

報告番号	甲 第 13864 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 ナノ秒時間分解計測に向けた NEA フォトカソードを電子源とする走査電子顕微鏡の開発
(Development of Scanning Electron Microscope Equipped with Electron Source Using NEA Photocathode towards Nanosecond Time-resolved Measurement)

氏 名 森下 英郎

論 文 内 容 の 要 旨

走査電子顕微鏡 (Scanning electron microscope : SEM) は金属、セラミックス、半導体、高分子、生体などの様々な試料表面の微細構造を観察、または分析するためのツールとして幅広く利用されている。SEM 像は、集束させた電子線を試料上で走査して各照射位置で発生する電子を検出し、その信号強度をマッピングしたものである。通常の SEM 像の検出信号源はエネルギー数 eV で放出される二次電子である。試料に対する電子線の侵入深さは照射エネルギーに依存する。照射エネルギーを大きくするほど、試料内部の電子散乱領域が大きくなり、SEM 像に試料の内部情報が重畳する。このため、試料表面約 10 nm 以内の情報を含む SEM 像を得るには、約 1 keV 程度の照射エネルギーの SEM 観察が有効である。また、照射エネルギー約 1 keV 以下の SEM 観察は、導電性の小さい試料では帯電に伴う像障害の悪影響を低減する手法としても有効である。これは、多くの試料で、試料に入射する電子数と放出される電子数が同程度になる照射条件が、照射エネルギー1 keV 付近に存在するためである。

本論文は SEM の低照射エネルギー域の観察性能を向上することを目的とし、負の電子親和性 (Negative electron affinity : NEA) の表面を有する半導体フォトカソードを

電子源とする光励起方式の電子銃を搭載した SEM を新たに構築し、実機検証を行った。低照射エネルギー域の SEM 観察で高い空間分解能を得るには、高輝度かつ単色性の良い（エネルギー幅の小さい）電子源が必要となる。電子源の光源径に起因するビーム径は、照射電流を I_p 、輝度を β_V として、 $\sqrt{I_p/\beta_V}$ に比例する。SEM 像の取得に必要な最小電流で、光源径が最適ビーム径の制限とならないようにするには、高輝度電子源が必要となる。また、色収差は電子源のエネルギー幅 ΔE に比例するため、色収差の低減にはエネルギー幅 ΔE の小さい単色電子源を利用することが重要となる。本研究で用いた NEA 表面を有する p 型 GaAs フォトカソードは、Schottky 型電子源と同程度の $\beta_V = 1 \times 10^7 \text{ A/m}^2/\text{sr/V}$ の高輝度特性と、冷陰極型（Cold field emission : CFE）電子源よりも小さいエネルギー幅 $\Delta E = 0.2 \text{ eV}$ を備える。この半導体フォトカソードは、電子放出を励起光の照射によって制御できるため、励起光をパルス光とすることでパルス電子線を発生させることができる。また、この半導体フォトカソードは、名古屋大学でスピン偏極電子源として開発されたもので、円偏光を照射することでスピン偏極電子線を発生させることができる。以上の特長を応用し、時間分解計測やスピン計測の機能を付加することによる性能向上を検討した。

本論文は 6 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本論文全体の緒言として SEM の低照射エネルギー観察の有用性を説明し、パルス電子線やスピン偏極電子線を用いた計測手法について説明するとともに、本研究の目的を示した。

第 2 章では、SEM の原理や試料上の照射ビーム径に寄与する各種収差について説明した。特に、低照射エネルギー域の SEM の空間分解能の制限となる、色収差と輝度について解説した。

第 3 章では、NEA 表面を有する p 型 GaAs を活性層とする半導体フォトカソードを用いた電子源について解説した。NEA 表面の形成原理や電子線の発生原理に加え、本研究で使用した NEA フォトカソードより放出される電子線について得られる単色性、放出角度分布、干渉性などの基本特性について説明した。さらに、NEA フォトカソードを SEM で高輝度単色電子源として利用するために製作した電子銃について説明した。本研究では、フォトカソード表面を NEA 活性化するための活性化室と、励起光を照射して電子線を SEM の照射電子線として利用するための電子銃室の 2 室構造を持つ電子銃を作製した。NEA フォトカソードを高輝度電子源として利用するには、仮想光源径を小さくするために、フォトカソードの活性層の励起光集光径を小さくすることが重要

となる。このため、活性層上で励起光の集光径が約 $1\ \mu\text{m}$ となるように、フォトカソード裏面近傍に開口数の大きい集光レンズを配置する電子銃構造とした。

第4章では、NEA フォトカソードを電子源とする SEM を構築し、波長 $785\ \text{nm}$ の連続光で励起した場合の SEM 像について、照射エネルギー $1\ \text{keV}$ の空間分解能を評価した結果を示した。SEM 像の分解能評価に先立ち、製作した電子源の仮想光源径を評価した。フォトカソード裏面に配置した集光レンズを光軸方向に移動させて、励起光の光源径をデフォーカスした条件で取得した SEM 像のボケ量と、フォトカソード・アノード間の電界レンズを考慮して計算した仮想光源径の関係から、励起光集光時の仮想光源径 $1.3\ \mu\text{m}$ を得た。この仮想光源径の評価値と角度制限して測定した照射電流から、NEA フォトカソードの輝度は最大で $1.1 \times 10^7\ \text{A/m}^2/\text{sr/V}$ となり、Schottky 電子源と同程度の換算輝度が得られることを確認した。分解能評価用の金粒子試料を用いて、NEA フォトカソードを用いた光励起電子源と Schottky 電子源の場合について最適照射条件で得られた SEM 像の像シャープネス値 (DR 法) を評価した。結果、電子源のエネルギー幅の違いを反映して、NEA フォトカソードを用いた光励起電子源では Schottky 電子源の場合と比べて像シャープネス値が 16% 改善されることを確認した。SEM のビーム径の計算値と比較して得られた結果の妥当性を検証した結果、Schottky 電子源のエネルギー幅 $0.6\ \text{eV}$ に対し、NEA フォトカソードを用いた光励起電子源のエネルギー幅は $0.2\ \text{eV}$ 以下であることがわかった。また、得られた結果について、収差補正技術やモノクロメータを用いた色収差の低減手法と比較して NEA フォトカソードを用いた光励起電子源の優位性を示した。

第5章では、波長 $760\ \text{nm}$ のパルス光で励起した場合のパルス電子線について電子線パルス波形の計測結果に基づき照射エネルギー $3\ \text{keV}$ について、パルス電子線の輝度を評価した。パルス電子線を応用した計測アプリケーションとして、光ポンプ・電子プローブ法による試料の励起状態の時間分解計測や、パルス電子線を照射して放出される信号波形の時間分解計測などがあり、いずれも計測時間分解能はパルス電子線のパルス幅と同程度となる。本研究では、ナノ秒時間分解計測をターゲットとして、最短数ナノ秒のパルス幅のパルス電子線について、最大輝度が得られる条件を探索するために励起光の時間平均強度を約 $1\ \text{mW}$ に固定にしてパルス幅やパルス周波数を変えて放出される電流量を測定した。結果、励起光ピーク強度の増大に伴い量子効率が低下することがわかった。この要因を検証するために空間電荷効果を考慮したパルス電子線の軌道シミュレーションを実施したところ、1 パルスに含まれる電子数の増大に伴い、空間電荷効果

の影響でエミッタンスが増大することがわかった。つぎに、電子線軌道の計算結果に基づき、空間電荷効果の影響を加味した仮想光源径を計算し、角度制限して測定した照射電流量からピーク輝度の最大値は約 2×10^7 A/m²/sr/V と見積もられ、連続電子線の場合と同程度となることがわかった。また、パルス電子線を照射して取得した金粒子試料の SEM 像の像シャープネス値に基づき、試料面で輝度を評価した結果、同程度のピーク輝度となることを確認した。空間電荷効果の影響は受けるものの、時間平均値にして Schottky 電子源と同程度の輝度が得られることがわかった。これにより、10 nm 程度の高い空間分解能と、ナノ秒程度の時間分解能を両立した走査計測が可能となった。

第 6 章では得られた結果を総括した。