近年,光学式検査装置では検出困難な微小欠陥や内部欠陥を高 速に観察・検査する必要性が高まっており,日立グループは,その 要求に応えられる有望な技術の一つとしてミラー電子顕微鏡の研究 を行っている。ナノインプリントモールドの検査を想定した評価では, ハーフピッチ50 nmのラインアンドスペース(L&S)の3 nmのピッチ ずれ欠陥を,30 nmのピクセルサイズで検出できることを示した。 またSiC 膜の積層欠陥の評価では,紫外光を同時照射して観察す ることで膜内部の欠陥を顕在化できた。これらの結果から,次世代 の高速高感度検査装置としてのミラー電子顕微鏡の可能性を示すこ とができた。

1. はじめに

透過電子顕微鏡は、文字どおり試料を透過した電子ビー ムをレンズによって拡大投影する顕微鏡である。そのため 薄膜化した試料だけに対応し、バルク試料の表面観察は不 可能である。一方、走査電子顕微鏡は小さく絞った電子 ビームを試料表面に走査させ、放出される信号を検出して 電子ビームの走査と同期して並べることで拡大像を得ると いう原理であり、バルク試料表面が観察できる。この走査 電子顕微鏡が実用化される以前に試料表面状態を拡大観察 する電子顕微鏡としてミラー電子顕微鏡が研究^{1), 2)}され ていたが、走査電子顕微鏡の普及により、特殊な表面状態 の観察用途以外には顧みられなくなっていた。しかし、ミ ラー電子顕微鏡は走査電子顕微鏡よりも原理的に高速に画 像を取得でき、しかも試料の表面状態に対する感度が非常 に高いという特徴がある。近年、光学式検査装置では検出 困難な微小欠陥や内部欠陥を高速に検査する必要性が急速 に高まっており、日立グループは、ミラー電子顕微鏡がそ の要求に応えられる有望な技術であると考えて研究を行っ ている^{3),4),5)}。

ここでは、 ミラー電子顕微鏡の原理と、実験用に設計製

作したミラー電子顕微鏡装置によって各種試料を観察した 事例について述べる。

2. ミラー電子顕微鏡の原理

ミラー電子顕微鏡は、試料直前で電子ビームを減速反転 させ、戻ってきた電子ビームをレンズによって結像して試 料表面状態を拡大観察するという原理である。電子ビーム が試料表面で反転することを、光が鏡で反射することに例 えて「ミラー電子顕微鏡 (MEM: Mirror Electron Microscope)」と呼ばれている。その構成概念を図1に示す。

電子ビームを試料直前で反転させるため,試料に電子 ビームの持つエネルギーよりわずかに大きい負の電位を与



注:略語説明 ExB(E cross B)

図1 ミラー電子顕微鏡の構成概念図

電子源から放出・加速された電子(行きの電子)は、加速電圧よりわずかに大 きい負の電圧を与えられた試料の直前で反転する。その電子(帰りの電子)を 結像する。

えることが必要である。試料はステージ上に電気絶縁して 載置され、外部電源によって負電位を与えられる。電子光 学鏡体として試料表面に向けて電子ビームを導く照射系 と, 試料表面から戻ってきた電子ビームを結像する結像系 の二つの電子光学系があり、それぞれに電子レンズを備え ている。両方の電子光学系の合流部分には行きと帰りの電 子ビームの光路を分離するための偏向器が配置されてい る。例えば、電場(E)と磁場(B)を組み合わせたExB(E cross B) 偏向器を用いる。その場合、「行きの電子ビーム」 に対して電場と磁場が同方向の偏向作用を与えるようにし て「行きの電子ビーム」を偏向すると、一方で「帰りの電 子ビーム」に対しては電場と磁場が逆方向の偏向作用とな るため相殺されて「帰りの電子ビーム」は直進する。また 試料の近くには対物レンズがあり,両方の電子ビームがレ ンズ作用を受けるようになっている。なおミラー電子顕微 鏡には電子ビームを一点に絞って走査する方式のものもあ るが、ここで紹介するのは一定の面積を持った電子ビーム を試料に向け、電子ビームの面積分の画像を一括して画像 化する方式である。

ミラー電子顕微鏡で得られる像は試料表面の微小な凹凸 や電位分布の情報である。その原理を図2に示す。

前述のように試料には負の電位が印加されているので試 料表面に凹凸があるとそれに応じた等電位面が生じる。電 子ビームは試料に近づくにつれて減速し,そのエネルギー がゼロになる等電位面で反転する。反転する等電位面の形 状に応じて電子ビームが内側に反射されるか外側に反射さ れるかが決まる。この反射してきた電子ビームを結像系の レンズで結像させる。同図の「フォーカス位置」とある面



注:略語説明 MEM (Mirror Electron Microscope)

凹凸に起因する試料表面すれすれの等電位面のゆがみに応じて電子の反転軌 道が異なる。これによる電子の粗密が像のコントラストとなる。



図3 | ミラー電子顕微鏡の電位コントラストの原理 試料表面や内部の電位が不均一な場合は、等電位面のゆがみが生じ、凹凸と 同様に像にコントラストが生じる。

を物面となるよう結像させると、電子ビームが内側に反射 して密度の高くなったところは明るいコントラストとな り、外側に反射して密度が薄くなったところは暗いコント ラストとなる。これにより試料表面の凹凸が明暗のコント ラストとなって観察される^{1), 2)}。また、試料の表面酸化や 内部に絶縁性の物体が存在するような場合は、試料表面が 平坦(たん)であっても、等電位面は試料の電位分布に応 じてゆがむ(図3参照)。この場合も表面の凹凸と同じよ うに、明暗のコントラストが生じる。

上記の結像原理から、ミラー電子顕微鏡には以下のよう な特徴があることがわかる。第一に、電子ビームが試料表 面に衝突しないため、試料に電子照射ダメージを与えるこ とがない。第二に、画像に現れるコントラストは、凹凸や 電位分布のサイズを正確に反映したものにはならない。第 三に、結像系のフォーカスを変えれば同じ場所でも明るい コントラストになったり暗いコントラストになったりす る。以上の第二と第三の特徴により、ミラー電子顕微鏡の 画像は光学顕微鏡や走査電子顕微鏡の画像とは全く異なる 様相を示し、像解釈が難しい。しかし、これを逆手に取れ ば、微小な欠陥を結像系のフォーカス条件によって大きく 拡大し、低倍率でも顕在化できる可能性がある。これにつ いて図4により説明する。

試料表面の突起により電子ビームは外側に広がる。結像 系のフォーカス調整によって結像する物面を同図の(1)から(4)に変えていくと、図のように暗い大きなコントラ ストから次第に小さい暗点になり、途中でコントラストが 消滅したのち、今度は明るい点となって現れることにな る。(1)を物面とした場合は、実際の突起サイズよりも大 きなサイズに拡大されることになる。これらの特徴を実際 の観察結果で実証したのが図5である。

観察に用いたのはSi基板に0.18ミクロンピッチであけ られたホールパターンである。SEM (Scanning Electron Microscope:走査電子顕微鏡)像ではやや角張った円形の eature articles

図2 | ミラー電子顕微鏡の凹凸コントラストの原理



図4 ミラー電子顕微鏡のフォーカスとコントラストの関係

結像レンズが結像する物面によって電子の粗密は異なるため、結像レンズのフォーカスによりコントラストは反転し、サイズも変化する。



注:略語説明 SEM (Scanning Electron Microscope)

図5 ミラー電子顕微鏡によるホールパターン観察例 (SEM像との比較と フォーカスによる画像の変化)

Siにあけられたホールパターンを結像レンズのフォーカス位置を変えて観察 するとそれぞれ全く異なるコントラストを示す。

ホールが観察されている。この試料をミラー電子顕微鏡で フォーカスを変化させて観察すると、同図(1)~(3)のよ うに異なる3種類の像を得ることができる。ホールにより 角度を曲げられて反転した電子ビームが集まる部分を物面 とすると、ホール位置に相当するところが明るい点とな り、逆に試料より下にフォーカスを合わせると、ホールの 存在する箇所は電子ビームの密度が低い部分となるため、 ホールよりも大きな暗いコントラストとなる。中間の面で は、電子ビームの粗密が少ないため、コントラストがほと んどなくなる。

次に,異物に相当する微小な突起を拡大して観察した例 を図6に示す。AFM (Atomic Force Microscope:原子間力 顕微鏡)の計測によれば直径67 nmの突起であるが、ミ ラー電子顕微鏡で観察した結果のラインプロファイルを見 ると,ほぼ10倍の700 nm程度の大きさの暗点として観察 されており,低倍率でも高感度に検出可能であることがわ かる。一方、このような突起が密集して存在すると、拡大 された欠陥の像が重なり合ってしまい解像できない。

以上のことから、ミラー電子顕微鏡の画像の特徴を積極 的に活用できるのは、平坦、または規則正しい繰り返しパ ターンを持った検査対象物の中に存在する孤立した形状欠 陥、または試料表面に電位の変化として現れる欠陥の検出 であることがわかる。

3. ナノインプリントモールドの観察

ミラー電子顕微鏡の画像の特徴を活用できる検査対象と して、ナノインプリントのモールドが挙げられる。規則正 しい繰り返しパターンを持っており、そこに存在するパ ターン崩れや寸法ずれ、および異物が検出対象のため前述 のミラー電子顕微鏡が得意とする検査対象の条件を満たし ているからである。ナノインプリントは、次世代以降の超 高密度磁気ディスク媒体上のパターンや、半導体の微細パ ターン形成にも適用を検討されている手法である。ナノイ ンプリントでは電子線描画装置で形成したマスターモール ドからレプリカモールドを作製し、レプリカモールドで型 押しして同じパターンを大量に製作する⁶⁾。したがって、 マスターモールドやレプリカモールドの欠陥を検査するこ



図6 AFMとミラー電子顕微鏡像の比較

ミラー電子顕微鏡像では、微小異物の大きさより大きなコントラストが現れる。

とが重要である。求められる欠陥検出性能は、一般的にパ ターン寸法の10%の誤差を検出できることであり、ディ スク媒体では数十nmのパターン形成をめざしているの で、数nmの寸法誤差の検出が、まずはめざすべき目標と なる。

そこで、作り込み欠陥としてラインパターンの一部を細 くしたL&S (Line and Space) パターンのナノインプリン トモールドをミラー電子顕微鏡像で観察し、その作り込み 欠陥を検出できるかを検証した。その結果を図7に示す。 画像の数字は図5に記載したフォーカス位置と対応してい る。試料より下面に合わせた像(3)でL&Sのスペースが 他の部分より幅広になっていることが観察されている。

次にこの作り込み欠陥を、より広視野低倍率で観察した





結果を図8(a) に示す。ハーフピッチ80 nmのL&Sのス ペースを,±16 nm増減した作り込み欠陥部分を画素サイ ズ50 nmで取得した画像である。50 nmのピクセルサイズ でも幅広部は暗,狭小部は明のコントラストが認識できる ことがわかった。また、図8(b) にはハーフピッチ50nm のL&Sのスペースを,+3 nm増した作り込み欠陥を30 nmのピクセルサイズで観察した像を示す。縦の暗い線が 欠陥部である。これにより、欠陥サイズの10倍のピクセ ルサイズでも、欠陥が顕在化できることを確認できた。な お、横に走るやや暗い線は、電子線描画装置でパターンを 描画する際のつなぎ部分に相当しており、その部分のみ数 nm程度パターンがくびれてスペースが広がっている部分 である。

以上のように、ナノインプリントモールドのL&Sパ ターンのピッチ誤差の欠陥を、そのサイズよりも数倍から



図8 | ミラー電子顕微鏡によるナノインプリントモールドの作り込み欠陥の低 倍率観察像

欠陥が拡大されて観察されるミラー電子顕微鏡の特長を活用すると,実際の欠 陥サイズより数倍~+倍粗い画素サイズ(低倍率)で欠陥を捉えることができる。 10倍程度粗い画素サイズでも高いコントラストで顕在化 できることがわかった。

4. SiCエピタキシャル層積層欠陥の観察

近年,大電力,高電圧および高温下で動作する半導体デ バイス用の材料として,Siよりバンドギャップが広い SiC⁷⁾が注目されている。SiCデバイスを製造する際の大き な課題は,基板上にエピタキシャル成長で形成するSiC結 晶に存在する多くの結晶欠陥(積層欠陥)である⁸⁾。この 結晶欠陥の存在を,非破壊でかつ微小なものまで観察・検 査することが必要とされている。基板の表面から非破壊で 観察できる手法としては,カソードルミネッセンス⁹⁾と フォトルミネッセンス¹⁰⁾が知られているが,検出感度は たかだか1ミクロン程度である。

ミラー電子顕微鏡は、表面の微小な凹凸だけでなく試料 表面の帯電状態を検出することが可能であることはすでに 述べた。結晶欠陥には、電荷がトラップされやすいことを 利用し、何らかの方法で電荷をトラップさせてその結果表 面に現れる電位の変化を画像化すれば結晶欠陥を観察でき ると考え、このSiCエピタキシャル層結晶欠陥の観察を試 みた。

試料は、4ミクロン厚さのエピタキシャル成長で作製し たnタイプの4H-SiC で、ドナー濃度は7.8×10¹⁴ cm⁻³で ある。まず、フォトルミネッセンスで結晶欠陥の存在を確 認し、その箇所をミラー電子顕微鏡で観察した。フォトル ミネッセンスの画像を図9(a)、(b) に、同一箇所のミラー 電子顕微鏡像を同図(c)、(d) に示す。(c) では欠陥の構造



図9 4H-SiCエピタキシャル層の積層欠陥観察例

フォトルミネッセンスによる像を (a) と (b) に,同じ場所をミラー電子顕微鏡 で観察した像を (c) と (d) にそれぞれ示す。フォトルミネッセンスで観察さ れた積層欠陥がミラー電子顕微鏡像で観察できているが, (d) は不鮮明であり, また(c), (d) ともにバックグランドにまだら模様のコントラストが生じている。



図10 | 紫外光を同時照射して観察したミラー電子顕微鏡による4H-SiCエピ タキシャル層の積層欠陥像

図9(a),(c)と同じ場所を紫外光同時照射してミラー電子顕微鏡で観察した像 を(a)に,図9(b),(d)と同じ場所を紫外光同時照射してミラー電子顕微鏡で 観察した像を(b)に示す。紫外光を同時照射しながら観察するとまだら模様 状の像障害はなくなり,欠陥コントラストは強調される。また裾を引いたよ うな暗いコントラストが現れる。

をある程度詳細に捉えているが,(d)では欠陥の一部しか 捉えておらずコントラストも弱い。また,両画像ともにま だら模様のコントラストが一面に現れている。これは絶縁 性の高い試料をミラー電子顕微鏡で観察する際に表れる特 有のもので,電子ビームの一部が反射されずに試料表面に 到達する,もしくは電子ビームが表面に非常に接近するこ とで,試料表面の電位が不安定になるためと推定される。

そこで、SiCのバンドギャップ(4H-SiCでは3.2 eV)よ りも高いエネルギーを持つ紫外光を、観察中に照射するこ とを試みた。これにより、SiC内に正孔一電子が生成し絶 縁性が低下してまだら模様が消失すると同時に、生成した 電子が結晶欠陥にトラップされ欠陥のコントラストが高く なることを期待した。照射した紫外光は波長:365 nm(3.40 eV)、侵入長:120 μm¹¹⁾である。この結果を図10に示す。

期待したとおりバックグランドのまだら模様は消失し, 一方で欠陥のコントラストは強くなった。また,図9(c), (d)では観察できなかった,裾を引いたような三角形の暗 いコントラストが観察された。これは内部に侵入する欠陥 の界面が帯電したことによるコントラストで,欠陥が深く なるに従って表面に現れる電位が弱くなるため,三角形の 頂点のほうのコントラストが弱くなっていると推察される。

なお,紫外光照射の有無に関わらず観察された線状の暗 いコントラスト部分をAFMで計測したところ,深さ約 5 nm,幅約200 nmの溝の両端に高さ約4 nm,幅約100 nmの土手状の突起が存在していることがわかった。すな わち,紫外光を照射しない場合は表面の凹凸だけが顕在化 されたと推定される。

以上のように、ミラー電子顕微鏡においてSiCの結晶欠陥による幅約200 nm 、高さ数 nm レベルの表面突起を鮮明に観察できたこと、さらに紫外光を試料に照射しながら観察することで内部に存在する欠陥を顕在化できる可能性を示した。

5. 画像取得速度(検査時間)について

ここで取り上げたミラー電子顕微鏡は、一定の面積を一 括して画像化する方式であるから,原理的に走査電子顕微 鏡より高速に画像を取得できる。走査電子顕微鏡と比較し てどの程度高速かを論じるためには、検出すべき欠陥の大 きさや欠陥コントラストの強さなどの検査対象に依存する パラメータ, CCD (Charge Coupled Device) やTDI (Time Delay Integration)などの画像検出素子に依存するパラメー タ(一括で検出できる画素数や検出応答速度など), さら に電子ビーム電流や同時に画像化できる面積、すなわち電 子ビームの面積などの電子光学系のパラメータをある程度 特定する必要がある。ただし、ミラー電子顕微鏡の最大の メリットである欠陥を拡大して検出できることを生かせる 検査対象(例えば、平坦または規則正しい繰り返しパター ンを持った検査対象物の中に存在する孤立した欠陥) であ れば、走査電子顕微鏡よりはるかに高速の検査が可能であ ることは間違いない。例えば、前述したナノインプリント モールドのL&S欠陥の場合,図8に示したように3 nmの 寸法誤差の存在を30 nm~50 nmの画素サイズで検出で きている。一方、走査電子顕微鏡であれば欠陥サイズと同 程度からせいぜい2倍程度(3 nm~6 nm)の小さい画素サ イズが必要と考えられる。同じ面積を検査するとして両者 を単純比較すると走査電子顕微鏡より約100倍高速に欠陥 を画像化できる計算となる。

6. おわりに

ここでは、ミラー電子顕微鏡の原理とナノインプリント モールドおよびSiCエピタキシャル層積層欠陥の観察事 例、および得られた画像からこれら欠陥の観察・検査の要 求に応えられる可能性について述べた。

ミラー電子顕微鏡の画像は,走査電子顕微鏡像とは異な り,試料形状をそのまま反映したコントラストを持たず, フォーカスにより全くコントラストが異なるため解釈が難 しい。また,絶縁性のある試料においては帯電の制御も必 須となる。しかし,光学検査装置では検出困難な微小な凹 凸や,帯電を伴う内部欠陥を高感度に検出可能であり,し かも原理的に走査電子顕微鏡より桁違いに高速の検査が可 能という特長を備えている。フォーカスの自動制御や画像 処理の技術は急速に進んでおり,また試料帯電を制御する 技術も着実に進歩している。今後,これら関連技術の進歩 を取り入れつつ高感度で,かつ電子顕微鏡としては画期的 な高速性を備えた検査装置とするべく開発を進めていく考 えである。

最後に、この研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・ 産業技術総合開発機構 (NEDO)の産業技術開発費補助事 業の結果得られたものである。関係各位に深く感謝の意を 表する次第である。

参考文献

- U. Brand, et al. : Modellversuche Zur Bildentstehung im Elektronenspiegeloberflächenmikroskop, Experimental Technique of Physics (Berlin) 11, 18 (1963)
- A.B. Bok, et al. : Mirror Electron Microscopy, Advances in optical and electron microscopy, Vol. 4, R. Barer and V. E. Cosslett, ed., Academic Press Inc., 161-261 (1971)
- T. Shimakura, et al. : Mirror electron microscope for inspecting nanometersized defects in magnetic media, Microelectronic Engineering, Vol. 85, 1811-1814 (2008)
- 4) M. Hasegawa et al. : Observation of electron trapping along scratches on SiO_2 surface in mirror electron microscope images under ultraviolet light irradiation, Journal of Applied Physics, Vol. 107, 084107 (2010)
- 5) T. Shimakura, et al. : Inspection technique for nanoimprint template with mirror electron microscopy, Proc. SPIE 7823, 78230Q (2010)
- G.M. McClelland, et al. : Nanoscale patterning of magnetic islands by imprint lithography using a flexible mold, Applied Physics Letters, Vol. 81, 1483-1485 (2002)
- W. Wondrak, et al. : SiC Devices for Advanced Power and High-Temperature Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 48, 307-308 (2001)
- H. Fujiwara et al. : Characterization of in-grown stacking faults in 4H-SiC (0001) epitaxial layers and its impacts on high-voltage Schottky barrier diodes, Applied Physics Letters, Vol. 87, 051912 (2005)
- S. I. Maximenko, et al. : Cathodoluminescence study of the properties of stacking faults in 4H-SiC homoepitaxial layers, Applied Physics Letters, Vol. 94, 092101 (2009)
- G. Feng, et al. : Characterization of stacking faults in 4H-SiC epilayers by room-temperature microphotoluminescence mapping, Applied Physics Letters, Vol. 92, 221906 (2008)
- 11) S. G. Sridhara, et al. : Absorption coefficient of 4H silicon carbide from 3900 to 3250 Å, Journal of Applied Physics, Vol. 84, 2963 (1998)

執筆者紹介

品田博之 1985年日 所属 現在,超高 博士(工学 日本顕微鏡

1985年日立製作所入社,中央研究所 ライフサイエンス研究センタ 所属 現在,超高圧電子顕微鏡の開発に従事 博士(工学)

日本顕微鏡学会会員,応用物理学会会員



1999年日立製作所入社,中央研究所 ライフサイエンス研究センタ 超電顕プロジェクト 所属 現在,超高圧電子顕微鏡の開発に従事 応用物理学会会員

長谷川 正樹

島倉 智一



1990年日立製作所入社,中央研究所 ライフサイエンス研究センタ 計測システム研究部 所属 現在,ミラー電子顕微鏡の開発に従事 博士(理学) 応用物理学会会員