

分離照射電子線ホログラフィー

Split-Illumination Electron Holography

谷垣 俊明^{a, b}, 会沢 真二^a, 朴 賢洵^c,
松田 強^d, 原田 研^b, 進藤 大輔^{a, e}
Toshiaki Tanigaki, Shinji Aizawa, Hyun Soon Park,
Tsuyoshi Matsuda, Ken Harada and Daisuke Shindo

^a (独) 理化学研究所創発物性科学研究センター

^b (株) 日立製作所中央研究所

^c Department of Materials Science and Engineering,
Dong-A University

^d (独) 科学技術振興機構

^e 東北大学多元物質科学研究所

要 旨 可干渉な電子波を二つに分離し試料面を照射する分離照射電子線ホログラフィーを開発し、これまで困難であった試料エッジから離れた領域の観察や、観察領域から参照波を離れた状態でのホログラム観察を可能にした。また、フレネル縞のない分離照射を可能とする二段バイプリズム型分離照射電子線ホログラフィーの開発により高精度電磁場解析を実現し、電子線ホログラフィーの応用範囲を拡張した。開発した手法と応用例を示す。

キーワード：電子線ホログラフィー、分離照射、電磁場解析、フレネル縞

1. はじめに

Möllenstedt型の電子線バイプリズムと電界放出形電子源を搭載したOff-axis電子線ホログラフィー顕微鏡の開発¹⁾により、電子線ホログラフィーの応用範囲は、原子配列^{2,3)}、磁場^{4,5)}、電位^{6,7)}、歪⁸⁾の観察へと発展した。Off-axis電子線ホログラムは、試料を通過し試料情報を振幅分布・位相分布として伝達する物体波と真空など素性のわかっている参照領域を通過した参照波を干渉させることで得られる。ここで、電子線ホログラフィーの実用範囲拡大を妨げてきた問題は、物体波と参照波の距離 D が電子波の横方向の可干渉距離 $R = \lambda / 2\beta \propto 1 / \sqrt{j}$ 、(ここで λ は電子波の波長、 β は電子照射角の半角、 j は照射電流密度)により制限されること $D < R$ であった⁹⁾。

本報では照射電流密度を低下させずにこの D を拡大し、これまで出来なかった試料エッジから離れた領域の観察や観察領域から参照波を離れた状態でのホログラム観察を可能にする、分離照射電子線ホログラフィー (Split-illumination elec-

tron holography : 以下 SIEH)¹⁰⁾ と、フレネル縞の影響をなくし高精度電磁場解析を実現した二段バイプリズム型 SIEH (以下二段 BP 型 SIEH)¹¹⁾ の原理とその応用例を簡単に紹介する。

2. 電子光学系および実験方法

2.1 分離照射電子線ホログラフィー (SIEH)

従来の電子線ホログラフィー (図 1a) では物体波と参照波の最大距離 D_{max} は電子波の横方向の可干渉距離 R で制限されており、干渉縞のコントラスト C は D (すなわちホログラム幅 W) を大きくするに従い低下する。 R を大きくするため照射角 β を小さくすると照射電流密度が低下し暗くなってしまふ。ホログラムから再生した位相像における位相検出下限は $C\sqrt{N}$ に逆比例する。ここで、 N は位相再生像の一画素に寄与した検出電子数である¹²⁾。空間分解能を保持して、 D を大きくすると C と N が低下するため、試料エッジから離れた領域を詳細にホログラフィー観察することは従来非常に難しかった。

SIEH (図 1b) は、照射系のバイプリズム (以下、コンデンサーバイプリズム) により可干渉な電子波を二つに分離し試料を照射することで、 D を大きく離れた状態でも電流密度を低下させずに高い干渉縞コントラストを得ることを可能にした。試料面上換算での干渉縞 (ホログラム) の得られる領域の幅 W_{obj} と物体波と参照波の距離 D の関係は、 $D = d + W_{obj}$ であり、SIEH において電流密度を下げずに D を大きくすることが出来る理由は、可干渉距離 R の制約を受ける W_{obj} とは別に、コンデンサーバイプリズムにより電子波の分離距離 d を独立に制御可能となったからである。これにより試料エッジから離れた領域のホログラム観察が可能になったことに加え、試料から漏れ出た電場・磁場による参照波の歪により発生するアーティファクトを回避するために、試料から離れた領域を参照波として用いるホログラム観察も可能となった。分離照射を行った場合と分離照射を行わない従来の方法で取得したホログラムの干渉縞コントラストを比較として示す (図 2)。分離照射を行うことにより、物体波と参照波を離れた場合でも高いコントラストの干渉縞を得ることが出来ることがわかる。

本 SIEH の実験には Cold FE 電子銃 (冷陰極電界放出形電子銃) と結像系に二段バイプリズム¹³⁾ を搭載した電界放出形透過電子顕微鏡「HF-3300X」(日立ハイテクノロジーズ社製) を使用した。ここで本 SIEH の実現に結像系二段バイプリズム¹³⁾ が必要であったことを短く記述しておく。コンデンサーバイプリズムで電子波を分離する場合、同時に試料面上での波面を傾けることになる。結像系二段バイプリズムは分離照射により傾いた波面を結像系で任意に調整し、像面で観察可能な干渉縞間隔を得るために欠かせない機能であった。電子波面を分離するアイデア¹⁴⁾ は約 50 年前から存在するにも関わらず、今日までインフォーカス型の Off-axis 電子線ホログラフィーで分離照射が実現されなかった理由には上記の理由があったと推察する。加速電圧は 300 kV で使用し、ホログラムは 4080 × 4080 pixels のスロースキャンカメラ

〒350-0395 埼玉県比企郡鳩山町赤沼 2520 番地
E-mail: tanigaki-toshiaki@riken.jp
2014 年 4 月 16 日受付

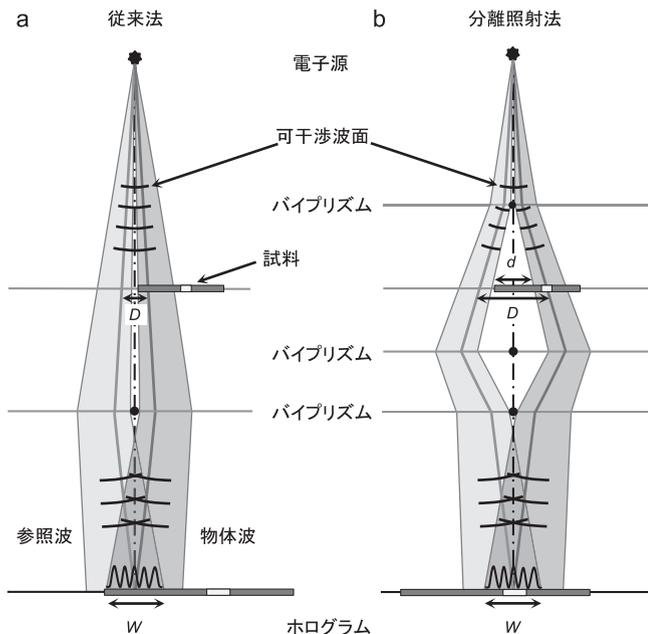


図1 光学系の模式図 (a) 従来法の電子線ホログラフィー (b) 分離照射電子線ホログラフィー. 可干渉な電子波をコンデンサーバイプリズムにより分離し、試料面上の離れた場所を照射する. 結像系のバイプリズムを用い二つの電子波を干渉させホログラムを得る.

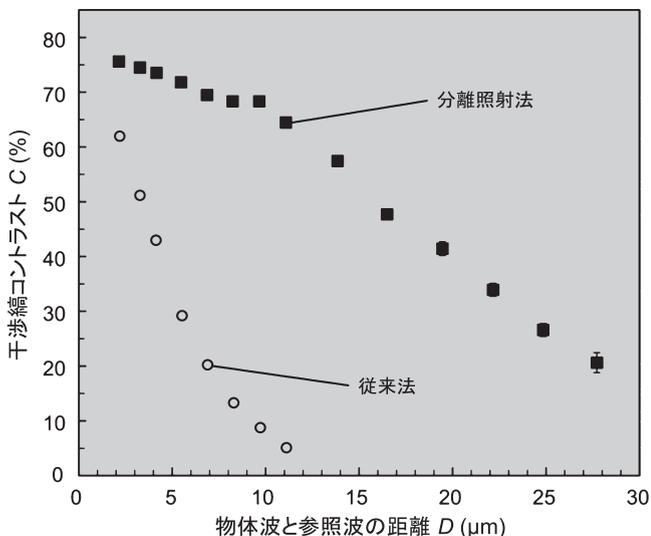


図2 従来法と分離照射法での干渉縞コントラストの比較. 横軸は物体波と参照波の距離 D である. ホログラム取得条件は、観察倍率 57,000 倍、試料面上での電流密度 1.3 A/m^2 、干渉縞間隔 30 nm とし、ホログラムの幅を可変できる分離照射法においては、ホログラムの幅を 700 nm に調整し実験を行った.

(UltraScan[®] 4000, Gatan Inc.) を用い取得した. ホログラムからの位相再生には HoloWorks 5.0 (Gatan Inc.) を使用した.

2.2 二段 BP 型分離照射電子線ホログラフィー (二段 BP 型 SIEH)

近年の材料及びデバイス開発はナノスケールでの構造制御によるものが主流であり、ナノスケールで存在する微小な電位・磁場・歪の解析が求められる. このため、ナノスケール

での電位・磁場・歪を高精度に観察することが可能な SIEH の開発が不可欠である. これまで高精度位相計測を目的とし、位相差増幅¹⁵⁾、リファレンスホログラムによる装置固有の像歪の除去¹⁶⁾、位相シフト法¹⁷⁾とその改良^{18,19)}、積算処理によるノイズ低減²⁰⁾、二段バイプリズム干渉計による干渉縞間隔 s とホログラム幅 W の独立制御と電子線バイプリズムによるフレネル縞の重畳されないホログラムの取得¹³⁾ などの手法が電子線ホログラフィーにおいて開発されてきた. SIEH について精度を考えた場合、照射系の電子線バイプリズムからのフレネル縞が計測精度を制約する課題が残されていた.

照射系に一本のバイプリズムのみを備える場合 (図 1b)、試料面上で電子波を分離するためにはコンデンサーバイプリズムのフィラメント電極の像を試料面上でデフォーカス状態にする必要があった. これは照射系のレンズを調整し試料面上にフィラメント電極が結像されるインフォーカス状態にすると、試料面上ではバイプリズムは左右の電子波に対して傾きのみしか与えることができなくなるためである. このため、一段 BP 型 SIEH ではフィラメント電極からのフレネル縞が試料面上に発生していた. このフレネル縞は参照波・物体波それぞれに変調を与えるため、それらを重ね合わせて得られるホログラムにもフレネル縞の影響が現れることになる. 結果、フレネル縞の影響を受けたホログラムから得られる位相再生像にはフレネル縞のアーティファクト²¹⁾ として、位相が変調した縞模様が現れる. このアーティファクトを位相再生時に Gauss-type line filter²⁰⁾ により除去する方法も考案されているが、この場合、試料の位相情報も部分的に除去されてしまうため、正確な試料の位相情報は得られない.

SIEH におけるフレネル縞の課題を解決するため開発した二段 BP 型 SIEH の照射光学系を図 3a に示す. 照射系に二本のバイプリズムを搭載し、第三コンデンサーレンズ (図 3a 中 C3) を用い上段コンデンサーバイプリズムのフィラメント電極のインフォーカス像を試料面に形成し、その他全てのバイプリズム (下段コンデンサーバイプリズム, 上段・下段結像系バイプリズム) のフィラメント電極を上段コンデンサーバイプリズムのフィラメント電極の影の領域に置いた. この BP の間にレンズを介在させず、BP 二段を直接並べる光学系は、従来の結像系二段バイプリズムと異なる点である. 試料を照射する二つの電子波の分離距離 d と傾斜角度 θ は照射系の二つのバイプリズムにより制御できる. コンデンサーバイプリズム電圧の極性は、C2-C3 間のクロスオーバーにあたる光源の像面と下段コンデンサーバイプリズムフィラメント電極の位置関係で決まる. 図 3a に示す位置関係の場合は、下段コンデンサーバイプリズムのフィラメント電極が電子波により照射されないように、上段コンデンサーバイプリズム電圧 V_{CU} をマイナス、下段コンデンサーバイプリズム電圧 V_{CL} をプラスとする. 逆に、クロスオーバーの下に下段コンデンサーバイプリズムフィラメント電極が位置する場合は、 V_{CU} をプラス、 V_{CL} をマイナスとする. 試料面での電子波の分離

距離 d 及び傾き θ は、上段コンデンサーバイプリズムによる偏向角 γ_{CU} 及び下段コンデンサーバイプリズムによる偏向角 γ_{CL} と図 3a に示すパラメータにより以下の式で与えられる。

$$d = \frac{b_3}{a_3} (2L_3\gamma_{CL} + d_{CU}), \quad (1)$$

$$\theta = \frac{a_3}{b_3} (L_1\gamma_{CU} + L_2\gamma_{CL}). \quad (2)$$

ここで、 d_{CU} は上段バイプリズムフィラメント電極の直径である。クロスオーバーにあたる光源の像面に下段コンデンサーバイプリズムのフィラメント電極を置いた $L_2=0$ の場合には、 θ は γ_{CU} のみの関数、 d は γ_{CL} のみの関数となるので、 V_{CU} による θ の調整、 V_{CL} による d の調整が独立に行える。

二段 BP 型 SIEH は Cold FE 電子銃と結像系に二段バイプリズムを搭載した電界放出形透過電子顕微鏡「HF-3000X」の照射系に二本の電子線バイプリズムと第三コンデンサーレンズを追加し実現した。結像系に二段バイプリズムを搭載することで、結像系上段バイプリズムによる干渉縞間隔 s の制御と結像系下段バイプリズムによるホログラム幅 W の制御を独立に行うことができる。従って、二段 BP 型 SIEH は照射条件 θ 、 d と結像条件 s 、 W をそれぞれ制御することが可能で、本手法を用いればホログラムの取得条件を自在に制御することが可能となる。ただし、装置の負担を低減し、オペレーションを容易にするためには、操作するバイプリズムの本数を少なくすることも必要とされる。その場合には、照射角度 θ を制御している上段コンデンサーバイプリズムを干渉縞間隔 s の制御に使用することも可能で、これにより、 s の制御に用いていた結像系上段バイプリズムを除き、3本のバイプリズムを用い二段 BP 型 SIEH の d 、 s 、 W 制御機能を実現することが可能となる。

帯電したラテックス粒子の周りの電場分布を二段 BP 型 SIEH を用い観察したホログラムとその位相像をそれぞれ図 3b と図 3c に示す。ホログラムは物体波に対して斜め方向から参照波を干渉させて得るため、電場により変化した電子波面を斜めにカットした様な干渉縞が得られる。このため、図 3 のラテックス粒子のまわりの干渉縞は非対称に曲がって観察される。しかし、ホログラムからの位相再生時に補正されるので、再生位相分布には全く影響を与えない。ホログラムにはフレネル縞は観察されず、位相像ではラテックス粒子を中心として同心円状に広がる滑らかな等位相線（白線）が得られた。これらの位相分布は帯電したラテックスの周囲の電場分布を示すものである。二段 BP 型 SIEH を用いることでフレネル縞の影響が除去され、微小な位相変化およびその分布を二次元的に観察することが可能となった。（参考文献 11）に従来型 SIEH と二段 BP 型 SIEH の結果を比較しているので詳細は文献 11）を参照して頂きたい。）

3. 電磁鋼板中の磁束線観察

SIEH の応用例として電磁鋼板中の磁束線を観察した結果を示す（図 4）。電磁鋼板は発電所の発電機、変電所の変圧器、

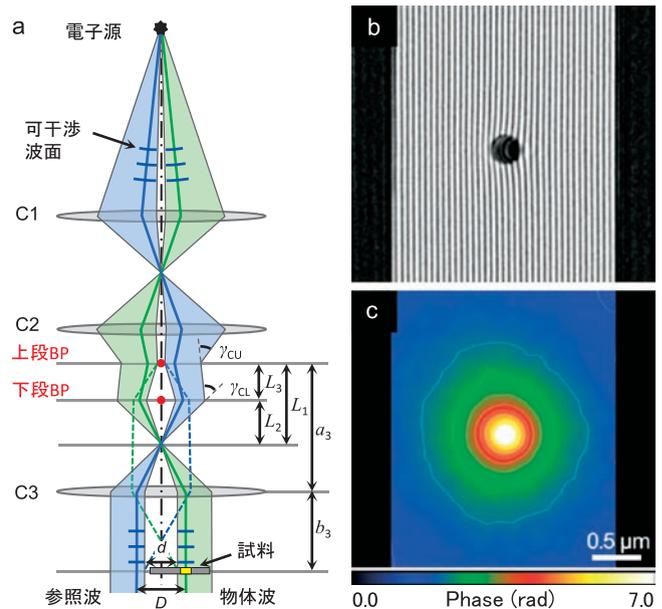


図 3 二段 BP 型分離照射電子線ホログラフィーの照射光学系 (a) とこの手法で取得した帯電したラテックス粒子の周囲のホログラム (b) とその位相再生像 (c). 上段コンデンサーバイプリズムのフィラメント電極のインフォーカス像を試料面上に結像させ、その陰にその他のフィラメント電極を置く。これにより大きな D における高コントラスト、高電流密度かつフレネル縞のないホログラムの取得を実現した。位相再生像の等位相線（白線）は 0.5 rad ごと。

ハイブリッド自動車のモーターなど様々な用途で電気エネルギーと磁気エネルギーの高変換効率素材として私たちの生活を支えている。電磁鋼板の性能を低下させる一つの要因として、析出物（非磁性）での磁壁ピンギング（引っ掛かり）が挙げられ、磁壁ピンギングメカニズムを明らかにすることは高性能電磁鋼板の開発に向け新たな知見を与える。近年、集束イオンビーム（FIB）装置を用い鋼板薄膜に穴加工をし、人工的ピンギングセンターを導入する技術が開発された²²⁾。ローレンツ顕微鏡（フレネル）法を用いピンギングセンターに磁壁がピン止めされることは観察されているが²²⁾、実際どのように磁束線がピンギングセンターの周りを走っているのかまでは解明されていなかった。SIEH を用いこのピンギングセンター近傍での磁束線の振る舞いを観察した。

電磁鋼板薄膜中の人工ピンギングセンターにピン止めされた磁壁をローレンツ顕微鏡（フレネル）法で観察した結果を図 4a に示す。図 4a 中明暗の線が磁壁を示す。ローレンツ顕微鏡法により調べた薄膜中の磁束線の方向を図 4a 中矢印で示す。人工ピンギングセンターにピン止めされた磁壁は図 4a 中実線四角枠内に存在する。ピン止め領域の拡大ローレンツ顕微鏡像に関しては参考文献 10) を参照して頂きたい。分離照射を行わない従来法の電子線ホログラフィーでは電子波の可干渉距離がならず、試料エッジから約 9 μm 離れた位置に存在する図 4a 中実線四角枠内の領域は観察することが出来なかった。また仮に、参照領域とする真空領域を観察箇所近づけるため薄膜の形状を FIB 装置などで加工し

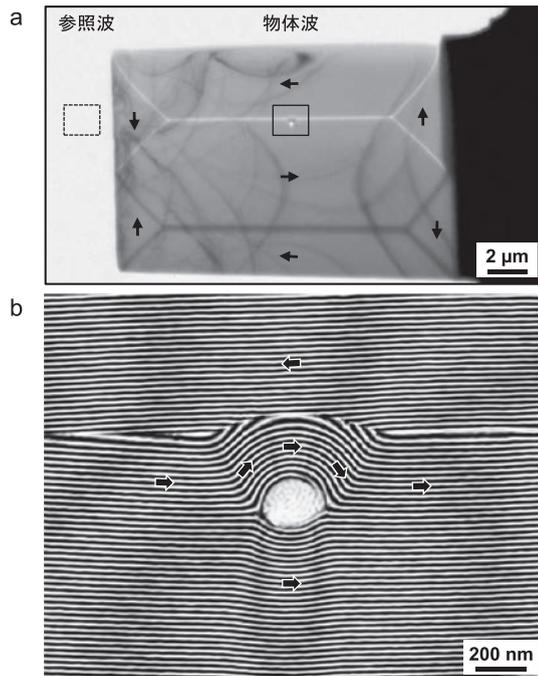


図4 電磁鋼板中の磁束線観察 (a) ローレンツ顕微鏡 (フレネル法) 像. 明暗線は磁壁に対応する. (b) 分離照射法で得た磁束線分布. 黒線が磁束線を示す. 中央部の人工ピンニングセンター (穴) の周りを磁束線が取り囲み, 磁壁がピンニングセンターにピン止めされている様子が観察された.

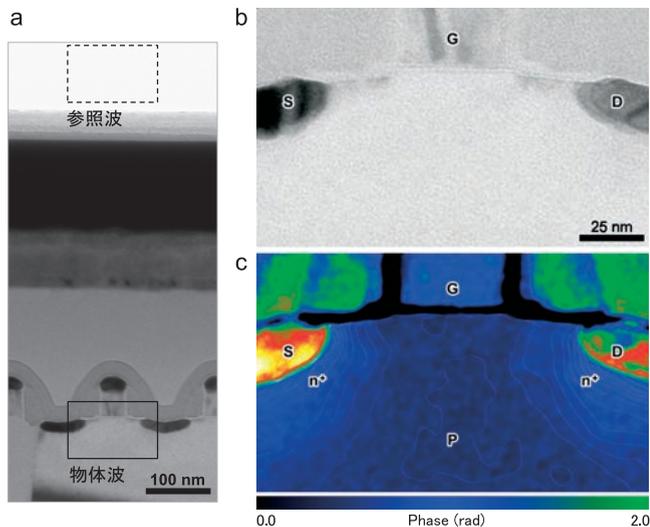


図5 nMOSFET 試料の電位分布. (a) 試料の明視野 TEM 像. (b) (a)中黒枠で示したFET領域の拡大TEM像. S, G, Dはソース, ゲート, ドレイン部を示す. (c) (b)の領域の位相像. 等位相線 (白線) は0.07 rad ごとの位相差を示し, 今回観察した試料厚さ95 nmを考慮すると, 等位相線は電位差0.1 V ごとを示す.

てしまうと, 試料外形の効果により磁壁の位置が大きく変化してしまいピンニングセンターに磁壁がピン止めされた状態を観察することが出来なかった.

SIEHにより観察したピンニングセンターの周りの磁束線を図4bに示す. 図4b中黒線が磁束線を表す. 参照波には図4a中点線四角枠の領域を使用した. 磁束線の方向を図4b

中矢印で示すように, 磁束線はアーチ状の形をとりピンニングセンターを回り込んでおり, ピンニングセンターに対し磁束線の分布が上下対称でないことがわかる. 図4bでは内部ポテンシャルによる電位情報⁹⁾が含まれているが, FIB加工により膜厚の変化は小さく (図4a参照), 基本的には磁束線の分布を定量的に計測することが出来ている. SIEHにより得られる磁束分布とシミュレーション結果を比較し磁壁ピンニングのメカニズムを調べることが可能で²³⁾, より高性能な電磁鋼板の開発への応用が期待される.

4. 半導体デバイス中の二次元電位分布観察

二段BP型SIEHを半導体デバイス中の二次元電位分布の観察に応用した例を示す. 半導体デバイスが我々の日常生活に欠かせないことは言うまでもなく, 本報も半導体デバイスが正常に作動したおかげで作成することができた. 半導体デバイスの不良を出来る限り低減するため半導体デバイスメーカーは絶え間ない努力を続けており, メーカー間の競争において問われるのはコストに並んで信頼性である. 高い信頼性を実現するため半導体デバイス中で電荷移動に直接影響する電位分布の可視化が求められる. 電子線ホログラフィーによる半導体の電位分布は二次元的に以前から可視化されているが, ホログラフィー観察領域近傍に真空の参照領域を作製する特殊な試料作製方法や, 得られた電位分布 (位相像) へのフレネル縞の影響を考慮する必要があった.

特に以前と状況が一変しているのはデバイスのスケールである. 1999年にW.D. Rau等が観察したデバイスのゲート長は約300 nmであったのに対し²⁴⁾, 近年実用的に使用されているデバイスのゲート長は50 nm以下である. デバイスが小さくなると物体波の近くの参照波を使用でき, 電子波の可干渉距離の制約を受けないと思われるかもしれないが, 実際にはFIBの加工精度の制約から観察箇所から100 nm以下の距離に, 観察箇所の試料厚さを変化させることなく参照波用の真空領域を作製することは困難である. このため試料作製技術の面から間接的に電子波の可干渉距離の制約を受けるとなり, 電子線ホログラフィーで半導体デバイスを観察することは出来ないと言われ始めていた. しかし, 二段BP型SIEHを用いれば観察が可能であることを以下に示す.

今回観察した試料は, トランジスタのソース, ドレイン部のキャリア密度が $6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ になるよう設計・作製された, ゲート長50 nmのnMOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)である. 薄膜試料は, FIB装置「FB-2100」(日立ハイテクノロジーズ社製)を用い, Cu配線処理を行ったnMOSFETチップからマイクロサンプリング²⁵⁾し作製した. 加速電圧100 kVでの収束電子回折 (CBED) 法により求めた結晶部の試料厚さは $95 \pm 5 \text{ nm}$ であった. 絶縁体部分の帯電によるホログラム観察への影響を抑えるため, 試料の両面に約30 nmのカーボン膜を蒸着した²⁶⁾. また, 動力学的回折効果が生じると透過波の位相変化 $\Delta\phi$ が試料の電位変化 ΔV と厚さ t の単純な積に比例しなくなる. 動力学的回折効果を

抑えるため試料を [100] 入射から 4 度傾斜し、対物絞りで透過波のみ選択し明視野像の条件でホログラムを取得した²⁴⁾。電位観察のためホログラムの観察は加速電圧 200 kV で行った。観察した領域と参照波の距離 D は 640 nm であったが、空間分解能 3 nm ($s = 1$ nm), 位相ノイズ (シリコン基板部の標準偏差) ± 0.03 rad の位相像を得た。ドーパント濃度が 10^{20} cm⁻³ 以上で、FIB 加工の加速電圧 30 kV 以下の場合には加工による電気的不活性層は無視できるので²⁷⁾, 最終加工は加速電圧 20 kV とした。電位変化 ΔV は結晶部の試料厚さ t より $\Delta V = \Delta\phi / (C_E t)$ で求めることが出来る²⁸⁾。ここで C_E は電子波の相互作用係数である (加速電圧 200 kV では $C_E = 7.29 \times 10^{-3}$ radV⁻¹nm⁻¹)。今回の観察では位相像の 0.07 rad ごとの等位相線は、電位差 0.1 V に対応する。ゲート直下の電位が基板とほぼ同じで、ソース、ゲート部の電位が基板部に比べ 1.1 V 高くなっている観察結果は、今回観察した nMOSFET の設計値と良く一致した。二段 BP 型 SIEH を用いることで、トランジスター部の近傍に真空の参照領域を作製することなく、トランジスター部の二次元電位分布を詳細に観察することに成功した。このような観察は、照射系にバイプリズムを搭載しない従来の電子線ホログラフィーや従来型 SIEH では困難であった。将来、ゲート電圧変化に伴う二次元電位分布変化のその場観察²⁹⁾へ、本手法を応用することも期待される。

5. まとめ

電子線ホログラフィーにおいて課題とされていた電子波の可干渉距離による制約を解消するため、照射系のコンデンサーバイプリズムにより電子波を分離する分離照射電子線ホログラフィー (SIEH) を開発した。また、コンデンサーバイプリズムフィラメント電極からのフレネル縞により位相が変調し位相像にアーティファクトが生じる問題を、照射系に二本のコンデンサーバイプリズムを搭載し、上段コンデンサーバイプリズムのフィラメント電極のインフォーカス像を試料面上に結像させることで解決した。開発した手法を電磁鋼板中にピンギングされた磁束線の観察や nMOSFET の二次元電位分布観察に応用し、これまで観察することが困難であった試料エッジから離れた領域の詳細な電磁場解析に成功した。基礎科学・産業研究における電場、磁場、歪み分布の観察に SIEH が広く活用されることが期待される。

謝 辞

本研究を支え貴重な指導を頂きました故外村彰氏 (日立中研, 理研), 電磁鋼板の試料提供および意見を頂きました谷山明氏 (新日鐵住金), 赤瀬善太郎氏 (東北大学), 半導体デバイスの試料提供および意見を頂きました朝山匡一郎氏, 橋本直人氏 (ルネサスエレクトロニクス), 装置開発にて技術支援を頂きました守谷騰氏 (日立中研), 谷口佳史氏 (日立ハイテック), 観察および解析作業にて技術支援を頂きました浅川孝之氏 (山梨大), 大津喜宏氏, 渡邊慶太郎氏 (日立ハイテック) に感謝いたします。本研究は、総合科学技術会議に

より制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。

文 献

- 1) Tonomura, A., Matsuda, T., Endo, J., Todokoro, H. and Komoda, T.: *J. Electron Microsc.*, **28**, 1–11 (1979)
- 2) Tonomura, A., Matsuda, T. and Endo, J.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18**, 1373–1377 (1979)
- 3) Lichte, H.: *Ultramicroscopy*, **20**, 293–304 (1986)
- 4) Tonomura, A., Matsuda, T., Endo, J., Arii, T. and Mihama, K.: *Phys. Rev. Lett.*, **44**, 1430–1433 (1980)
- 5) Dunin-Borkowski, R.E., McCartney, M.R., Frankel, R.B., Bazylinski, D.A., Pósfai, M. and Buseck, P.R.: *Science*, **282**, 1868–1870 (1998)
- 6) Frabboni, S., Matteucci, G., Pozzi, G. and Vanzi, M.: *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 2196–2199 (1985)
- 7) McCartney, M.R., Smith, D.J., Hull, R., Bean, J.C., Voelkl, E. and Frost, B.: *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 2603–2605 (1994)
- 8) Hýtch, M., Houdellier, F., Hùe, F. and Snoeck, E.: *Nature*, **453**, 1086–1089 (2008)
- 9) Tonomura, A.: *Electron Holography*, 2nd Edition, Springer-Verlag, Heidelberg (1999)
- 10) Tanigaki, T., Inada, Y., Aizawa, S., Suzuki, T., Park, H.S., Matsuda, T., Taniyama, A., Shindo, D. and Tonomura, A.: *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 043101(1)–(4) (2012)
- 11) Tanigaki, T., Aizawa, S., Park, H.S., Matsuda, T., Harada, K. and Shindo, D.: *Ultramicroscopy*, **137**, 7–11 (2014)
- 12) Lichte, H.: *Ultramicroscopy*, **108**, 256–262 (2008)
- 13) Harada, K., Tonomura, A., Togawa, Y., Akashi, T. and Matsuda, T.: *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3229–3231 (2004)
- 14) Möllenstedt, G. and Bayh, W.: *Physikalische Blätter*, **18**, 299–305 (1962)
- 15) Tonomura, A., Matsuda, T., Kawasaki, T., Endo, J. and Osakabe, N.: *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 60–62 (1985)
- 16) Rau, W.D., Lichte, H., Völkl, E. and Weierstall, U.: *J. Comp.-Assisted Microsc.*, **3**, 51–63 (1991)
- 17) Rau, Q., Lai, G., Aoyama, K., Endo, J. and Tonomura, A.: *Ultramicroscopy*, **55**, 209–220 (1994)
- 18) Yamamoto, K., Kawajiri, I., Tanji, T., Hibino, M. and Hirayama, T.: *J. Electron Microsc.*, **49**, 31–39 (2000)
- 19) Suzuki, T., Aizawa, S., Tanigaki, T., Ota, K., Matsuda, T. and Tonomura, A.: *Ultramicroscopy*, **118**, 21–25 (2012)
- 20) Voelkl, E. and Tang, D.: *Ultramicroscopy*, **110**, 447–459 (2010)
- 21) Lichte, H., Geiger, D., Harscher, A., Heindl, E., Lehmann, M., Malamidis, D., Orchowski, A. and Rau, W.D.: *Ultramicroscopy*, **64**, 67–77 (1996)
- 22) Inada, Y., Akase, Z., Shindo, D. and Taniyama, A.: *Mater. Trans.*, **53**, 1330–1333 (2012)
- 23) He, K., Smith, D.J. and McCartney, M.R.: *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 182507 (2009)
- 24) Rau, W.D., Schwander, P., Baumann, F.H., Höppner, W. and Ourmazd, A.: *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 2614–2617 (1999)
- 25) Ohnishi, T., Koike, H., Ishitani, T., Tomimatsu, S., Umemura, K. and Kamino, T.: *Proc. 25th Int. Symp. Testing and Failure Analysis*, 449–453 (1999)
- 26) McCartney, M.R., Gribelyuk, M.A., Li, J., Ronsheim, P., McMurray, J.S. and Smith, D.J.: *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 3213–3215 (2002)
- 27) Cooper, D., Ailliot, C., Truche, R., Barnes, J.-P., Hartmann, J.-M. and Bertin, F.: *J. Appl. Phys.*, **104**, 064513(1)–(8) (2008)
- 28) Li, J., McCartney, M.R. and Smith, D.J.: *Ultramicroscopy*, **94**, 149–161 (2003).
- 29) Ikarashi, N., Takeda, H., Yako, K. and Hane, M.: *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 143508(1)–(3) (2012)