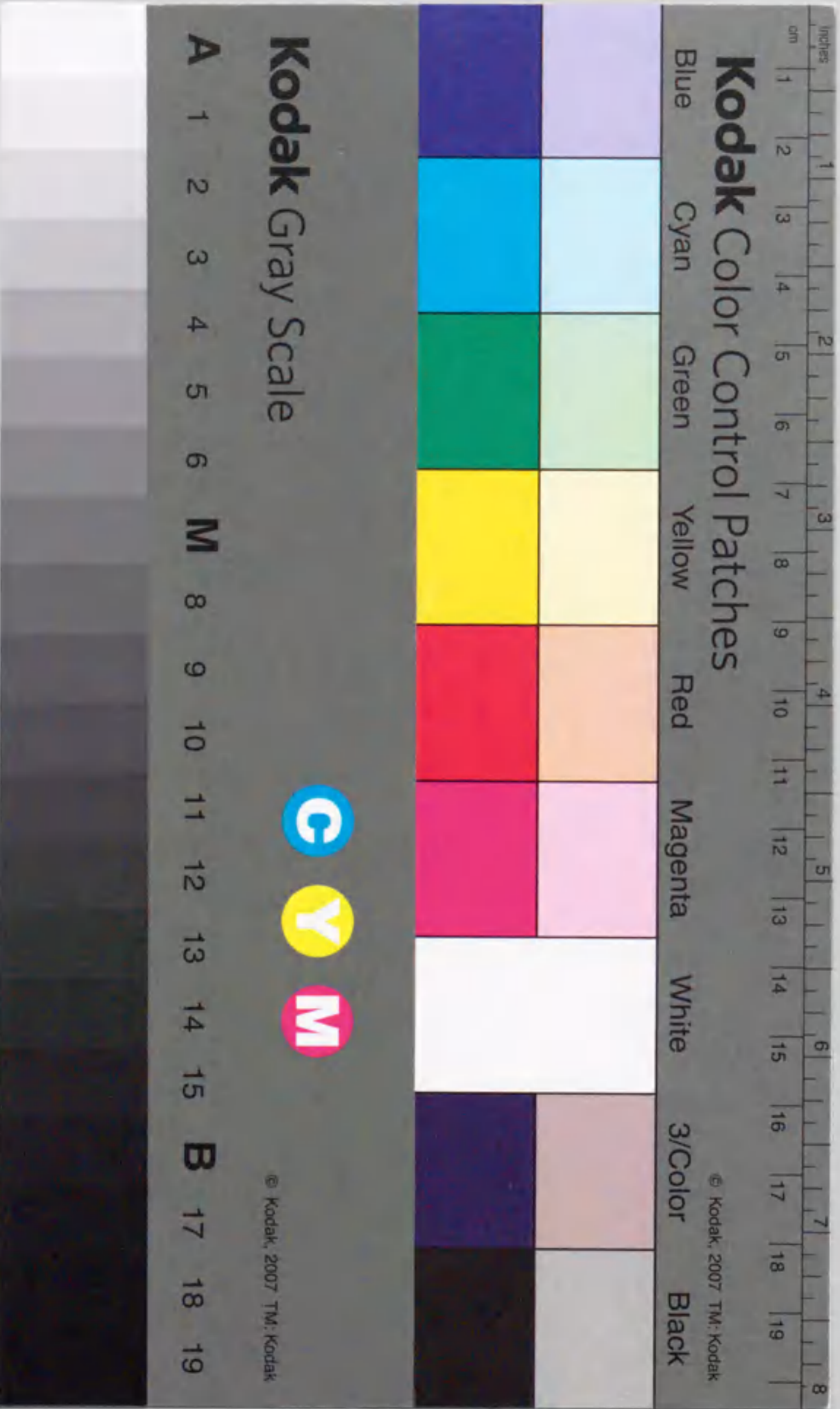


報告番号 乙第 5436

半導体デバイス製造における
電子ビーム利用技術の開発に関する研究

水野文夫



目次

1. 緒言	
1.1 背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 論文概要	4
2. 電位観測用走査電子顕微鏡の研究	
2.1 はじめに	11
2.2 低加速・電位観測用SEMの装置構成	12
2.2.1 冷陰極・電界放出型電子銃	
2.2.2 エネルギー分析機能付き二次電子検出器	
2.2.3 電源電圧・信号電圧印加機能	
2.3 低加速・電位観測用SEMの性能評価	16
2.3.1 チャージアップとデバイス損傷の軽減	
2.3.2 低加速・電位観測用SEMによる故障解析	
2.4 定量化のための基礎的検討	19
2.5 まとめ	21
3. 測長用走査電子顕微鏡の研究	
3.1 はじめに	47
3.2 測長精度の解析	47
3.3 測長精度の向上	49
3.3.1 電子ビーム径の縮小	
3.3.2 高分解能の維持	
3.3.3 測定性能を決める装置要因の精密制御	
3.4 実験結果	53
3.5 まとめ	53
4. ウエハ外観観察用走査電子顕微鏡の研究	
4.1 はじめに	73
4.2 インレンズSEMの装置構成	73

4.2.1	対物レンズ	
4.2.2	試料ステージとアクチュエータ	
4.3	インレンズSEMの性能評価	76
4.4	まとめ	77
5.	深穴観察用走査電子顕微鏡の研究	
5.1	はじめに	95
5.2	深穴観察装置の観察原理と装置構成	95
5.2.1	深穴観察装置の観察原理	
5.2.2	深穴観察装置の装置構成	
5.3	深穴観察装置の性能評価	96
5.4	デバイス損傷とチャージアップの評価	99
5.5	考察	102
5.5.1	深穴観察についての考察	
5.5.2	内部構造観察についての考察	
5.6	まとめ	104
6.	電子ビーム直接描画技術の研究	
6.1	はじめに	133
6.2	ホトマスク製作技術	135
6.2.1	2 μ mホトマスク製作技術	
6.2.2	サブミクロン・ホトマスク製作技術	
6.3	ウェハ直接描画技術	147
6.3.1	サブミクロン・ウェハ直接描画技術	
6.3.2	サブハーフミクロン・ウェハ直接描画技術	
6.4	まとめ	156
7.	結言	
7.1	本研究の成果	229
7.2	今後の課題と展望	232
8.	参考文献	234
9.	謝辞	237

1. 緒言

1.1 背景

電子ビームは、光ビームやイオンビームに比べると、より微細化できる上に、高速・高精度での制御が可能である。このため、半導体デバイス製造の各種工程に、電子ビーム(EB)技術が利用されている。ウエハ加工に於いてリソグラフィで用いられるEB直接描画技術、¹⁾ インラインでの検査に於いてパターン寸法測定に用いられるEB測長技術、²⁾ そしてオフラインでの不良解析手段として電気特性測定に用いられる電圧コントラスト法、³⁾ 等である。(図1.1)

これらEB技術の中でも、高精度の寸法測定が可能なEB測長技術、高解像度でのパターン形状観察が可能なEB外観検査技術、微小部の非接触電位観測が可能な電圧コントラスト法、および微細パターンの形成が可能なEB直接描画技術は、半導体デバイス製造に不可欠の技術となっている。(図1.2)

EB測長・EB外観検査・電圧コントラスト法などの電子ビーム計測技術は、走査電子顕微鏡(SEM; Scanning Electron Microscope)の応用である。SEMの観測原理を図1.3に示す。電子ビームを試料(ウエハ)表面に照射すると、電子ビームが試料物質と相互作用し、照射部分から二次電子などの二次粒子が放出される。これ等の二次粒子を検出し、その強度変化を電気信号に変換する。電気信号はディスプレイ上での像形成に用いられる。ディスプレイは電子ビームに同期して走査しており、電子ビームを二次元走査しディスプレイを輝度変調すれば、ディスプレイ上に試料像が得られる。一次元走査し振幅変調すれば、ラインプロファイルが得られる。試料像を用いてパターン形状や電圧コントラスト像の観察、ラインプロファイルを用いてパターン寸法や電位の測定を行う。

電子ビーム計測に於ける技術開発の方向は、「見えないものを見るようにする」ことである。半導体製品の開発に於ける所要期間の短縮、製造に於ける歩留りの短期・飛躍的向上、使用時に於ける信頼性の向上といった課題に対し、課題解決の基本は「不良現物を眼で観る」ことにある。また、「眼に見えるようにする」ことは、パターン寸法測定精度(測長精度)や電位観測精度を上げることにも繋がる。見えることの効果が如何に大きいのか、その例を図1.4に示す。16M-DRAMのメモリセルを観察した結果である。“分解能12nmの眼”で観ると、パターンは上手く加工できているようであり、異常を発見できない。しかし、“分解能4nmの眼”で見ると、メモリセル側壁にエッチング残りのあることが分かる。分解能4nmの写真に示す如く、異常を発見できれば、直

ちに改善の手を打つことができる。しかし、分解能12nmの写真の如く、異常に気が付かず見逃したままであると、製品開発は遅延し、歩留りは低迷を続け、信頼度不良は頻発することになる。“製品開発遅延、歩留り低迷、信頼度不良”に陥らないための技術研究・開発方向は、「ぼんやりとしか見えないものをはっきりと見えるようにする」ための高分解能化推進と、「今まで見ることが及びもつかなかったものを見ることができるようになる」ための観察限界打破である。

半導体デバイス製造に使われた“最初の観察限界打破技術”は、電圧コントラスト法である。電圧コントラスト法は、微細パターンの電位観測を目的として研究・開発が行われた。電位観測には、従来、メカニカル・プローブ法が用いられてきた。メカニカル・プローブ法は、メカニカル・プローブ(針状電極)を被測定パターンに接触させて、電位を直接測定する方法である。針の先端径は数百nm程度が微小化の限界であり、ミクロン・パターンの電位観測は不可能であった。(図1.5) 一方、電圧コントラスト法は、極細電子ビームをプローブとして用いるため、サブミクロン・パターンの非接触電位観測が可能である。しかし、電圧コントラスト法を実用化するためには、“電子ビームに因る試料の照射損傷およびチャージアップ”が障害となっていた。

E B測長・外観検査技術は、従来の光学顕微鏡に代わり、1980年代中頃から半導体デバイス製造のインライン検査に用いられ始めた。E B測長・外観検査では“高分解能化の推進”を基本として、技術研究・開発が進められてきた。高分解能化の推移を図1.6に示す。パターンは、世代毎に約0.7倍/3年の割合で縮小されてきた。パターンの微細化に合わせて、プロセス技術や検査装置への要求性能は厳しくなる。要求に応えるため、次々と、新しい検査装置が開発されてきた。代表的な機種として、日立製作所製装置の推移を図1.6に示す。しかし、半導体製品の世代交代が速いために、装置性能が要求に応えきれない傾向にあるのも事実である。

E B直接描画技術は、電子ビームを“筆”として、電子線レジストを塗布したウエハ上にパターンを直接描いてゆく方法である。電子ビームは光よりも波長が短いために、汎用的な光露光技術に比べて、より微細なパターンを形成できる点に特徴がある。

E B直接描画技術は、微細加工性を活かして、1980年頃まずホトマスク製作に実用化された。その後、“1 μ mの壁”として光露光技術の限界が説かれ始めるとともに、ウエハ直接描画への適用が検討されるようになった。

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、0.7倍/3年のパターン微細化を推進して行くため、先端的電子ビーム利用技

術を半導体デバイス製造に早期実用化することである。本研究で扱う先端的電子ビーム利用技術は、電圧コントラスト法、E B測長技術、E B外観検査技術、およびE B直接描画技術である。

電圧コントラスト法では、実用化するための障害になっていた“電子ビーム照射に因る試料の損傷およびチャージアップ”の問題を解決するために、“低加速電圧観察技術”を研究し、1980年に世界に先駆けた実用装置としての低加速・電位観測用SEMを開発した。この装置は、デバイス駆動用のパターン信号発生機能を有し、LSIを動作状態で非破壊観測できた。

E B測長・外観検査技術では、パターン微細化の進展に合わせて装置性能の向上を図るために、1990年に日立製作所製装置、S7000、を対象とした高分解能化の研究・開発(図1.6のS7000改)、1992年に分解能の飛躍的向上を図るべく新しい設計概念(対物レンズの中に大型試料ステージを組み込む構成)のインレンズSEMを研究・開発した。S7000改、インレンズSEMともに、当時の世界最高性能を実現したものである。なお、これら装置には、低加速・電位観測用SEMで開発した低加速電圧技術が応用されている。一方、E B測長・外観検査に於ける“観察限界の打破”という視点からは、1991年に新しい観察原理(反射電子により発生する二次電子を像形成に用いる方式)を見出し、高加速電圧を用いた深穴観察装置を研究・開発した。深穴観察装置は、コンタクト不良(半導体デバイス製造における最重要問題の一つ)の発見に有効な世界最初の装置であり、E B外観検査の新しい応用分野を拓いた。

E B直接描画技術では、国内他者に先行して1980年代初めに、E B直接描画を用いたホトマスク製作技術を開発した。実用化した開発技術は、点ビーム・ラスタ走査方式のE B描画装置と膨潤性のネガ型電子線レジスト・プロセスである。その後、高解像な非膨潤性ポジ型電子線レジスト・プロセスを開発し、ホトマスクパターンの微細化・高精度化を図った。そして、1990年代に入ると、「位相シフト露光法が光露光技術の解像限界を延ばすために有力な技術である」と考えられるようになった。このような動きを先取りし、世界に先駆けて、位相シフトレチクル製作技術を研究・開発した。

ホトマスク製作で開発したE B描画・プロセス技術を基礎として、ウエハへの直接描画技術を開発した。1980年代半ばの実用化は、国内では最初、世界的にはIBM社に次いで二番目であった。実用化のために開発した技術は、可変矩形ビーム・ベクタ走査方式のE B描画装置と非膨潤性のポジ型電子線レジスト・プロセスであった。その後、1980年代後半から1990年代初期にかけて、高速なキャラクタビーム・ステージ連続移動方式のE B描画装置と高感度・高解像な化学増幅系ポジ型/ネガ型電子線レジスト・プロセスの研究・開発を進め、高スループット化・高精度

化を推進した。

1.3 論文概要

本論文は、半導体分野に於ける電子ビーム利用技術に関し、筆者が係わった研究・開発の成果を纏めたものである。内容は本章を含む7つの章により構成されている。以下、各章ごとにその概要を述べる。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ本研究の位置付けを行うとともに、本論文の構成と概要を示した。

第2章では、電位観測用走査電子顕微鏡の研究に関して、低加速・電位観測用SEMの研究・開発成果を纏めた。研究・開発の背景と目的を述べた後、低加速電圧技術実用化に伴う装置開発上の課題と開発した技術、開発装置の構成と性能評価結果、および故障解析への適用例と効果を示した。

第3章では、測長用走査電子顕微鏡の研究というテーマの下、EB測長精度についての研究・開発成果を纏めた。測長精度を決定する要因の解析を行った後、測長精度向上のための検討と改善結果について示した。

第4章では、ウエハ外観観察用走査電子顕微鏡の研究というテーマの下、インレンズSEMの研究・開発成果を纏めた。研究・開発の目的・経緯を述べた後、開発装置の特徴、開発した技術、性能の評価結果、および適用効果について示した。

第5章では、深穴観察用走査電子顕微鏡の研究というテーマの下、深穴観察装置の研究・開発成果を纏めた。研究・開発の目的、観察原理、装置構成について述べた後、適用例・適用効果、および観察限界の考察結果について示した。

第6章では、電子ビーム直接描画技術の研究に関して、EB直接描画技術の研究・開発成果を纏めた。前半はホトマスク製作技術について述べた。内容は、2 μ mホトマスクおよびサブミクロン・ホトマスク製作技術に係わる課題と、開発した技術、および適用結果を示した。後半はウエハ直接描画技術について述べた。内容は、サブミクロン・ウエハ直接描画技術とサブハーフミクロン・ウエハ直接描画技術に係り、その技術課題と開発した技術、および適用結果を示した。

第7章では、本研究の纏めとして、本研究の成果と今後の課題を示した。

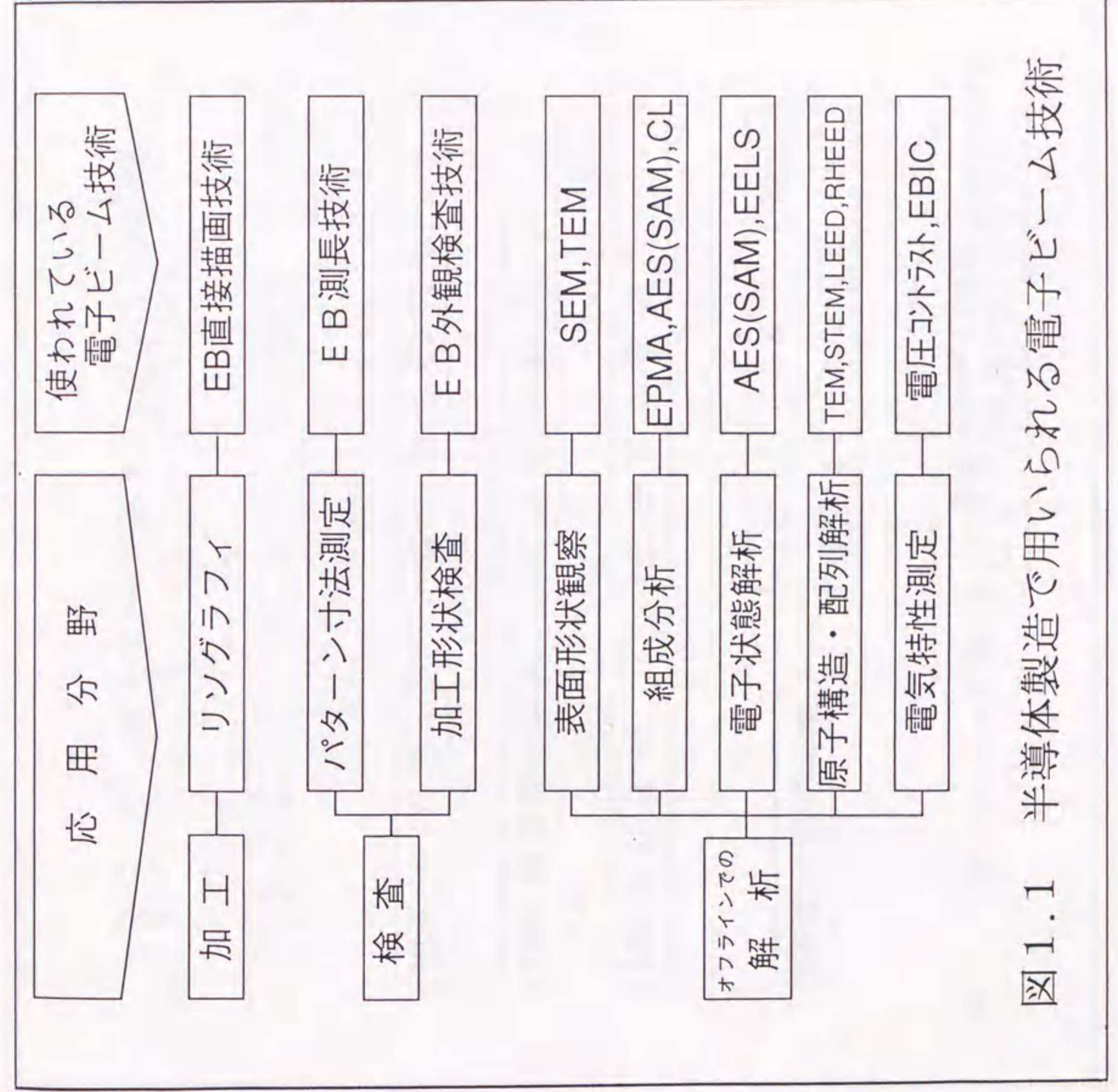


図1.1 半導体製造で用いられる電子ビーム技術

パターン微細化に対応した
細いビームの実現

。微細パターンの加工
。パターンジェネレータ機能

。高精度寸法測定

。高解像度観察

。微小部電位観測

EB直接描画技術

EB測長技術

EB外観検査技術

電圧コントラスト法

図1.2 電子ビームを用いることの特徴

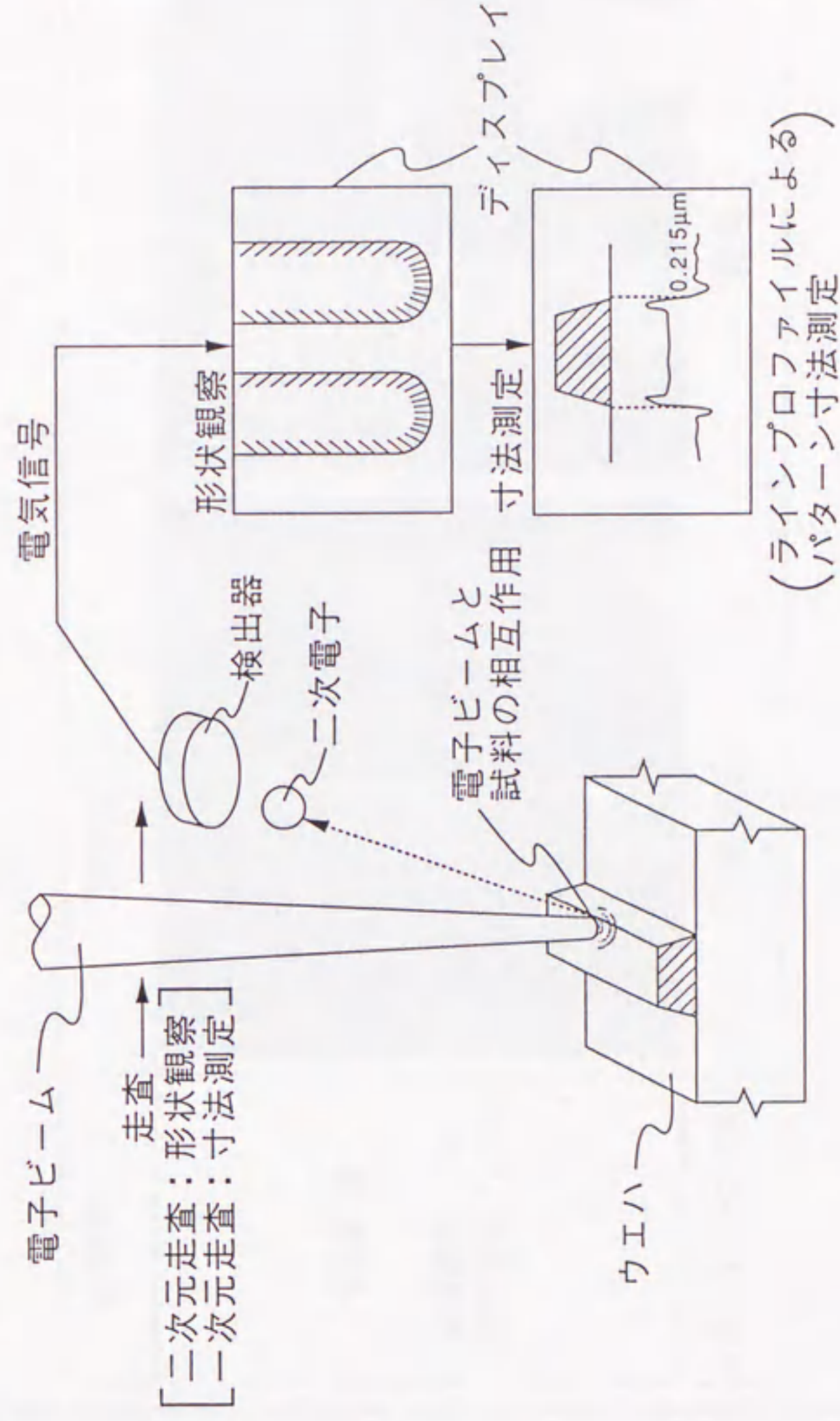


図1.3 電子ビーム走査法による形状観察とパターン寸法測定の原理

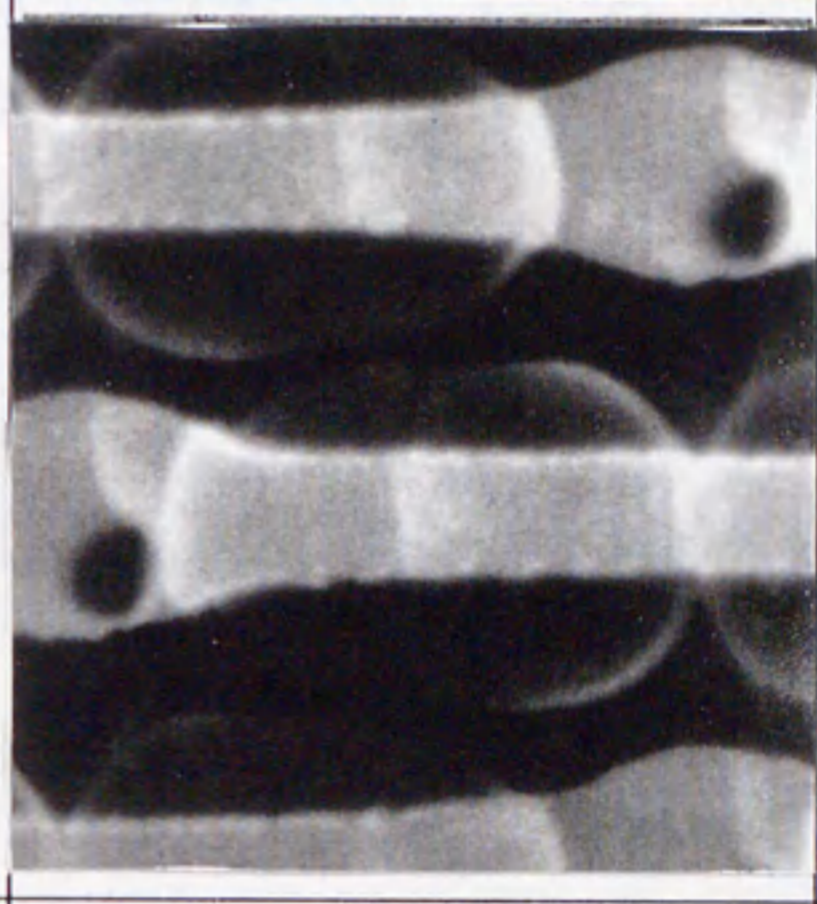

分解能	12nm	4nm	
観察像 加速電圧：1kV 観察倍率：20k倍			発見
不良：エッチング残り	見逃し		

図1.4 高分解能の効果

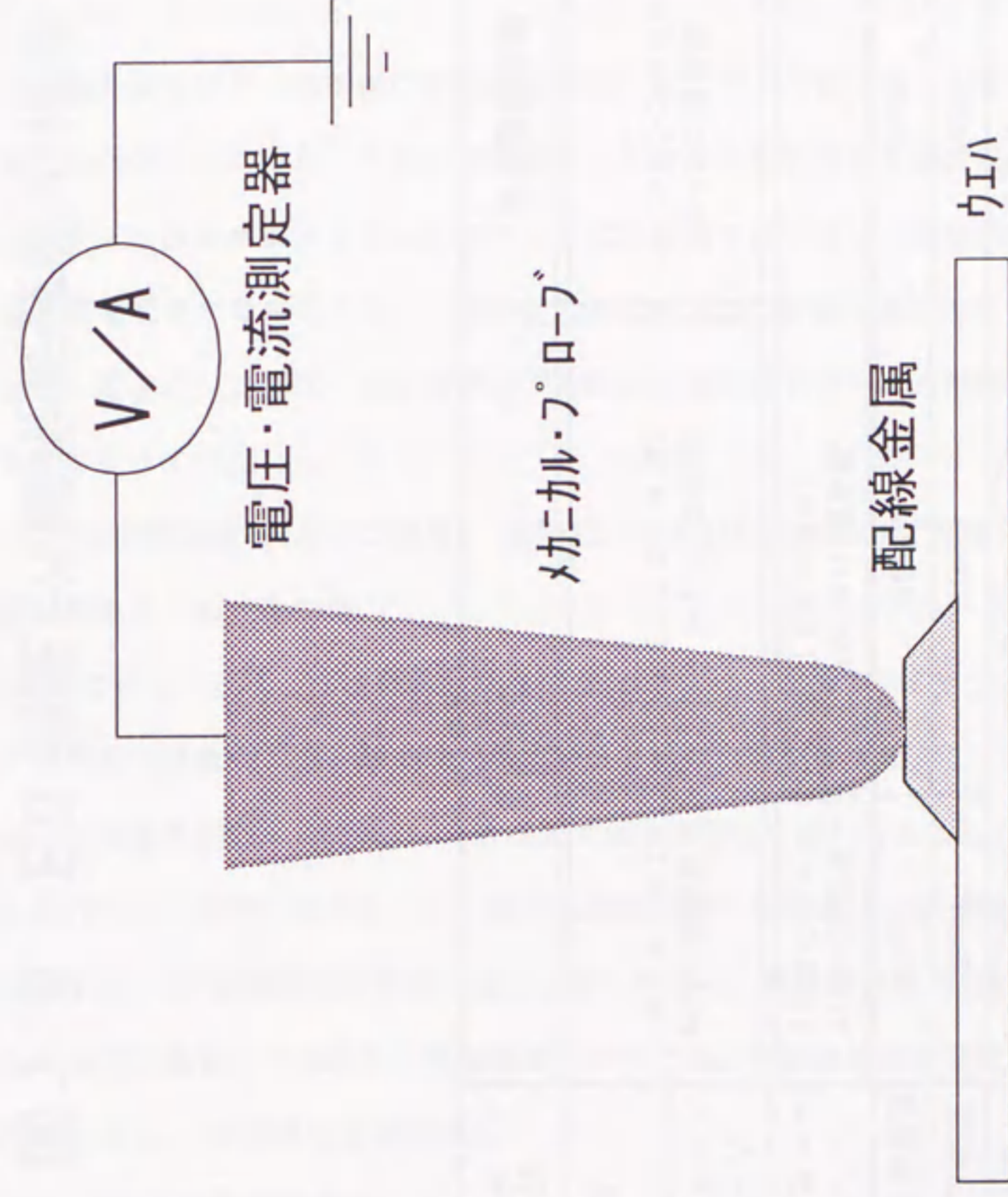


図1.5 メカニカル・プローブによる電圧測定の実理

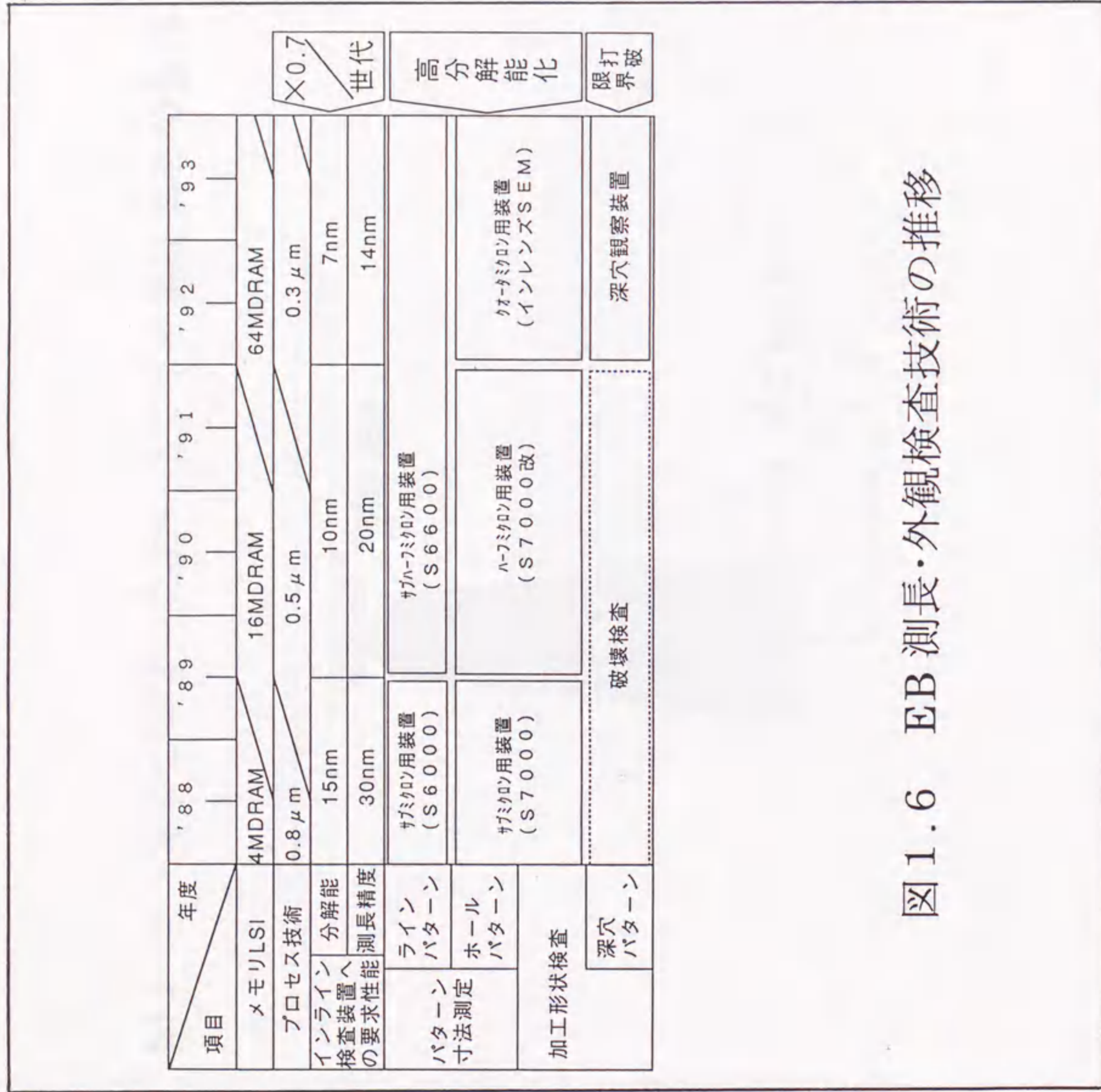


図1.6 EB測長・外観検査技術の推移

2. 電位観測用走査電子顕微鏡の研究

2.1 はじめに

半導体製品(LSI)の電気特性を試験・解析するために、LSIの内部電位を観測する手段として、メカニカル・プローブ法が用いられてきた。メカニカル・プローブをLSI内部の配線金属あるいは電極に触針し、配線電位を直接測定する方式である。しかし、LSIパターンの微細化が進むとともに、メカニカル・プローブを用いて配線電位を測定することが困難になってきた。メカニカル・プローブの先端径が配線パターンよりも太くなり、細いパターン上に針当てすることができないためである。

この問題を解決する“微小部の電位観測手段”として、“電子ビームをプローブとする方法”が注目されるようになった。SEMの電圧コントラストを利用した電位観測法である。⁴⁻¹⁷ 電圧コントラスト法は高入力インピーダンスの電位観測手段であり、観測部の電気状態を壊すことなく電位観測ができるため、「微小部の電位を正しく観測できる」ことが期待されていた。

しかし、電圧コントラスト法を実用化するためには、電子ビームの使用に起因する、下記の2点が障害となっていた。

- (1) 試料の照射損傷(デバイス損傷)：電子ビーム入射に起因した、トランジスタやコンデンサなど構成素子の特性変動。
- (2) 試料のチャージアップ：絶縁物試料の帯電(チャージアップ)に伴う、トランジスタやコンデンサなど構成素子の静電破壊、およびSEM像の解像度劣化。

これらの問題を克服するために、1kV程度の低加速電圧を用いることにした。1kVの加速電圧は、従来に比べて、一桁低い値であった。低加速電圧を用いる理由は、① 照射損傷の程度が加速電圧に比例する、② 実質的な二次電子放出比が1になり、絶縁物試料内に電荷が蓄積されない、という考え方に拠る。すなわち、照射損傷については、高加速電圧の場合に

$$\begin{aligned}
 (\text{照射損傷}) &\propto 1 / (\text{非弾性散乱断面積}) \\
 &\propto (\text{入射電子の速さ})^2 \\
 &\propto (\text{加速電圧 } V) \dots\dots (2.1)
 \end{aligned}$$

の相関が知られており、¹⁸ 加速電圧が低いほど損傷は軽くなると推測される。チャージアップについては、二次電子放出比の加速電圧依存性が要点となる。二次電子放出比の加速電圧依存性を図2.1に示す。数百Vの加速電圧で最大の二次電子放出比が得られ、それより高い加速電圧では、

放出二次電子数が減少する。従来型SEMで用いられる10kV~30kVの高加速電圧領域では、二次電子放出比が1より小さくなり、絶縁物試料は負にチャージアップする。負のチャージアップは入射電子量に比例して増大するため、不安定で像観察が困難な状態となる。一方、二次電子放出比が1より大きい1kV程度の低加速電圧領域では、“実質的な二次電子放出比が1となり、チャージアップの少ない安定な状態”に保持される。「二次電子が放出され試料が僅かに正電位にチャージアップした時点で、放出された二次電子の一部が試料上に逆戻りし始める」ことに因る。

低損傷・低チャージアップという実用的観点からは、「0.5kV~2kVの加速電圧が適している」ことが指摘されている。しかし、低加速電圧にすると、分解能（又は、解像度）は低下する。このため、これまで低加速電圧は実用されていなかった。

低加速・電位観測用SEMは0.5kV~2kVの低加速電圧領域で動作し、「低損傷・低チャージアップの上、高分解能で使用できる」ことを狙いとして開発されたLSI内部電位観測用の装置である。

2. 2 低加速・電位観測用SEMの装置構成

「0.5kV~2kVの低加速電圧領域で、如何に高い分解能を達成するか」ということが装置開発上の最大課題であった。開発を行った低加速・電位観測用SEMでは、高い分解能を得るために、3電極型のヒータ内蔵・冷陰極・電界放出型電子銃を開発した。装置構成を図2.2、装置仕様を表2.1に示す。主な装置仕様は、0.5kV~7kVの間で可変の加速電圧、加速電圧1kVの時に0.1 μ mの空間分解能、そして金属配線上で0.2Vの電圧分解能であった。装置構成上の特徴は、3電極型のヒータ内蔵・冷陰極・電界放出型電子銃の他、エネルギー分析機能付きの二次電子検出器、そして最大110ピンまで入力可能な電源電圧・信号電圧印加機能であった。110のピン数は、日立製作所で当時開発中であった大型コンピュータ専用のECL-LSIを動作状態で電位観測できるように設定されたものであり、当時に於いては世界最大規模のLSIピン数であった。

2. 2. 1 冷陰極・電界放出型電子銃

“低加速電圧に於ける分解能低下の問題”を解決するために、3電極型のヒータ内蔵・冷陰極・電界放出型電子銃を開発した。分解能は、加速電圧 V_0 が低くなるとともに低下する。粗い近似として、分解能を決める電子ビーム径が電子ビーム輝度の1/2乗に反比例し、電子ビーム輝度が V_0 に比例することに拠る。¹⁹ この問題を解決するための手段が、従来の熱電子放出型電子銃

に代わり、引出電圧を印加でき、輝度の高い電界放出型電子銃を用いることであった。1kV程度の低加速電圧に於いて、電界放出型電子銃の輝度は 10^6 A/cm²·str程度であり、熱電子放出型電子銃の 10^3 A/cm²·strに比べて3桁高い。また、冷陰極とすることに依り、電子ビームのエネルギーばらつきが熱電子放出型電子銃の1/10(0.2eV)程度に減少することから、色収差に因るビームのぼけを小さくできる。これら二つの効果に拠って、冷陰極・電界放出型電子銃では、熱電子放出型電子銃に比べると、30倍近く高い分解能を得ることが可能となる。

しかし、冷陰極・電界放出型電子銃を実用的なものとするためには、① 加速電圧変更時のビーム電流値変化を小さくすること、② 観測時のビーム電流変動を小さく抑えることに、研究・開発の課題があった。本装置では、これらの課題を克服するために、3電極型電子銃と脱ガス用引出電極内蔵ヒータを開発した。

(1) 3電極型電子銃

当時、一般的には2電極型電子銃が用いられていた。2電極型電子銃は、引出電極と加速電極とから構成される。電子ビームは、引出電極に約5kVの引出電圧を印加することに依って、FE(Field Emission)チップから電界放出された後、加速電極で1kV程度の加速電圧にまで減速される。この時、加速電圧 V_0 が低いほど引出電圧 V_1 との比(V_0/V_1)が小さくなるため、両電極間に働く静電レンズ作用は強くなる。強いレンズ作用は、加速電圧 V_0 を変更した時のビーム電流値変化を大きくする。加速電圧変更時の大きなビーム電流値変化は、2電極型電子銃を使い難いものにしてきた。

この欠点を無くすため、パトラ型電子銃²⁰を基として、図2.2に示すような3電極型電子銃を開発した。引出電極と加速電極との間に制御電極を設けた構成である。制御電極に依って静電レンズ作用を制御し、「電子銃から射出された電子ビームが、加速電圧に依らず常に平行ビームとなる」ようにしている。

この結果、加速電圧を0.5kVから2kVの間で変更した時に、ビーム電流値変化を0.9nAから1.5nAに抑えることができ、実用化が可能となった。

(2) 脱ガス用引出電極内蔵ヒータ

FEチップから飛び出した電子ビームの一部は、引出電極を叩き・加熱する。加熱された電極部分からは、含有気体分子が放出(脱ガス)される。放出された気体分子の一部は、FEチップに付着し、さらには離脱する。気体分子の吸着・離脱は、FEチップからの放出電子数を変化させる。放出電子数の変化はビーム電流を変動させ、“像がちらつく観察障害”を引き起こす。

ビーム電流の変動を抑えるためには、① FEチップ周辺を 10^{-7} Pa以上の高真空に保つ、② 電子ビーム衝撃に因る引出電極からの脱ガスを最小限に留める、ことが考えられる。引出電極からの脱ガスを少なくするためには、電極材料中に含まれる気体分子の数を減らさなければならない。含有気体分子数を減らすために、引出電極にヒータを内蔵させた。電子銃内部を大気に曝した後には、高真空に排気した状態で引出電極を約 500°C に加熱し、電極材料に吸着した気体分子を強制的に離脱させ、排気する。 500°C ・2時間の加熱を行うことに依り、ビーム電流変動1%以下の実用的条件に於いて、1回のフラッシング(短時間・高温加熱に依るFEチップ表面の消浄化操作)毎に8時間以上の連続観察が可能となった。従来は、1時間の連続観察も困難であった。

2. 2. 2 エネルギー分析機能付き二次電子検出器

電圧コントラストを強調し、高感度な電位観測を可能とするために、エネルギー分析機能付き二次電子検出器を開発した。

電圧コントラストの発生は、

(1) 放出された二次電子のエネルギーが、放出部分の電位に依存して変化すること。

(2) 検出される二次電子量が、放出部近傍の電位分布(電界分布)に左右されること。

に起因している。二次電子のエネルギー分布が放出部分の電位 V_0 に応じて変化する例を図2.3に示す。二次電子(S, E)のエネルギーは、接地電位を基準として表されている。放出部分の配線電位が負の場合には、二次電子のエネルギー変化が顕著に現われる。放出部の負電位が高くなるとともに、放出二次電子の運動エネルギーは増大する。この場合、二次電子分布の最小エネルギー値が放出部電位の V_0 に相当する。二次電子量は、放出部電位が0Vの時に比べて、僅かに減少している。理由は、二次電子の一部が加速電界を形成する周辺部に吸引されるためと考えられる。放出部分の配線電位が正の場合には、二次電子の量的変化が顕著となる。放出部の正電位が高いほど、二次電子量は少くなる。減少の理由は、放出部近傍に生じた減速電界にあると考えられる。減速電界は二次電子の放出を抑制する方向に働き、低エネルギーの二次電子は試料に逆戻りさせられる。上述したエネルギー分布の変化を高感度で観測するために、二次電子のエネルギーを分析し、エネルギー分別した二次電子を検出した。二次電子のエネルギー分析には、エネルギー分布のピーク位置を検出する方法と、閾値を設けてフィルタリングする方法とがある。ピーク位置を検出する方法は、像観察時の即応性が悪い上、正電位観測時の感度が低い。したがって、本装置ではフィルタリングする方法を採用した。

二次電子検出系は、図2.2に示すように、二次電子検出器としての輪帯型マイクロ・チャンネルプレート(MCP)の前段に、フィルタリング用の0.2mmメッシュ・銅製グリッド電極を配置した。フィルタリング用グリッド電極には $+20\text{V}\sim-20\text{V}$ の減速電圧 V_f を印加できる。 V_f が閾値となり、 eV_f 以上のエネルギーを持つ二次電子だけが、フィルタリング用グリッド電極を通過し、MCPに到達・検出される。検出された二次電子量($I_2 - I_1$)は、観測部電位 V_0 に対応しており、図2.4に示すような変化をする。一般的には、 V_0 が低いほど、大きな二次電子信号が得られる。図2.4において、 I_0 は入射電子ビーム量、 I_2 は二次電子量、 I_1 は周辺の高電位部に吸引された、或いはフィルタリング用グリッド電極ではね返された低エネルギー二次電子の量である。

図2.4から、「高感度で観測するためには、観測すべき電位範囲に対応して、最適な減速電圧 V_f を選ぶことが重要である」という知見が得られた。図2.4に於いて、直線的に変化し、傾きの大きい部分が高感度領域である。「観測部電位が正の時には V_f を正電圧、負の時には V_f を0Vまたは負電圧に設定すると良い」ことが分かった。

結果として、空間分解能 $0.1\mu\text{m}$ 、電圧分解能 0.2V で、配線電位を観測することができた。

2. 2. 3 電源電圧・信号電圧印加機能

観測すべき試料には、試料室外に設けられた電源から、ハーメチックシールを経由して、電源電圧および信号電圧が印加される。電源電圧は $0\text{V}\sim-6\text{V}$ の範囲で4種類、信号電圧は $0\text{V}\sim-5\text{V}$ の範囲で96チャンネルのパターン発生が可能であり、最大110ピンまでの入力ができる。負電圧と電圧範囲の選択は、ECL-LSIの測定を対象とするものである。また、信号電圧のパターン発生にはミニコンピュータ 21MX(メモリ:32kワード、日立製作所製)を用いており、電源を制御することによって、各種モードでのLSI動作状態を観測することができる。

試料がウェハの場合には、東京エレクトロン社製の特製プローブカードを用いて、電源電圧および信号電圧を印加した。特製プローブカードは、プリント基板に最大110本のメカニカル・プローブを装着したものであり、全てのプローブを一回の操作でパッド(針当て用電極)に触針できる。図2.5は、プローブカードを装填した状態の試料ステージ外観を示す。

全ての電圧印加用配線は、信号間のクロストークを防ぐために、シールド線を用いた。また、配線長は必要最小限の長さとした。これに依り、(1)配線材からの脱ガスによる試料室真空度の低下(真空度の低下は観測試料のコンタミネーションを増大させる)、(2)配線抵抗に起因する信号の伝搬遅延と電圧降下、の問題を最小限に抑えている。

2.3 低加速・電位観測用SEMの性能評価

2.3.1 チャージアップとデバイス損傷の軽減

低加速電圧の効果として、チャージアップの影響が軽減される例を図2.6と図2.7に示す。いづれも、SiO₂膜上に形成されたアルミニウム(Al)配線がV_f=0Vの条件で観測された。

図2.6は、負電位を有するAl配線の電圧コントラスト像が、加速電圧に依存して変化する様子を示している。3kVの電圧コントラスト像は、1kVの像と比較して、細部が明瞭になるとともに、コントラストのつき方が変わる。加速電圧が高くなると、分解能は向上するが、SiO₂膜チャージアップ状態の変化に起因した現象が現われる。7kVの像では、負にチャージアップしたSiO₂膜の強いハレーションと、黒に反転したAl配線部が観察される。Al配線部が暗い理由は、周辺のSiO₂膜表面に大きな負電位が形成されており、Al配線からの二次電子放出を抑制するためと考えられる。また、ハレーションが生じ、試料観察は困難となる。

図2.7は、4μm幅のAl配線の観測電位が、加速電圧に依存してどのように変化するかを示す。3本のAl配線には、左から-3V、0V、+3Vの電圧が印加されている。1kVの像では、図2.4に準じた分かり易い電圧コントラストが得られており、二次電子信号強度は-3V配線、0V配線、+3V配線の順に小さくなる。また、0V配線の信号強度との比較から、SiO₂膜表面が「安定な観測の条件である正電位にチャージアップしている」ことが分かる。Al配線とSiO₂膜の二次電子放出比が異なるために粗い推定値となるが、SiO₂膜表面のチャージアップ電位は、-3V配線の近傍が約+1V、+3V配線の近傍が+2V前後であり、直近の配線電位に順応して異なった正の値をとることが認められる。SiO₂膜表面のチャージアップ電位が、直近の配線電位に追従して変化する理由は、「実質的な二次電子放出比δ_{eff}が常に1となるように、平衡状態を保とうとする作用が働く」ためと考えられる。平衡条件は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \delta_{eff} &= (I_s - I_p) / I_p \\ &= 1 \quad \dots\dots\dots (2.2) \end{aligned}$$

2kVの像では、-3V配線の信号強度が0V配線の信号強度よりも低くなる。SiO₂膜表面が+数Vの比較的高い正電位にチャージアップされ、SiO₂膜表面から-3V配線に向かう強い電界が生じるためと考えられる。-3V配線から放出された二次電子の一部は、SiO₂膜に吸引される。

5kVの像では、SiO₂膜表面の負チャージアップが大きくなり、強いハレーションのために、電位観測が不可能となる。

7kVの像では、再び各配線の電位が観測できるようになる。1kVの像と異なる点は、SiO₂膜表面の高い負電位が、電圧コントラストの基準レベルになっていることである。5kVの像に比べて加速電圧が高いにも拘らず、チャージアップの影響が小さく見えている。理由は、加速電圧が高くなったことに因り、「入射電子の多くが0.5μm厚さのSiO₂膜を貫通し、Si基板に到達できるようになるため、実質的なチャージアップ量が減少する」ことの効果と考えられる。また、1kVの安定した正電位チャージアップと比較して、SiO₂膜表面の負電位チャージアップは場所むらが大きく、不安定であることが認められる。加速電圧による電圧コントラストの違いを際立たせるため、7kVと1kVの電圧コントラスト像を並べて図2.8に示す。

加速電圧を下げることに依ってデバイス損傷が軽減される例を図2.9に示す。動作状態のn-MOSトランジスタに電子ビームを照射しながら、しきい値電圧の経時変化ΔV_{th}を測定した結果である。用いたn-MOSトランジスタのチャンネル長は4μm、チャンネル幅は15μmであり、ドレイン電圧5Vで動作させた。また、10⁻⁴C/cm²の電子ビーム・ドーズ量は約90分間の照射時間に相当する。

加速電圧1kVの場合には、ΔV_{th}は極めて小さい。加速電圧2kVの場合には、しきい値電圧V_{th}が低くなる方向に変化する。ΔV_{th}の変化量|ΔV_{th}|は、電子ビーム・ドーズ量その他、基板バイアス電圧V_{sub}(0Vまたは負電圧で使用)に依存していることが分かった。電子ビーム・ドーズ量が増加するとともに、|ΔV_{th}|も比例して増大するが、同じ電子ビーム・ドーズ量を与えても、V_{sub}=0V(ゼロバイアス)の時に比べて、V_{sub}=-2Vの時の方が|ΔV_{th}|は大きい。

加速電圧2kVの場合にV_{th}が低くなる理由は、ゲート酸化膜中に蓄積される正電荷にある。ゼロバイアスの時に比べて、V_{sub}=-2Vの|ΔV_{th}|が大きい理由は、「ゲート電極から基板に向かう電界が強くなるため、酸化膜中に蓄積された正電荷がSiO₂/Si基板界面近くに引き付けられ、V_{th}への影響度を増すため」と考えられる。また、2kV以下におけるデバイス損傷の確認は、従来の報告とは異なった結果を示している。これまで、2kV以下の加速電圧では電子ビームの飛程が0.1μm以下と小さいため、デバイス損傷は無いとされていた。²¹ 得られた結果から推定すると、「デバイス損傷の要因として、入射電子による直接的な作用以外に、X線など二次粒子との相互作用が働いている」ものと考えられる。

加速電圧5kVと7kVの場合には、V_{sub}=-2Vの時に特徴的な傾向が現われる。ゼロバイアスの時には、V_{th}が加速電圧2kVの時と同様に照射量に比例して低下し、低下の傾きは加速電圧が高いほど大きくなる。一方、V_{sub}=-2Vの時には、電子ビーム照射の初期段階でV_{th}が急激に上昇し、

極大値をとった後、直線的に低下してゆく。照射初期における V_{110} の急激な上昇は、 SiO_2 膜表面が負にチャージアップされることに起因していると考えられる。すなわち、 SiO_2 膜表面が負にチャージアップされると、 SiO_2/Si 基板界面に正電荷が誘起される。n型拡散層領域に誘起された正電荷は、基板界面を空乏化させる方向に働き、n型拡散層からp型基板へのリーク電流を増大させる。このようなリーク電流の増大は、見かけ上 V_{110} を高くする方向に働く。また、負のチャージアップ量が大きいほど、 $|V_{110}|$ が高いほど、n型拡散層領域の周辺長が長いほど、リーク電流は大きくなる。

上記の V_{110} 上昇メカニズムの妥当性を検証するために、リーク電流の電子ビーム・ドーズ量依存性を測定した。加速電圧と SiO_2 膜厚をパラメータとした測定結果を図2.10に示す。リーク電流は、照射初期の段階で急激に増大した後、加速電圧と SiO_2 膜厚で決まる定常値に落ち着く。 SiO_2 膜厚が薄くなるほど、加速電圧が高くなるほど、リーク電流は大きくなり、負チャージアップ起因の現象であることを立証している。なお、図示されていないが、ゼロバイアスの時には、このようなリーク電流の増加は小さい。基板界面空乏化の程度が小さいためと推定される。定性的ではあるが、図2.10の結果は、図2.9の V_{110} 上昇特性を良く説明できており、前述のメカニズムの正当性を裏付けている。

2.3.2 低加速・電位観測用SEMによる故障解析

LSI、LSI用パッケージ、およびプリント基板の各種故障解析に適用し、有効な故障解析手段であることを明らかにした。

(1) LSIの故障解析

LSIへの適用は、配線金属の断線や短絡といった“一見して明らかな故障”の他に、信号レベルの不良といった“判別し難い不良”の検出にも効果をあげた。

図2.11、図2.12、および図2.13は配線金属の断線箇所を検出した例である。図2.11は、上部写真が光学顕微鏡像、下部写真が電圧コントラスト像である。光学顕微鏡像からは、配線金属が断線していることを判別できない。しかし、電圧コントラスト像を観察することにより、配線の電圧コントラスト像が途切れていることから、途切れた部分で断線していることを識別できる。図2.12は、上部写真が光学顕微鏡像と通常のSEM像、下部写真が電圧コントラスト像である。光学顕微鏡像や通常のSEM像からは、配線金属の断線していることを確認できない。一方、電圧コントラスト像では、入力信号の変化に追従して、断線箇所の電圧コントラストが反転する現象

を観察できる。図2.13は、ゲート回路の入力信号を変化させながらトランジスタの動作状況を電圧コントラスト像で観察した例であり、他の手段では見つかることのできなかつた断線箇所を検知できた。

図2.14は、LSIの信号レベル不良を抽出した例である。二次電子信号のラインプロファイルを観測した。下部写真に正常動作デバイス、上部写真に不良動作デバイスの電圧コントラスト像とラインプロファイルを示す。正常動作デバイスの場合には、Oという配線が“Hi(1)”レベルにあり、ラインプロファイルの強度は右隣の配線と略同じ高さとなる。一方、不良動作デバイスの場合には、右隣の配線よりも高い強度となっている。このようなラインプロファイル強度の違いから、正常なデバイス動作が行われていないことを判別できた。

また、ビーム・ブランキング(電子ビームを間欠的に照射すること)との併用により、LSIの種々な動作状態において“信号が正常に流れているか否か”の検査にも使用できる。図2.15は、その一例を示したものである。左下部写真は16K-DRAMの待機状態、右下部写真は動作状態に於ける信号の流れを示している。

(2) プリント基板の故障解析

プリント基板への適用は、膜で覆われた配線金属の断線箇所検出に有効である。図2.16は、多層セラミック基板の観察例を示す。図中、矢印Bで示す配線が、厚さ $50\mu\text{m}$ の Al_2O_3 膜で覆われた下層配線である。CCBベDESTALから少し入り込んだ部分でBの電圧コントラストが途切れていることから、この部分で断線していることが分かる。

上記の例で示したように「電圧コントラスト像は、光学顕微鏡像や通常のSEM像では発見できない不良箇所の検出に極めて有効な手段である」ことを明らかにした。また、パターンの明暗に加えて、二次電子信号のラインプロファイルを観察することにより「より正確に故障解析ができる」ことを確認できた。

2.4 定量化のための基礎的検討

前節の観測例は、電圧コントラスト像やラインプロファイルを利用した定性的な応用である。LSIの故障解析を更に効果的に行うためには、電圧値を定量測定できることが必須となる。電圧コントラストを定量化することは、電圧コントラストの発生メカニズムを明確にし、モデル化すること等を含め、今後の大きな研究課題である。本節では、そのための前段階として、電圧コントラストの定量化に際して考慮すべき事項を検討した。

(1) 二次電子検出系

電圧コントラストを定量化するためには、配線電位と二次電子信号の関係を把握することが、前提条件となる。これらの関係は二次電子検出系、特にエネルギー分析方法に強く依存する。

例えば、図2.4に示した配線電位と二次電子信号強度との関係から、配線電位が-10Vから-5Vの範囲では V_s が-10V、-5Vから0Vの範囲では V_s が0V、0V以上の範囲では V_s が+10Vの時に、直線性良く高感度で観測できることが分かった。今後は、このようなデータを積み上げて行くことが重要である。

(2) 近接配線の効果

観測部分から放出される二次電子は、その運動エネルギーが数eVから数十eVと低いために、近接配線の電位に因って軌道が曲げられる。二次電子軌道の変化は、二次電子検出信号量に影響を及ぼす。

図2.17は、4 μ mの間隔をおいた両隣に配線が走っている場合と、孤立配線の場合とを比較して、電圧コントラストがどのように変わるかを示した例である。図2.18は、隣接配線の電位 V_s により二次電子信号が如何に変化するかを、観測配線の電位 V_o をパラメータとして数値的に示したものである。この図から、隣接配線の電位が負の時に、二次電子信号が減少する方向での影響を受けていることが分かる。

(3) 被覆絶縁膜の効果

配線金属を絶縁膜が覆っている場合には、電圧コントラスト像が微分画像として現われ、時間が経つと消滅する。²²⁻²⁶ 電圧コントラストが、配線金属に印加される電圧の変化分に応答するためである。

図2.19は、矩形パルス電圧を印加した時のラインプロファイルを、絶縁膜に覆われていない場合との比較で示したものである。絶縁膜で覆われた配線電位のラインプロファイルが、微分波形を示している。微分波形の生じるメカニズムは、“配線金属と絶縁膜表面のチャージアップ層を両極とするコンデンサのモデル”を考えることに依って説明できる。絶縁膜表面のチャージアップ電位は、配線金属の電位変化に追従して変化した後、電子ビーム照射を受けながら、 δ_{eff} が1となる平衡状態に復元してゆく。平衡状態に戻る時定数RCは、R成分を決める電子ビーム電流値や、C成分としての絶縁膜の膜質・膜厚などに依存する。単位面積当たりの照射電子ビーム電流が小さいほど、絶縁膜厚が薄いほど時定数は大きく、電圧コントラストを観測できる時間が長くなる。電圧コントラストの存続時間に関するこれ等の帰結は、定性的には観測結果と良く一

致しており、上記メカニズムの妥当であることを立証している。

図2.20は、厚さ1 μ mのPSG(リンガラス)膜で覆われたLSI配線パターンを観察例である。右の写真は電圧印加直後、左の写真は60秒経過してからの電圧コントラスト像を示す。電圧印加直後の像は電圧コントラストを示しているが、60秒後の像は電圧コントラストが消滅し、通常のSEM像と変わらなくなる。このように、絶縁膜が被覆している場合には、安定した電圧コントラスト像を得ることができないため、電圧コントラストの定量化が更に困難となる。なお、絶縁膜に覆われている場合、電位感度は低下するが、電圧分解能1V程度での非破壊観測を行える。

(4) 配線幅の効果

二次電子信号の強度は配線幅に依っても変わる。図2.21は測定結果であり、図2.22は変化を数値的に表したものである。配線幅が広くなるにつれて、二次電子信号の強度も高くなる。「信号変化は、LSIで多用されている数 μ m幅程度の配線領域で大きくなる」ことに注意が要る。

(5) コンタミネーションの効果

試料室内に残留する気体分子が、電子ビームに依って分解され、カーボンや炭化水素化合物として試料表面上に堆積される。この現象をコンタミネーションという。コンタミネーションが試料表面に付着すると、その部分の二次電子放出比が変化するため、電圧コントラストの定量化に際しては注意が要る。

2.5 まとめ

LSIの内部電位を観測するため、先駆的実用装置として低加速・電位観測用SEMを開発した。低加速・電位観測用SEMは、従来にない低加速電圧領域(0.5kV~7kV)で動作するものであり、低損傷・低チャージアップの特徴と、以下の高い観測能力を示すことができた。

(1) 空間分解能0.1 μ m、電圧分解能0.2Vで、微細な配線金属の電位を観測することが可能。

(2) 電圧分解能1V、非破壊で、絶縁膜で覆われた下層配線の電位を観測することが可能。

本装置開発に際し、以下の装置技術を研究・開発した。

(1) 低加速電圧を実用化するための、3電極型のヒータ内蔵・冷陰極・電界放出型電子銃。

(2) 高電位感度で二次電子を検出するための、エネルギーフィルタ付き輪帯型MCP。

電位感度を高くするためには、フィルタリング用グリッド電極に印加する減速電圧を、観測部電位が正の時には正電圧、負の時には0Vまたは負電圧に設定すると良いことが分かった。

(3) LSIを各種動作状態で観測するための、110ピンECL-LSI用パターン信号発生電源。

L S I を動作させるための信号線導入に関して、高精度な観測を行うためには「信号線間のクロストークや信号線での伝搬遅延・電圧降下を考慮することが重要である」ことが分かった。この知見は、その後のストロボ法における電圧波形観測などに活かされた。

本装置をL S I 不良解析に応用し、以下のことを明らかにした。

- (1) 電圧コントラスト像は、光学顕微鏡像や通常のSEM像では発見できない不良箇所の検出に極めて有効な手段であること。
- (2) パターンの明暗に加えて、二次電子信号のラインプロファイルを観察することに依り「より正確に故障解析ができる」こと。

また、本装置の応用技術を研究・開発する過程で、低加速電圧に於けるチャージアップ、およびデバイス損傷の低減を確認するとともに、そのメカニズムを検討した。

- (1) チャージアップの加速電圧依存性について、

- ・1kV程度の低加速電圧領域では、 SiO_2 膜表面が+数Vの正電位にチャージアップし、安定な像観察が可能となる。実効的な二次電子放出比 $\delta_{\text{eff}}=1$ の平衡状態が成り立つためと考えられる。また、平衡状態を保とうとする作用は、 SiO_2 膜表面のチャージアップ電位を直近の配線電位に追従して変化させるものと推定される。
- ・2kV以上・5kV程度の電圧領域では、 SiO_2 膜表面に負電位が形成され、負のチャージアップが起こる。負のチャージアップが軽度の場合には、Al配線からの二次電子放出を抑制するだけであるが、甚だしい場合には、ハレーションを生じ試料観察が不可能となる。そして、 SiO_2 膜表面の負チャージアップは場所むらが大きく、不安定であることが分かった。
- ・7kVの比較的高加速電圧領域では、再び、チャージアップに因る影響の軽くなることが分かった。入射電子の多くが SiO_2 膜を貫通しSi基板に到達できるようになり、 SiO_2 膜内に蓄積される実質的な電荷量が減少するためと考えられる。この知見は、5章で述べる深穴観察用走査電子顕微鏡として、実用面に活かされた。

- (2) デバイス損傷の加速電圧依存性について、

- ・加速電圧1kVの場合には、しきい値電圧 V_{th} の変化は極めて小さい。
- ・加速電圧2kVの場合には、2kV以下の加速電圧ではデバイス損傷が無いと考えられていたが、 V_{th} が低くなる方向に変化することが分かった。デバイス損傷の要因として、入射電子による直接的な作用以外に、X線など二次粒子との相互作用が働いているものと考えられる。また、 $|\Delta V_{\text{th}}|$ は電子ビーム・ドーズ量その他、基板バイアス電圧 V_{bb} に依存していること

が分かった。同じ電子ビーム・ドーズ量を与えても、 $V_{\text{bb}}=-2\text{V}$ の時は、 $V_{\text{bb}}=0\text{V}$ の時に比べて、 $|\Delta V_{\text{th}}|$ が大きくなる。 $V_{\text{bb}}=-2\text{V}$ の時に $|\Delta V_{\text{th}}|$ が大きい理由は、ゲート電極から基板に向かう電界が強くなるため、酸化膜中に蓄積された正電荷が SiO_2/Si 基板界面近くに引き寄せられ、 V_{th} への影響度を増すためと考えられる。

- ・加速電圧5kV以上では、 $V_{\text{bb}}=-2\text{V}$ の時に特徴的な傾向が現われることを明らかにした。

$V_{\text{bb}}=-2\text{V}$ の時には、電子ビーム照射の初期段階で V_{th} が急激に高くなり、極大値をとった後、再び直線的に低下してゆく。照射初期における V_{th} の急激な上昇は、 SiO_2 膜表面が負にチャージアップされることに起因すると考えられる。

メカニズムは、 SiO_2 膜表面が負にチャージアップされると、 SiO_2/Si 基板界面に正の電荷が誘起される。n型拡散層領域に誘起された正電荷は、基板界面を空乏化させる方向に働き、n型拡散層からp型基板へのリーク電流を増大させる。このようなリーク電流の増大が、見かけ上 V_{th} を高くする方向に働くためと考えられる。

低加速・電位観測用SEMにおける今後の課題は、電位観測の高感度化を促進することと、定量的な電位測定を可能とすることである。特に、定量化については、二次電子放出比や二次電子検出率を左右する要因が数多く、極めて難しい課題と考える。学術的観点からだけでなく、実用的な面からも今後の精力的な検討が期待される。

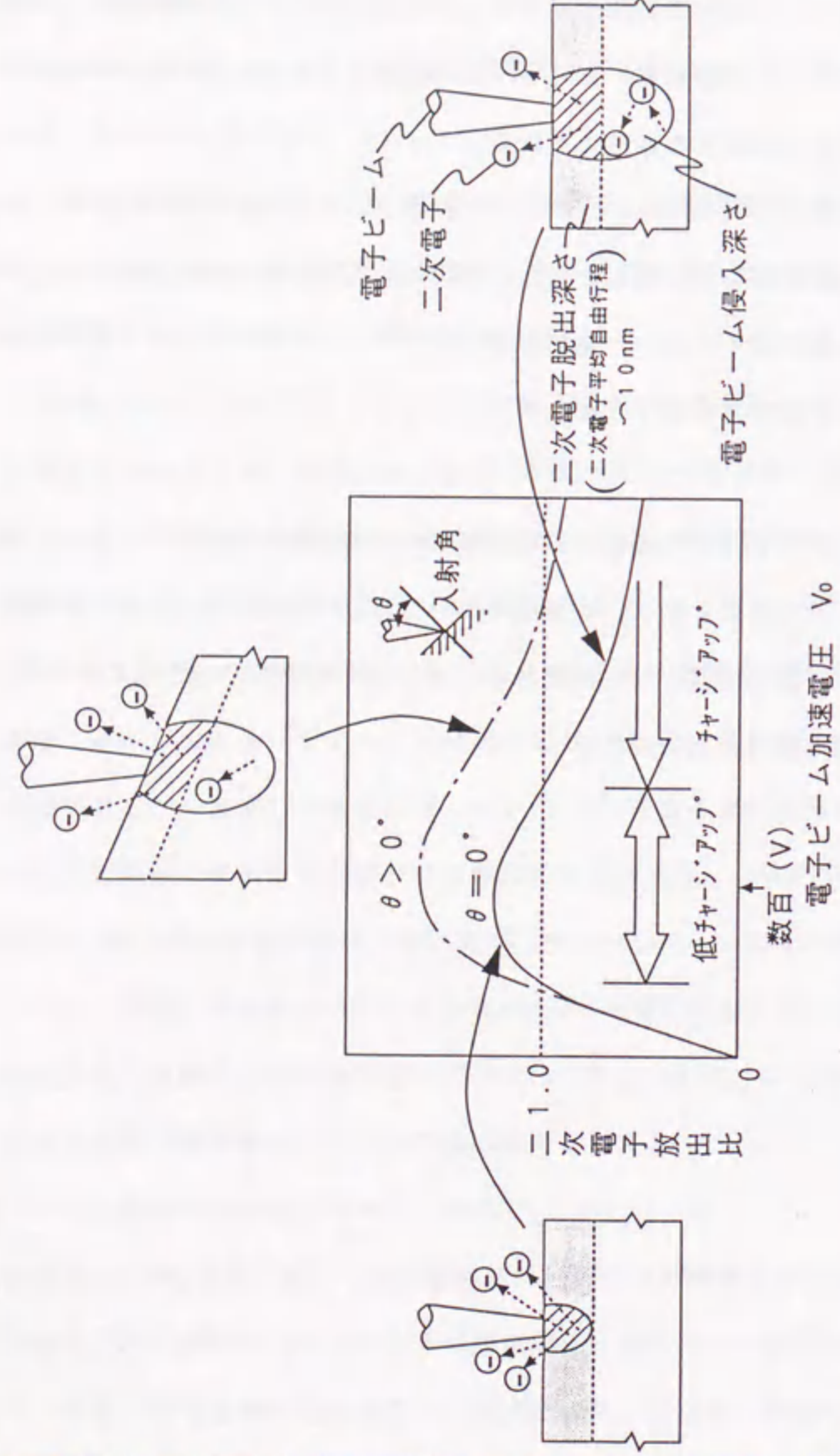


図2.1 電子ビームの加速電圧・入射角と二次電子放出比

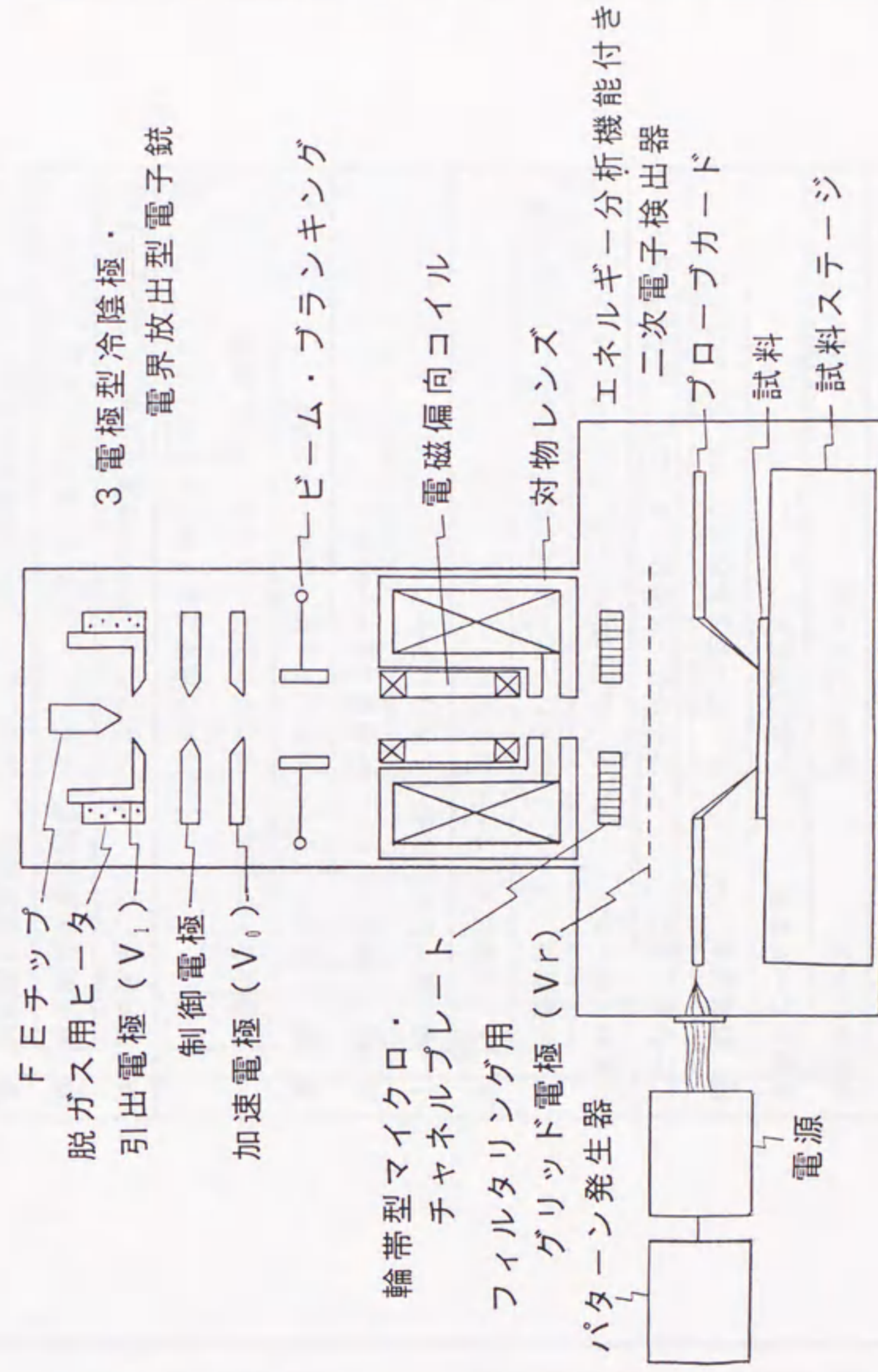
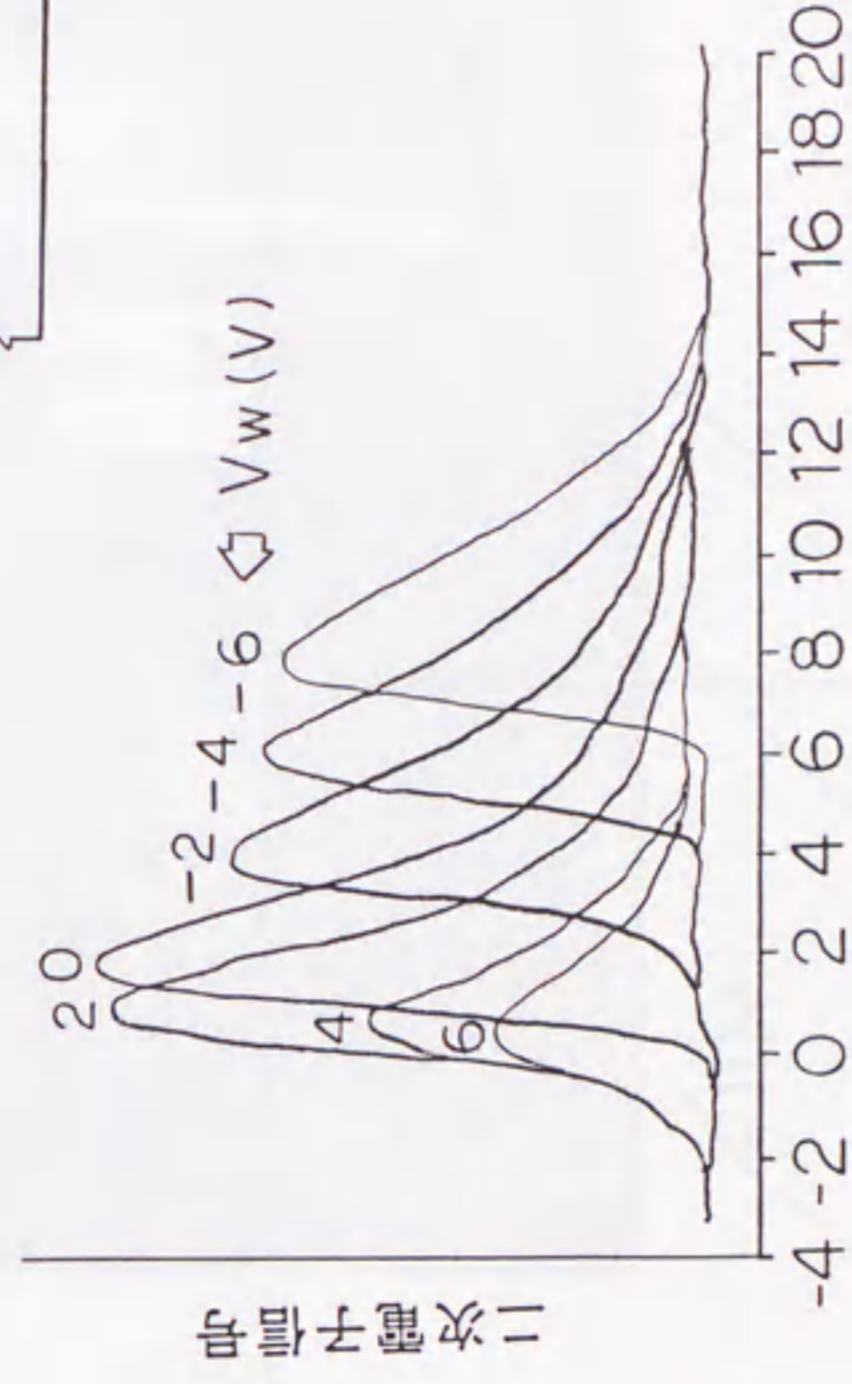
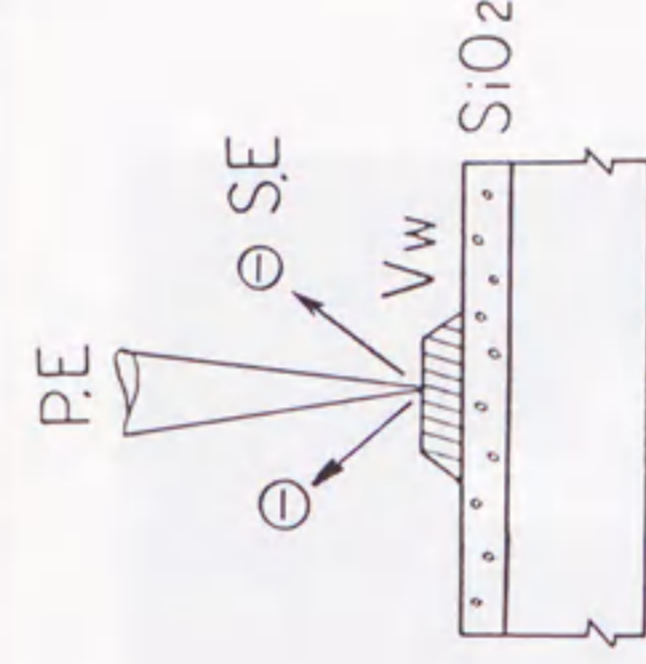


図2.2 低加速・電位観測用SEMの装置構成

表 2. 1 低加速・電位観測用 SEM
の装置仕様

項目	装置仕様
電子銃	冷陰極・電界放出型電子銃 (3電極型・脱ガス用ヒータ付き)
加速電圧	0.5 kV ~ 7 kV
対物レンズ	対物レンズ一段
電子ビーム走査	一段電磁偏向
観察倍率	×10 ~ ×20000
二次電子検出	エネルギー分析器+マイクロ・チャンネルプレート
試料ステージ	X・Y 2軸ステージ
対象試料	ウエハ, パッケージ組込LSI, プリント基板
X・Y 最大ストローク	20 mm
最大入力ピン数	110ピン
電源	4種類 (0V ~ -6V)
信号	96チャネル (0V ~ -5V)
加機パターン発生	ミニコンピュータ (21MX) 制御
機能	メモリ容量 32 kW (1W = 16 b)
真空排気系	イオンポンプによる高真空排気
電子銃室到達真空度	10 ⁻⁸ Pa (イオンポンプ)
試料室到達真空度	10 ⁻³ Pa (油拡散ポンプ)
空間分解能	0.1 μm (1 kV)
電圧分解能	0.2 V (裸の配線金属上)



二次電子のエネルギー (eV)

図 2. 3 二次電子エネルギー分布の放出部電位 Vw 依存性

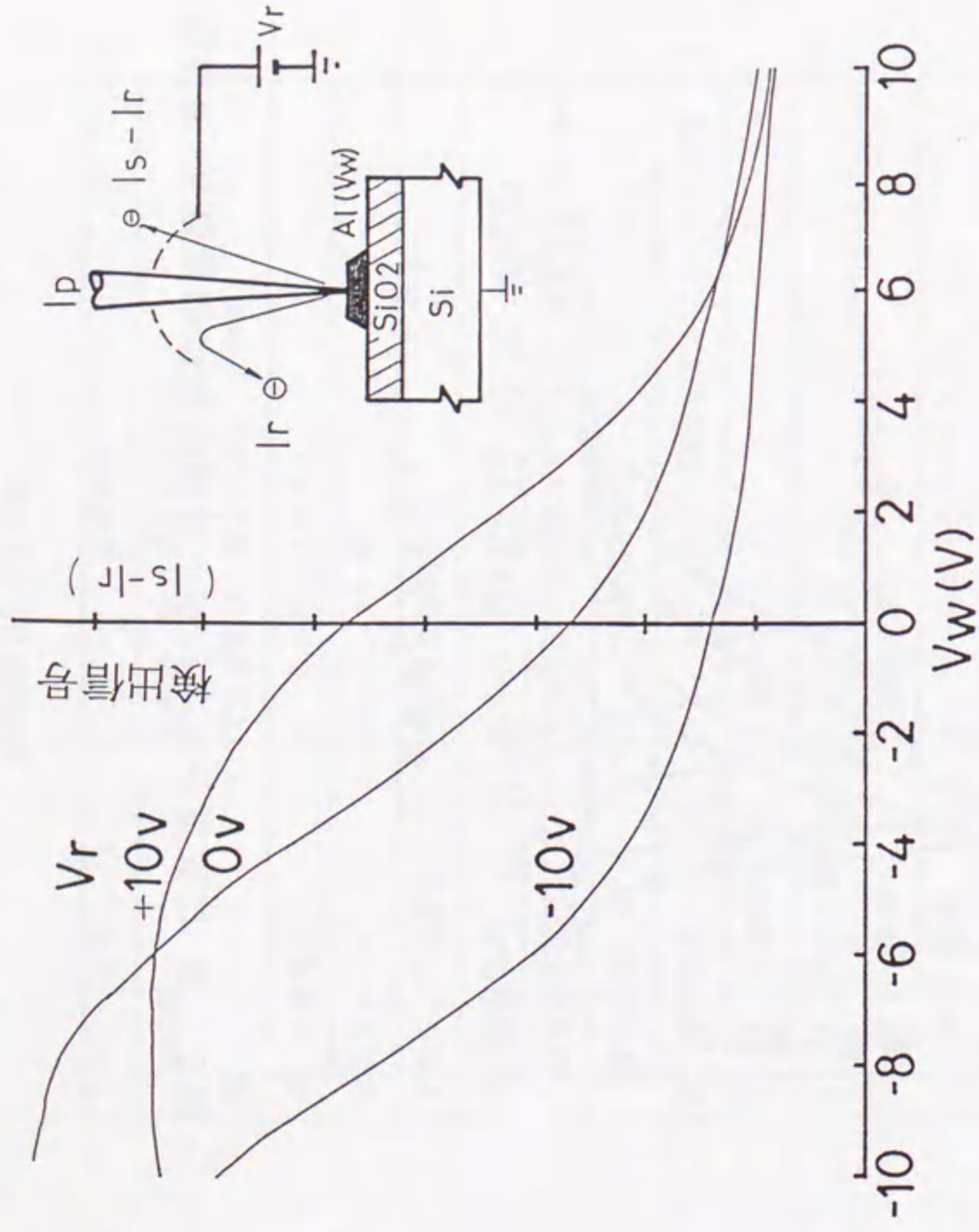


図2. 4 二次電子信号の観測部電位 V_w 依存性

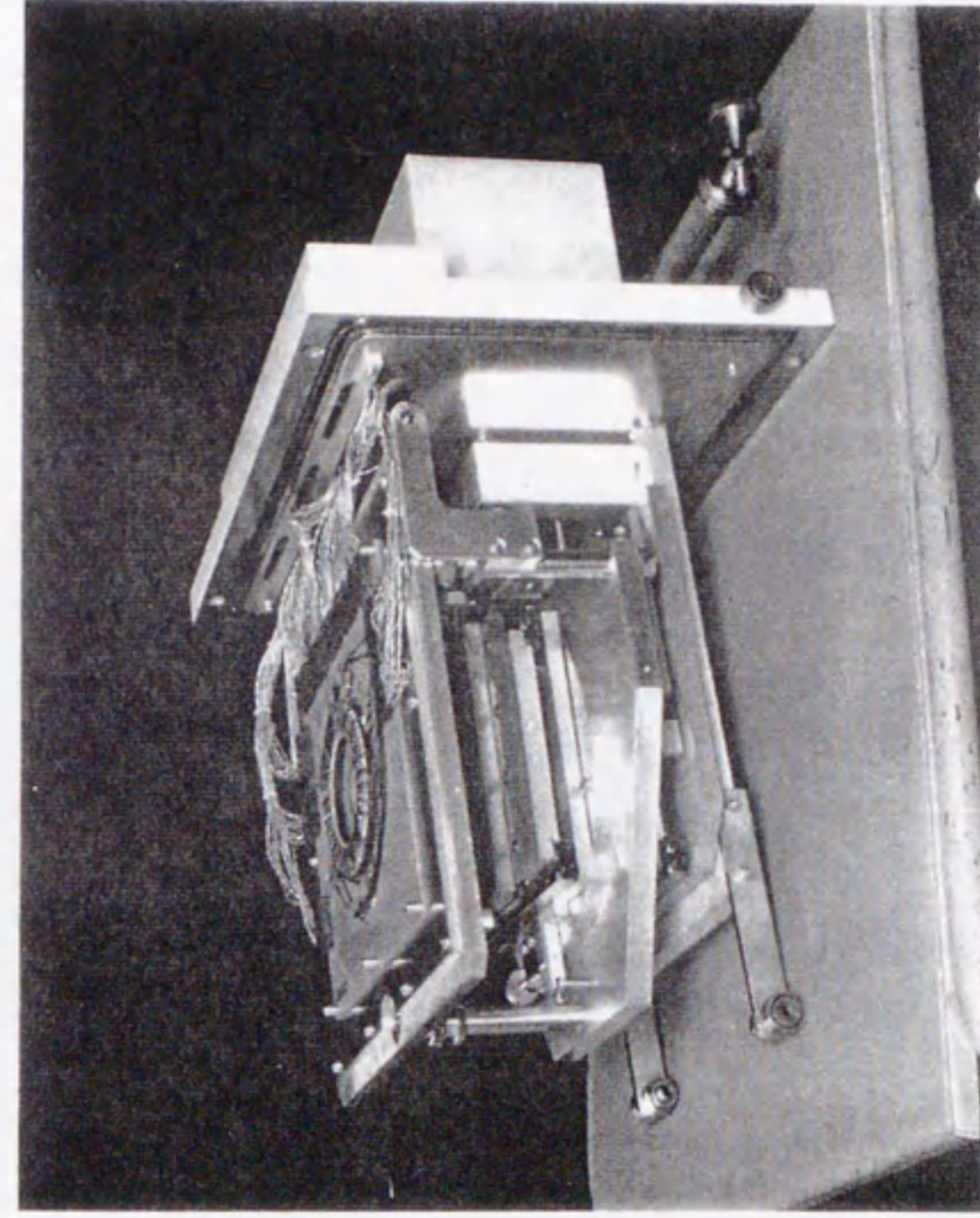


図2. 5 プロブカードを装着した試料ステージの外観

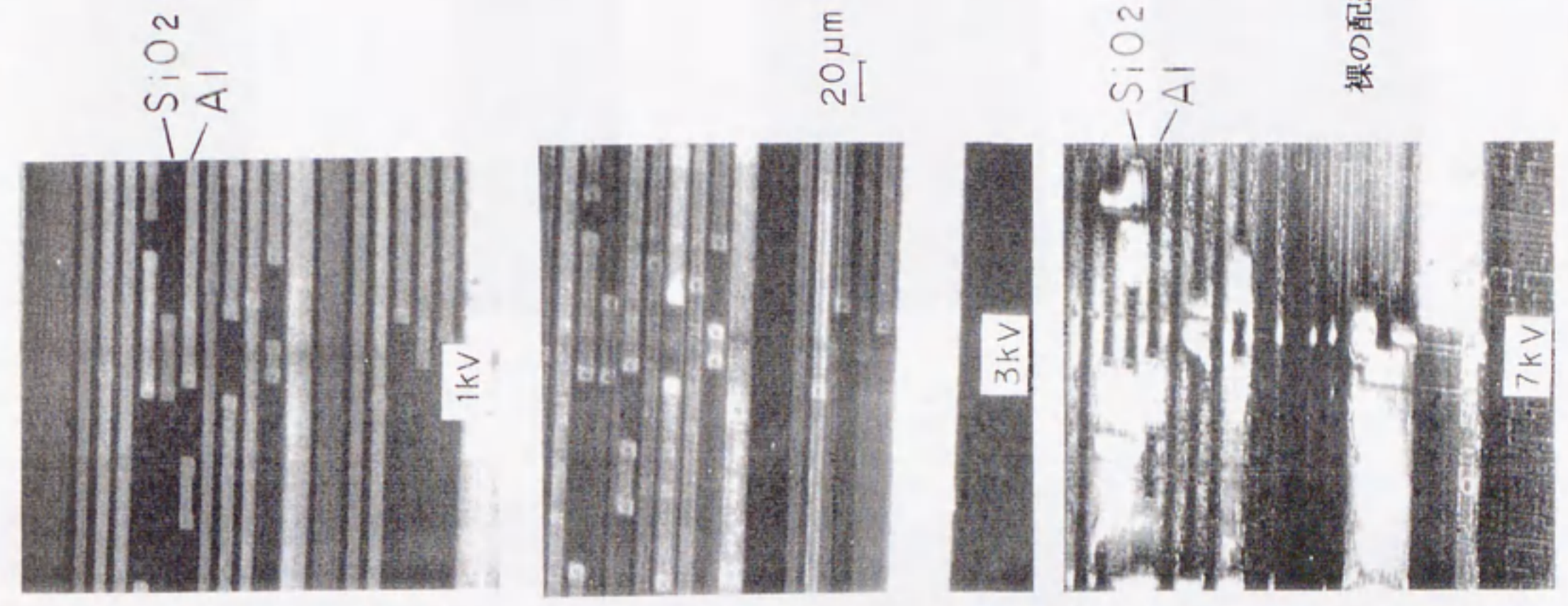


図2. 6 電圧コントラスト像の加速電圧による変化(1)

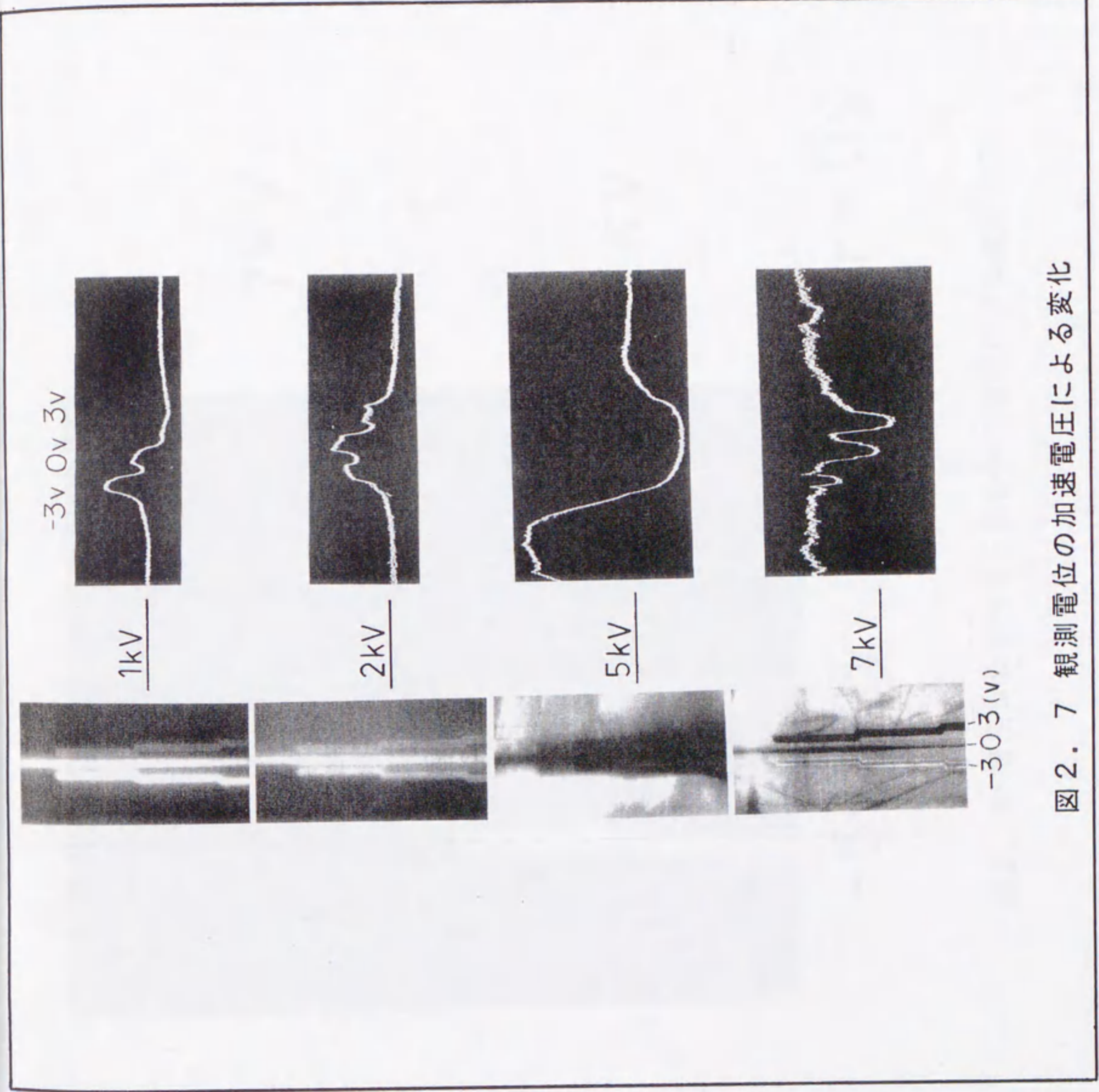
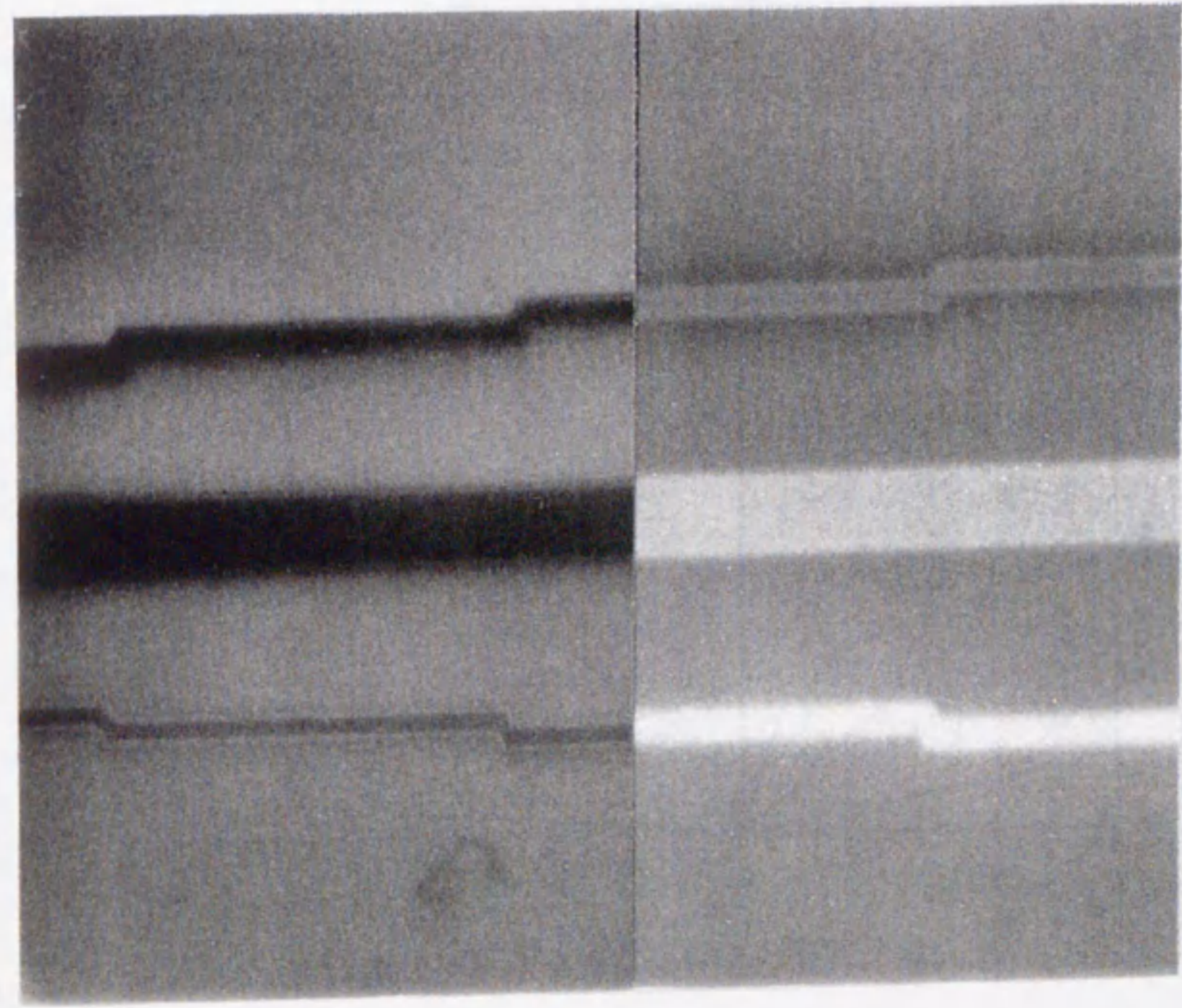


図 2. 7 観測電位の加速電圧による変化



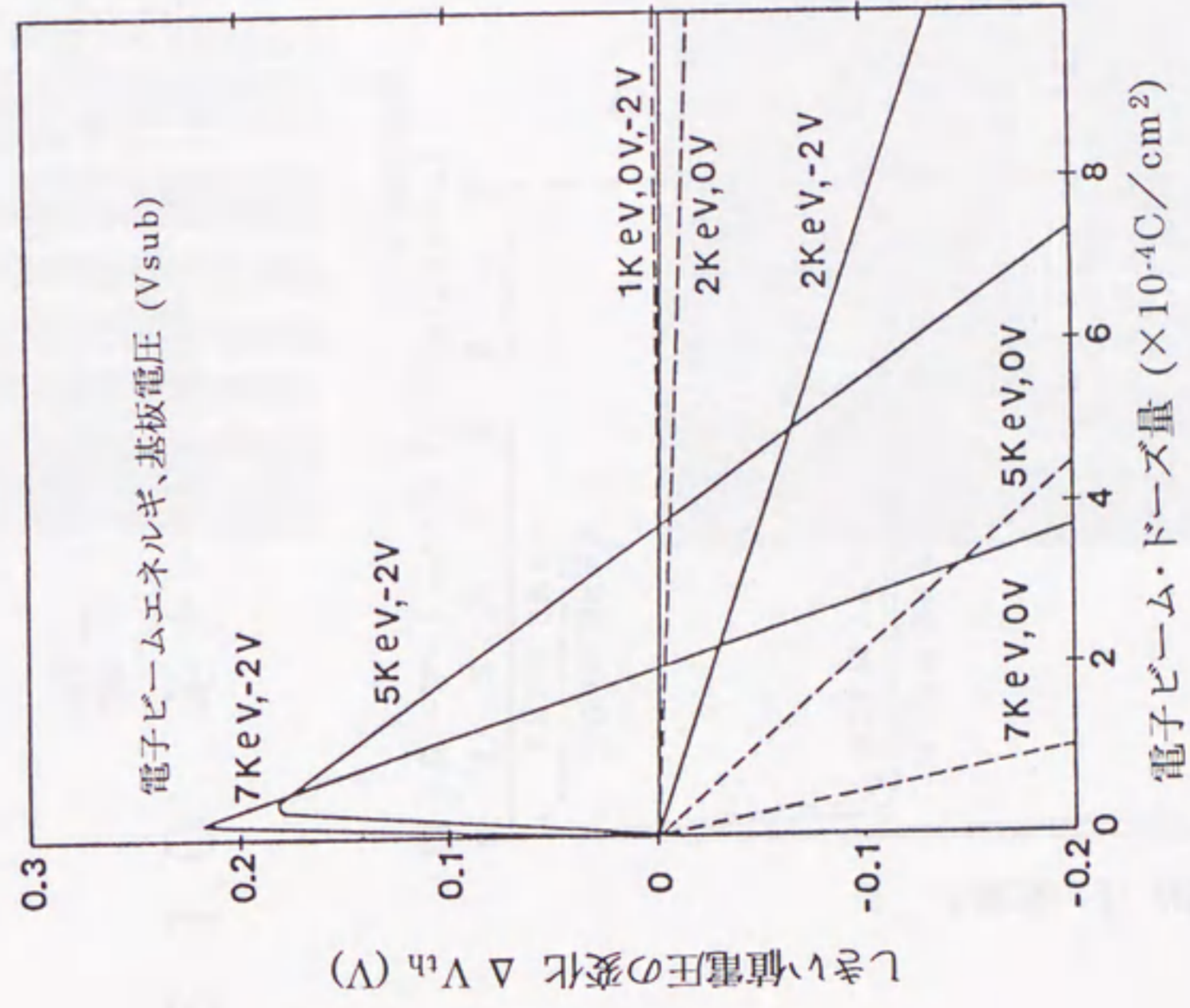
7KV

1KV

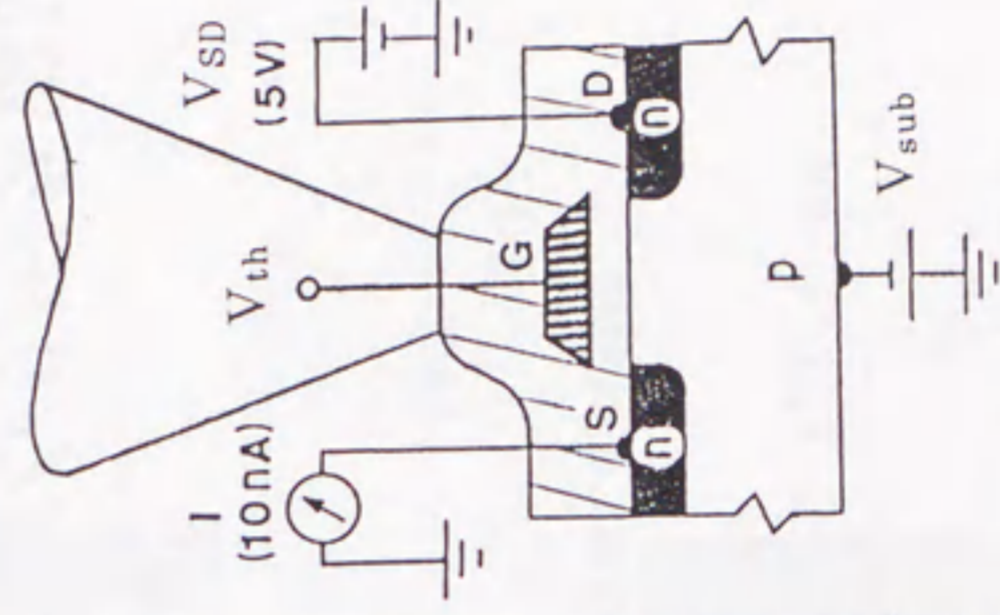
$V_r = 0V$

-5V -2V 0V

図2. 8 電圧コントラスト像の加速電圧による変化(2)



走査電子ビーム



チャネル長: $4 \mu m$

幅: $15 \mu m$

SiO_2 膜厚: $1.8 \mu m$

図 2.9 電子ビーム照射による MOS トランジスタしきい値電圧 V_{th} の変化

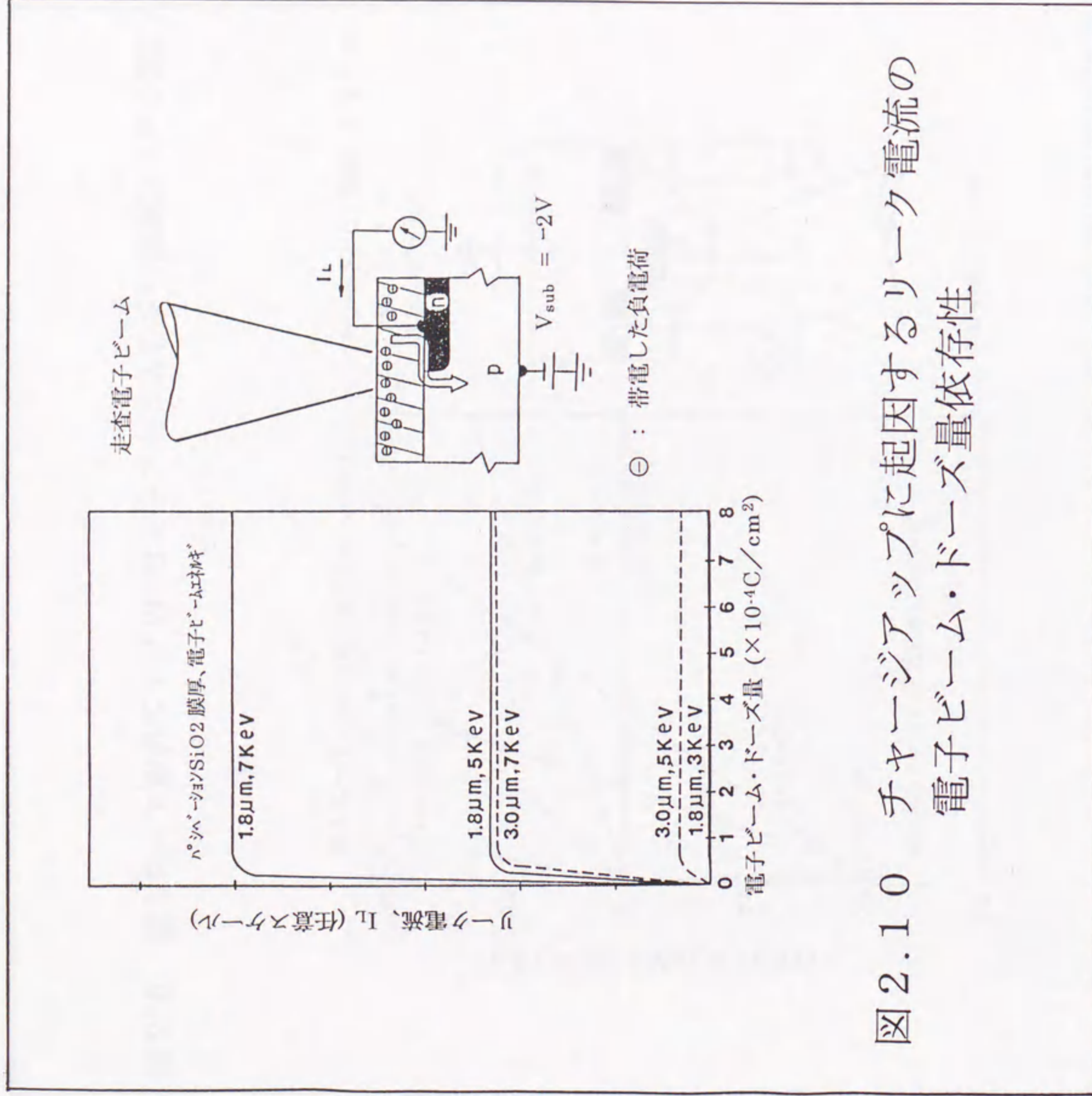
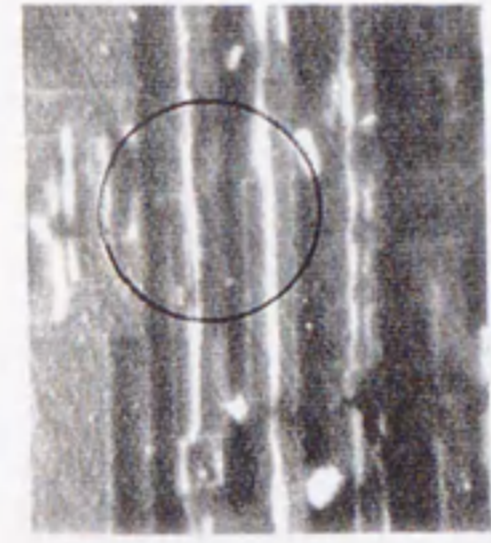


図2.10 チャージアップに起因するリーク電流の
電子ビーム・ドーズ量依存性



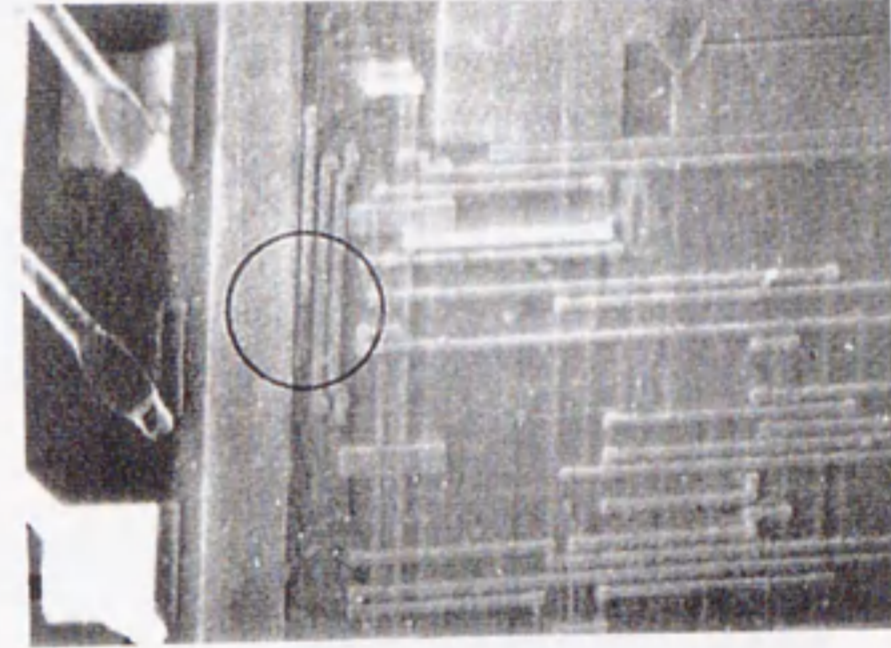
図2.11 LSI配線金属の断線箇所検出例(1)



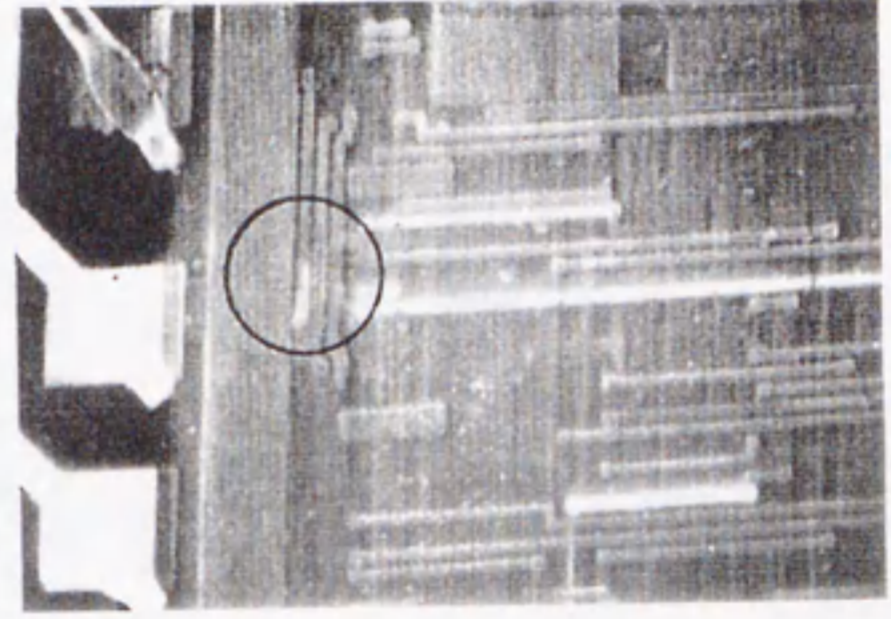
SEM像（凹凸）



光学顕微鏡像



A "Hi"→"Lo"



B "Hi"→"Lo"

電圧コントラスト像（○：断線箇所）

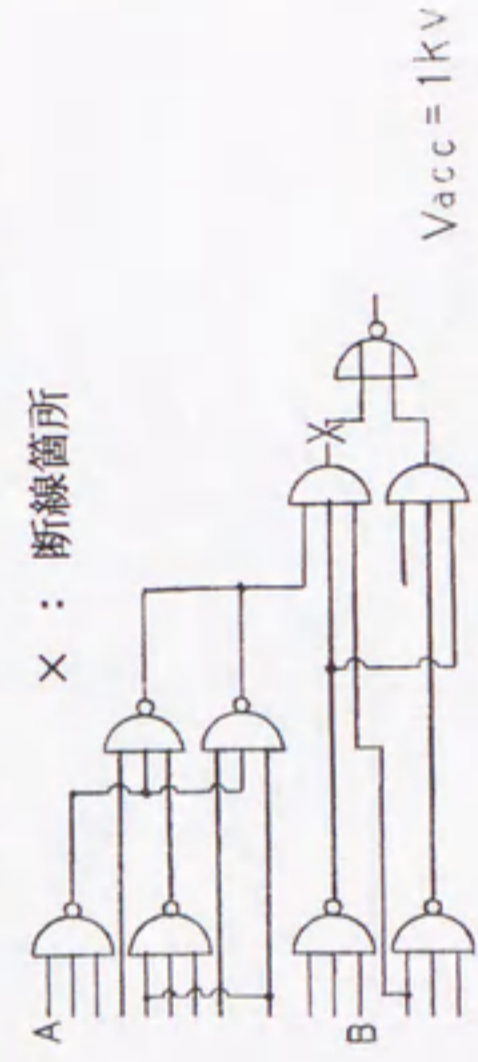


図2. 12 LSI配線金属の断線箇所検出例（2）

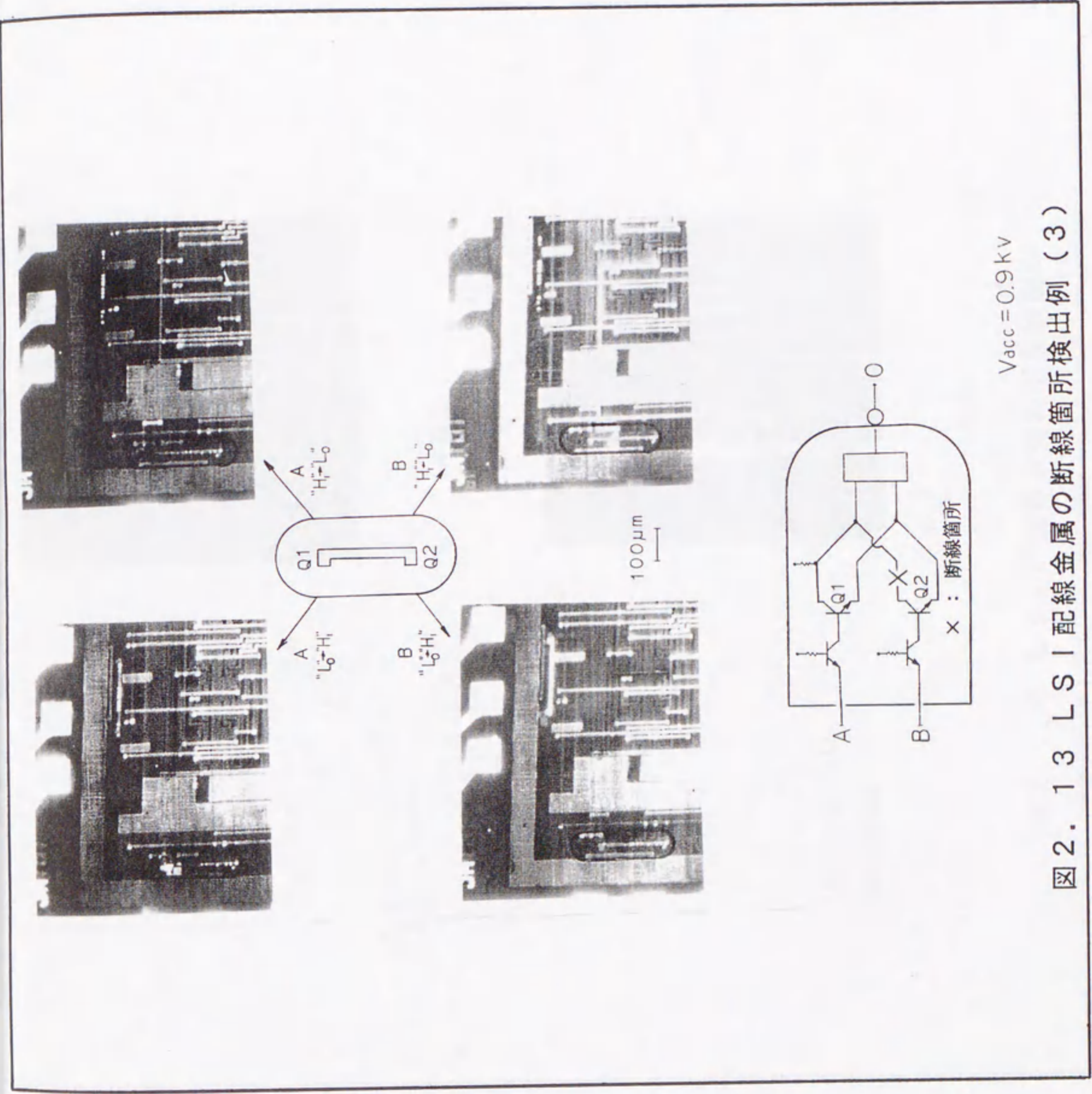
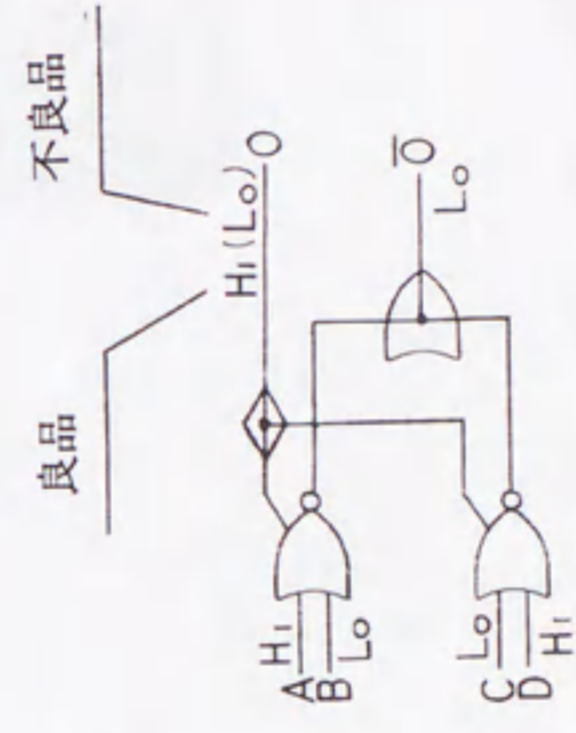


図2.13 LSI配線金属の断線箇所検出例(3)



Vacc = 0.9 kV
裸の配線金属

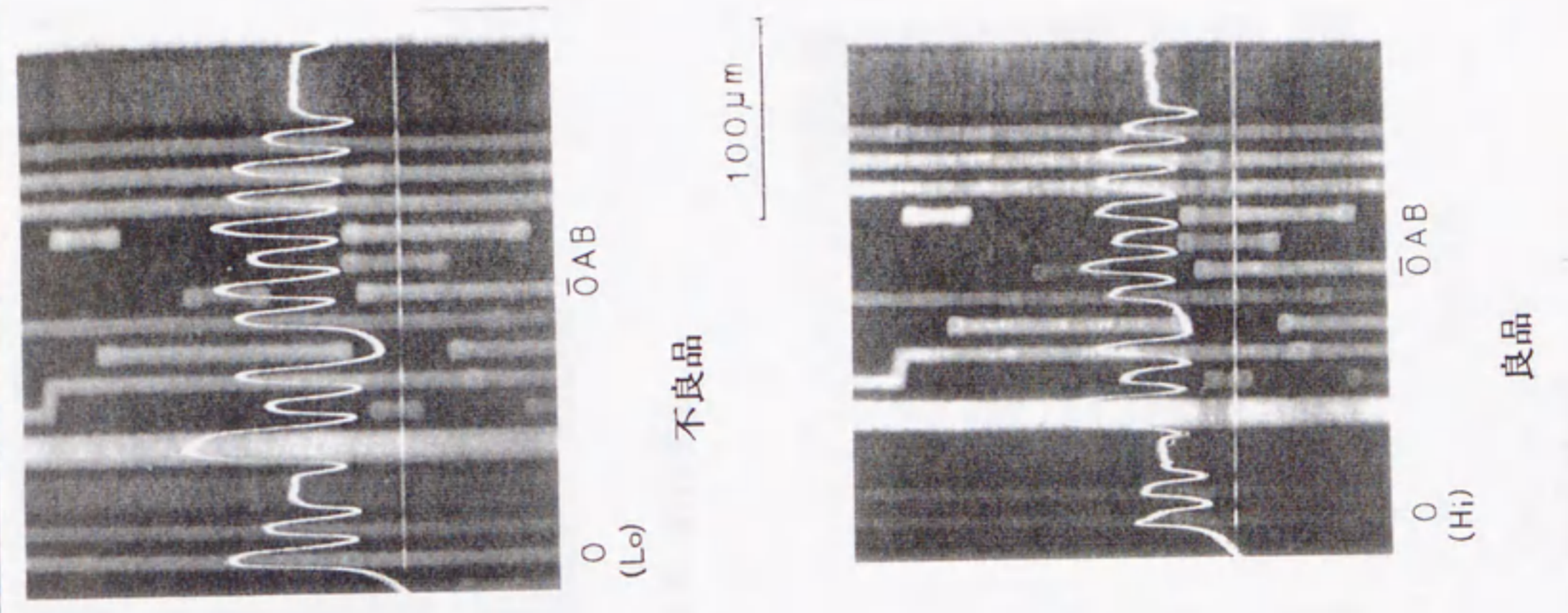
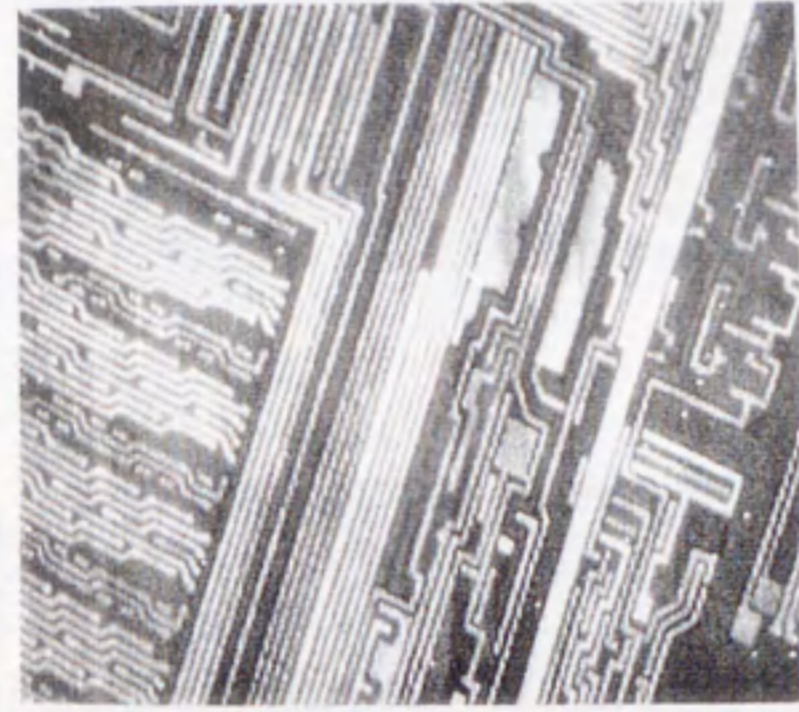
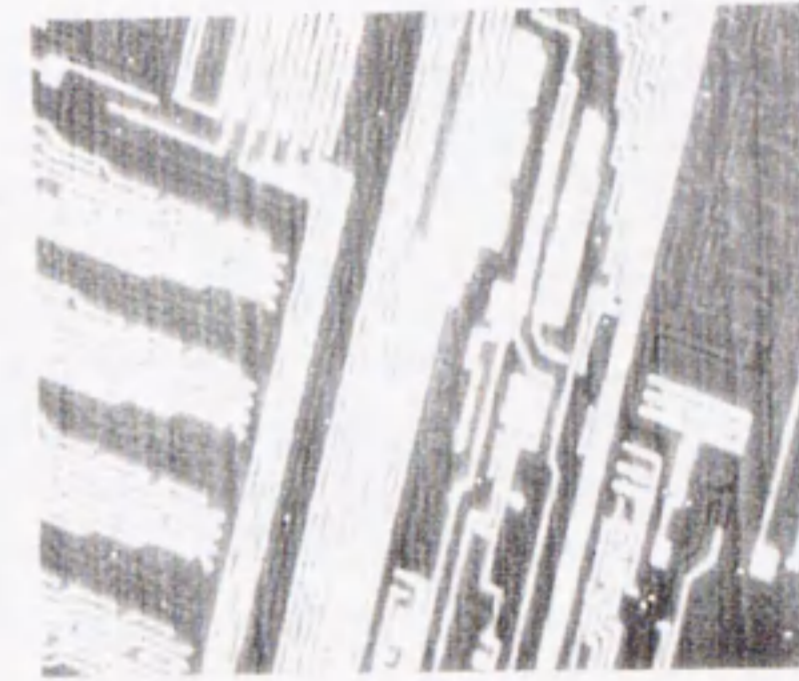


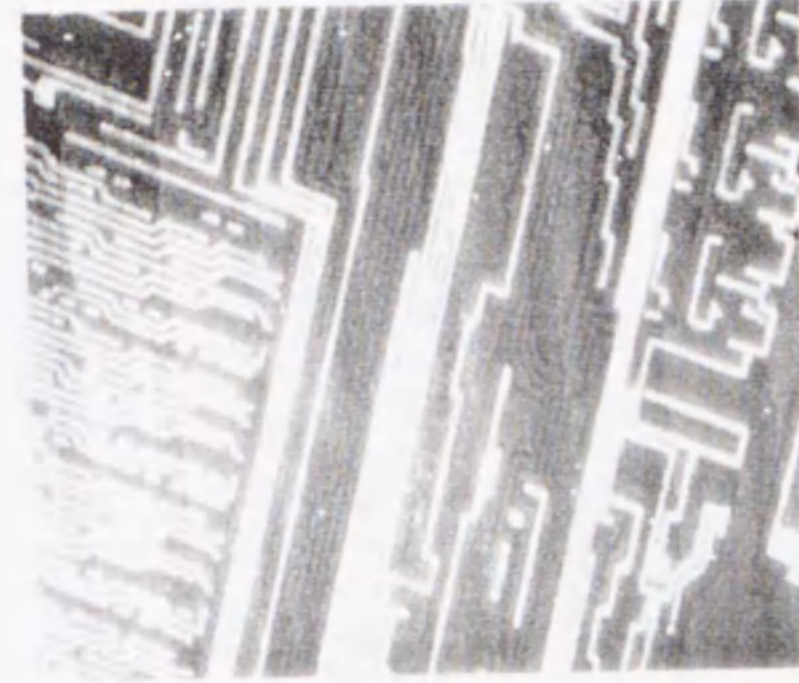
図2. 14 L S I の信号レベル不良検出例



待機状態+動作状態



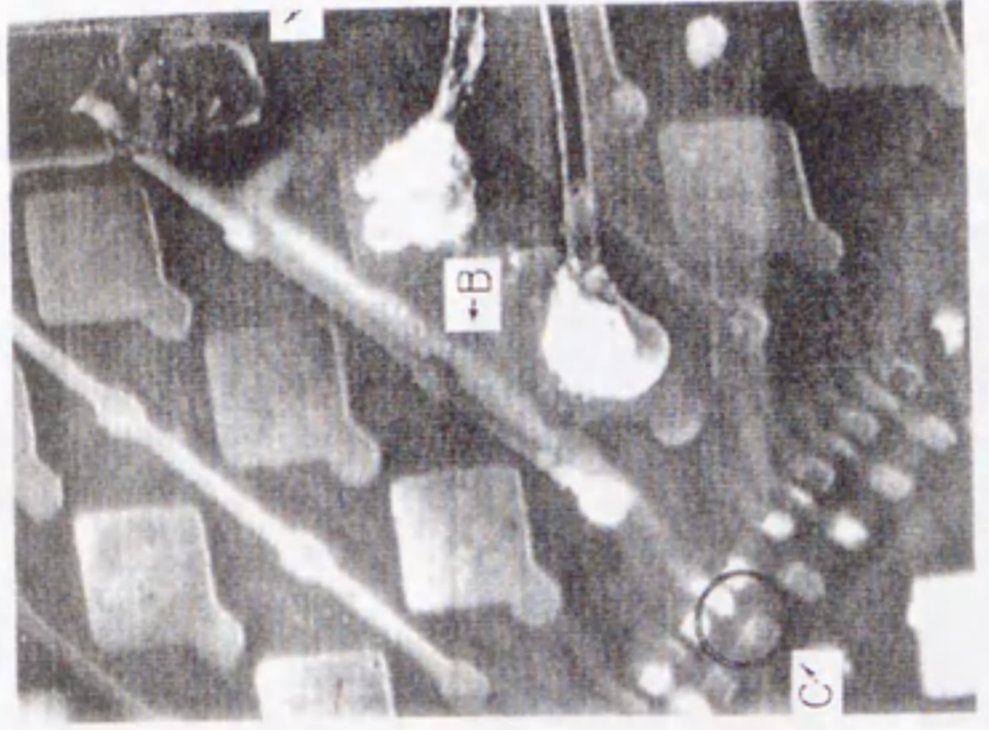
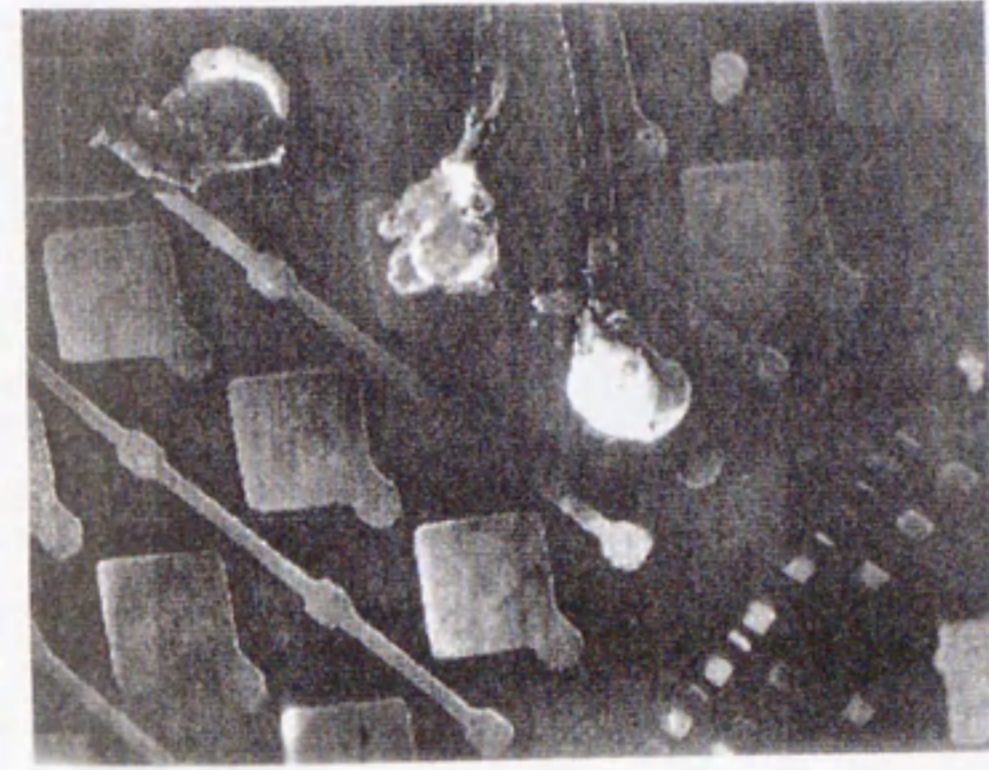
待機状態



動作状態

$V_{acc} = 1.2 \text{ kV}$
裸の配線金属

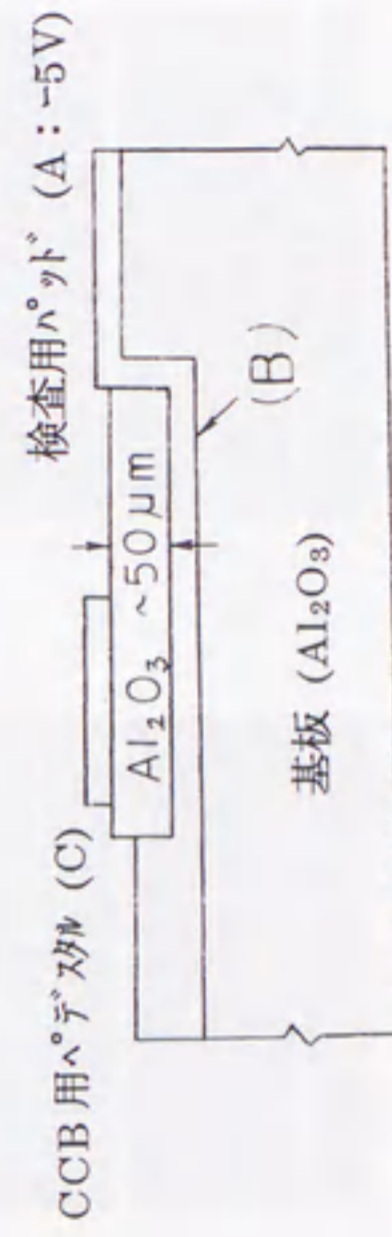
図2.15 16k-DRAMの動作状態における信号の流れ



500μm

SEM像 (凹凸)

電圧コントラスト像
(O:断線箇所)



V_{acc} = 0.9 kV

図2.16 プリント基板配線金属の断線箇所検出例

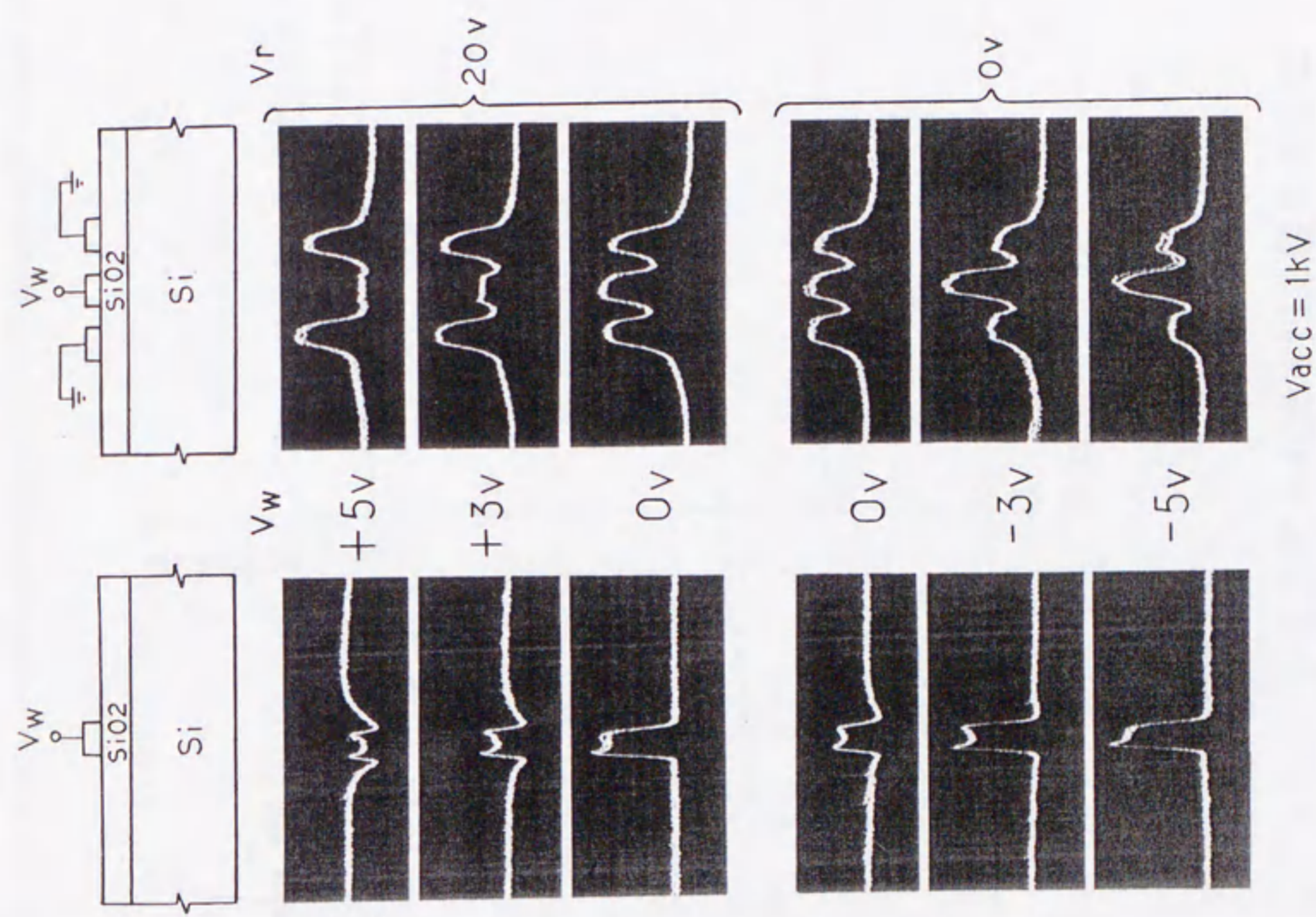


図 2. 1 7 近接配線電位が電圧コントラストに及ぼす影響

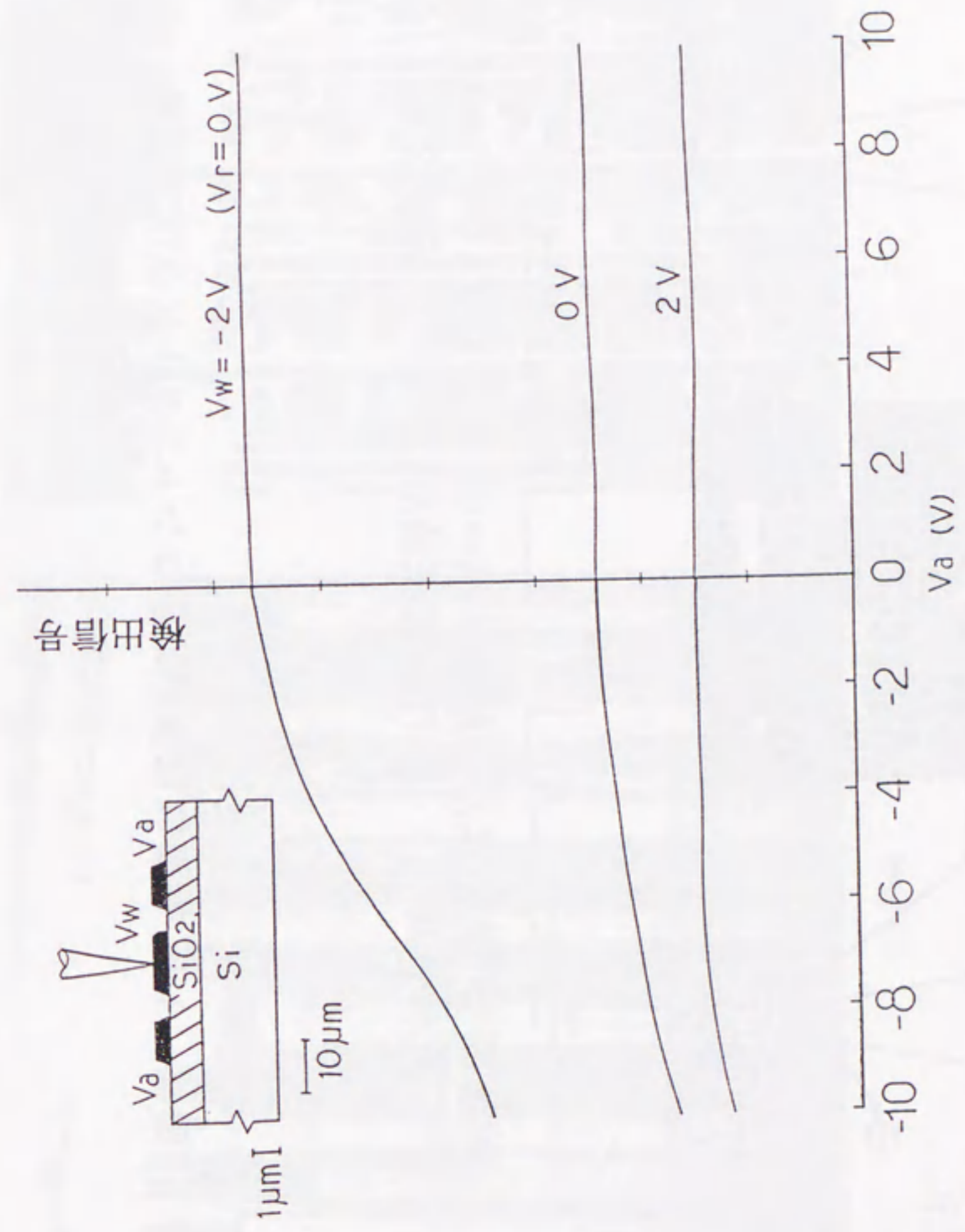


図2. 18 二次電子信号の隣接配線電位依存性

二次電子検出信号

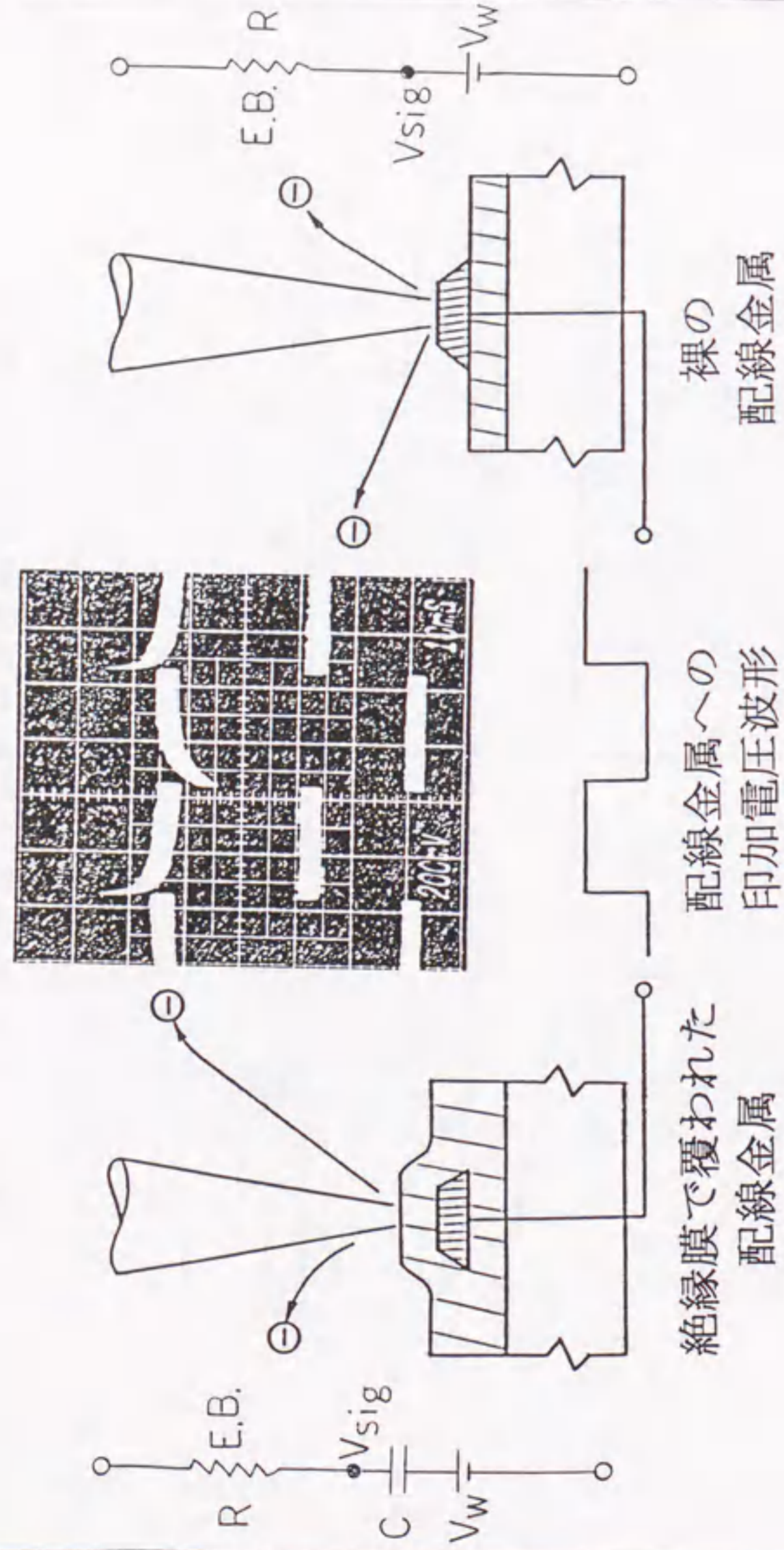


図2. 19 被覆絶縁膜が電圧コントラストに及ぼす影響

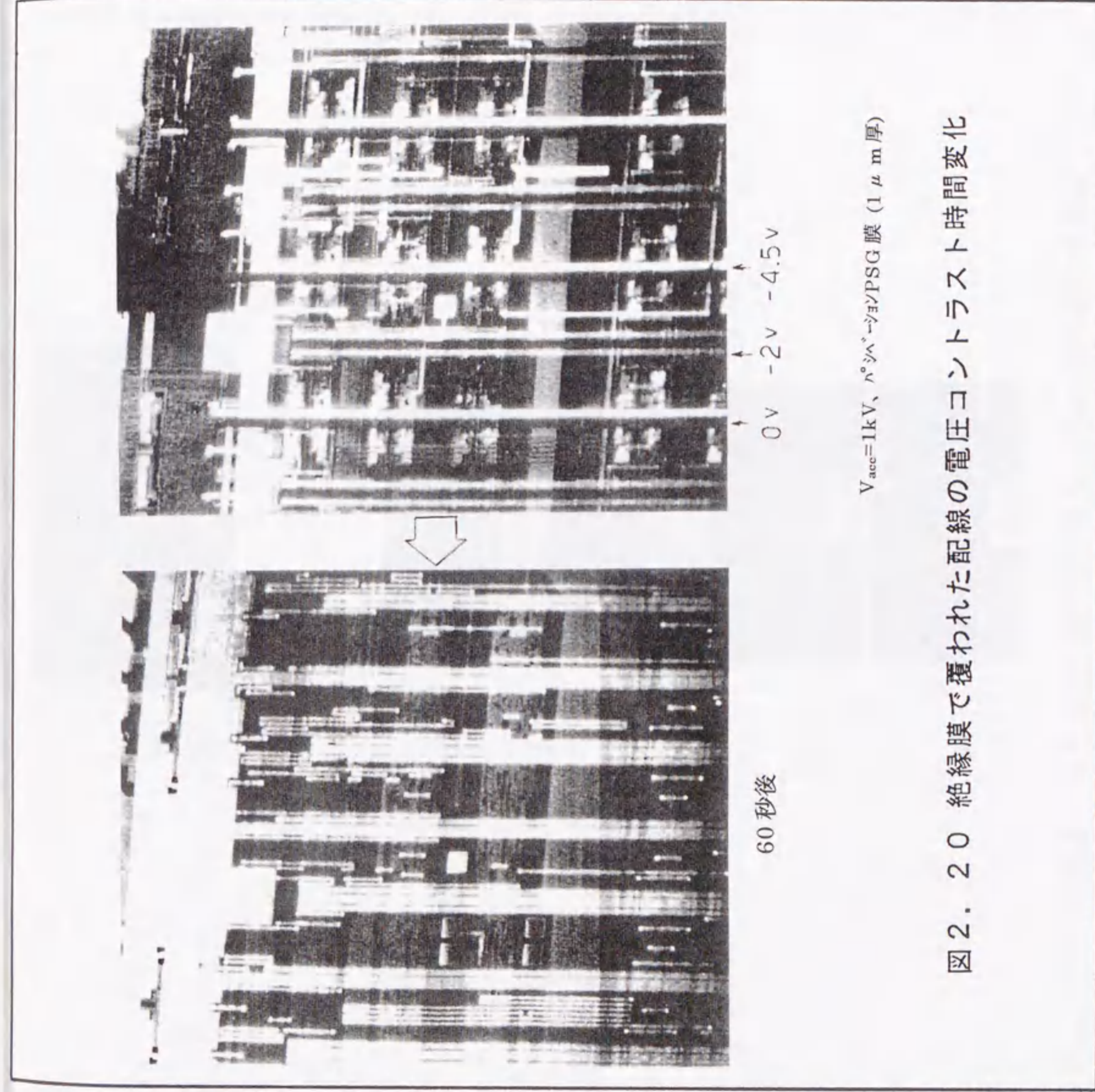


図2. 20 絶縁膜で覆われた配線の電圧コントラスト時間変化

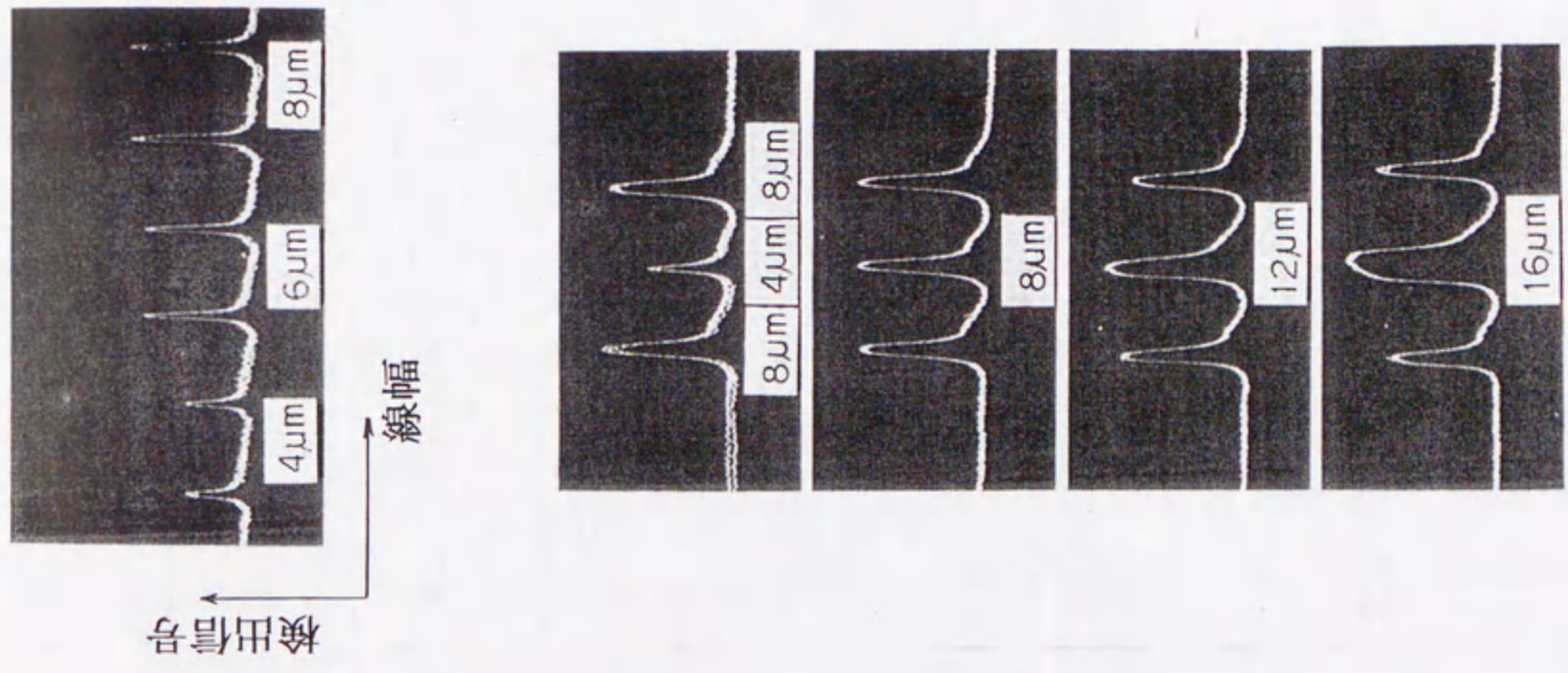


図2. 21 配線幅が電圧コントラストに及ぼす影響

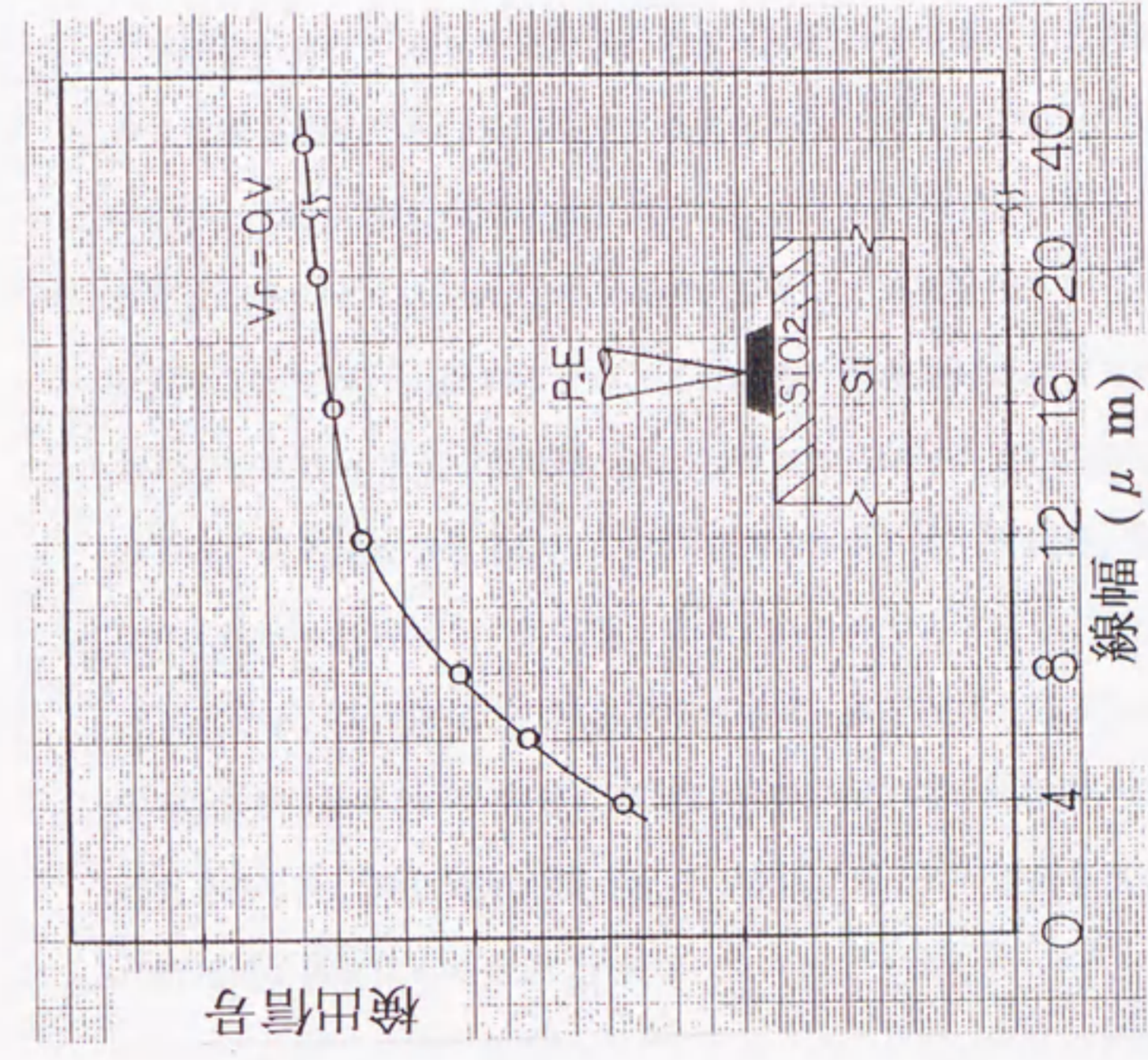


図2. 22 二次電子信号の配線幅依存性

3. 測長用走査電子顕微鏡の研究

3.1 はじめに

高速・高集積な半導体デバイスを製造するためには、高い精度でパターンを加工することが必要である。パターンを高精度で加工するためには、パターン寸法をより高精度に測定できることが前提となる。通常、“最小パターン加工寸法の1/25程度のパターン寸法測定精度(測長精度)”が必要とされる。例えば、 $0.3\mu\text{m}\sim 0.5\mu\text{m}$ プロセスでは、最小加工寸法の1/5に相当する $\pm 0.06\mu\text{m}\sim \pm 0.10\mu\text{m}$ の加工精度が要求される。この加工精度を保証するためには、所要加工精度の1/5に当たる $\pm 0.01\mu\text{m}\sim \pm 0.02\mu\text{m}$ の測長精度が必要となる。

微細なパターンの寸法測定には電子ビームが用いられる。従来の光ビームに比べると、より細かいビームを形成でき、高精度の寸法測定が可能なることに拠る。EB測長技術である。²⁷

しかし、EB測長や5章で述べるウエハ外観観察では、性能としての分解能や測長精度が高ければ良いということではない。“インラインでの検査”という実用的観点から、低損傷・低チャージアップでなければならない。このため、筆者の勤める日立製作所では、図3.1に示すような考え方に基づいて、EB測長・外観検査技術の開発が進められてきた。“低加速電圧の電子ビーム”と“電界放出型電子銃”の採用である。これらの技術は、低加速・電位観測用SEMで開発された技術を基礎として、発展させられたものである。

本章では、低加速電圧の電界放出電子ビームを用いたEB測長・外観検査装置、日立製作所製S7000、を対象として、従来のEB測長精度 $\pm 0.03\mu\text{m}$ を改善し、 $\pm 0.02\mu\text{m}$ 以下に向上するための研究を行った。測長精度を高くするために、電子ビームのビーム径縮小と、測定誤差要因を解析し誤差の低減を図ったものである。

3.2 測長精度の解析

測長精度は、直線性(Linearity)と再現精度(Reproducibility)に分けて考えることができる。直線性は、測定の平均値が真の値から偏っている程度を示す。再現精度は、平均値を中心とした測定値のばらつき程度、すなわち測定の精密さ(Precision)である。測定時期や装置使用履歴を問わず、同一試料を繰返し測定した時の測定値のばらつきから求める。

直線性については、ピッチ寸法が $0.240\mu\text{m}$ の寸法校正用試料を用いて評価した。図3.2に寸法校正用試料の構造を示す。レーザ干渉露光法とSi異方性エッチング技術を用いて、 $0.240\mu\text{m}$ ピッ

子のラインをSi(110)基板上に形成したものである。ピッチは、干渉光強度の測定結果から、0.001 μm 以下の加工ばらつきであることが確認されている。²⁸ 加速電圧 $V_0 = 1\text{ kV}$ に於ける直線性の測定結果を図3.3に示す。数値データから、測定再現性 $\pm 0.015\mu\text{m}$ 以下の精度で、良い直線性の得られていることが明らかになり、十分な精度の得られていることが分かった。

再現精度 $R_i(\mu\text{m})$ については、 R_i が次式で表されるという仮説の下に、解析を行った。

$$R_i^2 = r_i^2 + M_s^2 + M_t^2 \quad (\mu\text{m}^2) \quad (3.1)$$

ここで、 r_i 、 M_s 、 M_t は統計的に独立の事象であり、次のような意味を持つ。 $r_i(\mu\text{m})$ は繰返し測定精度(Repeatability)である。理想的な矩形パターンの寸法を比較的短時間で繰返し測定し、測定値ばらつき分布の3 σ 値から求める。本検討では、寸法校正用試料の矩形パターンを10回測定し、その分散から r_i を求めた。 $M_s(\mu\text{m})$ は、測定パターンの像コントラストや、その経時変動に依存する誤差である。① 電子ビーム径が有限の大きさを持つこと、② 電子ビームの電流値や照射位置が、電子ビーム通路のコンタミネーションなどに因り経時変化すること、③ 現実の測定パターンが理想的な矩形パターンでは無いこと等に因り、測定パターンの像コントラストが低下し、解像度は劣化する。解像度の劣化は寸法測定誤差を大きくする。本検討では、 M_s を装置能力としての分解能で近似した。図3.4に示した作動距離WD(mm)と分解能R(nm)との関係を利用し、WD(すなわちR)を変化させた時の寸法測定値の変化分から、 M_s を算出したものである。なお、分解能の測定は、後述する解像度チェック用標準試料を用いて行った。また、寸法測定時の観察倍率は50,000倍に設定した。50,000倍を選んだ理由は、図3.5に示すように、倍率を高くし過ぎると、焦点合わせや非点収差補正などの像調整マージンが急減し、かえって測定誤差を大きくしてしまうことが分かったからである。 $M_t(\mu\text{m})$ は、操作条件の変更や装置状態の経時変動に起因する測定値ばらつきである。装置の使用履歴に依存したり、装置構成部品の経時変化に起因して、比較的長時間の使用において現われる。本検討では、理想的矩形パターンのピッチ寸法を測定した場合に、 M_s の影響が無視できることを利用し、寸法校正用試料のピッチ寸法を測定して M_t を求めた。ピッチ寸法測定の再現精度 $R_p(\mu\text{m})$ は、次式のように近似される。

$$R_p^2 = r_p^2 + M_t^2 \quad (\mu\text{m}^2) \quad (3.2)$$

ここで、 $r_p(\mu\text{m})$ はピッチ寸法測定の繰返し精度である。(3.2)式を変形し、 M_t は R_p と r_p を用いて、次式で求められる。

$$M_t^2 = R_p^2 - r_p^2 \quad (\mu\text{m}^2) \quad (3.3)$$

上述の評価方法を用い、S7000で実測した結果から、次のような値が得られた。

$$r_i = \pm 0.015 \mu\text{m} \quad (\text{実測値})$$

$$M_s = 0.020 \mu\text{m} \quad (\text{推定値: 図3.6の分解能-パターン寸法の測定結果から、分解能の変動範囲を分解能調整直後の15nmから再調整直前の23nmとして求めた})$$

$$M_t = \pm 0.016 \mu\text{m} \quad (\text{計算値: } R_p \text{ と } r_p \text{ の下記実測値を基に、(3.3)式を用いて、計算で求めた})$$

$$R_p = \pm 0.018 \mu\text{m} \quad (\text{実測値: ピッチ寸法を1ヶ月間測定し、ばらつき分布の3 σ 値から求めた})$$

$$r_p = \pm 0.009 \mu\text{m} \quad (\text{実測値: ピッチ寸法を10回繰返し測定し、その分散から求めた})$$

上記 r_i 、 M_s 、 M_t の値を(3.1)式に代入すると、 $R_i = \pm 0.03\mu\text{m}$ が得られる。得られた0.03 μm の値は、実使用における R_i の経験値と良い一致を示した。

このことから、(3.1)式の妥当であることが検証できた。また、以上の検討から、 r_i 、 M_s 、 M_t は同程度の大きさであり、「再現精度を向上するためには、 r_i 、 M_s 、 M_t の全てを小さくしなければならない」ことが分かった。

再現精度向上のために、図3.7に示す方向で検討を行った。高分解能化すなわち電子ビーム径縮小による測長精度の向上は、ビーム径を小さくすることに拠り、パターンエッジにおける二次電子信号のラインプロファイルが急峻になることの効果である。図3.8に、その説明図を示す。

3.3 測長精度の向上

3.3.1 電子ビーム径の縮小

一般に、電子ビームのビーム径Dは、電子ビーム縮小光学系の収差で決まり、次式で表されることが知られている。

$$D^2 = D_0^2 + D_s^2 + D_c^2 + D_a^2 \quad (\text{nm}^2) \quad (3.4)$$

ここで、 $D_0(\text{nm})$ は無収差光学系でのビーム径、 $D_s(\text{nm})$ は球面収差に因るぼけ量、 $D_c(\text{nm})$ は色収差に因るぼけ量、 $D_a(\text{nm})$ は回折収差に因るぼけ量である。 D_0 、 D_s 、 D_c 、 D_a は、それぞれ次のように表される。

$$D_0 = M \cdot d_0 \quad (\text{nm}) \quad (3.5)$$

$$D_s = (1/2) \cdot C_s \cdot \alpha^3 \quad (\text{nm}) \quad (3.6)$$

$$D_c = C_c \cdot (\Delta V / V_0) \cdot \alpha \quad (\text{nm}) \quad (3.7)$$

$$D_a = 1.22(\lambda / \alpha) \quad (\text{nm}) \quad (3.8)$$

なお、Mは縮小光学系の縮小率、 $d_0(\text{nm})$ は電子源の直径、 $C_s(\text{mm})$ は縮小光学系の球面収差係数、

C_c (mm)は縮小光学系の色収差係数、 α (rad)は対物レンズの開口角、 ΔV (V)は $e \Delta V$ が電子ビームのエネルギーばらつき、 V_0 (V)は電子ビームの加速電圧、そして λ (nm)は電子ビームの波長である。

以下の考察は、対象を低エネルギー電界放出電子ビームに特定する。電界放出電子ビームでは、 d_0 が6nm程度と小さいため、 D_0 の項は無視できる。また、低エネルギー電子ビームでは、 V_0 が小さく、 λ が大きくなるため、色収差に因るぼけ量 D_c と回折収差に因るぼけ量 D_d とが支配的となる。したがって、(3.4)式のビーム径 D は、次式のように近似できる。

$$D^2 \approx D_c^2 + D_d^2 \\ = [C_c \cdot (\Delta V / V_0) \cdot \alpha]^2 + [1.22 \cdot (\lambda / \alpha)]^2 \quad (\text{nm}^2) \quad (3.9)$$

ここで、図3.9左図に示したS7000の収束レンズと対物レンズとから成る2段縮小光学系に於いては、 C_c および α は次式のように近似される。

$$C_c \approx C_{c_{obj}} + M_0^2 \cdot C_{c_{cond}} \quad (\text{mm}) \quad (3.10)$$

$$\alpha \approx [12 / (WD + 7)] \cdot \alpha_{opt} \quad (\text{rad}) \quad (3.11)$$

$C_{c_{obj}}$ は対物レンズの色収差係数、 $C_{c_{cond}}$ は収束レンズの色収差係数、 M_0 は対物レンズの縮小率、 WD (mm)は作動距離(対物レンズ下面から試料面までの距離)、 α_{opt} (rad)は最小ビーム径 D_{min} (nm)が得られる時の対物レンズ開口角である。 α_{opt} 、 D_{min} は、それぞれ次式で表される。

$$\alpha_{opt} = 1.1 \sqrt{[(\lambda / C_c) \cdot (V_0 / \Delta V)]} \quad (\text{rad}) \quad (3.12)$$

$$D_{min}^2 = [C_c \cdot (\Delta V / V_0) \cdot \alpha_{opt}]^2 + [1.22 (\lambda / \alpha_{opt})]^2 \quad (\text{nm}^2) \quad (3.13)$$

また、S7000の電界放出電子ビームでは、 d_0 は6nm、 ΔV は0.2Vであり、 λ は次式で表される。

$$\lambda = 1.23 / \sqrt{V_0} \quad (\text{nm}) \quad (3.14)$$

S7000に於いては、 WD が5mmの時に最小ビーム径が得られ、 α_{opt} は 3.4×10^{-3} radとなる。 D_{min} は、表3.1に示すS7000 ($WD=5$ mm)の電子光学パラメータを用いて求め、20nmとなる。

電子ビーム径を20nm以下に縮小するためには、(3.13)式から分かるように、 C_c を低減することが唯一の方法である。 C_c を小さくするためには、(3.10)式から、対物レンズの縮小率 M_0 を小さくしなければならない。 M_0 を最小とするためには、対物レンズに平行入射した電子ビームを試料面上に絞り込めばよい。図3.9右図のような光学系に改良することにより、従来20nmであった C_c を10mmにまで低減できることが分かった。この結果、(3.13)式から、 $WD=5$ mmに於ける最小ビーム径が16nmとなる。

実際に16nmのビーム径が得られていることを、SEM像の分解能に依って確認した。SEM像

の分解能 R (nm)とビーム径 D (nm)とは、次式のような比例関係にあることが知られている。

$$R = A \cdot D \quad (\text{nm}) \quad (3.15)$$

ここで、比例定数 A は、分解能の定義方法に依って異なるが、 $0.57\sqrt{2}$ の間の値をとる。日立製作所製の各種SEMについて実測してみると、図3.10に示すように、 A は、ほぼ0.85となることが分かった。したがって、(3.15)式は次のように表される。

$$R = 0.85 \cdot D \quad (\text{nm}) \quad (3.16)$$

図3.11に示す解像度チェック用標準試料像から判定して、 $WD=5$ mm、同一 α 値で、ほぼ12nmの分解能が得られている。(3.16)式から換算して、ビーム径16nmの得られていることを確認できる。

なお、分解能の精度は、解像度チェック用標準試料の加工精度で決まっており、 ± 2 nm程度である。また、解像度チェック用標準試料は、解像度が試料のチャージアップや二次電子放出率などの影響を受けず、「SEM像の解像度が装置分解能に等しいと見做せる」ように留意して設計・作製されている。

3.3.2 高分解能の維持

電子ビーム通路周辺のコンタミネーションなどに因り、時とともに、分解能が劣化する。このような分解能の経時変動は、 M_0 の支配的要因である。解像度チェック用標準試料を用いた定期監視を行うことに依り、分解能の経時変動を従来の15nm~23nmから12nm~17nmに低減できることが分かった。

3.3.3 測定性能を決める装置要因の精密制御

測定性能を決める装置要因は、電界放出型電子銃に係る項目と、対物レンズに係る項目とに大別される。測定再現精度に影響を与える装置要因と、それらに起因した寸法測定値の変化量を、纏めて表3.2に示す。電子銃に係る要因では、引出電圧 V_1 に依存した変化量が大きく、最大の問題であることが分かった。図3.12に示すように、 $0.03 \mu\text{m}/\text{kV}$ の割合で変化する。この変化は、光学パラメータの制御方法に起因したものである。S7000では、FEチップの表面状態が変化してもエミッション電流値が一定に保てるように、 V_1 および収束レンズ電流値が自動調整されている。すなわち、 V_1 が変化すると、第一アノード(引出電極)および第二アノード(加速電極)で構成している静電レンズの特性が変わり、仮想光源位置も変化する(図3.9)。したがって、仮想光源位置が変化しても収束レンズの焦点位置が動かず、所定ビーム電流値・所定観察倍率が保

るように、収束レンズ電流値が制御されている。しかし、収束レンズ電流の制御は、 V_0/V_1 をパラメータとした設計光学条件に対応する値になっており、装置毎に最適化されているわけではない。そのため、FEチップと引出電極の位置関係が設計光学位置から外れると、収束レンズの焦点位置が変化し、倍率補正誤差となる。倍率補正誤差は寸法測定誤差となる。

V_1 変更起因する寸法測定誤差の低減を目的として、FEチップと引出電極との最適位置関係を求めた。図3.13は、FEチップの高さ(引出電極からFEチップ先端までの距離)をパラメータとして、 V_0/V_1 を変化させながらピッチ寸法を測定した結果である。実験に用いた装置の場合、最適チップ高さは設計位置よりも2.5mm高い場所にあることが分かった。また、 V_0/V_1 の値が0.2以下、かつ V_0 が1kV以下の場合には、寸法測定誤差が大きくなるため、測長精度保証の困難なことが分かった。FEチップの高さを最適化した状態におけるピッチ寸法測定結果を図3.14に示す。この直線の傾きから分かるように、 V_1 変化に起因した寸法測定誤差を $0.007\mu\text{m}/\text{kV}$ に低減することができた。

対物レンズに係る要因では、対物レンズ電流値のモニタ誤差に起因する寸法測定値変化量が、 $0.011\mu\text{m}$ ($\text{WD}=5\text{mm}$) と大きいことが分かった。S7000では、試料高さを変更しても倍率が一定となるように、対物レンズ電流のモニタ値から焦点距離を算出し、倍率補正を行っている。対物レンズ電流値は、Coarse-focusノブとFine-focusノブで変えられる。しかし、レンズ電流のモニタは、Coarse-focusノブに依る変化分のみを、ロータリ・エンコーダを用い、12bitのDAC値として読み取っている。Fine-focusノブによる変化分についてはモニタされていない。したがって、Fine-focusノブの操作が倍率補正誤差、すなわち寸法測定誤差を引き起こす。 $\text{WD}=5\text{mm}$ の位置でFine-focusを変化させた時の寸法測定値変化量を図3.15に示す。なお、WDを長くすると、Fine-focusノブに依る対物レンズ電流値の相対的変化量が大きくなるため、寸法測定誤差が増大する。対物レンズ電流の変更に起因した寸法測定誤差を無くするため、Fine-focusノブ位置を固定すると良い。S7000では、観察倍率60,000倍までのSEM像において、ノブ位置固定に伴う操作上の支障はなかった。

また、前述の寸法校正用試料を用いて定期的に測定性能を監視することが、高性能を維持するために有効な手法であることを確認した。解像度チェック用試料については、さらに高感度にするべく、MO-CVD技術を用いて作製した試料の実用化を検討している。(図3.16)

3.4 実験結果

電子ビーム径の縮小、解像度チェック用標準試料を用いた高分解能の維持、およびFEチップ高さの最適化など、測定性能を決める装置要因の精密制御を行うことに拠り、 r_1 、 M_s 、 M_i を次のような値に低減することができた。なお、各値の求め方は、3.2で述べた方法に準じている。

$$r_1 = \pm 0.012\mu\text{m} \quad (\text{実測値})$$

$$M_s = 0.015\mu\text{m} \quad (\text{推定値})$$

$$M_i = \pm 0.004\mu\text{m} \quad (\text{計算値})$$

$$R_p = \pm 0.008\mu\text{m} \quad (\text{実測値})$$

$$r_p = \pm 0.007\mu\text{m} \quad (\text{実測値})$$

結果として、 R_1 は $\pm 0.02\mu\text{m}$ 以下の値が得られた。

3.5 まとめ

低エネルギーの電界放出電子ビームを用いた測長技術に於いて、寸法測定の高精度化を検討し、以下の結論が得られた。

- (1) 測長精度向上のためには、直線性の問題は小さく、再現精度を改善することが重要である。
- (2) 再現精度 R_1 は、繰返し測定精度 r_1 、像コントラストの違いやその経時変動に因る誤差

M_s 、および操作条件の変更や装置状態の経時変動に起因する誤差 M_i を用いて、次式のように表せることを明らかにした。

$$R_1^2 = r_1^2 + M_s^2 + M_i^2$$

- (3) 汎用的測長SEM、日立製作所製 S7000、に於いては、 $r_1 = \pm 0.015\mu\text{m}$ 、 $M_i = \pm 0.016\mu\text{m}$ 、 $M_s = 0.02\mu\text{m}$ の程度であり、 R_1 は $\pm 0.03\mu\text{m}$ (3 σ)であった。

- (4) S7000の R_1 を $\pm 0.02\mu\text{m}$ に向上するために、以下の方向付けと対策を行った。

- 1) 分解能の向上、すなわち電子ビーム径縮小に依る r_1 、 M_s の低減:

縮小光学系を改良し、電子ビーム径を従来の20nmから16nmに縮小できた。分解能としては、従来の15nmから12nmに改善された。

- 2) 高分解能の維持に依る M_s の低減:

解像度チェック用標準試料の開発に依り、分解能の変動幅を従来の15nm~22nmから12nm~17nmに改善した。

- 3) 装置パラメータの精密制御に依る M_i の低減:

測定性能を決める装置要因を解析し、FEチップ・引出電極間距離および対物レンズ電流値のモニタ誤差が大きな誤差要因であることを明らかにするとともに、それ等の低減を図った。

(5) 上記の対策を行うことに拠り、 $r_1 = \pm 0.012 \mu\text{m}$ 、 $M_s = 0.015 \mu\text{m}$ 、 $M_t = \pm 0.004 \mu\text{m}$ と改善され、 $\pm 0.019 \mu\text{m}$ (3 σ)の R_1 が得られた。

測長精度向上のための今後の課題は、高分解能の維持・装置パラメータの精密制御を推進し、装置性能を常時最高の状態に保持できるようにすることが重要と考える。本検討で述べた寸法校正用試料や解像度チェック用試料などは、その一例である。しかし、これ等もまだ充分なものではなく、今後の改良が必要である。

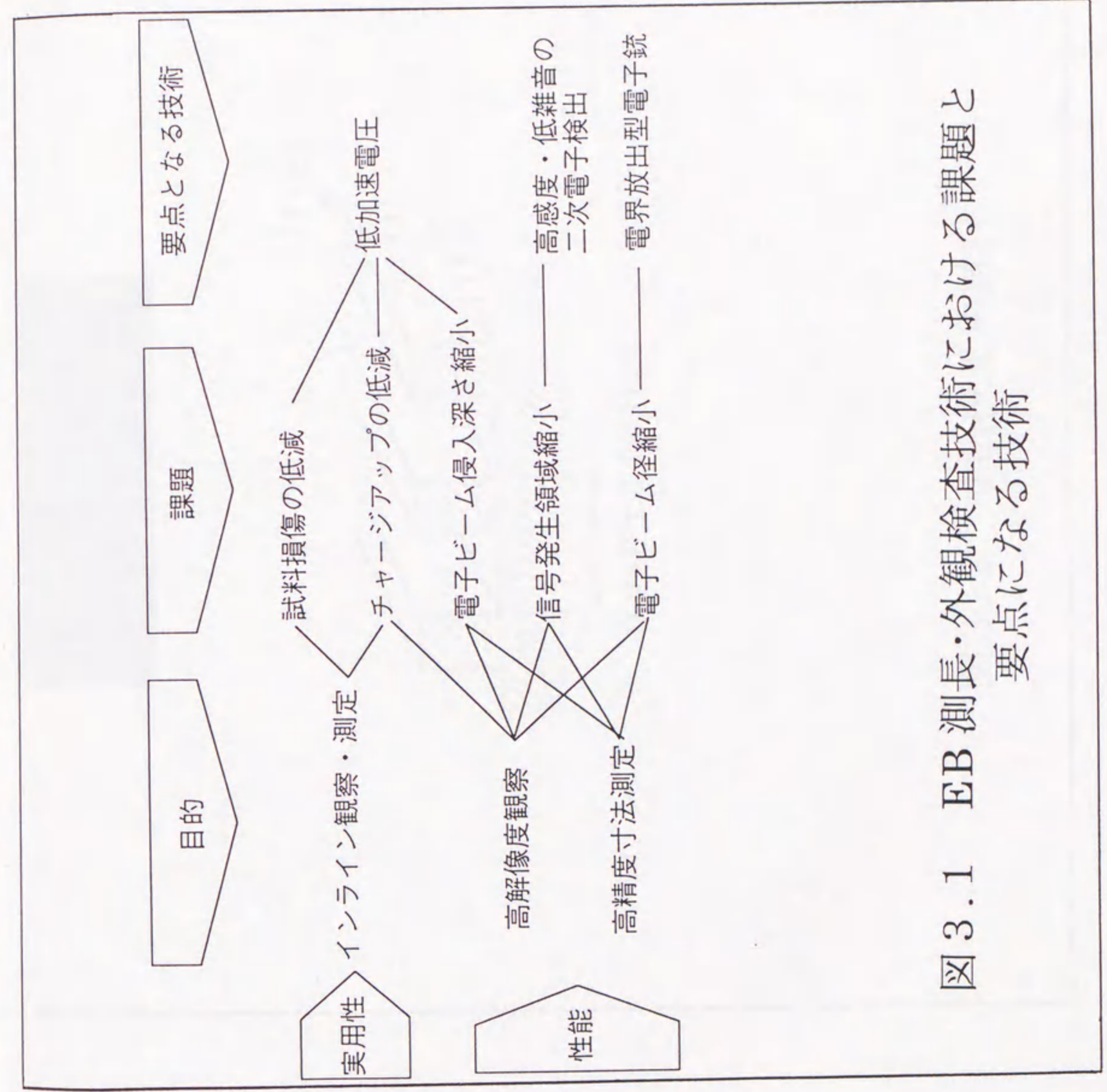


図3.1 EB測長・外観検査技術における課題と
要点になる技術

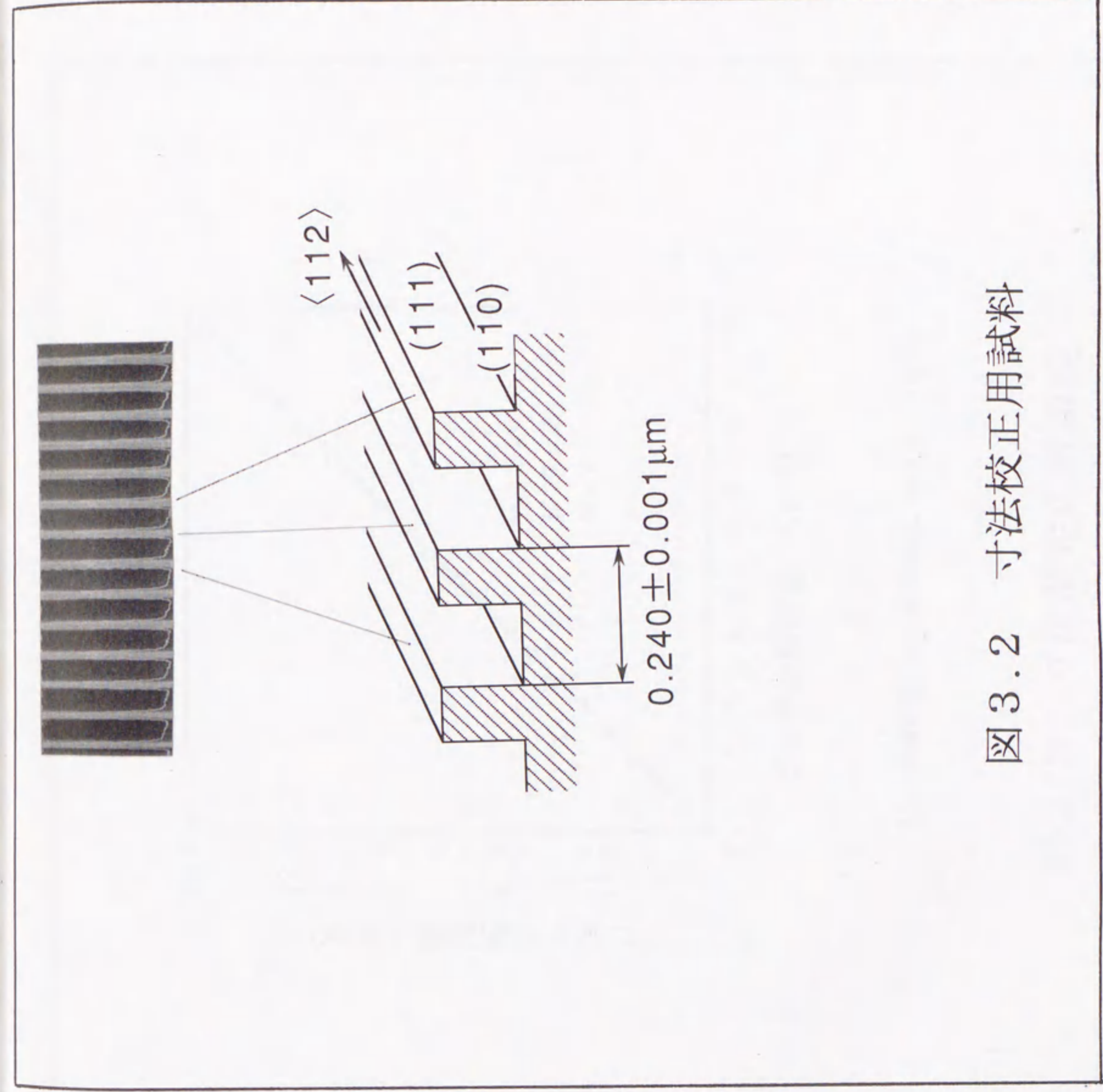
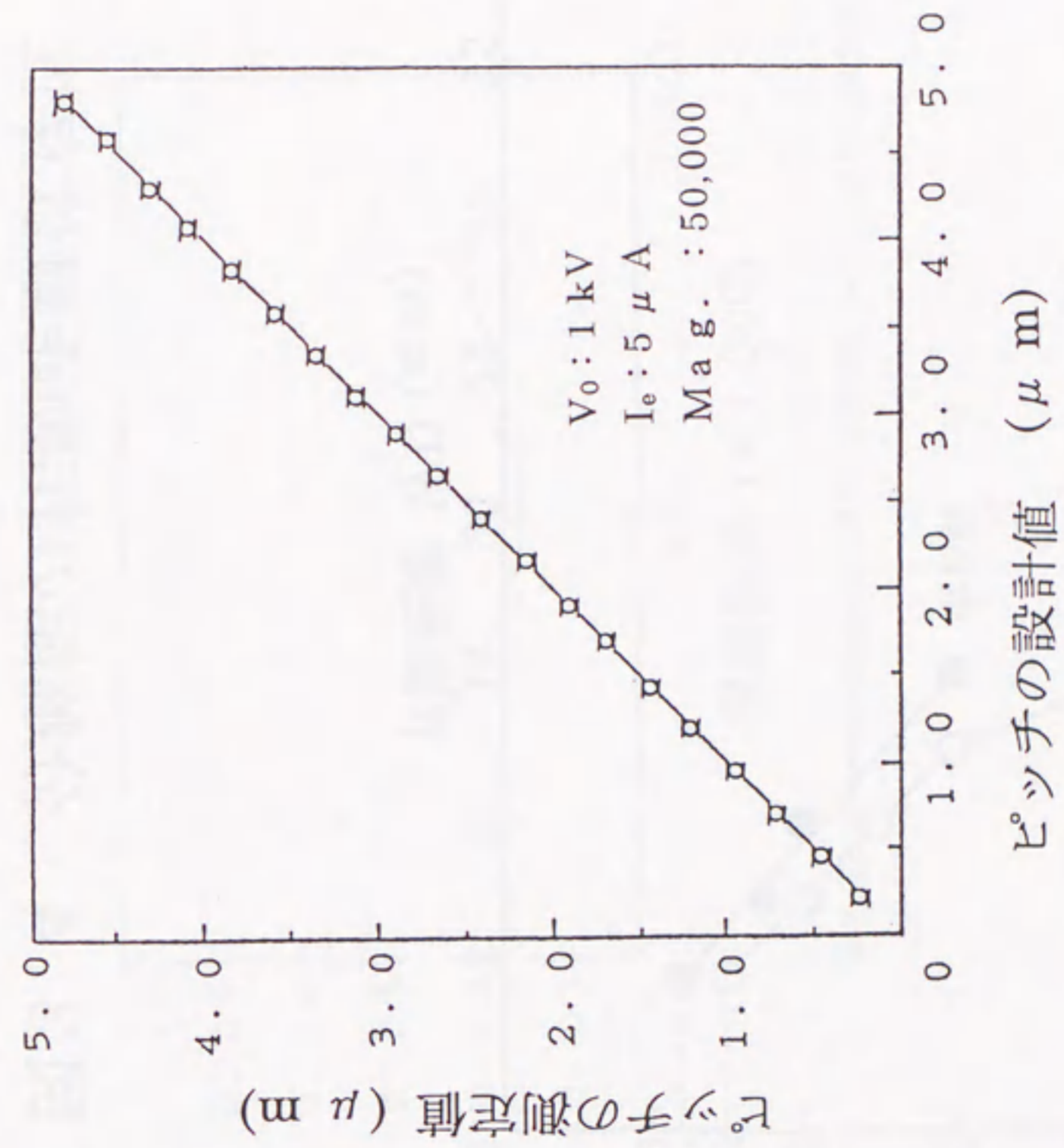


图 3.2 寸法校正用試料



V_0 : 加速電圧、 I_e : 放出電流、Mag.: 倍率

図 3.3 寸法測定直線の直線性

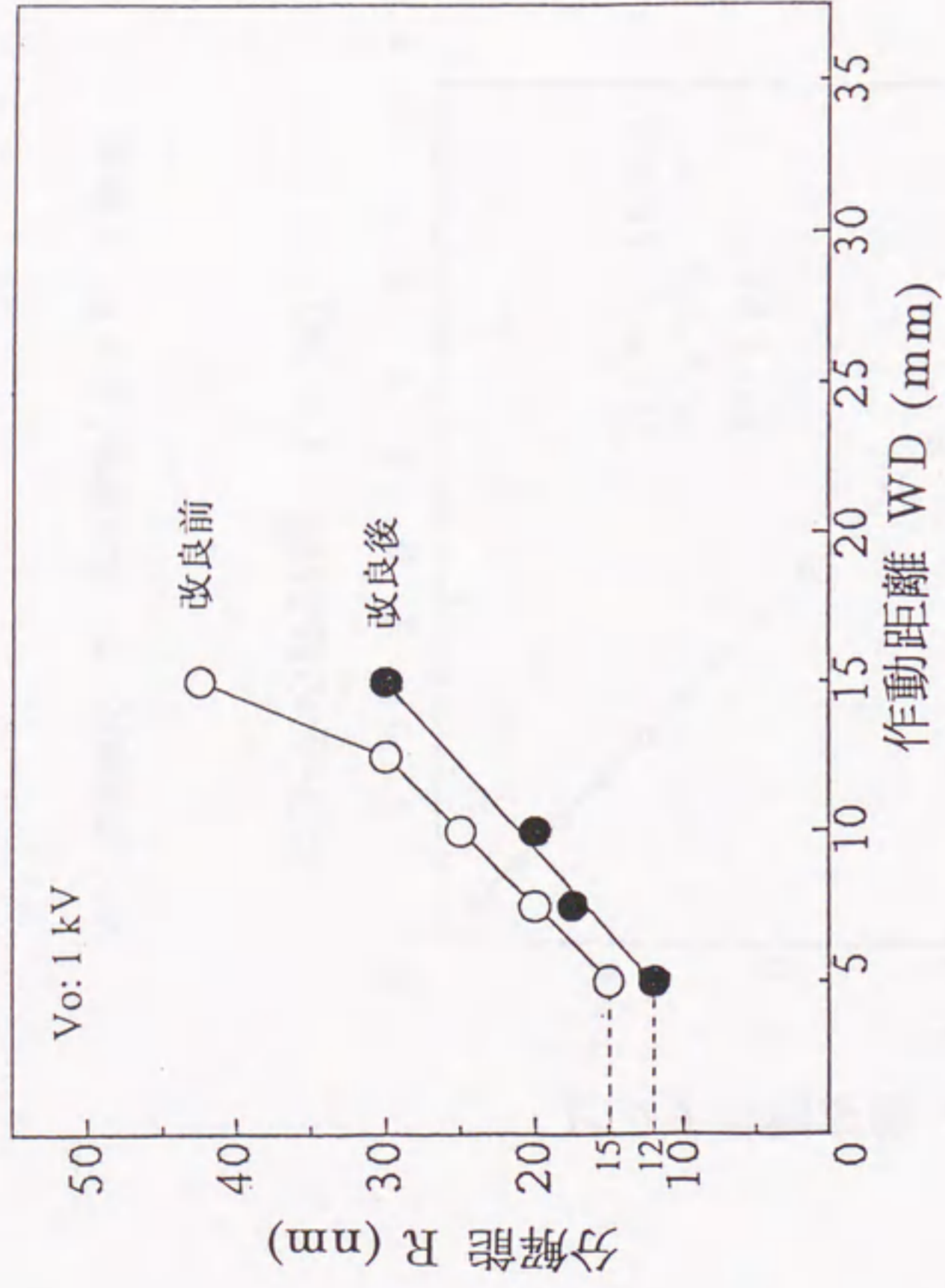
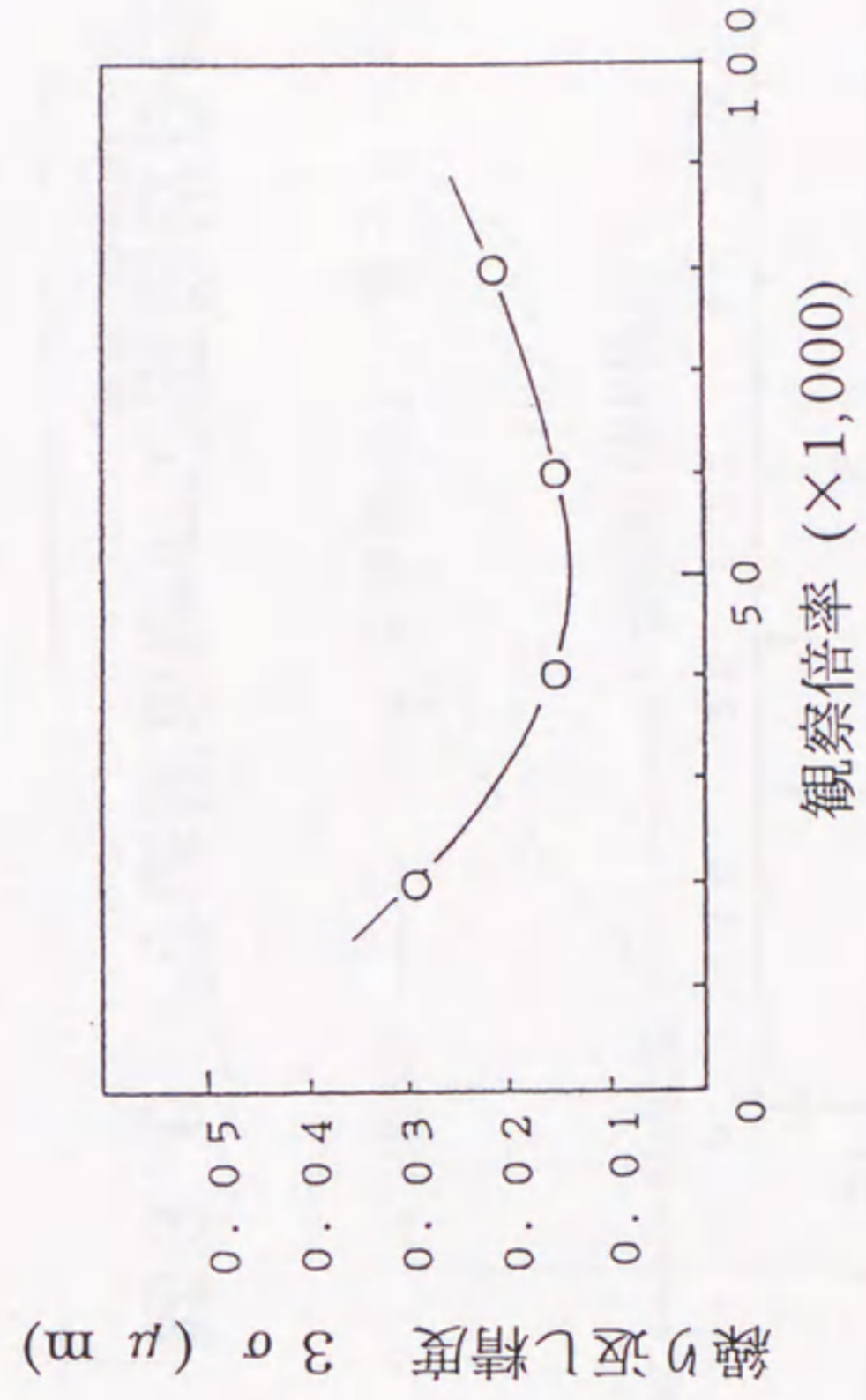


図3.4 分解能の作動距離依存性



Relation between measurement repeatability and image magnification

図3.5 寸法測定誤差の観察倍率依存性

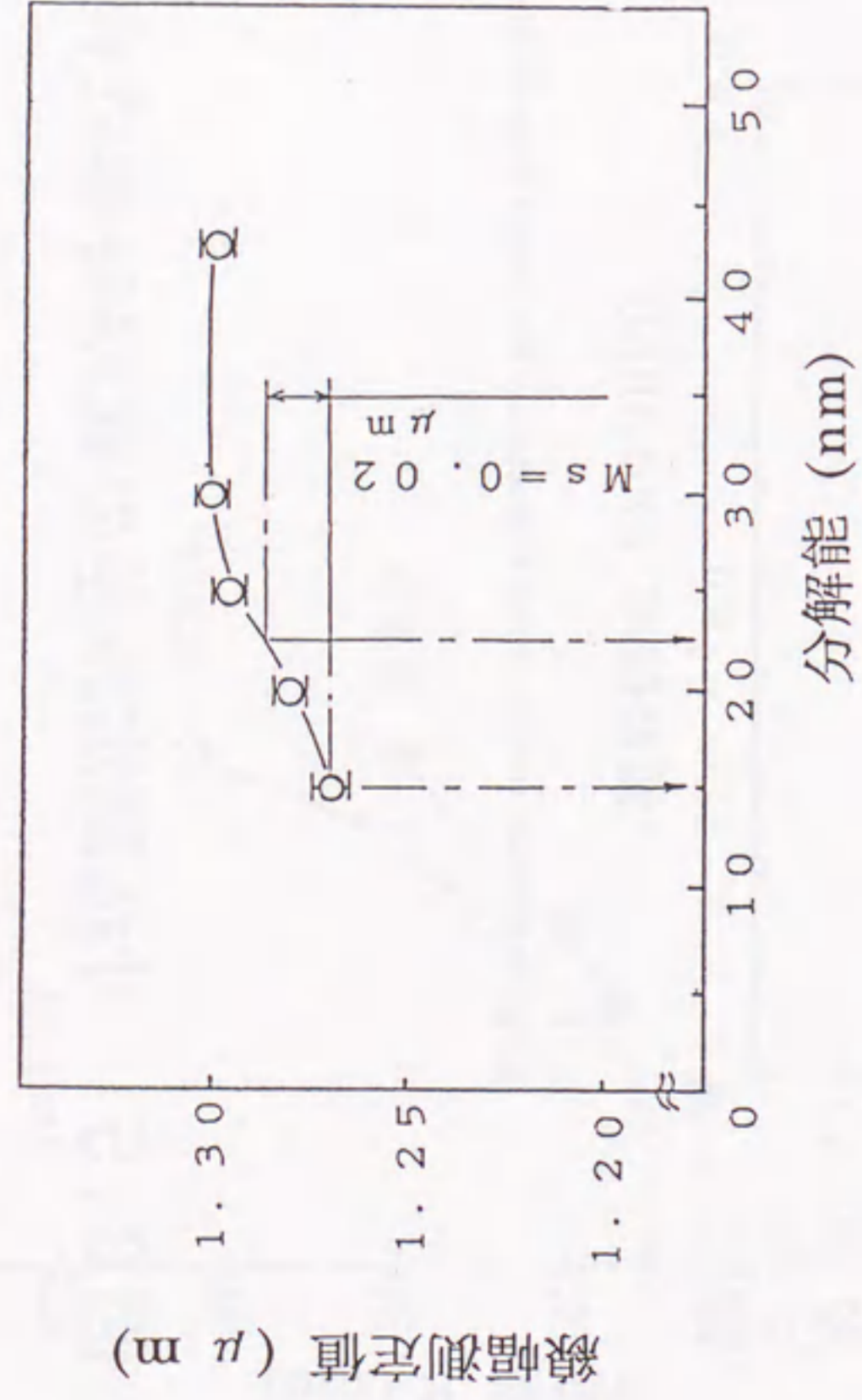


図3.6 寸法測定値の分解能依存性

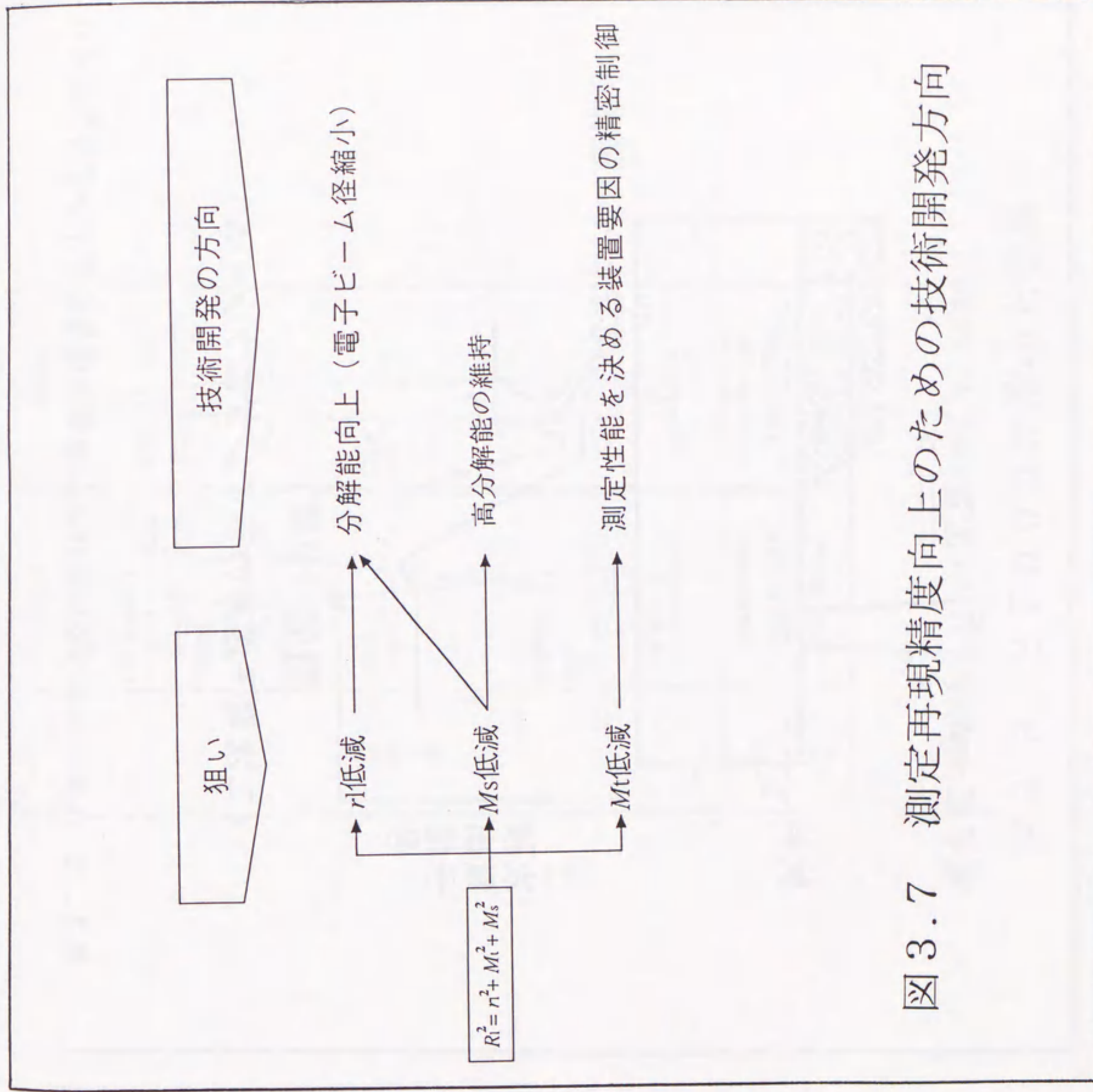


図3.7 測定再現精度向上のための技術開発方向

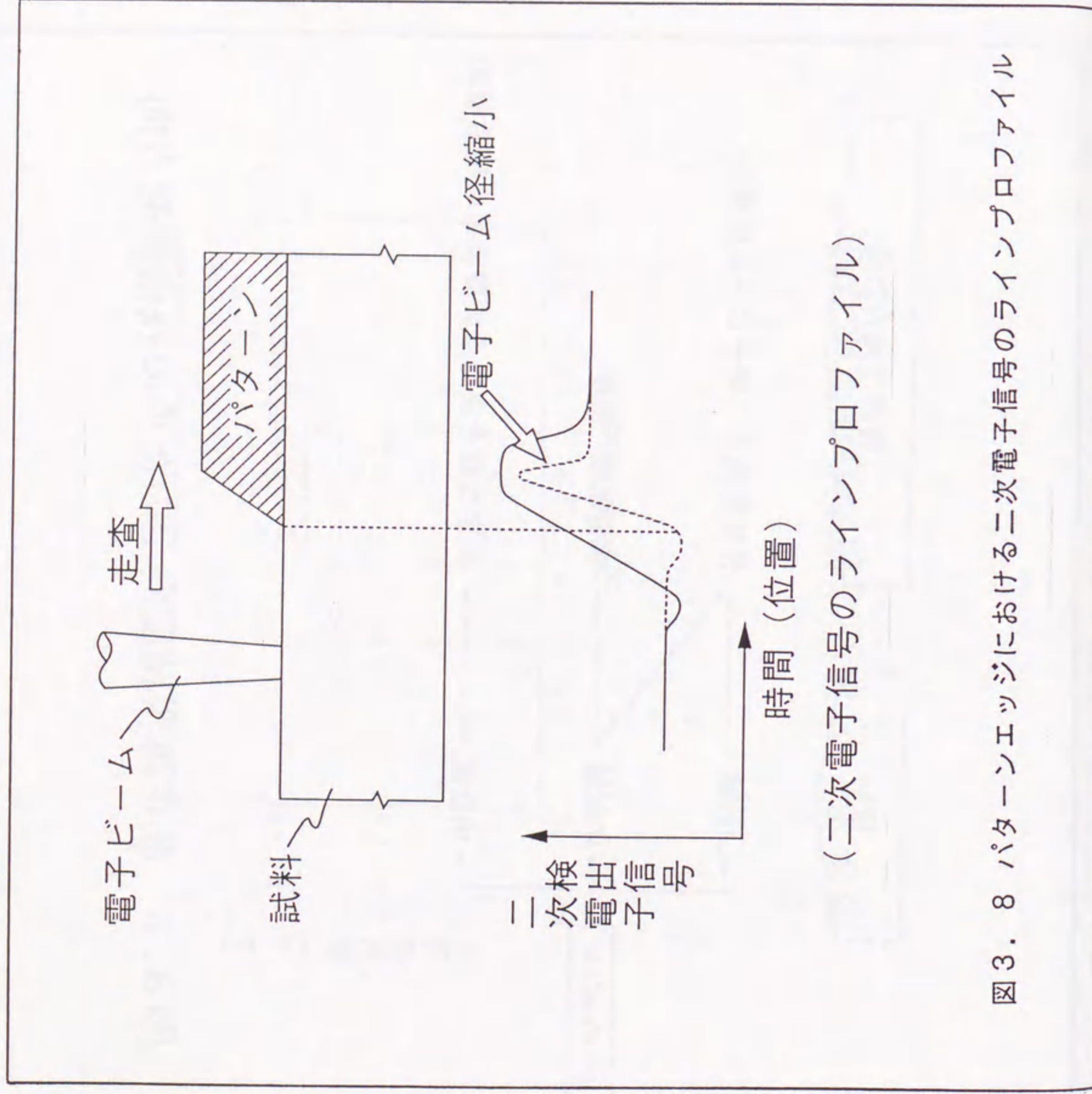


図3.8 パターンエッジにおける二次電子信号のラインプロファイル (二次電子信号のラインプロファイル)

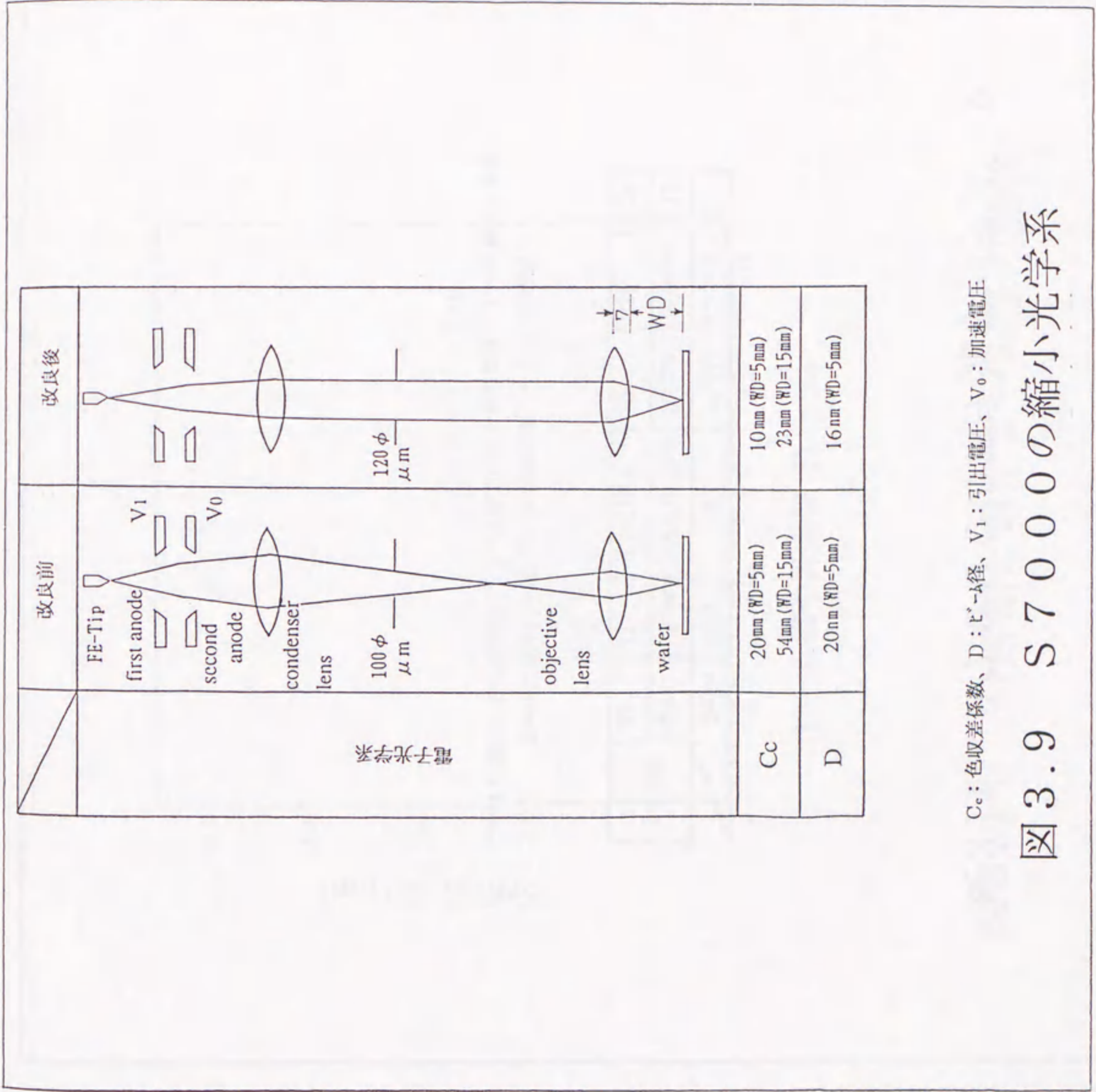


図3.9 S7000の縮小光学系

表3.1 S7000の電子光学パラメータ

	Dmin	WD	α	Ccobj	Cccond	Mo
S-7000	20nm	5mm	3.4×10^{-3} rad	9.5mm	684mm	0.13
	33	15	1.8×10^{-3}	20	684	0.24

Dmin: 最小ビーム径、WD: 作動距離、 α : ビーム半開角
 Ccobj: 対物レンズ色収差係数、Cccond: 収束レンズ色収差係数、Mo: 対物レンズ倍率

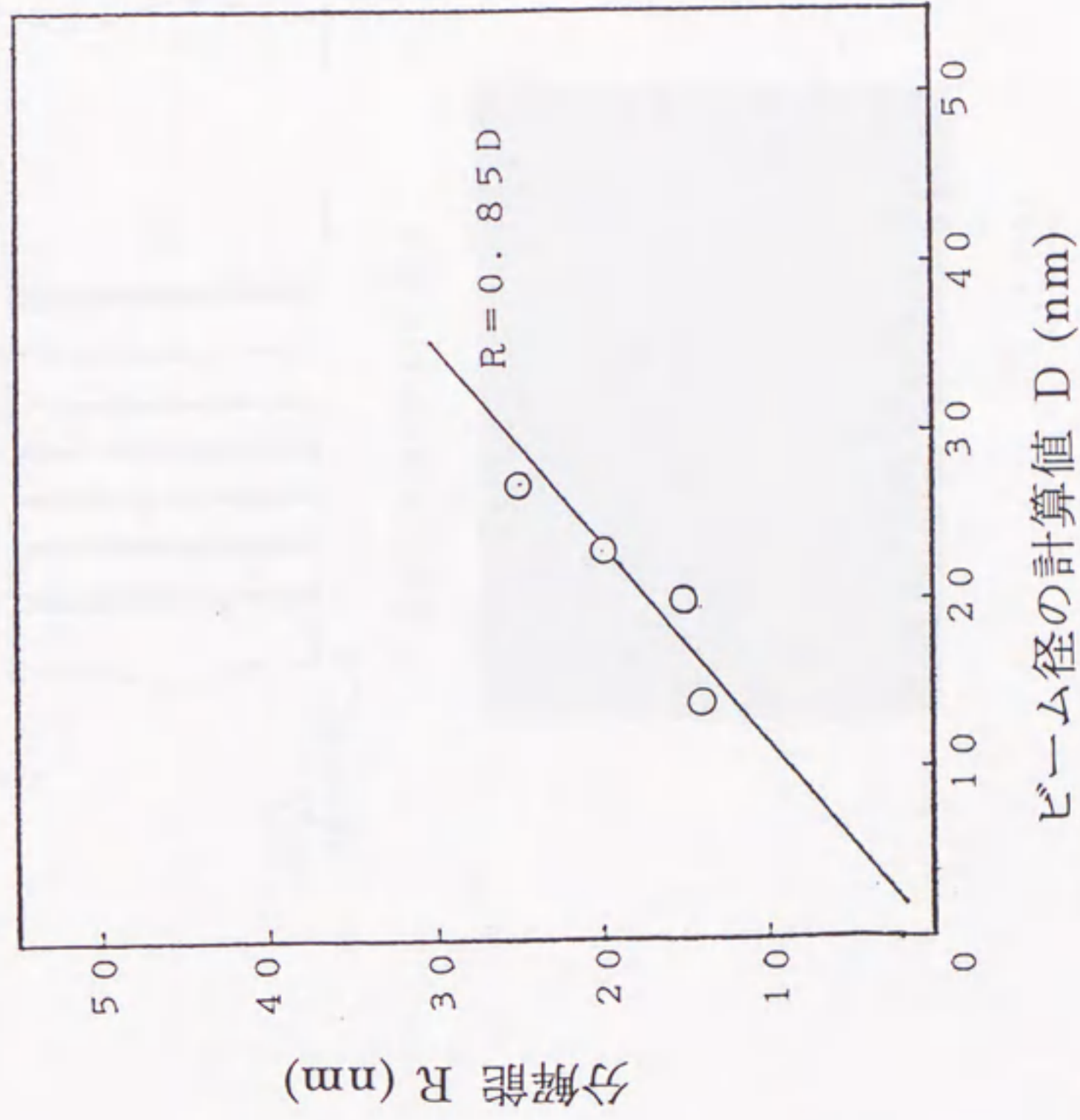
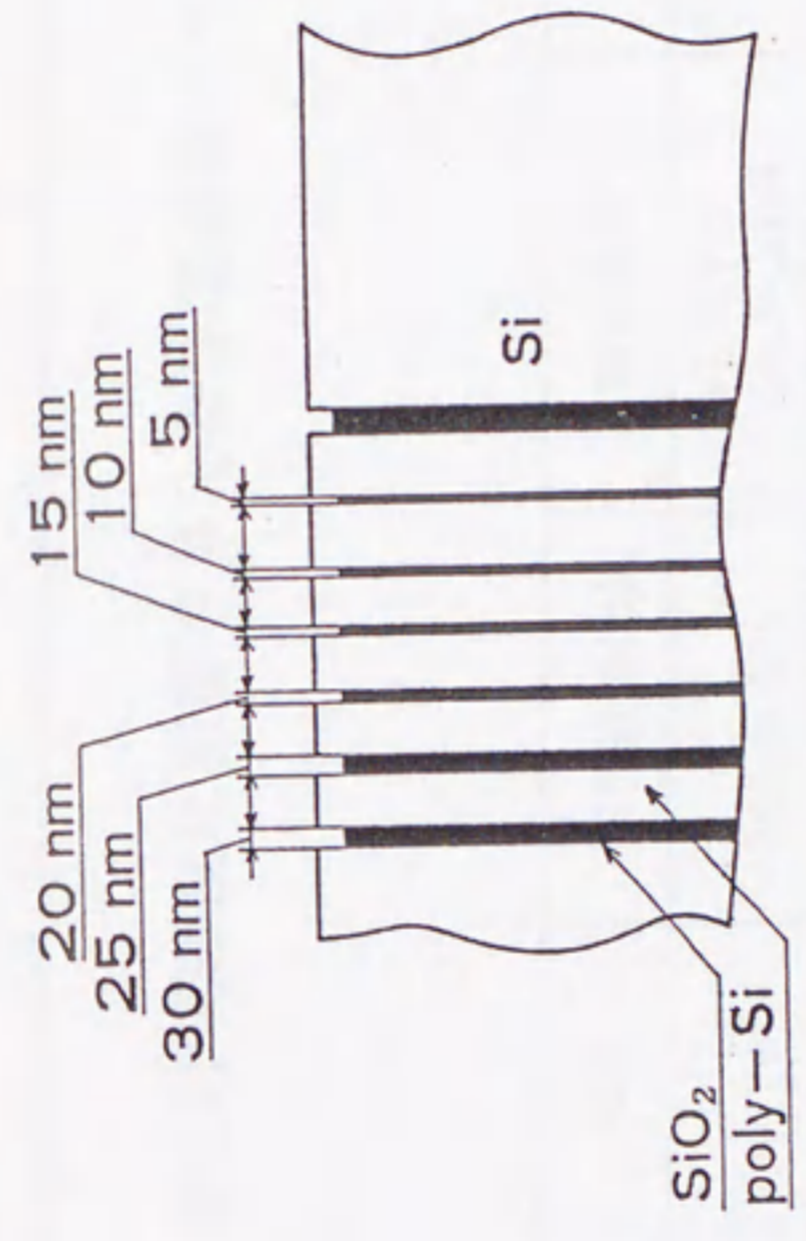


図3.10 分解能と電子ビーム径の関係



分解能評価用試料の構造

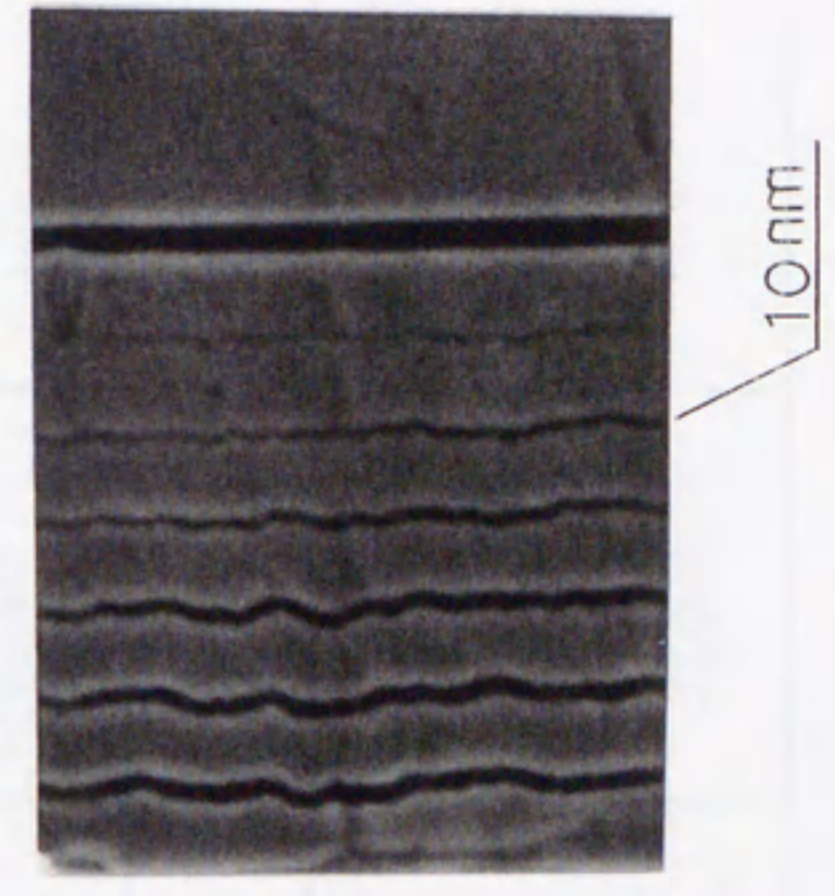


図 3. 1 1 電子光学系改良後の解像度試験結果

表 3. 2 測定再現精度に影響を与える装置要因とその実測値

項目	測長値変化量	測定条件	Fig.
FE 電子銃	V_1 [V]	V_0 : 1kV I_e : 2~20 μ A Mag: 50k	Fig. 3.12
	V_0 [V]	I_e : 5 μ A Mag: 50k	
	I_e [μ A]	V_0 : 1kV Mag: 50k	
対物レンズ*	電流	V_0 : 1kV I_e : 2.6~4.8 μ A Mag: 50k	Fig. 3.15
	磁気ヒステリシス	1), 2)	

1) V_0 を 1kV に固定して対物レンズ電流を変化させた。

2) V_0 は 0.8, 1.0, 3.0kV を用いた。

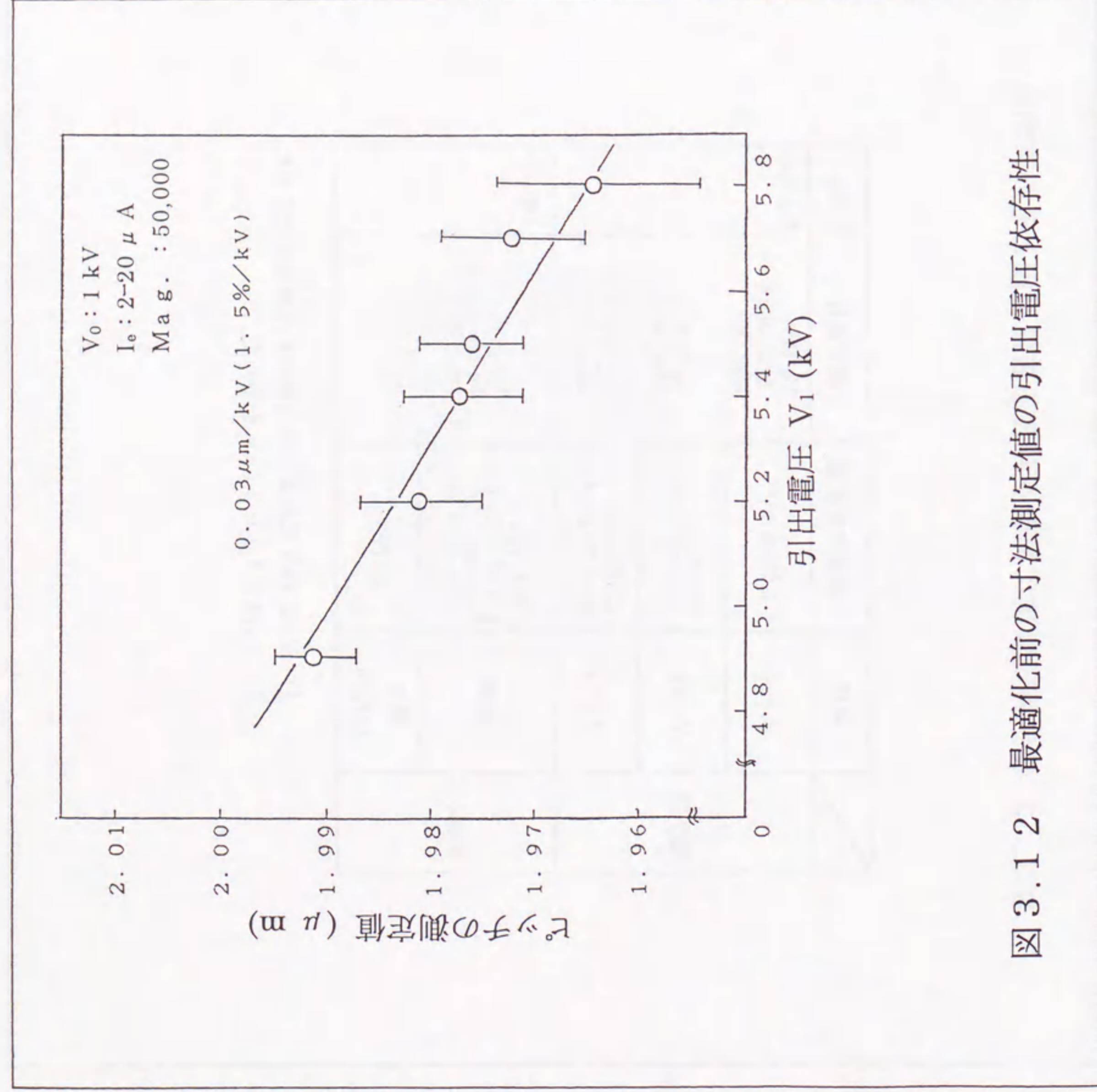


図3.1.2 最適化前の寸法測定値の引出電圧依存性

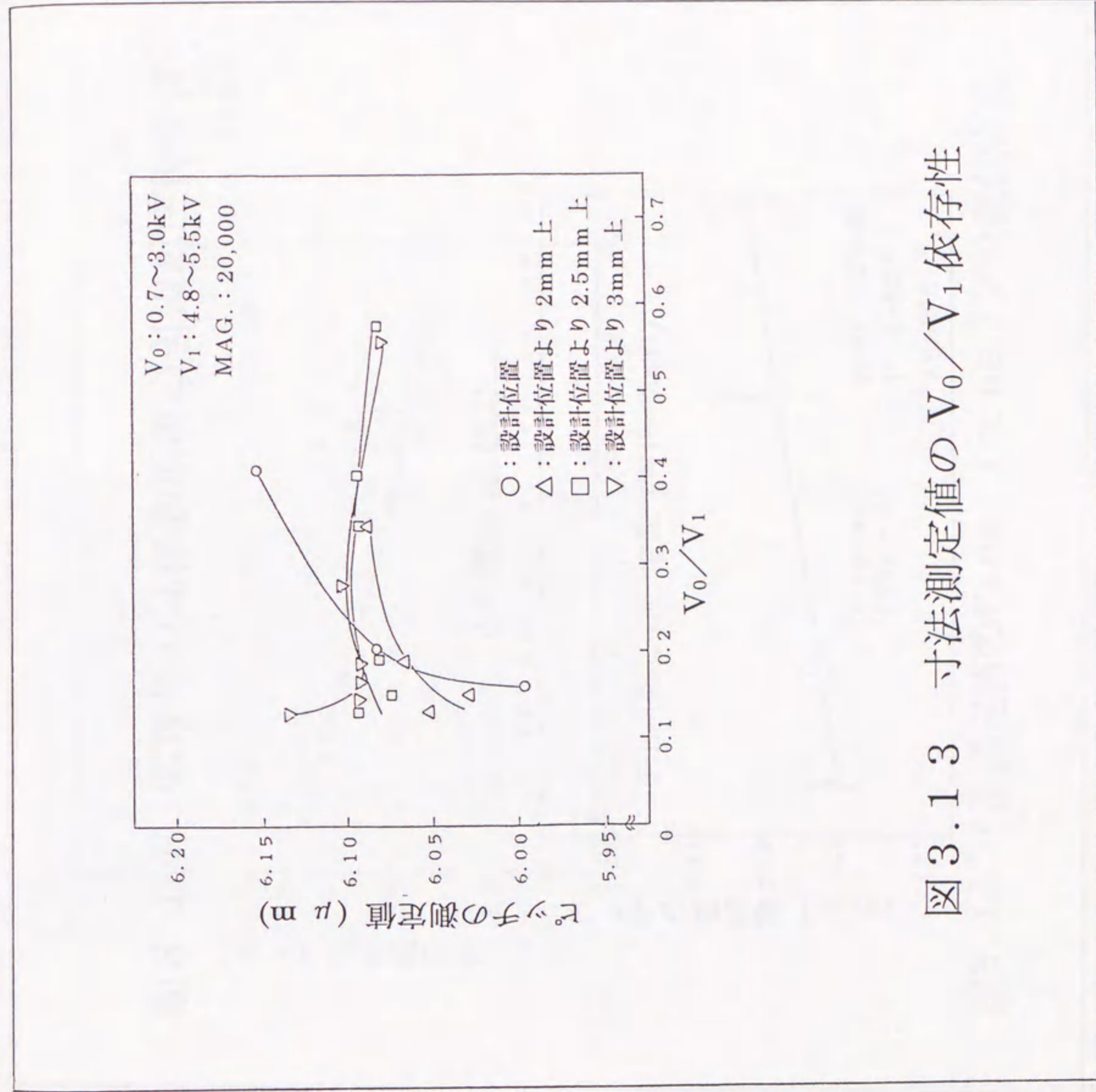


図3.1.3 寸法測定値の V_0/V_1 依存性

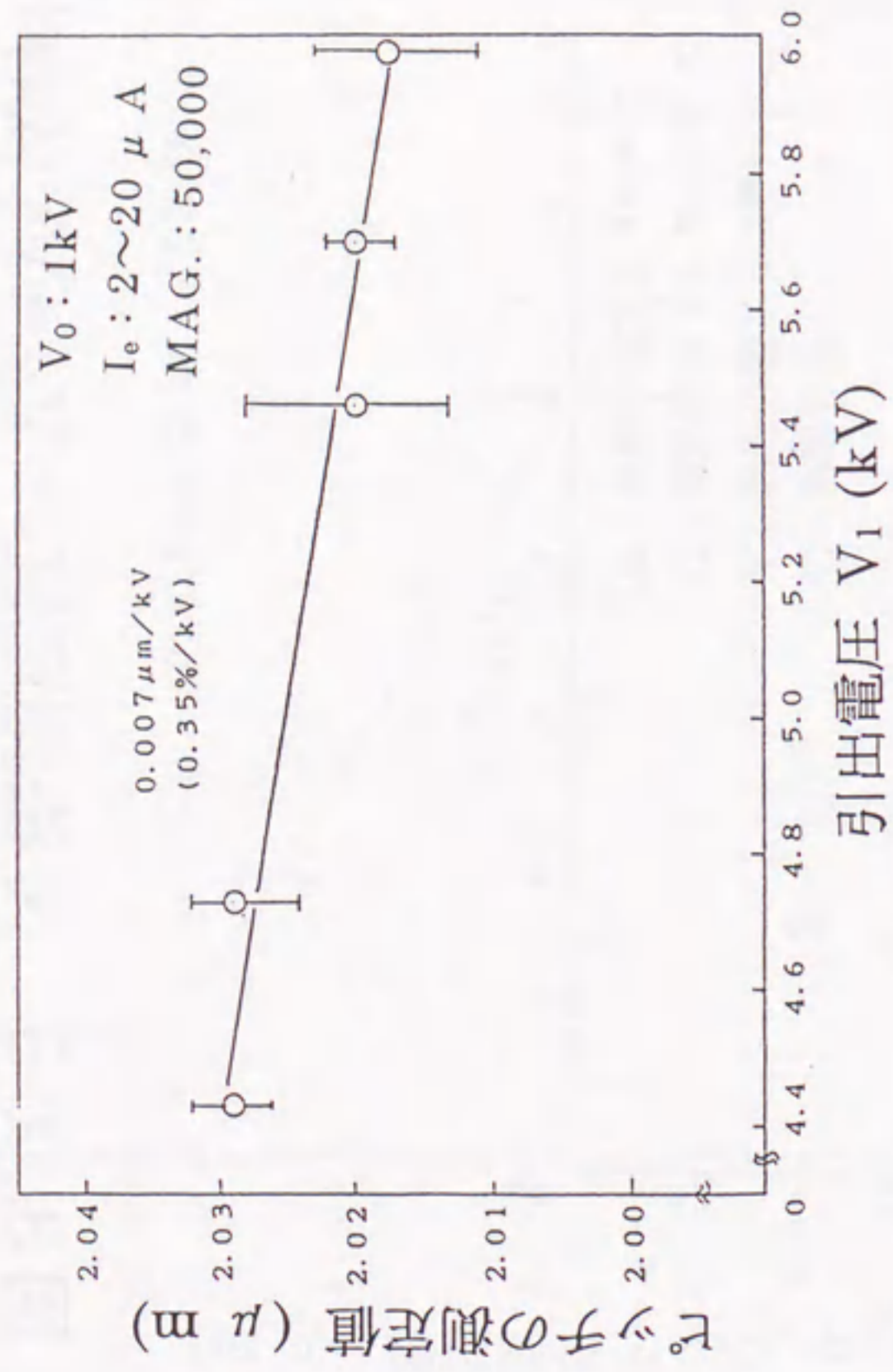


図3.14 改良後の寸法測定値の引出電圧依存性

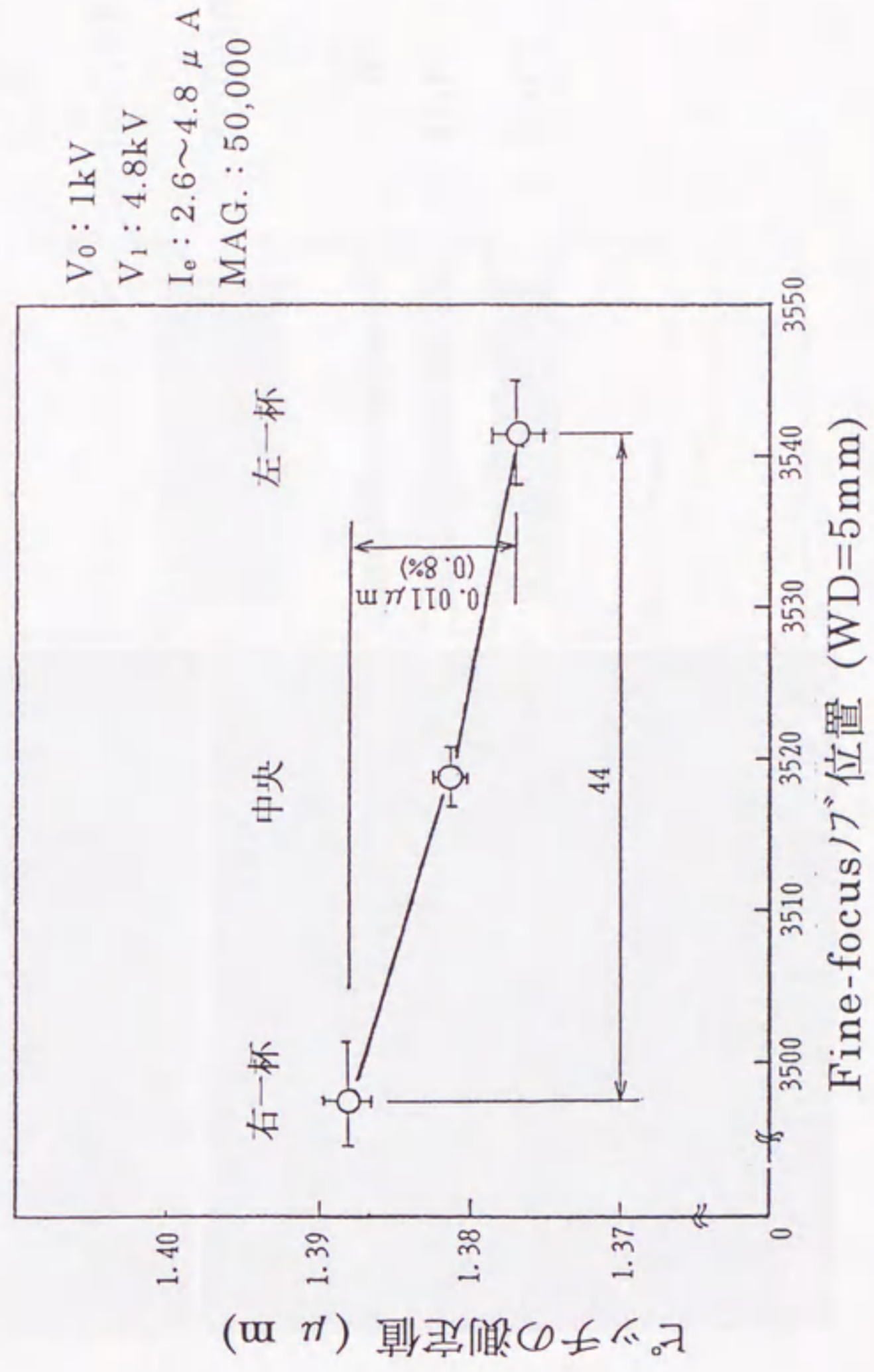


図3.15 寸法測定値のFine-focus位置依存性

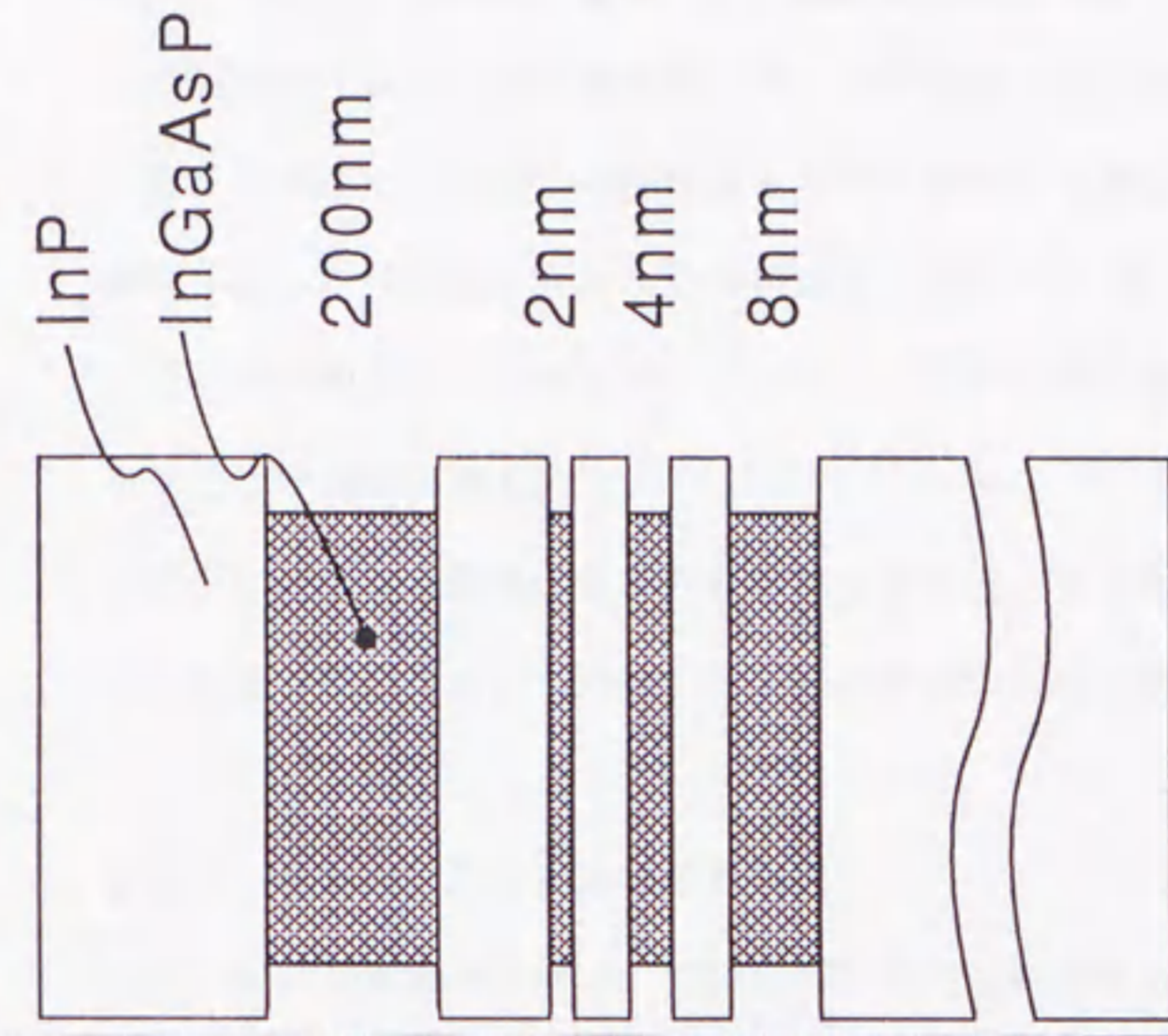
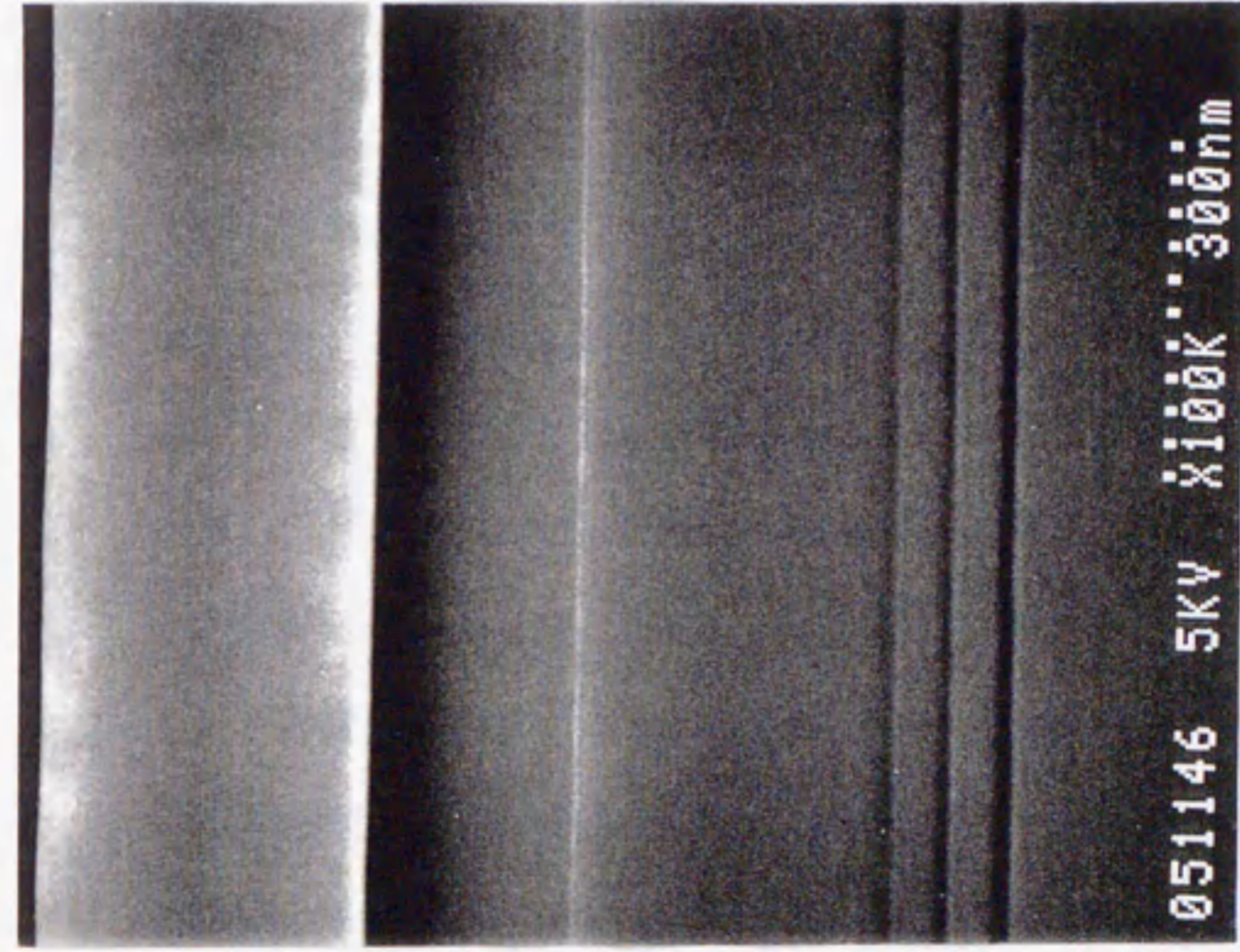


図3.16 MO CVD 技術による高精度な解像度チェック用
標準試料

4. ウエハ外観観察用走査電子顕微鏡の研究

4.1 はじめに

EB外観検査に於いて、従来技術の限界を打破し、より高い分解能を実現するために、最大8" (インチ)のウエハを検査することが可能な新規SEM、インレンズSEM、を開発した。

分解能向上の要点は作動距離、WD (Working Distance)、である。WDとは、電子ビームを細く絞り・ウエハ上に焦点を結ばせるために対物レンズを用いるが、その対物レンズとウエハとの間隔である。分解能とWDとの関係を図4.1に示す。WDを短くするとともに、分解能は高くなる。WDが短くなるにつれて、「対物レンズの収差係数が小さくなり、電子ビーム径は縮小される」ことの効果に拠る。²⁹

インレンズSEMは、このWD短縮の考え方に沿って開発された装置である。WDを“究極の0”に近づけるために、対物レンズ=試料室の新規な装置構成を採っている。

4.2 インレンズSEMの装置構成

インレンズSEMでは、“WD=0”を実現するために、“インレンズ・ステージ”を採用した。特徴となる対物レンズ、およびウエハを載置する試料ステージ部分の構成を、従来装置との比較で、図4.2に示す。従来装置では、対物レンズと試料ステージとが分離した“アウトレンズ・ステージ”の構成になっている。このため、WDの短縮には限界があった。インレンズSEMでは、対物レンズの中に試料ステージを組み込む“インレンズ・ステージ”の構成を採っている。WDを“0”とすることが可能となる。この構成を実現するため、対物レンズの磁路を試料室と兼用し、“対物レンズ=試料室”という新しい概念を導入した。

この概念を基に開発したインレンズSEMは、図4.3に示す装置構成と、表4.1に示す装置仕様を持つ。最大8"までのウエハを検査でき、加速電圧1kVで5nmの分解能、 $\pm 0.01\mu\text{m}$ 以下の測長再現精度を有する。装置開発に際し課題となった新規開発技術を図4.4に示す。主な研究・開発の課題は対物レンズと試料ステージである。

4.2.1 対物レンズ

“従来には見られない大型、かつ角形状の対物レンズ”を低収差で仕上げるのが研究・開発の課題であった。磁束密度分布、磁気飽和特性、および試料ステージ組立方法などをシミュレ

ーションした結果、図4.5に示す対物レンズ仕様を設定した。レンズ性能を決める内磁路の形状は、8mm径-26mm間隙-2mm径である。材料としては、磁気飽和特性の点から、内磁路・外磁路ともに純鉄を用いた。対物レンズの磁束密度分布と磁気飽和特性（最大磁束密度の励磁強さ依存性）を図4.6に示す。純鉄を採用した理由は、磁気飽和特性に優れていることである。磁路材質をパーマロイにした場合には、約2000AT（Ampere Turns）の励磁で飽和する。また、ウエハ面の位置（上磁極から6mmの距離）における収差係数を図4.7に示す。球面収差係数 C_s 、色収差係数 C_c とともに、約3mmの値が得られている。いずれも、従来に比べて数分の一の値である。

なお、対物レンズは、次の2点に留意して開発された。

- (1) 保守作業時の試料ステージ脱着を可能とするために、下磁極を取外し可能な構造（図4.5 A部）とする必要があり、下磁極を上磁極に対して高精度に芯出しすること。
- (2) 非点収差を小さくするために、外磁路（角形試料室）に加工するローダなどの取付け穴を可能な限り少なく、かつ対称に配置すること。

4. 2. 2 試料ステージとアクチュエータ

試料ステージは、8"ウエハの任意箇所を高精度に位置出しできるとともに、高解像度での観察に支障が無いよう、強い耐振動性を持たなければならない。しかも、従来とは大きく異なる点として、下記2点を満たすことが前提となる。

- (1) 対物レンズ内部に組み込まれるため、レンズ性能に悪影響を与えることが無いように、「全て非磁性材料で構成する」こと。
 - (2) 下磁極、および励磁コイルに接触することがないように、“中空構造”であること。
- さらに、形状観察を、より容易とするために、
- (3) “視野中心での全方位傾斜観察”（傾斜：-30度～+30度の任意角度、傾斜時の視野ずれ： $\pm 50\mu\text{m}$ 以内）ができるようにすること、とした。
- 各種構造を比較・検討の結果、“二段傾斜機構 $T_x \cdot T_y$ の上に水平方向移動機構 $X \cdot Y$ を載せる” $X \cdot Y \cdot D T$ 4軸ステージ構造が最適であると判定し、選択した。 $X \cdot Y \cdot D T$ 構造は、耐振動性に勝れている。材料は、軽量のアルミニウム合金を主体として、銅合金、SUS304など高剛性・非磁性の材料を選んだ。製作した4軸ステージの構成図を図4.8に示す。図示されていないが、ステージ内部は中空となっている。ステージ製作に際しては、傾斜観察時の視野ずれを最小とするために、 $T_x \cdot T_y$ ステージの大型半円筒（上段 T_x ステージの曲率半径160mm・長さ300mm、

下段 T_y ステージの曲率半径290mm・長さ440mm）を高真円度加工することが最重要、かつ困難な点であった。

$X \cdot Y$ ステージを駆動するアクチュエータについては、進行波型超音波回転モータ（超音波モータ）を採用することにし、フコク製品をベースとする耐真空・非磁性の超音波モータを新規に開発した。従来は、アクチュエータを大気中の試料室外壁に装着し、ユニバーサルジョイントなどを介してステージを駆動する方式、間接駆動方式、が採られていた。しかし、対物レンズとしての試料室にアクチュエータ装着のための加工を施すことは、非点収差を増大させ、レンズ性能を低下させることになる。レンズを高性能なものとするために、 $X \cdot Y$ ステージを直接駆動する方式を選択した。直接駆動用アクチュエータとして、磁場を発生しない各種圧電アクチュエータの中から、駆動能力が比較的高いという理由で、超音波モータを選定した。超音波モータは、ステータとロータから構成されている。ステータは圧電素子に弾性体を貼付たものであり、圧電素子の超音波振動を受けて、弾性体表面に進行波が生じる。この進行波に乗って、ロータが回転する。ロータには、弾性体と接触する部分に約0.15mm厚さのスライダが貼付られている。スライダは加圧スプリングによって弾性体に押しつけられ、弾性体との間に安定した摩擦力が生じるように設計されている。“安定な摩擦力がロータの円滑な回転を保証する”ことになる。

超音波モータの開発に際しては、起動トルク・保持トルク・移動速度などの駆動性能に加えて、真空中で対物レンズ内に組込み、長寿命で使用できるようにするため、次の2点に留意した。

- (1) ロータ・ステータの非磁性・耐摩耗性・少放出ガスの材料選択、および清浄な加工・組立。特に、摺動部となる弾性体・スライダの摩耗は、寿命を短くするとともに、発塵源となる。大きなトルクを得るための高く・安定した摩擦係数を有するとともに、摩耗し難い材料でなければならない。なお、材料評価に際しては、
$$(\text{比摩耗量}) = (\text{摩耗体積}) / (\text{荷重} \times \text{走行時間}) \dots\dots (4.1)$$
を指数として、比較・評価を行った。
- (2) 摺動部の温度上昇抑制。

超音波モータの寿命（耐久性）は、摺動部材料の摩耗の他、使用温度に依存する。特に、真空中では、放熱効率が悪いために動作時の温度上昇が大きく、圧電素子の耐久性劣化が激しい。摺動部では、摩擦熱のため高温となるので、効果的に放熱させることが重要である。一方、試料ステージの温度変化はステージ位置精度を低下させることになる。このため、ステージへの放熱（摺動部から $X \cdot Y$ ステージへの熱伝導）は、最小限に抑えなければならない。各種材料を比較・

検討した結果、弾性体としてリン青銅、スライダとしてPTFE複合材の良いことが分かった。

また、寿命については、「弾性体やスライダの接着むらが耐久性に大きく影響している」ことが分かった。真空中で動作することに起因した問題である。接着状態が悪く接着界面に気泡がある場合には、この気泡が核となって部分剥離を生じ、耐久性を劣化させる。劣化のメカニズムとしては、「気泡内壁に常時 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ の膨張しようとする力が働いている上、超音波振動が気泡を拡大させ、遂には剥離に至る」ものと考えられる。弾性体と圧電素子の接着状態を観察した例が図4.9である。「接着状態が悪いほど、超音波の反射波が強くなる」性質を利用し、超音波映像装置で撮像したものである。接着状態が悪い上図の場合には、動作開始後数十分で回転しなくなった。しかし、接着状態が比較的良好な下図の場合には、長時間・安定に回転を続けた。

上記のような検討と改善の結果、 $40\text{kHz} \cdot 100\text{V}$ の駆動で $2\text{kg} \cdot \text{cm}$ のトルクと最大 $10\text{mm}/\text{sec}$ の移動速度、通常の使用状態で1年以上の寿命が得られた。通常使用状態に於ける超音波モータの温度上昇測定結果を図4.10に示す。デューティ比の大きいX駆動用（移動速度 $1\text{mm}/\text{sec}$ ）で約 40°C 、Y駆動用（移動速度 $1.5\text{mm}/\text{sec}$ ）では 35°C 以下であり、限界温度の 50°C に対しては余裕がある。

4.3 インレンズSEMの性能評価

インレンズSEMの主な性能を纏めて表4.2に示す。低収差化の結果、加速電圧 1kV で 5nm の分解能と $\pm 0.007\mu\text{m}$ 以下の測長再現精度が得られた。いずれも、従来装置のS7000と比較すると、2倍程度の性能向上となっている。測長再現精度の改善は、高分解能化の寄与に拠るものである。

高解像度観察の例を、S7000との比較で、図4.11・図4.12に示す。図4.11はW/A1合金/Wの積層配線を観察したものである。S7000では“ぼんやり”としか見えなかった配線側面の微細構造を、より精細に見ることができる。図4.12はアスペクト比（深さ/直径）が約2.6のレジスト穴パターン（レジスト・ホールパターン）を観察したものである。S7000では見る事ができなかった穴底の下地構造を明瞭に観察することができる。

全方位傾斜観察の例を図4.13と図4.14に示す。図4.13は、 $0.5\mu\text{m}$ 幅・ $1\mu\text{m}$ 厚さのレジスト・ラインパターンをX方向に $+30^\circ$ 、および -30° 傾斜させて観察したものである。パターン先端の形状や定在波効果の影響を、より詳細に観測することができる。図4.14は、 $0.6\mu\text{m}$ 径・ $1\mu\text{m}$ 厚さのレジスト穴パターンをX方向、およびY方向に、それぞれ $+30^\circ$ 、 -30° 傾けて観察したものである。このように、視野中心での全方位傾斜観察が容易に行える。なお、上記観察例では、全て、加速電圧 1kV を使用した。

4.4 まとめ

高分解能・高測長精度のEB外観検査装置“インレンズSEM”を開発した。インレンズSEMは、 $0.5\text{kV} \sim 2\text{kV}$ の低加速電圧領域に於いて使用し、 $0.3\mu\text{m}$ プロセス以降のインライン検査に対応可能な装置である。インレンズSEMの特徴は、

(1) 高分解能化の手法として、“ $\text{WD} = 0$ ”を実現するために、“対物レンズ=試料室 という新しい概念”を導入した、ことにある。

新しい概念を実現するため、新規に開発した技術は、

- (1) 試料室を兼用した大型、かつ角形状の低収差対物レンズ。
 - (2) 視野中心での全方位傾斜観察が可能な非磁性・中空型の4軸試料ステージ。
 - (3) X・Yステージを駆動するための耐真空・非磁性の超音波モータ、である。
- 結果として下記の性能が得られた。従来装置に比べて、約2倍の性能向上である。

(1) 加速電圧 1kV で 5nm の分解能、 $\pm 0.01\mu\text{m}$ 以下の測長再現精度。

インレンズSEMに於ける今後の課題を纏めて、図4.15に示す。実用的な観点から“高スループット化と高信頼化の推進”が大きな研究・開発の課題である。高スループット化のためには、超音波モータの駆動能力・寿命の改善、特に「摩擦熱による温度上昇を如何に低く抑えるか」が最大の要点になる。原理的には、「駆動能力の増強が摩擦熱の増大をもたらす」ことは避けられず、放熱技術でのブレークスルーが期待される。高分解能化の推進については、今後とも対物レンズの低収差化を推進して行かなければならない。レンズ加工・組立て面での精度向上が必須である。

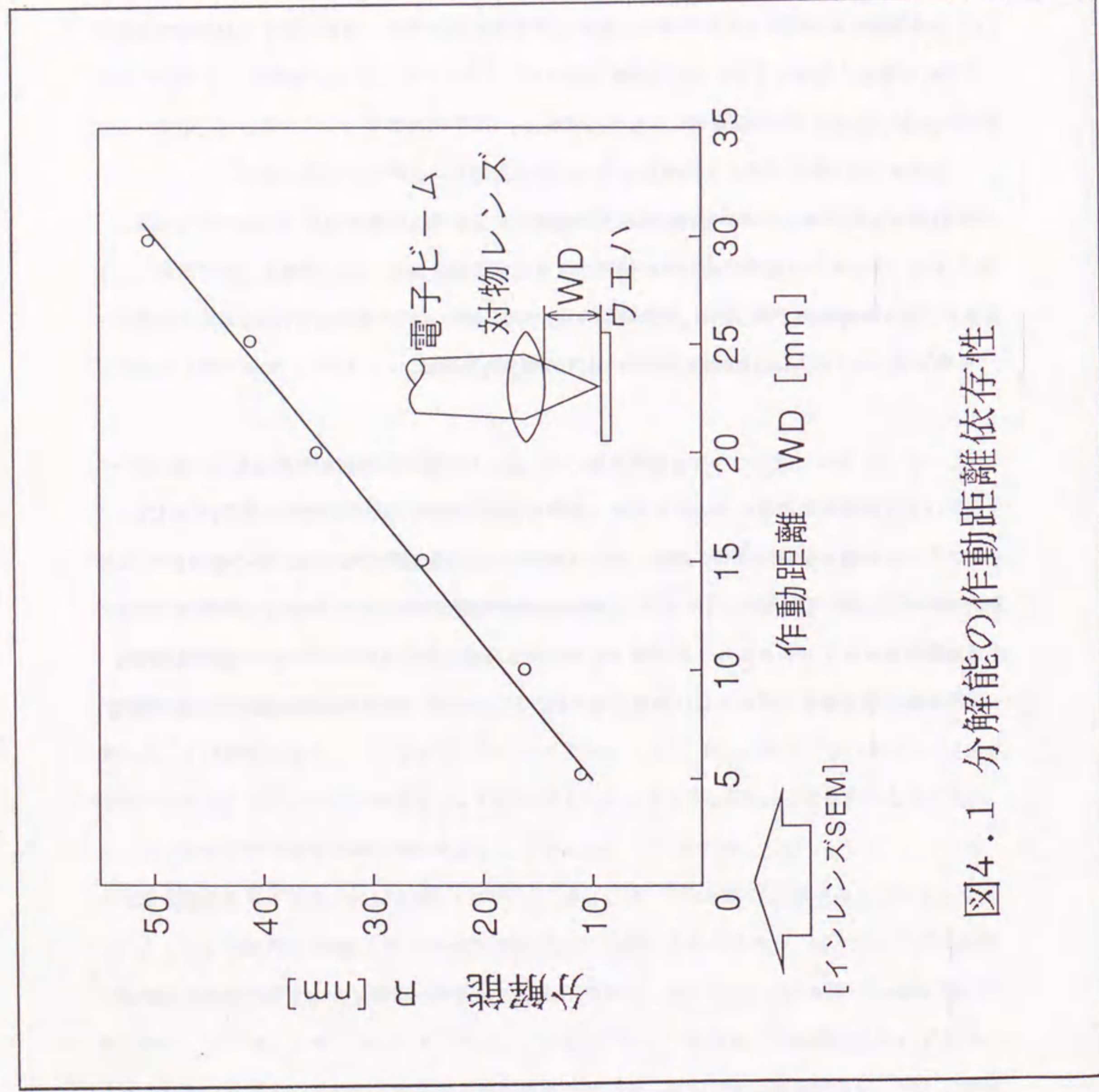


図4.1 分解能の作動距離依存性

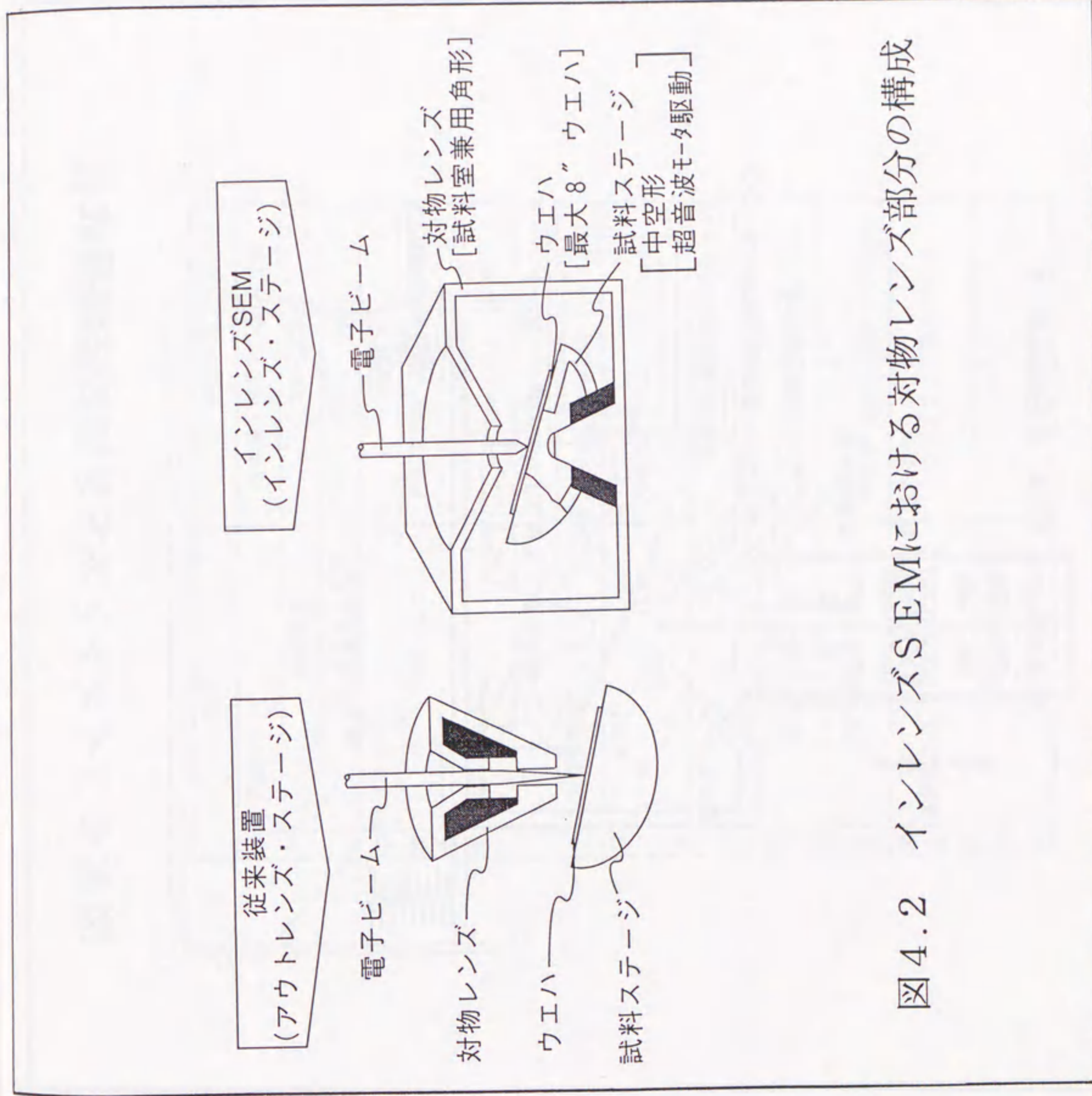


図4.2 インレンズSEMにおける対物レンズ部分の構成

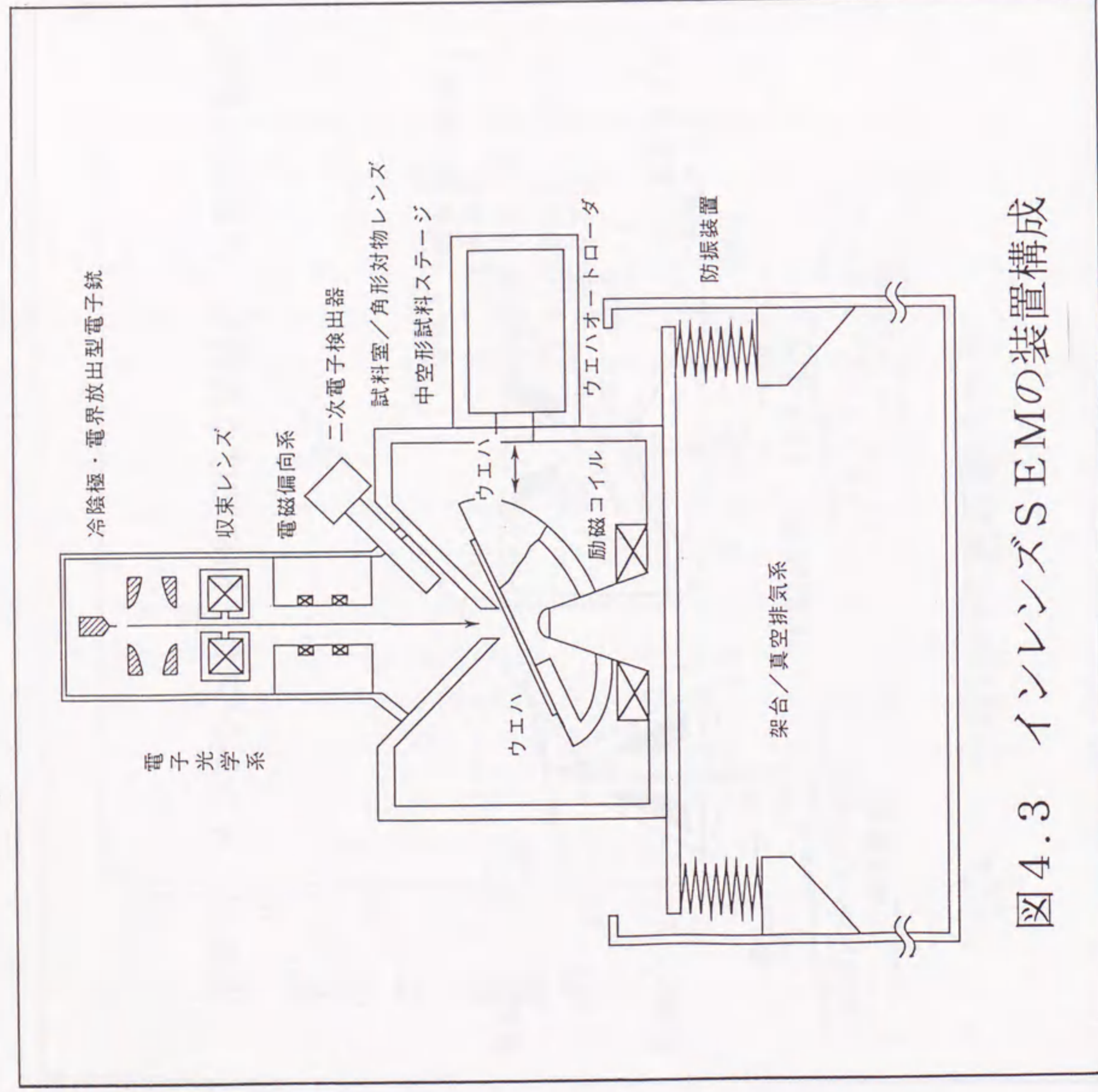


図4.3 インレンズSEMの装置構成

表4.1 インレンズSEMの装置仕様

項目	装置仕様
電子銃	冷陰極・電界放出型電子銃
加速電圧	0.7kV~3.0kV
エミッション電流	0.2μA~10μA
収束レンズ	二段収束
対物レンズ	試料室兼用(磁路=試料室)
電子ビーム走査	二段電磁偏向 (TVスキャンレート可)
観察倍率	X500~X300,000
二次電子検出	TTL検出(Through the Lens)
ローダ	最大8" ウエハ対応 C to C
試料ステージ	非磁性・4軸ステージ
アクチュエータ: X, Y	耐真空・非磁性超音波モータ
最大ストローク: X, Y	200mm (停止位置精度±10μm)
最大傾斜角: Tx, Ty	±30° (視野中心全方位傾斜: ±50μm)
真空排気系	オイルフリー真空ポンプ
電子銃到達真空度	10 ⁶ Pa
試料室到達真空度	7×10 ⁷ Pa

技術課題

新規開発技術

試料室兼用大型・低収差対物レンズ ——— 非対称・角型電子レンズの高精度設計技術
 ——— 大型純鉄磁極の高精度加工・精密組立技術

8" ウエハ対応
 非磁性・中空形試料ステージ

——— 中空ステージの耐震・剛構造設計技術

——— 大型・非磁性部品の
 高精度加工・精密組立技術

非磁性・小型・軽量アクチュエータ ——— 耐真空・非磁性の超音波モータ

図4.4 インレンズSEMの技術課題と新規開発技術

項目		仕様	備考
内磁路 (磁極)	形状	8mm φ	<ul style="list-style-type: none"> 試料ステージの引き出しができるようにするため下磁極の取り外しが可能 (左図 A部)
	上磁極内径	26mm	
	磁極間隔	2mm φ	
外磁路 (試料室)	下磁極内径	純鉄	<ul style="list-style-type: none"> ロータ/アンロータ室, 排気系, 真空測定子取付けポートなどの加工位置の対称性に配慮
	材質	角型 730(w)×730(D)×620(H) mm mm mm	
励磁コイル	形状	純鉄	<ul style="list-style-type: none"> 外部磁場の影響を避けるための配慮
	材質	純鉄	
励磁の強さ (IN)		最大2900AT	

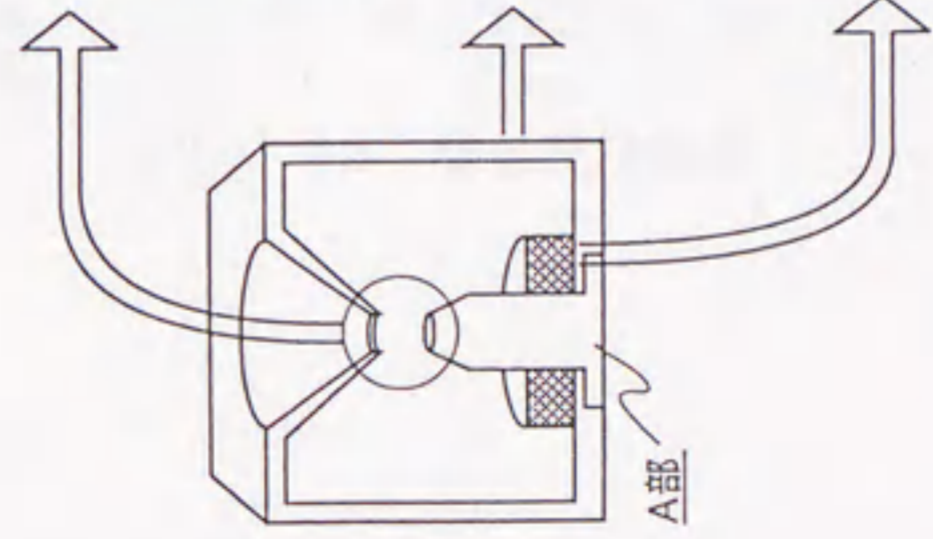


図4.5 対物レンズの仕様

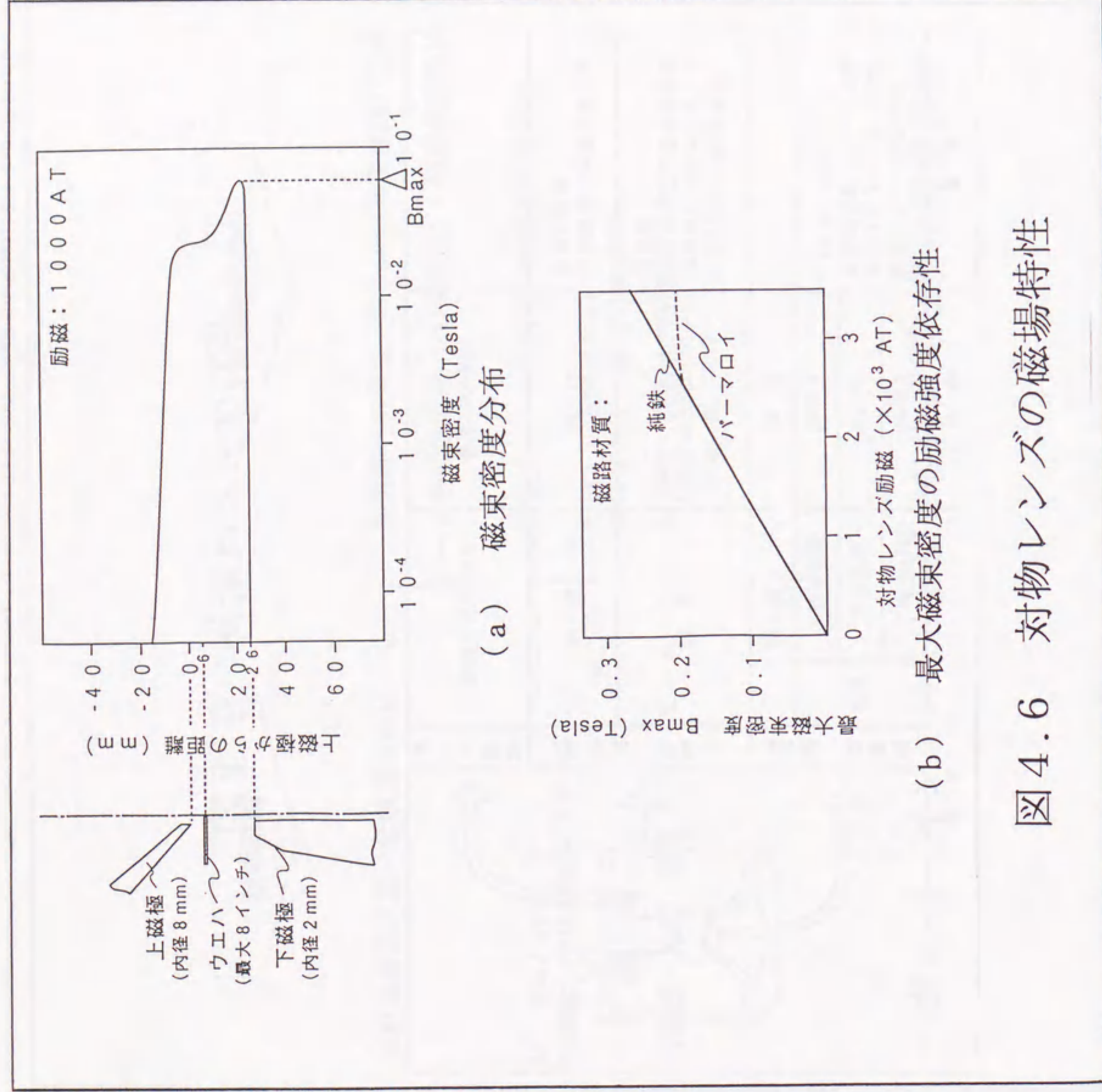


図 4.6 対物レンズの磁場特性

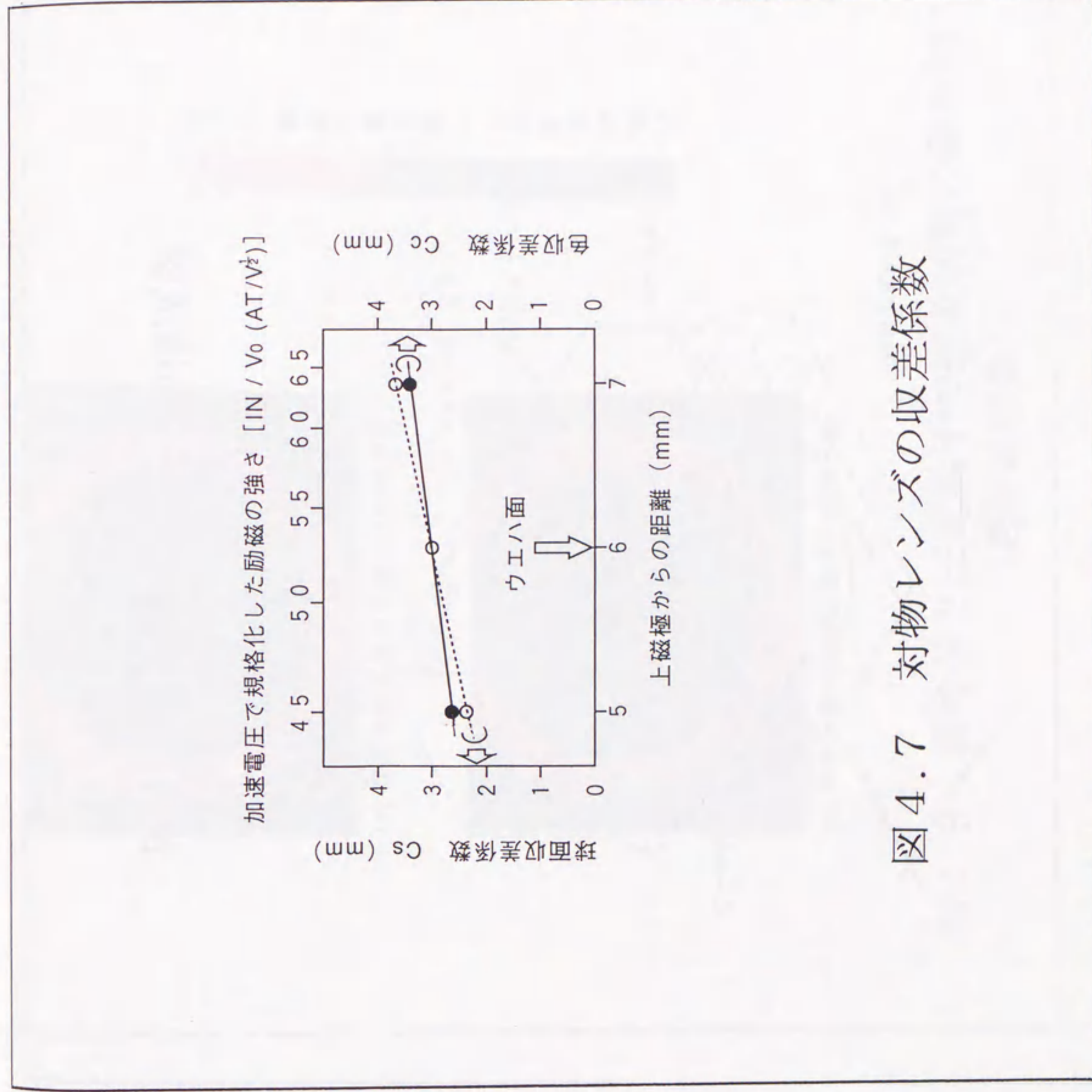


図 4.7 対物レンズの収差係数

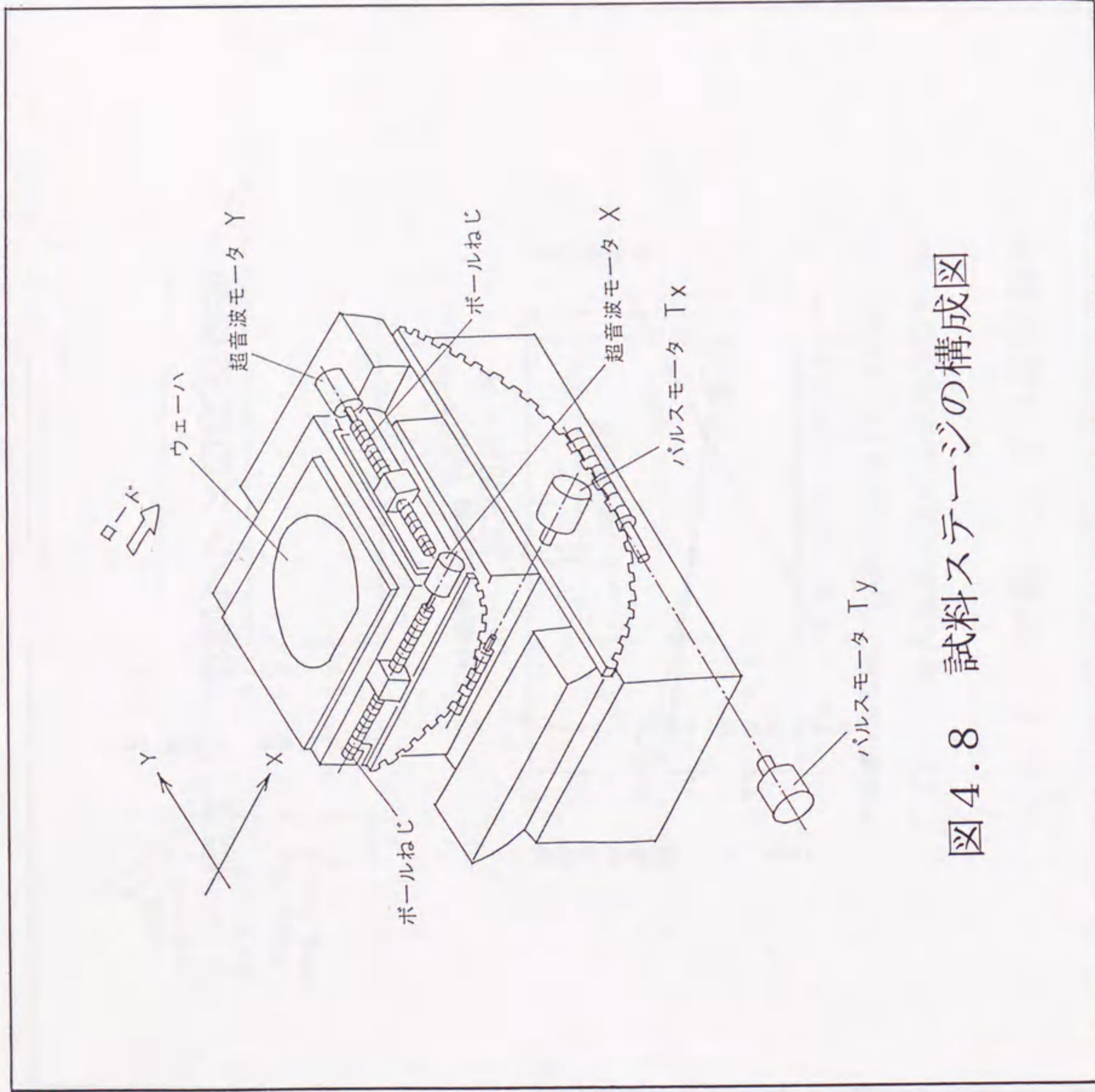
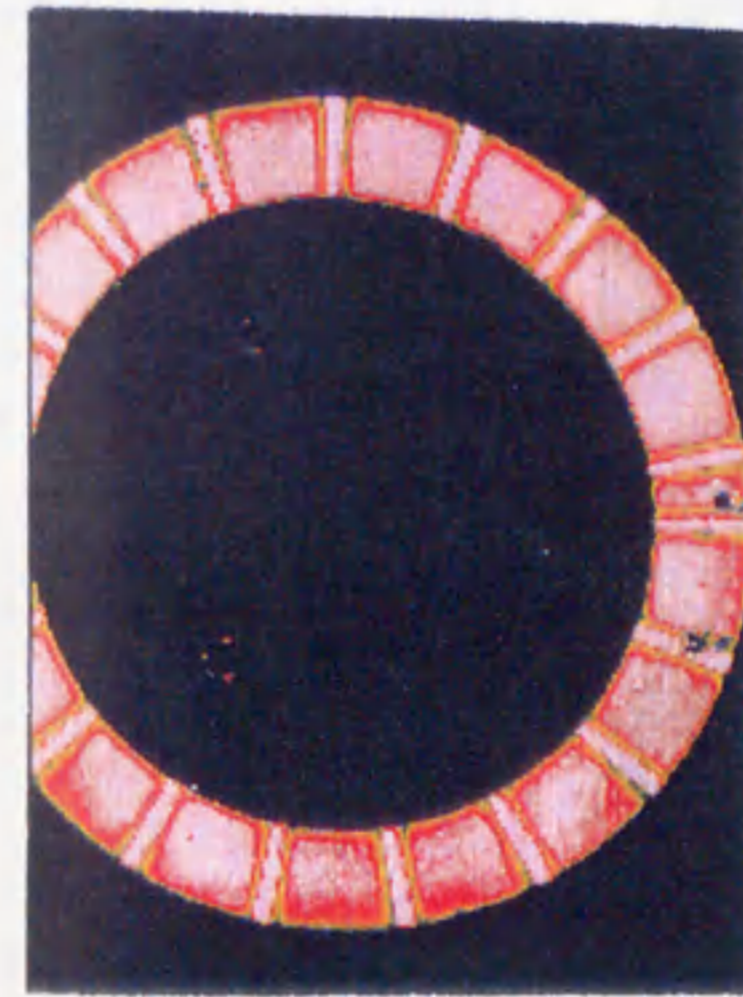


図4.8 試料ステージの構成図



(a) 接着状態が極めて悪い：寿命が短い



(b) 接着状態が比較的良好：寿命が長い

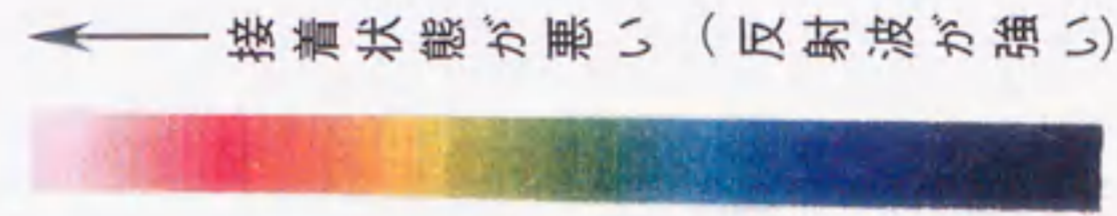


図4.9 弾性体と圧電素子の接着状態の観察例 (超音波映像)

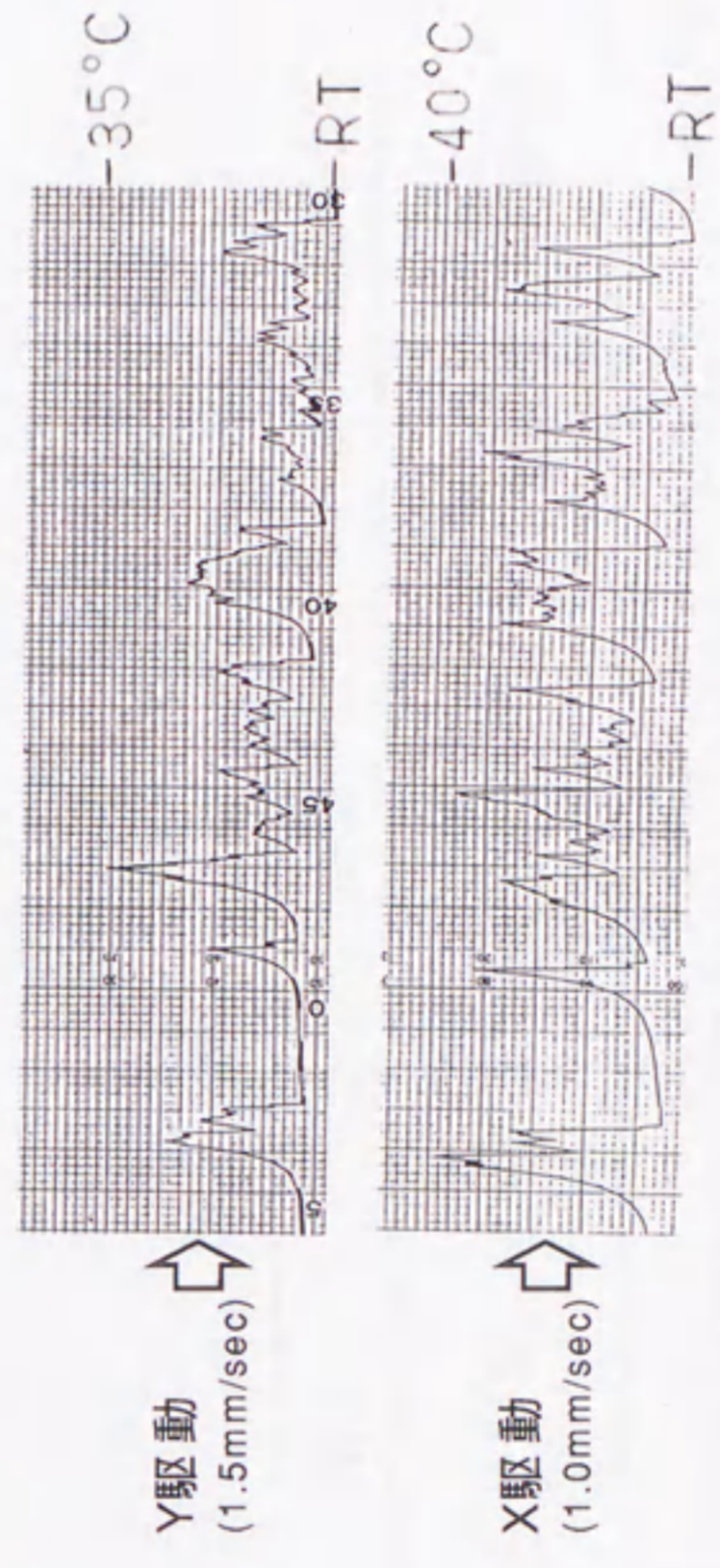
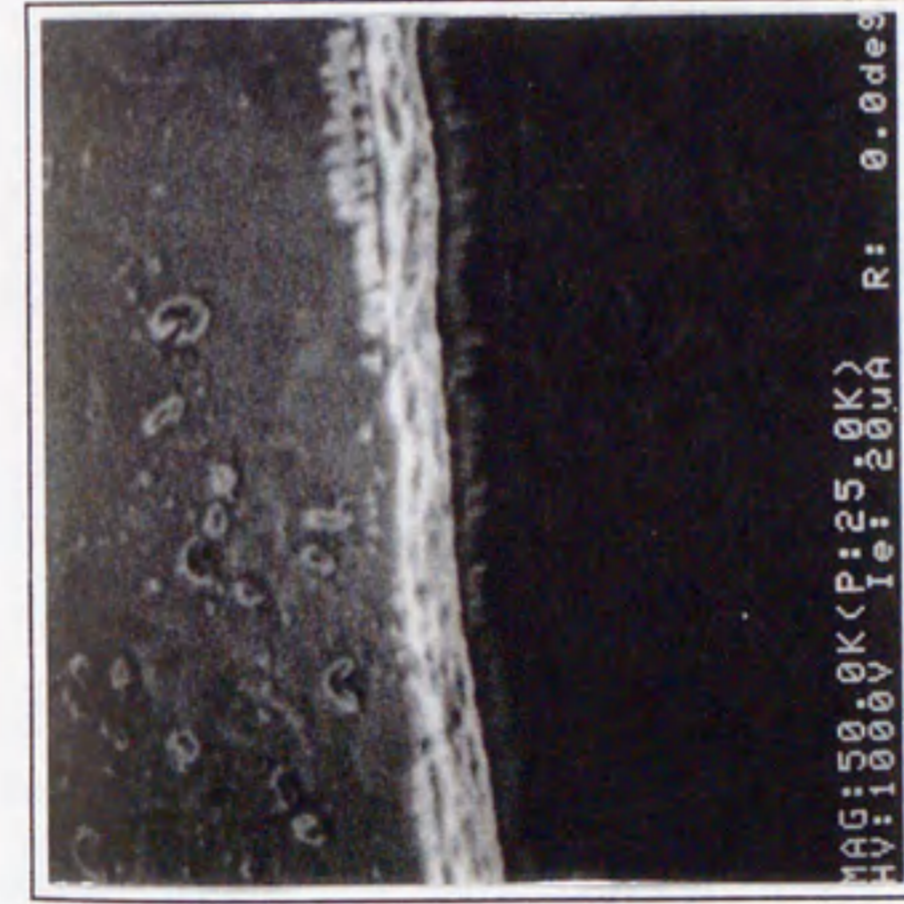


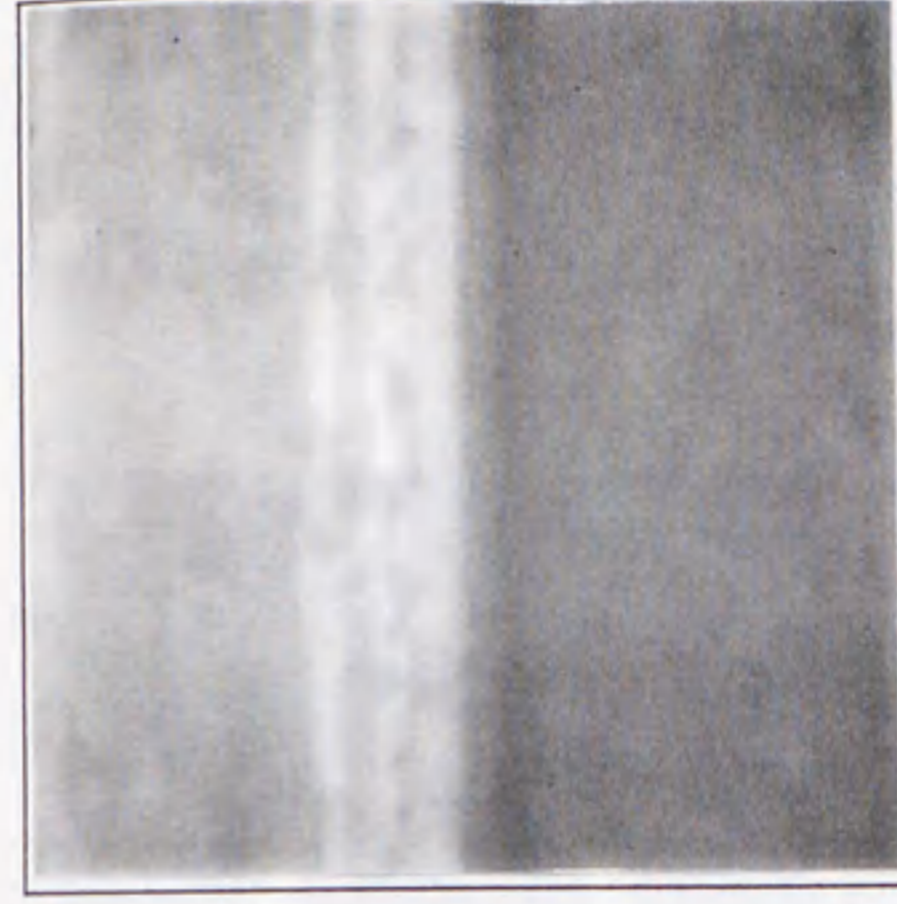
図4.10 通常使用状態における超音波モータの
温度上昇測定例

表4.2 インレンズSEMの主な性能

項目	性能	基準測定条件
分解能	5nm(1kV)	カーボン上 金蒸着粒子観察
測長	測長可能範囲	SiO ₂ 上レジストパター ーン測定 (0.5 μ mお よび1 μ mピッチ)
	測長再現精度	加速電圧=1kV エミッション電流=5 μ A
	加速電圧依存性	観察倍率=50k倍
	倍率依存性	測定回数=20回
スループット	3.7枚/時	5点/ウエハ測定



インレンズSEM
(分解能 5nm)



S7000 (分解能 12nm)

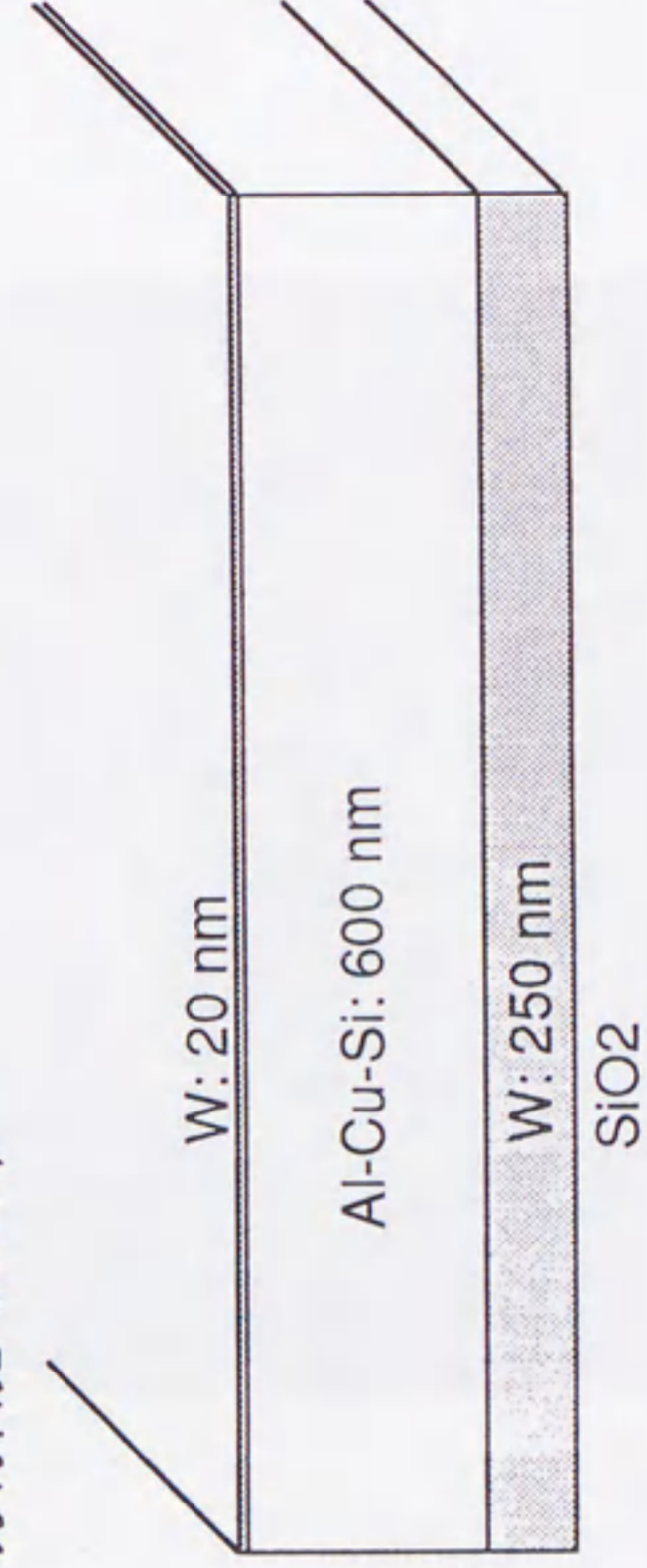
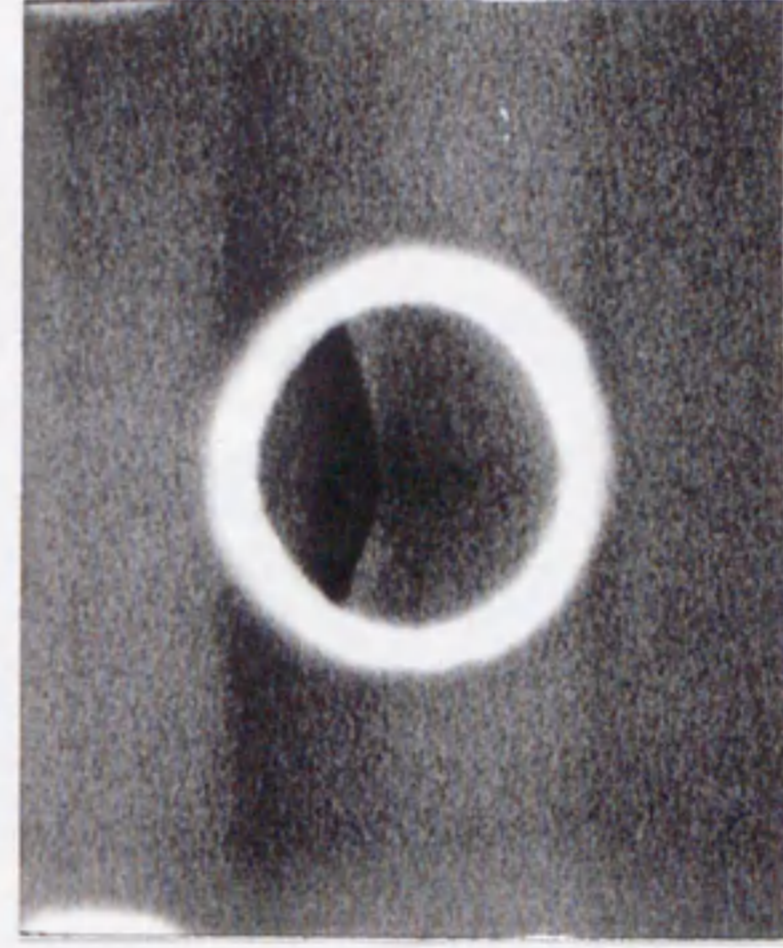
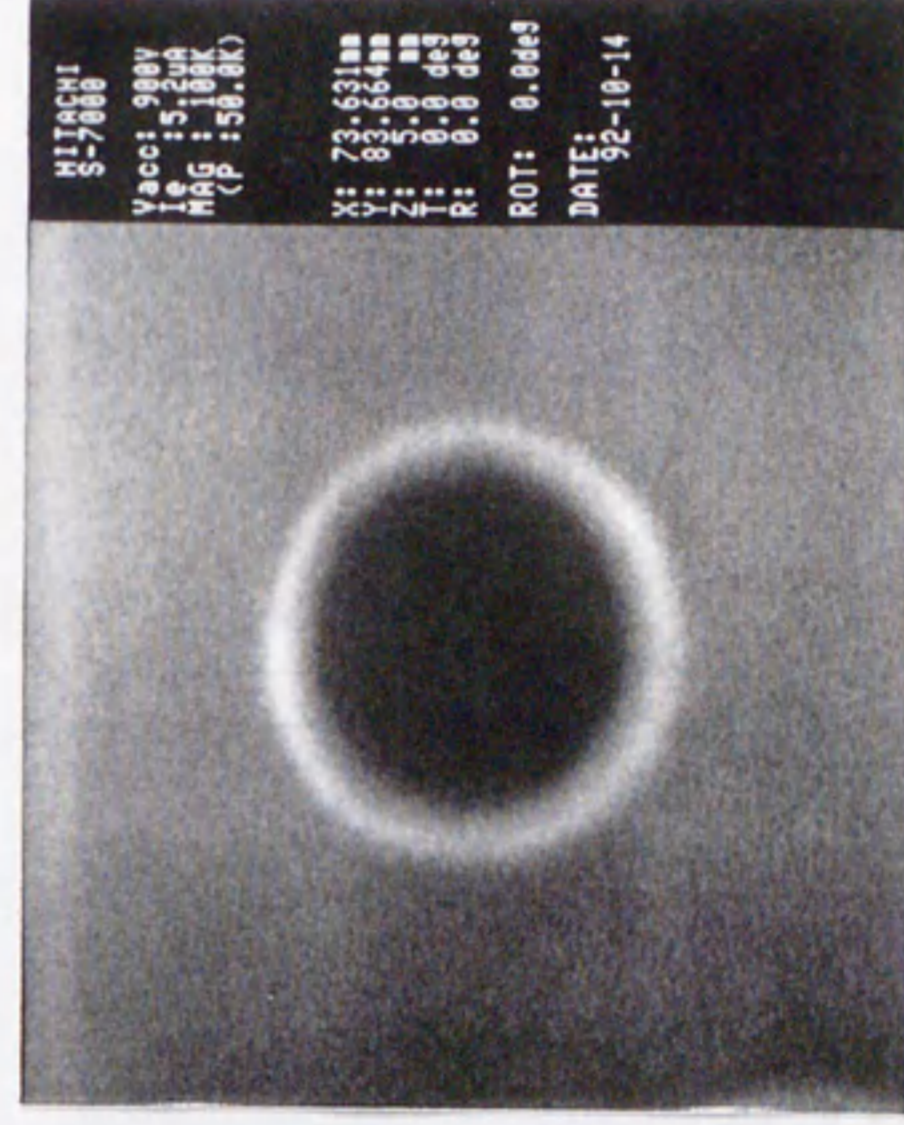


図4.1.1.1 インレンズSEMによる観察例 (1)
(配線構造の評価)



インレンズSEM



S7000

図4.1.2 インレンズSEMによる観察例(2)
(0.6 μ m径、1.6 μ m深さのホールパターン)

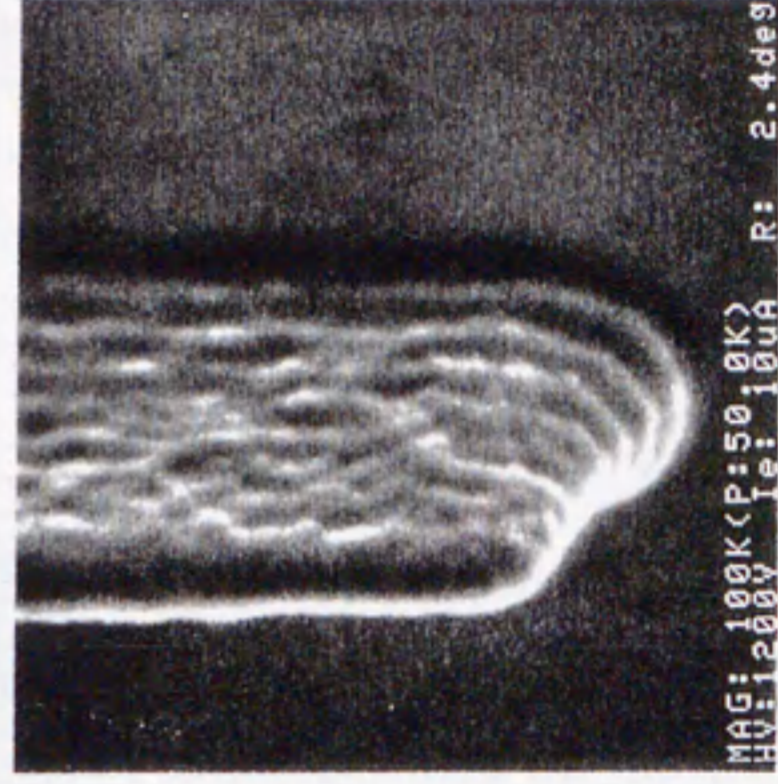
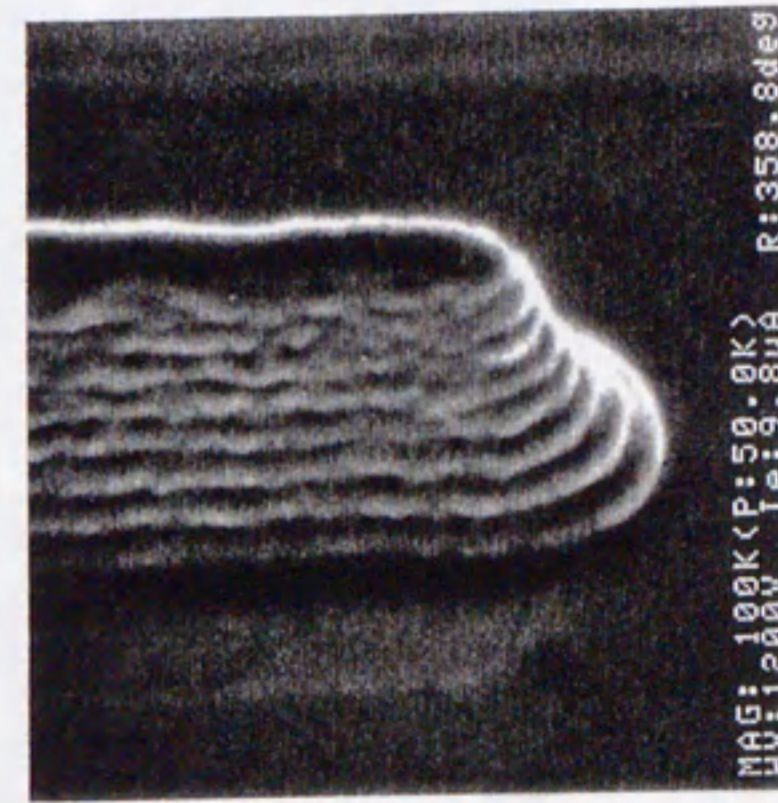
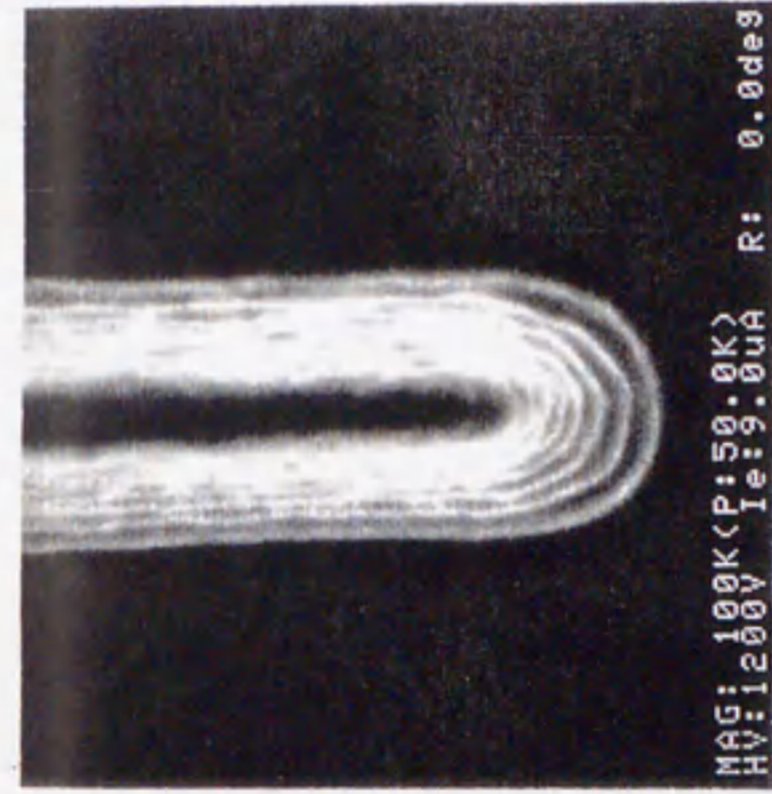


図4.1.3 インレンズSEMによる観察例 (3)
(全方位観察: SiO_2 上0.5 μm 幅ラインパターン)

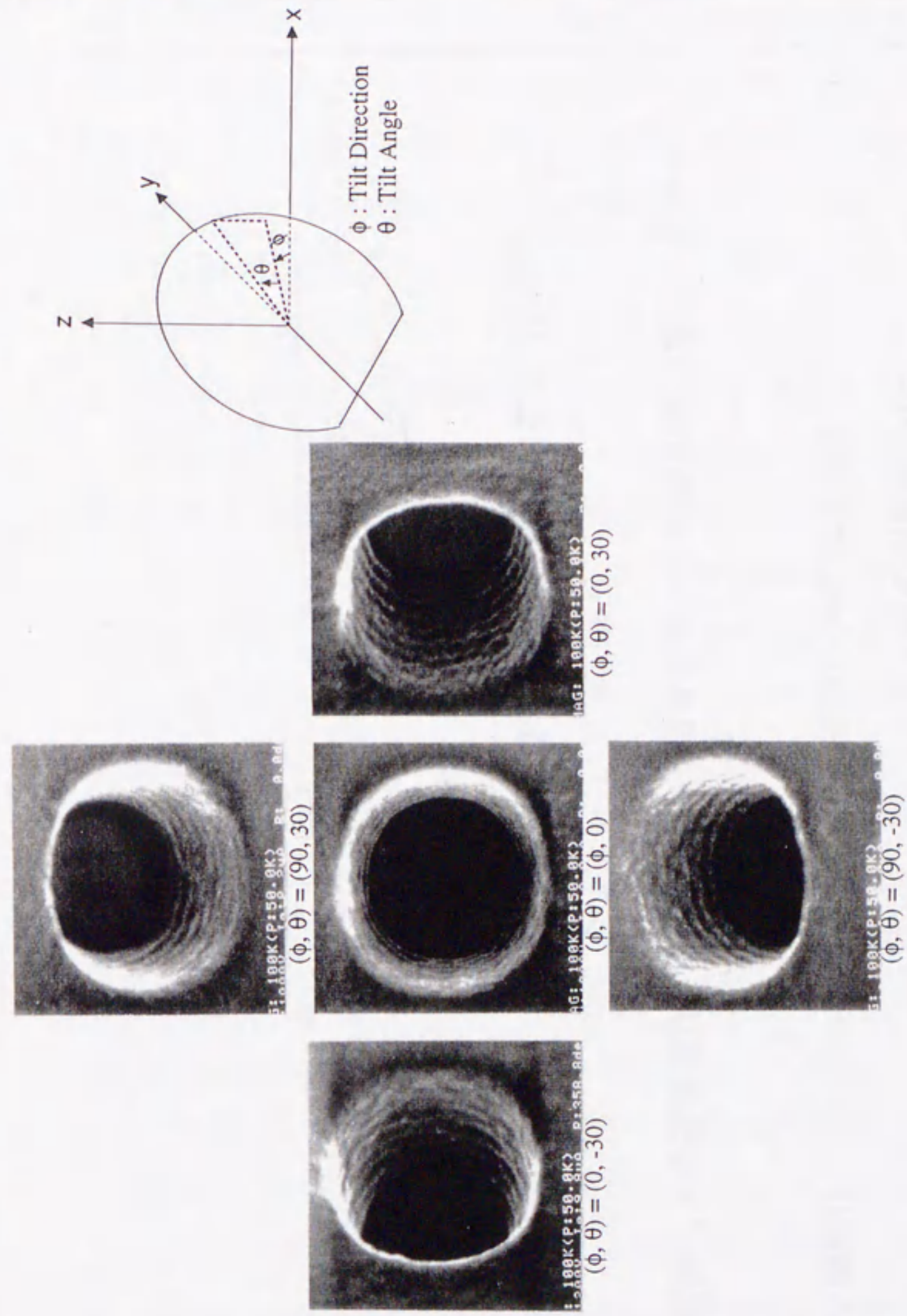


図4.14 インレンズSEMによる観察例(4)
 (全方位観察: SiO₂上0.6 μm径ホールパターン)

今後の課題

進め方

高スループット化

ウエハ搬送・位置合わせの高速化

高信頼化・保守簡便化

超音波モータの駆動能力増強・長寿命化

高分解能化

対物レンズ低収差化

ステージの耐振性強化

図4.1.15 インレンズSEMにおける今後の課題

5. 深穴観察用走査電子顕微鏡の研究

5.1 はじめに

高速化・高集積化・高信頼化を目指すLSIの動きに対して、デバイス・プロセス技術はパターンの微細化と多層化で応えてきた。今後も、同様に推移して行くものと推定される。中でも、パターン多層化への期待が大きい。パターン多層化に於いては、コンタクトホール(図5.1のcont)やビアホール(図5.1のvia)など、配線層間の接続穴形成が要の技術となる。例えば、64M-DRAMの場合、1チップ当たり約2億箇のコンタクトホールがある。これら2億箇のコンタクトホールのうち1箇でも導通不良があれば、64M-DRAMは動作しない。しかも、パターンの微細化は、接続穴をより小さく高アスペクト比(深さ/直径)にし、導通不良を起こし易くする。導通不良の根源は穴底にある。“導通不良の無い穴形成”を確実に、安定して行うためには、穴底を観測できることが必須の前提となる。しかし、従来技術では満足な穴底観察ができなかった。

深穴観察装置は、“新しい観察原理”を適用し、従来不可能とされていた「非破壊・短時間で穴底観察の要求に応える」ために開発された装置である。

5.2 深穴観察装置の観察原理と装置構成

5.2.1 深穴観察装置の観察原理

従来は、低損傷・低チャージアップを実現するために、0.5kV~2kVの低加速電圧が使用されてきた。しかし、観測対象をLSIに限れば、使用可能な加速電圧領域の拡張を見出した。図5.2は、低損傷・低チャージアップで観測できる範囲と解像度の加速電圧依存性を概念的に示したものである。LSIでは、用いられる絶縁膜の厚さ1 μ m前後、デバイス層の深さ数 μ m程度であり、活性領域がウエハ表面層に限られている。従って、従来の低加速電圧化とは逆に、数十kV以上の高加速電圧を用いると、入射電子の大半が絶縁膜やデバイス層を突き抜けてしまうため、低損傷・低チャージアップで観測できる領域が再び現れる。しかも、低加速電圧の場合と比較して、より高い解像度が得られる。深穴観察装置は、数十kV以上の高加速電圧領域に着目して開発された装置である。

“数十kV以上の高加速電圧を用いると、なぜ穴底を見ることができるのか”については、新たに見出した観察原理を図5.3に示す。高エネルギーの一次電子(高加速電圧の電子ビーム)を穴

底に照射した場合、従来と異なる点は、「穴底で散乱され側壁に突入した反射電子が、穴側壁を突き抜けて、試料表面から脱出できる」ことである。反射電子が脱出する際に、この反射電子に依って創られた二次電子が試料表面から放出される。これ等の“反射電子に依って創られた二次電子”は、反射電子と同様に、穴底の情報を担っている。したがって、“反射電子に依って創られた二次電子”を検出し、像信号として用いることに拠り、穴底の観察が可能となる。また、同様の二次電子発生メカニズムを利用して、膜で覆われた試料の内部構造を観察することができる。“内部構造で後方散乱された反射電子が創る二次電子”を像信号として用いる。形成される試料像は、表面凹凸情報と内部構造情報が重畳した画像となる。この原理をLSI観察に適用する場合、5.5にて後述するように、約50keV以上の一次電子エネルギーが必要である。

5.2.2 深穴観察装置の装置構成

装置構成を図5.4、装置仕様を表5.1に示す。装置開発に於ける要点は、高エネルギー反射電子を得るための、高加速電圧である。放電障害を考慮し、最大加速電圧を200kVとした。研究・開発の課題を図5.5に示す。200kVで加速された高速の電子ビームを、① 細く絞ること、② 大きく・高速で偏向すること、が二大課題技術である。収束レンズを2段として、3nmの電子ビーム径を達成した。また、新たに強励磁・高精度な偏向器を開発し、ヒステリシスの小さいパーマロイ磁路を採用することに拠って、最小倍率200倍とTVスキャン・レートを可能にした。

試料ステージは、最大8”までのウエハ搭載と、X・Y・R・T・Zの5軸駆動ができる。真空排気系については、試料のコンタミネーションを防止するために、ドライポンプとターボポンプの組合せによるドライ真空化を図った。

5.3 深穴観察装置の性能評価

200kVの加速電圧で5nmの分解能が得られていることを確認した。評価過程で、クリーンルーム空調のダウンフローが、従来に比べて太く・固い高圧ケーブルに振動を誘発し、解像性能を劣化させていることが分かった。ケーブル固定法の改善を行ったが、まだ、空気振動に因る影響が見られた。耐空気振動性を更に強化すれば、3nm以下を達成することも可能と考えられる。

また、当初の狙いであった“穴底観察”の他、パターン寸法測定に於ける“重ね合わせ精度測定”や、加工形状検査での“内部構造、および陰になった部分の観察”といった、新応用分野への展開の可能性を見出した。深穴観察装置の応用面での特徴を纏めて、図5.6に示す。枠表示で

強調した項目が、“従来のEB測長・外観検査では観測が不可能とされていた分野”である。以下、各応用分野ごとに代表的な観測例を示す。

(1) 穴底観察

穴底観察の例を、従来装置 S7000との比較で、図5.7に示す。0.6 μ m径のレジスト穴パターンを、斜め手前・視斜角10°の方向から観察した。深穴観察装置の像では、S7000では観察できていない“穴側壁の定在波効果に起因したリング状凹凸”および“穴底の下地パターン構造”を明瞭に観察できる。なお、穴底観察については、内部構造を観察できることから類推できるように、アスペクト比に依らず、狭く・深い穴の底でも観察可能である。以下、レジストパターンおよびエッチングパターンの加工不良観察例を示す。

1) レジスト穴パターン形状不良

レジスト残りの観察例を図5.8に示す。0.4 μ m径の穴パターンを、斜め左上、視斜角が10°の方向から観察した。穴パターン底部に、レジスト残渣が認められる。残渣は、露光装置の解像不良に起因しており、露光量不足に因り生じたものである。レジスト穴形状不良の観察例を図5.9に示す。“一つの穴が三つの同心円から成る像”が形成されている。従来技術では、図示されていないが、“一番内側に見えている円だけの像”が観察される。三つの同心円は、説明用断面図のa部・b部・c部に相当し、「穴の奥ほど広くなる」ことを示している。開口端のaからb部までは薄皮が残っており、レジスト材を透かして、薄皮部と側壁部の交わる部分b、および側壁部とシリコン基板の交わる部分cが見えている。薄皮の形成は、現像処理時に、レジスト表面が難溶化されたことに因る。図中、中央および右下に位置する穴は、その薄皮がリンス処理時に剥がれたものである。剥がれた薄皮の一枚がA部に再付着している。また、中央および右下の穴で、側壁部が陰になっているにも拘らず、底部よりも明るいコントラストを示している。理由は、「穴底で発生した二次電子に加え、側壁および表面で創られた二次電子が、像形成に寄与する」ためと考えられる。

広範囲にわたる形状不良が、短時間で簡単に検査できる例を図5.10に示す。64M-DRAMメモリマツト内の0.4 μ m径レジスト穴パターンを、真上、視斜角0°の方向から観察した。メモリマツト中心部では、表面開口部と穴底の像が同心円状に観察されており、穴が期待どおり垂直に形成されていることが分かる。一方、メモリマツト端部の像は、表面開口部と穴底の円の中心がずれている。これは、形成された穴が傾いていることを示している。図示されていないが、穴の傾き方

向はメモリマツト中心部に向いており、傾きの程度は中心部に近づくほど小さくなる。これ等の傾向から推定して、この現象の原因は「現像後の熱処理に起因したレジストの収縮である」と考えられる。穴の傾き程度は、レジスト厚さ、および“表面開口部と穴底の、円の中心の位置ずれ量”とから計算される。また、メモリマツト部の大きさと端部における円中心の位置ずれ量とから、レジストの収縮率を知ることができる。右図の像では、傾き程度は約0.06radである。また、レジストの収縮率は10⁻⁶程度と計算される。なお、用いたレジストは、いずれも、化学増幅系のポジ型レジストである。

2) エッチング不良

エッチング残りの観察例を、S7000との比較で、図5.11に示す。S7000では、穴底を観察できない。深穴観察装置では、穴側壁の凹凸とともに、深さ1.8 μ mの穴底にある島状のエッチング残りを観察できる。エッチング残りであることを確認した結果が、下段の破壊観察写真である。穴部分を断面加工し、その断面を高分解能のSEM（日立製作所製 S900）で観察した。左下の写真は穴全体の断面像であり、上段の黒い部分がポジ型レジスト、下段の白い部分がSiO₂膜である。SiO₂をエッチングした穴の底に、微小な突起のあることが認められる。この突起部分を拡大した像が、右下の写真である。突起の高さは0.1 μ m程度である。この微小突起が、深穴観察装置では、島状に観察されている。

エッチング形状不良の観察例を図5.12に示す。図左の深穴観察装置像において、aの円形部が穴底であり、a部周辺のより明るいb部が側壁のわん曲部分である。わん曲部分を断面加工し、S900で確認した結果が右図の写真である。このように、エッチングでの形状不良を非破壊で、容易に検出することができる。

(2) 内部構造および陰になった部分の観察

1) レジストパターン

レジストパターンの形状不良観察例を図5.13に示す。“一本のラインパターンが、a・b・cを端とする3本の縞から成る像”が形成される。従来技術では、図示されていないが、“aを端とする、一本の帯から成る像”が観察されるだけである。3本の縞の端、a・b・c、は説明用断面図のa部・b部・c部に相当する。aからbまでは薄皮が残っており、レジスト材を透かして、bからcまでの側壁部が見える。側壁部は、反射される電子が多いため、明るいコントラストが得られる。観察方向を変えて撮られた複数の像を組み合わせれば、陰になっている側壁部の立体形状を知ることができる。図下の写真は、左斜め上方から、視斜角7°で観察した像である。

左側壁部が幅広く見えるようになることから、台形の形状であることが分かる。

2) 加工パターン

膜で覆われた加工パターンの観察例を、S7000との比較で、図5.14に示す。配線寿命試験の後、SiO₂保護膜で覆われたW/A1合金/W積層配線を観察した結果である。S7000では、保護膜の段差が見えるだけである。深穴観察装置では、保護膜の下にある配線aが見える。しかも、エレクトロ・マイグレーションのために、b部で断線していることが分かる。

(3) 重ね合わせ精度測定

1) レジストパターン

レジストパターンの合わせずれ観察例を図5.15に示す。W膜上、厚さ1μmのレジストパターンを、手前、斜め上方から観察した。像の解釈を容易にするため、S7000との比較で示してある。図中、aの明るい縞は、死角になっている反対側のレジスト側壁である。bの暗い帯がレジスト底面、加工すべきWパターンに相当し、cが“レジストおよびW膜の下に位置する接続穴”である。パターン加工に際しては、bとcの合わせずれが要点となる。像から、比較的良好な合わせ状態にあることが分かる。

2) 加工パターン

加工パターンの合わせ不良観察例を図5.16に示す。SiO₂層間膜に加工した接続穴である。接続穴aが、M2配線に対して右下方向に、約0.07μmずれていることが分かる。一方、約1.5μm厚さのSiO₂膜に覆われてはいるが、M1配線と、その下の接続穴bを観察でき、これらの合わせは良好であることが認められる。

5.4 デバイス損傷とチャージアップの評価

(1) デバイス損傷

寄生n-MOSトランジスタのV_{th}シフトに着目して、評価を行った。寄生n-MOSトランジスタを用いた理由は、照射損傷に最も敏感であり、高感度な測定が可能なことに拠る。寄生n-MOSトランジスタのゲート部分を中心に、200keVの電子ビームを連続照射し、照射したトランジスタ、および周囲の同一構造を有するトランジスタのV_{th}シフト(ΔV_{th})を測定した。電子ビームの総照射量は、x10,000の観察倍率で、1μCと360μCである。1μCは、0.6C/cm²の電子ビーム・ドーズ量となり、約10分間の観察時間に相当する。

ΔV_{th}の測定結果を図5.17に示す。電子ビーム照射に因り、ゲート酸化膜中およびゲート酸化

膜/Si基板界面に正電荷が生成されるため、V_{th}は負の方向にシフトする。正電荷の生成は、「移動度の大きい電子が、入射電子の経路に沿って一時的に形成された電子-正孔対チャンネルを通り、基板およびゲート電極に抜けてしまうのに対して、移動度の小さい正孔は、酸化膜の中或いは界面に取り残されてしまうため」と考えられる。負方向へのV_{th}シフト量は、電子ビーム照射点から離れるにしたがって、小さくなる。V_{th}が変化する損傷領域はドーズ量に依存し、総照射量1μCで半径1mm程度、360μCで半径40mm程度の円状となる。なお、これらV_{th}の変化は、配線加工後の水素アニール処理(450°C・30分)に依って、照射点のごく近傍を除いては回復される。

また、損傷低減検討の結果、図5.18(a)に示すように、反射電子BSEが試料と対物レンズとの間で多重散乱を繰り返すことに因り、損傷領域の拡がることが分かった。図5.18(b)に示すように、対物レンズの試料に対向する面を、従来のリン青銅平板から、反射係数の小さいカーボン製鋸歯状面板に変更した。これにより、BSEの多重散乱が抑制された結果、損傷領域を約1/4に縮小できた。図5.17のV_{th}シフト・データは、図5.18(b)に改良後の測定結果である。

V_{th}シフトを詳細に解析するために、MOSダイオードに電子ビームを照射し、照射前後でのフラットバンド電圧の変化ΔV_{fb}(V)と界面準位密度の変化ΔN_{ss}(eV⁻¹・cm⁻²)を測定した。ΔV_{fb}とΔN_{ss}は、ΔV_{th}(V)との間に、次のような近似関係を持つことが知られている。³⁰⁾

$$\Delta V_{th} \approx \Delta V_{fb} \quad (V) \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\Delta V_{th} \approx -(Q_{ss}/C_{ox}) - (Q_{ox}/C_{ox}) \quad (V) \dots\dots\dots (5.2)$$

$$Q_{ss} \approx q \cdot \Delta E \cdot \Delta N_{ss} \quad (C/cm^2) \dots\dots\dots (5.3)$$

$$C_{ox} = \epsilon_{ox} \cdot \epsilon_0 / t_{ox} \quad (F/cm^2) \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、Q_{ss}(C/cm²)は単位面積当たりの界面トラップ電荷量、Q_{ox}(C/cm²)は単位面積当たりのゲートSiO₂膜内固定電荷量、C_{ox}(F/cm²)は単位面積当たりのゲート容量、q=1.6x10⁻¹⁹(C)は素電荷量、ΔE(eV)は界面準位のエネルギー幅、t_{ox}(cm)はゲートSiO₂膜の厚さ、ε_{ox}はゲートSiO₂膜の比誘電率、ε₀=8.85x10⁻¹⁴(F/cm)は真空の誘電率である。

測定には、図5.19に示す構造の200μm角MOSダイオードを用い、電子ビーム照射後の1M Hz C-V特性からΔV_{fb}を、Quasi-static C-V特性からΔN_{ss}を求めた。

ΔV_{th}の電子ビーム・ドーズ量依存性を、電子ビームエネルギーをパラメータとして、図5.19に示す。ΔV_{th}はドーズ量に比例して増大する。0.1C/cm²までの測定ドーズ量範囲では、次式のような比例関係のあることが分かった。

$$\Delta V_{th} \propto (\text{電子ビーム・ドーズ量})^{1/4} \dots\dots\dots (5.5)$$

一方、50keV以上のエネルギー範囲では、 ΔV_{th} の電子ビームエネルギー依存性は認められない。 ΔV_{th} を決めるデバイス層が表面から250nm以内にあり、入射電子ビームの大半がデバイス層を突き抜けてしまうためと考えられる。

電子ビーム・ドーズ量の影響が、 Q_{ox} と Q_{ss} のどちらに強く現われているかを調べるために、 ΔN_{ss} のドーズ量依存性を測定した。 ΔN_{ss} の測定結果を図5.20に示す。 ΔN_{ss} の測定結果を基に、 $\Delta E=0.4eV$ 、 $t_{ox}=13.5 \times 10^{-7}cm$ 、 $\epsilon_{ox}=3.9$ を用いて Q_{ss}/C_{ox} を計算した。計算結果を図5.19に破線で示す。図5.19の ΔV_{th} と Q_{ss}/C_{ox} との比較から、「低ドーズ領域では、 Q_{ox} の増加が ΔV_{th} を決め、 $0.001C/cm^2 \sim 0.01C/cm^2$ を境として、それ以上の高ドーズ領域では、 Q_{ss} すなわち界面準位の占められていく過程が支配的である」ことが分かった。

また、以上の検討から、「電子ビーム照射初期の低ドーズ領域では、デバイス損傷として V_{th} の変化が見え、ドーズ量が増大するとともに、 V_{th} への影響に加えて、相互コンダクタンス g_m の変化が現われてくる」ことが分かった。

(2) レジストの損傷

パターンの寸法変化に着目して、レジスト損傷を評価した。検討対象は、ポジ型レジストの穴パターン(TH1)、およびネガ型レジストのスペースパターン(M1)である。パターン寸法測定値の電子ビーム照射時間依存性を、加速電圧をパラメータとして、図5.21と図5.22に示す。同一箇所を繰り返し測長しながら、計測値の変化量を打点していった結果である。ポジ型・ネガ型レジストともに、高エネルギーでの寸法測定値変化量が1keVの変化量よりも小さく、損傷は軽微であることが分かった。低損傷の理由は、入射電子の大半がレジストを突き抜け、レジストに吸収されるエネルギー量が少ないためと考えられる。1keVでは、図5.21・図5.22ともに、寸法測定値が小さくなる方向に変化する。変化原因はコンタミネーションにあると考えられる。³¹ 図5.21に於いて、高エネルギーほど変化量が小さくなる理由は、「コンタミネーションとレジスト収縮の相殺効果が働く」ためと考えられる。また、図5.22に於いて、スペースが高エネルギー側で広がる理由は、レジスト収縮に起因するものと考えられる。

(3) チャージアップ

チャージアップについては、5.3で示した各種SiO₂膜の観察結果から分かるように、像観察の障害とはなっていない。これは、① 入射電子の絶縁層突き抜け、② 入射経路に沿って形成された電子-正孔対チャネルが導電通路となって電子を逃がす、ことの効果と考えられる。

5. 5 考察

5. 5. 1 深穴観察についての考察

深穴観察時に生成される反射電子と二次電子を、図5.23に模式的に示す。PEは一次電子、BSEは穴底で散乱された反射電子、SE1は穴底から放出された二次電子、そしてSE2はBSEによって励起された“二次的な二次電子”である。この他、図示されていないが、BSEが対物レンズに衝突した際、或いは対物レンズと試料との間で多重散乱を繰り返す間に創られる二次電子SE3がある。これ等の中で、BSE自体の像信号への寄与は無視できる程度に小さく、SE3の影響は技術的に小さくすることが可能である。したがって、深穴観察時の像信号としてはSE1とSE2を考えればよい。二次電子検出器に検知される二次電子の信号強度S(electrons/sec)は、次式で表される。

$$S = N_{se1} \cdot D_1 + N_{se2} \cdot D_2 \quad \dots \dots \dots (5. 6)$$

ここで、 N_{se1} (electrons/sec)はSE1の強度、 N_{se2} (electrons/sec)はSE2の強度、 D_1 はSE1に対する二次電子検出器の検出効率、 D_2 はSE2に対する二次電子検出器の検出効率である。

本検討の高エネルギー領域では、試料のチャージアップ程度が軽く、二次電子捕集に及ぼすチャージアップの影響を無視できる。したがって、電子ビーム照射点から穴開口部を見込む立体角 Ω (sr)を用いて、 D_1 は次式のように近似できる。

$$D_1 = \Omega / 2\pi \quad \dots \dots \dots (5. 7)$$

また、試料表面から放出されるSE2に対しては、 $\Omega=2\pi$ となるため、 D_2 は次式で表される。

$$D_2 = 1 \quad \dots \dots \dots (5. 8)$$

一方、 N_{se1} 、 N_{se2} 、および反射電子の強度 N_{bse} (electrons/sec)は次式のように表される。

$$N_{se1} = N_{pe} \cdot \delta_{pe} \quad \dots \dots \dots (5. 9)$$

$$N_{se2} = \alpha \cdot (1 - \Omega / 2\pi) \cdot N_{bse} \cdot \delta_{bse} \quad \dots \dots \dots (5. 10)$$

$$N_{bse} = N_{pe} \cdot \eta \quad \dots \dots \dots (5. 11)$$

ここで、 N_{pe} (electrons/sec)は一次電子PEの強度である。 δ_{pe} はPEに因って、 δ_{bse} はBSEに因って創られる二次電子の放出比である。また、 η は穴底に於けるPEの反射係数である。³²

$(1-\Omega/2\pi)$ はBSEが穴側壁に入射する確率、 α はBSEが穴側壁を突き抜ける確率である。計算を簡単にするため、 δ_{pe} 、 δ_{bse} 、 η の放出角度依存性が無いものと仮定すれば、(5.7)~(5.11)式を用いて、(5.6)は次式のように表される。

$$S = (\Omega / 2\pi) \cdot N_{se1} + N_{se2}$$

$$= \{ (\Omega / 2\pi) \delta_{pe} + \alpha \cdot (1 - \Omega / 2\pi) \cdot \eta \cdot \delta_{bse} \} \cdot N_{pe} \dots (5.12)$$

ここで、 δ_{pe} 、 δ_{bse} 、および η は試料材質の他、入射電子のエネルギーに依存する。

δ_{pe} 、 δ_{bse} については、図2.1に示したように数百eVでピークを持ち、エネルギーが高くなるとともに、二次電子放出比も漸減して行く。検討対象の高エネルギー領域では、二次電子放出比のエネルギー依存性は小さく、 δ_{pe} 、 δ_{bse} は試料物質によって定まる定数として近似できる。 η については、エネルギー依存性が小さく、約5keV以上のエネルギーでほぼ一定となることが知られている。AlやSiの η は、高エネルギー領域に於いて、0.2程度である。

(1) アスペクト比依存性

二次電子信号強度のアスペクト比依存性を図5.24に示す。測定には、100keVの電子ビームと、各種深さの0.4 μ m径・シリコン穴を用いた。比較のため、1keVの測定結果を示してある。また、二次電子信号強度の表示Sはアスペクト比“0”の測定値で規格化してある。この測定結果は、(5.12)式と定性的に良い一致を示す。

アスペクト比が低く Ω の大きい領域では、SE1による第1項が支配的となる。Sは、次式のよ

$$S = (\Omega / 2\pi) \cdot \delta_{pe} \cdot N_{pe} \dots \infty \Omega \dots (5.13)$$

アスペクト比の増大、 Ω の減少ともなって、Sも漸減して行く。

アスペクト比が高く Ω の小さい領域では、SE2による第2項が支配的となる。Sは、次式のよ

$$S = \alpha \cdot \eta \cdot \delta_{bse} \cdot N_{pe} = \alpha \cdot \delta_{bse} \cdot N_{bse} \dots \infty \alpha \dots (5.14)$$

α がアスペクト比に依存しないため、Sはアスペクト比に依らない一定値を取る。一方、 α は入射電子のエネルギーと穴の深さに依存するため、100keVとエネルギーが高い場合には、

$$S = \delta_{bse} \cdot N_{bse} \dots (5.15)$$

であるが、エネルギーを低くするとともに、Sも α だけ小さくなる。また、深穴の観察限界が、アスペクト比ではなく、穴の深さによって決められることが分かる。

(2) 電子ビーム・エネルギー依存性

二次電子信号強度の電子ビーム・エネルギー依存性を図5.25に示す。測定には、0.4 μ m径・1 μ m深さのシリコン穴を用いた。この測定結果も(5.12)式と定性的に良い一致を示す。電子ビームのエネルギーが低い場合には、Sは α に比例する。Sは、エネルギーが高く、 α が大きくなるとともに、増大する。しかし、電子ビームのエネルギーが或る閾値以上になると、反射電子の大半が穴側壁を貫通できるようになるため、 α は飽和し、一定の値を取るようになる。本測定での閾値は50keV前後である。閾値以上の領域では、 δ_{bse} のエネルギー依存性が見えるようになり、Sはエネルギーの増大とともに僅かな減少傾向を示す。

5.5.2 内部構造観察についての考察

モデルとしては、アスペクト比無限大の穴底観察を想定すれば良い。異なる点は、試料内部での電子ビーム拡がり解像度を定める点である。電子ビームのエネルギーが高いほど、拡がり解像度は小さく、内部構造を高解像度で、より深くまで観察できる。50keVと200keVにおける電子ビーム拡がりのモンテ・カルロシミュレーション結果と、観察写真例を図5.26に示す。200keVの場合、電子ビーム拡がりのシミュレーション結果から、深さ2 μ mに存在する内部構造は、内部構造の位置する深さをdとすると、d/10程度の解像度で観察できることが分かる。

5.6 まとめ

数十kV以上の高エネルギー電子ビームを用いることに依り、“深い穴の底や内部構造を非破壊で観測できる新しい観察原理”を見出した。原理は、「穴底や内部構造から反射された電子が創る二次電子を検出し、像信号として用いる」ものである。

この観察原理に基いて深穴観察装置を開発した。開発成果として、次のような高い性能と、従来には無い効果が得られることを確認した。

(1) 加速電圧200kVで5nmの分解能を有し、低損傷・低チャージアップで観測できる。

低損傷の理由は、入射電子の大半がデバイス層を突き抜けてしまうためと考えられる。デバイス損傷は、検討した50keVから200keVのエネルギー範囲で見ると、電子ビーム照射初期の低ドーズ領域では V_{fb} の変化として現われ、ドーズ量が増大するとともに、相互コンダクタンス g_m の変化が見えて来る。また、 V_{fb} 変化の要因としては、0.001C/cm²~0.01C/cm²以下の低ドーズ領域ではSiO₂膜内固定正電荷の増加が、それ以上のドーズ領域では界面準位の

占められて行く過程が支配的であることを明らかにした。低チャージアップの理由は、入射電子のデバイス層突き抜けと、進入経路に沿って形成された電子-正孔対チャンネルが導電通路となって電子をリークさせるためと考えられる。

(2) 従来不可能であった狭く・深い穴底の観測を可能とする。

深穴の観察限界は、アスペクト比では無く、穴の深さに依って決められることが分かった。

(3) 従来不可能であった“重ね合わせ精度測定”および“内部構造や死角になった陰の部分”を非破壊・高速でパターン寸法測定・形状観察”することができる。

深穴観察装置における今後の課題は、“デバイス損傷の軽減”と“使用できる限界の明確化”である。現在の使用に支障が無いとは云え、将来的には、電子ビーム照射点近傍での損傷が問題となることが予測される。

LSIの技術開発方向は微細化・多層化！

多層化のポイントは配線接続の穴形成：64 MDRAMコンタクト穴の数2億個！

穴1個の導通不良が致命傷：穴底を見たい！

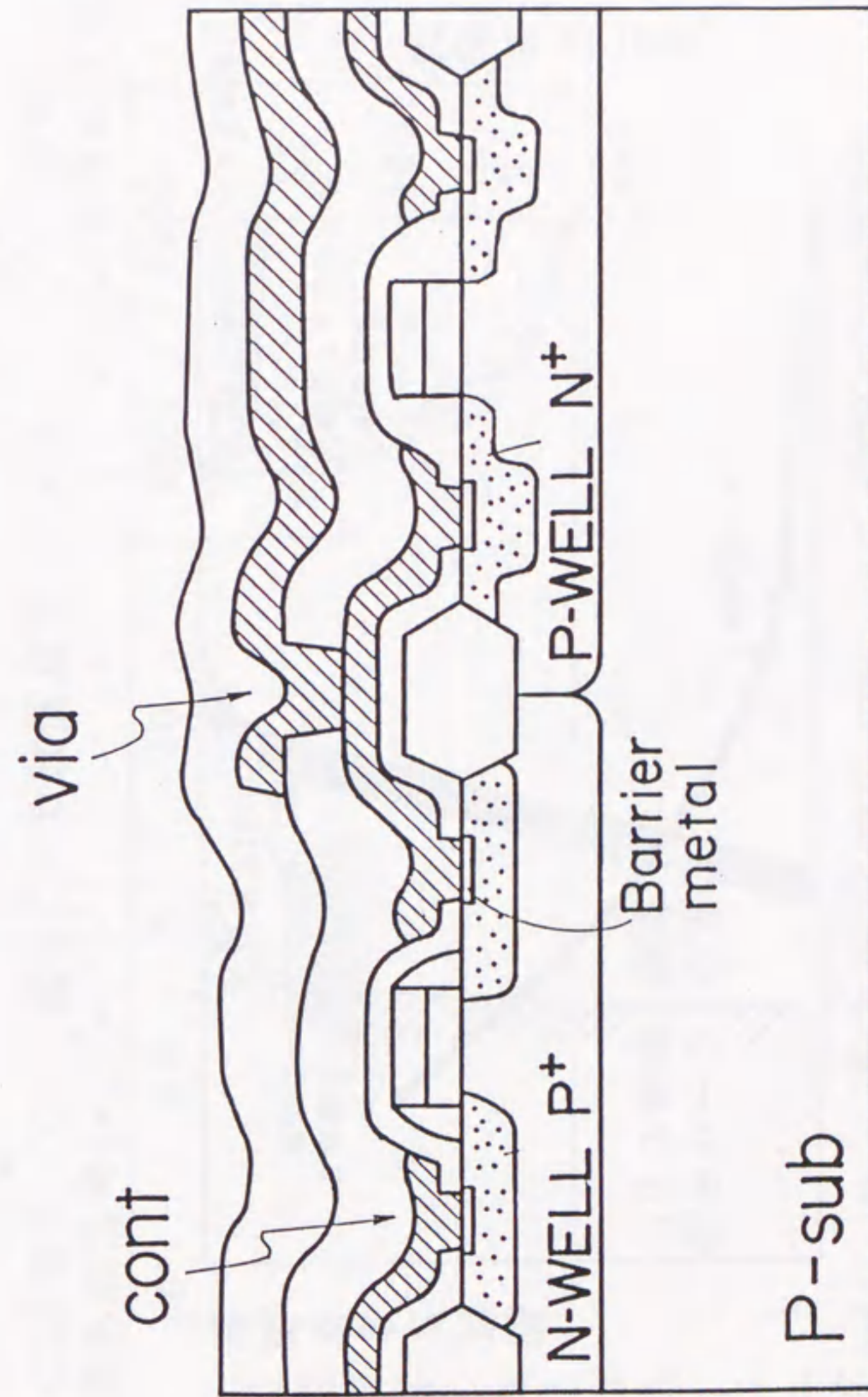


図5.1 穴観察の必要性

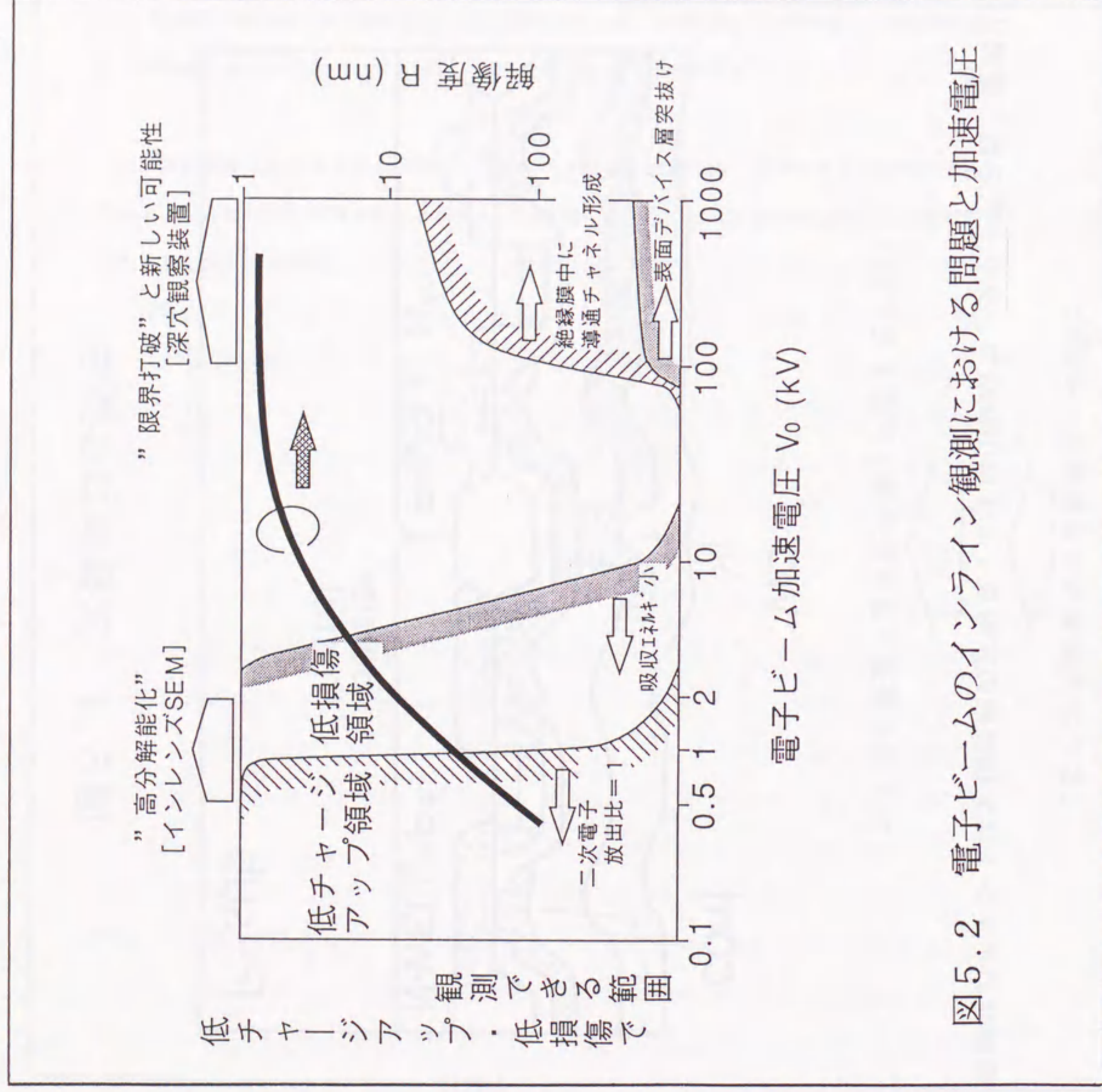


図5.2 電子ビームのインライン観測における問題と加速電圧

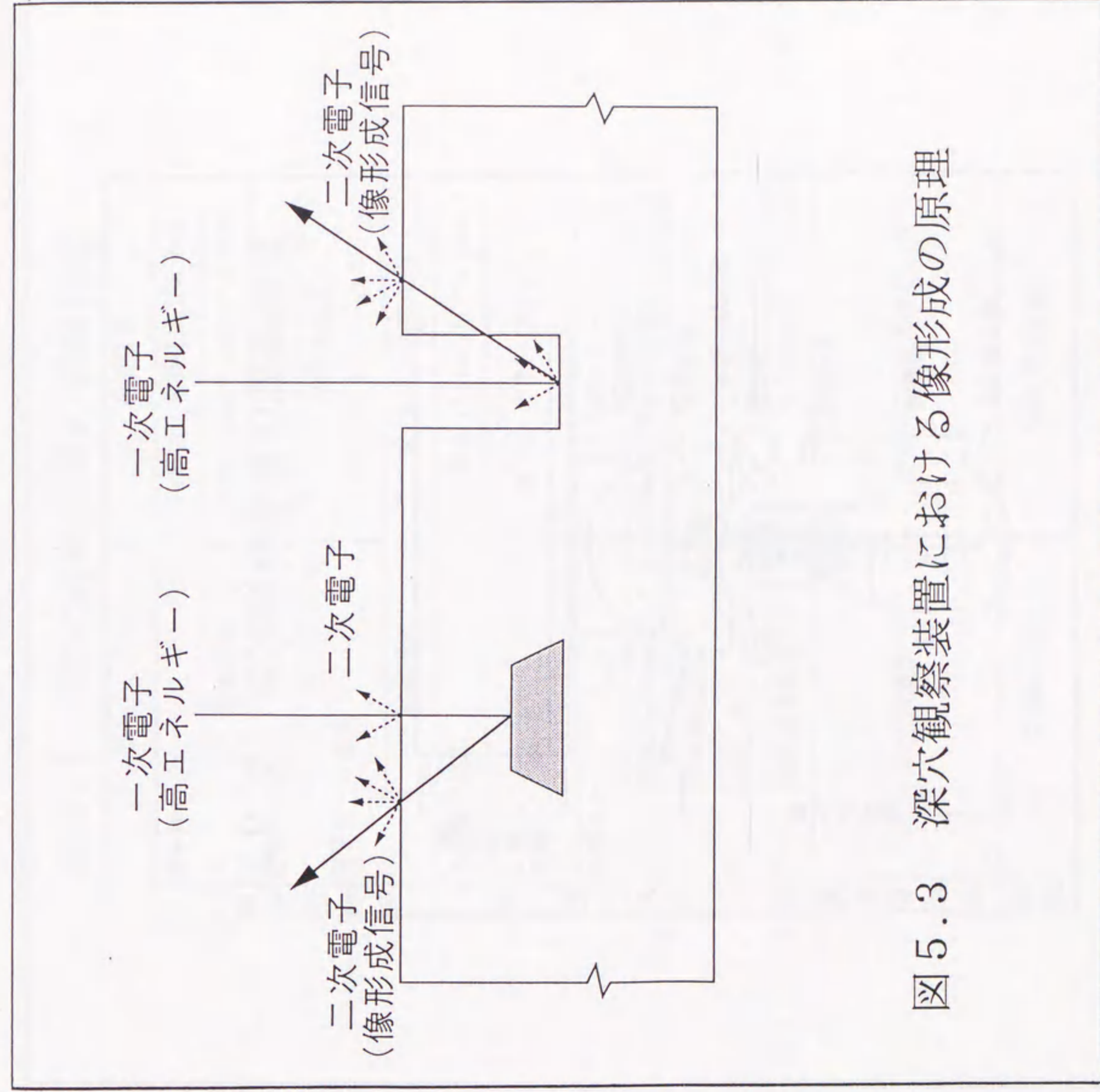


図5.3 深穴観察装置における像形成の原理

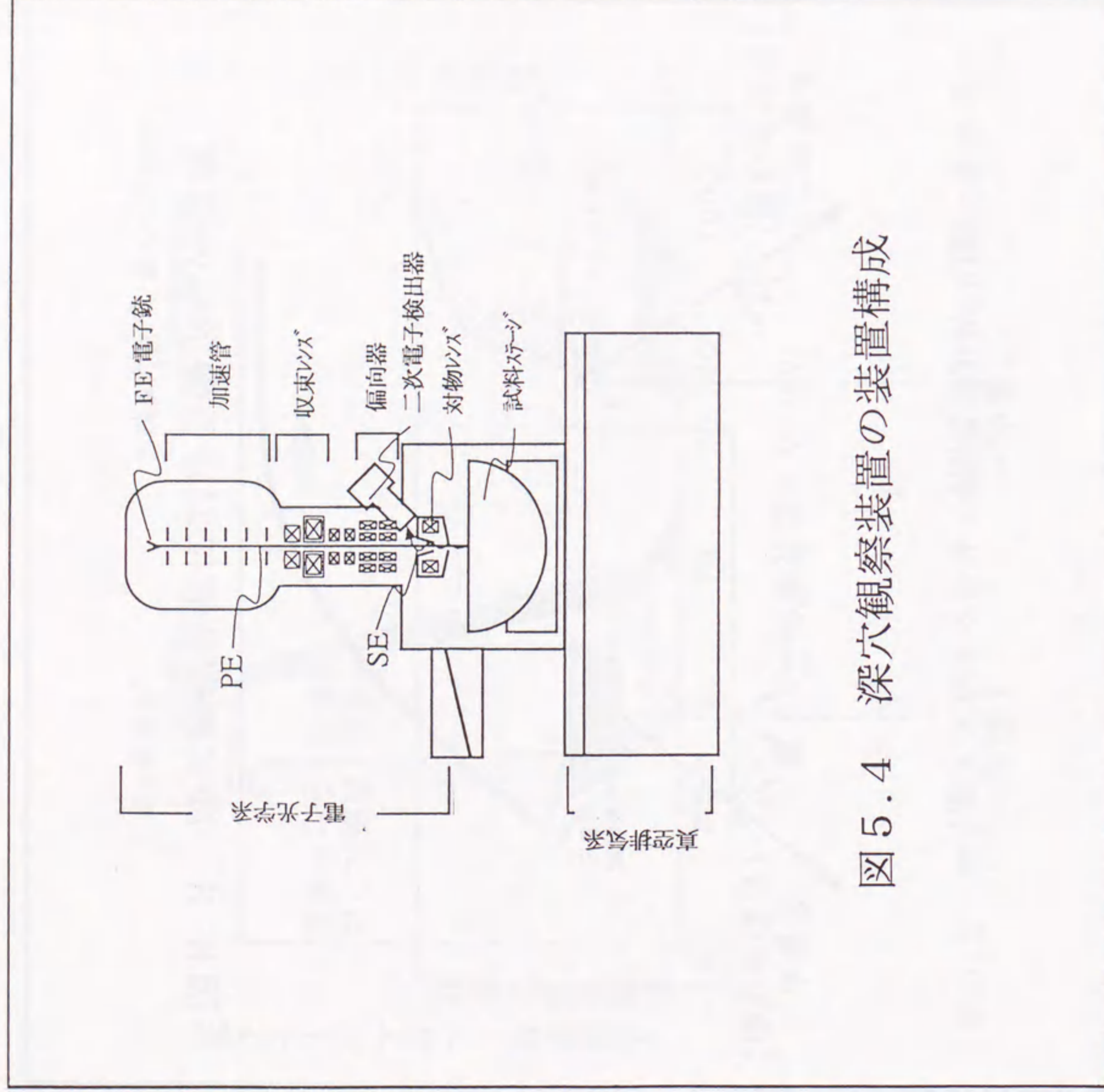


図5.4 深穴観察装置の装置構成

表5.1 深穴観察装置の装置仕様

項目	装置仕様
電子銃	冷陰極・電界放出型電子銃
加速電圧	50kV, 100kV, 150kV, 200kV
収束レンズ	三段収束
電子ビーム走査	二段電磁偏向 (TVスキャンレート可)
観察倍率	X200~X300,000
二次電子検出	TTL検出 (Through the Lens)
ローダ	最大8" ウエハ対応 C to C
試料ステージ	5軸ステージ
最大ストローク: X, Y	200mm (停止位置精度±15μm)
最大傾斜角: T	0~+15°
回転: R	0~360°
試料高さ位置: Z	8~18mm
真空排気系	オイルフリー真空ポンプ
性能	分解能 5nm (200kV)

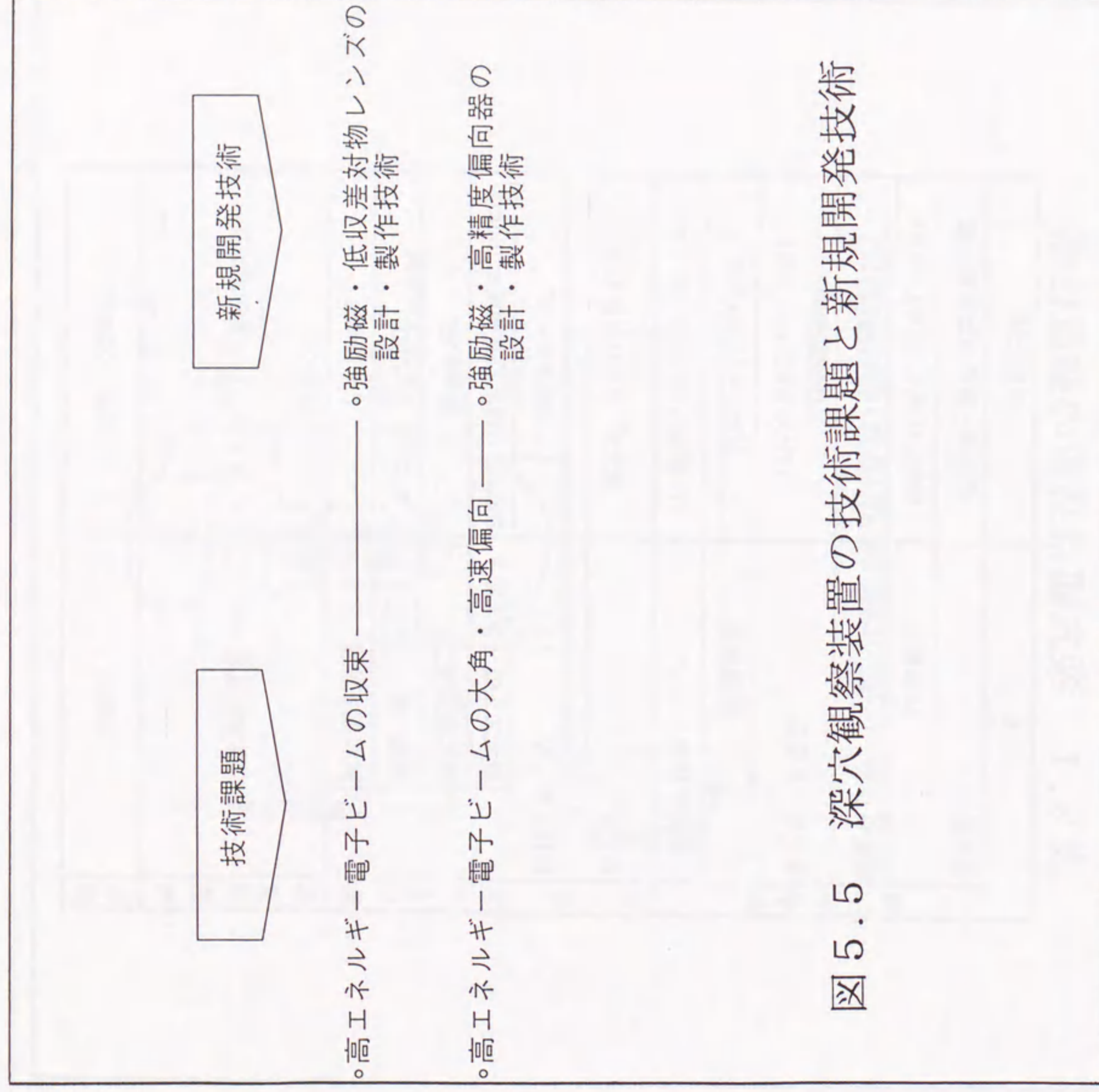


図5.5 深穴観察装置の技術課題と新規開発技術

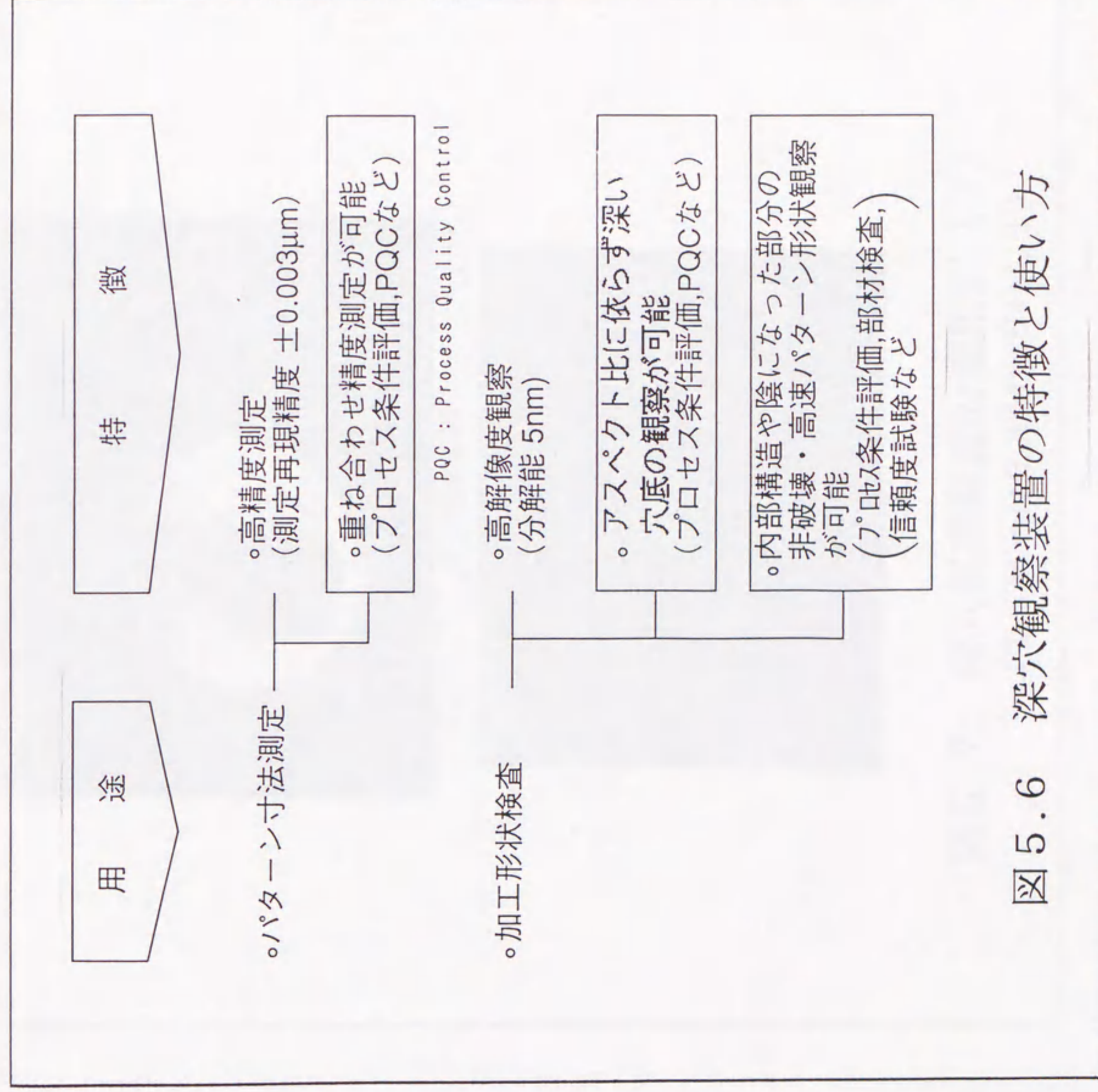
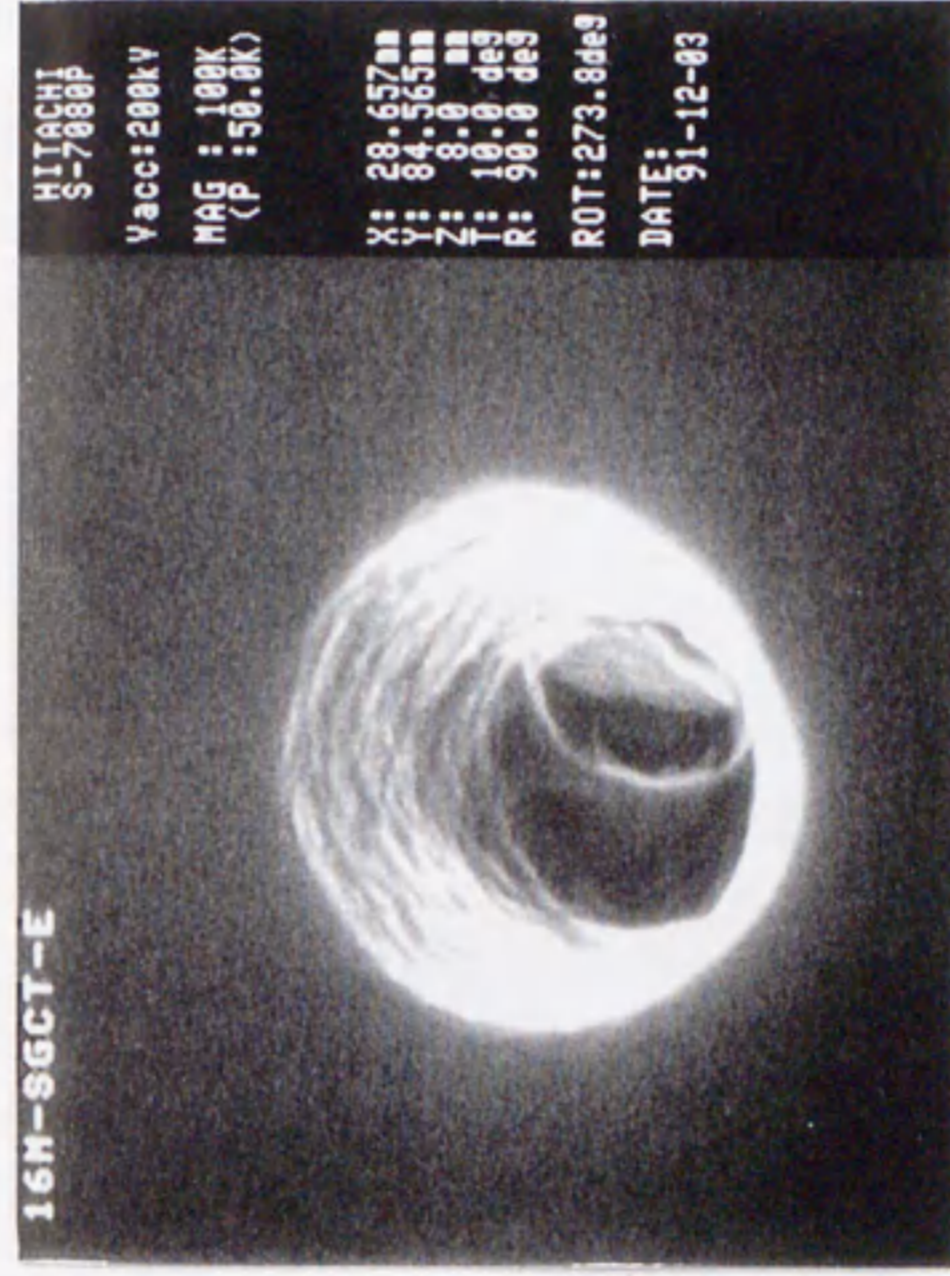
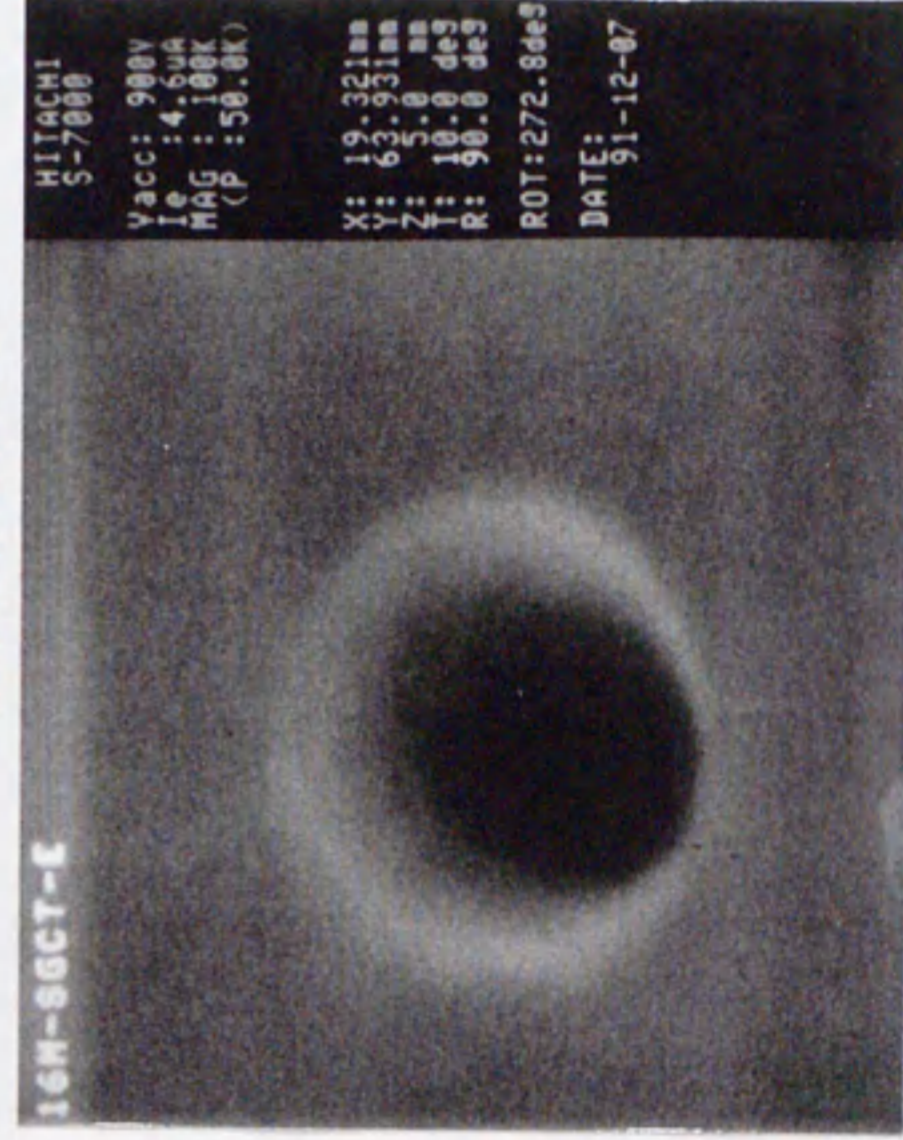


図5.6 深穴観察装置の特徴と使い方



深穴観察装置



S7000

図5.7 深穴観察装置の適用例(1)
(16M-DRAM SGCT)

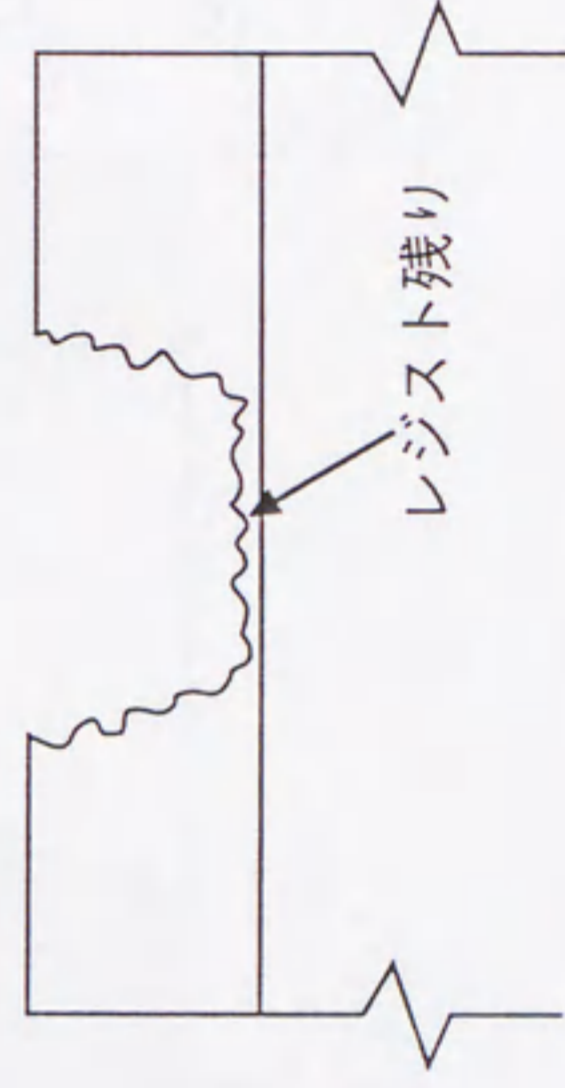
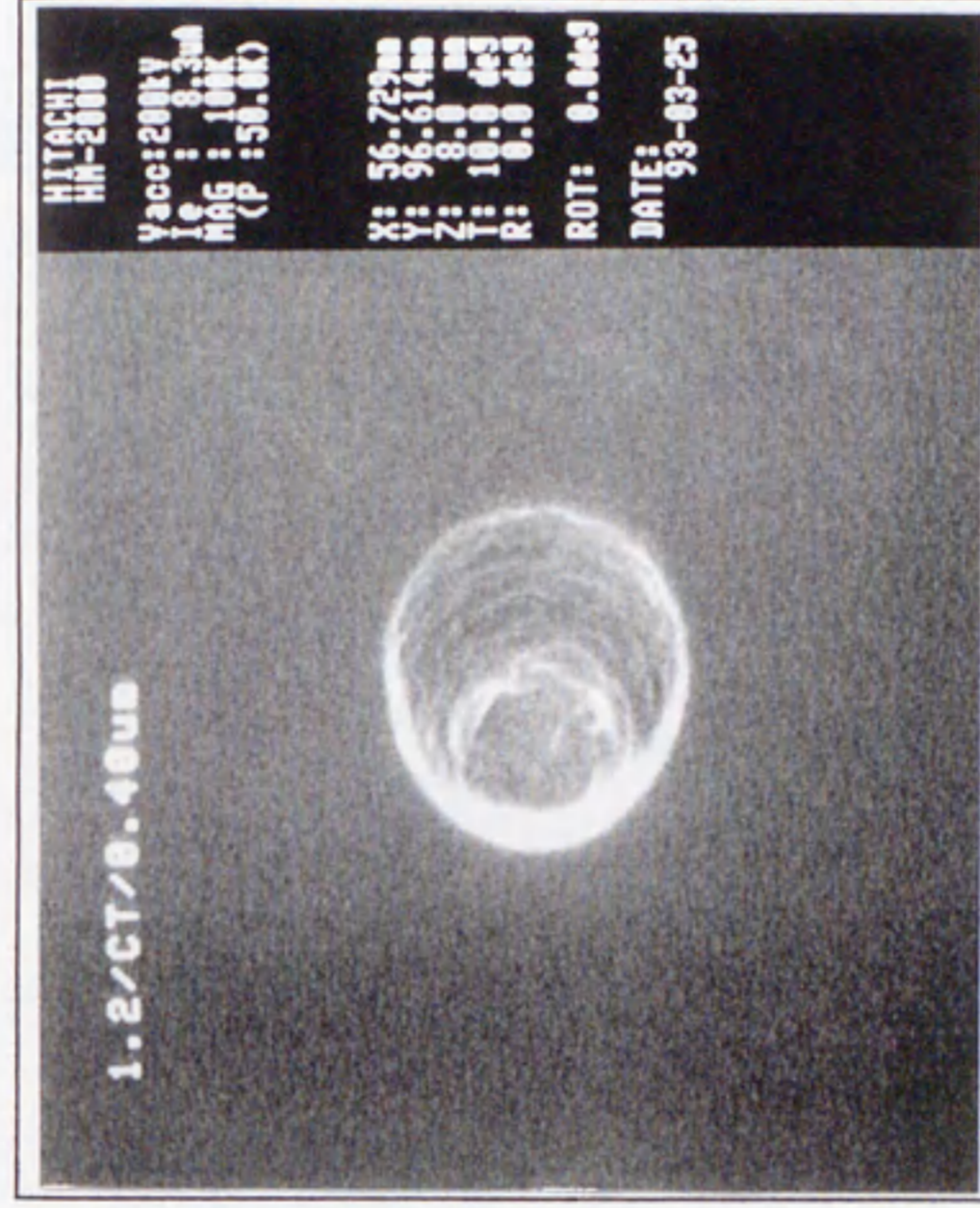


図5.8 深穴観察装置の適用例(2)
(レジスト残りの評価)

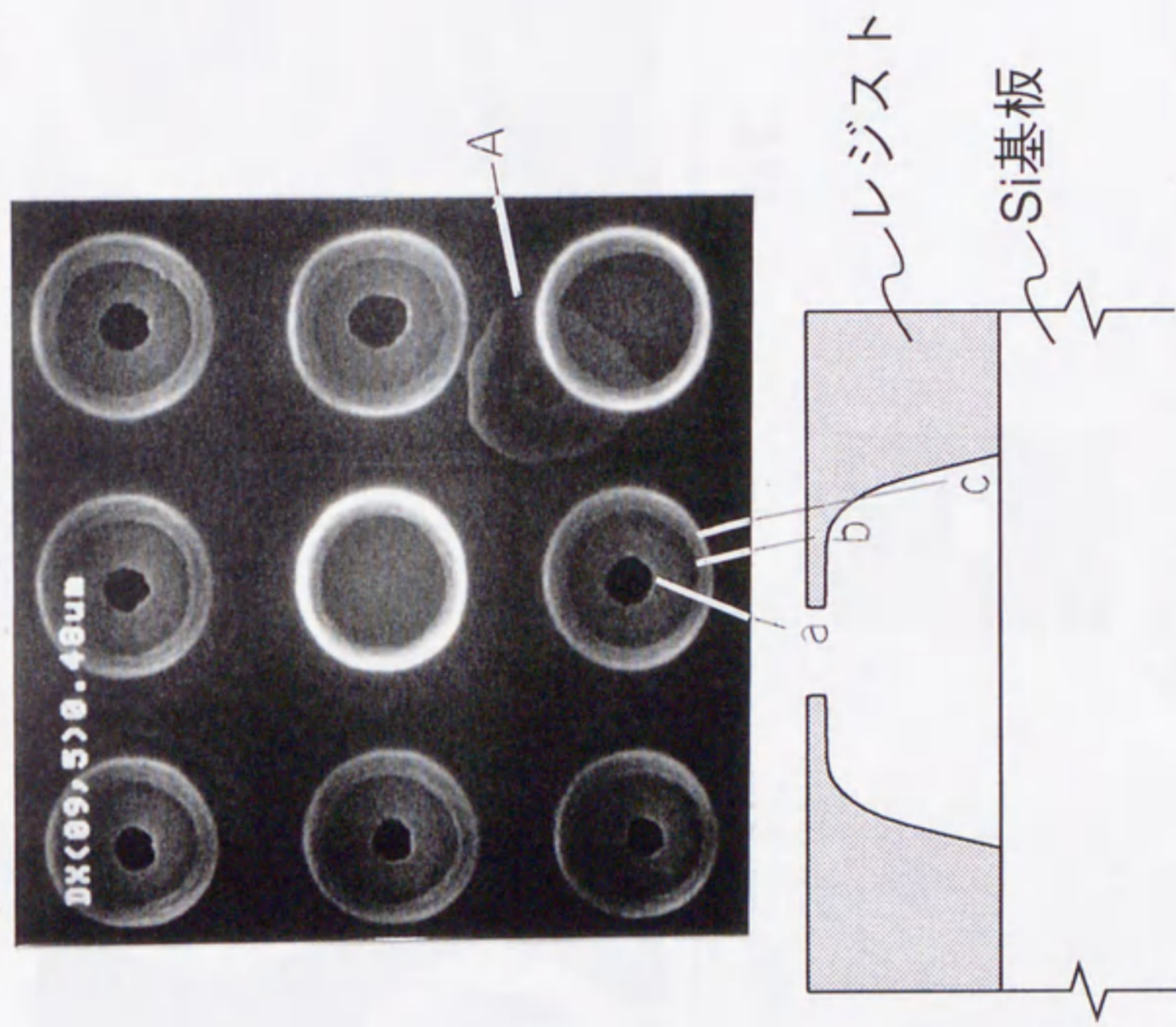
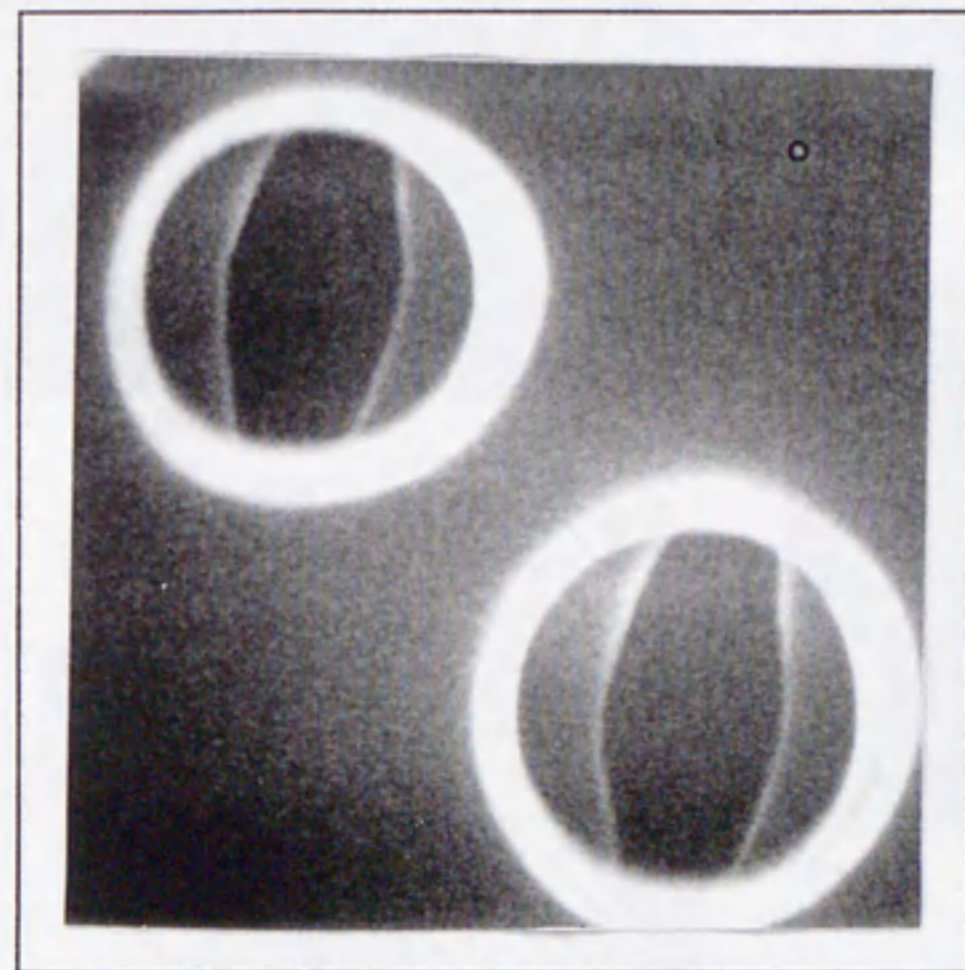


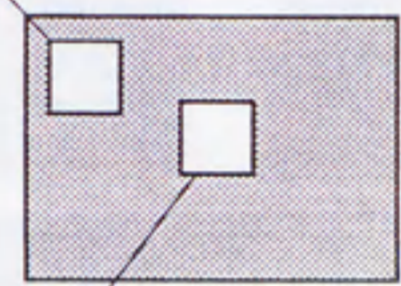
図5.9 深穴観察装置の適用例(3)
(レジスト形状の評価)



端部

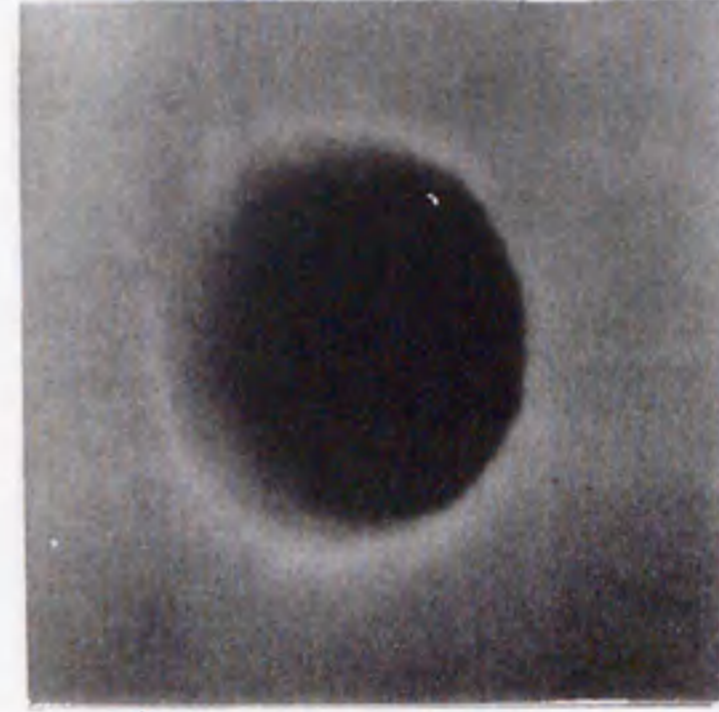
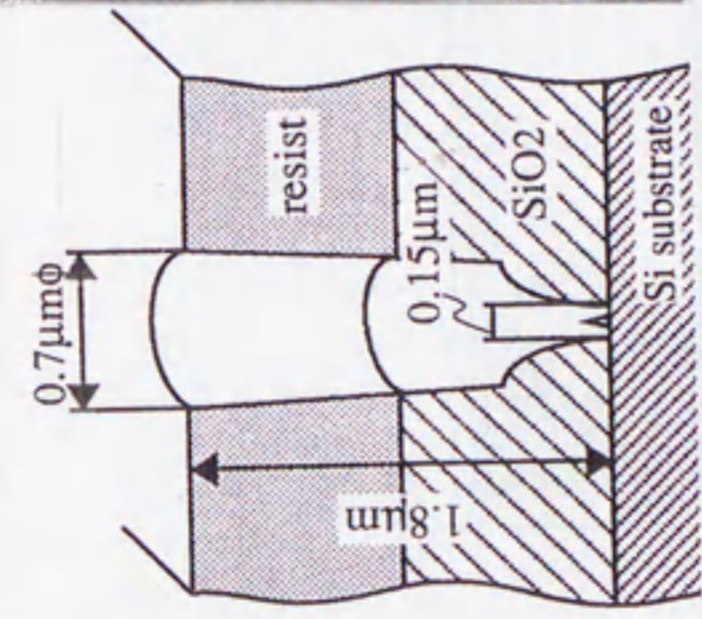


中心部



メモリマット

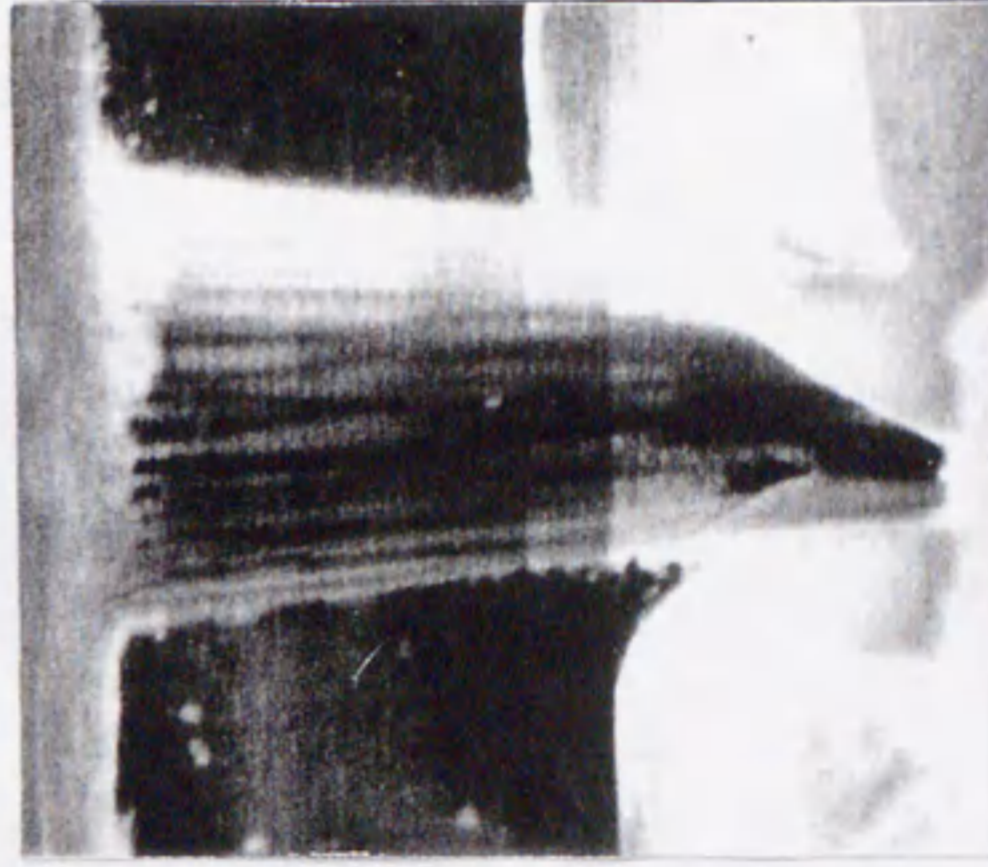
図5.110 深穴観察装置の適用例(4)
(レジスト形状不良の検出)



S7000



深穴観察装置

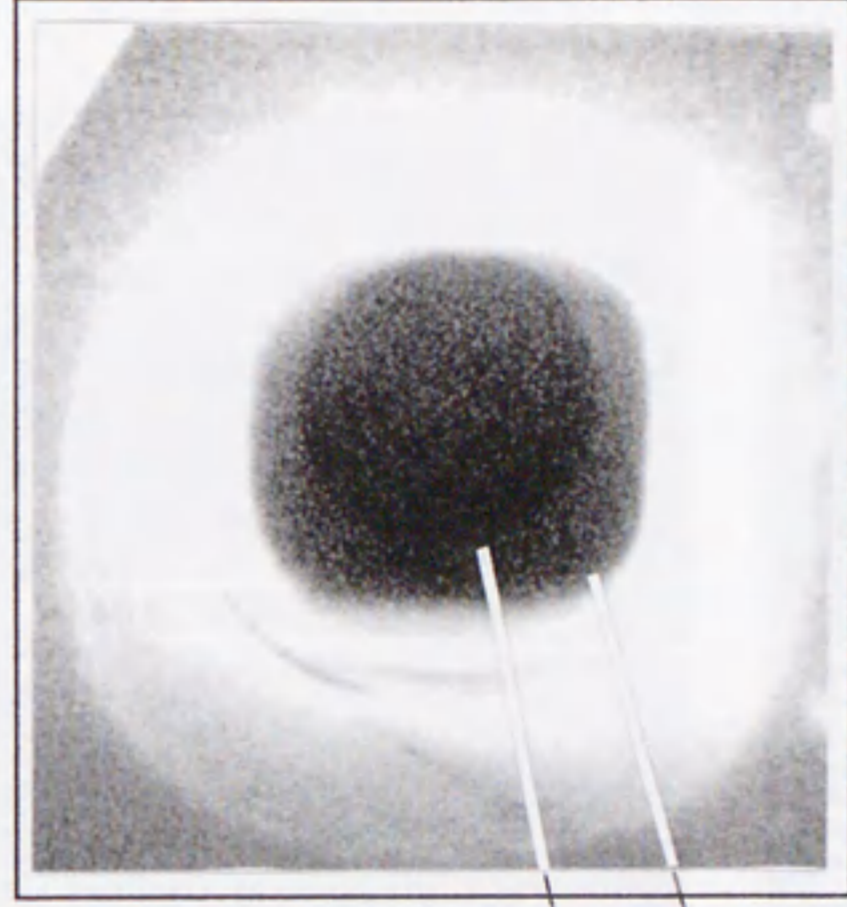


S900 (断面)

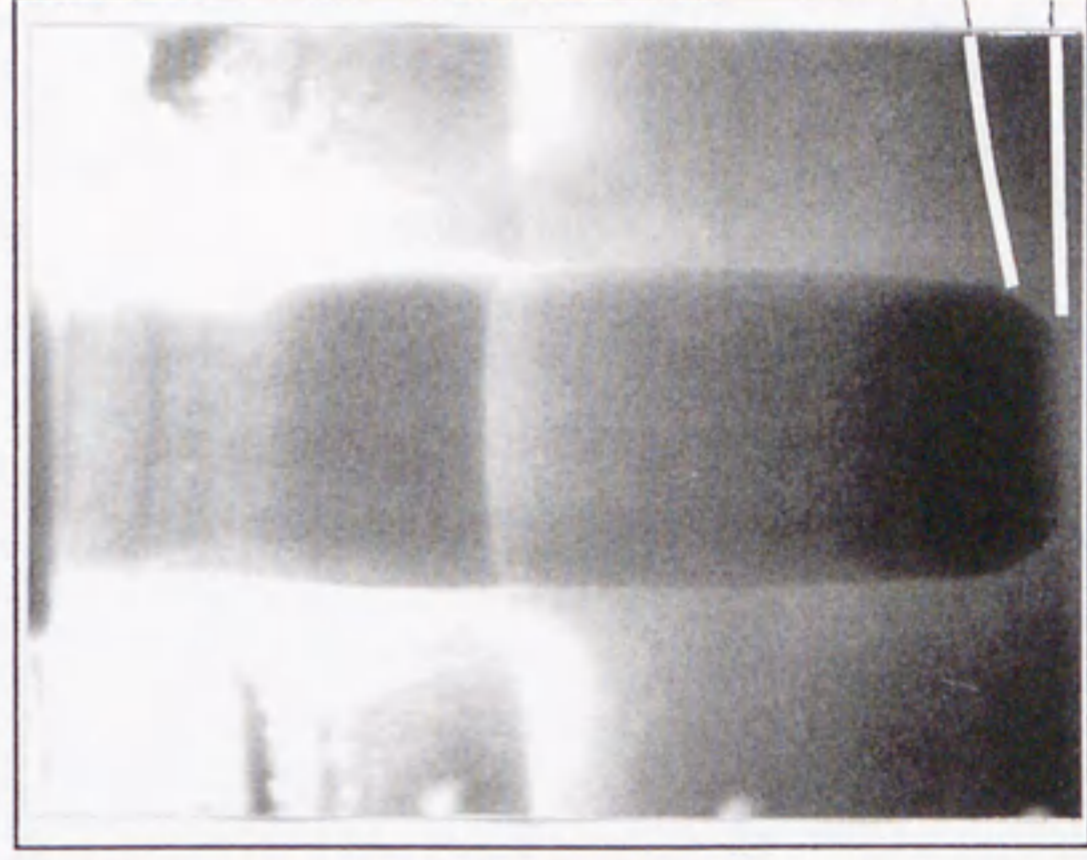


S900 (断面拡大)

図5.1.1.1 深穴観察装置の適用例 (5)
(エッチング残りの評価)



深穴観察装置



S900 (断面)

図5.1.12 深穴観察装置の適用例(6)
(エッチング形状の評価)

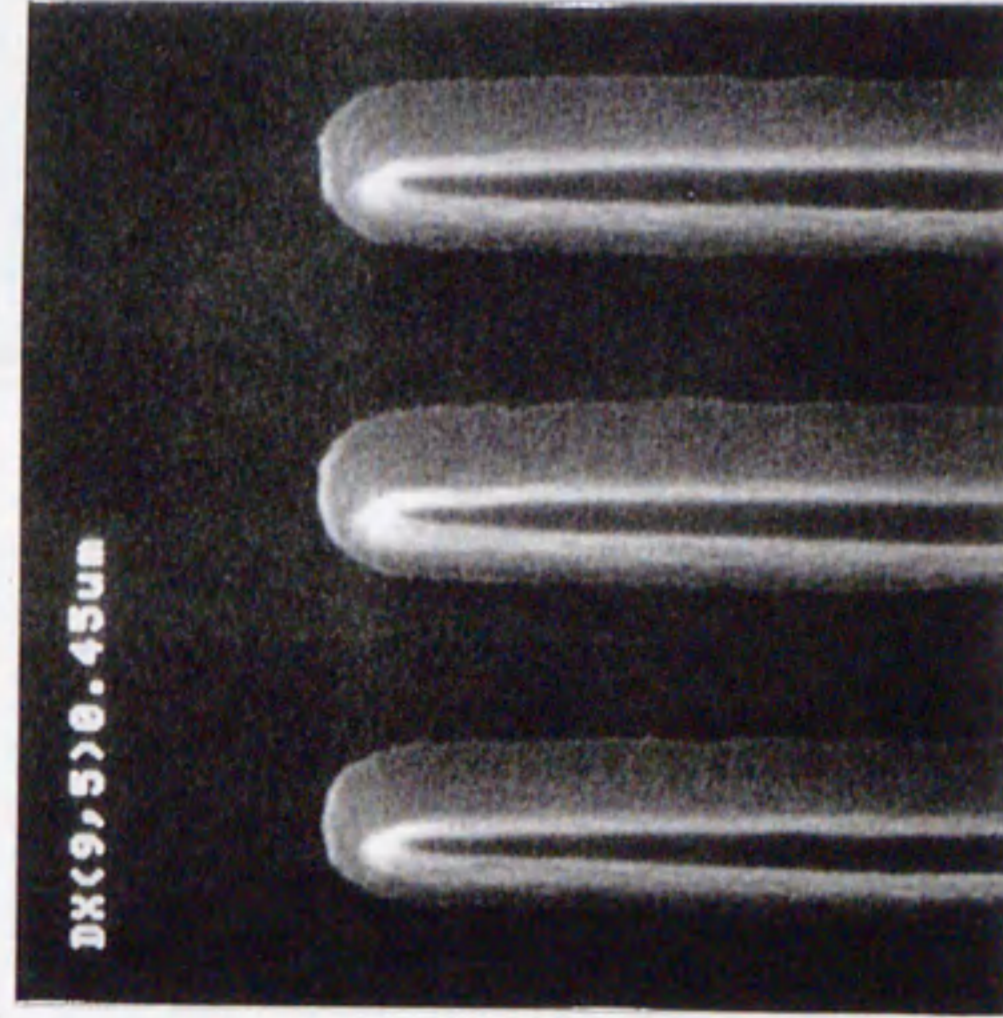
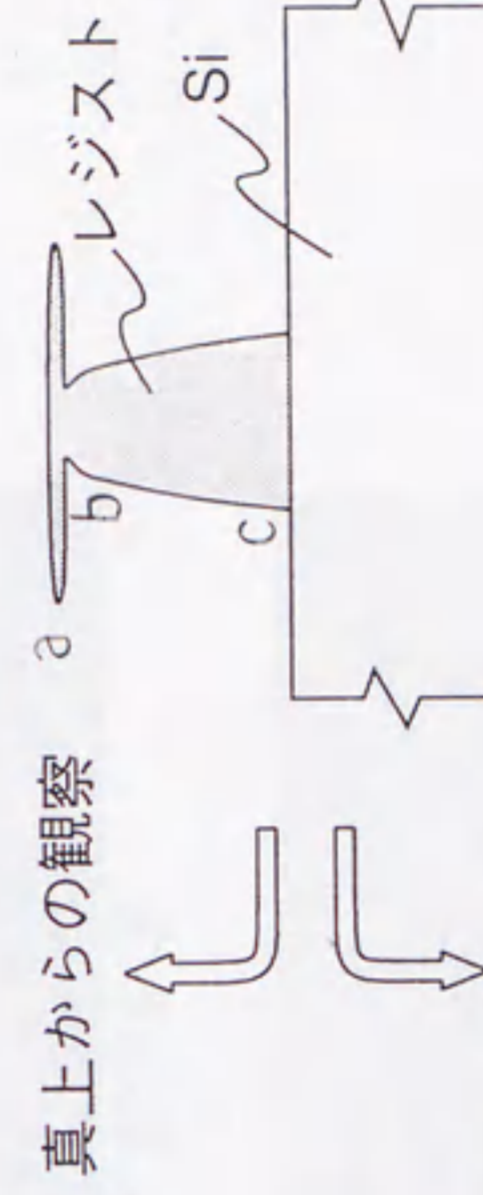
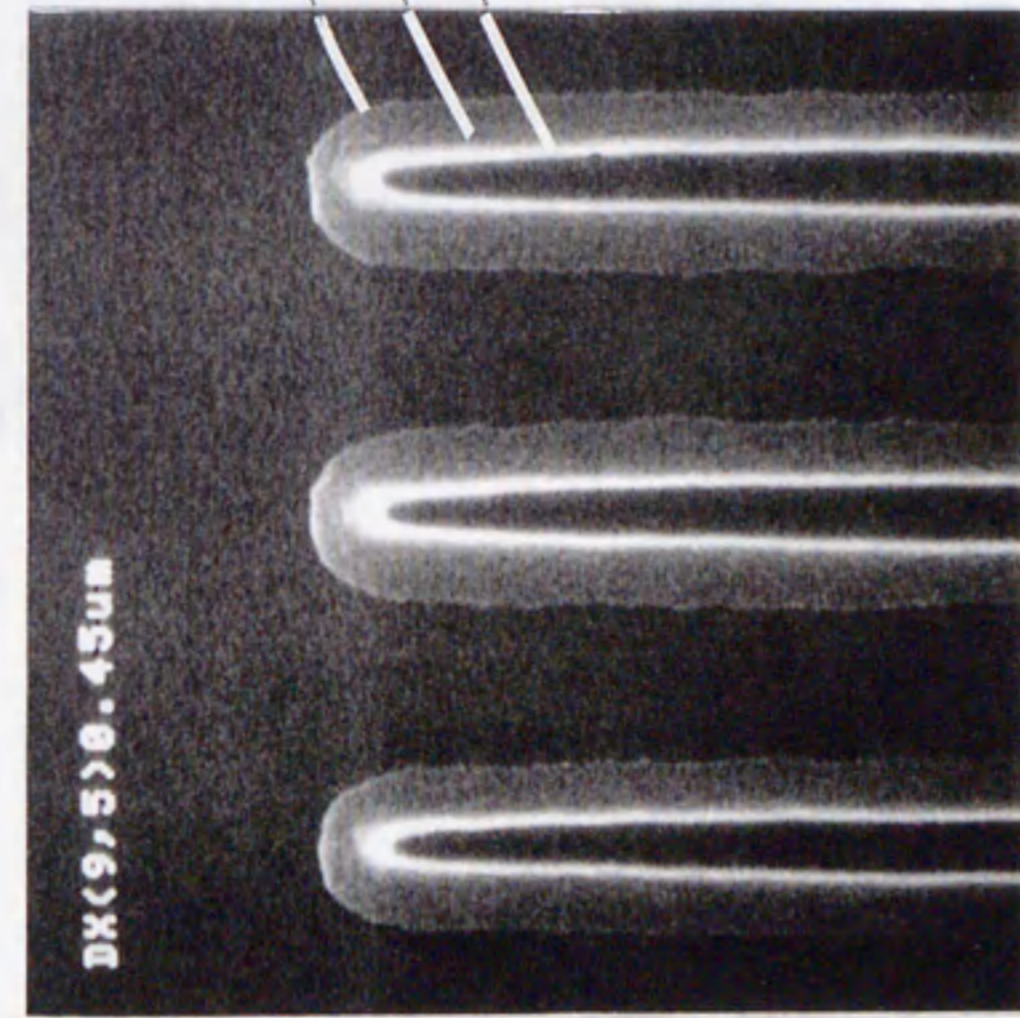
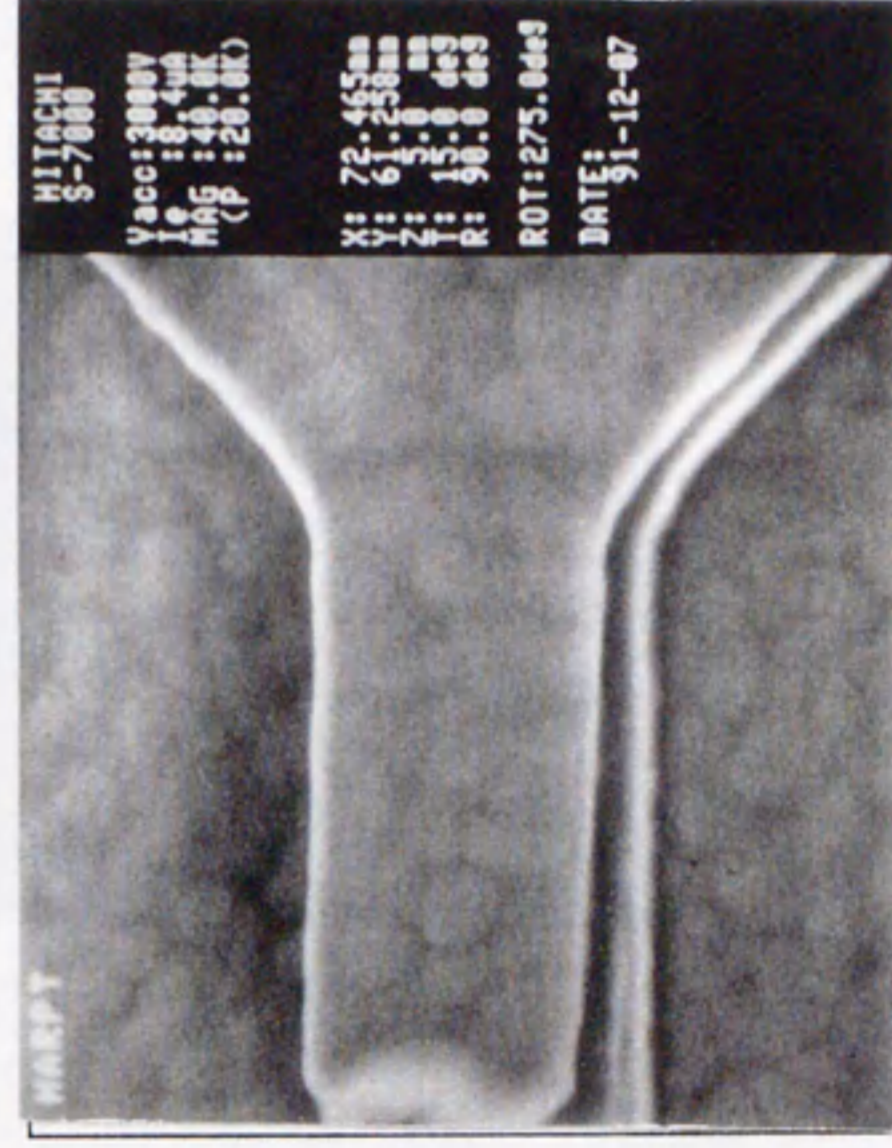


図5.13
深穴観察装置の適用例(7)
(レジスト形状の評価)



深穴観察装置



S7000

図5.1.1 4 深穴観察装置の適用例 (8)
(EMD試験後の配線状態の評価)



深穴観察装置



S7000

図5.1.15 深穴観察装置の適用例(9)
(レジストパターン合せずれ評価)

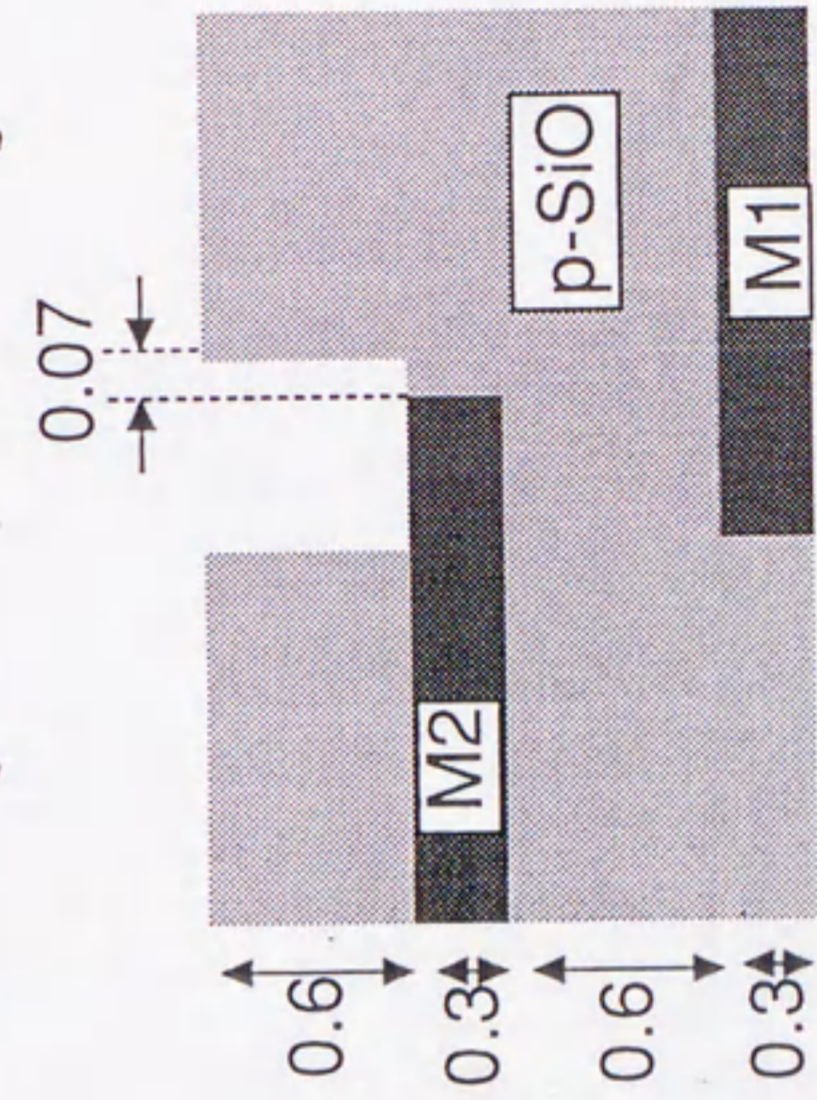
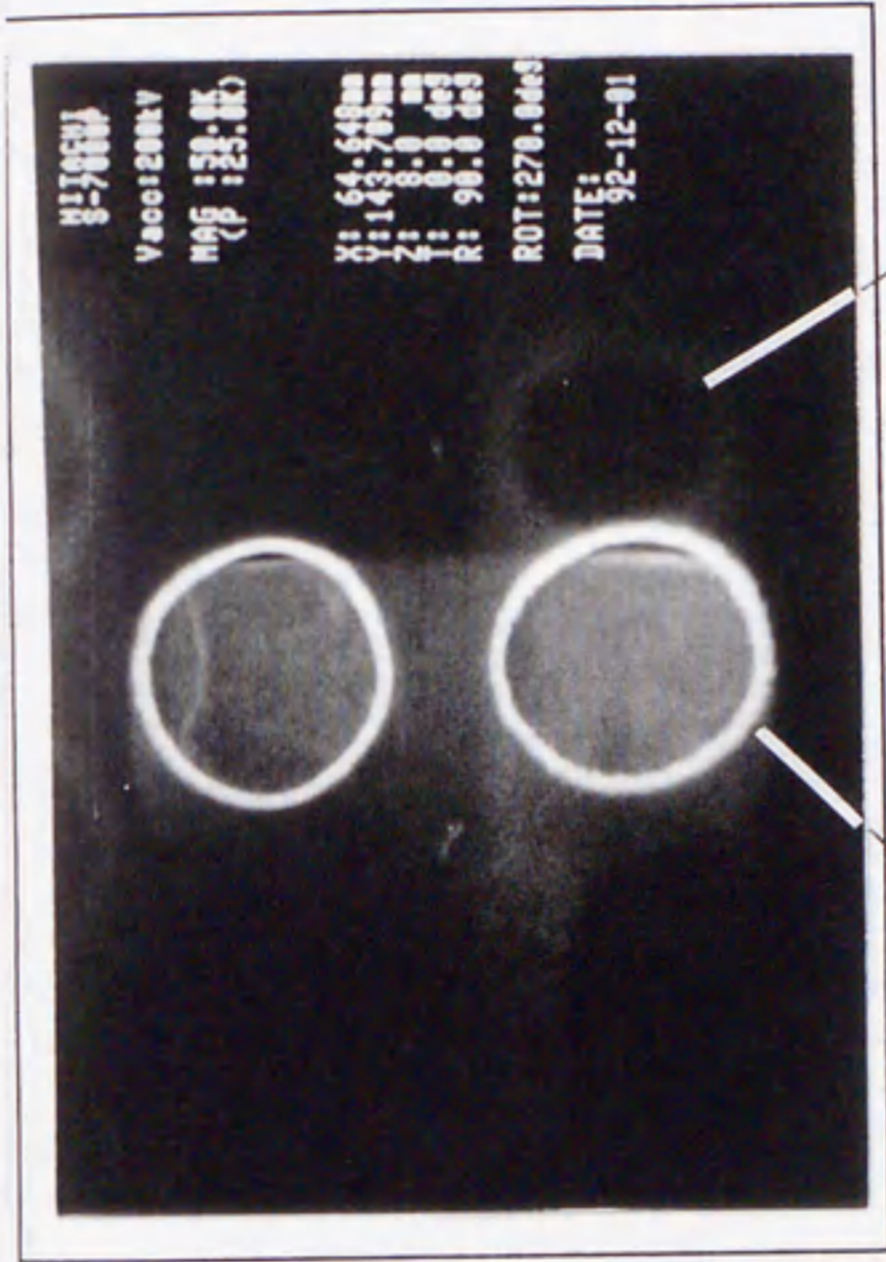
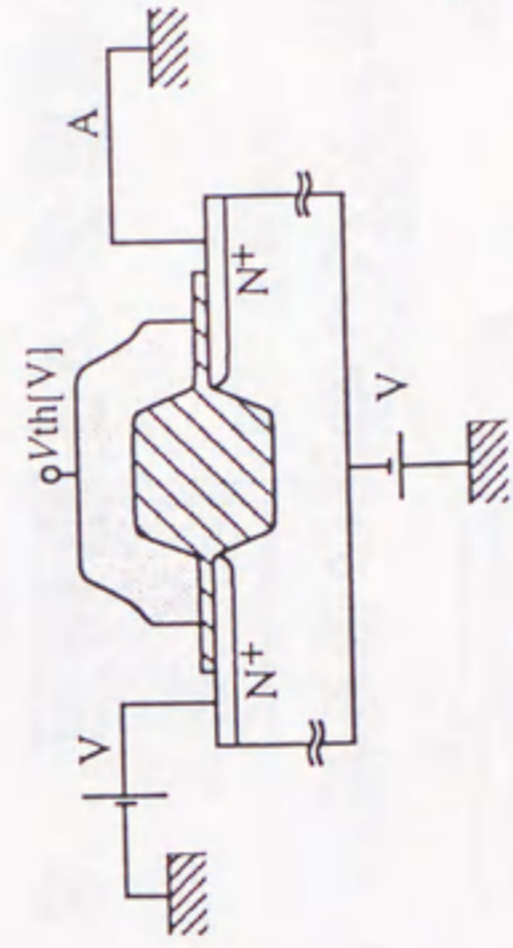
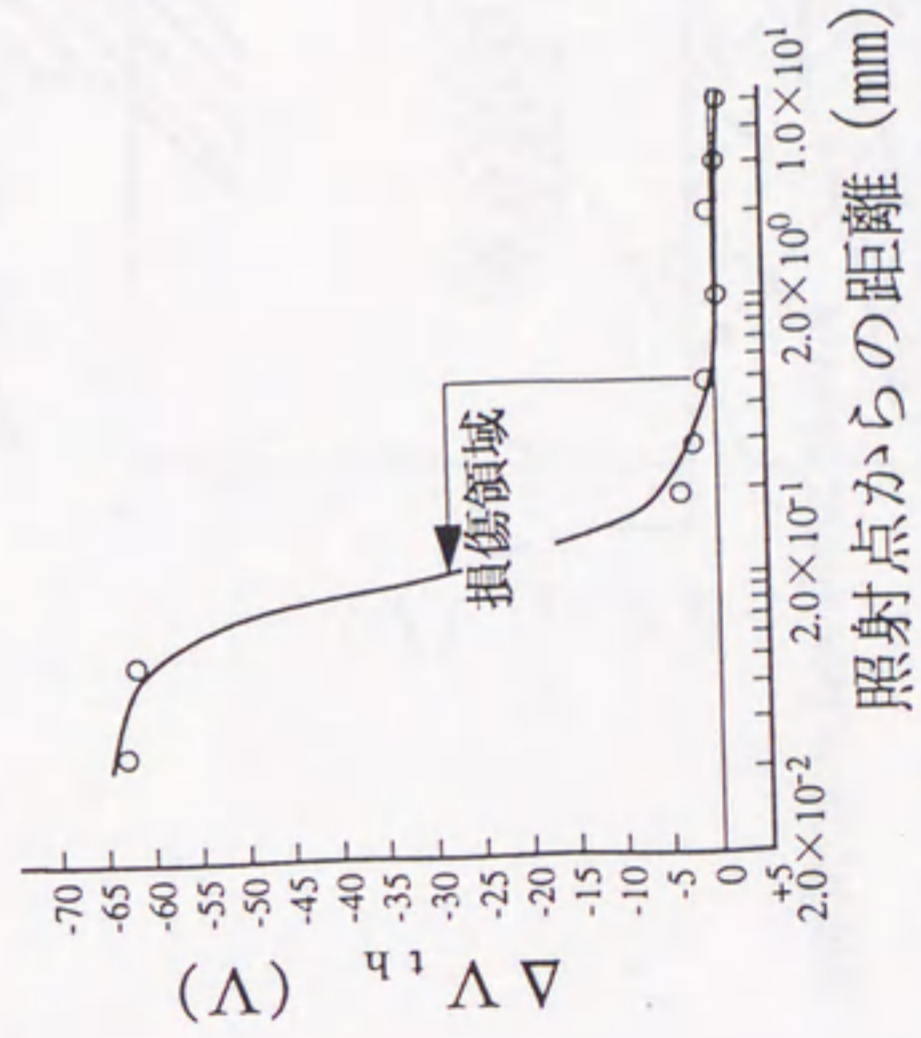


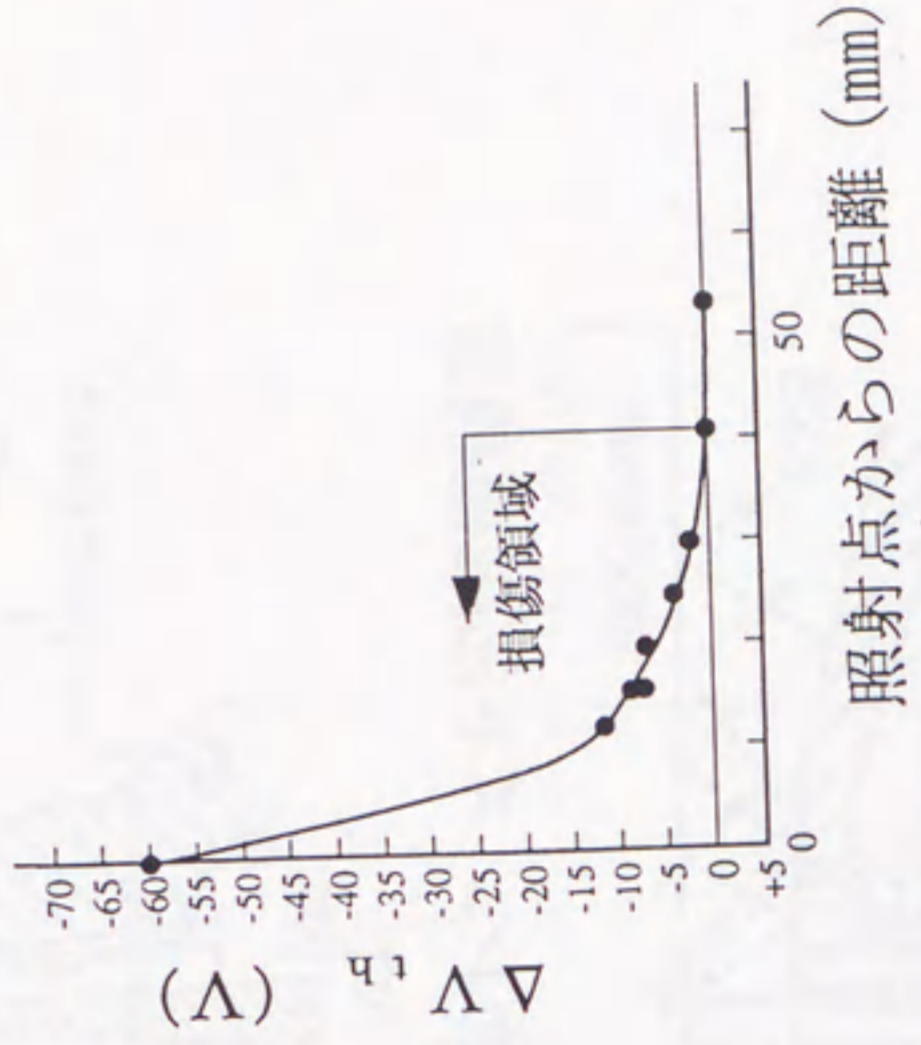
図5.1.16 深穴観察装置の適用例(10)
(合せずれの検出)



(a) 寄生MOSトランジスタの構造



(b) 照射量 $1 \mu C$



(c) 照射量 $360 \mu C$

図5.17 照射損傷による V_{th} シフトの測定例

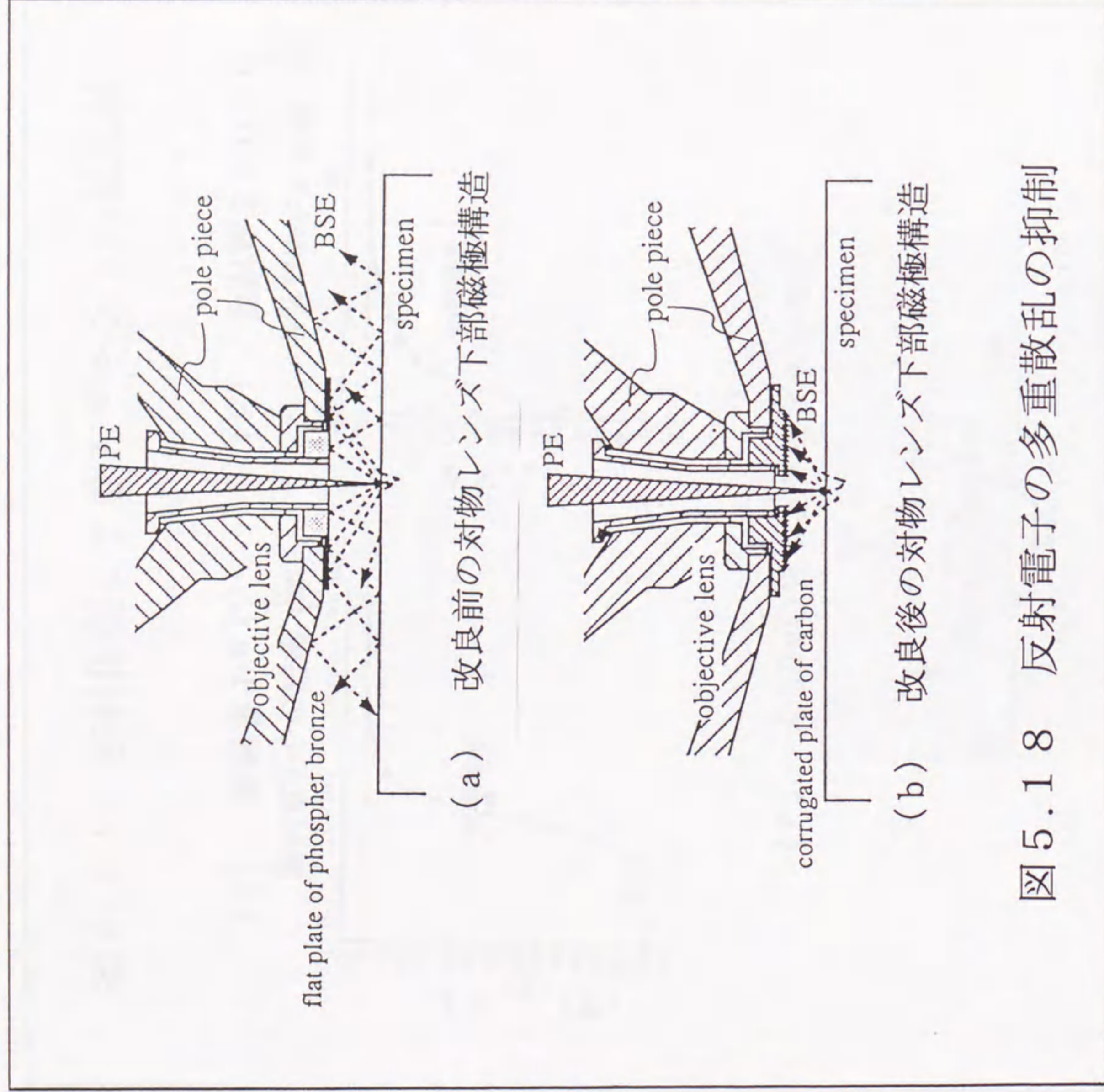


図5.1.18 反射電子の多重散乱の抑制

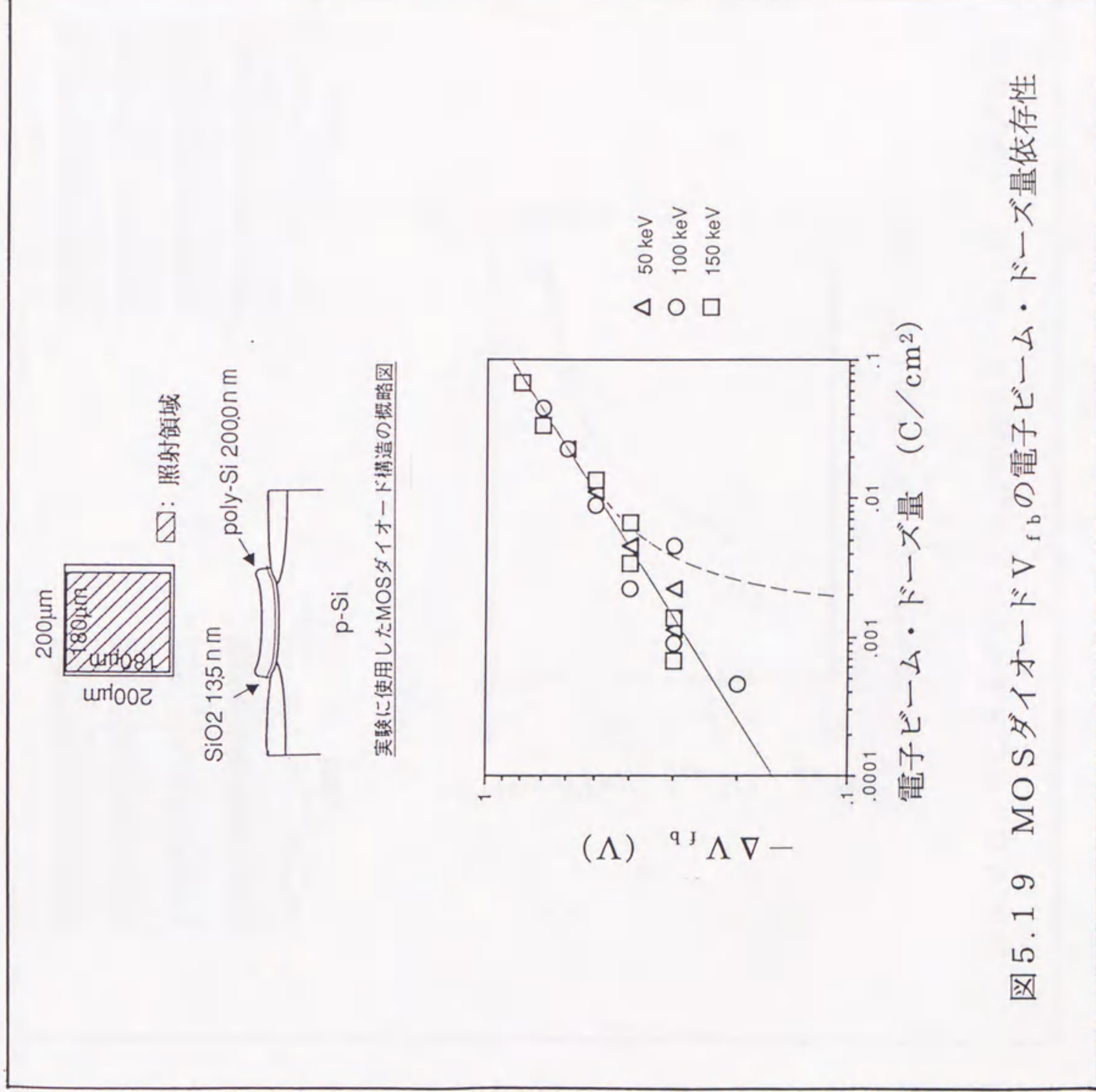


図5.1.19 MOSダイオード V_{fb} の電子ビーム・ドーズ量依存性

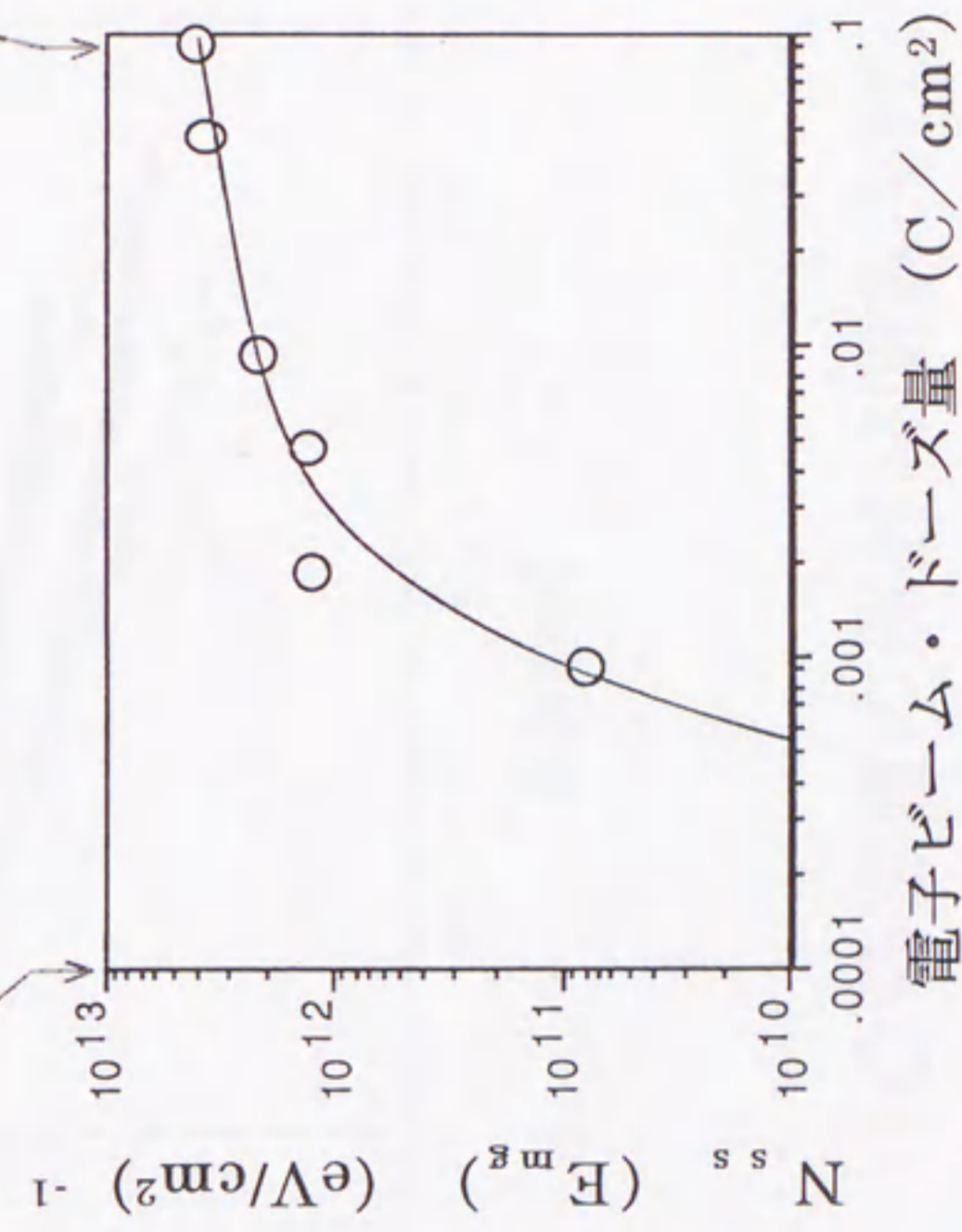
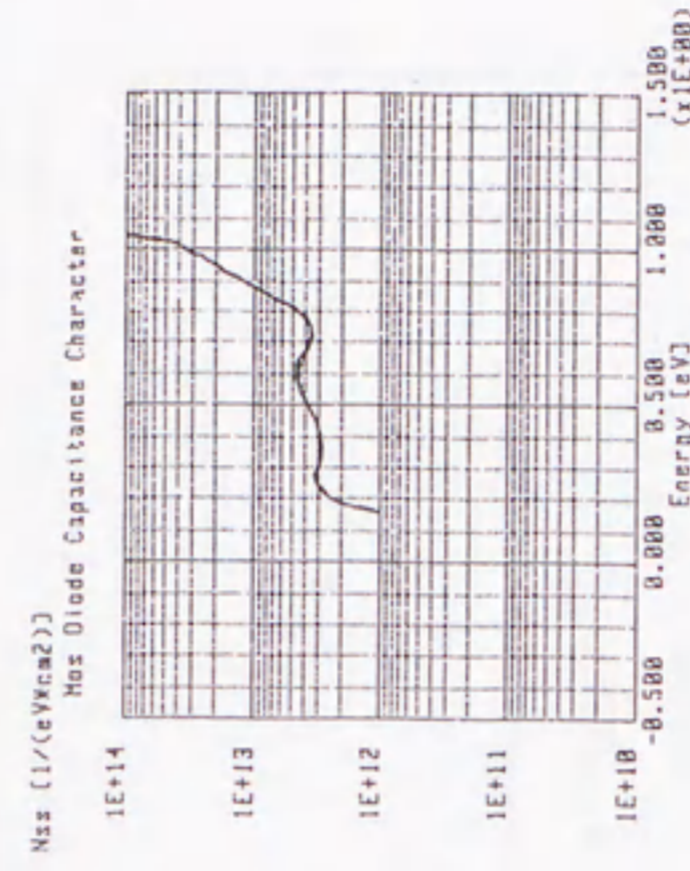
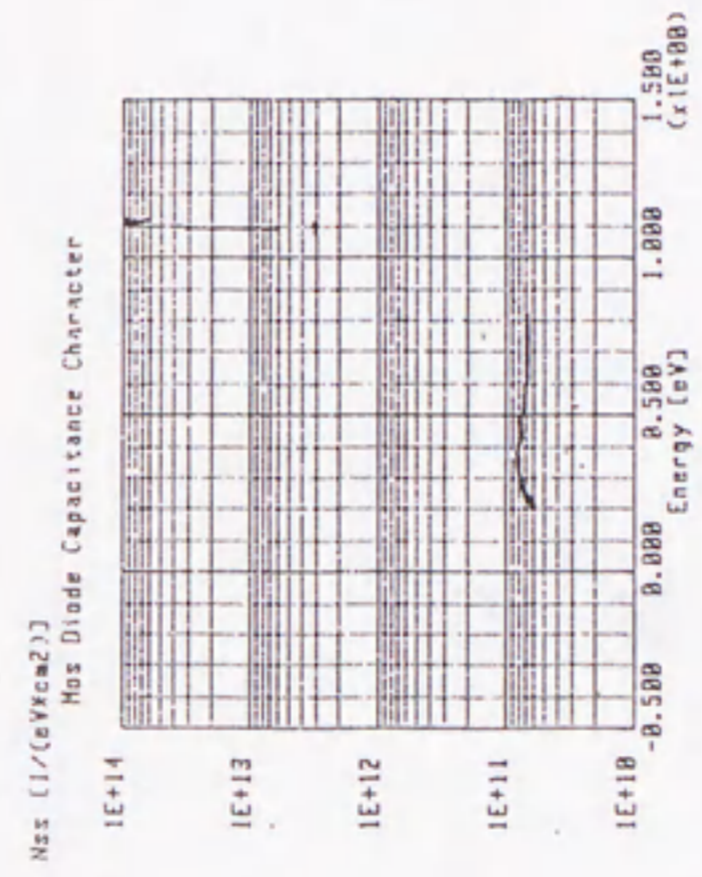


図5.20 MOSダイオード N_{ss} の電子ビーム・ドーズ量依存性

ホール径の測定値シフト量 (%)

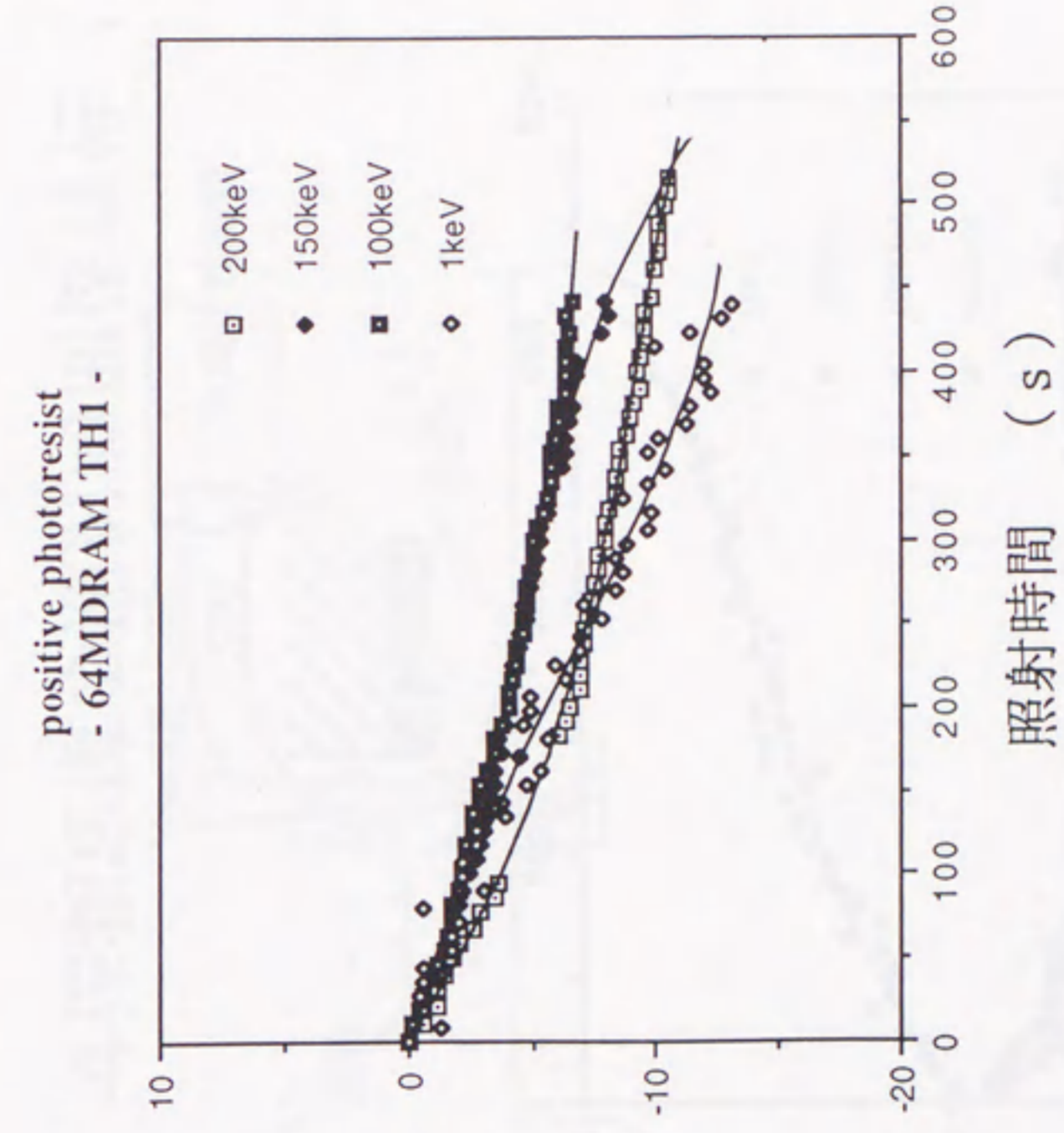


図5.21 寸法測定値の照射時間依存性 (1)

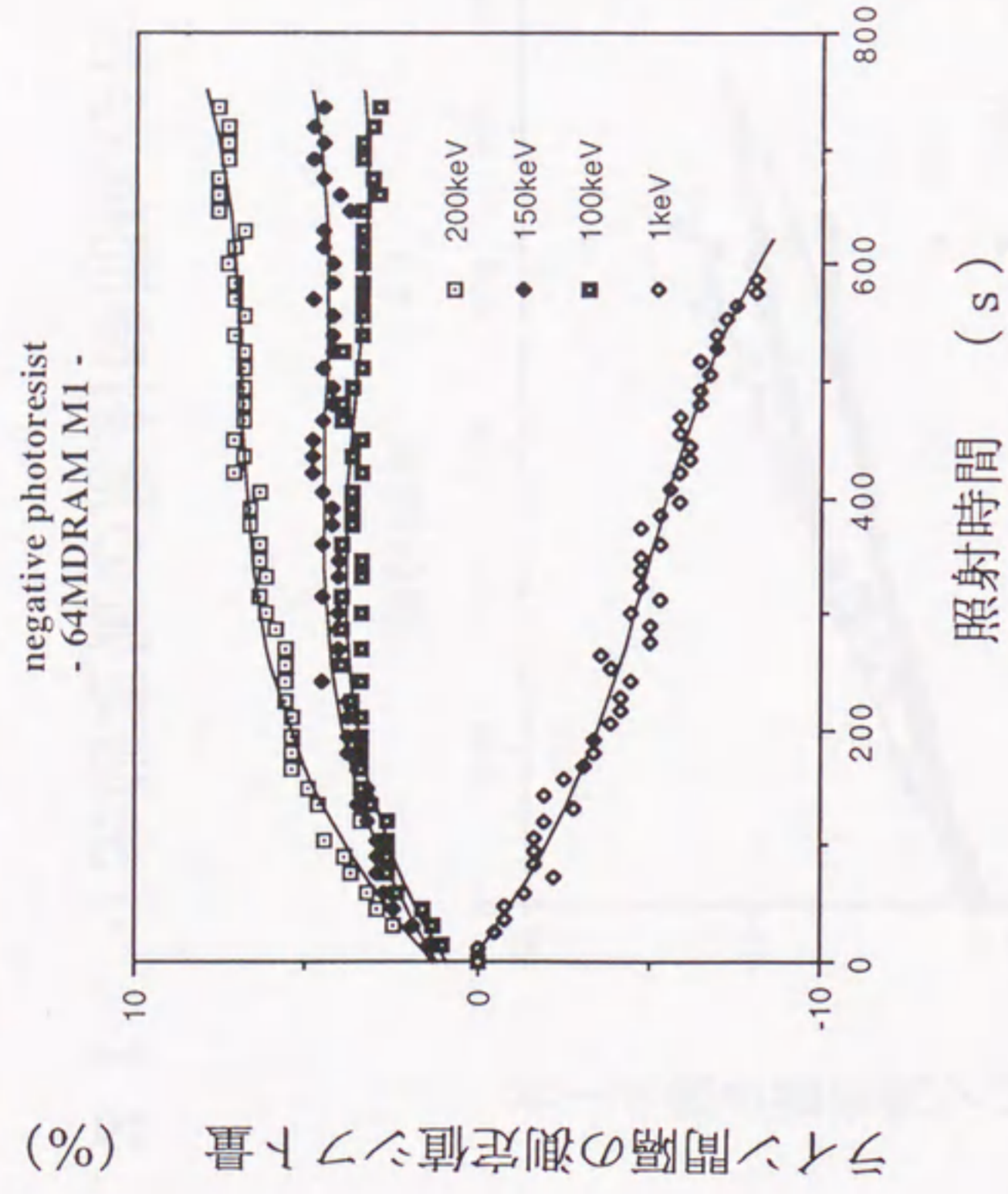


図5.2.2 寸法測定値の照射時間依存性 (2)

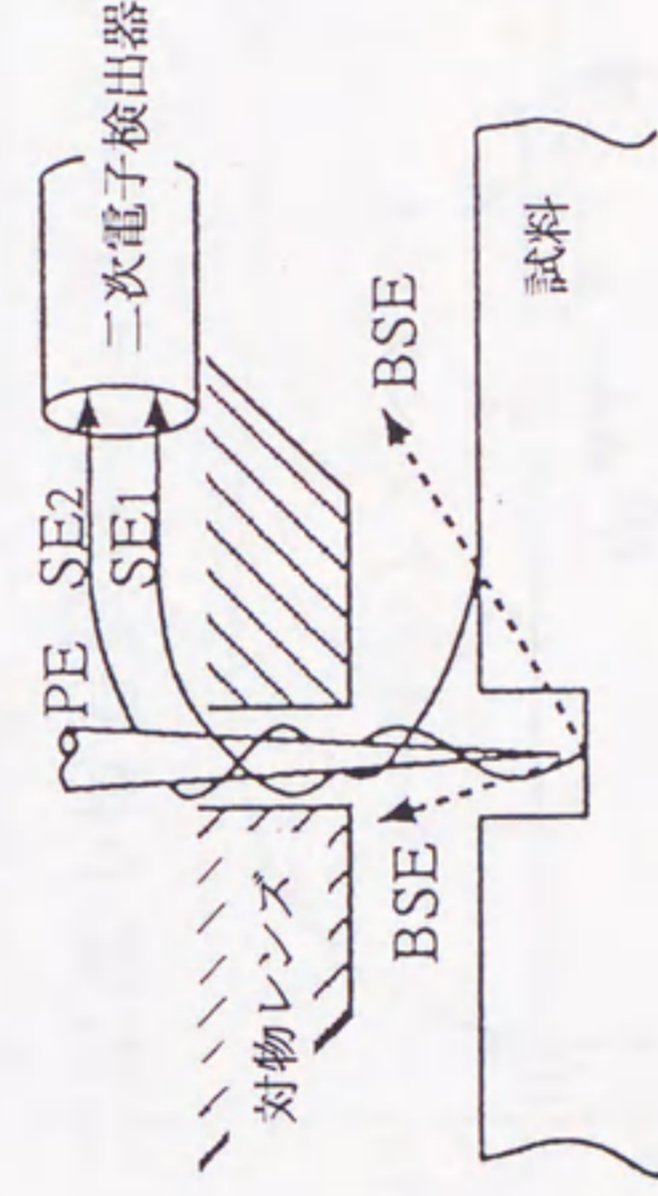


図5.2.3 高エネルギー電子ビームによって生成される
反射電子と二次電子

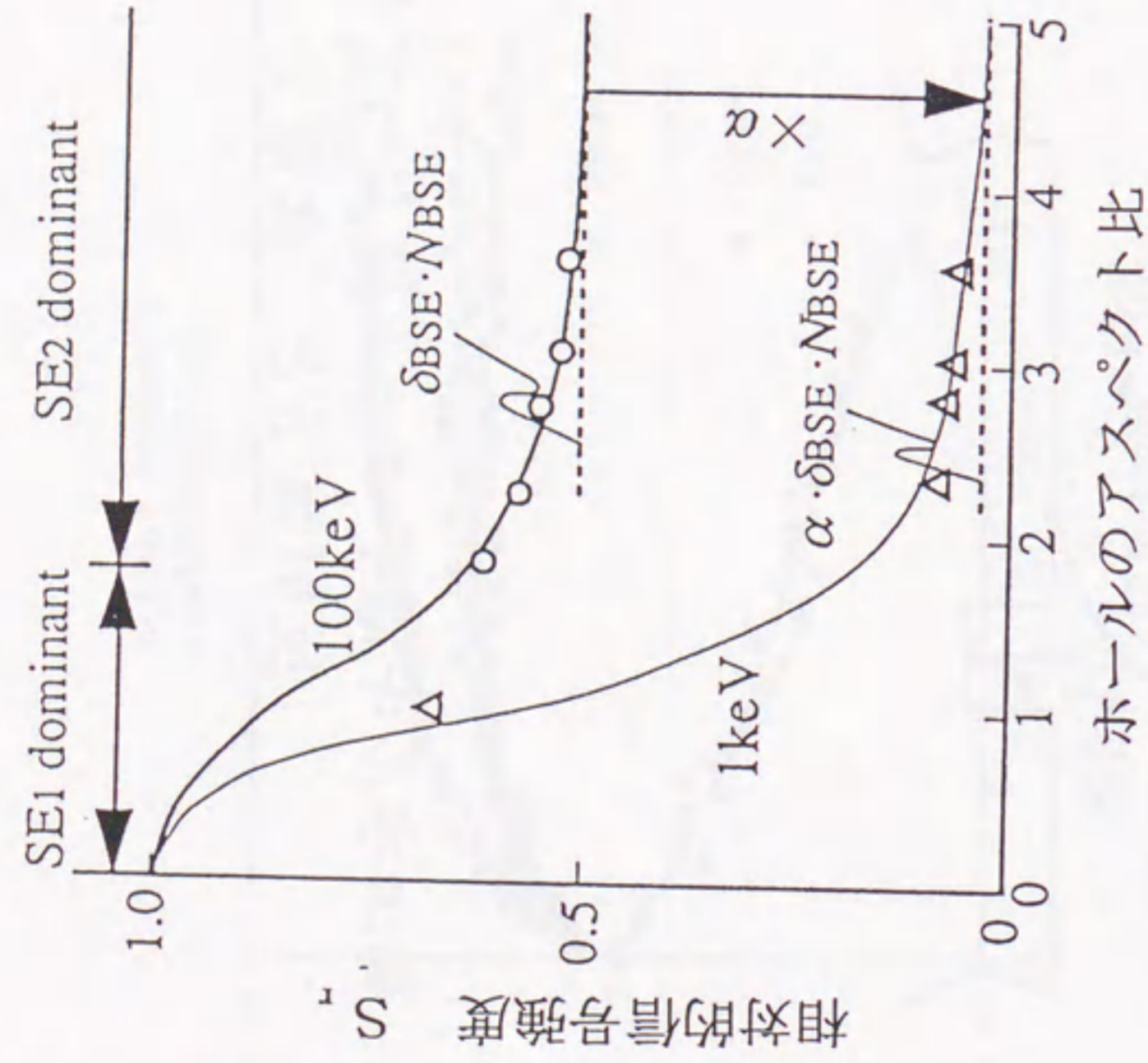


図5.24 二次電子信号強度のアスペクト比依存性

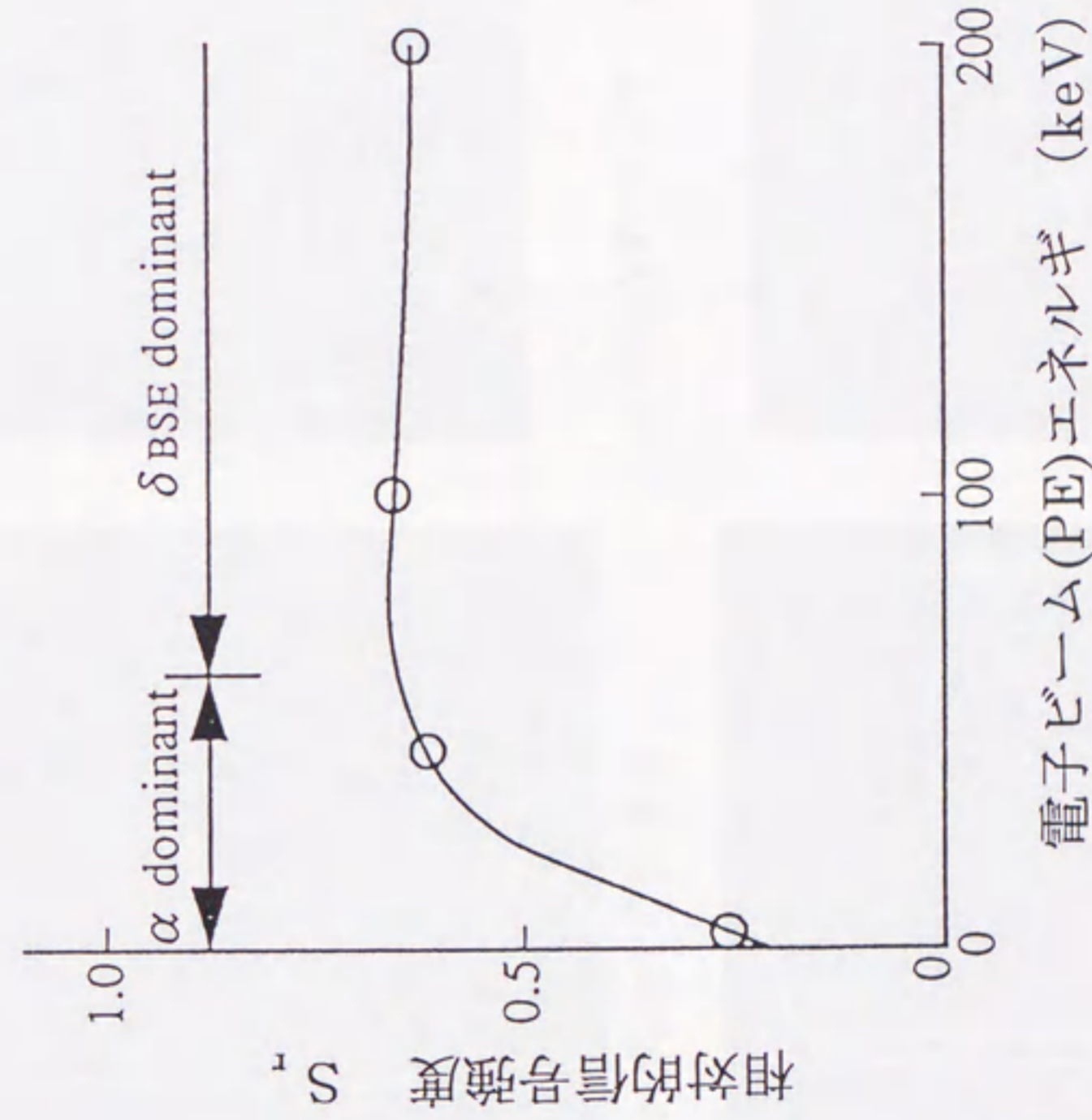
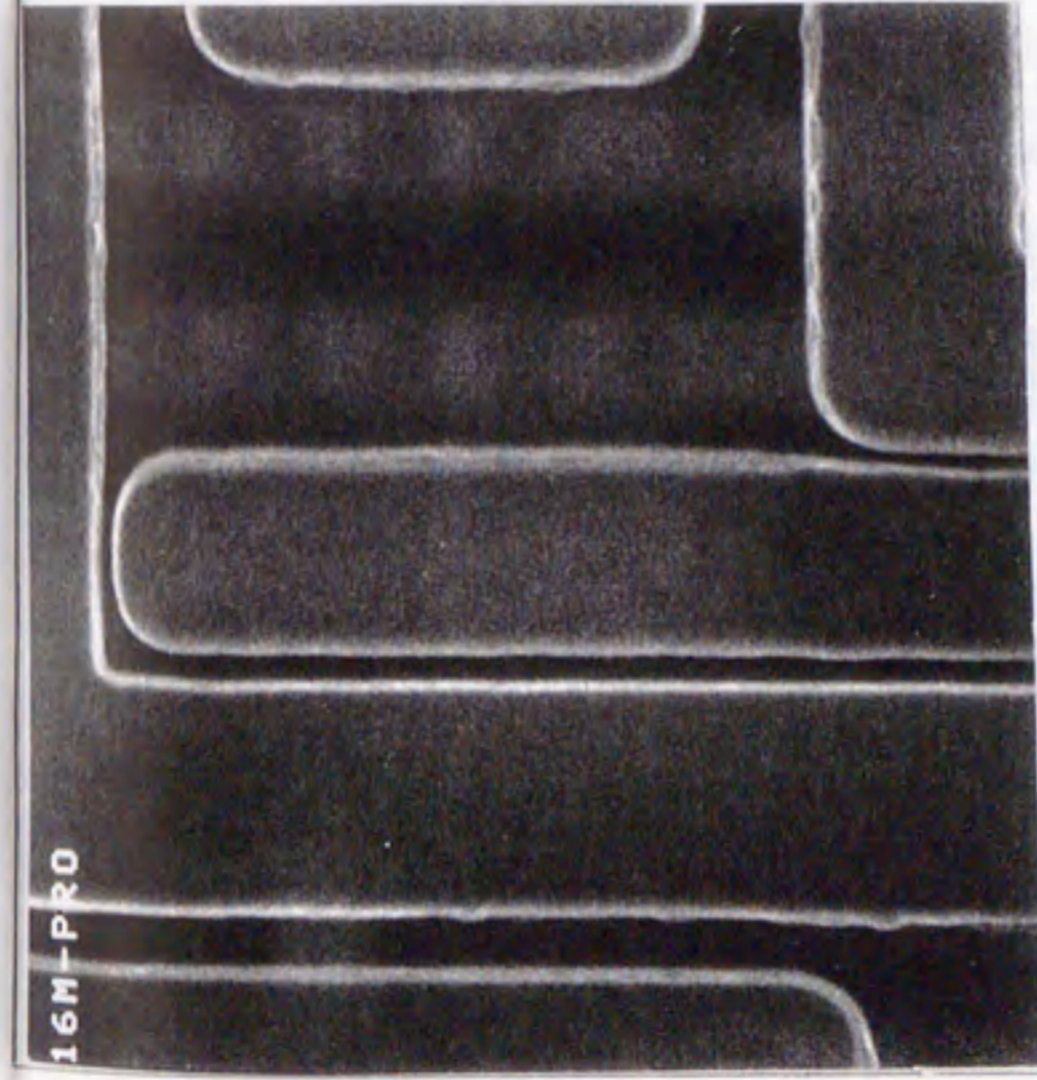


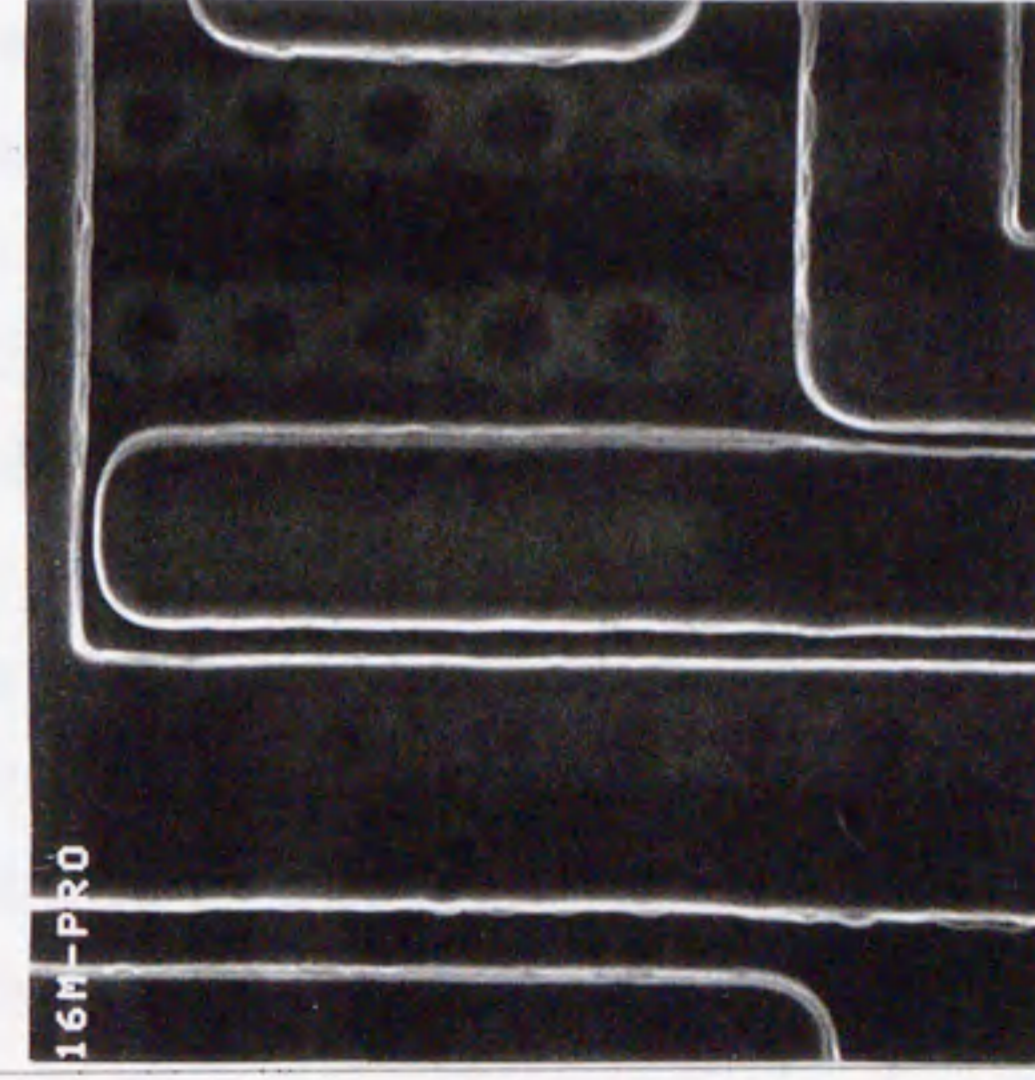
図5.25 二次電子信号強度の電子ビーム・エネルギー依存性



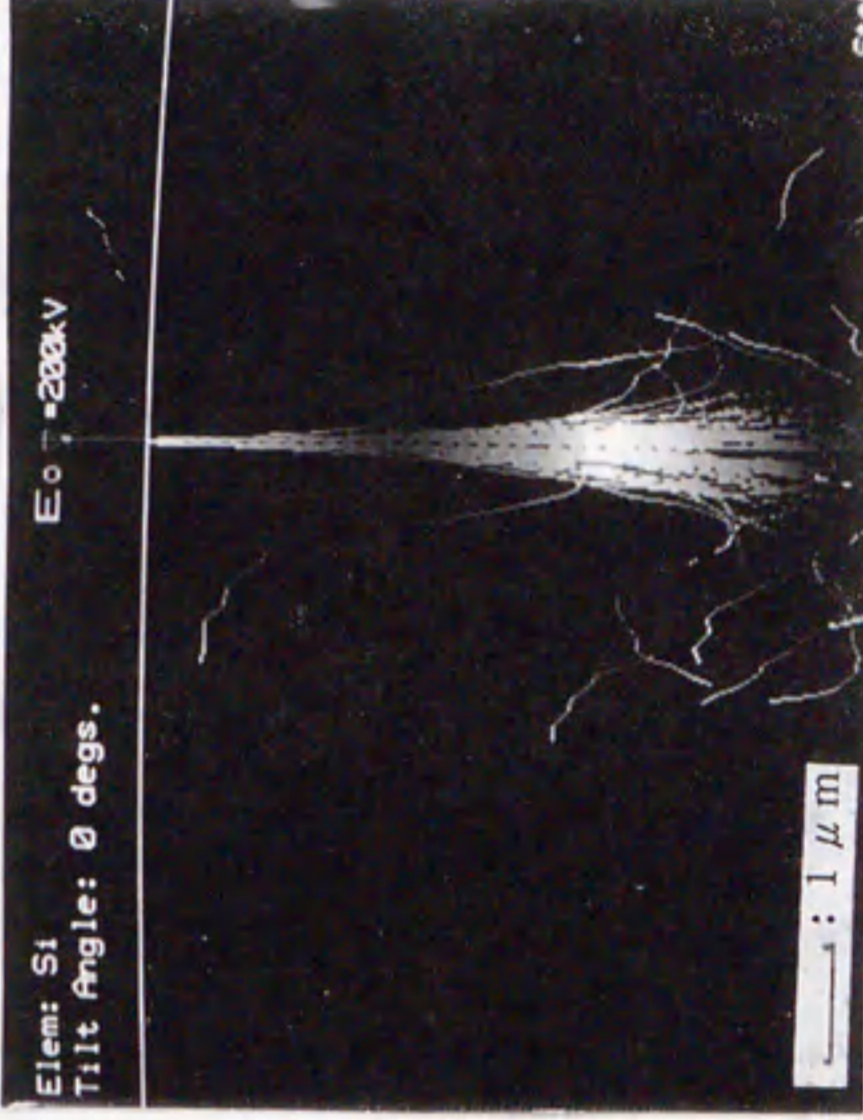
(a) 50keVの観察例



(b) 50keVのモンテ・カルロシミュレーション



(c) 200keVの観察例



(d) 200keVのモンテ・カルロシミュレーション

図5.26 電子ビームの拡がりと解像度