

冷陰極電界放出型分析電子顕微鏡による 極微小部分析

Cold Field Emission Analytical Electron Microscope

村越久弥* Hisaya Murakoshi

市橋幹雄*** Mikio Ichihashi

柿林博司** Hiroshi Kakibayashi

比留間健之** Kenji Hiruma



300 kV冷陰極電界放出型分析電子顕微鏡

この分析電子顕微鏡は、情報分解能0.1 nm、分析プローブ径0.8 nmの性能を持ち、半導体、光、磁気デバイスなどの極微小部の計測評価に必要不可欠なツールとなっている。

超LSI、高密度磁気記録材料などの最先端デバイス、材料の研究開発には、サブナノメートル領域の構造を分析評価することが必須(す)事項となっている。このニーズにこたえるために、高輝度でかつ単色性に優れた冷陰極電界放出電子源を搭載した加速電圧300 kVの分析電子顕微鏡を開発した。この分析電子顕微鏡は、原子レベルの分解能で試料構造が観

察できると同時に、電子ビーム径を0.8 nmと細く絞って試料に照射し、極微小部の元素組成などの情報を得ることができる。

この装置を用いた極微小部の計測評価により、半導体デバイスの不良解析、量子デバイスの成長メカニズムの解明などに有効な知見が得られている。

* 日立製作所 中央研究所

** 日立製作所 中央研究所 工学博士

*** 日立製作所 計測器事業部 工学博士

1 はじめに

最近の高機能材料や大容量・高速デバイスは、1 nm領域あるいはサブナノメータ領域の構造や組成の変化によって特性が著しく変動するようになっている。従来、熱電子源を搭載した電子顕微鏡は結晶構造などの高分解能観察装置として用いられているが、10 nm以下の微小領域での元素分析は熱電子源の平均輝度の制約から不可能であった。したがって、極微領域の構造や組成を評価することができる高性能分析装置の開発が強く望まれていた。

このような背景から日立製作所は、熱電子源に比べて平均輝度が約千倍大きく、エネルギー幅も0.2~0.4 eVと小さい冷陰極電界放出電子源を搭載した、加速電圧200 kVの冷陰極電界放出型電子顕微鏡“HF-2000”を1989年に製品化した。この電子顕微鏡により、情報分解能0.16 nmの高分解能観察および1 nm領域の元素分析が可能となり、半導体デバイスの界面不純物の分析や、金属合金中の積層欠陥部に不純物が集中する効果(鈴木効果)^{*)}の検証などの成果をあげている¹⁾。

今回、さらに高度化したサブナノメータ領域の計測評価に対応するため、分析および観察性能を向上させた加速電圧300 kVの冷陰極電界放出型電子顕微鏡を開発した²⁾。ここでは、この装置の概要と応用例について述べる。

2 装置構成と基本性能

この装置では、W<310>電界放出電子源を室温で動作させている。300 kVまで加速した電子ビームのエネルギー幅を図1に示す。通常使用条件で0.45 eV(熱電子源の約 $\frac{1}{5}$)の半値幅が得られ、色収差が大幅に低減されて分解能が向上する。

電子線照射系は3段照射レンズ構成とした。像観察モードでは照射系倍率を「拡大」にして、高分解能観察時に試料を平行照射できるようにしている。一方、分析モードでは照射系倍率を「縮小」にして、試料上で極微小プローブが得られるように最適化している。

像観察モードで撮影したカーボン膜の高分解能像とその光回折像を図2に示す。光回折像からこの開発装置の情報分解能が0.11 nm、すなわち原子サイズであることがわかる。

分析モードでは、直径0.8 nmの電子線プローブを試料に照射し、元素分析することができる。この装置には、エネルギー分散型のX線分析システムを付属している。

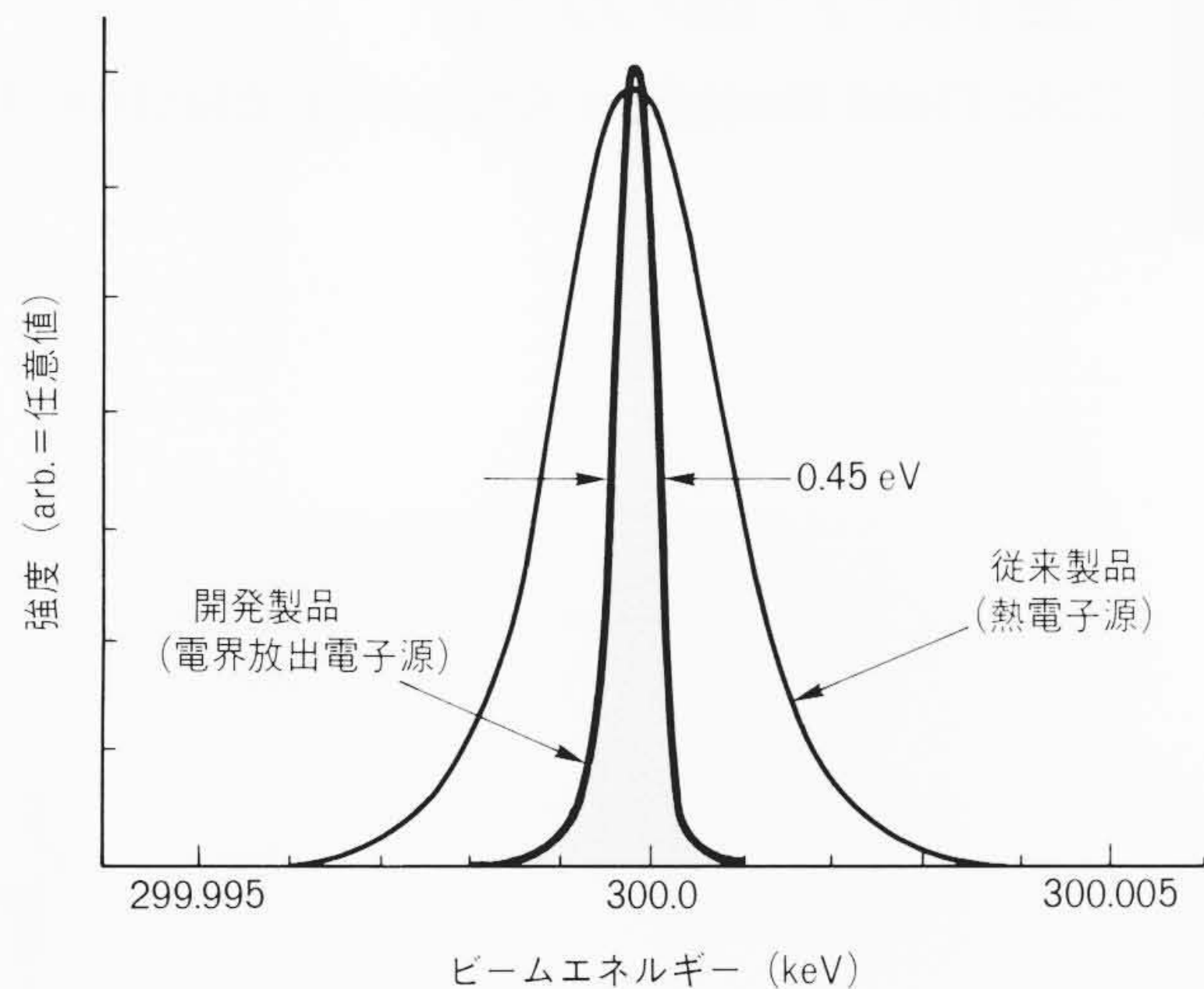


図1 電子ビームのエネルギー幅

電子線損失分光器を用いて、エネルギー幅を測定した。通常使用条件で0.45 eVの半値幅が得られている。

電子線励起によって試料から発生する特性X線の検出により、元素の同定と定量ができる。

このように、この装置は原子レベルの構造観察と元素分析が両立できる特徴を持つ。

3 応用例

3.1 バイポーラトランジスタの分析

集束イオンビームによって試料作製した超高速シリコン バイポーラ トランジスタをこの装置で分析した結果

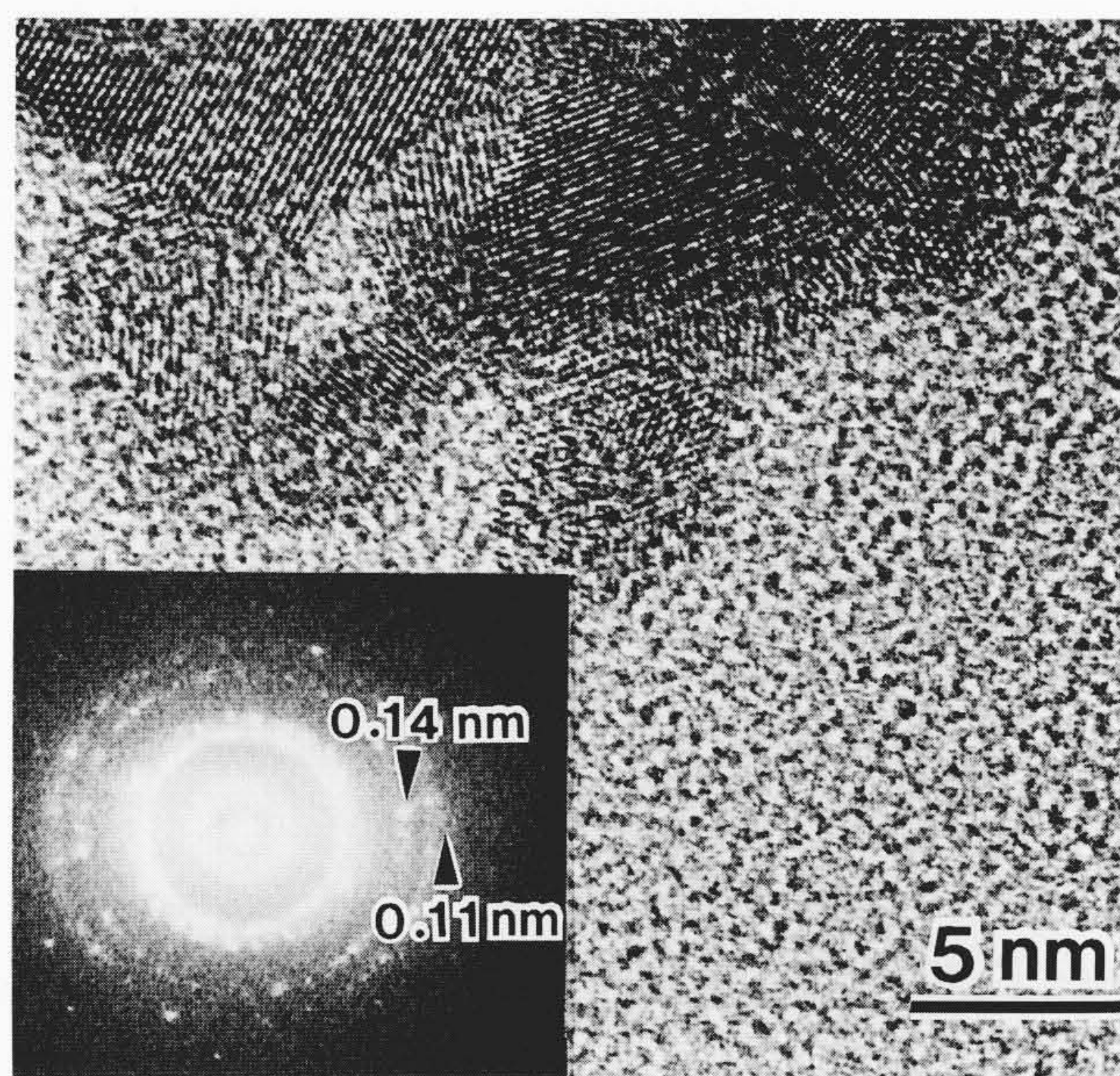


図2 カーボン膜の高分解能像と光回折像

光回折像では、Au<220>=0.14 nmを参照として、0.11 nmの情報分解能を決定した。

を図3に示す。バイポーラトランジスタでは、デバイス特性の一つである電流利得が小さくなる現象が、少ない頻度ではあるが生じていた。この特性を左右する要因としては、多結晶Siエミッタと基板との界面の状態が関係することが予想された。そこで、この装置を用いて、電流利得が大きい試料と小さい試料について、界面近傍の構造と組成を評価した。

トランジスタの基板界面付近の高分解能像を図3(a)に示す。電流利得が大きい試料では、基板と多結晶Siでは結晶方位が異なっているが、電流利得が小さい試料では多結晶SiおよびSi基板中で(111)面の格子像が観測され、界面で格子像が連続しており、エピタキシャル成長していることがわかった。

次に、直径0.8 nmの電子線プローブを用いて界面をはさんで5 nm間隔で ρ 濃度を分析した結果を図3(b)に示す。電流利得が小さい試料では界面の偏析が観測されないのに対し、大きい試料では界面で粒内より3倍から5倍濃度が高い ρ の偏析が観察できた。

なお、この検討では集束イオンビーム加工により、対象となるトランジスタを直接電子顕微鏡で分析した。この方法は、今後も不良解析などでますます有効な手法となることが予想される。

3.2 GaAs(ガリウムヒ素), InAs(インジウムヒ素)量子細線の分析

太さ100 nm以下の細線状の領域に電子を閉じ込めると、量子サイズ効果によって新しい超高速デバイスが実

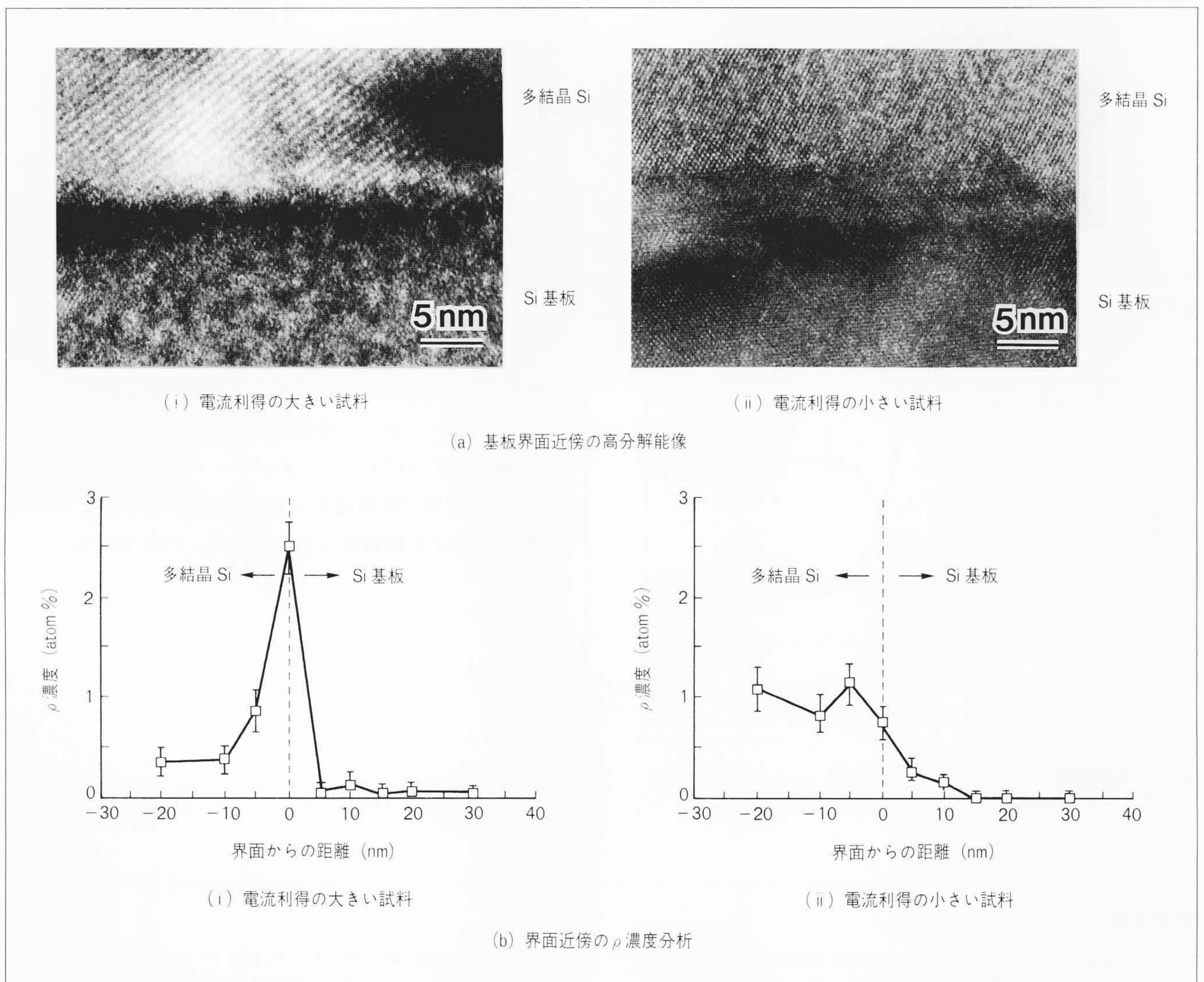


図3 バイポーラトランジスタの分析

高分解能像から電流利得の小さい試料の界面でエピタキシャル成長しているのがわかる。分析結果から、電流利得の大きな試料の界面で ρ の偏析が観測される。

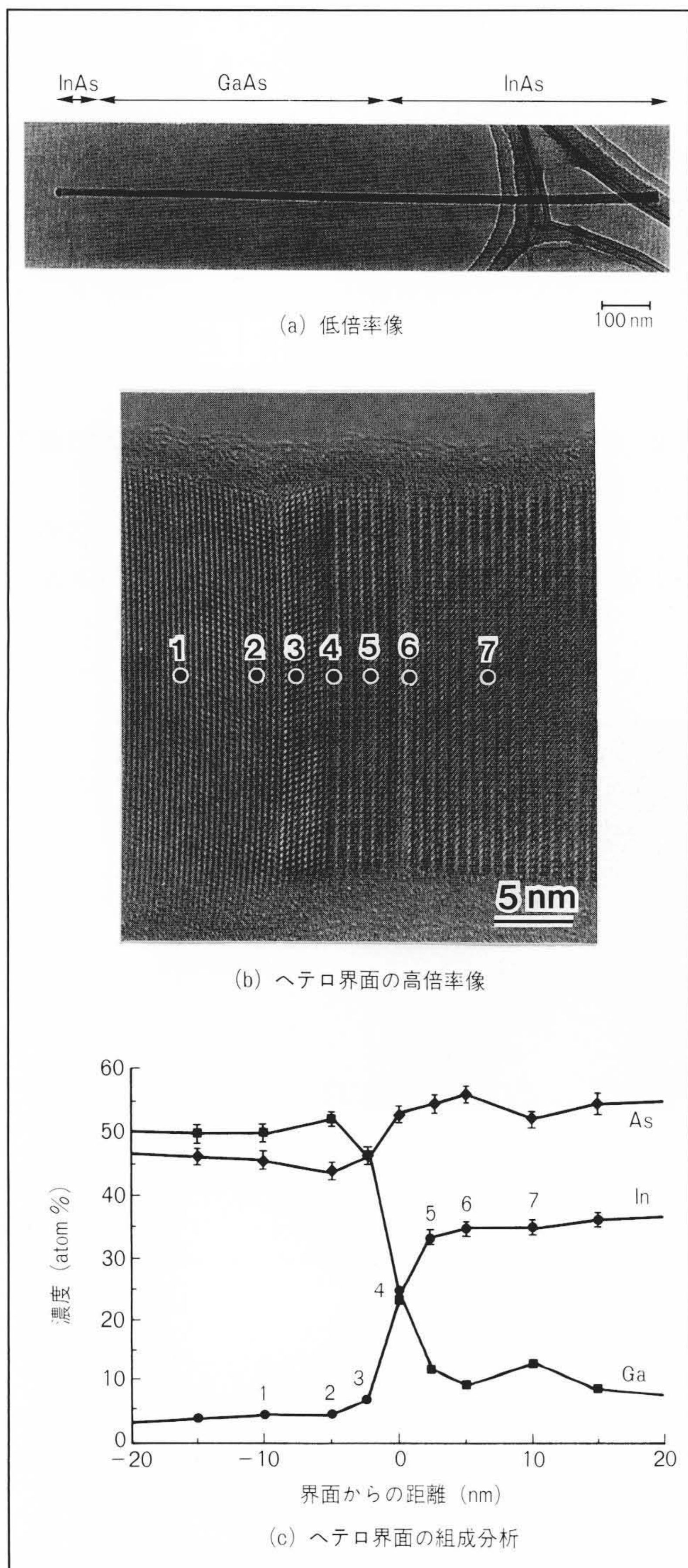


図4 量子細線ヘテロ界面の観察と分析
ヘテロ界面の急峻性が5 nm以下であることがわかる。

現できる可能性がある。この細線は、例えば有機金属の熱分解を利用した気相成長法を用いて形成され、最近では成長位置、組成、界面形成が制御できるようになった。しかし、細線結晶の成長メカニズムや界面の組成変化幅の急峻(しゅん)性については解明されていないので、細線先端部とヘテロ界面の極微小部分分析によってそれらの解析を試みた³⁾。

測定試料は、GaAs基板にAuを付着させ、420℃でInAsおよびGaAsを成長させた、図4に示すような直径約15 nmの細線である。先端部に球状粒子が観察され、線のほぼ中央部にGaAsとInAsのヘテロ界面が存在する。ヘテロ界面をはさんで2.5 nm間隔で分析したところ、5 nm以下の急峻性でGaAsからInAsへ組成変化していることがわかった。また、先端の球状粒子はAuとIn, Asの合金であることがわかり、量子細線がAu粒子を核として成長することが明らかとなった。

4 おわりに

300 kV冷陰極電界放出型分析電子顕微鏡を用いたULSI(Ultra LSI)、新材料の高分解能像観察と極微小部分分析により、不良解析、成長メカニズム解明などに有効となる知見が得られた。この装置は、今後ますます微細化するニーズにも有効な評価装置として期待できる。

なお、この装置をベースとした分析電子顕微鏡が製品化(型式: HF-3000)され、1995年に1号機が納入されている。

この研究の一部は、通商産業省産業技術研究開発制度の一環としてNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)からFED(新機能素子研究開発協会)を通じて委託された「量子化機能素子の研究開発」の成果である。

参考文献

- 1) S. Isakozawa, et al.: Nanometer Resolution Elemental Analysis Using FE-TEM, Hitachi Review, **43**, 4, 187~190(1994)
- 2) H. Murakoshi, et al.: ICEM 13-PARIS, 233(1994)
- 3) K. Hiruma, et al.: IEICE TRANS. ELECTRON., E77-C, 1420(1994)