

技術報告

1 nm 高分解能走査型拡がり抵抗顕微鏡(SSRM)を用いた Si デバイスにおける 2 次元キャリア分布計測及びその課題

張 利*

東芝研究開発センター LSI 基盤技術ラボラトリー
212-8582, 川崎市幸区小向東芝町1 番地

*li.zhang@toshiba.co.jp

(2014 年 10 月 14 日受理: 2014 年 11 月 18 日掲載決定)

走査型拡がり抵抗顕微鏡(SSRM)は, Si デバイスにおける 2 次元キャリア分布を計測する有効な手法である. 我々は, 高真空下で SSRM 計測を行うことにより 1 nm の空間分解能を達成した. また $10^{15} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の広いダイナミックレンジでキャリア濃度を計測できることも確認した. 高真空下での SSRM は, 将来の新しいデバイスに対してもキャリアの解析に大きな能力を有すると期待される. 本報告では, SSRM 計測の実験手順を示すと共に CMOSFET への応用例について紹介し, キャリア濃度の解析における再現性や定量性に影響を与える課題についても議論した.

Development and Technical Issues on 2D-Carrier Profiling of Silicon Devices by Scanning Spreading Resistance Microscopy (SSRM) with 1 nm spatial resolution

Li Zhang*

Advanced LSI Technology Laboratory, Corporate R&D Center, Toshiba Corporation
1, Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki, 212-8582, Japan,

*li.zhang@toshiba.co.jp

(Received: October 14, 2014; Accepted: November 18, 2014)

Scanning spreading resistance microscopy (SSRM) is a powerful technique for 2D-carrier profiling of silicon devices. We developed high spatial resolution SSRM by measuring in a high vacuum and achieved 1 nm spatial resolution. We also confirmed wide dynamic range of measuring concentration of 10^{15} through 10^{20} cm^{-3} . In this paper, we demonstrate experimental aspects and procedures of SSRM measurement, and applications to scaled CMOSFETs. SSRM in a high vacuum is shown to have high potential for carrier analysis of future devices. Technical issues affecting reproducibility and quantitative analysis of carrier concentration are also discussed.

1. 半導体断面における不純物濃度 2D 分布評価技術
近年, CMOS トランジスタ (CMOSFET) などの LSI デバイスの微細化や 3D 化が急速に進むにつれ, LSI プロセスは 45 nm 以下のテクノロジーノード領域に突入し, プロセス制御の難しさから, 高精度, 高分解能, 高次元の分析技術への要求が高まりつつある. 国際半導体技術ロードマップ(ITRS 2013)では

高空間分解能計測技術が要求され, とりわけ不純物ドーピング濃度分布計測(2D/3D)技術が要求されている[1]. 活性化ドーピング濃度としてキャリアの 2D 分布解析技術が求められるスペックは主に以下の 3 点が挙げられる. 高い空間分解能, 広い不純物濃度測定レンジ(10^{15} - 10^{20} cm^{-3})そして特定箇所分析である.

今まで、ドーパント分布計測技術として、SIMS による一次元深さ方向キャリア濃度分布分析はソース・ドレインエクステンション(SDE)及び Halo 解析に有効な手段であるが、1D 深さ方向の情報しか得られない。デバイス断面における接合位置など 2D 的な情報を得るためには走査型プローブ顕微鏡(SPM: Scanning Probe Microscope)ファミリー及び電子線ホログラフィー(Electron Holography)が用いられている。2D キャリア計測に用いられる SPM ファミリーは、走査型トンネル顕微鏡(STM: Scanning Tunneling Microscope), 走査型拡がり抵抗顕微鏡(SSRM), 走査型容量顕微鏡(SCM: Scanning Capacitance Microscope), 走査型ケルビンフォース顕微鏡(KFM: Kelvin Probe Force Microscope)などが挙げられる。

STM や電子線ホログラフィーは高い空間分解能を示しているが、18 乗以下の低い不純物濃度の検出は難しいとされている[2, 3]。評価可能なダイナミックレンジの広さと分析にあたって試料準備の簡便さから、有力な候補は SSRM[4-7]と SCM[8, 9]に絞られる。このうち、微細デバイスを評価するのに数ナノメートルの高空間分解能が要求される場合、SCM ではこのスペックを満たすことができない。また、原理的には、SCM 信号強度がキャリア濃度に対してほぼ反比例する傾向にあるが、実験的には、コントラスト反転現象が多く報告されている[9]。つまり、信号は 10^{17} cm^{-3} 付近でピークを持ち、さらに低濃度側になると、濃度の減少に伴って信号も減少する現象である。このコントラスト反転現象は断面試料の作製手順に依存し、影響を及ぼす経験的な要因や各種半導体材料の校正曲線が系統的に分類されてきたが、SCM データの理論的な統一解釈は難しい。

一方、SSRM の場合、移動度がほぼ一定の仮定のもとで、SSRM 信号(電流強度) I とキャリア濃度が比例の関係にあるため、プローブと試料間にバイアスを印加することにより、得られた 2D 電流分布像からキャリア濃度の 2D 分布が得られる。従って、直接的にキャリア濃度の 2D 分布を測定することができる。

我々はこれまでに、CMOSFET における SSRM を用いた 2D キャリア分布の高分解能評価に取り組み、極浅 pn 接合位置を 1 nm の高空間分解能で評価することに成功した[5-7]。さらには、収束イオンビーム(FIB)によるピックアップ(PU)法を開発し、極薄(< 60 nm)のサンプル作製に成功し、実デバイスの故障解析への道を開いた[7, 10]。

2. SSRM による断面における不純物キャリア分布評価手法

2.1. SSRM 測定原理及び回路

SSRM は、SPM ファミリーの一員であり、具体的には Conductive Atomic Force Microscopy (C-AFM, 導電型 AFM) の一種である。まず、SPM は、IBM のビニヒ(Binnig)らによって 1981 年に開発された STM をベースとして、様々な形に進化してきた顕微鏡の総称である。SPM の原点となる STM は観察対象が導電性を有する金属や半導体などに限られていたが、導電性の有無を問わず無機物、有機物、生物の試料いずれに対しても利用できる原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope) AFM の登場(1986 年)以来、SPM の利用範囲は格段に広がってきた。

SSRM の原理を理解するため、まずは導電型 AFM (C-AFM)の原理を簡単に説明する。図 1 に示すように、導電型 AFM は、接触(コンタクト)モード AFM を基本にしており、外部電圧印加回路、導電性プローブと電流アンプより構成されている。導電性プローブと試料間にバイアス電圧を印加し、接触モードにおいてプローブを試料表面で走査することによってトポグラフィー像と同時に試料の局所的抵抗分布が得られる。具体的には、コンタクトモード AFM のフィードバック制御回路を利用してトポグラフィーを取得しながら、試料と導電性プローブとの間にバイアス電圧を印加して電流マッピング像を測定する。こうしてトポグラフィー像と同時に試料の局所的電流分布像が得られ、これが抵抗分布像に対応する。

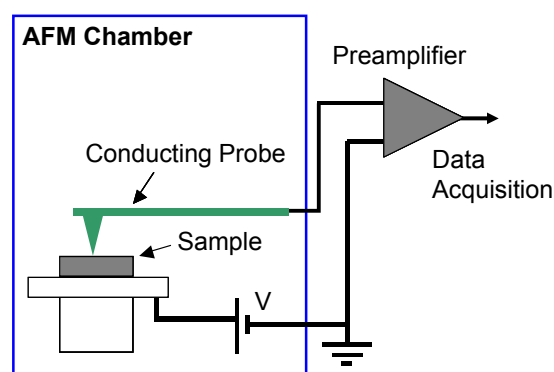


Fig. 1. Schematic circuit of conductive AFM measurement.

次に、SSRM の測定原理を簡単に説明する。図 2 は高真空中 SSRM を用いた MOSFET デバイス断面における不純物キャリア評価法の概念図である[5,6]。SSRM 技術をマクロ的な視点から見ると、拡がり抵抗法の AFM バージョンとも言える。プローブの接

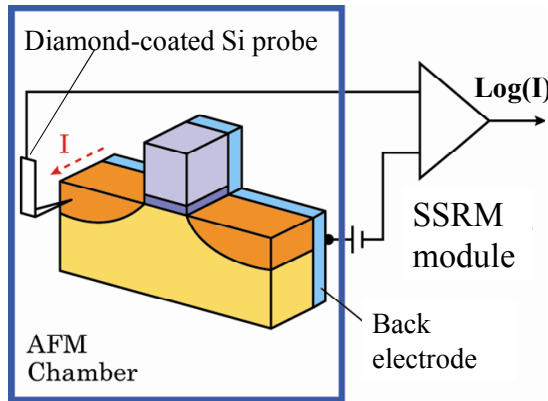


Fig. 2. Schematic circuit of SSRM measurement in a high vacuum.

$$R = \rho/4a \quad \textcircled{1}$$

$$\rho \sim 1/N \quad \textcircled{2}$$

$$\Rightarrow I \sim N$$

Fig. 3. Formula of relation between spreading resistance and resistivity. Resistivity is inversely proportional to carrier concentration, assuming that mobility is constant in the SSRM measurements.

触部位を円筒型の平面円と仮定した場合、図3の式①に表すように、半導体の拡がり抵抗値 R は抵抗率 ρ に比例し、有効接触半径 a に反比例する。また、抵抗率 ρ は不純物キャリア濃度 N と移動度の積に反比例する。移動度が一定と仮定した場合、式②のように、抵抗率 ρ は不純物濃度 N の逆数に対応し、電流値 I は不純物キャリア濃度 N に対応する。

SSRM では、電流 I がキャリア濃度に対応しているため、プローブと試料との間に一定のバイアスを印加することによる 2D 電流分布像から直接的にキャリア濃度の 2D 分布が得られる。また、幅広い範囲で抵抗値を測定できるので幅広いダイナミックレンジでキャリア濃度を測定できる。標準試料[11] (IMEC 供試の p 型シリコンチップ) を用いたキャリア濃度の半定量キャリブレーション結果を図4に示し、 10^{15} cm^{-3} まで約 5 桁のダイナミックレンジが得られていることがわかる。

SSRM は導電性 AFM に対して、三つの特徴が挙げられる。1つ目は電流アンプにログアンプを用いること。これにより、幅広い抵抗領域の測定をカバーできる。2つ目はプローブと試料間の接触圧 (ロード) が強いこと。これは良好なコンタクトを取るためである。プローブ先端と試料との間はポイントコンタクト (ナノコンタクト) となるため、できるだ

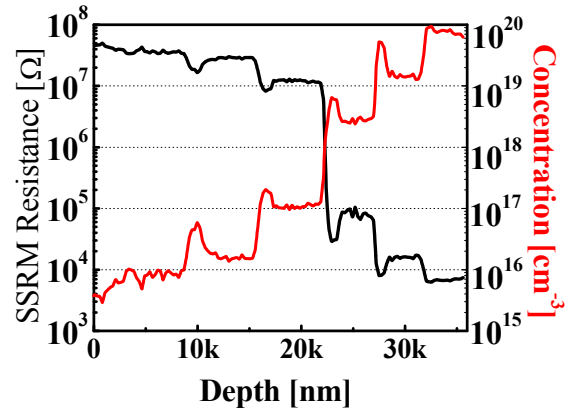


Fig. 4. Carrier concentration calibration from measured SSRM resistance of a standard staircase sample from IMEC p-type Si chip, showing a wide dynamic range of five orders of 10^{15} - 10^{20} cm^{-3} .

けオーミックライクなコンタクトが望ましい。強い接触圧のもとで測定を行なうため、プローブの磨耗が無視できなく、磨耗に強い導電性プローブが必要になる。Si 系の試料を測定する場合は、市販されているダイヤモンドコーティングの Si プローブが通常使われる。三つ目は断面試料を測定することである。SSRM はデバイス断面を走査することにより、試料内部のナノスケールにおける抵抗分布を精査することができる。そこで、ナノスケールにおいて平坦な断面試料を作製する必要がある。

2.2. 試料作製方法及び測定手順

図5に、機械研磨法を用いた試料作製から SSRM 測定、データ解析までの流れのフローチャート及び断面試料の模式図を示す。ナノスケールにおいて平坦な断面試料作製が鮮明な像を得ることの前提条件

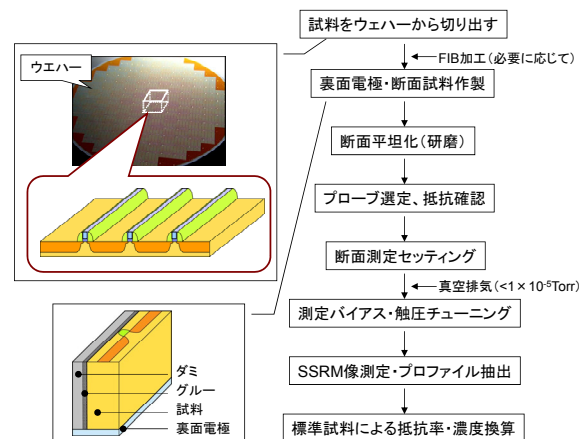


Fig. 5. A flow chat of sample preparation method of cross-section specimen for SSRM measurement.

である。SSRM 測定に用いられる断面試料は基本的に SCM 同様、裏面電極形成及び平坦な最終仕上げが必要であるが、測定面の酸化処理は必要としない。図 5 に示す機械研磨法を用いた断面試料作製法は一般的であるが、故障解析応用などに要求される特定箇所における SSRM 評価には、より高い位置決め精度が要求され、FIB 加工技術を用いた試料加工方法も検討され、報告されている[10]。

SSRM の最も重要な応用はシリコンデバイスの断面 2D キャリア分布評価である。測定は大気中から可能であるが、我々は真空中測定による空間分解能向上を見出している(図 6) [5, 6]。図 6 では明るいコントラストが高い導電性を表し、真空排気によるノイズ及び接触抵抗の低減効果が確認されている。この様に大気中では過剰なノイズで良好な測定ができないが、真空中では高分解能の像が高い再現性で得られ、真空排気は SSRM 測定に極めて重要であると言える。ITRS2013 計測技術ロードマップでは、キャリア濃度 2D 計測技術として、高真空中 SSRM の有効性が強調されている[1]

測定にはプローブと試料間の良好なコンタクトや高空間分解能及び再現性が要求されるため、硬く、鋭く、磨耗に強い導電性のプローブが必要とされ、通常はこれらの条件をすべて満たすことができるダイヤモンドプローブが用いられる。カンチレバーのばね常数は 20-100 N/m で、プローブ試料間の触圧は 1 μ N 以上が必要とされている。ダイヤモンドプローブはダイヤモンドコーティングシリコンプローブの他、モールド法によるフルダイヤモンドプローブの使用も報告されている[12]。プローブの導電性を確認するためには、Pt または Au 薄膜試料を用いた抵抗測定が一般的に使われている。市販のダイヤモンドプローブの抵抗値は約数 k Ω である。

2.3. SSRM による先端 CMOSFET の分析事例

高い空間分解能と高い濃度感度を有することから、SSRM は微細 CMOSFET のチャンネル部における

SDE 領域の横拡散や、比較的低い濃度の Halo 不純物分布の解析に優位性を示している。図 7 に極浅 pn 接合 pMOSFET の SSRM 像及び TCAD (Technology CAD) によるシミュレーション結果を示す[6]。NiSi 領域、ポリ Si 領域、ソース、ドレイン領域、SDE 領域及び Halo 領域がすべて鮮明に識別されている。ミリ秒アニールのため、極浅 SDE 接合が実現され、Halo 不純物の横拡散が少ないことも確認されている。また、ゲート長の減少に伴って、Halo 領域の重なりも確認されている。この様に、微細 CMOSFET における 2D キャリア分布解析に SSRM 評価技術が重要な役割を果たせることが示されている。

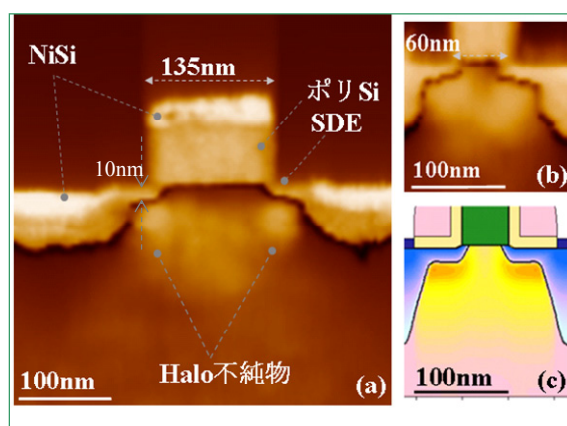


Fig. 7. SSRM image of ultrashallow-junction pMOSFETs. (a) L=135 nm; (b) L=60 nm; (c) TCAD.

3. 抵抗やキャリア濃度定量化評価に向けた課題

ITRS2013 では、微細化が進む CMOSFET 及びポスト CMOS 新材料・新原理デバイスの計測における SPM の必要性を訴えている一方、標準化に向けてさまざまな課題の解決が急務であることを指摘している。測定されるデバイスや材料の特性変動を検出するには、計測技術の再現精度(reproducibility)、計測精度(precision)、正確さ(accuracy)が要求されている。SSRM の場合、高空間分解能や広いダイナミックレンジが得られているが、標準化及び汎用化に向けた

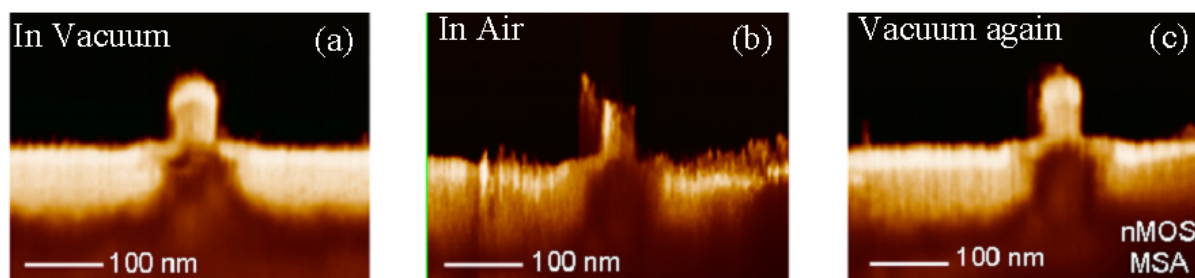


Fig. 6. High resolution obtained by measuring in a vacuum. (a) measuring in a vacuum; (b) released to air; (c) vacuum again.

取り組みが十分とは言えない。SSRM は局所拡がり抵抗分布を測定することによりキャリア分布を算出するため、再現性良く、定量的な抵抗評価が計測のポイントになる。拡がり抵抗法の再現性や定量性はいずれも試料 - プローブ間接触及びプローブ特性に依存するので、それぞれの影響について検討する必要がある。

まず、再現性について、繰り返し測定により安定したデータを得るには、試料 - プローブ間接触の再現性が不可欠である。SSRM 測定においては試料 - プローブ間の良好なコンタクトを得るため、ダイヤモンドプローブと試料間に μN レベルの強いロードを印加してマッピングを行う。ダイヤモンドの硬さによって測定後の Si 試料表面へのダメージやプローブの摩耗が生じやすいと考えられる。試料表面の測定に伴うダメージを調べた報告がみられるが、そのダメージと抵抗測定再現性の相関は必ずしも明確にされていない。一方、ダイヤモンドプローブの測定による摩耗も無視できなく、取り分け広い測定範囲を要するパワーデバイスの測定においては顕著であり、スキャン測定中に摩耗によるプローブ抵抗の増加が生じることがしばしば観察され、データの不安定性をもたらす。これは摩擦による試料から発生する Si 粉塵のプローブへの付着や、ダイヤモンドコーティング層の剥がれが要因と考えられる。以上から、SSRM 測定の再現性を制御するには測定による試料へのダメージやプローブの摩耗を検討することが重要なアイテムとして挙げられる。プローブ摩耗低減の取り組みとして、SIS(サンプリング・インテリジェント・スキャンモード)と呼ばれる測定モードが開発されて[13]、SSRM への応用例も報告されている[14]。SIS モードはデータ取得時のみ探針と試料が接触し、それ以外は上空に待避しながら水平方向に高速移動するモードであり、プローブと試料の摩耗を低減することが期待される。

一方、拡がり抵抗及びキャリア分布の定量評価課題として、まず拡がり抵抗から抵抗率の定量値を算出するために接触面積を見積る必要がある。通常は SRP や SIMS、または標準試料による校正が用いられる。現実的には接触面積はプローブ形状や試料表面の状態に影響されることから、制御が難しい。抵抗評価の定量性精度を上げるためには都度標準試料による校正が望ましい。次に、プローブ抵抗の影響をも考えなければならない。比較的低濃度領域では試料抵抗が高く、プローブ抵抗はほぼ無視できるが、 10^{20} cm^{-3} 近傍高濃度ドーピング領域では拡がり抵抗

もプローブ抵抗に近づくほど低くなり、プローブ抵抗の影響はドーピング濃度の増加に依存して徐々に現れる。図 8 に、キャリア濃度と SSRM 測定抵抗より算出したキャリア濃度の相関を示す。プローブ抵抗 $5 \text{ k}\Omega$ と設定している。キャリア濃度が 10^{19} cm^{-3} 以上の領域では、プローブ抵抗の影響により濃度測定理想からの乖離が現れ、測定されたキャリア濃度は本来の濃度より低く見積もられることがわかる。従って、高濃度ドーピング領域における抵抗及び濃度の高精度定量評価はプローブの抵抗の影響を考慮すべきである。

今後はさらなる微細化や新材料の導入に合わせ、適切な標準試料の設計及び評価が SSRM 計測の定量性検証において重要になってくると思われる。

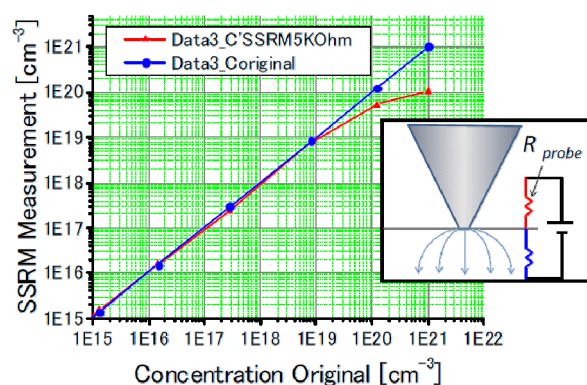


Fig.8. Influence of probe resistance on concentration calibration of the SSRM measurement. The inset shows a model of equivalent circuit by inserting a probe resistance of $5 \text{ k}\Omega$ in series with the spreading resistance.

4. おわりに

デバイスの微細化、構造の多様化及び新材料の導入に伴い、拡散層制御がますます難しくなると予測され、SSRM の有効性も増してくると思われる。そのための新しい構造や材料に適した高精度手法の開発や測定手順の標準化は今後の課題である。

5. 謝辞

試料提供及び計算頂いた(株)東芝大内和也氏、安達甘奈氏、谷本弘吉氏、有意義な議論を頂いた(株)東芝小池三夫氏、早瀬洋平氏、原啓良氏、栗原美智男氏、坪晴子氏、嶋崎綾子氏、竹野史郎氏、古賀淳二氏、村岡浩一氏、富田充裕氏、西山彰氏に深謝致します。

6. 参考文献

- [1] The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), (2013) ed. : <http://www.itrs.net>
- [2] N. Ikarashi, *J. Appl. Phys.* **103**, 114514 (2008).
- [3] H. Fukutome, "Direct measurement of effects of shallow-trench isolation on carrier profiles in Sub-50 nm N-MOSFETs" *VLSI Symp. Tech. Dig.*, pp.140-141 (2005).
- [4] P. De Wolf et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **16**, 355 (1998).
- [5] L. Zhang et al., "Reproducible and High-Resolution Analysis on Ultra-Shallow-Junction CMOSFETs by Scanning Spreading Resistance Microscopy", *Extended Abstracts of the Sixth International Workshop on Junction Technology, IWJT '06*, pp.108-111 (2006).
- [6] L. Zhang et al., *Appl. Phys. Lett.* **90**, 192103 (2007).
- [7] L. Zhang et al., *Electron Device Letters*, **29**, 799 (2008).
- [8] Y. Kukuchi, et al., *FUJITSU Sci. Tech. J.* **38**, 75 (2002).
- [9] T. Fujita et al., *Meas. Sci. Technol.* **25**, 044021 (2014).
- [10] T. Claryssed et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **16**, 394 (1998).
- [11] L. Zhang et al., "Direct visualization of anomalous-phosphorus diffusion in failure-bit gates of SRAM-load pMOSFETs with high-resolution scanning spreading resistance microscopy", in *IEDM Tech. Dig.*, pp.804-807 (2010).
- [12] T. Hatschel, et al., *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1603 (2000).
- [13] SIS モード, 日立ハイテクサイエンス製, Available:http://www.hitachi-hitec-science.com/products/spm/sp_SIS/about.html
- [14] 原田ら, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 19a-D5-6 (2014).

査読コメント

査読者 1.

著者は SSRM 法を用いた MOSFET 試料の実用分析の事例を挙げ, 同手法の試料作製方法に関するノウハウ, 真空中で大気中よりも良好なデータが得られたという実験の成果, キャリア濃度への解析方法を述べ, 誤差に対する補正の可能性を含めて興味深く執筆した. 本原稿の内容は表面・界面の工業分析を担当する読者に価値ある情報を多く提供し, JSA 誌に掲載される要件を満たしているため, 本誌編集長にこの論文が出版されることを強く推薦する.

しかしながら, 原稿には下記 4 つ項目について不明なところがあり, それらについて著者は説明の追記あるいは修正すべきである.

[査読者 1-1]

著者は第 1 章第 3 段落の後半で文献[9]から SCM 法のコントラスト反転現象について記載しているが, 原著論文に書かれていることを正しく引用すべきである. そのことを踏まえた上で, 次の段落で SSRM 法の改善点や解析の優位性を主張するべきである. そこで, 本文第 1 章第 3 段落の最後の文章については下記のように修正することを要求する.

「このコントラスト反転現象は断面試料の作製手順に依存し, 影響を及ぼす経験的な要因や各種半導体材料の校正曲線が系統的に分類されてきたが, SCM データの理論的な統一解釈は難しい。」

答及び改定をご検討ください.

[著者]

SCM のコントラスト反転現象の解釈について, ご指摘のように本文を修正いたしました.

[査読者 1-2]

本文第 2.1 節の中で, 比抵抗率 ρ とキャリア濃度 N の関係について触れられているが, 移動度 μ が一定であるという仮定は非常に粗い近似につながるため, その取扱いについては細心の注意を払うべきである.

Si のキャリア濃度 (300K, 活性化率 100%の不純物濃度と解釈してよい) で 15 乗から 20 乗までの 5 桁の範囲に対する比抵抗率の変化は 4 桁程度しかなく, 著者のいう移動度を一定とした一連の解析は理に適っていない. 図 4 の実験結果で桁数が比較的合っていたことは, 図 8 のプローブ抵抗の影響であり, 著者は原理説明の中で示す近似とは区別して議論すべきである.

著者は「電流 I がキャリア濃度にほぼ比例しているため」と記述しているが、これは近似なしには理論的に成り立たないため、「電流 I の変化がキャリア濃度に対応しているため」もしくは「移動度一定の仮定のもとで電流 I とキャリア濃度が比例の関係にあるため」と誤解の無いように修正ないし補足すべきである。

[著者]

移動度が一定という設定を本文に追加し、電流と濃度の比例関係を改め、「対応する」という表現にいたしました。

[査読者 1-3]

図 3 の中で、著者は拡がり抵抗値 R について $R=\rho/4a$ の式を導入しているが、本文に「プローブの接触部位を円筒型の平面円と仮定」したときに成り立つ場合であることは本文に追記すべきである。続く図 8 の挿絵では、半球と見なされるプローブが描かれているが、そのような場合には $R=\rho/2\pi a$ の式となるので注意されたい。著者はどちらかに統一するか、読者に誤解の無いように前述の文案のように配慮すべきである。

SSRM 法は実用化されて 10 年以上の歳月が経ち、多くの研究者が半球型もしくはそれよりも精度の高いコーン型の式でキャリア濃度の解析をしているので、今後は特別な理由がない限り、 $R=\rho/2\pi a$ の方を導入することを強く奨める。このことは、著者自身も本文後半で望んでいる標準化の一步でもあるので検討頂きたい。

[著者]

ご指摘のように、プローブを半球形に想定する場合と、接触面積として、円形にする場合は式が若干異なります。半球形では、 $R=\rho/2\pi r$ という式になり、 r は半球の半径です。一方、半導体側の接触面積に注目し、接触形状が円形に想定した場合、接触半径が a となり、拡がり抵抗は $R=\rho/4a$ となります。こちらはより現実的な解と言われてきました。この場合はプローブが試料へのはめ込みは考慮しなく、より一般的な式のように受け止めます。今後もこの式で定量化の議論をしたいと考えています。図面 Fig. 8 も対応して、平面接触のモデルに変更いたしました。

[査読者 1-4]

第 2.1 節の本文中と図 4 の中で標準試料の実験結果を示しているが、どこの標準なのかを示すべきである。例えば、「IMEC 供試の p 型シリコンチップ」

のように記すこと。可能であれば、その論文も引用されたい。参考までに以下の文献を挙げるので、引用する場合には照合されたい。

T. Claryssed, M. Caymax, P. De Wolf, T. Trenker and W. Vandervorst, *J. Vac. Sci. Technol. B* 16 (1), Jan/Feb, 394 (1998).

[著者]

ご指摘のように、IMEC 供試の p 型東電タイプ試料であること、本文に追記しました。参考文献も追加いたしました。

査読者 2. 筒井一生 (東京工業大学)

SSRM による微細領域のキャリア濃度の二次元分布の計測を実際の微細 CMOS トランジスタの断面測定の例を示しながら、その特長や留意すべき技術的ポイント、さらに今後の課題についてわかりやすくまとめて書かれており、掲載の価値が充分あると考えられます。

[査読者 2-1]

3 ページ目右カラムで、プローブの摩擦の影響の重要性が指摘されています。摩擦は評価結果にどのような悪影響を与えるのか、具体的に少し説明を加えて下さい。原文ではこの説明が全く無いので、どうい影響がでるのかイメージし難いです。

[著者]

今回は摩擦に関する具体的なデータを整理できておらず、抽象的な表現になってしまいました。摩擦によって、プローブ先端にシリコン粉塵が付きやすいこと、また、プローブの抵抗増加しやすいことを例として挙げさせていただきました。それ以上のことを議論するにはさらなるデータの提示が必要となります。