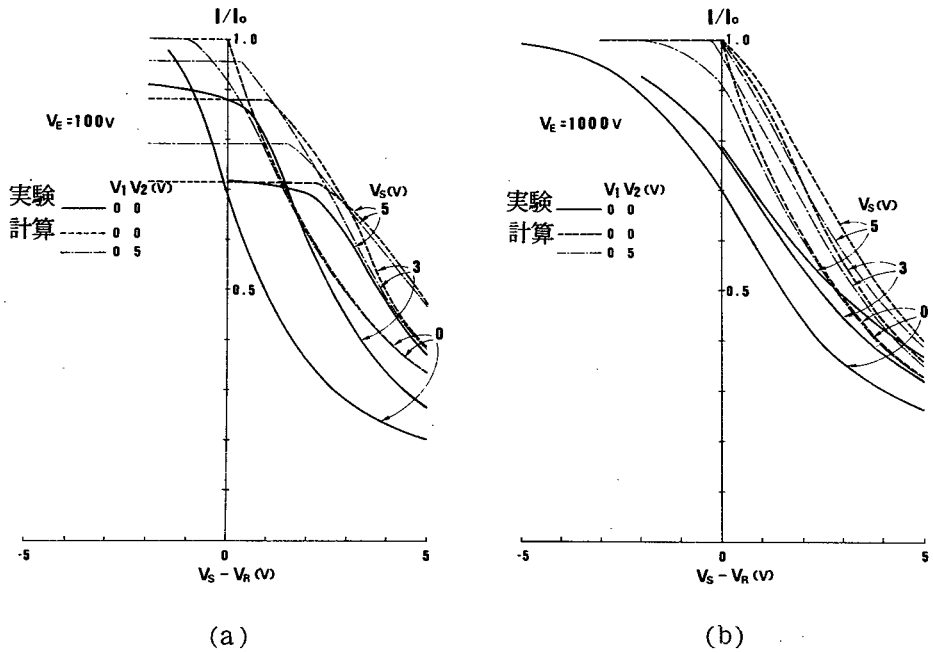


図 4-13 検出二次電子電流 I と $(V_S - V_R)$ の関係の

計算結果と実験結果

(a) $V_E = 100\text{V}$

(a) $V_E = 1000\text{V}$

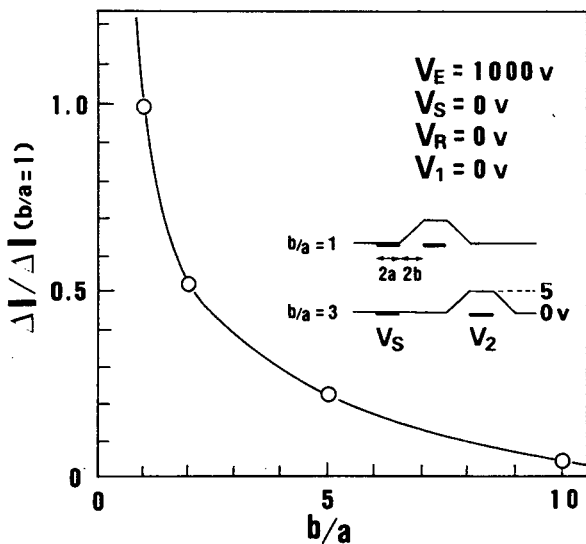


図 4-14

第二種局所電界効果と
電極間隔の関係

だし、 ΔI は $I(0, 0, 0)$ と $I(0, 0, 5)$ の差を示す。これより、試料電極間隔を二倍にすると、第二種局所電界効果は約半分になることがわかる。

以上の解析は二次元の系で行った。電位分布が二次元のまま、電子の運動を三次元と考えた場合、検出二次電子電流は付録 2 に示されるように計算できる。この場合の結果は上記の結果と本質的には変化はないことが図 A-3, 表 4-4, 表 4-5 からわかる。

4.2.5 解析モデル C : 高分解能分光器検出系

ここでは、高分解能分光器として図 4-5 のような同心球型静電分光器を考えるが、得られる結論は他の高分解能分光器に対してもあてはまる。図 4-5 の電圧 V_p はあるエネルギーの二次電子が常に分光器の中心軌道を通り検出器に達するようにするために用いられる。引き出し電極や入射絞りのレンズ効果は無視する。また、試料上の電位分布は二次元とし、電子は三次元運動をするものとする。

引き出し電界によって加速される二次電子は、図 4-5 に示す仮想源から出て来るものと考えられる。局所電界が存在する場合でも、二次電子の初期エネルギーが 30 eV より小さい時は同様に考えられる。この仮想源と共役な位置、すなわち、像面に射出絞りを置く。その大きさは、入射絞りを通過し中心軌道を描くあるエネルギーの二次電子が過不足なく絞りを通過するように設定する。このとき、検出器に流入する電流は、入射絞りを通過する電流に等しい。入射絞りを通過する条件は

$$x_E'^2 + y_E'^2 \leq h^2 \quad (4-6)$$

となる。ただし、 y 座標は x, z 軸に垂直な方向にとる。 h は入射絞りの大きさと図 4-5 に示す距離 l_{EV} によって決まる。高分解能のためにはこの h が小さいことが必要である。したがって、出射角 θ の小さい二次電子の軌道のみが、式 (4-6) を満たす。出射角 θ が小さいとき、 x_E' は次のように書ける。

$$x_E' = \left(\frac{W}{W+V_E} \right)^{1/2} (p + q\theta), \quad \theta \ll 1 \quad (4-7)$$

ただし、 p と q は W 、 V_E 及び形状の関数である。

図4-15にモデルBと同じ試料電極構造に対する p と q を示す。 $p=0$ と $q=1$ の二つの曲線は $(V_1, V_S, V_2) = (0, 0, 0)$ の場合、すなわち、局所電界がない場合に対応する。

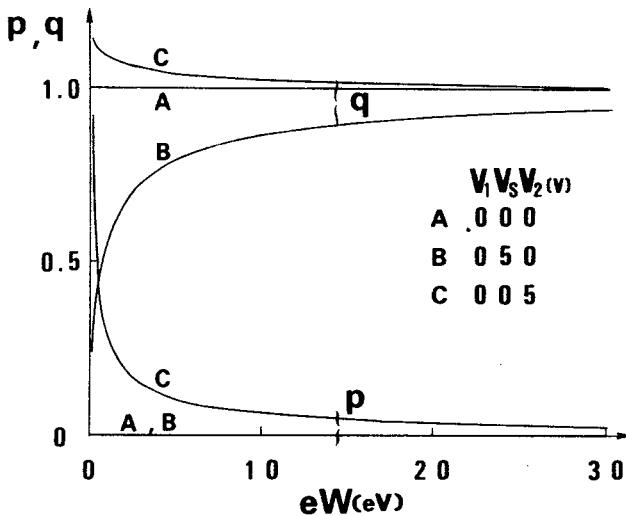


図4-15 モデルCのパラメータ p と q

ただし、電極構造はモデルBと同じ

$p \approx 0$ は二次電子の偏向を示す。 $q < 1$ は二次電子に対して集束作用、 $q > 1$ は発散作用を及ぼすことを示す。第一種局所電界効果は曲線AとBの差に対応する。第二種局所電界効果は曲線AとCの差に対応する。

試料電極は y 方向に無限に長いので、局所電界によって y_E' は変化しない。さらに、 $\theta \ll 1$ のとき $\cos \theta$ はほぼ1に等しくなるため、検出電流は二次電子の偏向を示すパラメータ p にあまり依存しない。したがって、局所電界の存在する場合の電流 I は

$$I/I(0, 0, 0) \simeq 1/q, \theta \ll 1 \quad (4-8)$$

となる。

図4-15, 式(4-8)より、局所電界効果は高分解能検出系の場合でさえ、避けえないことがわかる。

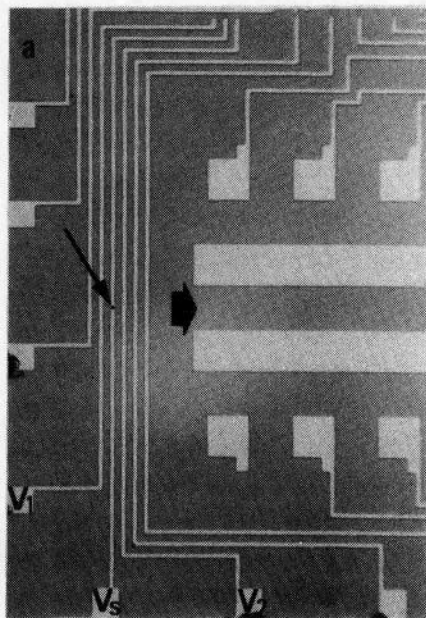
4.3 実験

4.3.1 通常のSEM検出系

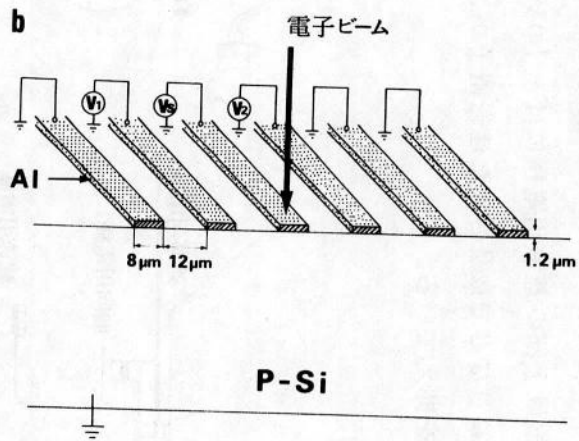
図4-16に実験に用いた試料の顕微鏡写真と構造を示す。A θ 電極はp-Si基盤上に直接蒸着されており、高さ1.2 μm , 幅8 μm で電極間隔は12 μm である。V_Sは測定電極電圧で、V₁とV₂は隣接電極電圧である。他の電極はすべて接地されている。実験は加速電圧25kV、ビーム電流1 $\times 10^{-9}$ Aで行なった。また、作動距離は39mmであった。

検出二次電子電流の測定の際、測定電極に0~5V、繰り返し周波数0.01Hzの鋸歯状波電圧を印加し、検出二次電子信号をXYレコーダの縦軸に、横軸には鋸歯状波信号を入力して測定した。第二種局所電界効果を測定する際には、さらに隣接電極V₁あるいはV₂に0~5V、繰り返し周波数1.5Hzの矩形波電圧を印加した。

実験結果を計算結果とともに図4-9に示す。実験結果と計算結果を比較すると、V_S=0V~5Vの変化に対して計算結果では信号変化は最大検出電流I₀の約45%であるが、実験結果では約25%と小さくなっている。実験では、後方散乱電子などによる大きなバックグラウンドが含まれていたため、直流成分が増加し信号変化が小さくなったものと推定される。しかし、4.4検討で述べるように電圧測定の際に生じる誤差電圧(偽電圧)によって局所電界効果を評価すると、実験でも計算でも局所電界効果は同程度の大きさである。



(a)



(b)

図 4-16 実験に用いた試料

(a) 光学顕微鏡写真。矢印の方向は検出器の方向を示す。

(b) 電極の構造

4.3.2 平行平板減速電界型分光器検出系

分光器の構造を図4-17に示す。分光器は二次電子引き出し用電極、減速用電極および偏向用電極から構成されている。上部の $-5V$ を印加しているメッシュは、試料からの反射電子が上蓋にあたって出す二次電子を追い戻すためである。分光器最上部の遮蔽用電極には $+10V$ の電圧が印加されており、対物レンズ絞りなどで散乱された迷送電子が、分光器を経ないで検出器に達する効果を抑えている。

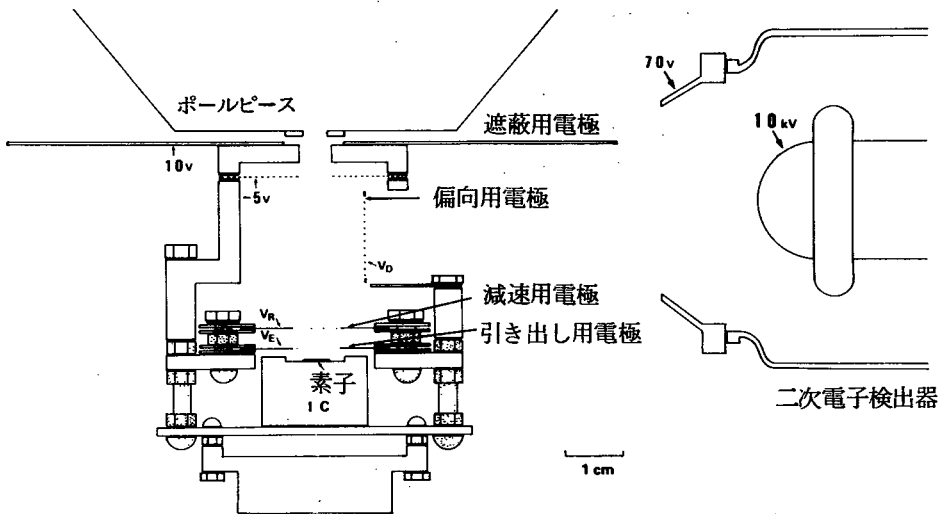


図4-17 減速電界型分光器の構造

分光器上部の $-5V$ を印加するメッシュと偏向用電極のメッシュは 0.25 mm の銅線からなる 1.2 mm 間隔のものである。引き出し電極と減速用電極は隣青銅板をエッチングすることにより作られた $1000\text{ 孔}/\text{cm}^2$ 、光学的透過率約 50% のメッシュである。分光器全体での二次電子透過率は、分光器を付けない時と付けた時の検出二次電子電流の比として、 $V_E = 1000V$, $V_R = 0V$, $V_D = 100V$ の時、約 14% となった。これは分光器を付けることにより S/N 比が約 1 桁小さくなることを意味する。

最初に分光器の特性を調べた。試料は $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ の銅板である。実験は、電子ビームを銅板の中央に点照射することによって行った。なお、本節の実験はすべて加速電圧 25 kV 、ビーム電流 $8 \times 10^{-9}\text{ A}$ で行った。

図 4-18 に検出二次電子電流 I と偏向電圧 V_D との関係を示す。ただし、 $V_E = 1000\text{ V}$ 、 $V_R = 0\text{ V}$ の時である。この図から検出電流は約 50 V 近傍ではほぼ飽和することがわかった。そこで、以後の実験は、検出電流が十分飽和すると考えられる $V_D = 100\text{ V}$ で行った。

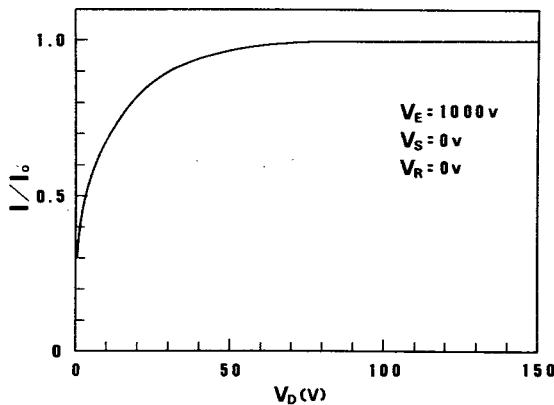


図 4-18

検出二次電子電流 I と偏向電圧 V_D の関係

図 4-19 に $V_E = 1000\text{ V}$ 時の検出二次電子電流 I と減速用電極電圧 V_R の関係を示す。この図から、検出電流には、たとえば $V_R = -50\text{ V}$ のときに約 30% のバックグラウンド電流が含まれることがわかる。そこで、図 4-19 に示す一点鎖線でバックグラウンド電流を近似する。図 4-20 の検出電流では、このバックグラウンド電流が差し引かれている。図 4-20 は (a) $V_E = 100\text{ V}$ 、(b) $V_E = 1000\text{ V}$ について検出二次電子電流 I と $(V_R - V_S)$ の関係を $V_S = 0, 1, \dots, 5\text{ V}$ の六個の値に対して示したものである。図から、予期したように V_S の異なった曲線がお互いにはほぼ重なっていることがわかる。また、測定した曲線が、本来 $V_S - V_R = 0\text{ V}$ に最大値を取るべきものが、 $V_S - V_R < 0\text{ V}$ に最大値を取っている。これは、減速用電極と引き出し用電極に用いられているメッシュのレンズ効果によ

るものと思われる。

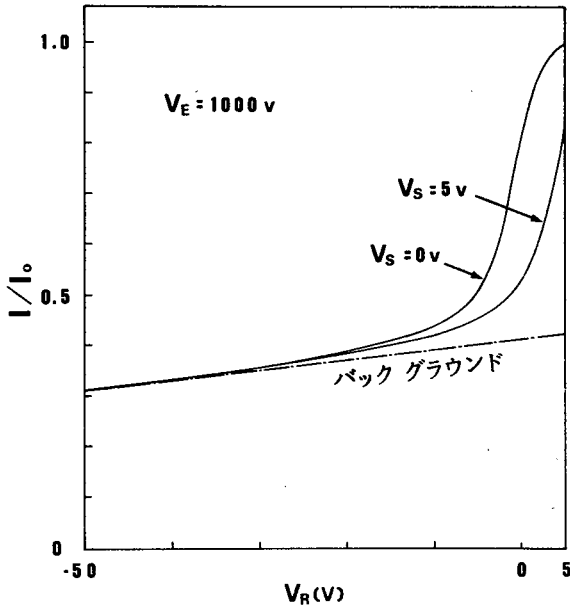


図 4-19

検出二次電子電流と減速用
電極電圧 V_R の関係

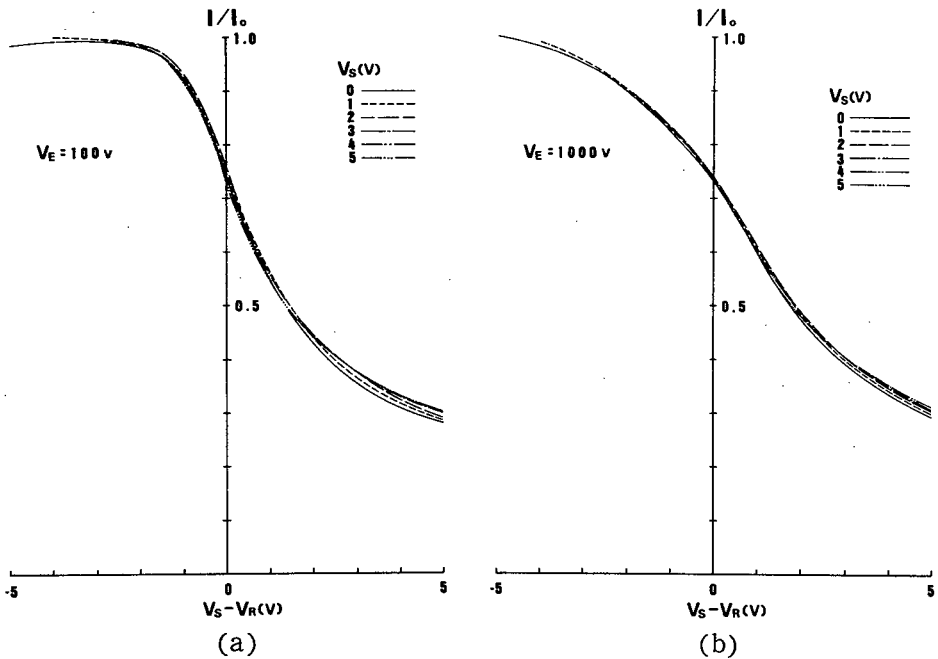


図 4-20 測定電極電圧 V_S を 0~5V まで変化させた場合の検出二次電子電流 I と $(V_S - V_R)$ の関係 (a) $V_E = 100V$ (b) $V_E = 1000V$

次に局所電界効果を 4.3.1 節で用いたのと同じ寸法の試料を用いて調べた。まず、第一種局所電界効果について測定した。図 4-13 に $V_1=V_2=0$ V 時の $V_S=0, 3$ と 5 V の三個の値に対する検出二次電子電流と $(V_S - V_R)$ の関係の測定結果を実線で示す。この図から、先ほど述べた減速用電極と引き出し用電極のレンズ効果により、実験結果は計算結果と比べて図上左側 ($(V_S - V_R)$ の負の方向) へずれてはいるが、電位障壁により検出電流 I の欠ける大きさ (図 4-13 (a)) や、第一種局所電界効果により生じた同じ検出電流 I に対する $(V_S - V_R)$ の差の引き出し電圧 V_E に対する関係 (4.4 検討で評価する) については、比較的良好に一致していることがわかる。

次に第二種局所電界効果について測定した。図 4-21 に $V_S=0$ V 時の $V_R=0$ V と -3 V の場合の検出二次電子電流 I と引き出し電極電圧 V_E の関係の測定結果を示す。図の実線 ($V_2=0$ V) と破線 ($V_2=5$ V) の差が第二種局所電界効果に対応する。この図から、二次電子引き出し電極に印加

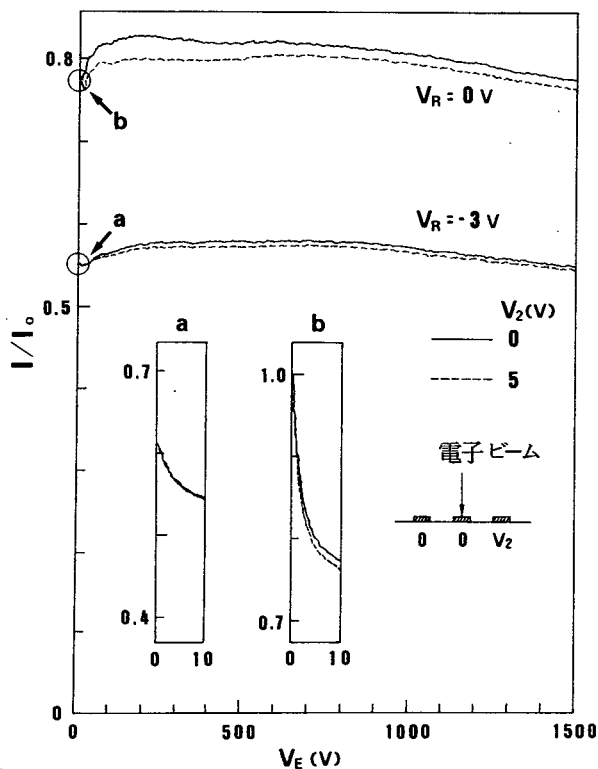


図 4-21
検出二次電子電流と引き出し電極電圧 V_E の関係

する電圧 V_E を相当大きくしても第二種局所電界効果はさほど改善されないことがわかる。また、 $V_E = 100V$ の結果と $V_E = 1000V$ あるいは $10000V$ のそれとを比較すると、 V_E を大きくしても必ずしも第二種局所電界効果は減少しないことがわかる。ちなみに、図 4-3 の分光器を用いない場合の引き出し電界は 4.2.3 節に述べたように $4V/mm$ である。

図 4-22 (a) ($V_E = 100V$) と 4-23 (a) ($V_E = 1000V$) に V_2 電極電圧が $0 \sim 5V$, 繰り返し周波数 $1.5Hz$ の矩形波電圧を印加したときの二次電子電流 I と減速用電極電圧 V_R の関係を示す。 $V_2 = 0V$ と $5V$ 時の検出電流 I の差 ΔI が第二種局所電界効果に相当する。図 4-22 (b) ($V_E = 100V$) と 4-23 (b) ($V_E = 1000V$) はそれぞれ図 4-22 (a)、4-23 (a) の動作点 a から d での検出二次電子電流 I と隣接電極電圧 V_2 との関係を示す。ただし、 V_S をパラメータとしている。この図より、 V_2 による検出電流の変化 ΔI は V_2 の大きさにほぼ比例することがわかる。

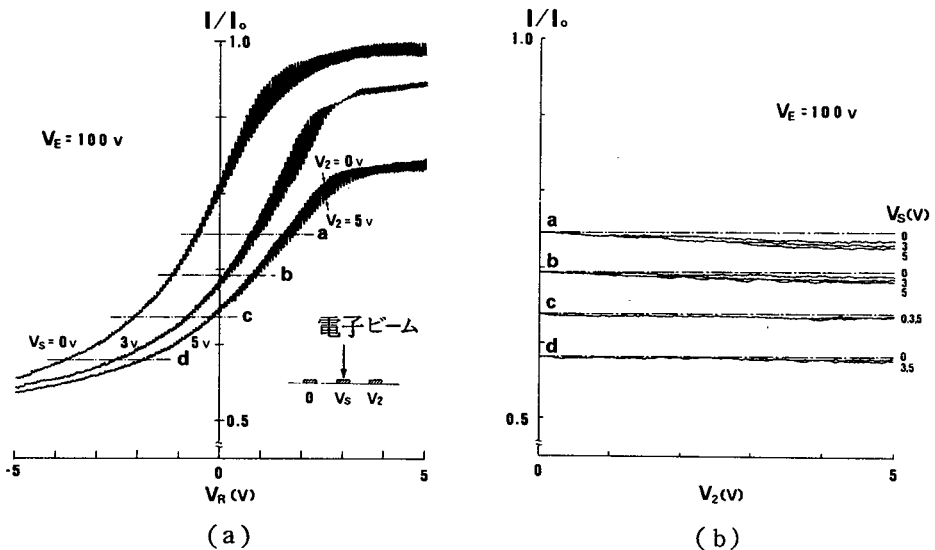


図 4-22 隣接電極電圧 V_2 の変動が検出二次電子電流に与える影響 ($V_E = 100V$)

(a) V_R との関係

(b) V_2 との関係

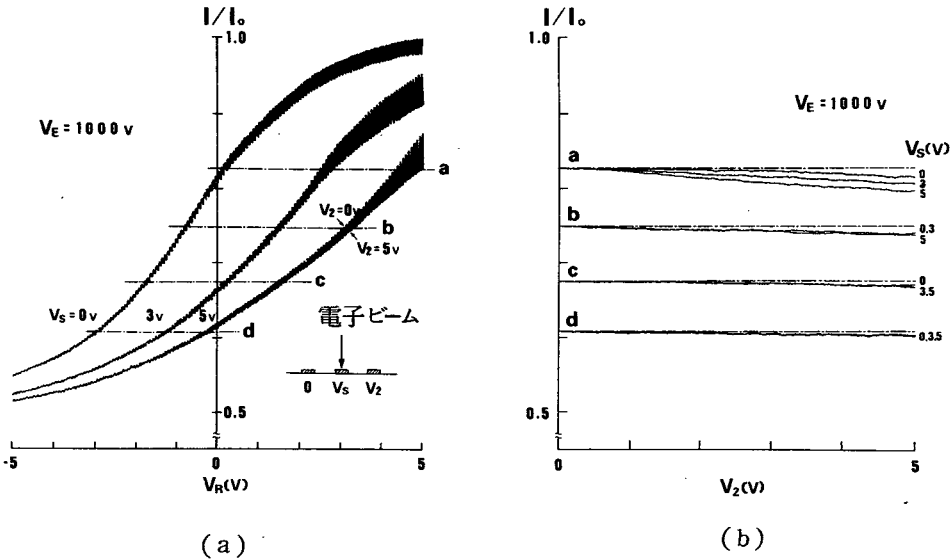


図 4-23 隣接電極電圧 V_2 の変動が検出二次電子電流に与える影響 ($V_E = 1000$ V)

(a) V_R との関係

(b) V_2 との関係

4.4 検 討

ここまで、局所電界が存在する場合の検出二次電子電流を理論的、実験的に調べて来た。そこで、次に局所電界が検出電流に及ぼす影響が定量的な電圧測定法において、どの程度の誤差を生じるかをモデル A と B について見積ってみよう。

図 4-24 (a) は図 4-9 を図式的に描いたもので、実線が局所電界効果がない場合で、破線がある場合である。電位コントラストの較正曲線を用いて測定電極電圧を知る⁽¹⁸⁾ 際には、測定電極電圧は実線から読むことになる。したがって、局所電界が存在すれば実線と破線の差 δV_S だけの誤差を生じる。これを偽電圧と名付ける。表 4-3 にモデル A に対して図 4-9 から読んだ計算と実験に対する偽電圧 δV_S を示す。ただし、 $V_1 = 0$ V, $V_2 = 5$ V の場合

の結果からである。これより、計算では 0.2~0.4 V、実験では 0~0.3 V の偽電圧 δV_S を生じることがわかる。

表 4-3 モデル A の第二種局所電界効果による偽電圧 δV_S

ただし、 $(V_1, V_S, V_2) = (0, V_S, 5)$ 時である。

測定電極電圧 V_S (V)	実験値 (V)	計算値 (V)
1	0.3	0.38
2	0.2	0.35
3	~0.1	0.30
4	<0.1*	0.29
5	<0.1*	0.21

* 実験誤差、読み取り誤差は約 0.1 V である。

モデル B においては、フィードバックループを用いて検出電流を一定に保つように V_R 電極電圧を変化させる。この V_R の変化から測定電極電圧の変化を知ることがよく行なわれる。これは線形化と呼ばれている⁽³⁰⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。

この際

$$\Delta V_R = \Delta V_S \quad (4-9)$$

が成立していると仮定される。しかし、これは実際には以下に見るように成立しない。図 4-24(b) は図 4-13 を図式的に描いたものである。曲線 A, B, C はそれぞれ $(V_1, V_S, V_2) = (0, 0, 0), (0, V_S, 0), (0, 0, V_2)$ に対応する。横軸は $(V_S - V_R)$ であるから線形化関係が成立していれば、これらの曲線は一致するはずである。曲線 A (実線) と曲線 B (破線) の差が第一種局所電界効果によるものである。そこで、図 4-24(b) に示すように同じ検出電流 I に対する $(V_S - V_R)$ の差 $\Delta(V_S - V_R)$ を線形化誤差電圧 ΔV_{lin} と名付ける。表 4-4 に図 4-13 から読んだ線形化誤差電圧 ΔV_{lin} の計算値と実験値を示す。ただし、 $I/I_0 = 0.5$ の時である。この表から、計

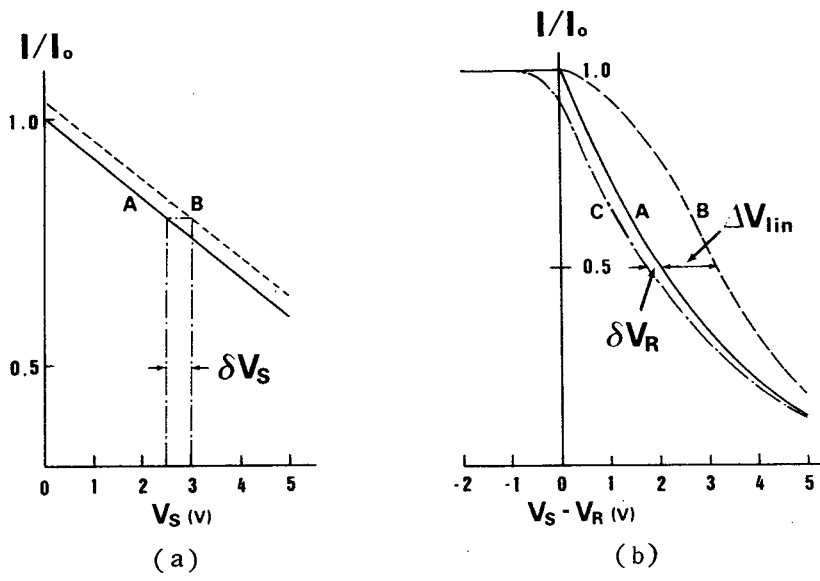


図 4-24 偽電圧 δV_S と線形化誤差電圧 ΔV_{lin} の定義

- (a) 曲線 A, B はそれぞれ第二種局所電界効果がない場合とある場合に対応する。
- (b) 曲線 A, B, C はそれぞれ $(V_L, V_S, V_2) = (0, 0, 0)$, $(0, V_S, 0)$, $(0, 0, V_2)$ に対応する。

算と実験ともに線形化誤差電圧 ΔV_{lin} は 1~3 V になり、引き出し電圧を 100 V から 1000 V へ十倍大きくしても、約半分しか、改善されないことがわかる。ただし、このような第一種局所電界効果は試料電極電位と検出電流の対応関係を予め測定しておくことにより、モデル A の場合と同様にソフトウェア的に較正することは可能である。

表 4-4 モデル B の第一種局所電界効果による線形化誤差電圧 ΔV_{lin} ただし、 $I/I_0 = 0.5$ 時の $(V_L, V_S, V_2) = (0, 0, 0)$ と $(0, 5, 0)$ の曲線から読み取った。

引き出し電極電圧 V_E (V)	実験値 (V)	計算値 (V)	
		二次元	三次元
100	2.9	1.9	—
1000	1.4	1.1	0.9

図 4-24 (b) の曲線 A (実線) と曲線 C (一点鎖線) の差 δV_R は、第一種局所電界効果の存在により、そのまま偽電圧 δV_S に等しくならない。 δV_R は V_R に関する変動分であるので、これを V_S に関する変動分に換算し直すと、偽電圧は

$$\delta V_S = \frac{\Delta V_S}{\Delta V_R} \delta V_R = \frac{\Delta V_S}{\Delta V_S - \Delta V_{lin}} \delta V_R \quad (4-10)$$

となる。表 4-5 に計算 (図 4-13) と実験 (図 4-22 (a) と 4-23 (a)) に対する偽電圧 δV_S を示す。ただし、計算結果は $I/I_0=0.5$ 、実験結果は c 点で読んだ。この表から、引き出し電圧の大きさ V_E にかかわらず、0.1~0.4V の偽電圧 δV_S を生じることがわかる。これは、モデル A の偽電圧 δV_S と同程度である。

表 4-5 モデル B の第二種局所電界効果による偽電圧 δV_S

ただし、 $I/I_0=0.5$, $(V_1, V_S, V_2)=(0, V_S, 5)$ 時である。

引き出し電極電圧 V_E (V)	実験値 (V)	計算値 (V)	
		二次元	三次元
100	0.3~0.4	0.1~0.2	—
1000	0.2~0.4	0.15~0.4	0.2

次に、測定電極の寸法がさらに小さくなった場合、局所電界効果はどのようになるのであろうかを考えて見よう。電極寸法を小さくすると、電極間の電界は強くなるが、それによる電界の乱れた領域も小さくなる。その結果、電子が局所電界効果を受ける時間は短くなる。したがって、局所電界効果は電極寸法に強くは依存しないものと推定される。そこで、モデル B についてさらに考えて見よう。式 (4-3) において、 $V_E/L = aV_E/\ell$ と b/a が一定であるならば、電位 Φ も一定となる。軌道方程式 (4-4) において、 $(W-V_S)$ が一定であるならば、軌道方程式は不変である。今、二次電子のエネルギー分布 $N(W)$ は試料電極電位に関係なく、いつも同じであるとしているから、 $V_S, V_E/L = aV_E/\ell, b/a$ が一定である系は同じ軌道を描くこ

とになる。したがって、たとえば電極幅 $8\ \mu\text{m}$ ($2a = 8\ \mu\text{m}$)、電極間隔 ($2b = 12\ \mu\text{m}$)、 $V_E = 100\ \text{V}$ の結果は、電極幅 $0.8\ \mu\text{m}$ 、電極間隔 $1.2\ \mu\text{m}$ 、 $V_E = 1000\ \text{V}$ の結果と同じになる。一方、電極幅 $8\ \mu\text{m}$ 、電極間隔 $12\ \mu\text{m}$ の電極寸法に対して $V_E = 1000\ \text{V}$ の場合の偽電圧 δV_S 、線形化誤差電圧 ΔV_{lin} は表 4-4、表 4-5 から $V_E = 100\ \text{V}$ の場合の半分程度である。したがって、電極幅 $0.8\ \mu\text{m}$ 、電極間隔 $1.2\ \mu\text{m}$ 、 $V_E = 1000\ \text{V}$ に対する δV_S と ΔV_{lin} は、電極幅 $8\ \mu\text{m}$ 、電極間隔 $12\ \mu\text{m}$ 、 $V_E = 1000\ \text{V}$ のそれに対して約二倍となる。すなわち、引き出し電極電圧 V_E を一定としたとき、局所電界効果の電極寸法依存性は、電極寸法一定のときの V_E への依存性と等価となる。ただし、二次電子放出源の大きさを電極幅と比較して無視できる場合である。以上の議論は、逆に電極寸法を大きくした場合にも、その大きさが試料と引き出し電極間の距離に比べて十分小さい場合には成立する。

4.5 むすび

本章の結果は次のとおりである。

- (1) 局所電界が存在する場合の検出二次電子電流をアクセプタンス図を用いて計算する手法を示した。
- (2) 局所電界効果を測定電極電位が零でないことによる効果(第一種)と隣接電極電位が零でないことによる効果(第二種)に分けて考えられる。
- (3) 通常のSEM検出系(モデルA)では、電位コントラストは主に第一種局所電界効果により生じる。この検出系での電圧測定法では第二種局所電界効果が測定誤差を生じ、それは偽電圧で評価され、 $(V_1, V_S, V_2) = (0, V_S, 5)$ の時、 $V_S = 0 \sim 5\ \text{V}$ の変化に対して $0 \sim 0.4\ \text{V}$ であった。
- (4) 引き出し電界を持つ減速電界型分光器検出系(モデルB)での電圧測定法では、第一種、第二種局所電界効果はともに測定誤差を生じる。第一種局所電界効果による測定誤差は線形化誤差電圧で、第二種によるそれは偽電圧で評価され、それぞれの大きさは $1 \sim 3\ \text{V}$ ($I/I_0 = 0.5$ 、 $V_E = 100$ と $1000\ \text{V}$ 、 $(V_1, V_S, V_2) = (0, 0, 0)$ と $(0, 5, 0)$ の結果から)、

0.1~0.4V ($I/I_0=0.5$, $V_E=100$ と 1000 V, $(V_1, V_S, V_2)=(0, V_S, 5)$)の結果から)であった。

- (5) 強い引き出し電界を持つ減速電界型分光器検出系(モデルB)、あるいは高分解能検出系(モデルC)でも局所電界効果は避けえない。
- (6) モデルA、モデルBについて、線形化誤差電圧と偽電圧の計算値は実験値とかなりよい一致を示した。
- (7) 局所電界効果は引き出し電界を大きくすれば減少するが、局所電界効果の引き出し電界への依存性は強くない。たとえば、引き出し電界を 60 V/mmから 600 V/mmと十倍大きくしても局所電界効果は約半分にしかならない。
- (8) 局所電界効果の電極寸法への依存性は、引き出し電界への依存性と等価である。

第5章 ストロボSEMによる集積回路の波形観測

5.1 まえがき

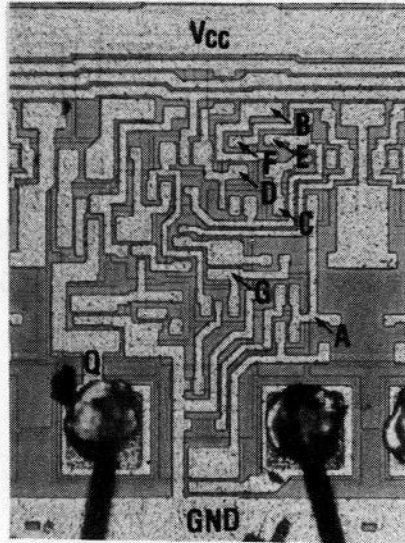
本章では第2章で述べたストロボSEM装置を用いて、実際にバイポーラICやLSI(5.2)とMOS LSI(5.3)を観測した。なお、本章では分光器を用いていない。その理由は第3章の結果からわかるように i) S/N比が一桁程度悪くなる、ii) 局所電界効果はさほど改善されない、iii) 分光器を用いても線形化関係が得られない、からである。

5.2 バイポーラ素子への応用

5.2.1 6回路内蔵D型フリップフロップICの故障診断

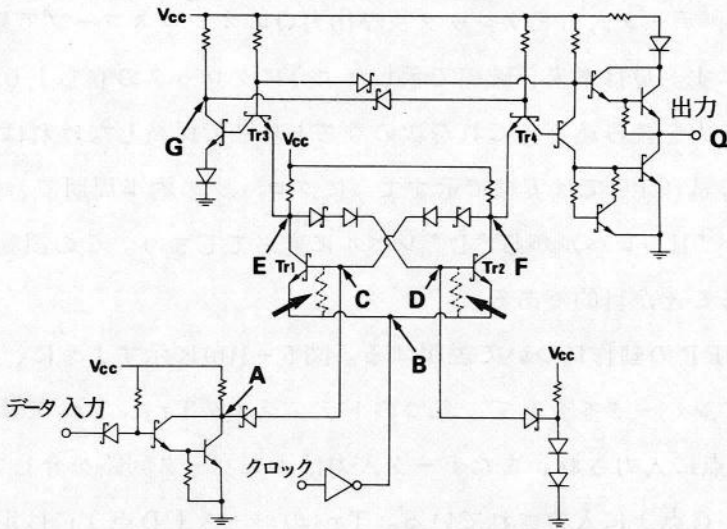
試料は正エッジトリガD型フリップフロップ(FF)を6回路内蔵したローパワーショットキー(LS)TTL ICの試作品である。この1回路部分の光学顕微鏡写真(a)とその等価集中定数回路表示(b)を図5-1に示す。図5-2に、データ入力とクロック及び出力Qのオシロスコープで観測した波形を示す。Qは本来、破線で示したようにクロックの立ち上がり部分でのデータ入力を読み込み、これを次の立ち上がりまで保持しなければならないが、この試作ICでは実線で示すようにクロックの約半周期で、保持したデータが“H”レベルから“L”レベルになってしまう。この誤動作の原因を調べることが目的である。

このD-FFの動作について説明する。図5-1(b)に示すように、クロック信号はインバータを介して、二つのトランジスタ Tr_1 、 Tr_2 で構成されるFFのB点に入力され、またデータ入力はインバータ回路を介して Tr_1 のベース(C点)に入力されている。 Tr_2 のベース(D点)には定電圧回路が接続されている。そこで、クロック信号がL→H(したがって、B点の電圧がH→L)に変化するときに、C点の電圧とD点の電圧とを比較し、より高い方のトランジスタが導通し、他方はしゃ断状態となる。この情報は Tr_3 と Tr_4 を通じて出力を形成するFF回路に入力される。次にクロッ



出力 データ入力

(a)



(b)

図 5-1 6回路内蔵D型フリップフロップTTL IC 1回路部分の
光学顕微鏡写真(a)とその等価集中定数回路表示(b)

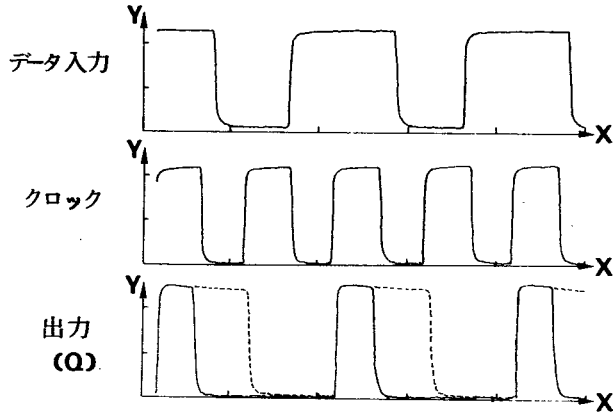


図 5-2 データ入力、クロック及び出力 (Q) のオシロスコープ波形。

破線は正常な出力波形を示す。

X : 200ns/div Y : 2V/div

ク信号がH→Lに変化したときには、 T_{r3} と T_{r4} はしゃ断状態となり出力FF回路は先の情報を保持し続け、Qは一定の値を出力する。以上は正常動作した場合である。

データ入力、クロック、A～G点及び出力Qのストロボ観測波形を図5-3(a)に示す。実験条件は表5-1に示す通りである。出力Qの波形は、先に図5-2のオシロスコープ波形に示した通り、クロックの約半周期分しかデータを保持していない。そこで、信号波形を出力QからG→F→E D→Cと逆にたどっていくことにより、これがクロック信号のL→Hの変化に対してC、D点の電圧変化が明確でなく小さいことに起因することがわかる。

この原因は、この回路のCあるいはD点の電圧が T_{r2} あるいは T_{r1} がそれぞれ導通したときにフローティングとなることによるものと推定された。そこで、C、D点の電圧がフローティングとなるのを避けるため図5-1(b)に矢印で示すような抵抗が挿入された改良型素子を測定したところ図5-3(b)に示すように予想通りの動作を示している。

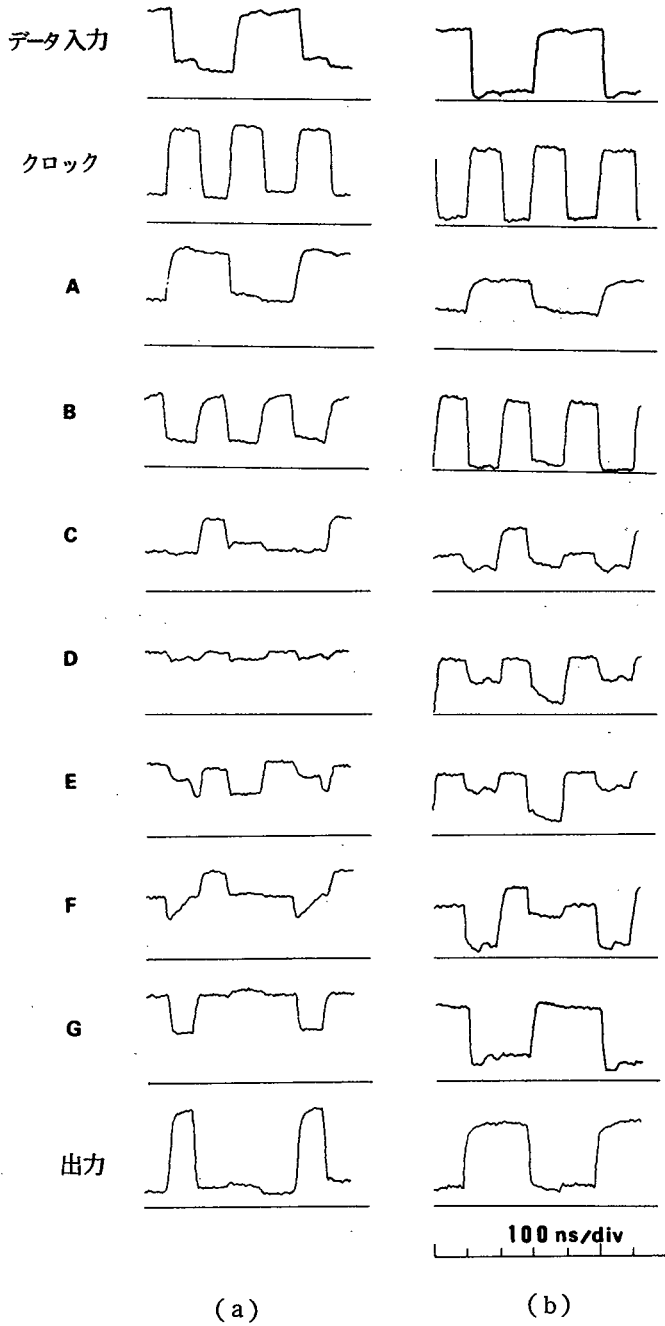


図 5-3 D型フリップフロップ内部のストロボ観測結果

(a) 改良前

(b) 改良後

なお、数回のストロボ波形観測を繰り返しても、電子ビーム照射前後のオシロスコープによる入出力モニタ波形には何ら変化が認められず、また複数回のストロボ観測結果にも差異が認められなかった。このことから、表 5-1 に示す電子ビーム照射条件の下では、この素子のビーム照射による損傷は無視できると考えられる。

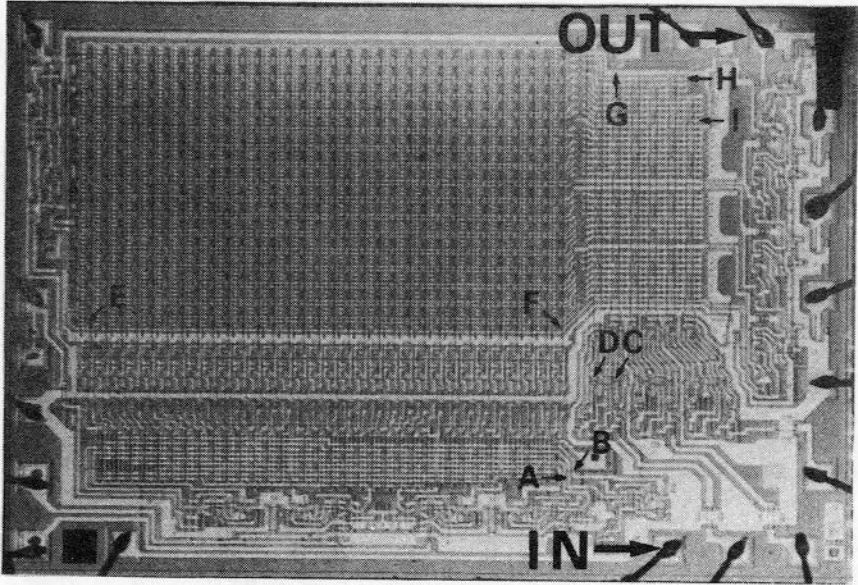
表 5-1 D型フリップフロップ 6 回路内蔵 LS TTL IC 観測条件

パッシベーション膜	あ り
ビーム加速電圧	2 5 kV
平均パルスビーム電流	2 3 pA
試料励振周波数	2.4 8 MHz
ビームパルス幅	1.4 ns
移相ステップ幅	1.1 ns
移相ステップ数	6 0 0
平均化回数	1 0 0
サンプリング時間	1 1.2 s

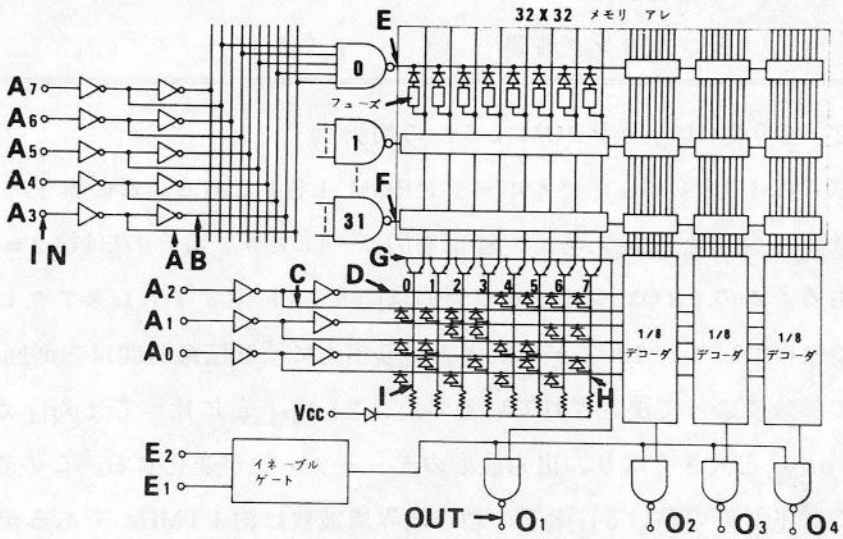
5.2.2 1024ビットPROM LSI の観測

試料は1024ビットバイポーラPROM LSIである。この素子の光学顕微鏡写真(a)と機能ブロック図(b)を図5-4に示す。素子寸法は約2mm×3mmである。このPROMを観測する目的は図5-5に示すアドレスアクセス時間特性について、1) アドレス入力から出力に至る伝搬時間は内部回路のどの部分によって決定されているのか、2) t_{PLH} に比べて t_{PHL} が約30nsほど大きくなり、出力波形のデューティ比が変化する。この変化はどこで生じるのか、3) 素子の動作限界周波数は約11MHzであるが、これが内部回路のどの部分で決まっているのか、を知ることである。

このため、図5-4に示すアドレス入力部(IN)からA, B, …… , G点を経て出力に到る各点を観測した。A, B点は行選択デコーダの入力、E, F点はその出力であり、C, D点は列選択デコーダ(ダイオードマト



(a)



(b)

図 5-4 1024ビットバイポーラ PROM

(a) 光学顕微鏡写真

(b) 機能ブロック図

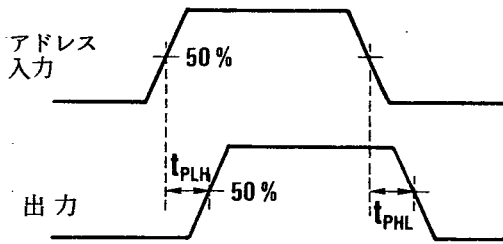


図 5-5

伝搬遅延時間 t_{PHL}

t_{PHL} の定義

リクス)の入力、H、I点はその出力である。Gはメモリアレイの出力である。アドレス入力 $A_0 \sim A_7$ に“H”あるいは“L”の信号を適当に加えることにより、(0, 0)から(31, 7)番地の256個の番地のどれかを選ぶことができるが、この実験では A_0 から A_7 を外部で結線し、この部分に立ち上り 5 ns、振幅 4.5 V の矩形波を印加した。したがって、入力信号が“H”のときには(31, 7)番地の内容(“H”を記憶させてある)が“L”のときには(0, 0)番地の内容(“L”を記憶させてある)が出力される。図 5-6 に信号の流れと各測定点の論理状態を示す。

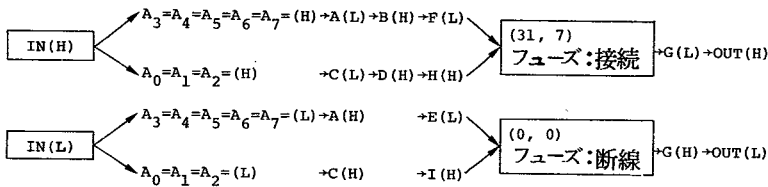


図 5-6 1024ビット PROM内の信号の流れと論理状態

図 5-7 に入力周波数 2.5 MHz (a) と 1.09 MHz (b) の時の結果を示す。ただし、(b) の波形は最大値で正規化して表示している。2.5 MHz は通常動作時での周波数で、1.09 MHz は動作限界に近い周波数である。実験条件は表 5-2 に示す通りである。図 5-7 (a) から伝搬遅延の主たる原因は G 点にあり、しかも G 点の立ち上り時間が立ち下り時間に比べて長いため、出

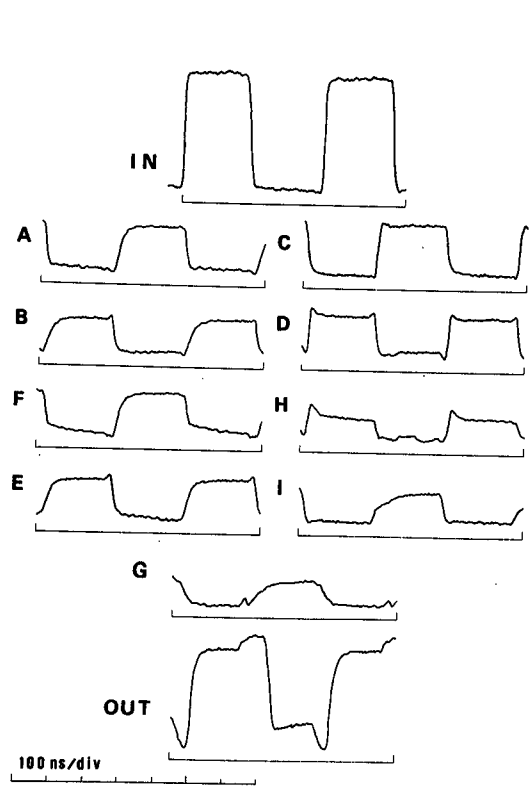
力信号の t_{PHL} が t_{PLH} に比べて大きくなり、デューティ比が変化してしまうことがわかる。図 5-7 (b) は、最大値で正規化して表示しているので、もともとの振幅が他の点の波形に比べて小さい G 点の波形は非常に S/N 比が悪くなっている。周波数を 1 MHz より高くすると、G 点を除く A ~ I 点の波形は平坦部が少なくなり三角波に近い状態になるが依然として出ている。しかし、G 点の振幅はさらに小さくなり、出力は“H”のままになる。したがって、G 点が動作周波数の限界を決めていることがわかる。G 点は図 5-4 (b) をみればわかるように、八個のトランジスタのコレクタが共通に接続されている大面積共通コレクタ部であり、周囲部分との間に存在する容量がこの部分の時間特性をなまらせているものと推定できる。

なお、この素子に対しても、電子ビーム照射前後のオシロスコープによる入出力波形には何ら変化が認められず、また複数回のストロボ観測結果にも差異が認められなかった。

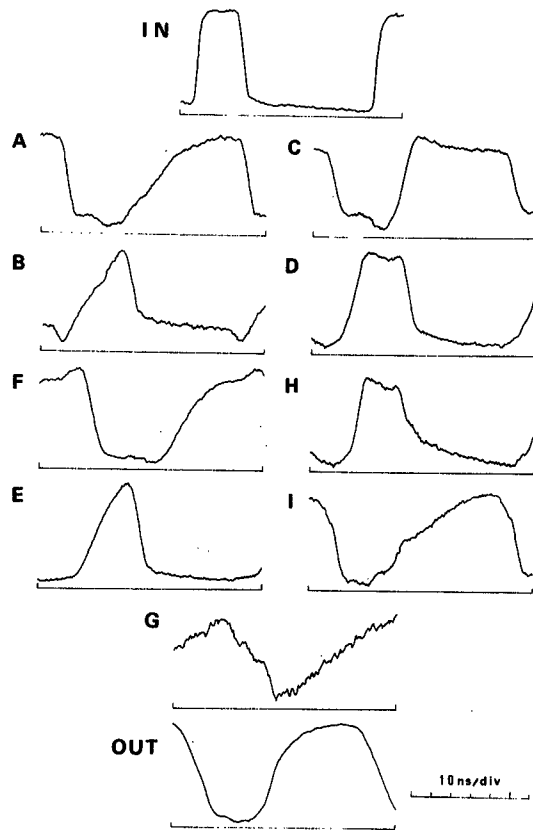
表 5-2 1024ビットバイポーラ PROM 観測条件

	図 5-7 (a)	図 5-7 (b)
パッシベーション膜	あり	あり
ビーム加速電圧	2.5 kV	2.5 kV
平均パルスビーム電流	3.2 pA	2.6 pA
試料励振周波数	2.5 MHz	10.9 MHz
ビームパルス幅	2.0 ns	0.4 ns
移相ステップ幅	1.1 ns	0.19 ns
移相ステップ数	600	600
平均化回数	100	100
サンプリング時間	8.4 s ※	8.4 s ※

※ マイクロコンピュータ系初期の項の観測結果であるため、第二章式(2-4)の観測時間より若干短かくなっている。



(a)



(b)

図 5-7

1024ビットバイポーラ

PROMの観測波形

(a) 2.5MHz

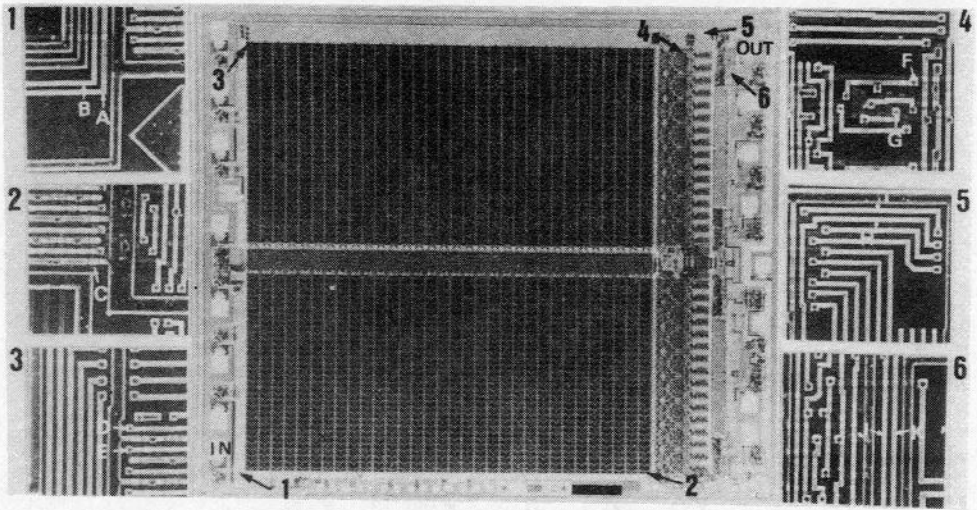
(b) 10.9MHz

5.3 MOS素子への応用

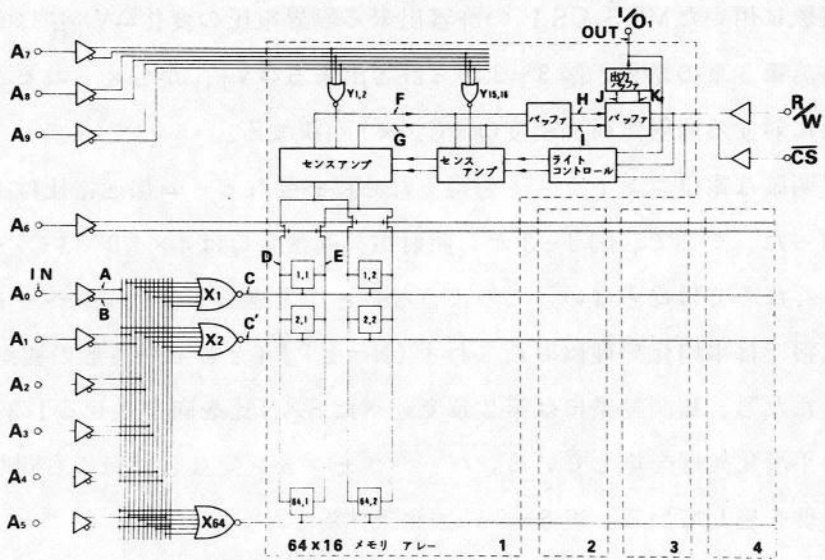
MOS素子の観測は、通常はパッシベーション膜を取り除き、2 kV程度の低加速電圧を用いている⁽⁸⁾⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。しかし、パッシベーション膜を付けたままで観測出来る方が、便利なことと言うまでもない。このとき考慮すべき点は、(i)電子ビームがパッシベーション膜下にある測定電極に達し、電極電圧の変化を電位コントラストとして観測するのに十分な加速電圧をもつこと⁽³²⁾、(ii)電子ビーム照射の影響がゲート酸化膜にまで及び、素子の電気的特性を変えないように照射条件を設定することである。第二の項目は第3章で述べたように、電子ビームの加速電圧が低ければ低いほど電子ビーム照射効果は小さく、第一の項目と相反する条件となる。したがって、MOS素子の観測に際しては、観測条件を適切に選ぶことが重要となる。

観測試料は1024語×4ビット構成のnチャンネルシリコンゲートMOSスタティックRAMである。実験は、パッシベーション膜(0.9 μm SiO₂膜)付、およびパッシベーション膜なしの試料について行った。試料の光学顕微鏡写真と機能ブロック図を図5-8(a), (b)に示す。ただし、パッシベーション膜付とパッシベーション膜なしの試料は完全に同種のものでなく、パッシベーション膜なしの方が素子寸法は若干小さくなっている。最小線幅はともに5 μm である。深さ方向の寸法は第3章で用いたものと大体同じである(図3-2参照)。

この実験の目的は、読み出し動作時の素子内部の波形を観測し、パッシベーション膜付とない場合の結果を比較検討することである。測定点(I, N, A, B, …, J, K, OUT)は図5-8に矢印で示されている。振幅4Vの矩形波がアドレス入力A₀に印加されている。A₁~A₉はすべて接地されている。したがって、アドレス入力の“H”は番地(2, 1)を“L”は(1, 1)をアクセスする。それぞれの番地には、前もって“H”および“L”の情報が書き込まれている。したがって、入力の“H”には出力の“H”が対応する。各測定点における信号の流れと論理状態を図5-9に示す。



(a)



(b)

図5-8 4096ビットスタティック MOS RAM

(a) 光学顕微鏡写真 (b) 機能ブロック図

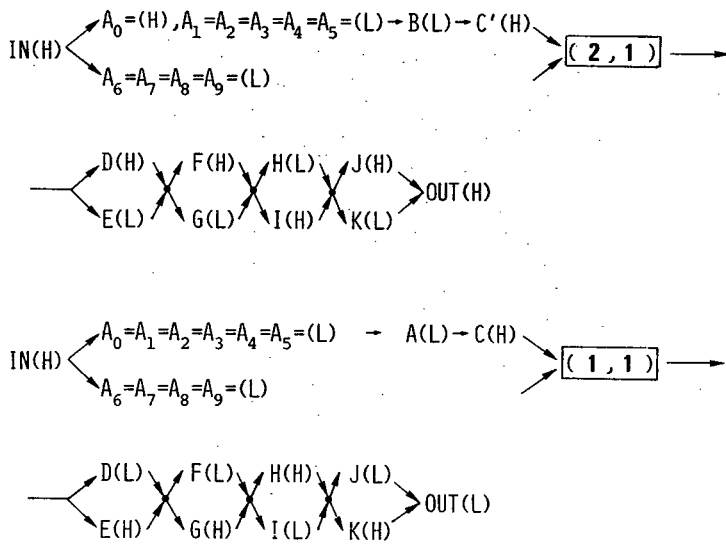
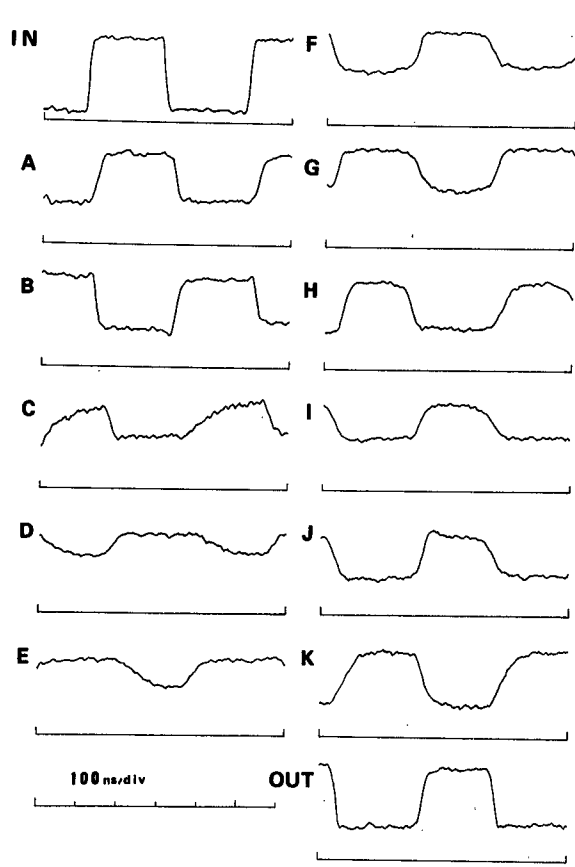


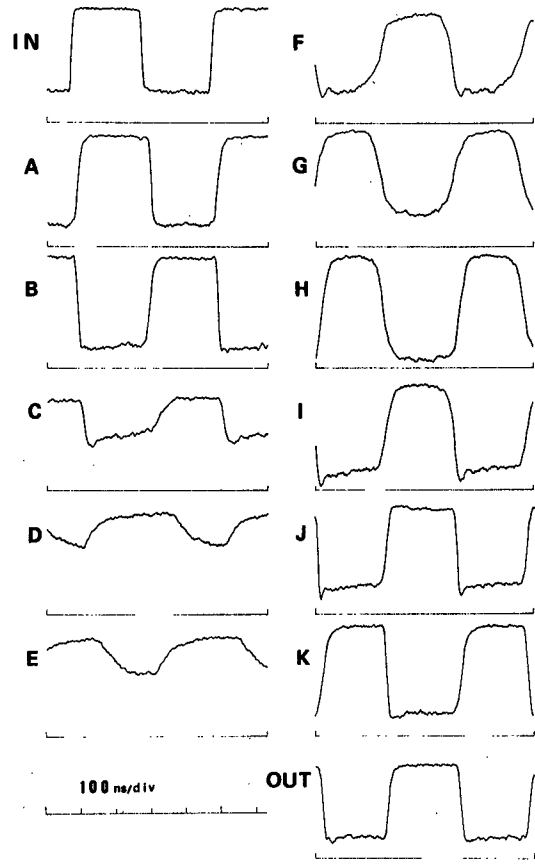
図 5-9 MOS RAM 内の信号の流れと論理レベル

実験に用いた MOS LSI の許容出来る臨界電圧の変化 ΔV_{TH} は 0.3 V である。第 3 章の結果、図 3-3 から許容出来る ΔV_{TH} が与えられると各加速電圧に対する照射電荷面密度 Q (C/cm^2) が決まる。パッシベーション膜付試料で明確な電位コントラストを得るために必要なビーム加速電圧は 10 kV であった。そこで、図 3-3 から照射電荷面密度 Q は 4×10^{-7} (C/cm^2) より小さくなくてはならない。このようなことを考慮して、パッシベーション膜付試料では平均化処理はおこなわず ($N=1$)、0.2 秒で一波形の観測を行った。ただし、観測結果には第 2 章で述べた S/N 比を向上させる 13 点法による平滑化処理を施している。パッシベーション膜なし試料にも同じく平滑化処理を施している。表 5-3 に観測条件を示す。

観測した内部波形を図 5-10(a), (b) に示す。(a) はパッシベーション膜付、(b) はパッシベーション膜なしである。この図から、D, E 点の波形が (a), (b) とも、立ち上り、立ち下り特性ともになまっておき、また振幅も小さく、この部分が出力特性に大きく影響していることがわかる。



(a)



(b)

図 5-10 4096 ビットスタティック MOS RAM のストロボ観測波形

(a) パッシベーション膜付

(b) パッシベーション膜なし

表 5-3 4096 ビット MOS RAM 観測条件

	図 5-10(a)	図 5-10(b)
パッシベーション膜	0.9 μm	なし
ビーム加速電圧	1.0 kV	2 kV
平均パルスビーム電流	1.4 pA	2 pA
試料励振周波数	2.5 MHz	2.5 MHz
ビームパルス幅	3.3 ns	3.8 ns
移相ステップ幅	1.1 ns	1.1 ns
移相ステップ数	600	600
平均化回数	1	10
サンプリング時間	0.2 s	1.2 s

パッシベーション膜のある場合とない場合の観測結果を比較すると、パッシベーション膜のある場合、電圧振幅が小さく、また立ち上りなどがなまっ
て見える。この原因として、まず第一に

- (1) 実験に用いたパッシベーション膜のある場合とない場合の試料は、素
子寸法が完全には同じでない。

ことが挙げられる。さらに

- (2) 加速電圧を電位コントラスト信号が取り出せる範囲内で実験的に最小
の値に設定した。このため、電子ビームが測定電極まで達していたかど
うか、わからない。

ことが挙げられる。その上、パッシベーション膜のある場合には、

- (3) 放出二次電子の一部が電位障壁により試料へ追いつけられなかったり、後方散
乱電子により発生した二次電子が試料表面に降り注いだりして、試料表
面を帯電させる。

ことが考えられる。この要因(3)によって、たとえ電子ビームが測定電極に十分
達していたとしても、パッシベーション膜がある場合とない場合とで観測

結果が異なる可能性がある。

このように原因として三つの要因が考えられるが、これらの要因の内での要因が主たる原因となっているかは現在のところ明確でない。パッシベーション膜のある場合、観測しているのは測定電極電位ではなく、表面電位である。そこで、パッシベーション膜のある場合の表面電位と内部電極電位との対応関係について検討する必要がある。これは、今後の課題である。

次に、観測結果から読み取った伝搬遅延時間について、パッシベーション膜がある場合とない場合とを比較した結果を表5-4に示す。ただし、伝搬遅延時間は電圧振幅の半値から読み取っている。この表から、伝搬遅延時間は層間絶縁膜 SiO₂ 下にあるポリシリコン電極上の点C（他の観測点はすべてA θ 電極上にある）を除いては、比較的良好に一致していることがわかる。なお、表5-3に示す観測条件の下では、ビーム照射前と後の入出力モニタ波形には何らの変化も認められなかった。

表5-4 パッシベーション膜付となし MOS LSI の伝搬遅延時間の観測結果
ただし、伝搬遅延時間は入力波形の立ち上がりからの遅延時間で、振幅の半値から読み取っている。

観測点	伝搬遅延時間 (ns)		観測点	伝搬遅延時間 (ns)	
	パッシベーション膜 なし	パッシベーション膜 あり		パッシベーション膜 なし	パッシベーション膜 あり
IN	0	0	G	120	120
A	18	19	H	130	110
B	16	19	I	130	130
C	33	52	J	130	130
D	66	69	K	140	140
E	120	120	OUT	150	140
F	120	110			

本実験により、パッシベーション膜付 MOS LSI に対しても、観測条件を適切に選ぶことにより、伝搬遅延のような時間特性に対してストロボ SEM による波形観測はパッシベーション膜のない素子と同様に有効であることがわかった。

5.4 むすび

ストロボ SEM 装置を用いて、D 型フリップフロップ 6 回路内蔵バイポーラ LS TTL IC, 1024 ビットバイポーラ PROM LSI と 4096 ビット MOS RAM を観測し、素子の故障箇所、動作限界の原因の追求などにストロボ SEM による観測が有効であることがわかった。

第6章 結 論

本研究によって得た主な成果をまとめるとつぎのようになる。

- (1) ストロボSEM装置に次の二つの改良を施した。一つは電氣的に位相を精密に変化でき、また周波数二通倍の機能も兼ね備えたPLL型移相器（出力周波数10MHzで時間分解能0.2ns）を試作し付加したことである。他の一つは、検出波形のS/N比の改善と観測時間の短縮のための信号処理を施したことである。
- (2) SiO₂膜1.8μm（パッシベーション膜0.87μm、層間絶縁膜0.53μm）ポリシリコンゲート電極0.43μm、ゲート酸化膜0.085μmからなるMOSトランジスタを用いて、低エネルギー電子のゲート酸化膜で吸収されるエネルギーを測定した。その結果、電子の飛程とそのストラグリングを考慮しても説明できないほど深いところまでエネルギー吸収が生じていることがわかった。この原因として、特性X線などの二次的効果が考えられる。
- (3) 局所電界が存在する場合の検出二次電子電流をアクセプタンス図を用いて計算する手法を示した。この手法に基づく電圧測定の際の誤差電圧は実測値とよい一致を示した。
- (4) 局所電界効果は引き出し電界を大きくすると減少するが、局所電界効果の引き出し電界への依存性は小さい。また、局所電界効果の電極寸法への依存性は、引き出し電界への依存性と等価である。
- (5) バイポーラIC、LSIとMOSLSIをストロボSEM装置を用いて観測した。素子の故障個所、動作限界の原因の追求などにストロボSEMによる観測が有効であることを示した。

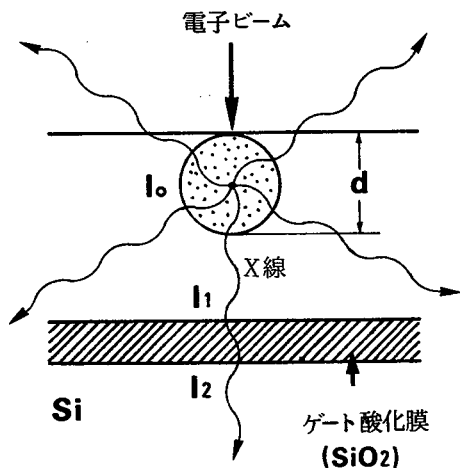
今後の課題として、次の様な事が挙げられる。

- (1) 種々の電極構造に対する局所電界効果のデータ集積。
- (2) 局所電界効果の小さい二次電子検出系の開発。
- (3) パッシベーション膜付集積回路の内部電極電位と表面電位との対応関係。

付録 1 特性 X 線による f_D の概算

特性 X 線による f_D を概算する。図 A-1 に示す特性 X 線の発生領域 d を Thomson-Whiddington の飛程によって近似する。すなわち、

$$d = 0.033(E_0^2 - E_C^2) / \rho \quad (A-1)$$



図A-1 特性 X 線による f_D の概算の仕方

ただし、 d (μm) は厚さ、 E_0 (keV) は入射電子の初期エネルギー、 E_C (keV) は臨界励起エネルギー (SiK α : 1.84 keV、OK α : 0.53 keV)、 ρ (g/cm^3) は密度である。この領域内で発生した X 線強度 I_0 は文献 (53) 式 (12.8) により次式で与えられる。

$$I_0 = 1.16 \times 10^{-1} \frac{\omega_K R}{A} (U_0 - 1)^{1.67} \quad (A-2)$$

ただし、 ω_K はけい光収率、 R は後方散乱係数、 $U_0 = E_0 / E_C$ 、 A は原子量である。X 線の発生領域を図 A-1

のように球で近似し、X 線は球の中心から放射するものとする。強度 I_0 の X 線が厚さ z の物質 (密度 ρ) を通過すると、X 線強度 I は

$$I = I_0 \exp(-\mu \rho z) \quad (A-3)$$

となる。ただし、 μ は質量吸収係数である。

ゲート酸化膜に吸収される X 線光子数を、発生したすべての X 線がゲート酸化膜を垂直に通過したときに酸化膜に吸収される X 線光子数と X 線発生領域である球の中心からゲート酸化膜を見込んだ立体角 ($\Omega / 4\pi$) の積によって近似する。ゲート酸化膜通過前後の X 線強度をそれぞれ I_1 、 I_2 とすると f_D は次式で与えられる。

$$f_D = I_0 \times \frac{I_1 - I_2}{I_0} \times \frac{\Omega}{4\pi} \times \frac{E_C}{E_0} \quad (\text{A-4})$$

以上、式(A-1)~式(A-4)から特性X線による f_D を概算できる。

付録 2 二次電子の運動を三次元とした時の検出二次電子電流の計算

モデル B において、試料は二次元のまま二次電子の運動を三次元とした時の検出二次電子電流を計算する。図 A-2 はこの計算の座標系を示す。この場合、y 方向の速度成分はその方向の初速度と同じである。すなわち、y 方向には等速運動をする。二次電子の x-z 面での軌道は 4.2.4 節と本質的に同じである。そこで、4.2.4 節のエネルギー eW のかわりにエネルギーの x-z 成分である eW_p 、出射角 θ のかわりに x-z 面での出射角 α をとると、図 4-12 のアクセプタンス図はそのまま成立する。三次元の場合の検出二次電子電流は次のように書ける

$$I / I_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^\pi d\phi \int_{W_L}^\infty \sin\theta \cos\theta N(W) dW \quad (\text{A-5})$$

$$W_L = \frac{W_1(\alpha)}{\cos^2\theta + \sin^2\theta \cos^2\theta}$$

ただし、 I_0 は最大検出二次電子電流であり、 $W_1(\alpha)$ はアクセプタンス図の曲線上のエネルギーである。

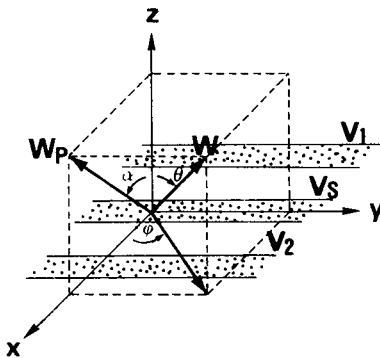
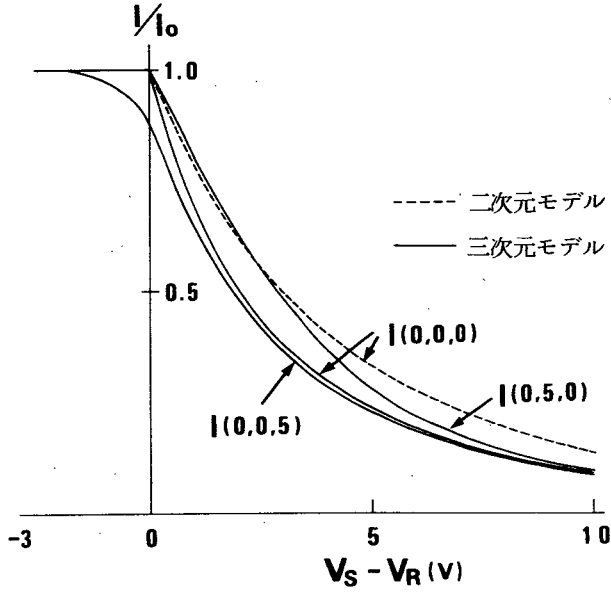


図 A-2 座標系の設定

図A-3に $V_E = 1000\text{V}$ 時の計算結果を示す。破線が $(V_1, V_S, V_2) = (0, 0, 0)$ の場合の検出二次電子電流である。この図から、4.2.4節の結果と本質的な様子は変わっていないことがわかる。この図から読み取った線形化誤差電圧 ΔV_{lin} と偽電圧 δV_S をそれぞれ表4-4、4-5に示す。



図A-3 モデルBにおいて二次電子の運動を三次元としたときの検出二次電子電流 I と $(V_S - V_R)$ の関係

謝 辞

本研究を行うに際し、終始懇切な御指導、御鞭撻を賜った大阪大学工学部 裏 克己教授、終始一貫して直接御指導頂いた藤岡 弘助教授に深甚なる感謝の意を表します。

本論文作成にあたり、懇篤なる御指導を頂くとともに種々の御高配を賜った大阪大学工学部小山次郎教授、大阪大学産業科学研究所松尾幸人教授に深謝の意を表します。

さらに、著者が大阪大学に在学中、御指導と御教示を賜った大阪大学工学部尾崎 弘教授、中井順吉教授、埴 輝雄教授、児玉慎三教授、寺田浩詔教授、および大阪大学産業科学研究所中村勝吾教授、角所 収教授に深謝の意を表します。

本研究に関して有意義な御教示を頂いた鷹岡昭夫博士、細川照夫博士（日本電信電話公社）、田岡信考氏（川崎重工業株式会社）、神田佳昌氏（日立製作所株式会社）、斉藤達夫氏（新コスモス電機株式会社）に心から感謝の意を表します。

また、本研究の各過程で協力を得た高岡弘幸氏（神戸製鋼所株式会社）、横林敏昭氏（日立製作所株式会社）、国沢寛治氏（松下電工株式会社）、竹島俊夫氏（日本電気株式会社）、山中政明氏（ソニー株式会社）、新田谷洋氏（シャープ株式会社）、村松秋弘氏（日本楽器株式会社）に感謝します。

参 考 文 献

- (1) C. W. Oatley and T. E. Everhart: "The examination of p-n junctions with the scanning electron microscope", J. Electron., 2, 568 (1957).
- (2) T. E. Everhart, O. C. Wells and R. K. Matta: "Evaluation of passivated integrated circuits using the scanning electron microscope", J. Electrochem. Soc., 111, 929 (1964).
- (3) D. C. Crothwait and F. W. Ivy: "Voltage contrast methods for semiconductor device failure analysis", Scanning Electron Microscopy, 935 (1974).
- (4) G. S. Plows and W. C. Nixon: "Stroboscopic scanning electron microscopy", J. Phys. E: Sci. Instrum., 1, 595 (1968).
- (5) G. Y. Robinson, R. M. White and N. C. MacDonald: "Probing of Gunn effect domains with a scanning electron microscope", Appl. Phys. Lett., 13, 407 (1968).
- (6) N. C. MacDonald, G. Y. Robinson and R. M. White: "Time-resolved scanning electron microscopy and its application to bulk-effect oscillators", J. Appl. Phys., 40, 4516 (1969).
- (7) G. Y. Robinson: "Stroboscopic scanning electron microscopy at gigahertz frequencies", Rev. Sci. Instrum., 42, 251 (1971).
- (8) G. S. Plows and W. C. Nixon: "Operational testing of LSI arrays by stroboscopic scanning electron microscopy", Microelectron. Rel., 10, 317 (1971).
- (9) A. Gopinath and M. S. Hill: "A technique for the study of Gunn devices at 9.1 GHz using a scanning electron microscope", IEEE Trans. Electron Devices, ED-20, 610 (1973).

- (10) M. S. Hill and A. Gopinath: "Probing Gunn domains at X-band microwave frequencies using a scanning electron microscope", J. Phys. D: Appl. Phys., 7, 69 (1974).
- (11) P. J. Fentem and A. Gopinath: "Voltage distributions in X-band $n^+ - n - n^+$ Gunn devices using a SEM", IEEE Trans. Electron Devices, ED-23, 1159 (1976).
- (12) A. J. Gonzales and M. W. Powell: "Resolution of MOS one-transistor, dynamic RAM bit-failures using SEM stroboscopic techniques", J. Vac. Sci. Technol., 15, 3, 1043 (1978).
- (13) A Gopinath and K. G. Gopinathan: "High-resolution sampling SEM for quantitative investigations of semiconductor devices and integrated circuits", IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, 4, 431 (1978).
- (14) H. P. Feuerbaum, D. Kantz, E. Wolfgang and E. Kubalek: "Quantitative measurement with high time resolution of internal waveforms on MOS RAM's using a modified scanning electron microscope", IEEE J. Solid-State Circuits, SC-13, 319 (1978).
- (15) E. Wolfgang, R. Lindner, P. Fazekas and H. P. Feuerbaum: "Electron-beam testing of VLSI circuits", IEEE J. Solid-State Circuits, SC-14, 2, 471 (1979).
- (16) T. Hosokawa, H. Fujioka and K. Ura: "Two-dimensional observation of Gunn domains at 1 GHz by picosecond pulse stroboscopic SEM", Appl. Phys. Lett., 31, 340 (1977).
- (17) T. Hosokawa, H. Fujioka and K. Ura: "Gigahertz stroboscopy with the scanning electron microscope", Rev. Sci. Instrum., 49, 1293 (1978).

- (18) H. Fujioka, T. Hosokawa, Y. Kanda and K. Ura: " Sub-micron electron beam probe to measure signal waveform at arbitrarily specified positions on MHz IC", Scanning Electron Microscopy, 1, 755 (1978).
- (19) C. J. Wu and D. B. Wittry: "Investigation of minority-carrier diffusion lengths by electron bombardment of Schottky barriers", J. Appl. Phys., 49, 2827 (1978).
- (20) G. A. Ausman Jr. and F. B. Mclean: "Electron-hole pair creation energy in SiO₂", Appl. Phys. Lett., 26, 173 (1975).
- (21) E. H. Snow, A. S. Grove and D. J. Fitzgerald: "Effects of ionizing radiation on oxidized silicon surfaces and planar devices", Proc. IEEE, 55, 1168 (1967).
- (22) N. C. MacDonald and T. E. Everhart: "Selective electron-beam irradiation of metal-oxide-semiconductor structure", J. Appl. Phys., 39, 2433 (1968).
- (23) W. C. Johnson: "Mechanisms of charge buildup in MOS insulators", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-22, 2144 (1975).
- (24) W. J. Keery, K. O. Leedy and K. F. Galloway: "Electron beam effect on microelectronics", Scanning Electron Microscopy, 1, 507 (1976).
- (25) R. Freeman: "A simple model for predicting radiation effects in MOS devices", IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-25, 1216 (1978).
- (26) T. H. Everhart and P. H. Hoff: "Determination of kilovolt electron energy dissipation vs penetration distance in solid materials", J. Appl. Phys., 42, 5837 (1971).
- (27) K. Ura: "Address error of electron beam by local electric field", Optik, 58, 281 (1981).

- (28) C. W. Oatley: "Isolation of potential contrast in the scanning electron microscope", J. Phys. E: Sci. Instrum., 2, 742 (1969).
- (29) J. P. Fleming and E. W. Ward: "Improved technique for voltage measurement using the scanning electron microscope", Electronics Letters, 6, 7(1970).
- (30) L. J. Balk, H. P. Feuerbaum, E. Kubalek and E. Menzel: "Quantitative voltage contrast at high frequencies in the SEM", Scanning Electron Microscopy, 1, 615 (1976).
- (31) S. K. Obyden, G. V. Saporin and S. V. Bavin: "The development of stroboscopic methods in the scanning electron microscopy", Electron Microscopy 1980, 1, 324.
- (32) D. M. Taylor: "The effect of passivation on the observation of voltage contrast in the scanning electron microscope", J. Phys. D: Appl. Phys., 11, 2443 (1978).
- (33) G. S. Plows, Ph D. Diss. Cambridge Univ. 1969.
- (34) A. Gopinath and C. C. Sanger: "A technique for the linearization of voltage contrast in the scanning electron microscope", J. Phys. E: Sci. Instrum., 4, 334 (1971).
- (35) P. J. Fentem and A. Gopinath: "Voltage contrast linearization with a hemispherical retarding analyser", J. Phys. E: Sci. Instrum., 7, 930 (1974).
- (36) W. R. Hardy, S. K. Behera and D. Cavan: "A voltage contrast detector for the SEM", J. Phys. E: Sci. Instrum., 8, 789 (1975).
- (37) H. P. Feuerbaum: "VLSI testing using the electron probe", Scanning Electron Microscopy, 1, 325 (1979).
- (38) A. P. Janssen, P. Akhter, C. J. Harland and J. A. Venables: "High spatial resolution surface potential measurements using secondary electrons", Surface Sci., 93, 453 (1980).

- (39) 藤岡、中前、裏：“ストロボ走査電顕によるバイポーラ L S I 内部の信号伝搬特性の観測”、電子通信学会技術研究報告、ED78-118 (1979)。
- (40) H. Fujioka, K. Nakamae and K. Ura: "Function testing of bipolar IC's and LSI's with the stroboscopic scanning electron microscope", IEEE J. of Solid-State Circuits, SC-15, 2, 177 (1980).
- (41) H. Fujioka, K. Nakamae, H. Takaoka and K. Ura: "Function testing of bipolar and MOS LSI circuits with a combined stroboscopic SEM-microcomputer system", Trans. IECE Japan, E64, 295 (1981).
- (42) A van der Ziel: "Estimate of the time constant of secondary emission", J. Appl. Phys., 28, 1216 (1957).
- (43) 細川照夫：“ピコ秒パルスストロボ走査電子顕微鏡に関する研究”、学位論文(1977)。
- (44) T. Hosokawa, H. Fujioka and K. Ura: "Generation and measurement of subpicosecond electron beam pulses", Rev. Sci. Instrum., 49, 626 (1978).
- (45) K. Ura, H. Fujioka and T. Hosokawa: "Electron optical design of picosecond pulse stroboscopic SEM", Scanning Electron Microscopy, 1, 747 (1978).
- (46) 高岡、藤岡、裏：“ストロボ走査電顕の波形観測用マイクロコンピュータ系”、電子通信学会技術研究報告、SSD79-102(1980)。
- (47) A. Sabitzky and M. J. E. Golay: "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures", Anal. Chem., 36, 1627 (1964).
- (48) 中前、藤岡、裏：“ストロボ走査電顕の半導体応用(Ⅲ)”、日本学術振興会第132委員会第73回研究会資料(1979)。

- (49) 中前、藤岡、裏：“ストロボ走査電顕によるMOS LSIの波形観測”、電子通信学会技術研究報告、SSD 79-101(1980)。
- (50) 中前、藤岡、裏：“MOS素子に与える電子ビーム照射効果の電子エネルギー依存性”、電子通信学会全国大会、No.276(1980)。
- (51) K. Nakamae, H. Fujioka and K. Ura: "Measurements of deep penetration of low-energy electrons into metal-oxide-semiconductor structure", J. Appl. Phys., 52, 3, 1306 (1981).
- (52) E. J. Sternglass: "Backscattering of kilovolt electrons from solids", Phys. Rev., 15, 343 (1954).
- (53) S. J. B. Reed: Electron Microprobe Analysis, Cambridge Univ. Press 1975.
- (54) 竹島、中前、藤岡、裏：“走査電子顕微鏡の電位コントラスト生成機構”、日本学術振興会第132委員会第76回研究会資料(1980)。
- (55) 中前、藤岡、裏：“SEM電位コントラストに与える隣接電極電圧の影響の測定”、応用物理学会春季第28回講演会、30aX7(1981)。
- (56) H. Fujioka, K. Nakamae and K. Ura: "Local field effects on voltage measurement using a retarding field analyser in the SEM", Scanning Electron Microscopy (1981), to be published.
- (57) 中前、藤岡、裏：“SEM電位コントラストに与える隣接電極電圧の影響の測定”、日本電子顕微鏡学会第37回講演会、20-PA VI-4(1981)。
- (58) K. Nakamae, H. Fujioka and K. Ura: "Local field effects on voltage contrast in the scanning electron microscope", J. Phys. D: Appl. Phys., to be published.
- (59) R. Kollath: "Sekundärelektronen emission fester körper", Handbuch der Physik XXI 241 (1956).

- (60) A. Gopinath: Quantitative Scanning Electron Microscopy, Academic Press (New York), 95 (1974).
- (61) K. Ura, H. Fujioka and T. Yokobayashi: "Calculation of local field effect on voltage contrast of SEM", Electron Microscopy, 1, 330 (1980).
- (62) 中前、藤岡、裏: "ストロボ走査電顕法によるバイポーラLSIの信号伝搬特性の観測", 応用物理学会春季第26回講演会、No. 28aS7 (1979)。
- (63) 中前、藤岡、裏: "ストロボSEMによるMOS LSIの波形観測", 日本電子顕微鏡学会第36回講演会、PA-2(1980)。
- (64) 中前、藤岡、裏: "ストロボSEMによるバイポーラICの故障診断", 電子通信学会論文誌(C) 技術談話室、掲載予定。
- (65) 中前、藤岡、裏: "ストロボSEMによるパッシベーション膜付MOS LSIの波形観測", 電子通信学会論文誌(C) 技術談話室、掲載予定。

関連発表論文および資料

論文

- (1) H. Fujioka, K. Nakamae and K. Ura: "Function testing of bipolar IC's and LSI's with the stroboscopic scanning electron microscope", IEEE J. Solid-State Circuits, SC-15, 2, 177 (1980).
- (2) K. Nakamae, H. Fujioka and K. Ura: "Measurements of deep penetration of low-energy electrons into metal-oxide-semiconductor structure", J. Appl. Phys., 52, 3, 1306 (1981).
- (3) H. Fujioka, K. Nakamae, H. Takaoka and K. Ura: " Function testing of bipolar and MOS LSI circuits with a combined stroboscopic SEM-microcomputer system", Trans. IECE Japan, E64, 5, 295 (1981).
- (4) K. Nakamae, H. Fujioka and K. Ura: "Local field effects on voltage contrast in the scanning electron microscope", J. Phys. D: Appl. Phys., to be published.

国際学会

- (1) H. Fujioka, K. Nakamae and K. Ura: "Local field effects on voltage measurement using a retarding field analyser in the SEM", Scanning Electron Microscopy 1981, to be published.

研究速報

- (1) 中前、藤岡、裏：“ストロボSEMによるバイポーラICの故障診断”、電子通信学会論文誌(C)技術談話室、掲載予定。
- (2) 中前、藤岡、裏：“ストロボSEMによるパッシベーション膜付MOS LSIの波形観測”、電子通信学会論文誌(C)技術談話室、掲載予定。

研究会

- (1) 藤岡、中前、裏：“ストロボ走査電顕によるバイポーラLSI内部の信号伝搬特性の観測”、電子通信学会技術研究報告、ED78-118(1979)。
- (2) 中前、藤岡、裏：“ストロボ走査電顕の半導体応用(Ⅲ)”、日本学術振興会第132委員会第73回研究会資料(1979)。
- (3) 中前、藤岡、裏：“ストロボ走査電顕によるMOS LSIの波形観測”、電子通信学会技術研究報告、SSD 79-101(1980)。
- (4) 竹島、中前、藤岡、裏：“走査電子顕微鏡の電位コントラスト生成機構”、日本学術振興会第132委員会第76回研究会資料(1980)。

学 会 講 演 会

- (1) 中前、藤岡、裏：“ストロボ走査電顕法によるバイポーラLSIの信号伝搬特性の観測”、応用物理学会春季第26回講演会、No.28 aS 7 (1979)。
- (2) 中前、藤岡、裏：“MOS素子に与える電子ビーム照射効果の電子エネルギー依存性”、電子通信学会全国大会、No.276 (1980)。
- (3) 中前、藤岡、裏：“ストロボSEMによるMOS LSIの波形観測”、日本電子顕微鏡学会第36回講演会、No. PA-2 (1980)。
- (4) 中前、藤岡、裏：“SEM電位コントラストに与える隣接電極電圧の影響の測定”、応用物理学会春季第28回講演会、No. 30 aX 7 (1981)。
- (5) 中前、藤岡、裏：“SEM電位コントラストに与える隣接電極電圧の影響の測定”、日本電子顕微鏡学会第37回講演会、No. 20-PA VI-4 (1981)。

