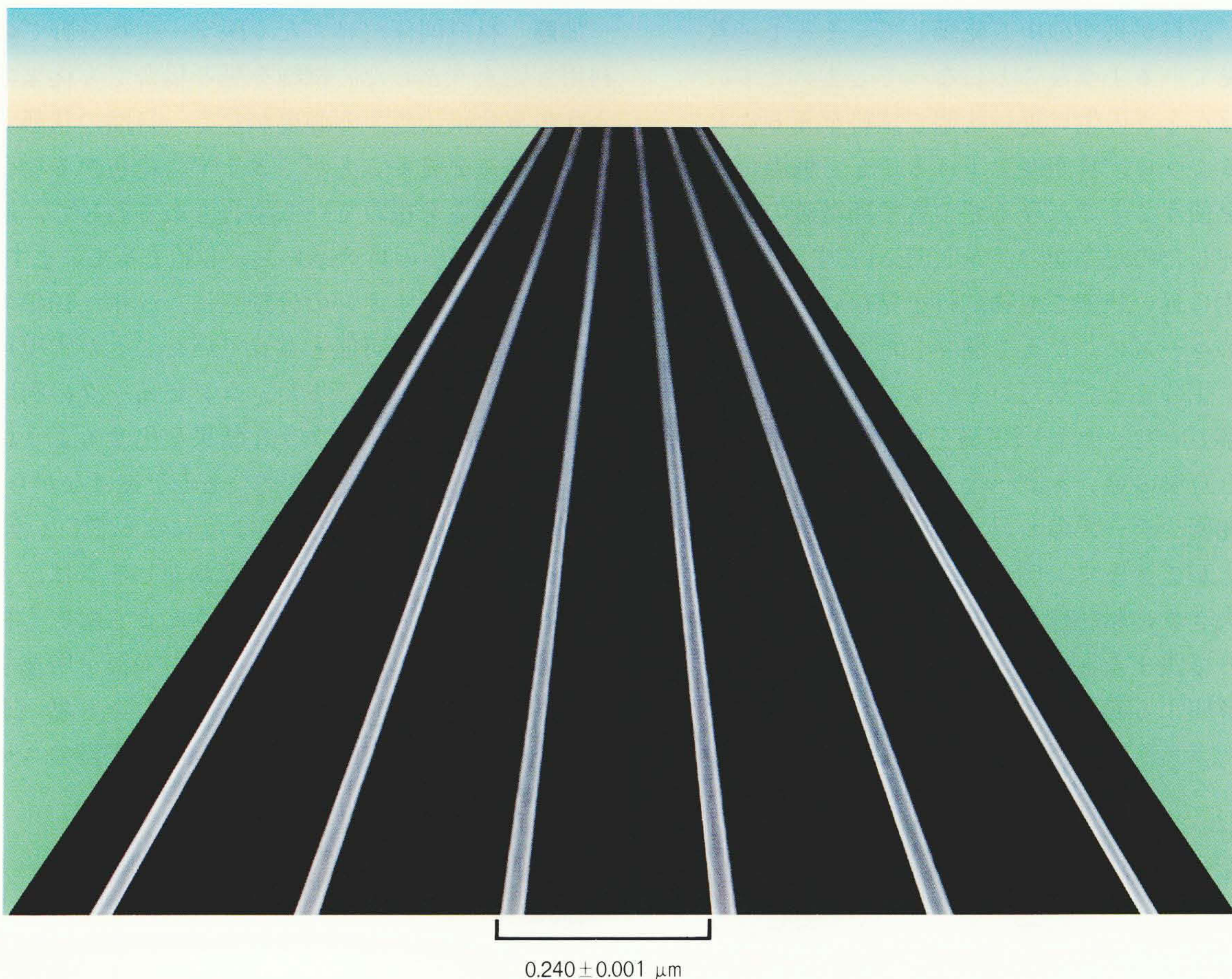


電子・イオンビームを用いた観察・分析技術の動向

Observation and Analysis Using Electron and Ion Beam Technologies

水野文夫* *Fumio Mizuno*

中泉 泰** *Yasushi Nakaizumi*



パターン寸法校正用標準試料「マイクロスケール」のSEM(走査電子顕微鏡)像

レーザ干渉露光法と異方性エッチング技術を用いて、シリコン基板上に精密加工されたライン・スペースパターンを描く、半導体デバイスなどの高精度観測を可能とする精度1 nmの世界である。

電子・イオンビームを用いた観察・分析技術により、ミクロのものの組成、化学結合状態、結晶構造・原子配列を容易に観察することができる。この技術は、半導体デバイスなどの高度技術製品の開発に不可欠であり、それゆえに、現代の高度技術社会を支える基盤技術の一つといっても過言ではない。

従来は、学術研究用としてのイメージが強かったが、現在では製造装置としての役割も果たし、その

重要性がますます増してきている。観察・分析装置としての課題は、極微小部・極微量成分の観察・分析を実現していくことと、観察・分析作業の経済性の推進である。そのため、種々な観察・分析技術を有機的に使い分け、各装置から得られる情報を統合的・系統的に解釈し、正確かつ迅速な判断を下せるようにするべく総合的・組織的な観察・分析技術の開発に取り組んでいる。

* 日立製作所 計測器事業部 技術士(電気・電子部門) ** 日立製作所 計測器事業部

1 はじめに

「より遠くにあるものを見てみたい」、「ミクロの世界をのぞいてみたい」という願いは、人間生来の欲求である。この欲求が、望遠鏡や顕微鏡を発明させ、人間に視力を超える能力を与えた。視力を超えてものを観察することができるということは、科学・技術発展の推進力となる。望遠鏡や顕微鏡の誕生が科学・技術の発達を加速し、科学・技術の進歩が望遠鏡や顕微鏡をさらに高性能なものとしてきた。

顕微鏡については、1600年代に発明された光学顕微鏡を嚆矢(こうし)とする。1,000倍程度に拡大した光学顕微鏡像を観ることから始まり、1930年代の電子顕微鏡の発明がわれわれに極微世界への扉を開いてくれた。現在では、電子顕微鏡を用いて「もの」を構成する原子の姿を観察することも、イオンビームを利用してものの表面を削りとり、ものの内部をのぞき見ることも可能である。

また、このような電子ビームやイオンビーム技術の進歩は、形状の細部が鮮明に見えるということでの、人間の視覚機能の強化を果たしただけではない。ものがどんな組成をしているか、その化学結合状態はどうか、それらはどんな結晶構造・原子配列をしているのかといった疑問にも答えてくれる。すなわち、われわれにとっては、人間の五感を超えた能力を与えてくれる技術「物理分析技術」である。

このように、電子およびイオンビームを用いた観察・

分析技術は、現代の高度技術社会を支える基盤技術の一つであると言える。

ここでは、電子・イオンビームを用いた観察・分析技術の現状と今後の動向について、半導体分野への適用を中心に述べる。

2 電子・イオンビームを用いた観察・分析技術

電子ビームやイオンビーム、または光ビームを試料の観察・分析したい部分に照射すると、入射ビームと試料物質との相互作用が生じる。相互作用の結果、入射ビームが試料物質で変調され、あるいは試料物質を励起し、電子・イオンおよび光子の粒子が試料外部に放出される。放出された粒子は試料物質に関連した情報を担っている。これらの放出粒子を検出・解析することにより、試料物質の表面形態、組成、化学結合状態、および結晶構造・原子配列についての知見が得られる。その原理を模式的に図1に示す。

入射ビームを試料表面上で二次元走査すれば「走査像」が、透過粒子または反射粒子を投影光学系に通して結像すれば「透過像あるいは反射像」がそれぞれ形成できる。また、入射ビームを一次元走査すれば「ラインプロファイル(線分析結果)」が得られ、1点照射の状態を保てば「点分析」が行える。観察時の解像度・分析時の最小分析領域は、入射ビームのビーム径、侵入深さ、および検出粒子の脱出深さによって決まる。ビーム径が小さく、侵入深さや検出粒子の脱出深さが浅いほど高い解像度が得られ、より小さな領域での分析を行うことができる。電

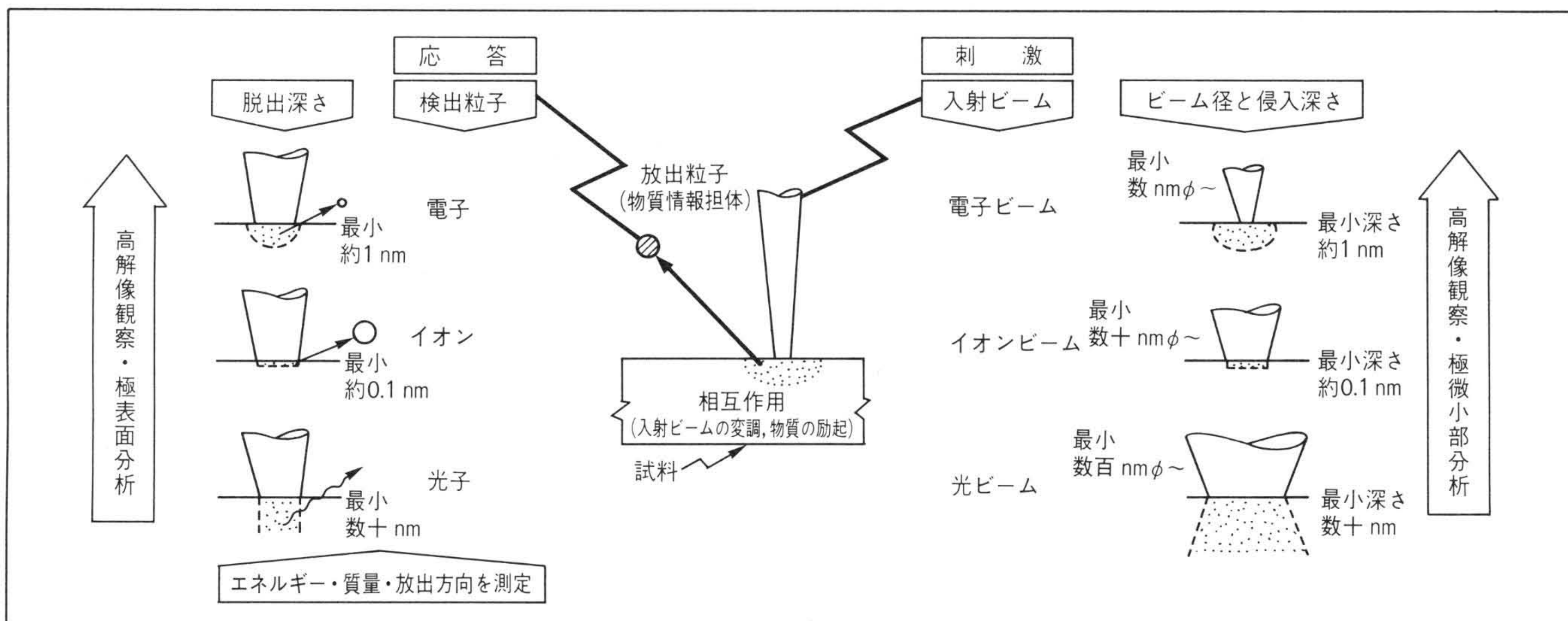


図1 観察・分析の原理

電子ビームやイオンビーム、または光ビームを試料の観察・分析したい部分に照射し、照射部分から放出される粒子を検出する。

子ビームやイオンビームは、光ビームに比べて、より高解像度での観察・微小部の分析に適した技術である。

侵入深さは、同じ入射エネルギーであれば、一般的にはイオンビーム<電子ビーム<光ビームの順に深くなる。放出粒子の脱出深さについては、特性X線の脱出深さがミクロン程度であるのに対し、二次電子の脱出深さは10 nm程度と浅い。電子ビームやイオンビームを用い、二次電子を信号源として検出する観察・分析方法は、一般的に、解像度に優れ、表面分析に適している。

一方、得られる情報の量すなわち放出粒子の多様さは、入射ビームのエネルギーに依存する。入射ビームのエネルギーが高いほど励起粒子の種類も多く、より多量の情報が獲得できる。電子ビームやイオンビームは、高いエネルギーを光ビームに比べて容易に持たせることができる。電子ビームやイオンビームを用いれば、伝導帯電子の励起から素粒子の励起まで、幅広い情報が得られる。

電子ビームを利用した各種分析法を図2(a)に示す。TEMおよびSEMが代表的な観察・分析装置であり、微細構造の観察・分析には不可欠のものである。SEMの信号源として、オージェ過程による特性エネルギー損失電子(オージェ電子)を検出すればAESとなり、特性X線を検出すればEPMAとなる。

イオンビームを利用した各種分析法を図2(b)に示す。SIMS、IMAおよび集束イオンビーム装置(FIB装置)が代表的な手法である。特に、極細イオンビームを用いるFIB技術は、今や半導体デバイス解析の必須(す)技術となり、近年での進歩が目覚ましい。これは、FIB技術の誕生が、従来不可能とされていた試料の高精度・微細な三次元加工を可能としたことによる。FIB装置による微細加工・三次元加工の技術は、イオンビームの特徴であるスパッタリング現象やイオンビームアシスト反応を利用したものであり、試料の局所断面観察・分析を可能にするなど、観察・分析技術の適用分野を大きく広げつつある。これらの分析法とそれによって得られる情報をまとめて図3に示す²⁾。

電子顕微鏡とFIB装置を中心に、その現状と今後の動向について以下に述べる。

3 電子顕微鏡の性能推移と現状

観察装置の解像性能は分解能で表される。日立製作所での電子顕微鏡の分解能推移について以下に述べる。TEMでは、最初の製品であるHU-2を1943年に名古屋大学に納めた。HU-2の点分解能は5 nmである。その後、

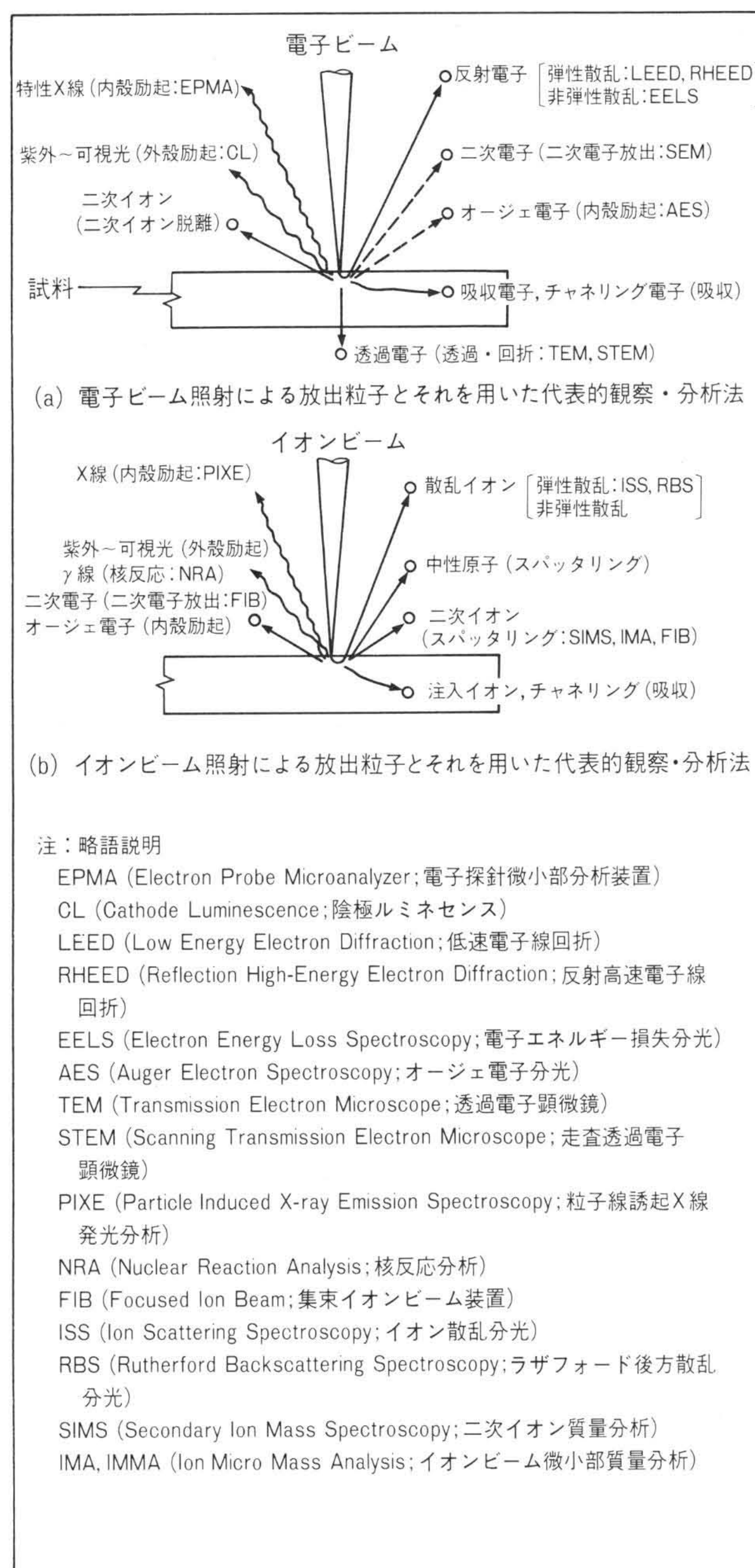


図2 電子ビームおよびイオンビームを用いた代表的観察・分析法

電子ビームを利用した手法ではSEM・TEMおよびAESが広く使用されており、イオンビームを用いた技術ではFIBやSIMSが代表的である。

1950年代から1960年代にかけて電子銃や電子レンズの高性能化の研究を進め、分解能は飛躍的な向上を遂げた。現在の代表的装置である分析顕微鏡“H-9000NAR”では、0.175 nmの点分解能を得ることができる。

SEMは、1969年の“HSM-2”が初号機である。HSM-2では、ヘアピン型の熱電子放出型電子銃を用いており、20 nmの分解能を持っていた。その後、1970年代初期に、

より高輝度の電界放出型電子銃を実用化したことを契機として分解能は目覚ましく向上した。1981年に開発した“S-800”では2 nmの分解能を、1986年の“S-900”では0.7 nmの分解能をそれぞれ得ている。一方、1980年代に入り、従来の学術研究用装置としての用途に加え、半導体分野で製造装置として使用され始めるとともに、使用台数も急増した。それが、1984年の“S-6000”を嚆矢とする測長・外観観察SEMである。

4 FIB装置の性能推移と現状

FIB装置は、半導体デバイスの配線修正や電子顕微鏡試料の断面作製を目的として1980年代半ばに製品化し始めた。当初の分解能は100 nmである。

日立製作所は、IMAで培ったイオンビーム技術を生かして、1993年に“FB-2000”、“FB-4080”を開発した。FB-2000、FB-4080の分解能は25 nmであり、その後製品化したFB-4080Sの分解能は10 nmである。選択エッチング・選択ディポジション技術を駆使しての立体加工など、新しい用途への展開が今後期待できる。

5 電子・イオンビーム観察・分析技術の今後の動向

電子顕微鏡・FIB装置を問わず、最近の傾向としては、半導体分野からの要求が装置の機能増強・性能向上を促す最大の牽(けん)引車となっている。

半導体製品の高集積化・高性能化の勢いはとどまるところを知らず、半導体製造技術をますます高度で難しいものにしている。一方、製造技術が難しくなるにしたが

って、半導体製造に占める観察・分析技術の役割は重要性を増し、その適用範囲も拡大してきている。今や、観察・分析技術力の差が、半導体製品の開発力・生産技術力の差として現れるとの認識が一般的である。このような背景から、電子およびイオンビーム観察・分析技術力の強化は、半導体産業の今後を左右する重要な課題となっている³⁾。

半導体製造での観察・分析技術の役割と主な適用の対象を図4に示す。ここに見られる特徴は、観察・分析の対象となる領域がサブミクロン以下の微小な部分であることと、必要とされる情報が多様なことである。

このような半導体産業からの要求は、従来の学術研究用装置としての考え方・あり方とは大きく異なっており、電子・イオンビーム観察・分析技術の文化を大きく変えつつある。この傾向は、今後ますます強くなると思われる。これらの変革していくべき観察・分析技術の方向について以下に述べる。

- (1) 極微小部・極微量成分の観察・分析が可能
サブミクロン以下の領域が観察・分析の対象である。また、問題とすべき成分の含有量も必然的に少なくなる。しかも、3年で0.7倍というパターン微細化の流れに同期して、観察・分析技術の性能向上を進めなくてはならない。そのための技術課題は、次の3点である。
 - (a) より微細なものを観察するための高解像度化と、より微量なものを分析するための高感度化
 - (b) 観察・分析したい部分への容易かつ正確なビーム照射
 - (c) 各種観察・分析装置間で、試料やデータを有機的

入射ビーム→ 検出粒子		表面形状	組 成	化学結合状態	構造・原子配列
電 子 ビーム	→ 電 子	SEM	AES 試料破壊程度：破壊中、 SAM 代表的検出感度：0.1 %	検出可能元素：Z≥B	TEM STEM
		TEM		EELS 破壊中、Z>B, 0.1 %	LEED RHEED
	→ イオン → 光 子		EPMA 破壊中、Z≥B, 0.1 %		CL
イオン ビーム	→ 電 子	FIB			
	→ イオン		ISS 破壊中、Z≥Li, 0.1 %		ISS
			RBS 破壊小、Z≥C, 10 ⁻¹⁰ %		
			SIMS 破壊大、Z≥H, 10 ⁻⁵ % IMA		
	→ 光 子		NRA PIXE 破壊中、Z≥Na, 10 ⁻⁵ %		

注：略語説明ほか

情報深さ  (～1 nm)

 (1 nm～1 μm)

 (1 μm～)

SAM (Scanning Auger Electron
Microscope; 走査型オージェ
電子顕微鏡)

図3 各種分析法とそれによって得られる情報
電子ビームを用いた手法では二次電子が、イオンビームを利用した技術では二次イオンがそれぞれ情報源として広く使われる。

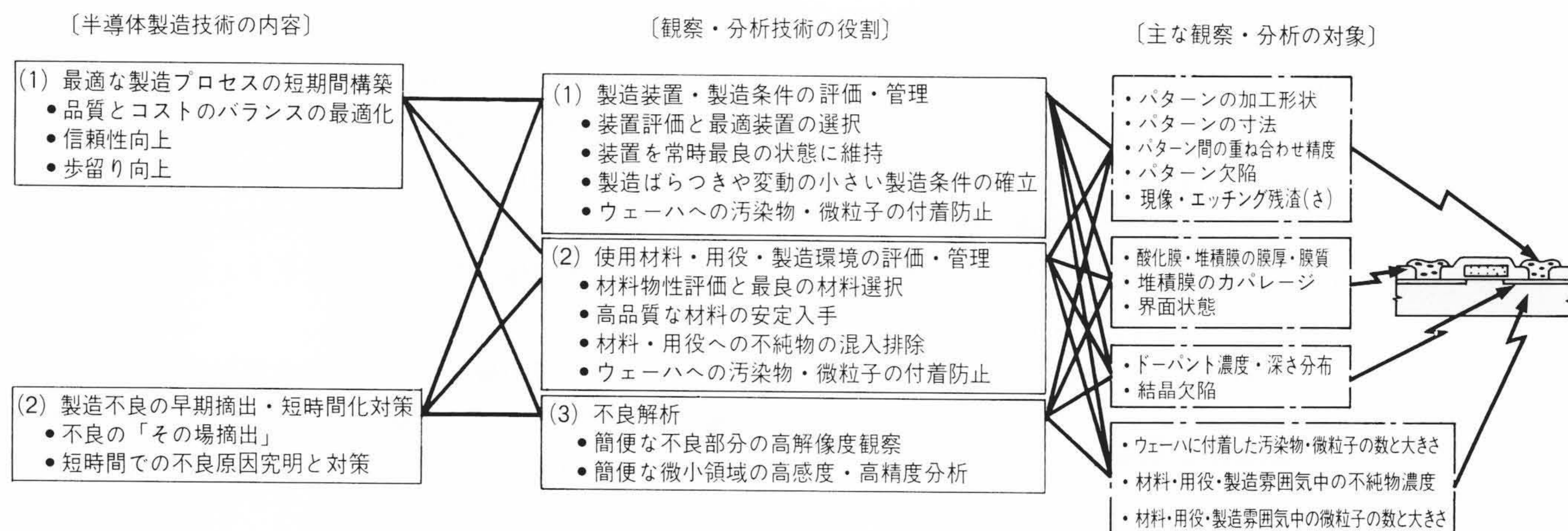


図4 半導体製造における観察・分析技術の役割と主な対象

観察・分析の対象となる領域がサブミクロン以下の微小な部分であることと、必要とされる情報が多様な点に特徴がある。

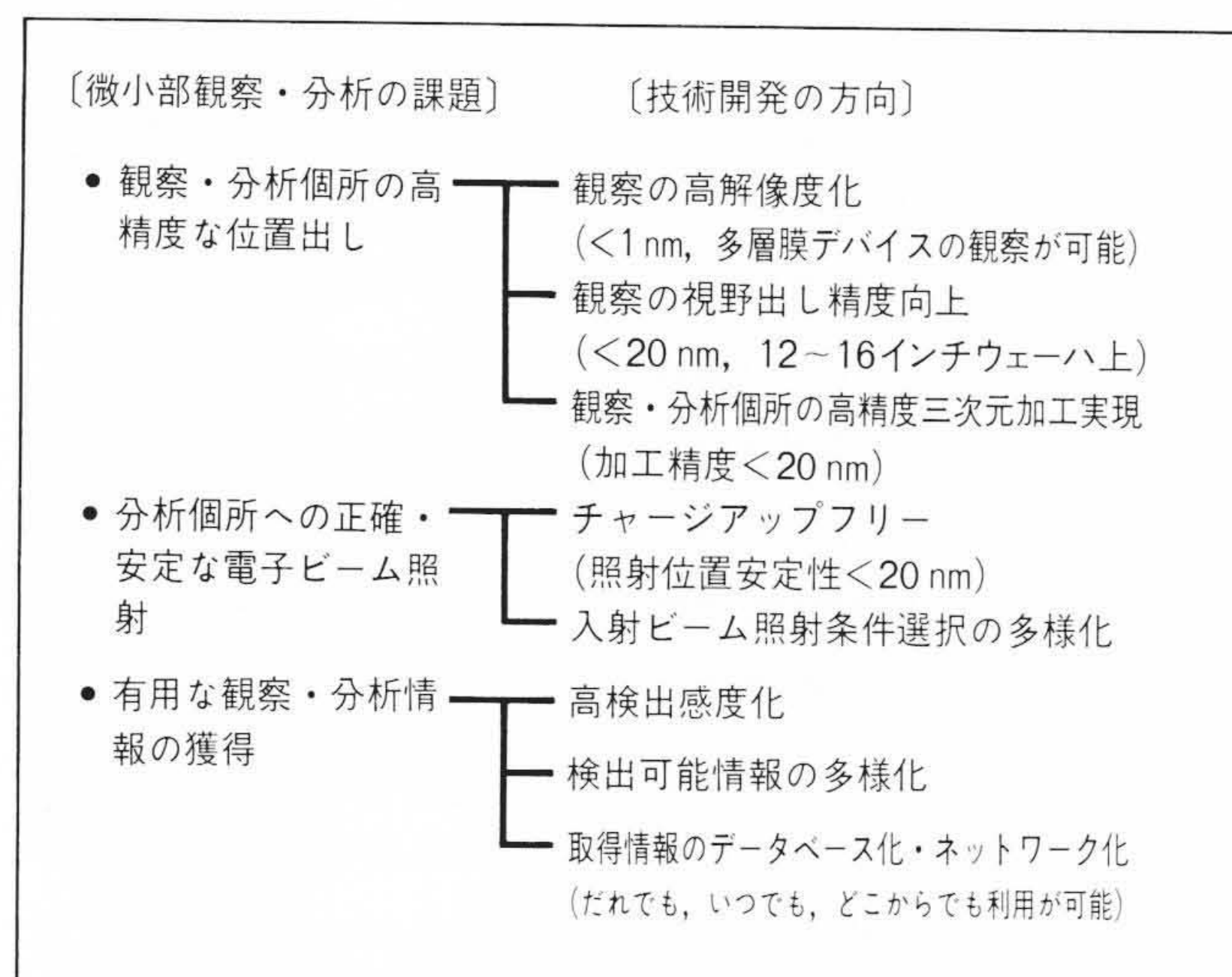


図5 微小部観察・分析のための課題と技術開発の方向

ビームをサブミクロン以下の領域に正確に照射し、必要とする情報を高感度で検出することが課題である。

にやりとりできることと、得られた多種の情報を統合的、系統的に解釈できること

各技術課題に対する技術開発の方向を図5に示す。

(2) 経済的な観察・分析作業の実施

初期投資としての装置価格だけでなく、ランニングコストの低減も念頭に置いた装置・技術開発が重要とな

る。そのために目指すべき技術の方向は、(a) 観察・分析装置の運転費用削減、(b) 操作・解析の人的費用削減、(c) 観察・分析装置の稼働率向上の3点である。

6 おわりに

ここでは、電子・イオンビームを用いた観察・分析技術の概要・動向とその課題、および今後の技術開発の方向について述べた。

この技術は、半導体デバイスなど高度技術製品の開発・生産に不可欠な基盤技術として、その重要性が増大してきている。このような周囲環境の変化は、従来の学術研究用の色彩が強い装置から、製造装置への転換を促すものである。観察・分析装置の製造装置としての課題は、極微小部・極微量成分の観察・分析を実現していくことと、観察・分析作業の経済性の推進である。今後、このような考え方に沿って装置・技術の開発を進めていく。

製造には多様な情報が要求される。単独の装置・技術で要求に足る情報を取得・提供することは不可能である。そのため、種々な観察・分析技術を有機的に使い分け、各装置から得られる情報を統合的・系統的に解釈し、正しい判断を正確かつ迅速に下せるようにすることが必須である。これに向け総合的・組織的な観察・分析技術の開発に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) S.トランスキー, 砂川訳: 光学の世界, 講談社(1970)
- 2) 氏平: 固体表面/微小領域の解析評価技術, リアライズ社(1991)
- 3) 戸所, 外: 高アスペクト比ホール寸法測定を可能にした高エネルギー走査電子顕微鏡「ミラクルアイ」, 日立評論, 76, 7, 543~546(平6-7)