

電子線ホログラフィーによる半導体デバイスのドーパント分布観察

Dopant Profiling of Semiconductor Devices by Electron Holography

平 山 司

Tsukasa Hirayama

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

要 旨 半導体内に注入された少量の不純物（ドーパント）は、半導体デバイス機能の根元となるマイクロメートル～ナノメートルスケールの電位分布を形成する。このため、半導体デバイス内のドーパント分布を観察することは、非常に重要な要素技術である。しかし、一般にこのドーパントの濃度は $10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (0.1 atm%以下) の低濃度領域にあり、透過電子顕微鏡像には何のコントラストも形成しない。また、エネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) や電子エネルギー損失分光法 (EELS) でも検出するのは困難である。そこで、ドーパント元素を直接観察するのではなく、ドーパントの分布が形成する電位分布を電子線ホログラフィーで計測する手法を開発した。本稿では、その原理、手法、代表的観察例について紹介する。

キーワード：電子線ホログラフィー、ドーパント分布、電位分布、半導体デバイス

1. はじめに

半導体中に注入されたドーパントは、デバイスとしての高度な機能の源泉となるマイクロメートル～ナノメートルオーダーの電位分布を形成する。このため、ドーパント分布を観察することは非常に重要な評価技術である。一般には 2 次元イオン質量分析法 (SIMS) が使われているが、実デバイス中の 2 次元ドーパント分布をナノメートルオーダーで観察することは容易ではない。このドーパントの濃度は $10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (0.1 atm%以下) の低濃度領域にあり、透過電子顕微鏡像 (TEM 像) には何のコントラストも形成しない。また、元素分布の解析に広く用いられているエネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) や電子エネルギー損失分光法 (EELS) を用いてもこのレベルの低濃度のドーパントを検出するのは困難である。そこで、我々はシリコンや化合物半導体の中のドーパント分布によって形成された電位分布を電子線ホログラフィーで観察した。本稿では、その原理、手法、観察試料作製技術、代表的観察例等について概説する。

2. 電子線ホログラフィーの歴史、原理、手法

ホログラフィーは D. Gabor¹⁾ が電子レンズの取差を補正することを目的に考案したが、マイクロメートル～ナノメートル領域の磁力線や電位分布を観察する電子顕微鏡法として進歩を遂げてきた^{2~4)}。イタリアの Pozzi らのグループは逆バイアスを印加した pn 接合部から真空中に漏れ出る電位分布

を 1985 年に電子線ホログラフィーで初めて観察した⁴⁾。9 年後の 1994 年に、McCartney らはホログラフィーで半導体の pn 接合を定量評価することの重要性を改めて指摘した⁵⁾。さらに、1999 年 Rau らは電界効果トランジスタ断面のドーパント分布を可視化し、半導体業界はこれに非常に刺激された^{6~9)}。その結果、ホログラフィーを学術研究だけではなく工業的に活用しようとする人の数が一気に増加した。現在では、ホログラフィー電子顕微鏡や画像解析のソフトウェアが市場に出回り、電子線ホログラフィーは一般の TEM ユーザーが活用できる技術になりつつある。

電子の挙動はシュレディンガー方程式によって記述される。このシュレディンガー方程式に WKB 近似を適用し、電子の加速電圧 (数百 kV) がサンプルの持つ電圧 (通常は高々数十 V) よりはるかに高いという条件を考慮すると、位相と電位の関係を示す次の式が得られる²⁾。

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda E} \int_z V(x,y,z) dz \quad (1)$$

式 (1) において $\Delta\phi$ は電子波の位相変化量、 λ は電子の波長、 E は加速電圧によって決まる定数 (加速電圧 200 kV であれば $E \sim 172 \text{ kV}$)、 $V(x,y,z)$ は試料が持つ電位分布である。この式は、厚さが一定の試料で位相分布を計測すれば、電位分布が得られることを意味している。

図 1 に電子顕微鏡を用いたホログラム撮影の模式図を示す。電子源から放出され試料を透過した電子の波 (物体波) と、試料の横の何も無いところを透過した波 (参照波) を干渉させるために電子線バイプリズムを使う。これは、電子顕微鏡の本体に接地された 2 枚の平行平板のあいだに直径 0.5 ミクロン程度の細い導電性の糸を張ったものである。この糸にプ

〒 456-8587 名古屋市熱田区六野 2-4-1
TEL: 052-871-3500; FAX: 052-871-3599
2010 年 5 月 13 日受付

ラスの電位を印加すると、その両側を通る電子波は引き寄せられるように偏向し、その下の観察面で干渉する。試料の電位分布に関する情報は干渉縞の曲がりとなって記録される。その干渉縞はホログラムと呼ばれ、フィルムやカメラで撮影する。

図2には、像再生のためのフーリエ変換法と呼ばれる画像解析の手順を示す¹⁰⁾。以前は光学的に像再生を行っていたが、最近では市販のパソコンで非常に簡単に再生できるようになった。まず、ホログラムをフーリエ変換する。すると、中央にセンターバンド、その両側にサイドバンドと呼ばれるパターンが現れる。位相情報はサイドバンドに入っているの、片方のサイドバンドを選び適当な絞関数を掛けて原点に移動させる。さらにそれを逆フーリエ変換すると、もともとの試料直下の複素波動場が得られる。電位分布を可視化する

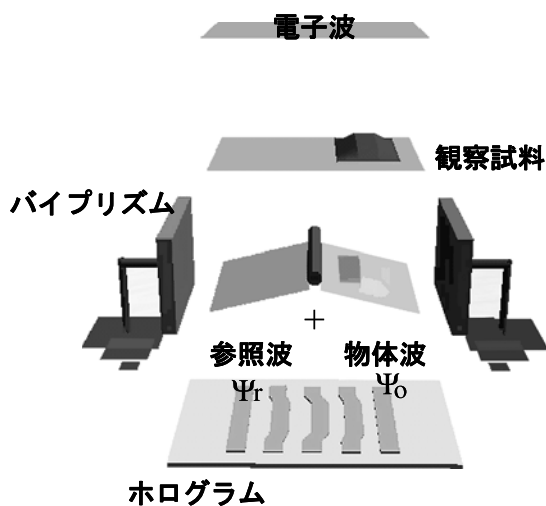


図1 電子線ホログラム撮影の模式図

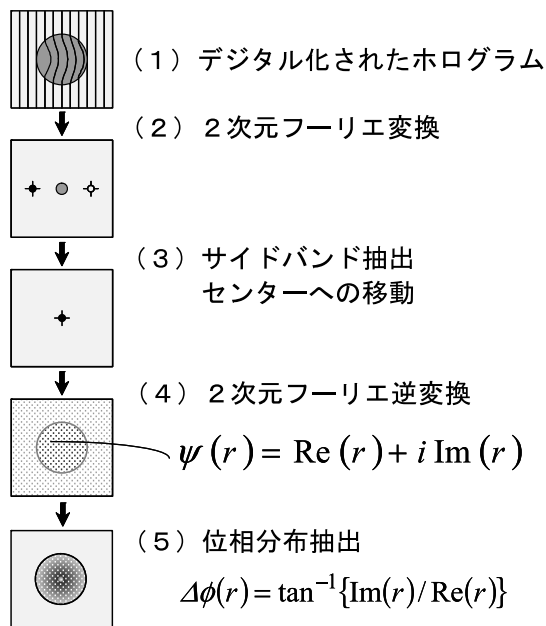


図2 コンピューターによるデジタル位相再生の手順

るために、我々は複素波動場を位相像に変換する。そうすると、たとえば高い電位は明るく低い電位は暗く表わすことができ、直感的に理解しやすい再生像になる。

3. 電界効果トランジスタ断面のドーパント分布観察

すべての物質は「内部電位」を持っており、シリコンの内部電位はおよそ12V程度である⁸⁾。電子線ホログラフィーを用いると、n型領域とp型領域の電位差（本実験では0.7V程度）を可視化することができる。この電位差はドーパント分布によって形成されたものであるため、得られた電位分布像はドーパント分布像と解釈できる^{11,12)}。図3にドーパント濃度が 10^{15} cm^{-3} 程度のp型シリコンウエハを用いて作製した電界効果トランジスタ（Si-MOSFET）の断面観察結果を示す。TEM観察用試料は集束イオンビーム（FIB）を用いて、厚さが均一になるように慎重に作製した。図3(a)の透過電子顕微鏡像では全く見えないドーパントの分布が図3(b)のホログラムでは干渉縞の曲がりとして捉えられており、図3(c)の位相分布像でははっきりと可視化されている。特にゲート直下の横方向のドーパント分布は、デバイスの性能を左右する重要な要因である。この電界効果トランジスタは比較的大きいものであるが、今日の開発の最前線ではゲート長は $0.1 \mu\text{m}$ をはるかに下回る値になっており、実際のデバイスでどのようなドーパント分布になっているかを知り、デバイスやプロセスの研究開発に生かすことは益々重要になってきている。

このような観察のための試料厚さは、我々の経験ではシリコンの場合300nm程度が最も適当であった。TEMの試料としてはかなり厚い試料であるが、これは式(1)に示されるとおり計測される位相変化量が試料厚さに比例するため、厚めの試料の方が有利であることによる。この意味では試料は厚ければ厚い程有利であるが、あまり厚すぎると電子線が透過しなくなってしまうので、その妥協点が300nm程度ということになる。

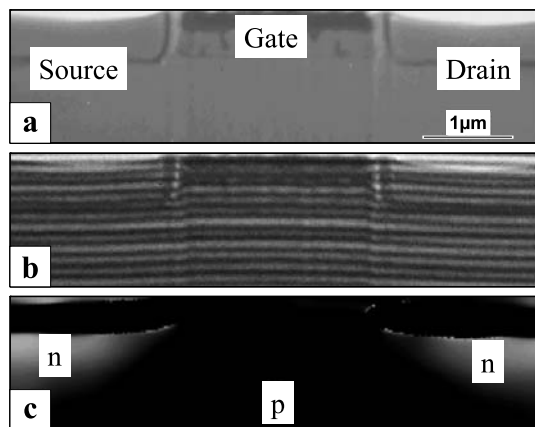


図3 シリコン電界効果トランジスタの断面。(a) 透過電子顕微鏡像、(b) ホログラム、(c) 再生した位相分布像。ドーパント分布が電位分布として明瞭に観察できる。

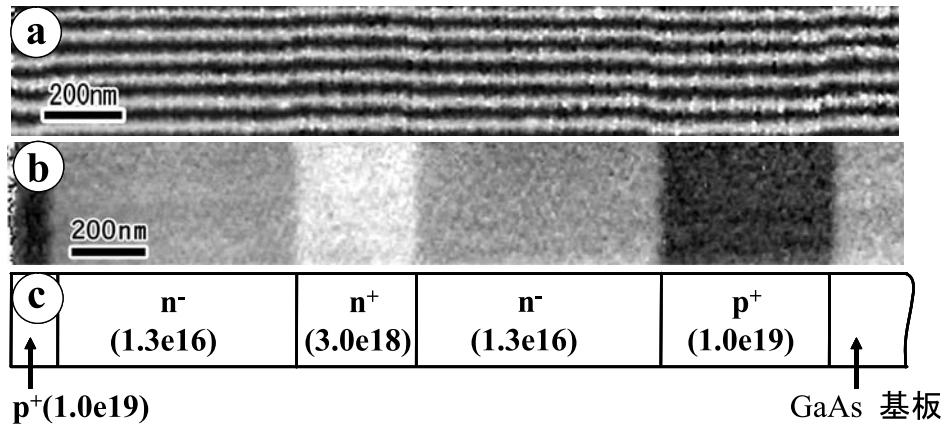


図4 ヒ化ガリウム (GaAs) 多層膜モデルサンプルの断面. (a) ホログラム, (b) 再生された位相分布像. p 領域と n 領域が区別できるだけでなく, n 領域のドーパント濃度の高低がはっきり可視化されている. n^- は低濃度 n 型領域, n^+ は高濃度 n 型領域を示す. (c) 模式図.

「ドーパント濃度 10^{15} cm^{-3} 」とは市販のシリコンウエハとしては最も濃度の低いものである. このようなシリコンウエハを用いて作製したトランジスタのドーパント分布観察に成功したことは, どんなドーパント分布のシリコンデバイスでもこの技術で観察可能であることを示唆している.

4. ヒ化ガリウム (GaAs) 多層膜モデルサンプルのドーパント分布観察

先述の Si-MOSFET 断面のドーパント分布観察に成功した直後, 我々は化合物半導体のドーパント分布観察に着手した. しかし, 最初は, 再生した位相分布像にノイズが多く, 容易に観察することはできなかった. この理由を様々な角度から検討した結果, FIB 法で作製した TEM 試料に関して, シリコン表面に形成されるダメージ層はアモルファスであるが, 化合物半導体表面に形成されるダメージ層には微結晶粒子が含まれることが多いことがわかった. 微結晶粒子は複雑な電子回折を起こし, 再生像中に大きな位相ノイズを形成してしまう. そこで, 表面のダメージ層を低い電圧で加速したアルゴンイオンビームで除去した¹³⁾.

ダメージ層除去後にホログラフィー観察した GaAs 多層膜モデルサンプルの断面を図4に示す¹⁴⁾. この実験では「位相シフト法」という位相計測感度の高い手法を使用した¹⁵⁾. この図では p 型領域と n 型領域の識別が出来るだけでなく, n 型領域の中のドーパント濃度が高い部分と低い部分が明瞭に描き出されている. このような微妙なドーパント濃度の差を観察することのできる理由は, 短く言えば低濃度領域のキャリアが表面にピンニングされることによって低濃度領域が空乏化し, フェルミ準位がバンドギャップの中央近くに移動することによって, 高濃度領域との間に大きな電位差を生じるためである. 詳しくは原著論文を参照されたい¹⁴⁾. 半導体製品の特性はこのようなドーパントの濃度分布に強く依存するため, 上記のような観察手法を用いて試作したデバイスが設計通りに出来ているか, または不良の原因はどこにある

かなどを調べることが, 企業の新製品開発や品質管理に役立つようになってきている. 濃度の絶対値を測るのであれば, SIMSの方がはるかに精度が高いが, 濃度分布を2次元の映像として得られるところが, 電子線ホログラフィーの大きなメリットである.

5. まとめ

電子線ホログラフィーを用いて, 半導体に含まれるドーパントの分布を観察する方法について記述し, 観察例を紹介した. このような観察は研究機関の実験室で行われているだけでなく, すでに企業の開発現場で使われている. 今後益々半導体デバイス開発における必要性は増すものと考えている.

謝 辞

株式会社アイテスの河野好映氏と加藤直子博士 (現在, 日本 IBM 株式会社), 日本 IBM 株式会社の北村恒二氏には Si-MOSFET 観察に関して有益なご意見を頂戴しました. 心より御礼申し上げます. また, FIB による TEM サンプル作製には名古屋大学の佐々木勝寛准教授, 坂公恭教授にご協力をいただきました. 厚く御礼申し上げます. 古河電気工業株式会社の佐々木宏和氏には GaAs ドーパント分布観察のためにご尽力を頂きました. 心より御礼申し上げます. 本研究に貢献してくれた財団法人ファインセラミックセンターの王洲光博士 (現在, 米国マイクロテクノロジー社), 山本和生博士, 加藤丈晴博士, Dr. Craig Fisher に感謝します.

文 献

- 1) Gabor, D.: *Nature*, **161**, 777-778 (1948)
- 2) Tonomura, A.: *Advances in Physics*, **41**, 59-103 (1992)
- 3) Lichte, H.: *Ultramicroscopy*, **20**, 293-304 (1986)
- 4) Frabboni, S., Matteucci, G. and Pozzi, G.: *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 2196-2199 (1985)
- 5) McCartney, M., Smith, D., Hull, R., Bean, J., Voelkl, E. and Frost, B.: *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 2603-2605 (1994)

- 6) Rau, W.D., Schwander, P., Baumann, F.H., Hoppner, W. and Ourmazd, A.: *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 2614–2617 (1999)
- 7) Wang, Z., Hirayama, T., Sasaki, K., Saka, H. and Kato, N.: *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 246–248 (2002)
- 8) Wang, Z., Kato, T., Shibata, N., Hirayama, T., Kato, N., Sasaki, K. and Saka, H.: *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 478–480 (2002)
- 9) Twitchett, A.C., Dunin-Borkowski, R.E. and Midgley, P.A.: *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 238302-1–238302-4 (2002)
- 10) Takeda, M. and Ru, Q.: *Appl. Opt.*, **24**, 3068–3071 (1985)
- 11) 平山 司 : 応用物理, **73**, 629–632 (2004)
- 12) 平山 司 : 応用物理, **79**, 298–301 (2010)
- 13) Sasaki, H., Matsuda, T., Kato, T., Muroga, T., Iijima, Y., Saitoh, T., Iwase, F., Yamada, Y., Izumi, T., Shiohara, Y. and Hirayama, T.: *J. Electron Microsc.*, **53**, 497–500 (2004)
- 14) Sasaki, H., Yamamoto, K., Hirayama, T., Ootomo, S., Matsuda, T., Iwase, F., Nakasaki, R. and Ishii, H.: *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 244101-1–244101-3 (2006)
- 15) Yamamoto, K., Hirayama, T., Tanji, T. and Hibino, M.: *Surf. Interface Anal.*, **35**, 60–65 (2003)