

走査型電子顕微鏡による半導体素子の観察

Observations of Semiconductor Devices Using a Scanning Electron Microscope

樋口 久幸*
Hisayuki Higuchi

田村 一二三*
Hifumi Tamura

牧 道義*
Michiyoshi Maki

要 旨

走査型電子顕微鏡を用いて各種半導体素子の観察を行なった。2次電子電流を用いた観察では、試料の表面状態のほか光学顕微鏡などでは観察できない試料表面の電位分布が観察でき、その接触電位差によってpn接合の直接観察を行なうこともできた。また、トランジスタのペレットの断面を観察してベース層の厚みを測定し、従来の測定法による結果とよい一致が得られた。

一方、電子起電力による観察では、pn接合近傍の少数キャリアの拡散距離とライフタイムを結晶の位置と対応させて観察した。また電界効果トランジスタのチャンネルの直接観察とその信号の定量的測定を行ない顕微鏡像との対応を明らかにした。

1. 緒 言

走査型電子顕微鏡は1940年ごろからすでに M.von Andenne 氏⁽¹⁾らによって検討されていたが、透過型電子顕微鏡に比べ分解能が低いなどの点から発展しなかった。しかし、半導体素子製作技術が高度に発達し、素子が小形複雑化するにしたがい、従来の機械的な測定法では限度があり、T. E. Everhart 氏⁽²⁾らの提案した走査型電子顕微鏡による試料表面の電位分布観察が注目されるに至った。その後、半導体のpn接合に電子線を照射した場合に発生する電子起電力などを用いる方法も提案され、半導体の分野への応用はさらに拡大されてきている。

電子線の透過しないような厚い試料を観察する場合、透過型電子顕微鏡が、レプリカ法などによって間接的に観察するのに対し、走査型電子顕微鏡は、電子線照射によって試料表面から放出される2次電子を検出して、試料を直接観察できる点に大きな特長があり、試料表面の凹凸、構成元素に対応した像が観察できる。また、試料の表面電位の動的变化を観察することも可能である。電位分布観察に利用する2次電子は、数eVのエネルギーをもって放出されるため、試料の表面電位の影響を受ける。したがって、放出された2次電子のエネルギー分析を行ない、特定のエネルギーを有する電子のみを検出すれば、試料の電位分布が観察できる。このようにして蒸着配線、拡散マスクのピンホールなどによる素子の不良箇所を検出すれば、従来電気的特性から推定するにすぎなかった特性不良の原因を明確には握ることができる。2次電子のエネルギー分析は約0.5Vの電位差まで検出が可能であり、したがって半導体のpn接合近傍の観察では、p型半導体とn型半導体の間に0.5V近くの接触電位差が存在するため、外部から接合に電位差を与えない場合にも各領域を観察できる。

一方、pn接合に電子線を照射すれば、接合の拡散電位によって起電力が発生するので、その起電力を用いてpn接合の位置を検出することができる。分解能は少数キャリアの拡散距離によって限定されるが、数 μ の分解能で満足されるpn接合の検出には有効であろう。われわれは、試料電流像に、上記の電子起電力の信号が重畳されている現象を利用して集積回路の観察を行ない、拡散マスクのピンホールを検出した。また、電子起電力は電子線によって半導体内に生成された少数キャリアが拡散してpn接合に到達することによって発生し、キャリアがpn接合に到達できる拡散距離は、pn接合近傍に存在する欠陥により局所的な変化を示すので、電子起電力を用いて結晶内のすべり面、転移、不純物の偏析の状態⁽³⁾を観察した

* 日立製作所中央研究所

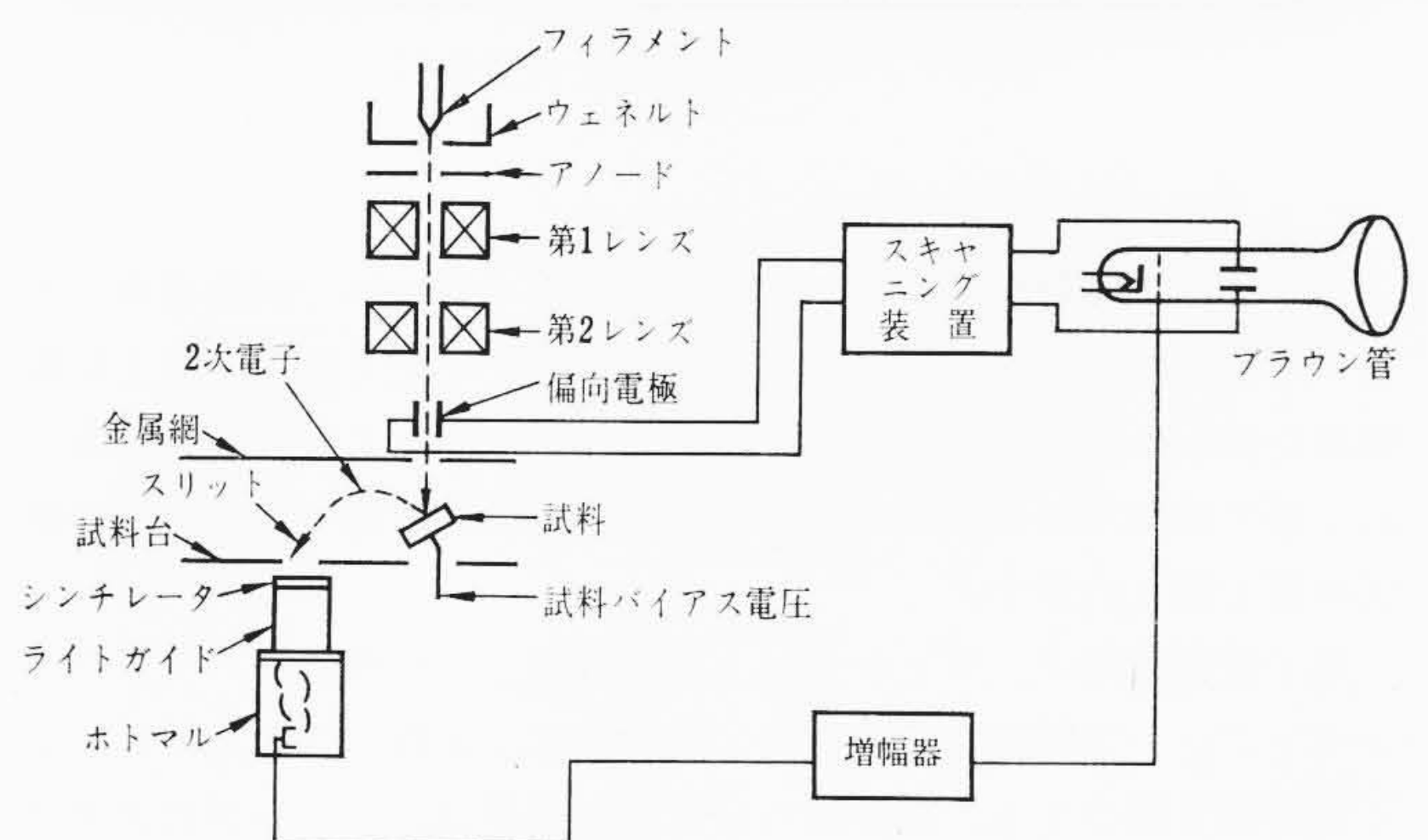
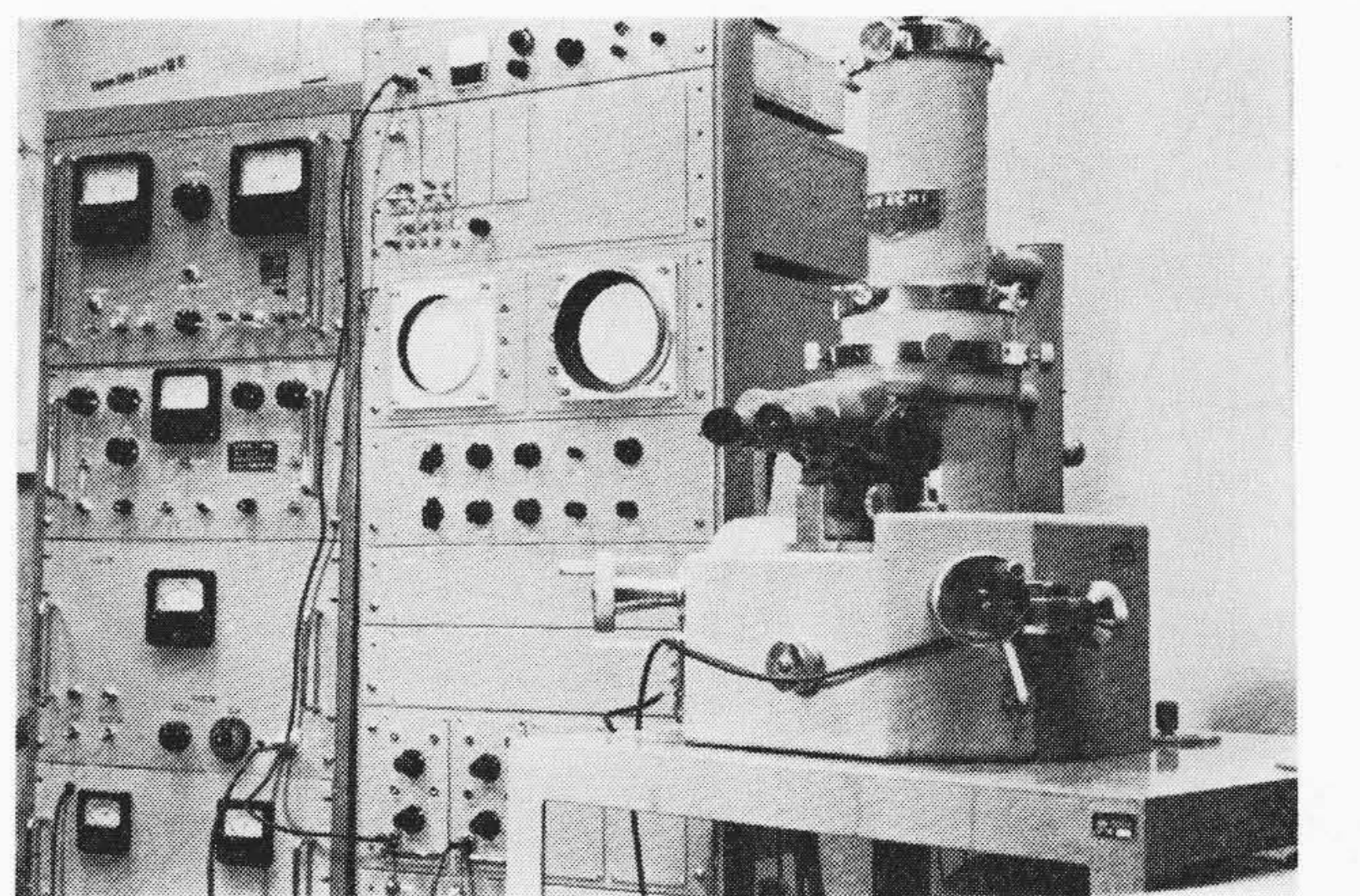


図1 走査型電子顕微鏡とその構成概略図

結果も報告されている。われわれは、より定量的に少数キャリアの拡散距離について測定した。

最近、電子起電力を検出する方法を用いて、半導体素子表面に形成された反転層の観察が行なわれている。D. Green 氏⁽⁴⁾らは Insulated Gate Tunneling 素子を観察し、ゲート電極に印加する電圧の変化にともなう、反転層の生成、消滅の様子を直接観察した結果を報告している。反転層は、現在 MOS 型電界効果トランジスタにおいて、その実用化が行なわれ、素子の特性上、反転層の生成とその制御とは重要な課題とされており、その直接観察の結果についても述べる。

2. 実験装置

走査型電子顕微鏡については、Mc. Mullan 氏⁽⁵⁾らによって詳細に検討されているので、ここでは簡単にその原理と構成の概略を記

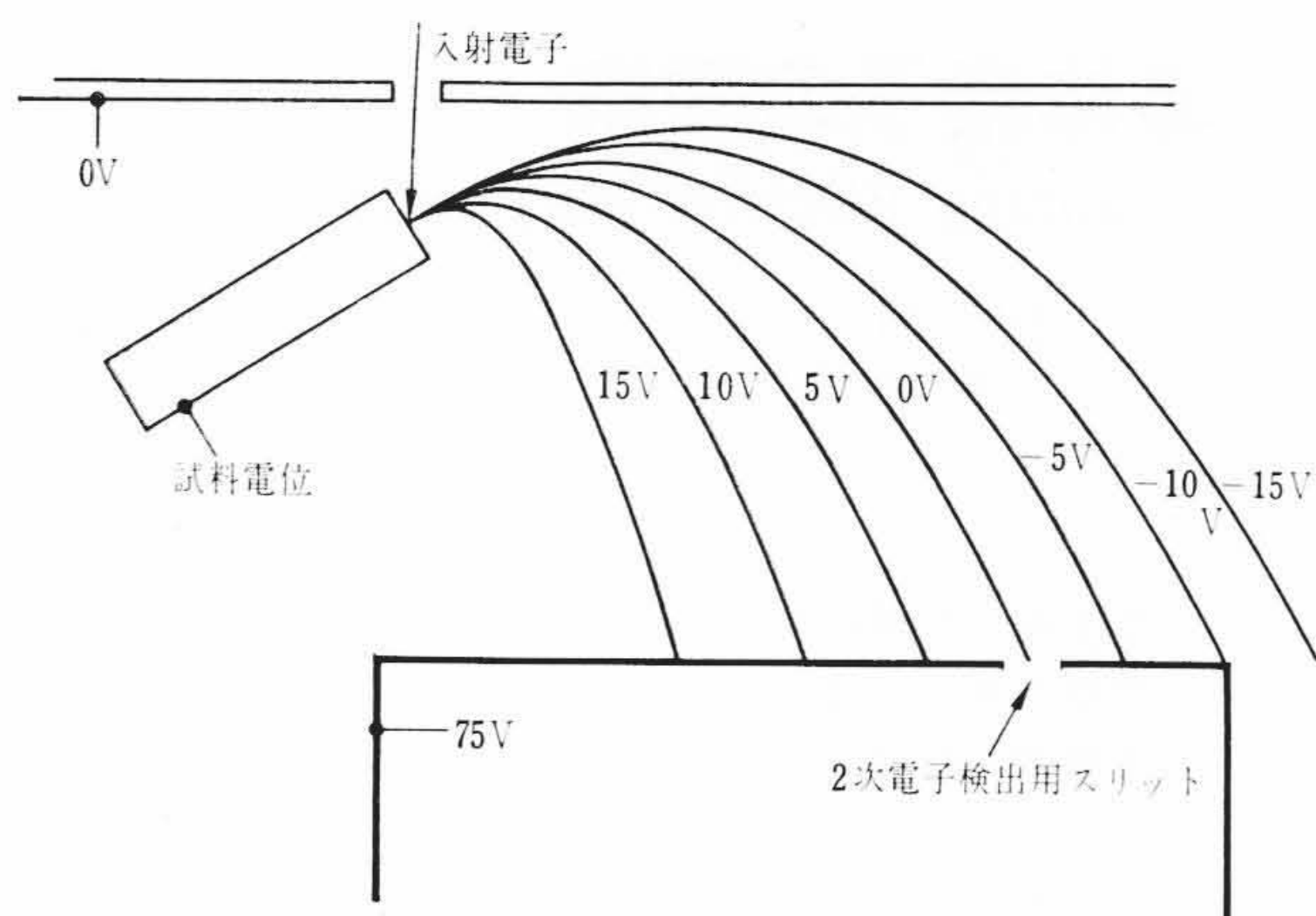


図 2 試料電位と二次電子の軌跡との関係

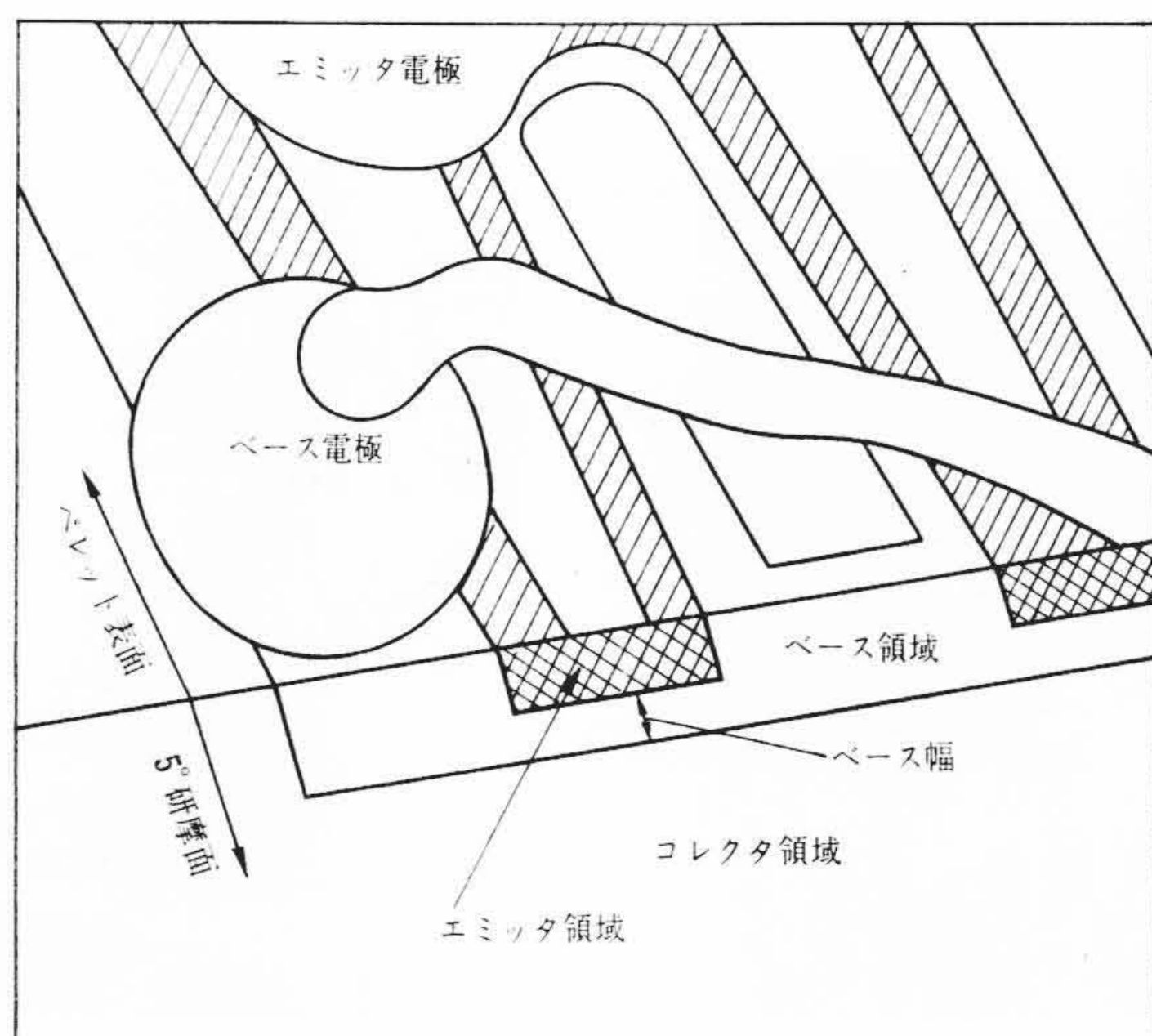


図 3 ベース幅測定試料説明図

すにとどめる。

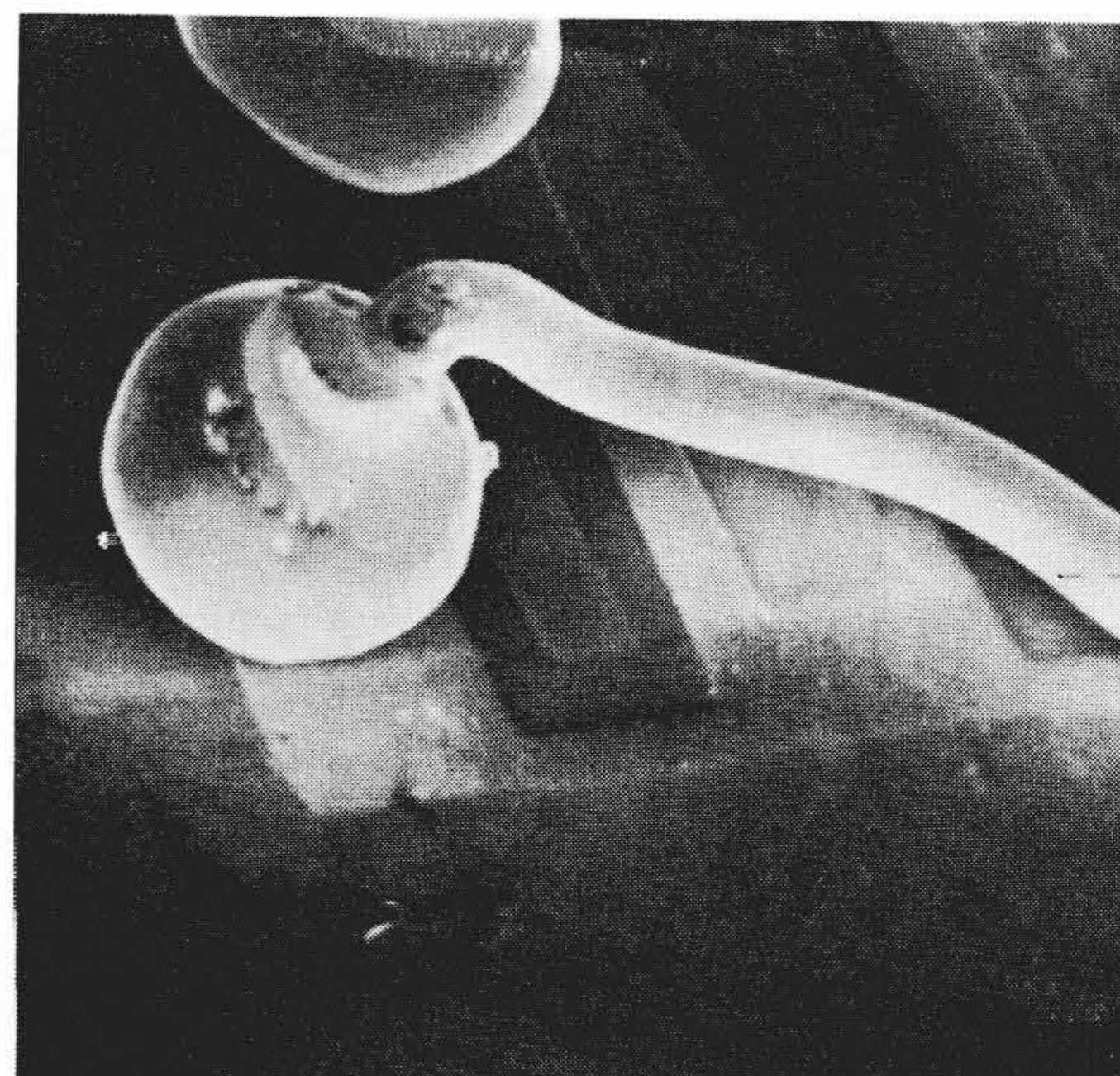
走査型電子顕微鏡は、細く絞った電子線プローブで試料表面を走査するための照射系と、走査電子線と同期させたブラウン管上に観察像を描かせる観察系、および、プローブによって得られる信号を取り出す検出系から構成される。走査型電子顕微鏡の外観とその構成略図を図 1 に示す。

電子線照射系は、フィラメントから放出された電子を、フィラメント・アノード間の高電圧によって加速し、2 段の電子レンズにより電子線を縮小する。顕微鏡の分解能の限界は、プローブの大きさによって与えられる。用いた装置の電子線の直径は約 0.1μ 、したがって、その分解能はそれと同程度である。

観察系は、電子線を走査するため偏向電極に鋸歯状の電圧を印加し、テレビの画面のように試料上を走査する。一方、同期したブラウン管をプローブから得られる信号によって輝度変調し、ブラウン管上の画像を観察する。走査は、検出系の周波数帯域を狭くできるなどの理由により低速走査をおこなっている。そのフレーム時間は、1 秒から 50 秒まで 4 段階、走査線の本数は 200 本から 2,500 本まで 4 段階に変えることができる。通常の観測には、フレーム時間 10 秒、走査線 1,000 本を用いる。

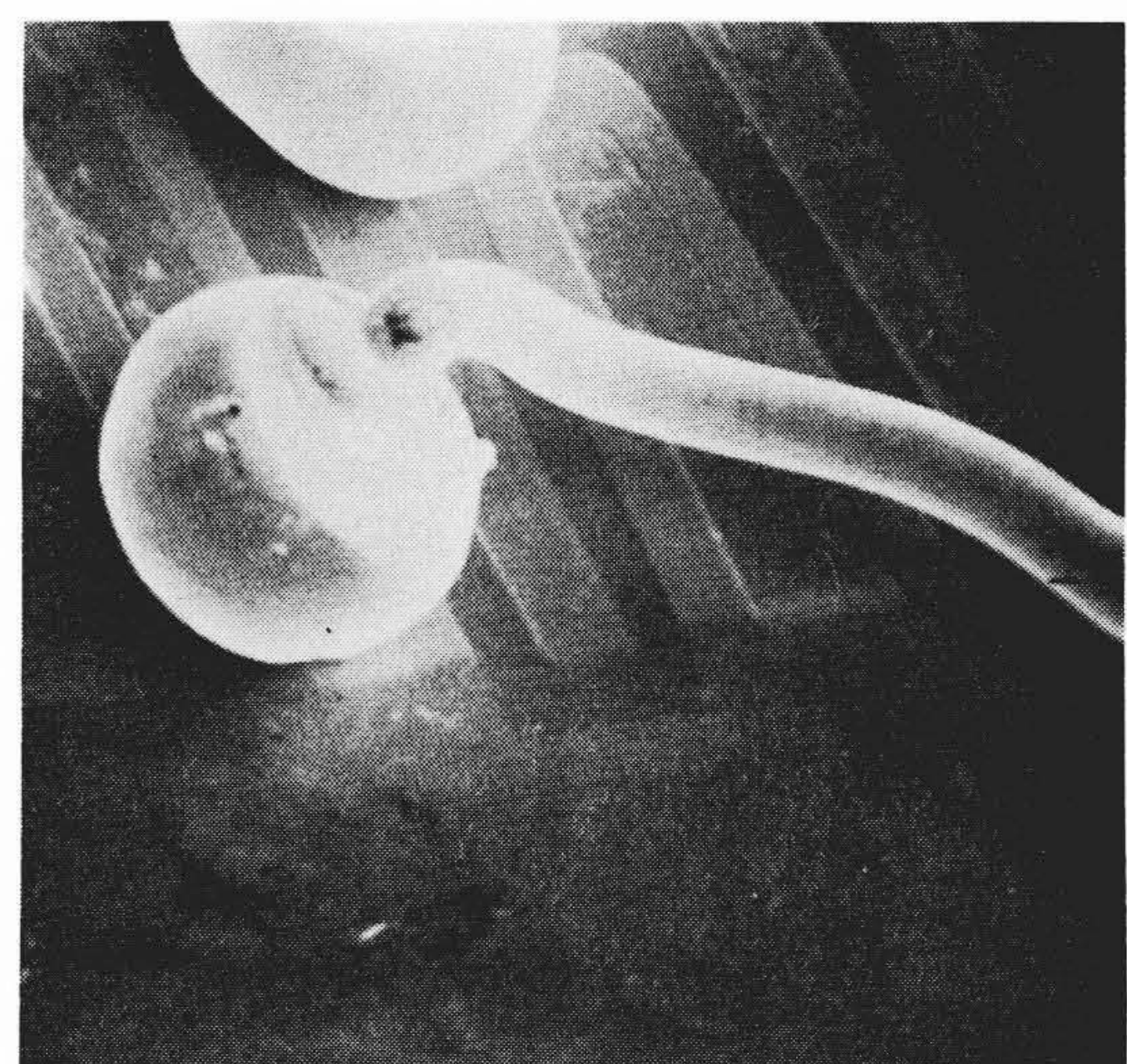
検出系には、電子線プローブが試料に照射された場合に表面から放出される 2 次電子、または、反射電子を検出、増幅する方法と、半導体などの試料に電子線を照射した場合に発生する電子起電力を検出する方法とが用いられる。前者にはエネルギー分析装置が用いられる。図 2 は 4 eV のエネルギーをもって放出された 2 次電子の軌跡を試料電位をパラメータとして求めたもので⁽²⁾、検出用スリットに到達する 2 次電子と、試料表面の電位との関係を示している。

使用した検出系では、2 次電子電流 10^{-13} A まで S/N 比 10 以上、周波数帯域 $0 \sim 100 \text{ kc}$ の特性をもち、2 次電子のエネルギー分析による電位分布の観察は、約 0.5 V 以下の感度を有している。後者は周波数帯域 $0 \sim 10 \text{ kc}$ 、利得 $20 \sim 1,000$ の特性をもつ電流増幅器である。以上のほかに、照射電子線が試料に吸収される電流を検出増幅する

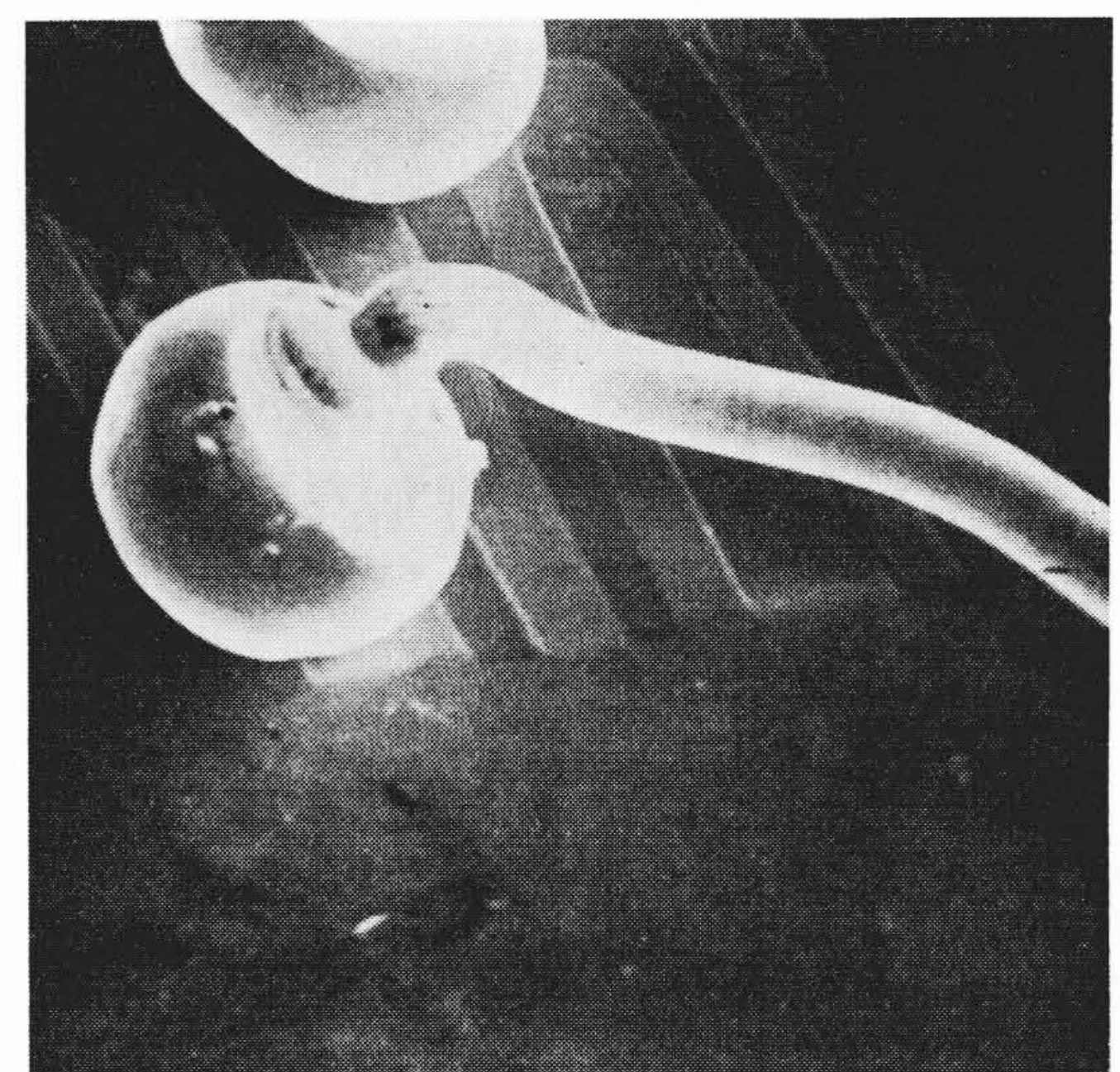


(a) $V_{CB} = +1.5 \text{ V}$, $V_{EB} = +1.5 \text{ V}$

60 μ



(b) $V_{CB} = 0 \text{ V}$, $V_{EB} = 0 \text{ V}$



(c) $V_{CB} = -0.5 \text{ V}$, $V_{EB} = -0.5 \text{ V}$

図 4 トランジスタのベース幅観察結果

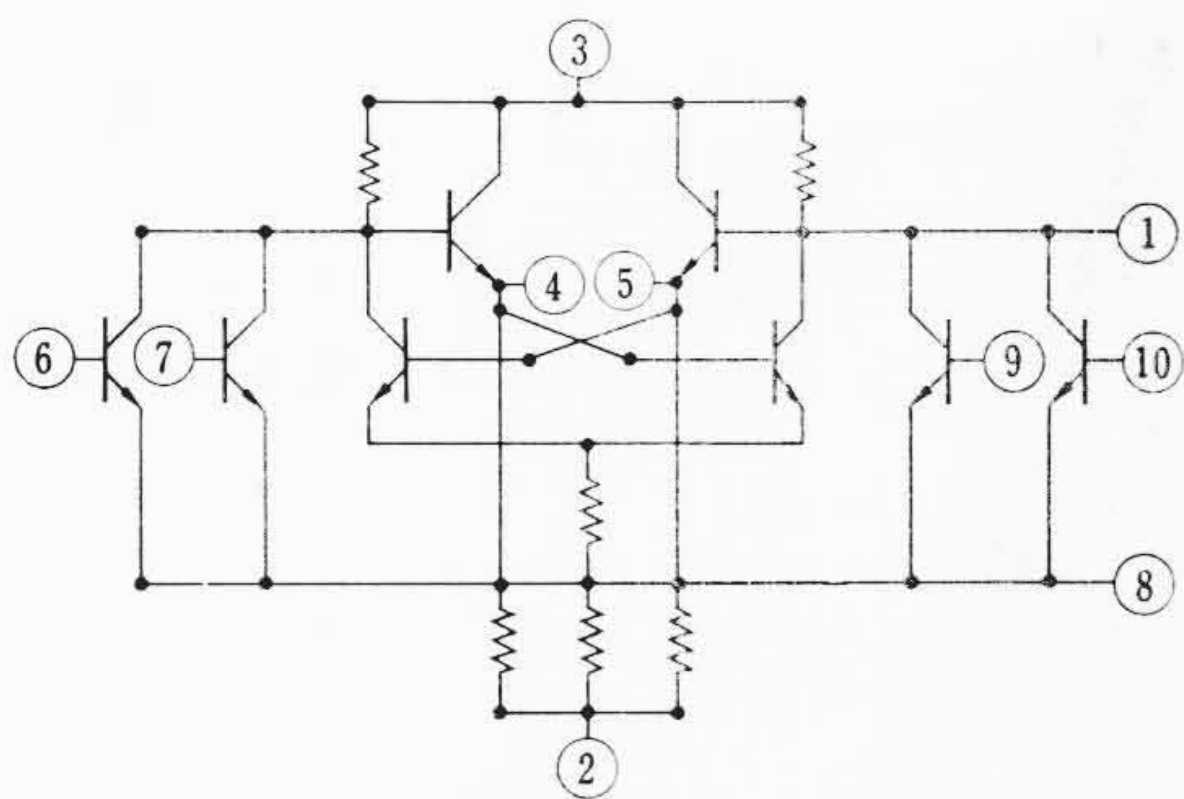


図5 集積回路構成図

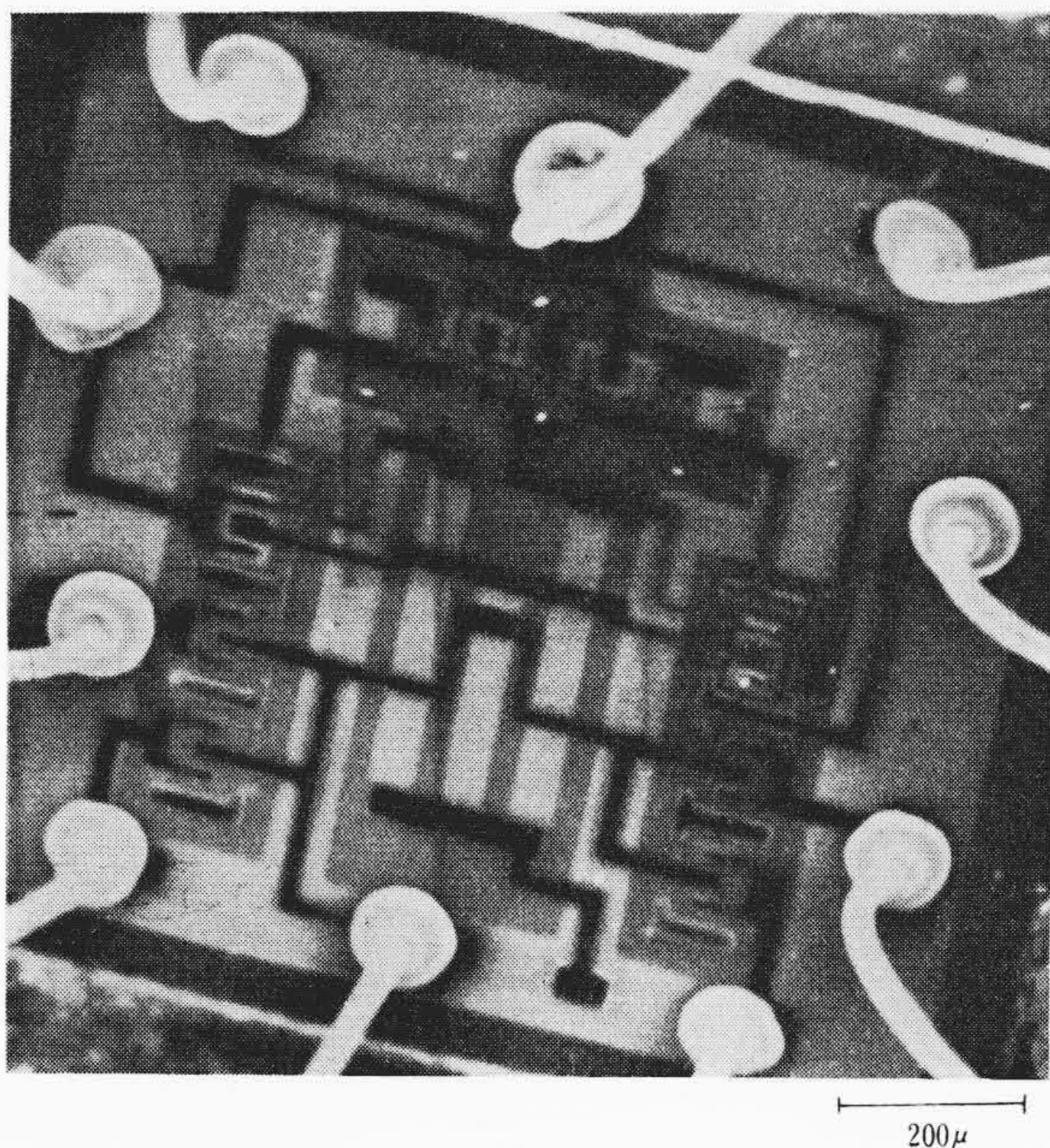


図6 集積回路の観察結果

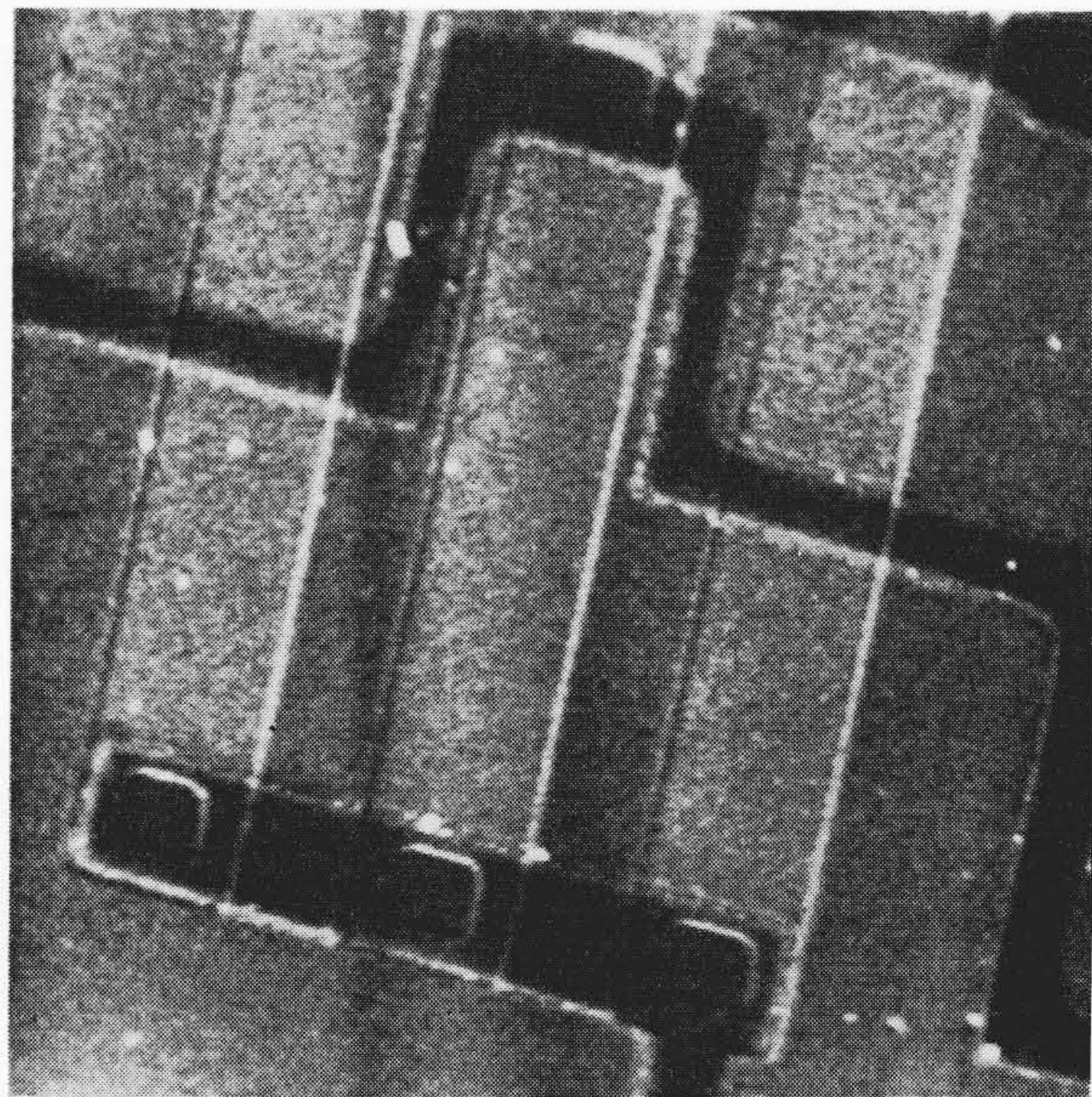
方法もあり、2次電子による信号と、電子起電力による信号とを同時に検出できる特長をもっているが、照射電子電流の減少とともにS/N比が極度に悪くなる欠点がある。上記の3方法によって観察する顕微鏡像は、それぞれ、2次電子像、電子起電力像、試料電流像とよばれている。

3. 実験結果とその考察

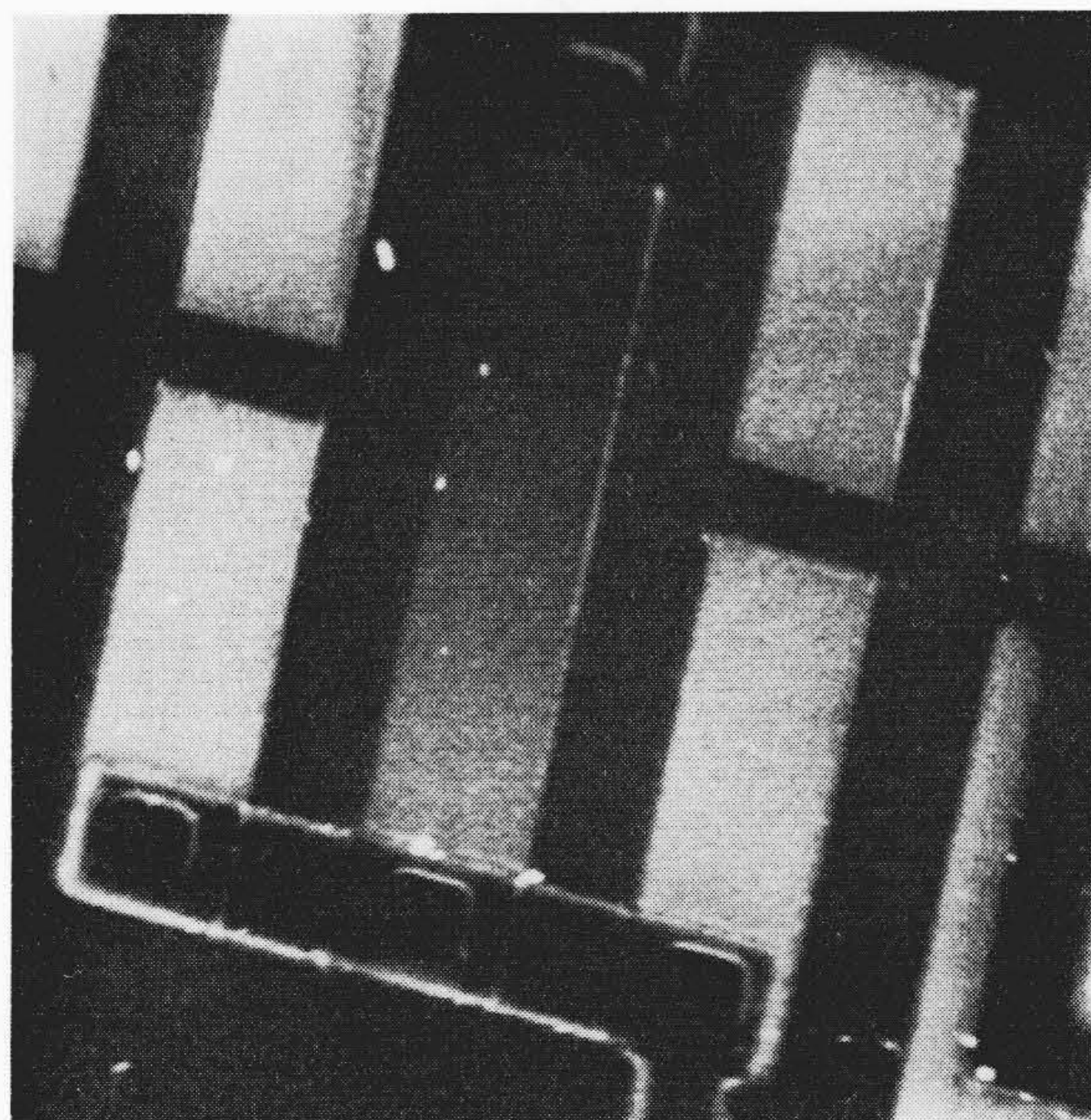
3.1 トランジスタのベース層の観測と電位分布の検出感度の検討

試料はシリコントランジスタのペレットの一部をその表面に対して図3に示すように5度の角度で斜め研磨し、エミッタ、ベース、コレクタの各領域の表面からの深さが研磨面にそって10倍に拡大されて観察できるようにした。図4(a)には、ベース領域を接地、エミッタ、コレクタの各端子に+1.5Vの電位を与え各領域の電位分布を走査型電子顕微鏡2次電子像によって観察した結果を示す。+1.5Vの電位を与えられた領域は黒く、接地されたベース領域は白くコントラストが生じている。黒い領域には含まれたベース層の幅を測定すると図4(a)から19 μ が得られ、ベース層の厚みとして1.9 μ が求められる。この測定法はステイニング法より精度が高く、特に、ステイニング法で測定できないゲルマニウムトランジスタのベース幅などの測定に有効である。

図4(a)の試料について、各領域に与える電位を変えて電位分布の検出感度を検討した結果は図4(b), (c)に示すとおりである。図4(b)はすべての領域の端子を接地した場合で、外部から電位を与えていないにもかかわらず各領域の間にコントラストがみられ



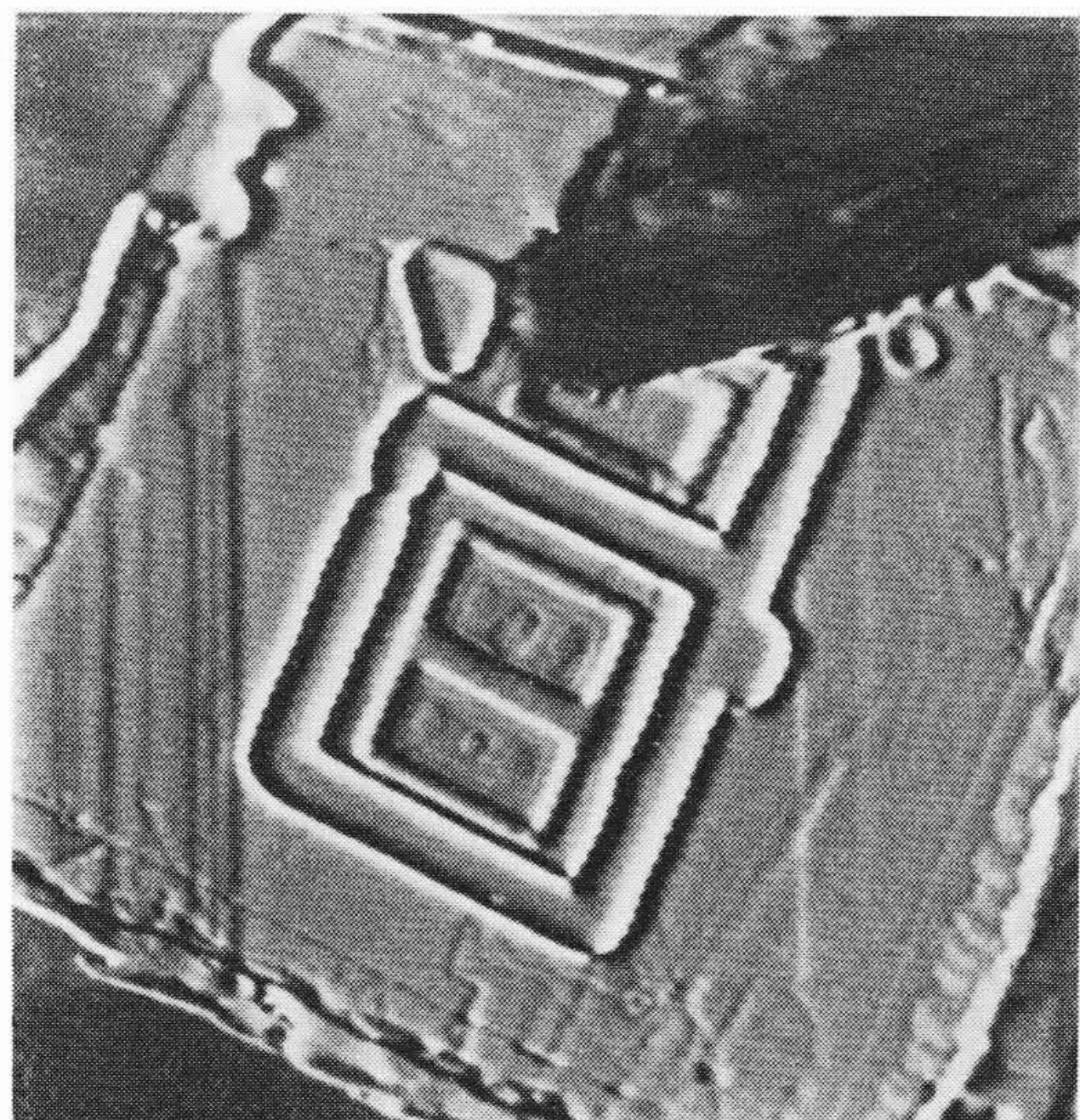
(a) 電位分布のない場合

50 μ (b) 中央の抵抗体の電位降下 5Vの場合
図7 抵抗体の電位分布の観察結果

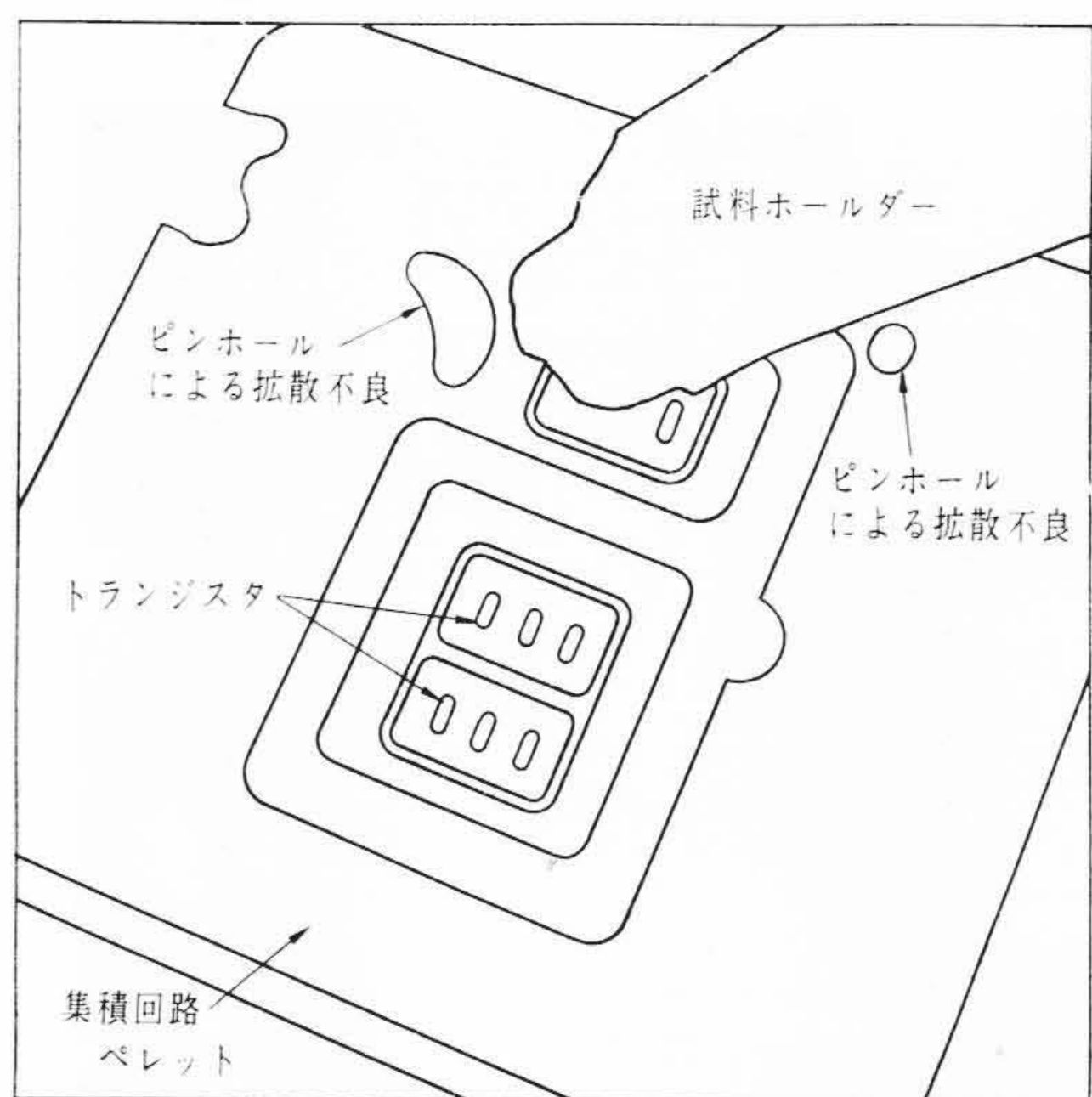
る。しかし、ベース領域のみを接地し、エミッタ、コレクタの端子を開放した図4(c)では、そのコントラストはまったく消失している。この場合、開放端子には接触電位差を打ち消す方向に約0.5Vの電位が発生している。図4(b), (c)の結果は、p型シリコンとn型シリコンとの間に存在する接触電位差によるものであると考えられる。各領域の間に接触電位差の存在する場合には、外部から与えた電位に接触電位差を加えて考慮しなければならない。またその電位分布の検出感度は接触電位差を含めて0.5V以下である。

3.2 集積回路の観察

前節の結果に基づき集積回路の観察を行なった。観察した集積回路は図5に示す構成をもっているが、その素子に外部から電位を与えず2次電子像を観察すると、集積回路の各領域に図6に示すようなコントラストができる。前節の結果より、白い領域はp型シリコン、黒い領域はn型シリコン、さらに黒い領域はアルミニウムの真空蒸着膜であり、上部に2個、両側にそれぞれ3個のトランジスタ、中央には抵抗体が配置され、そのトランジスタはnpn型の構造、抵抗体はp型シリコンであることが結論される。さらに、中央の抵抗体を拡大して観察した結果を図7に示す。(a)は抵抗体に



(a) 観察結果



(b) 説明図

図8 ピンホールによって拡散不良となった集積回路

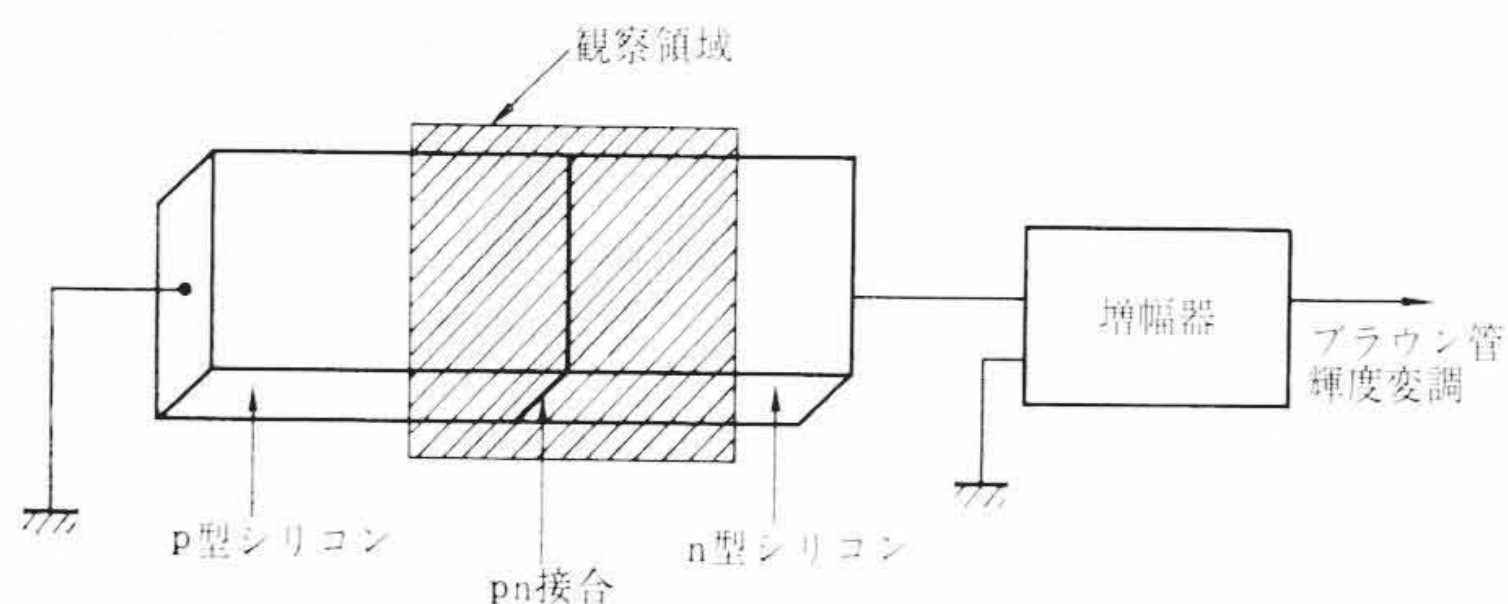


図9 ライフタイムの観測説明図

電位分布を与えない場合。(b)は中央の抵抗体の下方の端子を接地，上方の端子に+5Vの電位を与えて観察した結果である。(b)では，電位の上昇にともなう黒くなり，抵抗体の一様性について観察できる。抵抗体，蒸着配線などに断線不良のある場合にはその不良個所にコントラストが発生するので，複雑な回路構成をもつ集積回路においても簡単にその不良個所の検出を行なうことができる。

一方，試料電流像による集積回路の観察では，2次電子像に重畳して，pn接合の位置が電子起電力によって検出される。図8(a)にその観察結果，(b)にその説明図を示す。図に示したように，拡散マスクのピンホールによって予期しない位置にしま状の拡散が行なわれている。

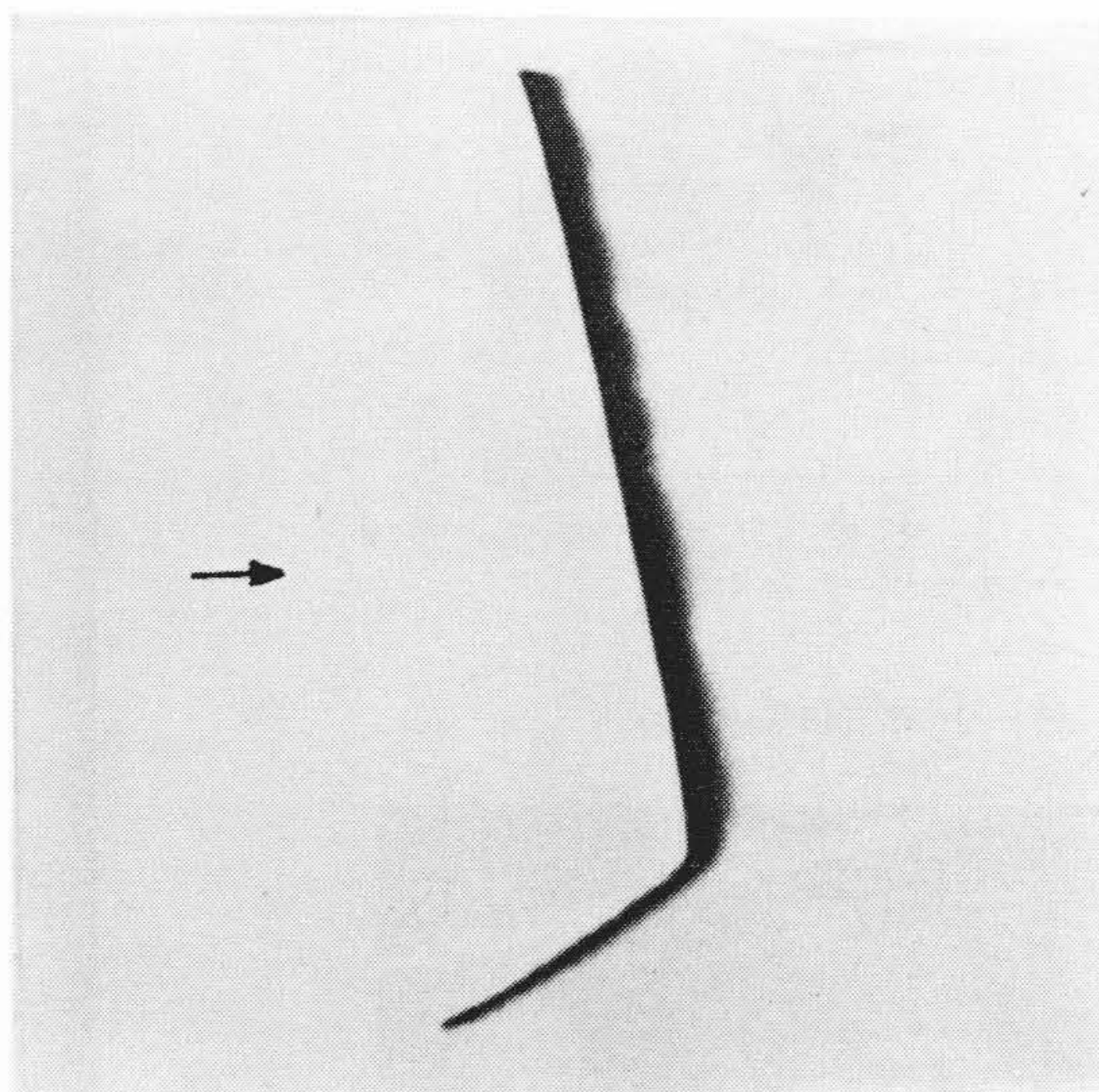


図10 ライフタイムの観察結果

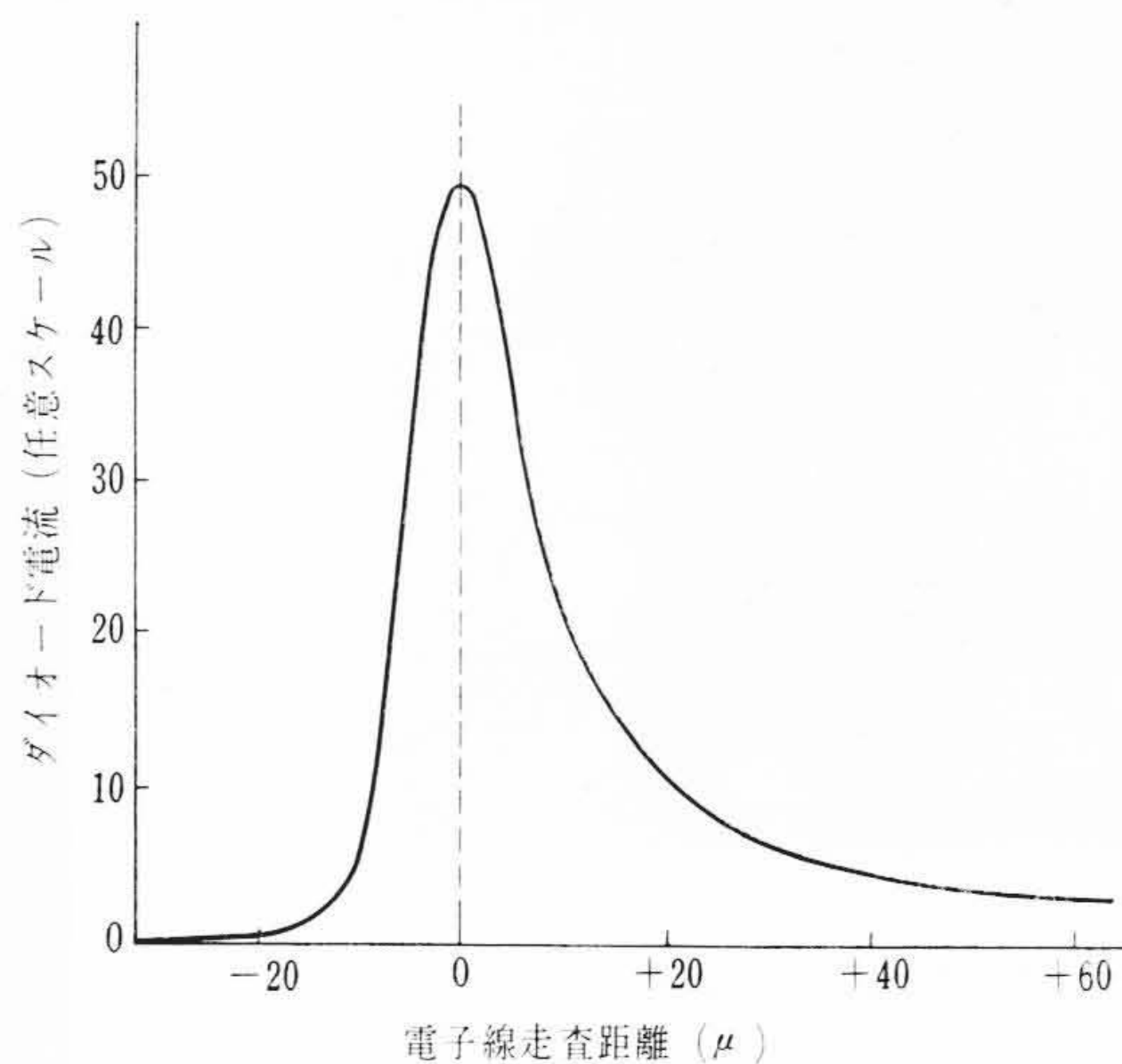


図11 電子起電力のラインアナリシス

アナリシスを行ないpn接合からの距離とその電流との関係を測定した結果を図11に示す。p型シリコン中ではその電流の減少はn型シリコン中よりもはなはだしい。この現象はp型領域の不純物濃度 10^{20} cm^{-3} ，n型領域の濃度が $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり，不純物濃度が高くなるにしたがい拡散距離が短くなる効果と定性的に一致する。p型領域の拡散距離は短く測定精度が劣るため，n型領域の少数キャリアの拡散距離について検討する。第1次近似では，拡散距離は電流値が最大値の $1/e$ に減少する距離として求めることができる。図11よりその距離を求めると，正孔の拡散距離 $L_p \approx 15 \mu$ が得られる。拡散係数 D_p とライフタイム τ_p の間には拡散係数を D_p とすれば次式の関係がある。

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

不純物濃度， $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ における拡散係数 $D_p \approx 5 \text{ cm}^2/\text{s}$ を用いて正孔のライフタイム $\tau_p \approx 0.5 \mu\text{s}$ が求まる。この測定法は従来困難とされている $1 \mu\text{s}$ 以下のライフタイムを比較的簡単に観測できるほか，結晶の位置に対応させることにより，局所的なライフタイムの変動を観察できる特長をもっているが，結晶表面の影響などについてさらに検討を必要とする。

3.4 チャンネルの観察

走査型電子顕微鏡を用いてMOS型電界効果トランジスタのチャンネルを観察した結果について述べる。試料の概略図と観測回路を図12に示す。試料はn型シリコン結晶上に，p型の領域を形成し， SiO_2 酸化膜上に設けたゲート電極の電圧によって，そのチャン

3.3 ライフタイムの観測

pn接合近傍に電子線を照射すると電子起電力効果のために起電力が発生し，その電流は電子線によって注入された少数キャリアがpn接合に到達する量に等しいから，p型シリコン，n型シリコンからの各端子を図9に示すように電流増幅器に接続し走査型電子顕微鏡像を観察すれば，pn接合近傍の少数キャリアの拡散距離ならびに，ライフタイムを結晶の位置に対応させて観察できる。図9に示した試料の観察結果を図10に示す。中央の黒い帯状のコントラストは電子線照射によって起電力の発生した領域に対応する。その幅にゆらぎがみられるのは，結晶の欠陥などのために結晶の位置により拡散距離が変化していると考えられる。また図10に矢印で示した方向にライン

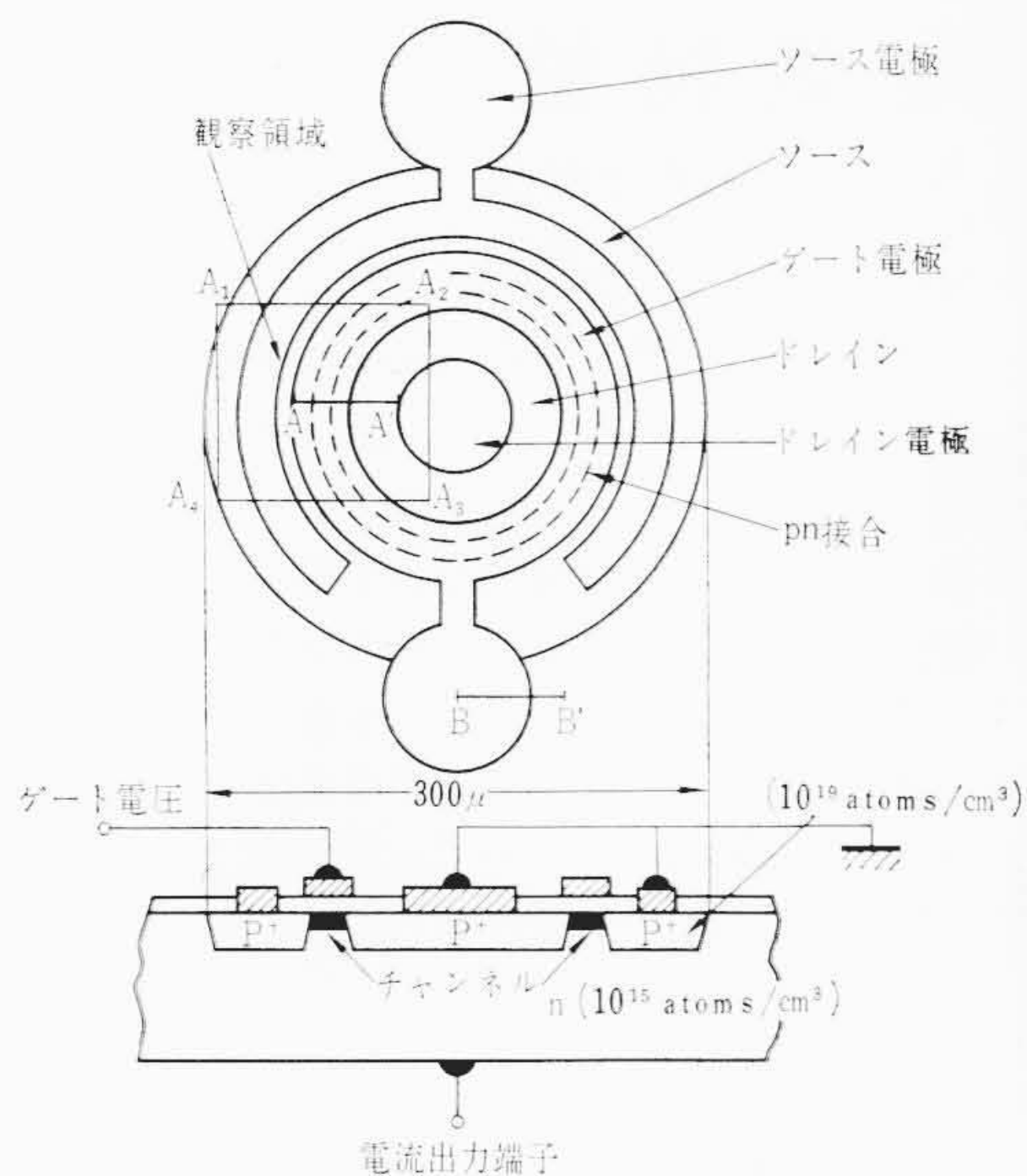
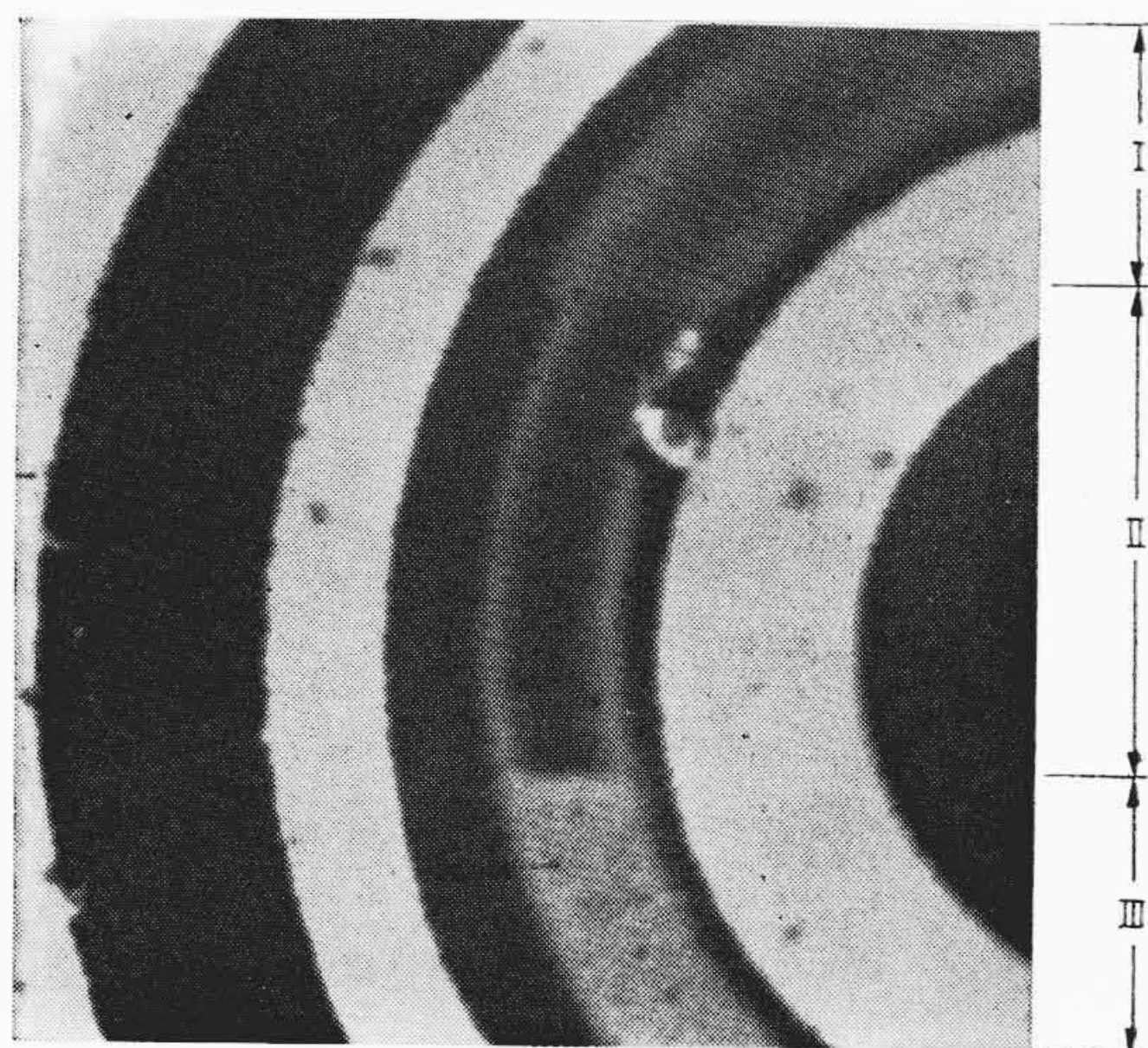


図12 MOS型電界効果トランジスタ説明図



領域 I, II, III のゲート電圧はそれぞれ 0 V, -15 V, -25 V である。

図13 電界効果トランジスタのチャンネル観察結果

ネルの特性を制御できるように設計されている。ゲート電極に負の電圧を印加すると、ゲート電極下のn型シリコンの表面がp型に反転し、ドレイン・ソース間は電気伝導を示す。観測には図12に示すようにp⁺領域を接地し、n領域の端子に流れる電流を走査型電子顕微鏡のブラウン管輝度変調信号として用い、ゲート電圧の変化にともなうチャンネルの状態を観察した。

図12にA₁, A₂, A₃, A₄で示した領域の観察結果を図13に示す。領域(I), (II), (III), はゲート電極にそれぞれ0V, -15V, -25V, の電圧を印加した領域に対応する。観測に用いた電子線のエネルギーは12 keVであり試料を透過する深さは1μ程度であるため、図13(I), (II)の領域ではアルミニウム蒸着電極におおわれている領域は、p領域の底に存在するpn接合に到達できず電子起電力は発生していない。しかし、チャンネルが誘起された(III)ではゲート電極の下にチャンネルに対応したコントラストが発生している。図13のコントラストについて、さらに定量的な検討をするため、図12のAA'線上の電流を測定した結果を図14に示す。電流の測定結果では、ゲート電圧0Vにおける電流が-15Vの電流より多くなっている、電流の検出される位置がpn接合よりもp⁺領域に広がっている。これは、ゲート電圧0Vにおいては、p⁺領域の表面にn型反転層が形成されていて、ゲート電圧-15Vでは、その

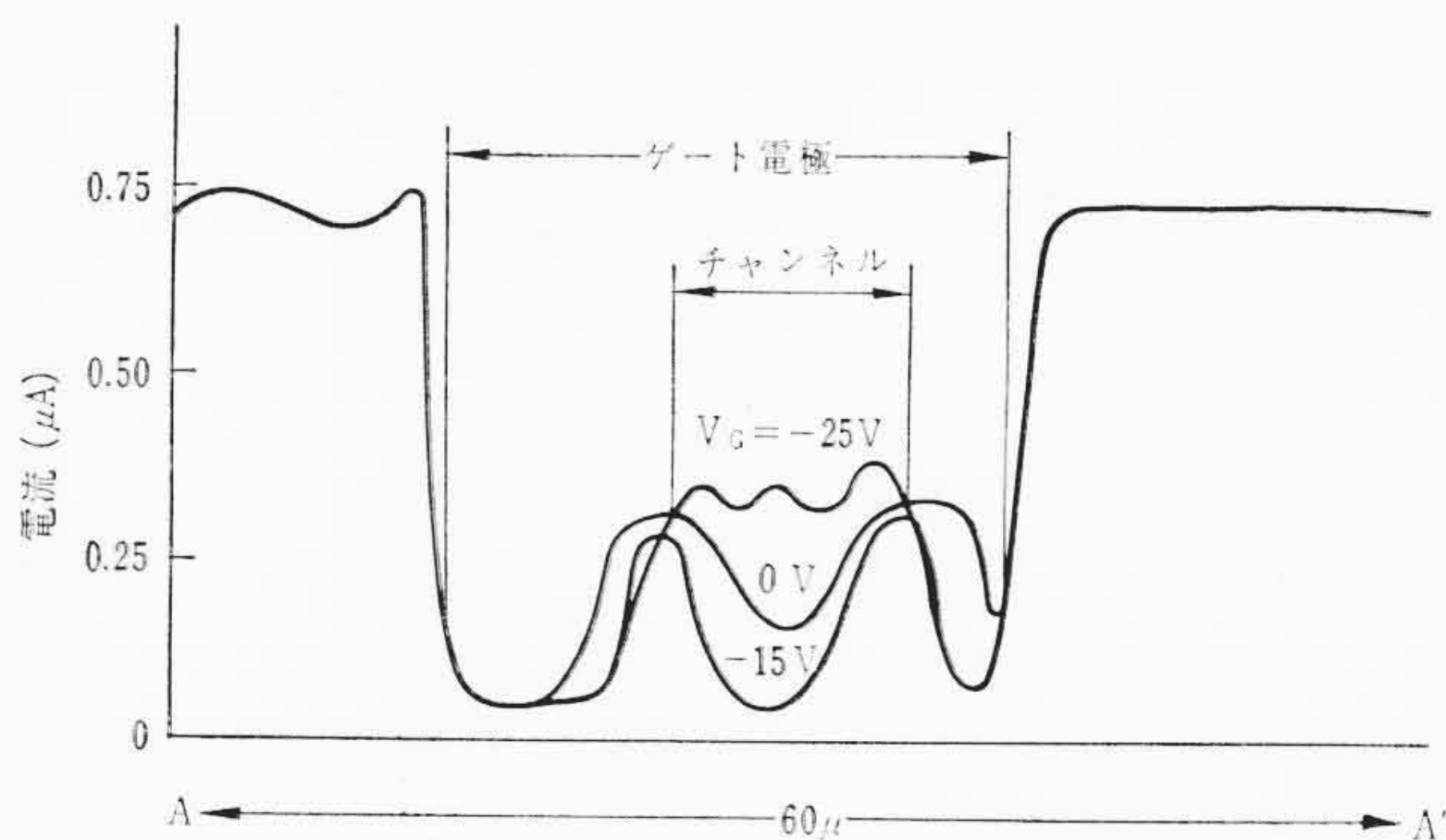


図14 AA'線上(図12)の電流測定結果

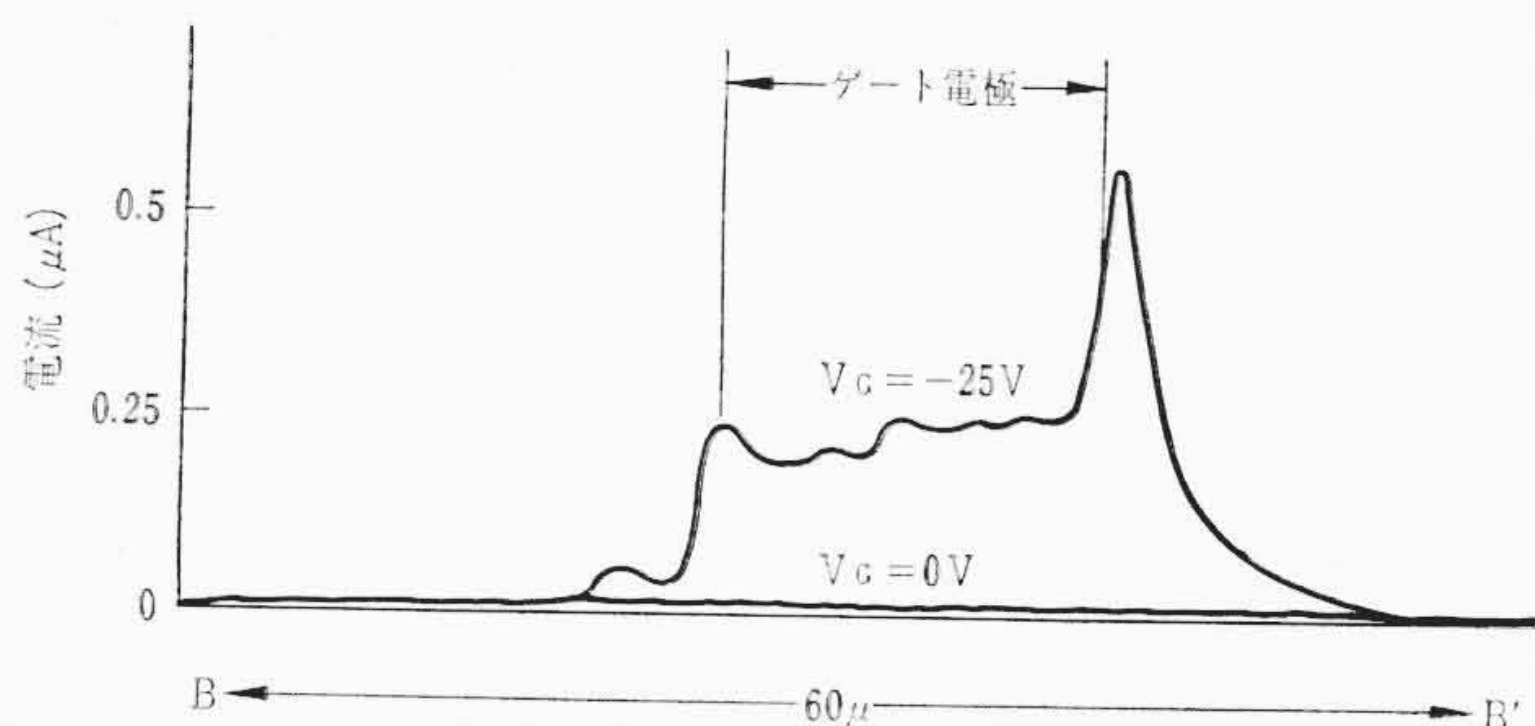


図15 BB'線上(図12)の電流測定結果

15に示す。ゲート電圧0Vでは電子起電力による電流はまったく検出されず、チャンネルが発生していないことを示している。-25Vにおいては、検出される電流より、n型シリコン表面にp型の反転層が誘起されたと思われる。電子起電力が反転層においても発生する現象は、チャンネルにpn接合同様に拡散電位が存在することを示すもので、電子起電力のさらに定量的検討が必要である。

4. 結 言

走査型電子顕微鏡を用いて各種半導体素子の直接観察を行ない次の結果が得られた。

2次電子電流を用いた観察では、試料表面の幾何学的状態の観察とともに、光学顕微鏡などでは観察できない試料表面の電位分布が観察され、半導体素子ではその接触電位差によってpn接合の観察を行なうことができる。また、トランジスタのペレットの断面を観察して、そのベース層の厚みを測定し、従来の測定法による測定値とよい一致が得られた。

一方電子起電力による観察では、pn接合近傍の少数キャリアの拡散距離およびライフタイムを結晶の位置と対応させて観察した。この方法によれば1μs以下のライフタイムが測定できる。電界効果トランジスタの観察では、チャンネルの誘起される状態を直接観察し、その信号の定量的測定を行なって、ゲート電圧の変化にともなうチャンネルの変化について検討を加え、顕微鏡像との対応を明確にした。

以上の結果は、走査型電子顕微鏡が半導体素子の観察に用いられる可能性を示したもので、その実用化は今後の課題であると思われる。

終わりに、本研究にあたり激励をいただいた日立製作所中央研究所只野技師長、直接ご指導を賜った木村部長、戸村主任研究員、試料を提供していただいた高木研究員ならびに日立製作所武蔵工場大野主任技師のかたがたに深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) M. von Andenne: Zeit. für phys. 109, 553 (1939)
- (2) T. E. Everhart: J. Electronics and Control. 7, 97 (1959)
- (3) W. Czaja: J. Appl. Phys. 36, 1476 (1965)
- (4) D. Green: Proc. IEEE. 53, 183 (1965)
- (5) Mc Mullan: Proc. Instr. Elect. Engrs. 100, 245 (1953)