

電子線ホログラフィによる化合物半導体のキャリア分布の観察

Observation of Carrier Distribution in Compound Semiconductors Using Electron Holography

佐々木宏和*
Hirokazu Sasaki

大友晋也*
Shinya Ootomo

松田竹善*
Takeyoshi Matsuda

石井宏辰*
Hirotsu Ishii

概要 電子線ホログラフィを用いると、半導体のキャリア分布を観察できることが広く知られており、Si半導体については多くの研究例がある。本研究では、化合物半導体のキャリア分布を観察することを目的として、試料作製及び観察手法の最適化を行った。GaAsの半導体について、pn接合が明瞭に観察できるとともに、n⁺層とn⁻層も明瞭に判別することに成功した。この手法は、半導体レーザなどの半導体製品に応用可能であり、特性及び信頼性の向上に寄与できる手法である。

1. はじめに

種々の半導体デバイスを開発するうえで、電氣的評価はもちろんのこと、設計上の構造が構築されているか否かを確認することは必要不可欠である。構造を観察する手段として、低倍率ではSEM (scanning electron microscopy)、高倍率ではTEM (transmission electron microscopy) が用いられており、研究開発のみならず、製品管理においても重要な役割を果たしている。通常のTEM法(透過像、明視野像、暗視野像、高分解能像などを指す)は、結晶の配列、転位の分布、結晶性などの情報を実空間で観察することができ、半導体材料の開発をするうえで欠かせない評価手法の1つである。しかしながらこれら通常のTEM法では、微小部の磁場及び電場の情報を得ることはできない。半導体デバイスや磁性体を用いたデバイス開発では、これらの微細な情報を必要とする場合があり、その手段の1つとして電子線ホログラフィがある。

電子線ホログラフィは、Gabor¹⁾によって発明されたホログラフィを電子線に応用したものである。外村らは²⁾、一光束の電子線ホログラフィを実現し、Möllenstedt³⁾により発明された電子線バイプリズムにより、二光束の電子線ホログラフィが実現した。その後測定装置の改良とともに、磁性体中の磁場分布や、超電導の磁束量子などの磁場観察の目覚しい研究成果が報告された⁴⁾。

電子線ホログラフィ法による半導体の観察は、1985年にFrabboniらによって初めて成功した⁵⁾。彼らの実験では、Siのpn接合に電圧を印加し、その周囲に発生する電界を捉えている。この実験は電子線ホログラフィを半導体に応用した意味で先駆的である。半導体内部の電位差を観察する事例は、Frabboniらの研究から10年以上待つことになる。最初に半導体内部のpn接合の観察に成功したのはMcCartneyらであり、

1994年に発表された⁶⁾。実際のデバイスへの応用は1999年にRauらが最初に行った⁷⁾。彼らはSiのMOSFETの観察に成功し、この研究の発表から多くの研究機関が電子線ホログラフィによる半導体観察を開始した。その後WangらがFIBを用いて作製したTEM試料のSiのMOSFETの観察に成功し⁸⁾、Twitchettらは、pn接合に電圧を印加させて電位差が増幅された研究事例を報告している⁹⁾。

これまでの半導体の観察事例は全てがSi半導体に関するものであり、化合物半導体についてのpn接合の観察事例は皆無であった。当社における半導体の製品群は化合物半導体であるため、GaAsやInPなどの化合物半導体の電子線ホログラフィ観察手法の研究を開始した。本論文は化合物半導体についての電子線ホログラフィ観察の概要と手法について述べ、実験結果の定量的な議論を行った。

2. 他のキャリア分布観察手法

半導体のドーパント分布評価とキャリア分布評価は、SIMS (secondary ion mass spectrometry) による方法、SEMによる方法¹⁰⁾、SCM (scanning capacitance microscopy) による方法などがある¹¹⁾。本節ではこれらの手法の特徴を述べ、電子線ホログラフィ法と比較する。

SIMSは試料表面に1次イオンを照射し、スパッタリング現象で放出される2次イオンを質量分析することにより、試料表面の組成を評価する表面分析法である。微量のドーパントの評価が可能であり感度は非常に高い。感度はマトリックスとドーパントの組合わせに依存するが、 $1.0 \times 10^{13} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ までの低濃度のドーパント評価が可能であり、材料及びデバイス開発では必要不可欠な装置である。しかしながら深さ方向分析評価であるため、多くは1次元の評価手法である。またSIMSはドーパントを捉える評価装置でありキャリアそのものを評価する装置ではないため、活性化していないドーパントも全て捉えることになる。

* 研究開発本部 横浜研究所

SEMは電子線を絞って電子ビームとして対象に照射し、対象物から放出される二次電子と反射電子を捉える手法である。SEMを用いる半導体観察の場合は、劈開面を用いてpnコントラストを観察することが可能である。簡便に観察できる評価手法であるため、製造や開発現場では極めて有用である。SEMのコントラストとしては凹凸や組成の違いによる情報が利用されることが多いが、半導体ではこれらに加えて、ドーパントの種類や量によってコントラストが生成することが知られている¹⁰⁾。SEMによる手法は半導体表面に吸着した酸素などの大きな影響を受けるため、定量的な評価は難しいものの、簡単に作製できる劈開試料を用いて観察できるため広く用いられている。

SCMは走査型プローブ顕微鏡の一種であり、プローブで試料表面を走査し、半導体表面に発生する電気容量を捉える手法である。この手法を用いればpnコントラストを捉えることが可能である。SCMによる手法は試料表面数nmの情報ではなく、表面から数10 nm程度の深さの情報であるため、極表面状態の影響が少なくより定量的な評価が可能である。SCMの空間分解能は金属プローブ先端の品質にも依存するが数10 nmである。

電子線ホログラフィ法は試料の内部電位を測定する方法である。上述した種々の手法と比較して利点と不利点があるが、最大の特徴として空間分解能が高いという利点がある。したがって半導体デバイスの微細化に伴い、Siデバイスの開発現場では必要不可欠な手法となりつつある。また、電位分布を評価する方法であるため、間接的にキャリア分布を評価する手法と言える。

3. 電子線ホログラフィによる半導体観察の原理

3.1 電子線ホログラフィ法

電子線ホログラフィ法はTEMの手法の1つである。電子線ホログラフィ法による成果は、アハラノフ・ボーム効果の検証が極めて有名である¹²⁾。本手法は基礎物理学の世界では歴史的に多く用いられ非常に成果をあげてきたが、民間企業の研究機関における実用材料の観察にはあまり用いられていない解析手法である。

図1に位相の揃った電子源から放出された2つの軌道を通った電子線が、観察者の目元に届く様子を示す。この観察者が観察する電子の物理現象を理解するには、次に示すシュレディンガー方程式(1)を解かなければならない。

$$\left[\frac{1}{2m} \{-i\hbar \cdot \nabla + eA(r)\}^2 - V(r) \right] \psi(r) = E\psi(r) \quad (1)$$

ここに、 e 、 m 、 ψ は電子の電荷、静止質量及び波動関数である。 $\hbar$ はディラック定数、 E は電子のエネルギー、 A はベクトルポテンシャル、また V はスカラーポテンシャルである。電子線ホログラフィ法においては、位相積分の手法であるWKB法を用いることにより解くことができ、位相変化は次の(2)式のように表せる。

$$\Delta\phi = \oint_C \left(k + \frac{V}{2E} k - \frac{eA}{\hbar} \right) ds \quad (2)$$

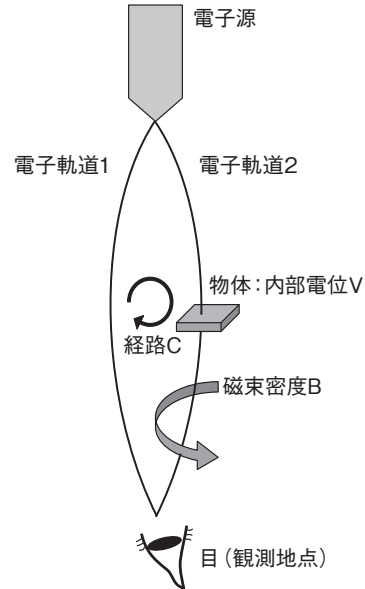


図1 電子波の位相計測
Phase measurement of electron wave.

ここで k は波数ベクトルである。(2)式の右辺の第1項は光路差による位相変化を表しており、電子線ホログラフィの実験系においては、電子軌道1と電子軌道2の光路は同じであるのでこの項は無視できる。第2項は電位による位相の変化を表している。物体が電子軌道2にのみ置かれている系では、この物体の内部電位が表現される項である。第3項はベクトルポテンシャル A による項、すなわち磁束の様子が反映される項である。以上より波動関数の位相の変化として、電子軌道に置かれた試料の内部電位の変化及び電子軌道に囲まれた面を貫く磁束が観察されることになる(図1)。この第3項に関する情報に基づいた手法は主に磁性体の観察に用いられている。一方本論文で述べる半導体内部のキャリア分布の観察は、第2項の内部電位に関する情報によるものである。

3.2 電位と位相差の関係

電子線ホログラフィを用いれば半導体中のpn接合などの電位分布を観察できることが広く知られている。電位が異なれば、(2)式の電位の項のみを抽出した次の(3)式により電子の位相差として表すことができるからである。

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda E} Vt \quad (3)$$

ここで λ は電子の波長であり E は電子のエネルギーであるので $\frac{\pi}{\lambda E}$ は定数である。また t は試料の厚さを表している。(3)式からTEM試料膜厚が一定であれば位相分布を検出することにより電位の分布を観察できることが分かる。

pn接合部では、フェルミ準位を同じレベルに揃えるように電位分布が形成される。同種の半導体であれば、n型半導体とp型半導体を持つ結晶としての平均内部電位は本来ほとんど同じであるが、フェルミ準位のシフトによって内部電位も電位分布と同じ分布を持つことになる。すなわち電子線ホログラフィ

を使うと、この見かけ上変化した内部電位を計測することが可能となる。

4. 電子線ホログラフィによる化合物半導体の観察 (劈開により試料作製した場合)

4.1 劈開試料の利点

(3) 式から明らかなように、右辺に t (試料厚さ)の情報を含むため、TEM試料の厚さが不均一であると位相像に試料厚さの情報がでてしまう。したがって均一厚さのTEM試料を作製することが必要である。しかも電子線ホログラフィ法においては、要求される試料厚さの均一性のレベルは通常のTEM法よりも高いため、機械研磨とArミリングのみを用いるTEM試料作製法では、均一な膜厚のTEM試料を作製することは難しい。またFIBで作製したとしても、大きな問題点としてTEM試料の表面にFIB加工によって形成されたダメージ層の影響がある。このダメージ層は微結晶やアモルファスであり、厚いものでは30 nmにも及び位相情報のノイズの原因にもなる。そのためここで述べる測定では劈開することによりTEM試料を作製した。この試料ではTEM試料膜厚は変化するもののその変化量が一定であるため、定量的な議論が可能になる。

4.2 劈開試料を用いた化合物半導体のpn接合の観察

4.2.1 観察条件

電子線ホログラフィ観察装置は、FE電子銃を搭載した日立HF-2000を用いた。電子線の加速電圧は200 kVである。位相像の再生はフーリエ変換法を用いた。

4.2.2 観察試料

GaAsのpn接合を観察した。n型のGaAsはシリコンがドーパされており、ドーパント濃度は $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。p型のGaAsはカーボンがドーパされており、ドーパント濃度は $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。試料作製は劈開により行った。劈開試料作製の手順を図2に示す。図に示すように劈開を2回行うことによって2つの劈開面が露出される。次に劈開した試料を45°傾斜させてTEMホルダに載せた。

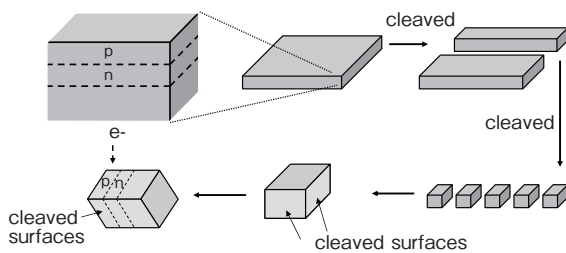


図2 劈開試料の作製方法
Preparation of cleaved specimens for electron holography.

4.2.3 観察結果

図3に観察したホログラムとホログラムから再生した位相像を示す。像の下側は真空領域である。図3(b)の位相像では、明瞭にpn接合の位置が確認される。この図において膜厚が厚い部分の位相ジャンプは曲がり方が大きくなっていることが確認される。

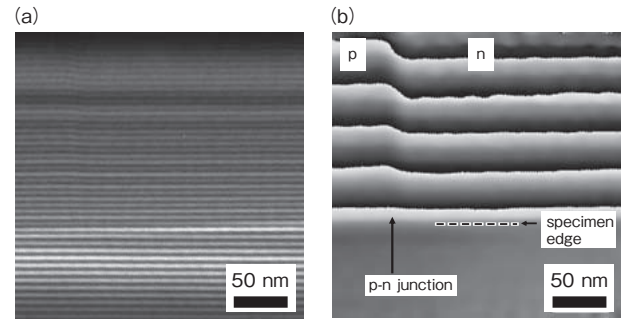


図3 GaAsの劈開試料の(a) ホログラムと(b) 位相像
(a) Hologram and (b) phase image of p-n junction in GaAs cleaved specimen.

4.2.4 位相像の解析

図3(b)に示した位相像からp型半導体とn型半導体の電位差を定量的に求めることを試みた。まずその手法について簡単に説明する。内部電位と試料膜厚による位相変化は、上述したように次の(4)式で表される。

$$\Delta\phi = -\frac{\pi}{\lambda E} Vt \equiv C_E Vt \quad (4)$$

ここで、定数項を C_E とおいた。

本実験では試料は劈開しているので試料端は90°であり、試料を水平位置から45°傾斜させたすると次の関係がある。

$$t=2x \quad (5)$$

ここで、 x は試料端からの距離、また t は試料の厚さである。よって(4)式及び(5)式から次の関係が導かれる。

$$V = \frac{1}{C_E} \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2C_E} \frac{d\phi}{dx} \equiv \frac{1}{2C_E} a \quad (6)$$

ここで、 $d\phi/dx$ は a とおいた。以上より次の(7)式が求まる。

$$V_n - V_p = \frac{1}{2C_E} (a_n - a_p) \quad (7)$$

数値解析をする場合は図4に示すように、位相像からp領域とn領域の平均プロファイルを作成し、プロファイルの傾きから a_n と a_p を求める。傾き $a_n - a_p$ から $V_n - V_p$ を計算したところ1.2 eVであった。

一方計算によって求めたp-GaAs (2e18) とn-GaAs (1e18) のフェルミ準位の差は約1.35 eVであり、実験値は計算値に近い値となった。誤差要因としては後述する表面空乏層の影響や試料の傾斜角度誤差などが考えられる¹³⁾。

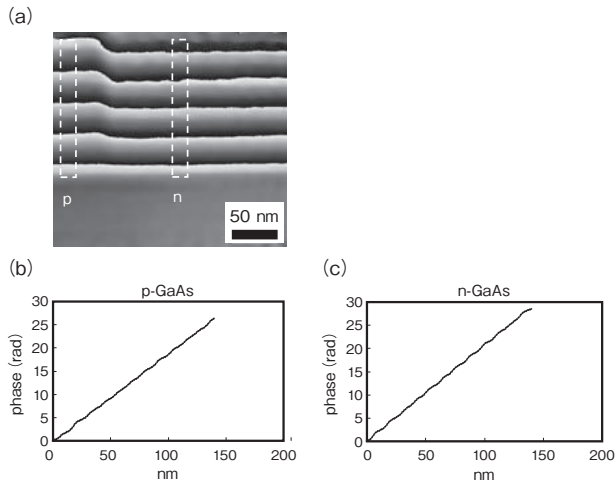


図4 (a) ホログラムと (b) p 型領域と (c) n 型領域の位相プロフィール
(a) Hologram and (b) phase profiles of p-type region and (c) n-type region.

5. 電子線ホログラフィによる化合物半導体の観察 (FIBにより試料作製した場合)

5.1 FIB ダメージ層除去の必要性

電子線ホログラフィを化合物半導体に応用するうえで重要なのがTEM試料作製である。FIBを用いればデバイスの特定箇所を加工できる利点があるものの、FIBによるダメージ層が試料表面に形成されるという問題がある。GaAs, GaN, InPなどの化合物半導体は特に顕著で、FIB加工で試料を作製した場合、30～40 kVの加速電圧のGaイオンビームを使用すると加工面に数10 nmのダメージ層が形成される。これらのダメージ層はSiの場合と異なり、アモルファス層の中に微結晶が存在するという特徴がある¹⁴⁾。この微結晶は電子線ホログラフィ観察をするうえで非常に大きな問題であり、これらの微結晶を透過する電子は回折コントラストの影響を受けノイズの原因となる。CooperらはGaAsのpn接合を電子線ホログラフィにより観察しているが¹⁵⁾、FIBのみで作製したTEM試料ではノイズが多く明瞭な位相像を再生することができていない。彼らはin-situ法でTEM試料をアニールすることにより結晶を回復させ、明瞭な像を得ることに成功している。このin-situアニール法も1つの解決手段ではあるが、全ての材料に適用できるとも限らず、また実デバイスの観察という観点からするとより迅速な試料作製手法が望まれる。

そこで本研究では図5に示すように、FIB加工後にArミリングを用いてダメージ層を除去する手法を、電子線ホログラフィ観察用のTEM試料作製に応用した。この手法を用いればダメージ層を数nmにまで低減可能である¹⁴⁾。

5.2 電子線ホログラフィによる化合物半導体の観察

5.2.1 観察試料

観察に用いた試料の模式図を図6に示す。GaAs基板の上にp-GaAsとn-GaAsの薄膜をMOCVD法で積層させたモデルサンプルである。n-GaAs中には濃度の高いn⁺領域と濃度の低いn⁻領域を作製した。この試料のn-GaAsのドーパントはシリコ

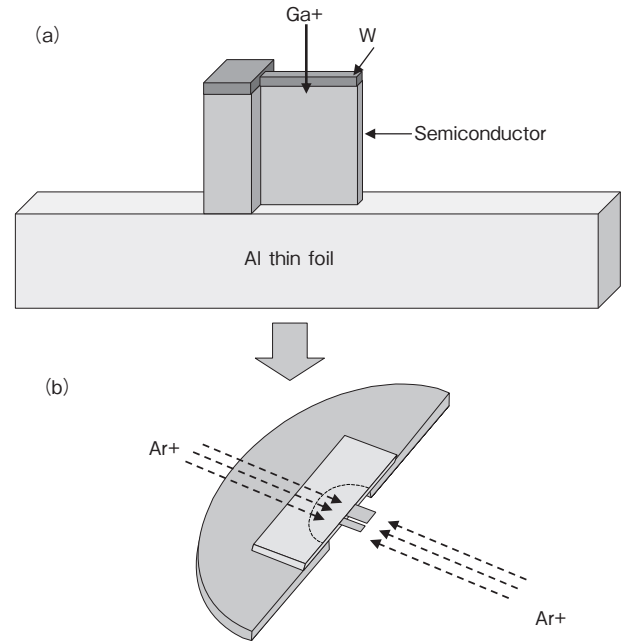


図5 FIBとArミリングを併用したTEM試料作製方法
Preparation of TEM specimens using FIB and Ar milling.

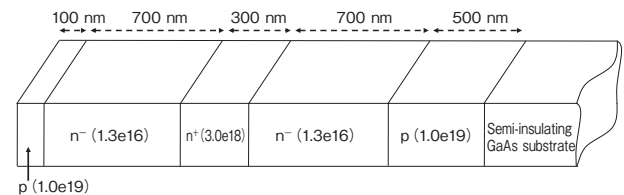


図6 GaAsのモデルサンプルの模式図
Schematic diagram of GaAs p-n-p test sample.

ンであり、p-GaAsのドーパントはカーボンである。ドーパント濃度はSIMSより求めた。ドーパント濃度はそれぞれn⁻層では $1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、n⁺層は $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、p層は $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である。

5.2.2 TEM試料作製条件

試料作製にはFIBを用いた。FIB加工装置は日立FB-2100である。Gaイオンビームの加速電圧40 kVで加工を行った。TEM試料膜厚はSIM像で観察しながら300 nmとなるように加工を行った。FIB加工後室温でArミリングを行った。Arミリング装置はGATAN Dual ion millingで、Arビームの入射角度は10°である。また試料は回転させずに5分間Arミリングを行った。

5.2.3 位相シフト電子線ホログラフィ測定条件

観察にはFE電子銃を搭載したJEOL-3000Fを用いた。電子線の加速電圧は300 kVである。ホログラムはピクセル数が 1024×1024 のGATAN 794のCCDカメラで撮影した。用いた観察条件ではCCDの1ピクセルは2 nmに対応する。パイプリズムの印加電圧は13 Vである。位相像の再生には位相シフト法¹⁶⁾を用いホログラムは13枚撮影した。

5.2.4 観察結果

図7にTEM写真を示す。試料の左側はFIB加工のためのタ

ングステン保護膜である。このTEM写真から明らかなように、ドーパントの異なる領域のコントラストは通常のTEM写真では観察することができない。図8(a)にホログラムの1枚を示す。図8(a)の点線で囲んだ領域の干渉縞についてバイプリズムによって生じるフレネル縞を除去する処理をし、コントラストを調整した干渉縞を図8(b)に示す。図8(a)ではフレネル縞の影響が大きく干渉縞は明瞭ではないが、フレネル縞を除去することにより干渉縞が明瞭になっており、ドーパントの異なる領域の界面で縞が曲がっていることが確認できる。なおこの干渉縞の間隔は約60 nmである。図8(b)のようなホログラムを13枚用いて再生した位相像を図8(c)に示す。この位相像でp領域とn領域が明瞭に区別できていることが分かる。またn領域とn⁺領域も明瞭に区別できていることが確認できる¹⁷⁾。

5.2.5 考察

図8(c)の位相像を解釈するために平均位相プロファイルを

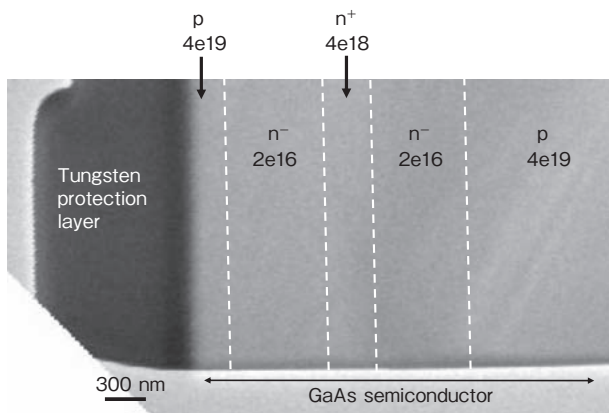


図7 FIBで作製したGaAs試料のTEM写真
Transmission electron micrograph of FIB-prepared GaAs specimen with p, n⁺ and n⁻ regions.

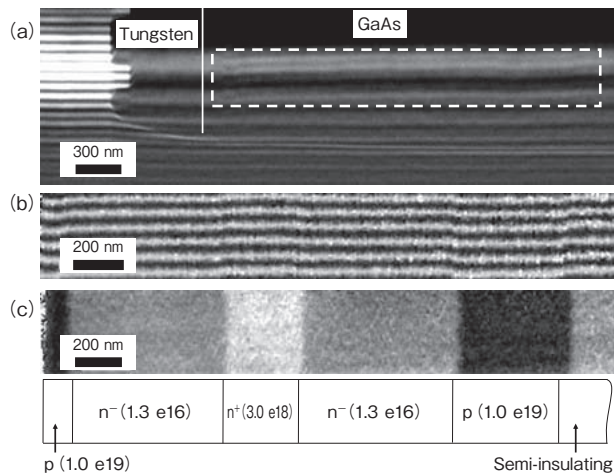


図8 ホログラムと位相像
Electron holograms and phase image.
(a) GaAs試料のホログラム
Electron hologram obtained from GaAs specimen.
(b) フレネル縞を除去したホログラム
Corrected hologram without Fresnel fringes obtained from region enclosed by broken line shown in (a).
(c) 再生位相像
Reconstructed phase image obtained from 13 holograms.

作成したので図9に示す。p領域とn領域の位相差は約1.1 radであり、n⁺とn領域の位相差は約0.8 radである。図10にSIMS測定から求めたドーパント濃度値を用いて作成した電位のプロファイルを示す。このプロファイル作成にはband calculatorを用いた。このプロファイルではn領域とp領域の電位差は約1.4 eVであり、n⁺とn領域の電位差は約0.2 eVである。電位差と位相差の関係は、(4)式を基に試料作製時のダメージ層の影響を考慮した次の(8)式で表すことができる。

$$\phi = C_E V (t - 2t_0) \quad (8)$$

ここで t_0 はダメージ層の厚さである。なお、(8)式はTEM試料内で電子線の透過方向に対して、電位が一定である場合に成立する式である。

(8)式によると電位差と位相差は比例関係が成立つが、本実験ではn領域とp領域の位相差が1.1 radに対し電位差が1.4 eVであり、n⁺領域とn領域の位相差が0.8 radに対し電位差が0.2 eVであるから比例関係が成立しない。この比例関係が成立しない原因は(8)式が成立たないこと、厳密には電子の透過

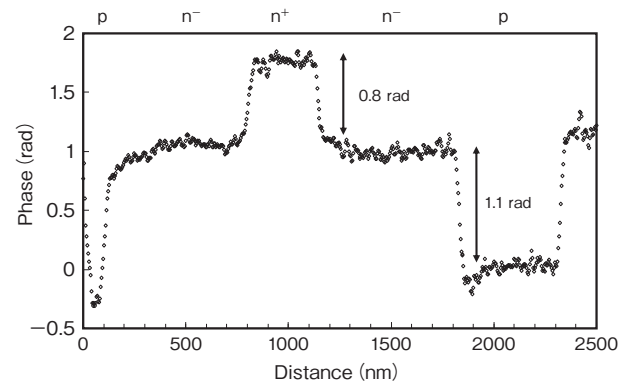


図9 位相像から作成した平均プロファイル
Averaged phase profile across p-n junction and n⁺/n⁻ interface from phase image.

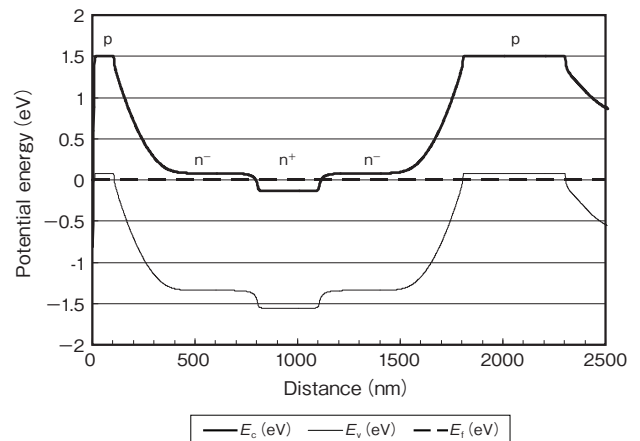


図10 シミュレーションで求めたバンド図
Band diagram of sample obtained by solving Poisson's equations self-consistently.

方向に対して電位が変化していることが原因であると考えられる。この場合電位と位相の関係は次の(9)式で表す必要がある。

$$\phi = C_E \int_0^{t-2t_0} V(z) dz \quad (9)$$

ここで z は電子の透過方向に対する成分である。電位が z 方向に変化することを考慮に入れ、 z 方向について電位の変化とキャリアの変化についてシミュレーションを行った。シミュレーションを行った方向を図11に示す。またシミュレーションをするに当たっていくつかの仮定を用いた。TEM試料表面のフェルミ準位は、伝導体の下端からp-GaAsで0.90 eV, n-GaAsでは0.65 eVとした^{18), 19)}。またドーパントは全て活性化していると仮定した。TEM試料膜厚はCBED測定から求め

280 nmである。バンド図とキャリアのシミュレーション結果を図12に示す。

図12 (a) (b) が n^+ 領域、図12 (c) (d) が n^- 領域、図12 (e) (f)

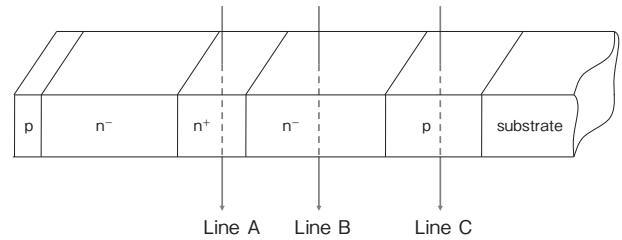


図11 シミュレーションを行った方向を示す模式図
Schematic diagram of the directions along which simulations were run.

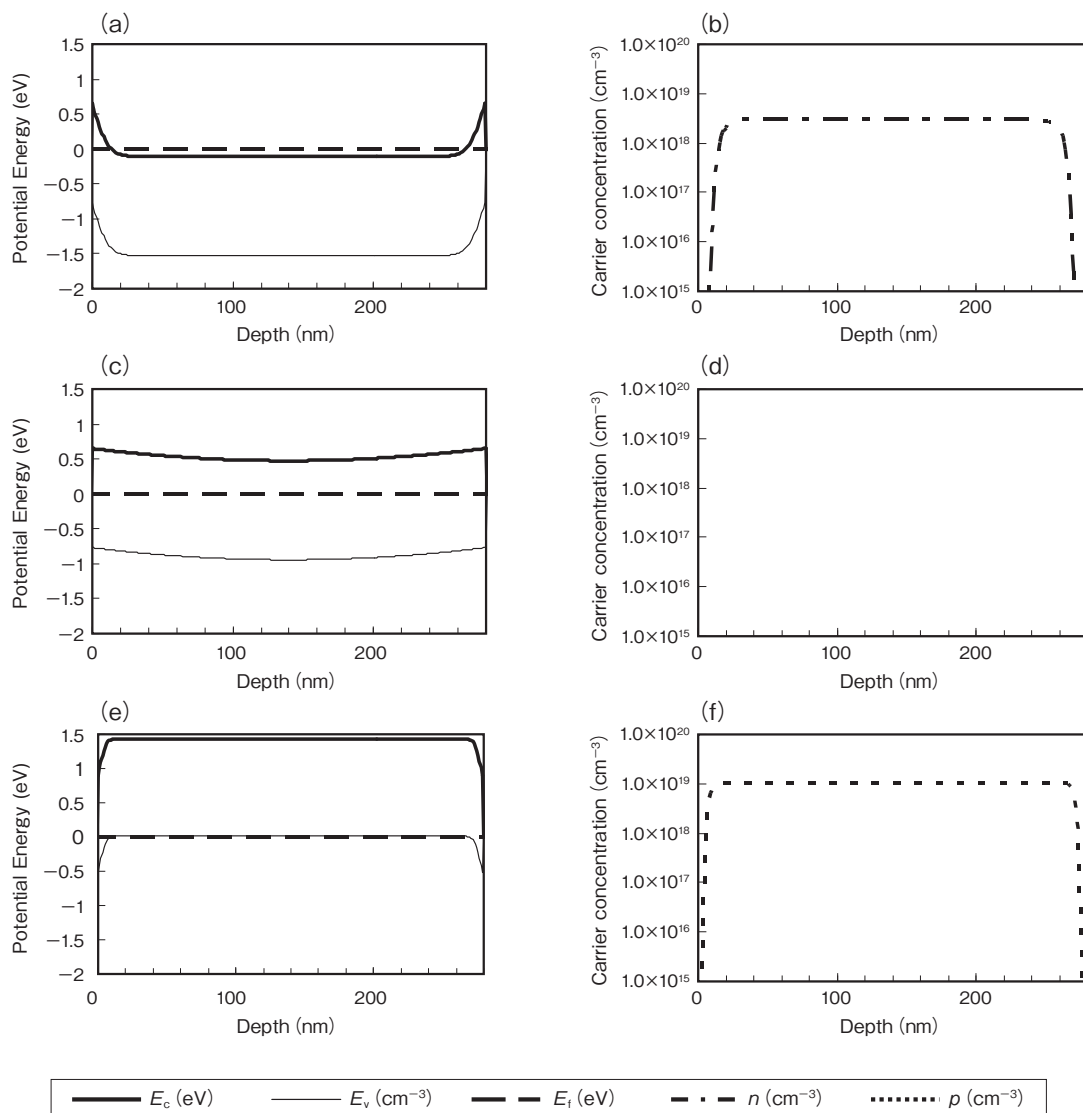


図12 TEM試料内部のバンド図とキャリア分布のシミュレーション結果
Simulations of the band diagram and carrier concentration in the TEM specimen.
(a) (b) Aライン沿いの n^+ 領域でのバンド図とキャリア分布
Band diagram and carrier concentration for the n^+ region along line A.
(c) (d) Bライン沿いの n^- 領域でのバンド図とキャリア分布
Band diagram and carrier concentration for the n^- region along line B.
(e) (f) Cライン沿いのp領域でのバンド図とキャリア分布
Band diagram and carrier concentration for the p region along line C.

がp領域を示している。ドーパント濃度の高いn⁺領域とp領域では、TEM試料表面近傍でバンドが急激に曲がっていることが分かる。またキャリアのプロファイルから、表面近傍ではキャリアが減少しており空乏化していることも確認できる。これらの領域の表面空乏化やバンドの曲がりは位相差に多少影響があるものの、TEM試料全体から見れば小さい領域なので結果には大きな影響はないと考えられる。一方n⁻領域ではバルクの状態とは大きく様子が異なっている。図12(d)ではキャリアが消失しており、図12(c)のバンド図でもバンドが全体的に曲がっている。フェルミ準位はバンドギャップのほぼ中央に位置しており、本来のn半導体からは大きく性質が異なっている。以上よりp領域やn⁺領域ではTEM試料表面近傍のみに空乏層が存在していたが、n⁻領域ではTEM試料全体が空乏化している結果となった。

これらの結果と(9)式を用いて再度位相差を計算した。その結果n⁻領域とp領域の位相差 $\Delta\phi_{n-p}$ は1.62 radであり、n⁺領域とn⁻領域での位相差 $\Delta\phi_{n+n^-}$ は1.11 radとなった。以上の解釈により比例関係では実験値に近くなったものの大きさは異なっている。これはGaイオンビームにより形成された電気的不活性層(electric inactive layer)の影響と考えられる。ここでTEM試料表面に40 nmの電気的不活性層が存在すると仮定すると、n⁻領域とp領域の位相差は $\Delta\phi_{n-p}$ は1.08 radであり、n⁺領域とn⁻領域での位相差 $\Delta\phi_{n+n^-}$ は0.84 radとなり実験結果とはほぼ一致する。

以上の実験結果から推定されるTEM試料の断面図を図13に示す。FIB加工後のTEM試料表面にはアモルファスと微結晶からなるFIBダメージ層が存在したが、Arミリングで除去した。したがってArミリングによる数nmのダメージ層が存在していると考えられる。その下にはGaイオンビーム又はArミリングで形成された電気的不活性層が存在していると予想される。更にその下側には空乏層が存在しているが、空乏層の厚さはドーパント濃度により変化する。今回観察した試料のn⁻領域では試料全体が空乏化していると考えられる。

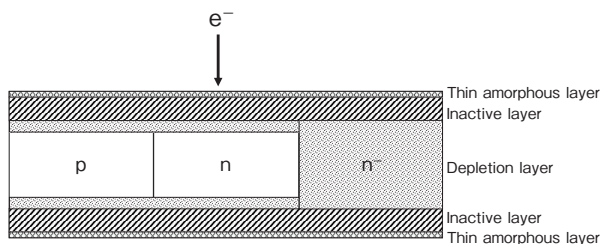


図13 推測されるTEM試料の断面図
Cross-sectional TEM specimen structure deduced by our study.

6. おわりに

電子線ホログラフィを用いてGaAsの電位分布が観察可能となった。半導体の場合電位分布はキャリアの分布に対応するので、キャリア分布を間接的に観察していることになる。また劈開試料を用いれば明瞭にpn接合を観察できることを示した。1次元の情報ではあるが、FIBダメージ層を考慮する必要がなく、

試料作製や解釈が容易である。一方FIBで試料作製した場合は、ArミリングによりFIBダメージ層を除去することが観察するうえで優位である。この場合TEM試料の両面に電気的不活性層が存在していることを示唆する結果となった。GaAsの観察ではpn接合のみならず、n型半導体中において $1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ と $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の領域を明瞭に区別することが可能であった。これらの手法は実デバイスの観察でも可能であるため、半導体デバイスの特性及び信頼性の向上に有用な手法となっている。

謝辞

最後に、共同研究者である財団法人ファインセラミックスセンター・ナノ構造研究所の平山司、山本和生及びZ. Wang(現マイクロテクノロジー)の各氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) D.Gabor: "A new microscopic principle," Nature, **161** (1948), 777.
- 2) A.Tonomura, A.Fukuhara, H.Watanabe and T.Komoda: "Optical reconstruction of image from fraunhofer electron hologram," Jpn. J. Appl. Phys., **7** (1968), 295.
- 3) G.Mollenstedt and H.Duker: "Fresnelscher interferenzversuch mit einem biprisma für Elektronenwellen," Naturwissenschaften, **42** (1955), 41.
- 4) T.Matsuda, S.Hasegawa, M.Igarashi, T.Kobayashi, M.Naito, H.Kajiyama, J.Endo, N.Osakabe and A.Tonomura: "Magnetic field observation of a single flux quantum by electron-holographic interferometry," Phys. Rev. Lett., **62** (1989), 2519.
- 5) S.Frabboni, G.Matteucci and G.Pozzi: "Electron holographic observations of the electrostatic field associated with thin reverse-biased p-n junctions," Phys. Rev. Lett., **55** (1985), 2196.
- 6) M.R.McCartney, D.J.Smith, R.Hull, J.C.Bean, E.Voelkl and B.Frost: "Direct observation of potential distribution across Si/Si p-n junctions using off-axis electron holography," Appl. Phys. Lett., **65** (1994), 2603.
- 7) W.D.Rau, P.Schwander, F.H.Baumann, W.Hoppner and A.Ourmazd: "Two-Dimensional Mapping of the Electrostatic Potential in Transistors by Electron Holography," Phys. Rev. Lett., **82** (1999), 2614.
- 8) Z.Wang, T.Hirayama, K.Sasaki, H.Saka and N.Kato: "Electron holographic characterization of electrostatic potential distributions in a transistor sample fabricated by focused ion beam," Appl. Phys. Lett., **80** (2002), 246.
- 9) A.C.Twitchett, R.E.Dunin-Borkowski and P.A.Midgley: "Quantitative Electron Holography of Biased Semiconductor Devices," Phys. Rev. Lett., **88** (2002), 238302.
- 10) F.Iwase, Y.Nakamura and S.Furuya: "Secondary electron emission from Si-implanted GaAs," Appl. Phys. Lett., **64** (1994), 1404.
- 11) A.Erickson, L.Sadwick, G.Neubauer, J.Kopanski, D.Adderton and M.Rogers: "Quantitative scanning capacitance microscopy analysis of two-dimensional dopant concentrations at nanoscale dimensions," J. Electronic Materials, **25** (1996), 301.
- 12) A.Tonomura, N.Osakabe, T.Matsuda, T.Kawasaki, J.Endo, S.Yano and H.Yamada: "Evidence for Aharonov-Bohm effect with magnetic field completely shielded from electron wave," Phys. Rev. Lett., **56** (1986), 792.

- 13) J.Li, M.R.McCartney, R.E.Dunin-Borkowski and D.Smith: "Determination of mean inner potential of germanium using off-axis electron holography," *Acta Cryst.*, **A55** (1999), 652.
- 14) 藪崎こずえ, 佐々木宏和: "FIBを用いた微細構造解析用試料調製技術" *古河電工時報*, **110** (2002), 77.
- 15) D.Cooper, A.C.Twitchett, P.K.Somodi, P.A.Midgley, R.E.Dunin-Borkowski, I.Farrer and D.A.Ritchie: "Improvement in electron holographic phase images of focused-ion-beam-milled GaAs and Si p-n junctions by in situ annealing," *Appl. Phys. Lett.*, **88** (2006), 063510.
- 16) K. Yamamoto, I. Kawajiri, T. Tanji, M. Hibino and T. Hirayama: "High precision phase-shifting electron holography," *J. Electron Microsc.*, **49** (2000), 31.
- 17) H.Sasaki, K.Yamamoto, T.Hirayama, S.Ootomo, T.Matsuda, F.Iwase, R.Nakasaki and T.Ishii: "Mapping of dopant concentration in a GaAs semiconductor by off axis phase-shifting electron holography," *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006), 244101.
- 18) W.E.Spicer, P.W.Chye, P.R.Skeath, C.Y.Su and I.Lindau: "New and unified model for schottky barrier and III-V insulator interface states formation," *J. Vac. Sci. Technol.*, **16** (1979), 1422.
- 19) W.Monch: "Chemisorption-induced defects at interfaces on compound semiconductors," *Surf. Sci.*, **132** (1983), 92.