

超微細電子ビーム描画装置“HL-700F”

Nanometric Electron Beam Lithography System

最先端半導体デバイスの研究開発のツールとして、高精度電子ビーム描画装置が注目されている。今回、最小ビーム径 $0.03\mu\text{m}$ のスポットビームを用いて、最小 $0.1\mu\text{m}$ の図形を高速・高精度で描画できる超微細電子ビーム描画装置HL-700Fを開発した。本装置のために新規に開発した技術は、(1)ビームを細く絞っても大電流が得られる新電界放出電子銃、(2)電子ビームを高速度で偏向するための3段偏向方式、(3)精度を低下せずに高速度で描画できる電流モード切換機能、である。本システムは先に開発した可変成形電子ビーム描画装置HL-700M/Dと系統的に共通化が図られている。HL-700Fの性能は、最小描画線幅 $0.1\mu\text{m}$ 、層間合わせ精度 $0.04\mu\text{m}$ 、スループット1ウェーハ/時である。

齊藤徳郎* Norio Saitô

中村一光** Kazumitsu Nakamura

1 緒言

最近の半導体デバイスはますます微細化の傾向にあり、それに伴って微細加工プロセスの研究やデバイスの微細加工限界追求が重要な研究課題となっている。また、Si素子だけでなく、超電導素子、GaAs高速素子、光集積素子、更に量子力学的な物理現象に基づく新機能素子などの研究開発にも、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の極微細加工のツールが求められている。日立製作所では過去に $0.5\mu\text{m}$ までのパターンを対象とした可変成形電子ビーム描画装置HL-600を開発してきた^{1),2)}。このシステムはその後各種の改良によりスループットの改良が図られ、デバイス生産用HL-700M/Dとして製品化されている。しかし、このシステムを用いた $0.5\mu\text{m}$ をはるかに下回る $0.1\mu\text{m}$ レベルの微細加工は、精度とスループットの点で必ずしも最適とは言えない。ビーム径が小さくなると、熱電子を用いた可変成形方式では電流が激減するからである。むしろ、 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 以上の電流密度が得られるFE銃(電界放出電子銃)を用いた点ビーム方式が有利となってくる。

そこで、極限素子研究の要請にこたえるものとして、FE銃を搭載した $0.1\mu\text{m}$ レベルのLSIを実用的なスループットで描画できる超微細電子ビーム描画装置HL-700Fを開発した³⁾。本装置の開発では、ソフトウェアに互換性を持たせるため、HL-700M/Dと系統的に可能な限り共通化を図った。主な差異は電子光学系、真空排気系とビーム偏向制御系の一部である。ここではHL-700Fのために開発した主要な三つの技術と装置総合性能について紹介する。

2 開発装置の目標とそのための課題

2.1 開発装置の目標

電子ビーム描画装置の性能はスループットと最小加工寸法である。この二つを軸とする平面にHL-700M/Dをプロットす

ると図1のようになる。同図に示すように、寸法が小さくなるとビーム電流が低下するので、スループットは落ちる。装置の性能指標を、スループット/(最小加工寸法)²とすると、この量は単位時間当たりのデバイス数に比例するので、図示の実線上にある装置は性能的に等価であると言える。同図からHL-700Dの性能は $0.5\mu\text{m}$ レベルで2枚/時であるが、 $0.1\mu\text{m}$ レベルでは0.1枚/時となり、とうてい実用的とは言えない。デバイス研究者の要求を考え、開発装置の目標を $0.1\mu\text{m}$ レベルで10倍以上の1枚/時と設定した。

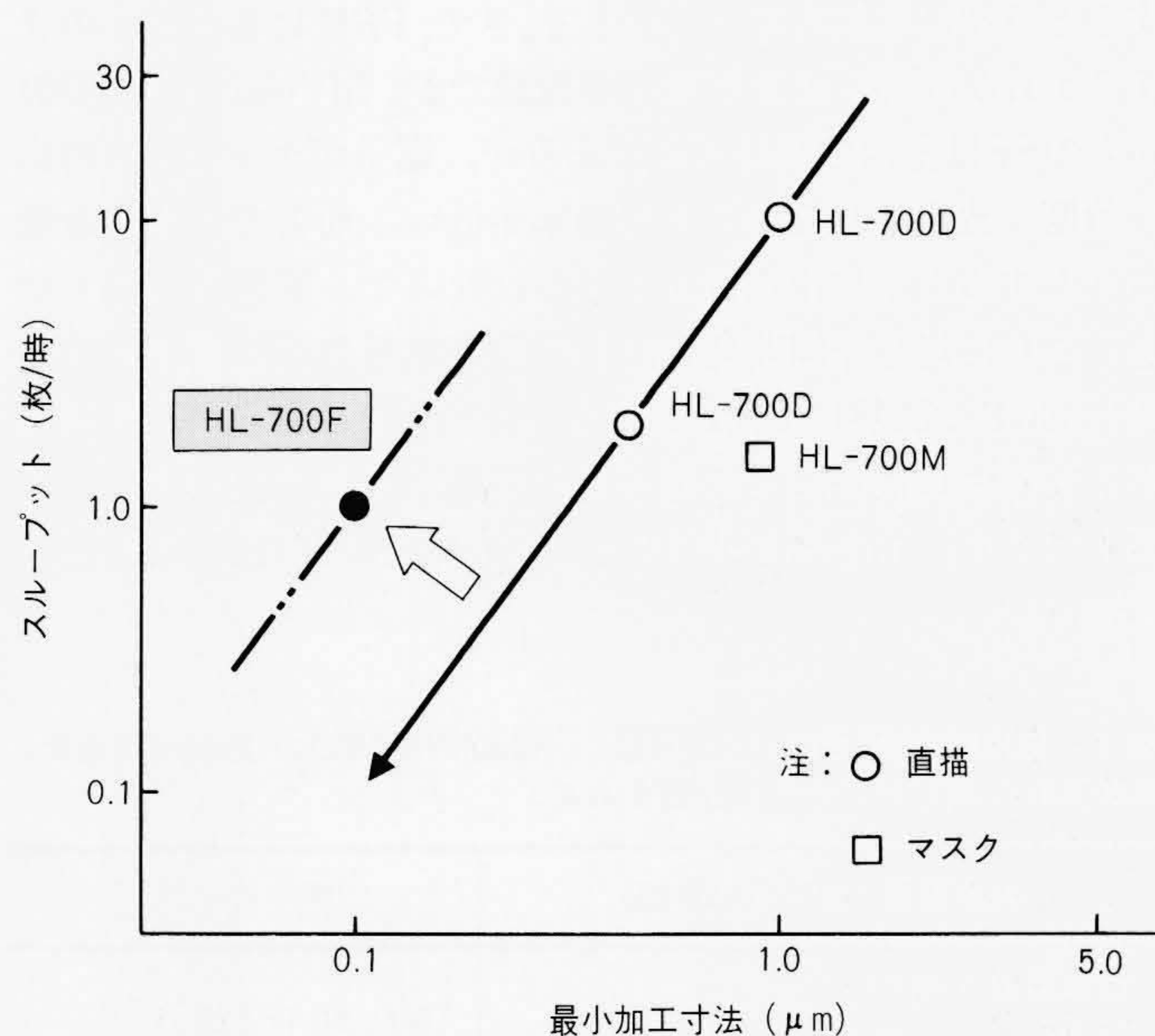


図1 HL-700Fの目標 スループットは最小加工寸法が小さくなると、ほぼ自乗に比例して小さくなる。

* 日立製作所中央研究所 工学博士 ** 日立製作所那珂工場 工学博士

2.2 目標達成のための技術課題

電子ビーム描画装置は電子銃からの電子をレンズにより細く絞り、偏向器でビームを振りながらウェーハ上にパターンを描く。したがって、描画速度の向上のためには、(1) 大電流のとれる高輝度の電子銃、(2) 高速度ビーム偏向システム、(3) 高効率描画方式、の開発が必要である。前節の目標を実現するためのこれら技術課題と対策を、数値的に表1にまとめて示す。まず第一に電流密度の増大であるが、従来値10 A/cm²を100 A/cm²以上にする必要がある。これに対しタングステン表面にチタン原子を拡散させたTi/W-TFE銃(熱電界放出電子銃)⁴⁾を開発した。第二のビーム偏向の高速化に対しては、ドット間のジャンプ時間を従来値100 nsから10 nsにすることを目標とした。この実現のために3段偏向方式を開発した。第三は描画効率の向上である。ビーム径が固定しているよりも、パターン寸法に応じて可変としたほうが効率が向上する。この解決策として、ビーム径可変光学系及び図形の輪郭分解方式を開発した。これら三つの技術を電子光学系との関連で図2に示す。以下、各技術について詳述する。

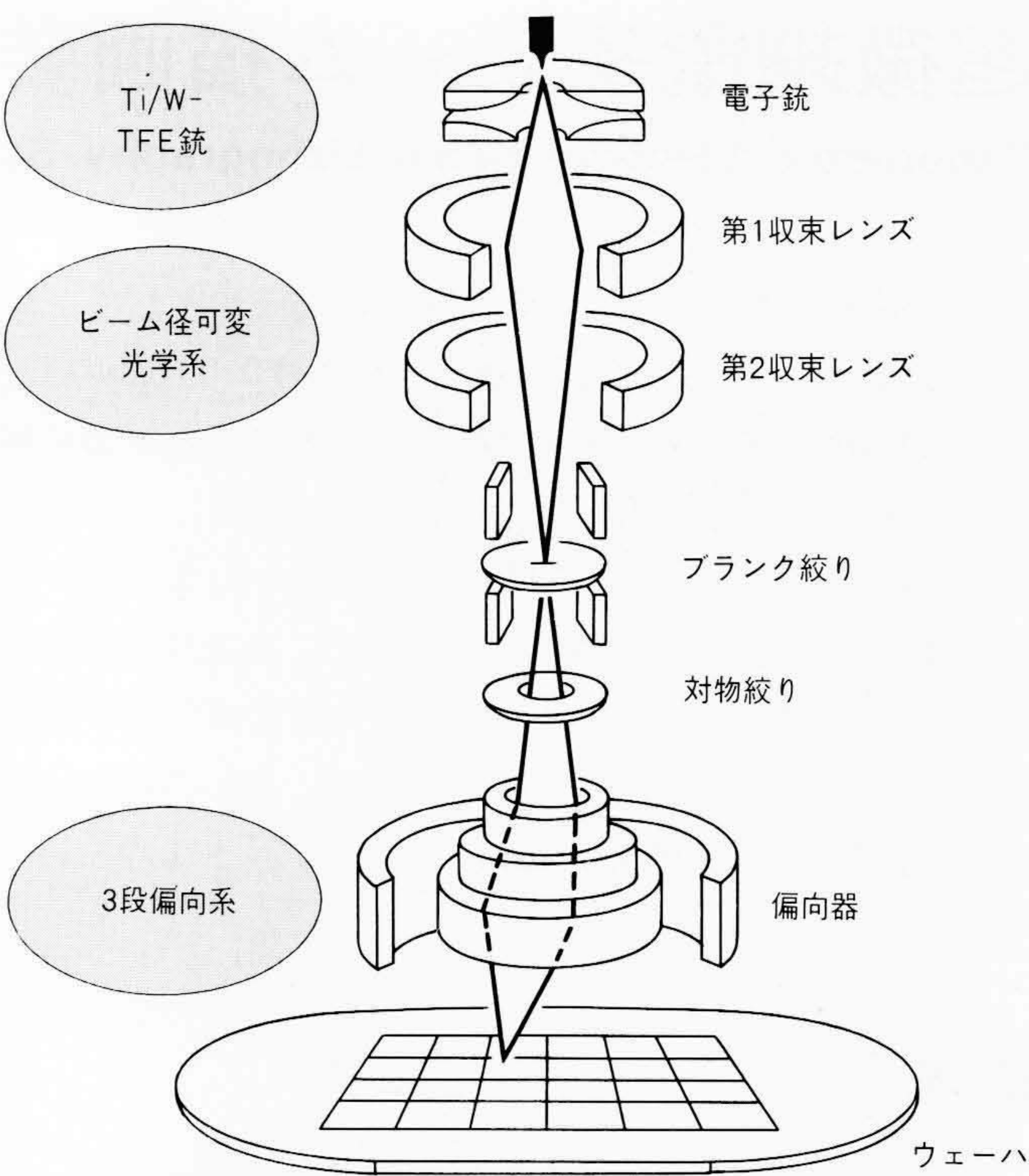
3 新規開発技術

3.1 Ti/W-TFE銃

最大電流密度は電子銃の輝度、エミッタンス(光源径と放出角の積)、ビーム半開角 α によって制限を受ける。ビーム径に対する最大電流密度の関係を、FE銃と熱電子銃(LaB₆とW)につき図3に示した($\alpha=1.5$ mrad)。上の平らな部分は輝度制限、斜めの部分はエミッタンス制限による。同図から明らかなように、熱電子銃では輝度が低いため10 A/cm²以上は得られないが、大きなビームを作ることができる。一方、FE銃を用いるとビーム径が0.2 μ m以下では500 A/cm²という高電流密度が得られる。ただし、光源径が小さいためビーム径を大きくすると急速に電流密度は低下する。さて、FE銃にも幾つかのタイプがある。通常、走査形電子顕微鏡でよく用いられるW(310)からのFEは室温で動作可能であるが、電子がチップ前方の広い角度に放出されるので利用効率が低い。前方で大電流を取ろうとすると全放出電流を上げねばならず、安定性が悪くなる。これに対し今回開発したTi拡散形熱電界放出電子銃は、約1,300℃で加熱して使わねばならない欠点はあるが、利用効率と安定性は高い。この電子銃の構造と電界放出パターンを図4に示す。Tiを巻き付けたヒータの先端にW(100)単結晶チ

表1 超微細装置開発上の課題 電流密度の増大、偏向の高速化、描画効率の向上が三大技術課題である。

技術課題(従来値→目標)	解 決 策
電流密度の増大 (10 A/cm ² →100 A/cm ² 以上)	● Ti/W-TFE銃
偏向の高速化(100 ns→10 ns)	● 3段偏向方式
描画効率の向上 (固定スポット→可変スポットビーム)	● ビーム径可変光学系 ● 輪郭分解



注：略語説明 Ti/W-TFE銃(熱電界放出電子銃)
図2 新規開発技術と電子光学系 長円形で囲んだ箇所が新規開発技術を示す。

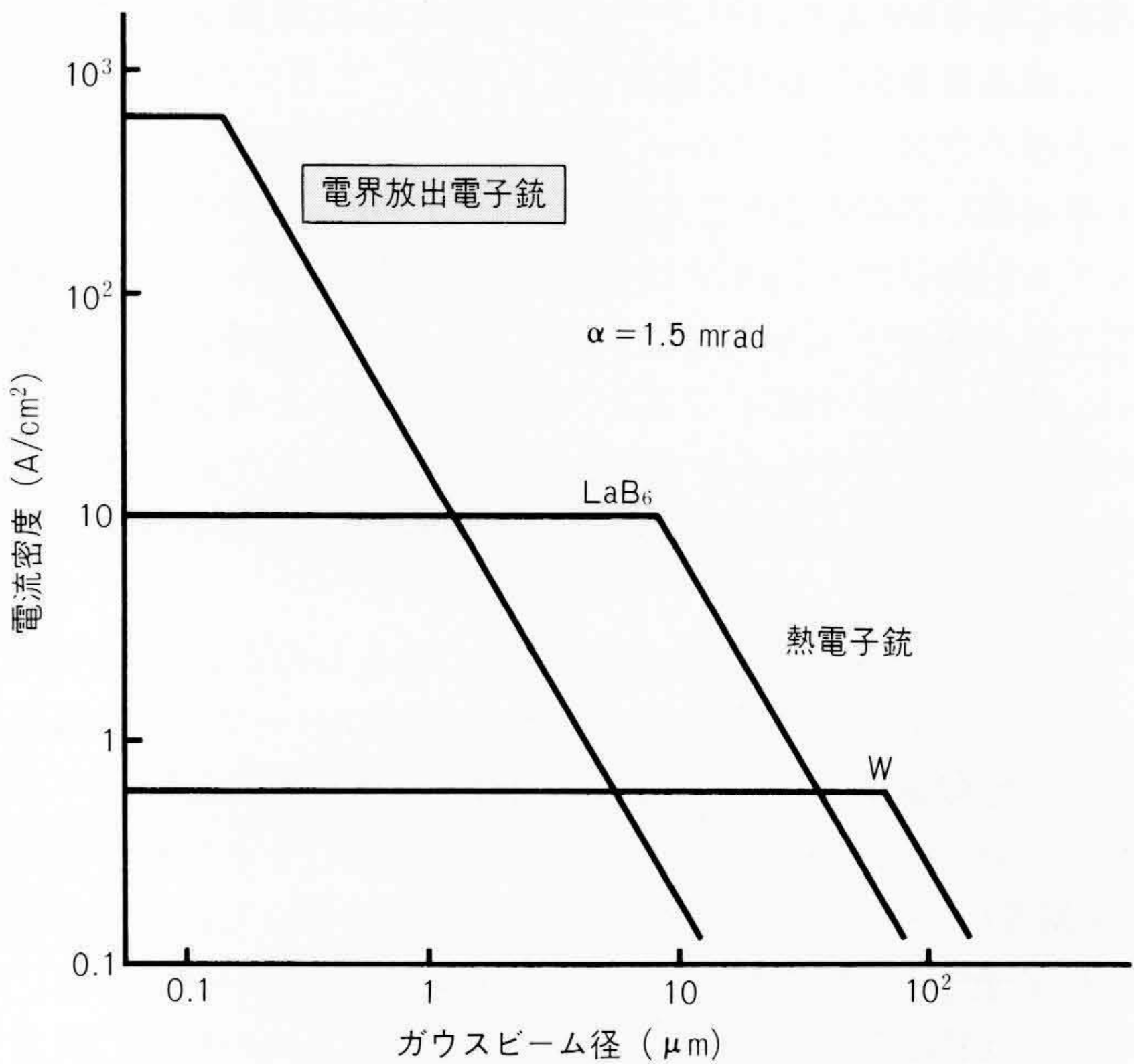


図3 最大電流密度の電子銃依存性 上の平らな部分は電子銃の輝度制限、斜め部分はエミッタンス制限による。

ップを溶接し、加熱によってTi原子をチップ表面に拡散させる。右側の二枚の写真はFEパターンで、チップ前方に蛍光板を置き、放出電子の角度分布を目に見えるようにしたものである。同図から分かるようにTiが拡散していないWだけのときは広い角度範囲に電子が放出されるが、Tiが先端にまで拡散

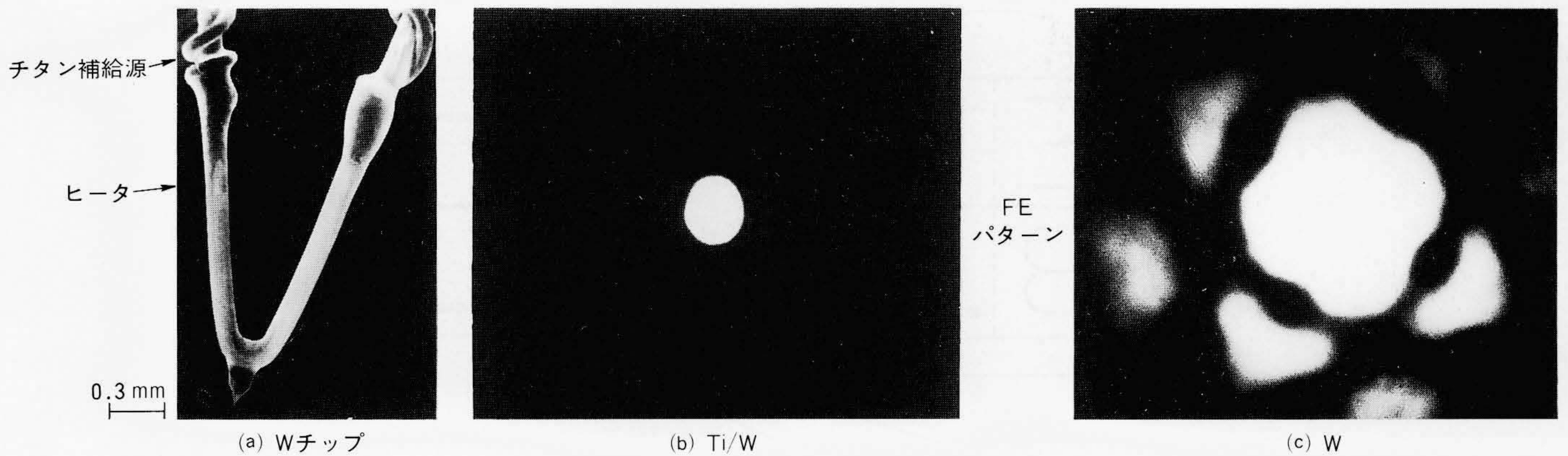


図4 Ti/W陰極の構造とFEパターン チップ表面にTiが拡散し、雰囲気ガス中の酸素と作用するとFE電子は(b)のように前方に集中する。

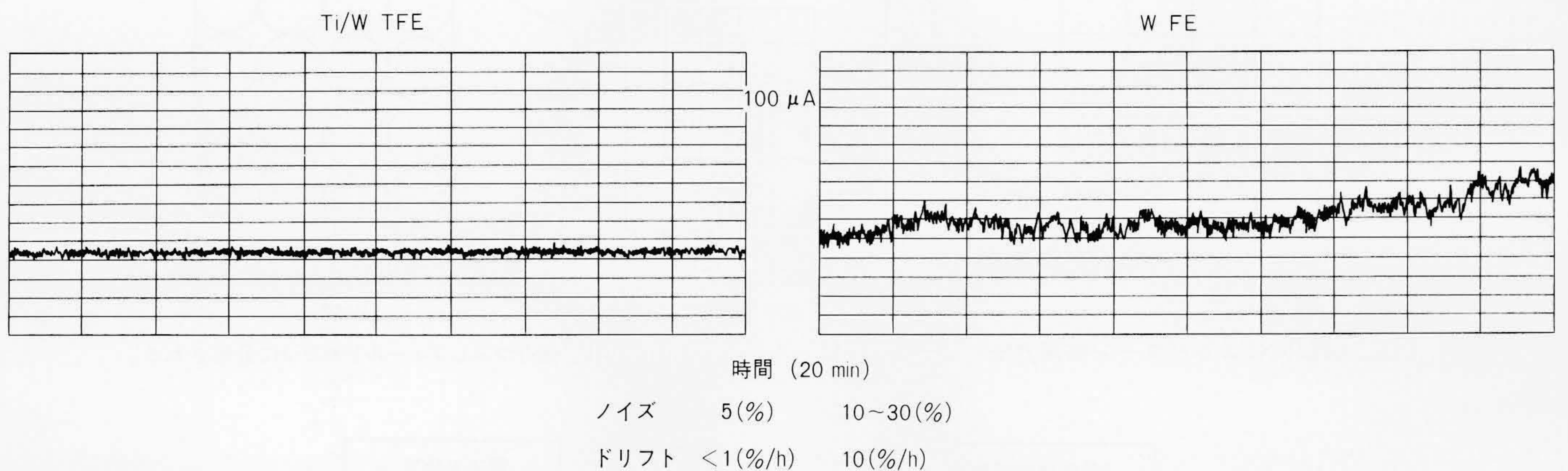


図5 放出電流特性比較 Ti/W-TFE銃はノイズ、ドリフト共に小さく、描画装置の要求に合っている。

すると雰囲気ガス中の酸素と作用し、(100)面の仕事関数を下げる結果、前方向に集中して電子が放出される。このような状態での放出電流の安定度をW(310)と比較して図5に示した。平均電流100 μ A、時間は共に20分間にわたっている。一見して明らかなように、Ti/W-TFE銃はノイズ、ドリフト共に小さく、描画装置の要求に合っている。この銃の安定性メカニズムについては文献4)を参照されたい。またこの銃はSwansonらにより開発されたZr/W-TFE⁵⁾が1,700°Cで動作するのに比べ低温で動作でき、エネルギー広がり小さいという特徴もある。

3.2 3段偏向方式

D-A変換器の応答速度は、ビット数が大きいほど遅くなる。したがって、最近の描画装置は回路の待ち時間を減らすため、大小二つのD-A変換器を用いた2段偏向方式が多い。すなわち、偏向フィールドを主・副に分割し、主偏向領域は16ビット以上のD-A変換器で、副偏向フィールド内は12ビット程度のD-A変換器でビームを偏向する。さて、12ビットD-A変換器の応答速度は ~ 100 nsである。これではFE電子銃からの大電流特性を殺すことになる。FE電子銃の大電流特性を生かすには、D-A変換器の応答速度は10 ns以下にしたい。そうすると8ビット程度にビット数を下げる必要がある。そこで日立製作所では3段偏向方式を考案した。3段偏向による描画方式を図6に示す。サブフィールドまでは従来の2段偏向方式

と同じであるが、サブフィールド内図形は最大2.5 μ mの長方形又は45度斜図形に分割され(1 LSB=0.01 μ mとして8ビットに相当)、この内部は8ビットD-A変換器によりラスタ的に高速に塗りつぶされる。この間、ビームは出しっぱなしである。すなわち、3段偏向方式では可変成形方式の1ショット相当領域を第三の偏向器で塗りつぶしているの、仮想可変成形方式といえることができる。図7に光学系との関連で偏向制御系の構成を示した。下から順に、18ビットD-A変換器により駆動される電磁偏向により2.5 mmのフィールドを低ひずみで偏向する主偏向器、12ビットD-A変換器により駆動される静電偏向により40 μ m角の比較的狭いサブフィールドを高速に偏向する副偏向器、そして2.5 μ m角の小領域を8ビットD-A変換器により極めて高速に偏向する塗りつぶし偏向器がある。この塗りつぶし偏向器の高速化には、(1)ビーム偏向アドレス演算、(2)D-A変換器の高速化が必ず(須)である。特にD-A変換器に関してはグリッジノイズの低下が重要である。高速化の具体的手法として、ビーム偏向アドレス演算回路では450ゲートのECL(Emitter Coupled Logic)ゲートアレーを用いて、8ビット並列加算器を内蔵した専用LSIを開発した。更に演算制御回路ではきめ細かなパイプライン制御により高速化を図った。また、8ビット内では偏向補正は一定とした。その結果、演算サイクル時間9 nsが得られた。D-A変換器では二つのD-A変換器を交互に切り替えて用いる2-D-A変換器

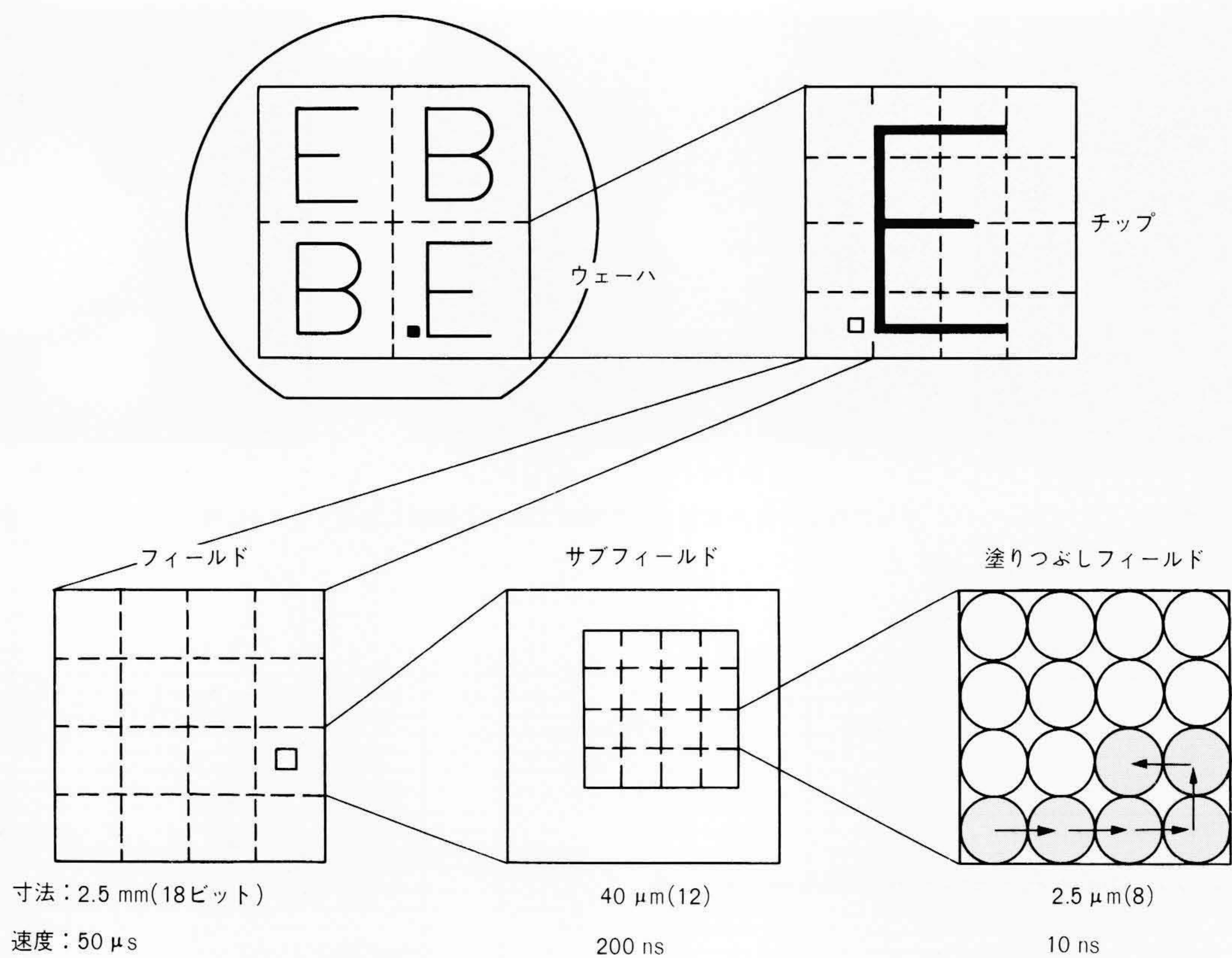


図6 3段階偏向によるパターン描画方法 チップはフィールド、サブフィールド、塗りつぶしフィールドの三つに分解される。

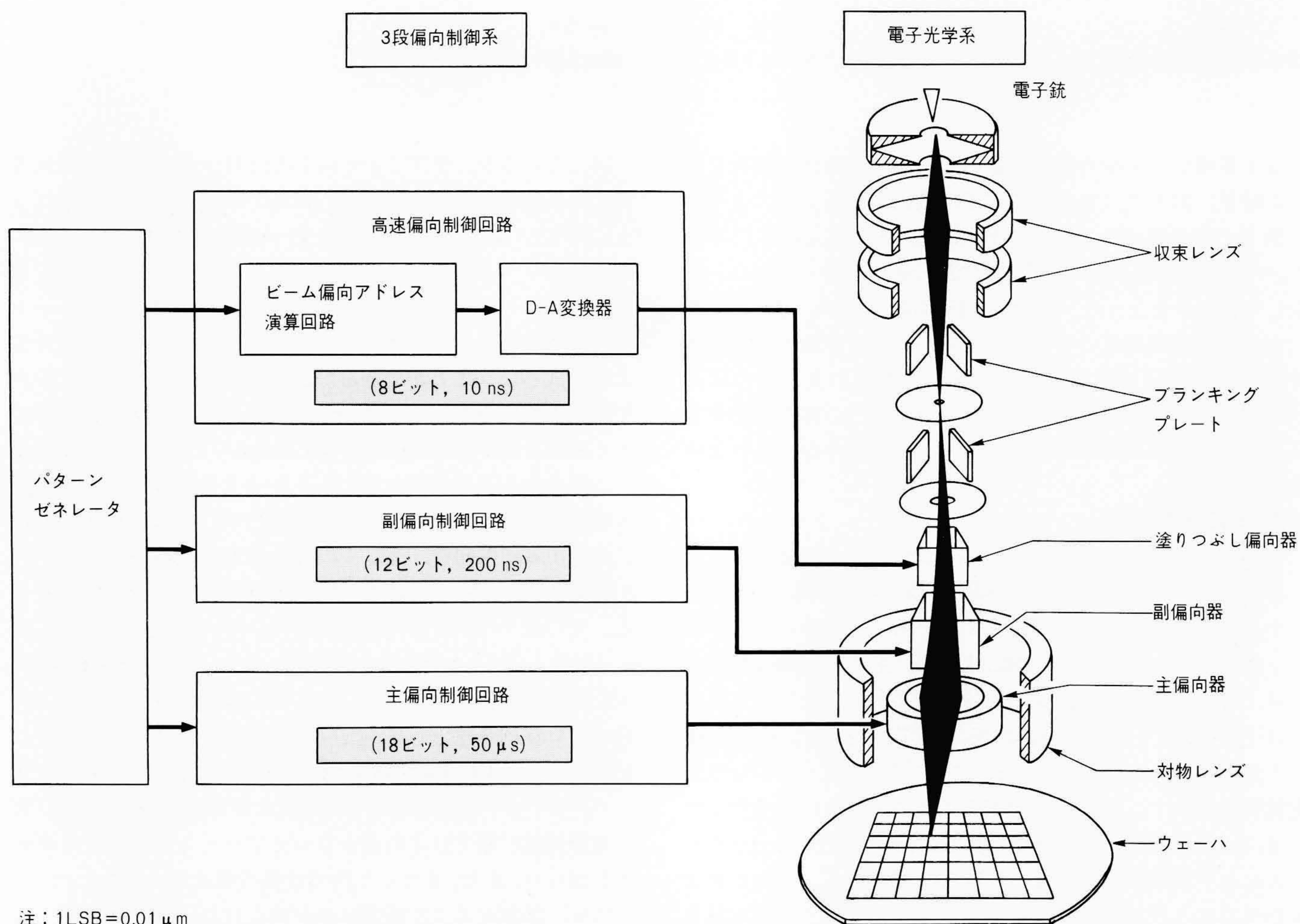


図7 HL-700Fの3段階偏向制御系 主偏向器では2.5 mm角, 副偏向器では40 μ m角, 塗りつぶし偏向器では2.5 μ m角領域を偏向できる。

変換方式を開発した。トランジスタを差動結合した高速アナログスイッチを用いて、2個のD-A変換器出力を交互に切り替え、グリッジノイズを避ける構成としてある。すなわち、デジタル入力を $\frac{1}{2}$ 周期ずつずらせてD-A変換器1とD-A変換器2に交互に加え、出力も同様に取りようにすればその出力はデジタルデータの入れ替わり時に生じる10~20 LSB(1 LSB=0.01 μm)に達するグリッジノイズを避けることができるわけである。

3.3 ビーム径可変光学系と輪郭分解処理

HL-700Fの用途を0.1 μm レベルのパターンに限定せず、粗いパターンを描画したい場合もある。また、0.1 μm レベルのLSI描画でも全パターンを細いビームで描画しては時間がかかる。一般にパターンの輪郭は、高精度に描画する必要があるが内部はそれほどではない。そこで今回の装置では、電流モードを切り替えて描画できるようにした。すなわち、パターンの輪郭や微細パターンは小さなビーム(小電流モード)で、パターンの内部や大きなパターンは大きなビーム(大電流モード)で描画する。電子光学系にはビーム径切替えのための2段収束レンズを設けた。図8に大小電流モードのビームトレースを示した。第1収束レンズを用いると太くて大電流のビームが形成され(90 nm{900 Å}, 27 nA), 第2収束レンズでは細くて小電流のビームが形成される(30 nm{300 Å}, 3 nA)。この場合、対物絞り径は0.1 mm($\alpha=1.5 \text{ mrad}$)であるが、もっと大きな絞りを用いることによって、電流モードに変化を持たせることもできる。収束レンズによるモード変化では、図8に示すようにクロスオーバー像はブランクアパーチャ上に結像するので、対物レンズ系の結像条件は偏向ひずみ補正量

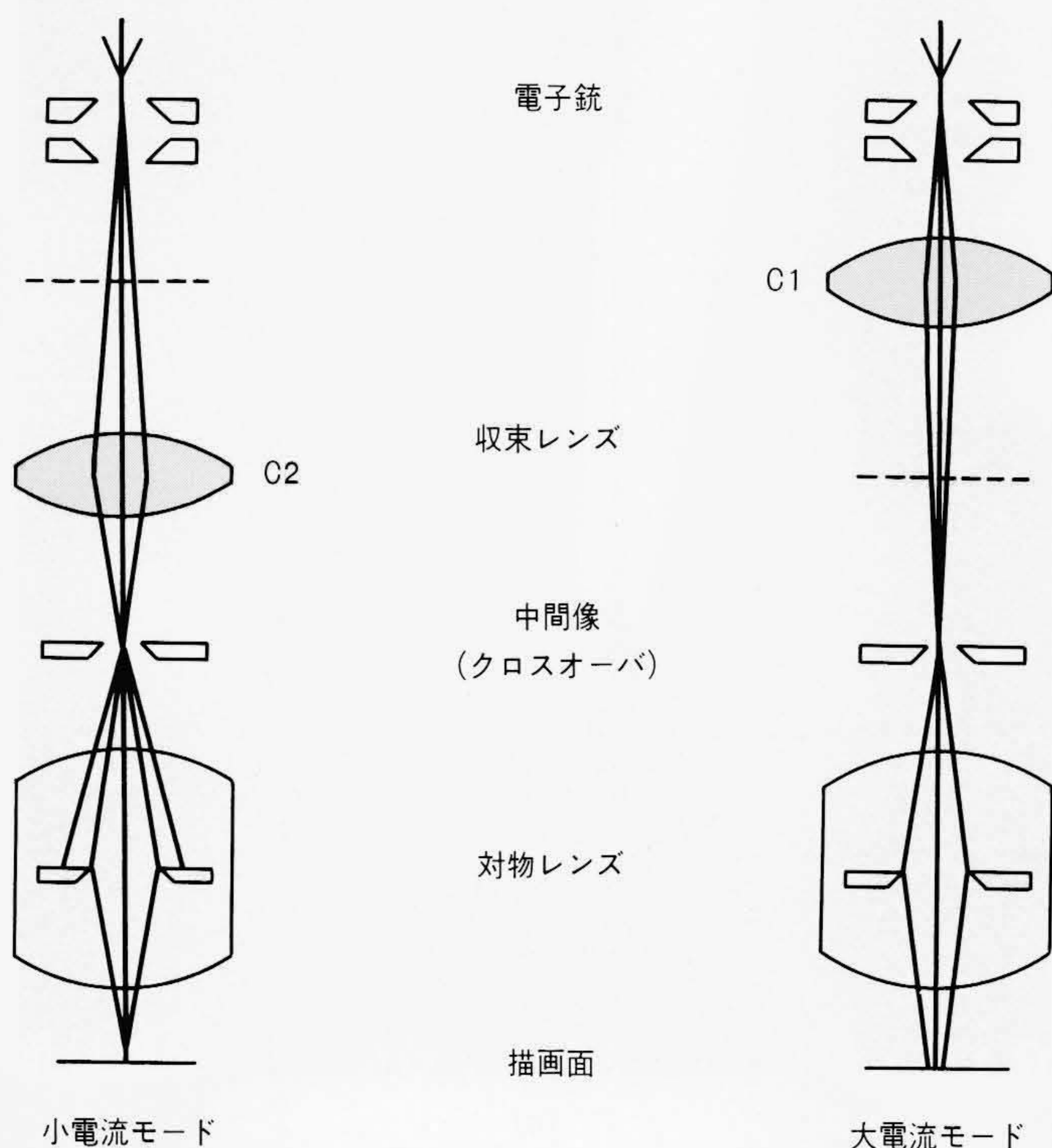
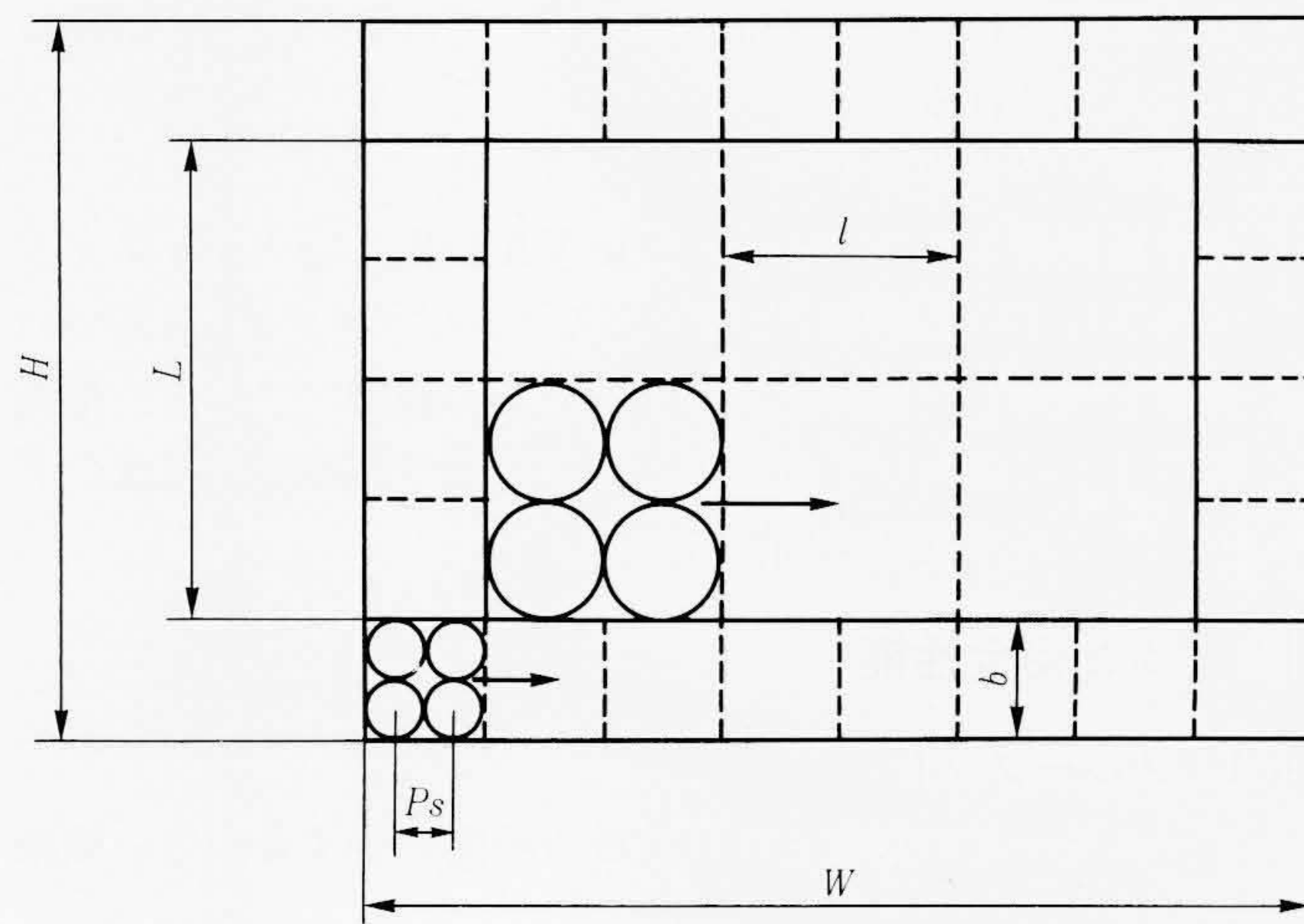
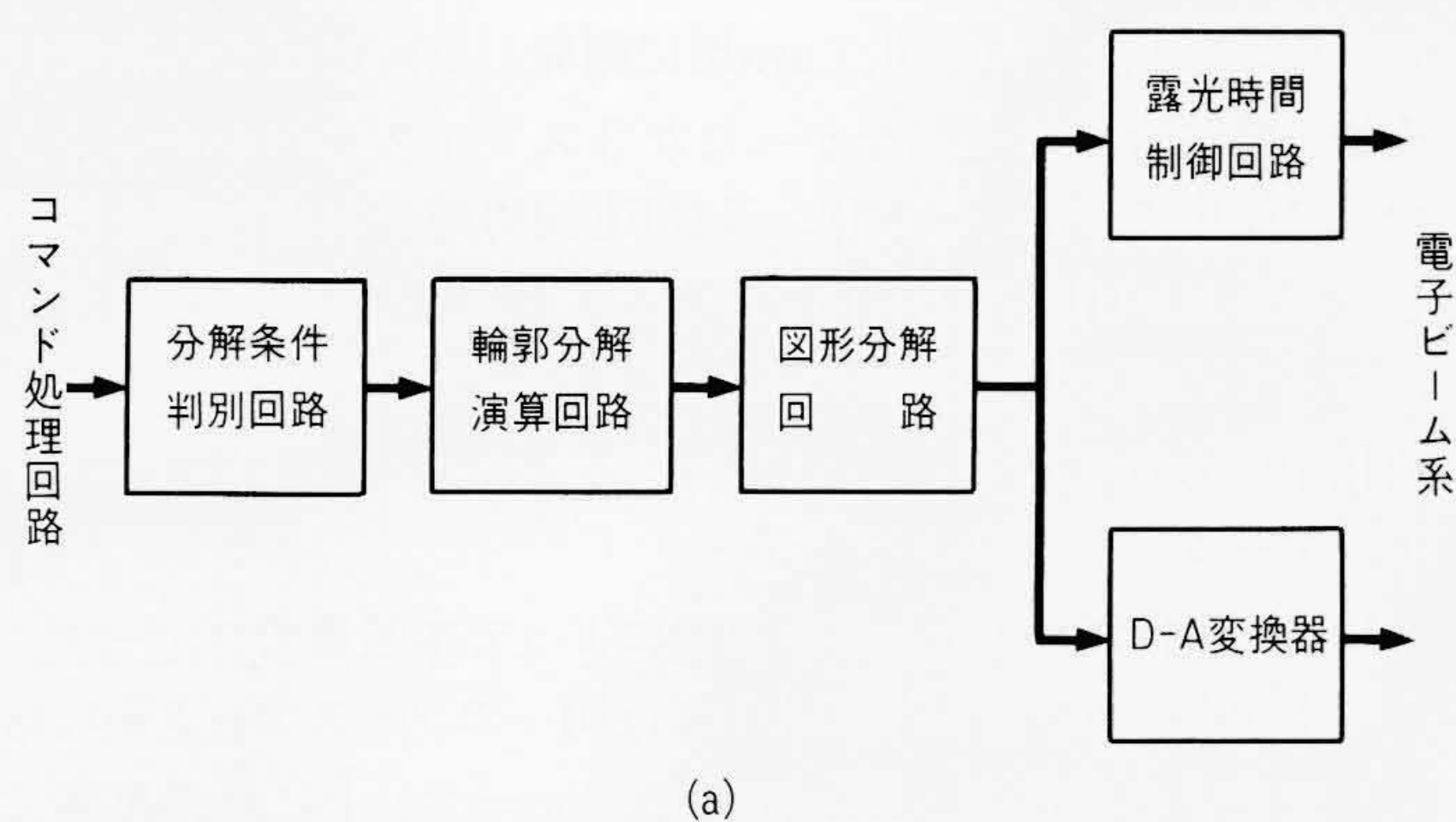


図8 ビームモード切替え方式 C1レンズを用いると大電流モード、C2レンズでは小電流モードが形成される。



W, H: 図形寸法
l: 図形分解寸法
b: 輪郭幅
L: 輪郭分解判定幅
Ps: ショットピッチ
(判定式)
W及びH $\geq L+2b$

(b)

図9 輪郭分解回路の構成と分解例 (a)は回路構成, (b)は輪郭分解パラメータを示す。露光時間は輪郭部、内部で独立に指定できる。

も含めて変化させる必要はない。なお、電流モードの切替えは制御計算機により自動的に行える。

次に、輪郭分解処理について述べる。輪郭分解回路は2段のパイプライン演算構成から成る(図9)。1段目で分解条件(図種、輪郭寸法)の判別を行い、2段目で分解演算を行う。輪郭部と中心部の露光時間は独立に制御できる。図9(b)に輪郭分解の一例を示す。内部、輪郭部の描画電流モードは独立に指定できる。ハード構成は専用演算器によるパイプライン構成とし、結線論理及びROM(Read Only Memory)を用いたシーケンス制御方式を採用した。分解速度は 3×10^6 図形/秒である。なお、斜め図形はすべて輪郭とみなした。

3.4 HL-700Fシステム構成

本システムは電子光学系(標準加速電圧30 kV)・ステージローダ系から成る本体部、データ制御系・偏向制御系から成る制御回路部、マーク検出を行う信号処理系及び制御計算機で構成される。このシステムの特徴は、ユーザーにとっての外見、使い勝手が先に開発した可変成形電子ビーム装置HL-700 M/Dと同じになるように設計されていることである。すなわ

ち、要素技術として、 $0.1\mu\text{m}$ 用に開発した前節までの新規技術や、特に今回は述べなかったが3スライスレベル法によるマーク検出の一部ハード化、及びFE銃用超高真空技術を採用している点がHL-700M/Dと異なっている。しかし、ユーザーにとっての使い勝手を決めるソフトウェアは、次のように共通化が図られている。

(1) データ変換ソフトウェア

LSIの設計データは大形計算機によって本装置のフォーマットに変換される。HL-700M/Dとは同一のソースデータから指定を変更するだけで、HL-700Fのフォーマットに変換可能である。変換されたデータは、磁気テープに格納され、本システムに入力される。

(2) 制御ソフトウェア

高性能制御ミニコンピュータ(μ -VAX II)によりディスク上に保持されている制御データ(システムパラメータ)に基づいて装置を制御し、描画を実行する。この制御ソフトは、描画制御のほかに偏向ひずみ補正、補正結果や描画進行状況のグラフィック表示機能を備えている。

4 装置総合性能

4.1 スループット

ビームモードの切替えには数秒の時間を要するので、頻繁

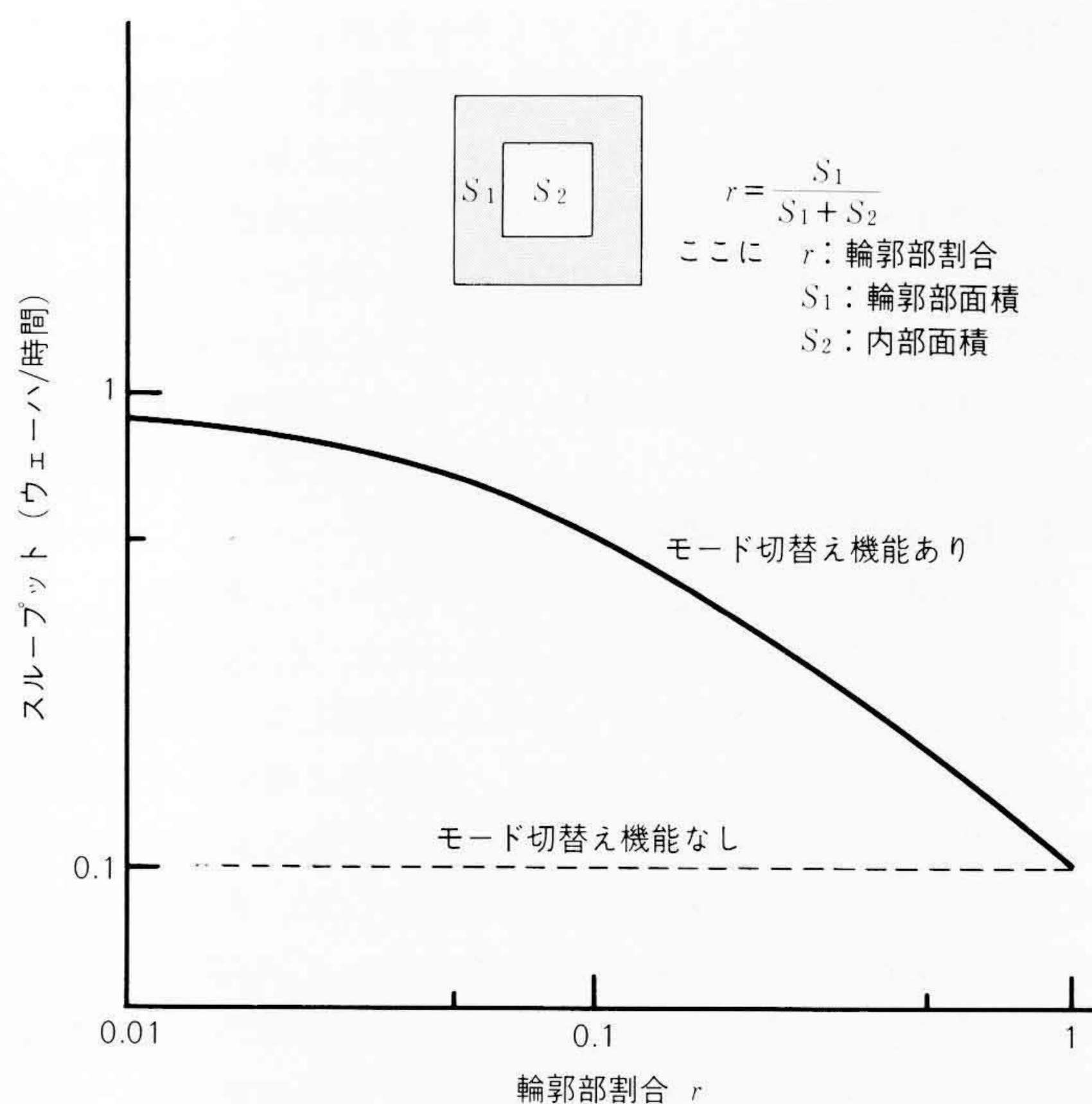
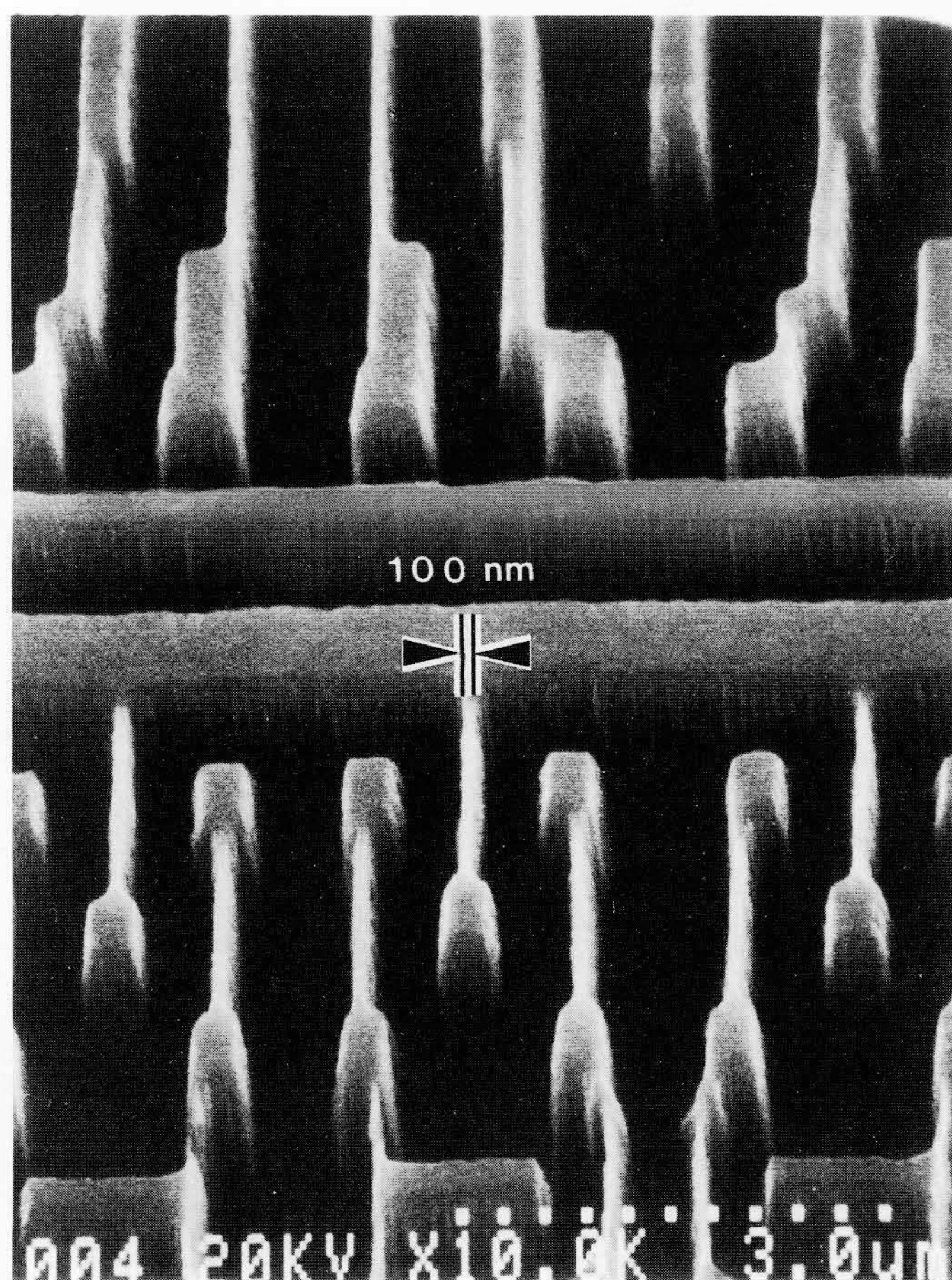
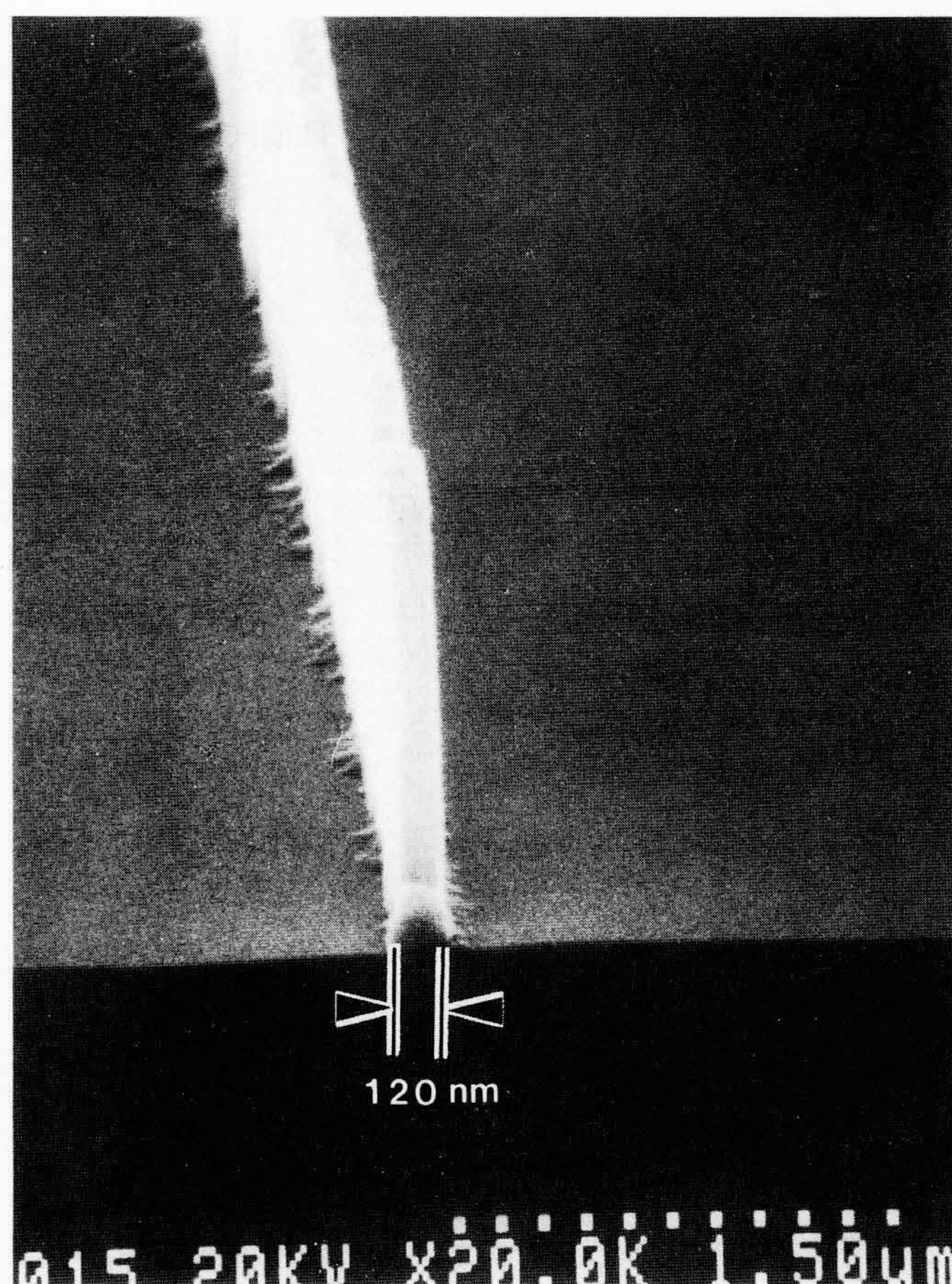


図10 HL-700Fのスループット 4インチウェーハで描画率20%, レジスト感度 $5\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の場合のスループットである。



(a)



(b)

注：日本電信電話株式会社 NTT LSI研究所提供

図11 HL-700Fにより描画した $0.1\mu\text{m}$ パターン 2層レジスト法により描画した。アスペクト比は20である。

に切り替えることはスループットの点で好ましくない。切替えの単位はチップ、ブロック又はウェーハである。ウェーハ単位の場合、ウェーハ中の全パターンの輪郭を小電流モードで描画し、モードを切り替えた後、内部を描画する。全描画面積中、小電流モードで描画する輪郭部の割合を r とすると、大電流モードで描画する内部の割合は $(1-r)$ である。全描画時間は両モードによる露光時間のほかに、偏向待ち時間、マーク検出時間、ステージ移動時間などを加えたものである。4インチウェーハで描画率20%、レジスト感度 $5\mu\text{C}/\text{cm}^2$ とした場合のスループットの r 依存性を図10に示した。通常のモード切替えのないシステム(破線)ではスループットは0.1枚/時である。モード切替え機能を持っていると $r \leq 0.05$ の場合、スループットは約一けた向上する。

4.2 描画例

Siウェーハ上に描画した $0.1\mu\text{m}$ 配線パターンのレジスト像を、2層レジスト法により描画し図11に示す。線幅は $0.1\mu\text{m}$ 、レジスト厚は $2\mu\text{m}$ で、アスペクト比は20である。パターン(a)は4Mビット相当パターンを $\frac{1}{8}$ に縮小したもので、256Mビット相当密度のパターンと言える。パターン(b)は孤立ラインである。図12は単層ネガレジスト(日立化成工業株式会社製RD-2000N)に描画した $0.1\mu\text{m}$ スペースパターンである。非膨潤形のフェノール系レジストであるが、非常に高い解像度を持っていることが分かる。バーニヤ描画による合わせ描画結果を図13に示す。バーニヤは最小 $0.05\mu\text{m}$ で、合わせ精度は $2\sigma = 0.04\mu\text{m}$ である。輪郭分解の例を図14に示す。本機能は当初ス

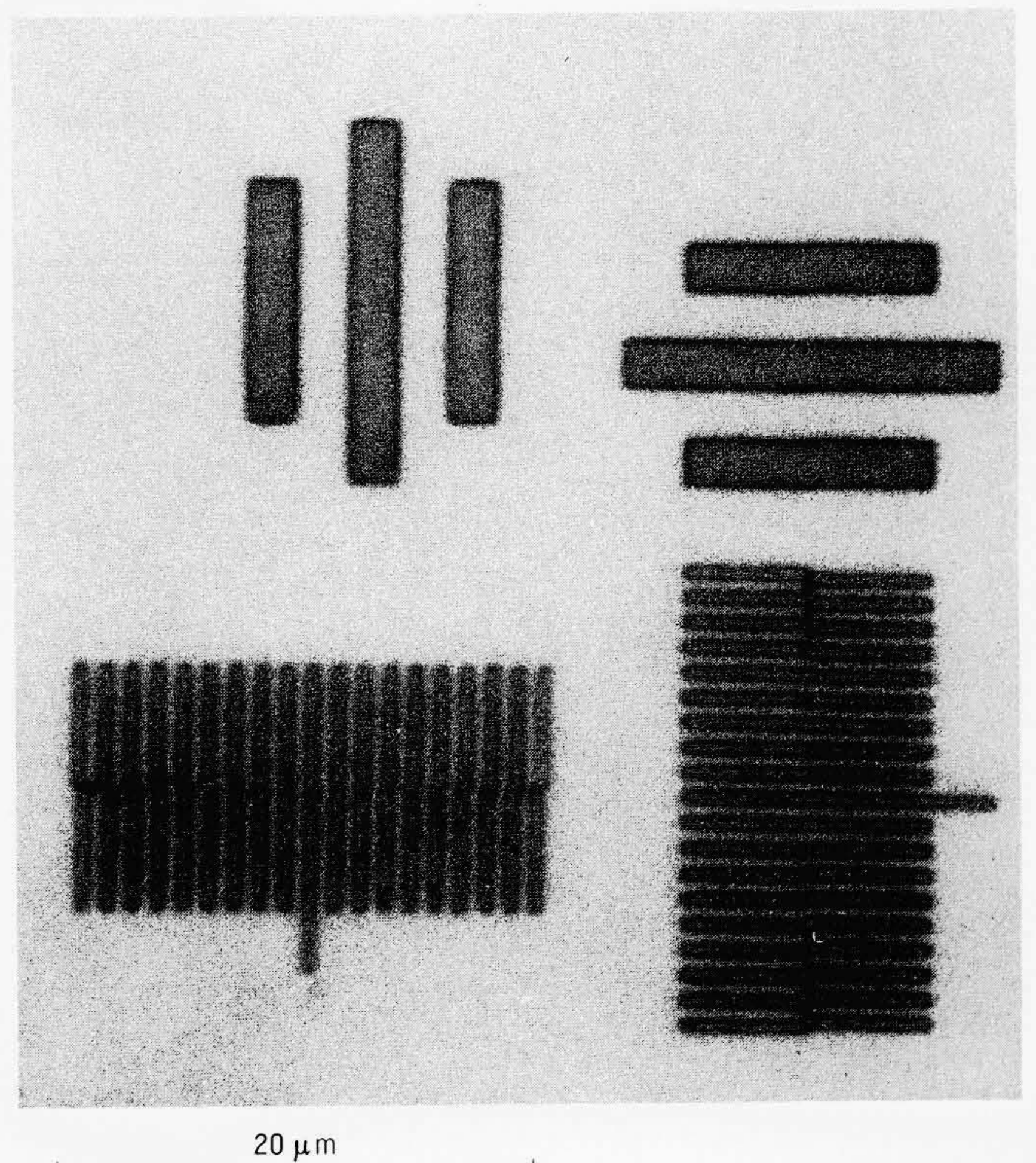


図13 HL-700Fの合わせ描画結果 バーニヤは最小 $0.05\mu\text{m}$ である。

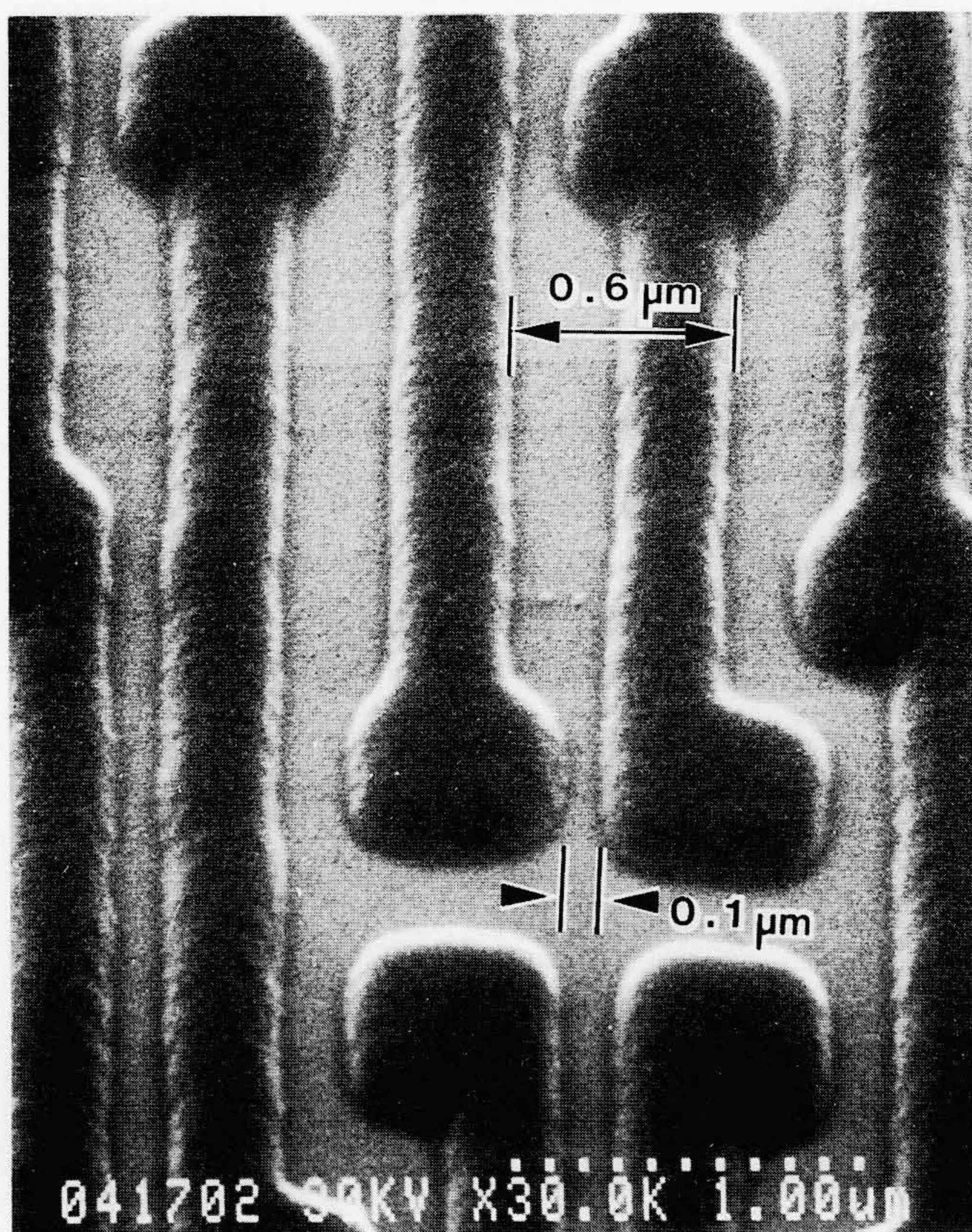


図12 単層ネガレジストに描画した $0.1\mu\text{m}$ スペースパターン 日立化成工業株式会社製RD-2000Nを使用した。

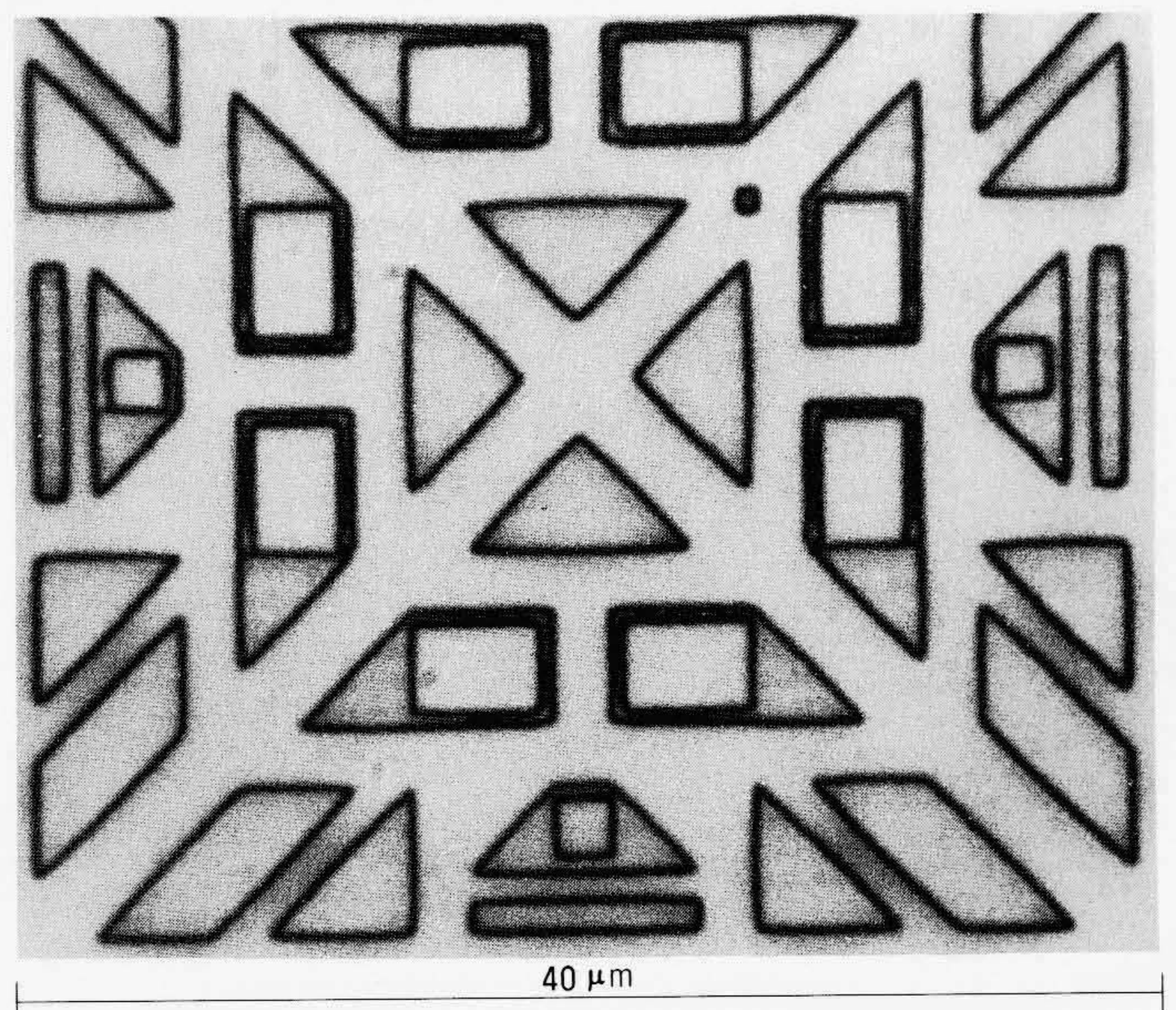


図14 HL-700Fの輪郭分解描画例 台形以外の斜め図形は、すべて輪郭部と見なされる。

ループットの向上が目的であったが、内外のドーズを調整することで近接効果補正機能もあることが分かった⁶⁾。図15にデータの一例を示す。Siウェーハ上にRD-2000Nレジストを塗布し、同図中に示すようなスペースパターンを描画した。スペースとして $0.5\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ まで変化させた。輪郭分解幅 b は $0.5\mu\text{m}$ にした。通常描画は輪郭部と内部で電子ビーム照射量

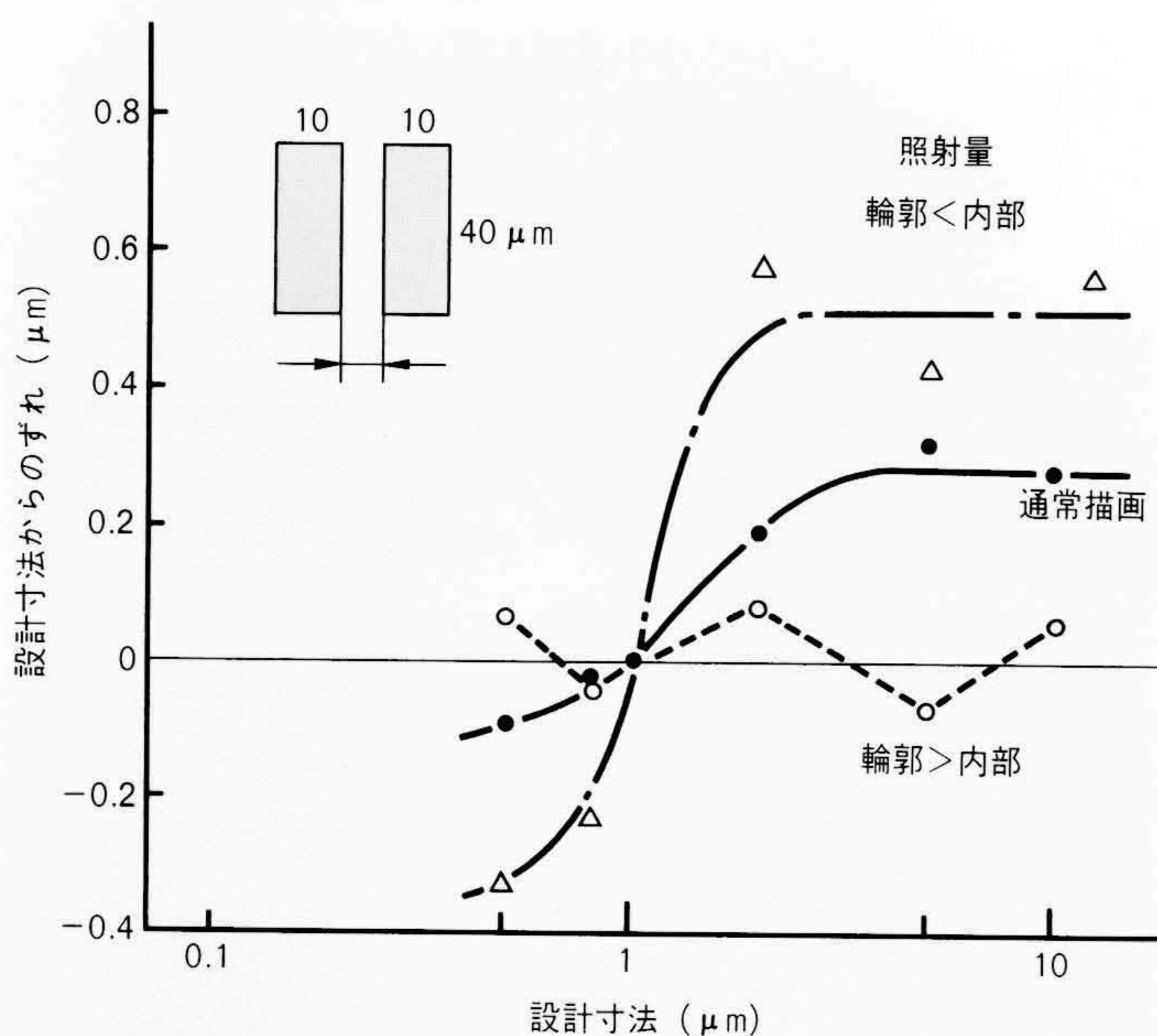


図15 輪郭分解描画による近接効果補正 輪郭部と内部の照射量(ドーズ)を適当に選べば、設計値からのずれの寸法依存性を小さくすることができる。

が等しく、約 $20 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ である。この照射量を基準にして、輪郭部1.2倍、内部0.8倍の照射量の場合と、輪郭部0.8倍、内部1.2倍の照射量の場合につき描画した。横軸にスペースの設計寸法、縦軸に設計寸法からのずれを示した。スペース寸法は電子ビーム測長装置により測定した。同図から、通常描画の場合には、スペース寸法が小さくなるにつれ設計値からのずれが小さくなり、 $1 \mu\text{m}$ 以下では実際の寸法は $1 \mu\text{m}$ より小さくなる。今の場合、照射量は $1 \mu\text{m}$ スペースで設計値と実際の値が等しくなるように設定されている。さて、この傾向は輪郭部照射量を減らし、内部を増した場合には、より大きくなる(一点鎖線)。その逆に、内部を減らし、輪郭部を増した場合は $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ のスペースにわたり、設計寸法からのずれは $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以内に収まっており、近接効果の補正がなされていることが分かる。従来、このような補正はソフト的になされていたが⁷⁾、本装置ではハードウェアにより簡易に行える。

5 結 言

$0.1 \mu\text{m}$ レベルのLSIを描画できる電子ビーム描画装置HL-700Fを開発した。本装置実現のために特に開発した技術は、(1) Ti/W-TFE銃、(2) 高速3段偏向系と10 ns応答の8ビット偏向系、(3) ビーム径可変光学系と輪郭分解データ処理系、である。

HL-700Fの総合性能として、(1) $0.1 \mu\text{m}$ レベルLSIのパターンの描画、(2) 合わせ精度 $0.04 \mu\text{m}$ 及び(3) $0.1 \mu\text{m}$ レベルでスループット1ウェーハ/時を確認した。現在、この装置は日本電信電話株式会社 NTT LSI研究所と日立製作所中央研究所で稼動し、先端デバイスや極限素子の研究に活躍中であり、デバイス面での興味ある結果も出つつある。装置面では要素技術を更に改良し、より高速化、高精度化が必要と思われる。

終わりに、本装置の研究開発に当たり、日本電信電話株式会社 NTT LSI研究所の指導を受けた。ここに深謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 鉾谷, 外: 高速・高精度電子ビーム描画装置, 日立評論, **65**, 7, 469~474(昭58-7)
- 2) 中村, 外: 電子線描画装置の高度利用技術の開発, 日立評論, **68**, 9, 699~704(昭61-9)
- 3) N. Saitô, et al.: Electron Optical Column for High Speed Nanometric Lithography, Microelectronic Engineering **5**, 123(1986)
- 4) S. Hosoki, et al.: Ti/W(100) Field Emission Source, Proc. XIth Int. Cong. on Electron Microscopy, Kyoto, 219 (1986)
- 5) L. Swanson, et al.: J. Vac. Sci. Technol. **12**, 1228(1975)
- 6) T. Matsuzaka, et al.: A High Speed Nanometric Electron Beam Lithography System, Proc. SPIE, **773**, 234(1986)
- 7) F. Murai, et al.: Electron Beam Direct Writing Technology for LSI Wiring Process, Proc. IEEE. IEDM **83**, 558(1983)