報告番号	甲　第　13306 号

主　論　文　の　要　旨

論文題目　半導体フォトカソードの高量子効率化、高耐久化による電子ビーム技術の刷新
(Innovation of Electron Beam Source by Semiconductor Photocathode with High Quantum Efficiency and High Durability)

氏　　名　佐藤　大樹

論　文　内　容　の　要　旨

本論文では半導体フォトカソードを用いた電子ビーム技術を刷新する上で重要な要素となる量子効率と電流安定性の向上を目的として研究を行った。その結果、InGaN フォトカソードを用いて、走査電子顕微鏡(SEM)などの産業利用に要求される電流安定性と、ショットキー陰極の 10 倍以上の輝度を実現する高量子効率を達成した。

第 1 章では、電子源実用化の歴史を紹介し、新しい電子源の開発によって誕生した産業技術の例を振り返ることで、電子源の重要性を述べた。また、産業技術の進歩によって生まれた新たな電子源の要求に触れ、ニーズにこたえる次世代電子源として負の電子親和力(NEA)半導体フォトカソードを提唱した。高輝度高安定性を必要とする産業機器の例に半導体検査装置を取り上げた。

第 2 章では、電子ビームの物理量であるエミッタンスを用いて、半導体フォトカソードを SEM に使用した場合に得られるプローブ電流を見積もった。

半導体フォトカソード型の電子銃において、従来型の発散角と仮想光源サイズから求まる輝度を測定することが難しい。そのため、本章では、半導体フォトカソードからの光電子生成原理をもとに、エミッタンスが電子ビーム源と試料面の間で不変であることを利用して、半導体フォトカソ

ードを SEM に応用した場合に期待されるプローブ電流を見積もることを目的とした。

典型的な SEM における光学系のパラメーターを用いると、半導体フォトカソードを用いて得られるプローブ電流はエミッション電流の 1/20000 の値と見積もられた。このときの条件はエミッションサイズ: 1 μm、電子の運動エネルギー: 0.1 eV、加速電圧: −30 kV、電子源縮小サイズ: 1 nm であった。

上記の条件におけるショットキー陰極を用いた場合に得られるプローブ電流は~ 60 pA 程度であるため、それと同等のプローブ電流を得るためには半導体フォトカソードのエミッション電流が 2 μA 程度必要となる。すなわち、半導体フォトカソードのエミッション電流が 20 μA であれば、ショットキー陰極の 10 倍、200 μA であれば、100 倍のプローブ電流が見込める。

以上より、半導体フォトカソードを用いた場合で、従来技術であるショットキー陰極の 10 倍以上の SEM プローブ電流が期待されるエミッション電流の条件が示された。

第 3 章では、本研究で主に使用したフォトカソード電子源装置（NPeSII）の詳細を述べた。①ロードロックチャンバー、②NEA チャンバー、③電子銃チャンバー、④励起光源、⑤電源及び制御機器に関する項目が記載されている。本装置を用いて InGaN フォトカソードに関するこれまでにない数多くの知見が得られた。

第 4 章では、InGaN 膜厚の最適化による高量子効率化が行われた。

半導体フォトカソードを透過型で用いる場合、高い量子効率を得るための最適な InGaN 膜厚が存在する。本章ではモデル計算と実験から量子効率の InGaN 膜厚依存性を調査し、背面照射において 5%以上の高い量子効率を有する InGaN フォトカソードの開発を目的とした。

膜厚 70 nm、100 nm、160 nm、240 nm を有する InGaN フォトカソードを作製し、その量子効率を調査した。実験結果に対して連続の方程式を用いて考察を行った。背面照射では、膜厚が 100 nm、70 nm、160 nm、240 nm の順で量子効率が大きくなり、それぞれの値は、9.8%、7.5%、4%、0.9%であった。実験結果とモデルによる計算結果を比較することで、膜厚とともに欠陥が増加し、その影響で膜厚が厚いと量子効率が低くなることが示唆された。

上記のサンプルを用いて、照射光の励起パワー密度が 1×10^{-3} W/cm^2 ~ 1×10^{-1} W/cm^2 の範囲における正面照射および背面照射の量子効率の変化を測定した。いずれの膜厚と照射方向においても励起パワー密度が 100 倍になることで、量子効率は 1/4 程度に減少した。

以上より、InGaN の最適膜厚は 50 nm ~ 160 nm の範囲にあることが実験的に明らかになり、InGaN 膜厚を 100 nm とすることで、背面照射において 9.8%の高い量子効率を達成した。

第 5 章では、量子効率の励起パワー密度依存を調査することで、高励起パワー密度における量子効率が見積もられた。

半導体検査装置の検査スループットを向上させるには SEM のプローブ電流増加がキーとなる。SEM のプローブ電流を上げるためには、小さい電子ビーム径で大電流密度が必要となる。励起光パワーに限りがある中で大電流密度を得るには、高励起パワー密度で高い量子効率が必要となる。本章では、InGaN フォトカソードに対し励起パワー密度を 1×10^{-5} W/cm^2 から 2×10^3 W/cm^2 の範囲で変化させ量子効率を測定した。

励起パワー密度が 1 W/cm^2 以下では、励起パワー密度の増加に対し量子効率は 18%からほとんど減少しないが、それ以上になると量子効率は減少し、励起パワー密度が 2×10^3 W/cm^2 になると量子効率は 1.4%まで減少した。この結果は表面に到達する電子のチャージによって引き起こされる表面光起電力(SPV)のモデルとおおむね一致した。これにより量子効率制限の原因が SPV であることが示唆された。また、実験結果を外挿すると、励起パワー密度が 3.8×10^7 W/cm^2 における量子効率は 0.4%と見積られた。さらに、NPeSII の電極構造において、加速電圧が－500V の場合、電流密度が 1 A/cm^2 を上回ると、加速電圧－10 kV に比べて量子効率が低くなることが確認された。これは、空間電荷制限効果によるものだと示唆された。

以上より、InGaN フォトカソードにおいて励起パワー密度の増加に伴い量子効率は減少するが、その状態においても、ショットキー陰極の 300 倍の SEM プローブ電流が期待される結果が得られた。

第 6 章では、レーザーフィードバックシステムとカソード温度制御により電子ビームの安定化が行われた。

新奇電子ビーム源の実用化には、安定した電子ビームの生成が重要となる。本章前半では、フィードバックシステムを用いた光電流の安定化と、一定電流発生時の連続稼働時間及び量子効率の寿命の調査を目的とした。

エミッション電流 20 μA において、連続稼働時間 13 h、電流変動率 0.08%が達成された。エミッション電流が 50 μA、100 μA のときの連続稼働時間と電流変動率はそれぞれ 1.5 h、0.09%と 0.4 h、0.06%であった。量子効率の寿命を解析することで、20 μA における量子効率の劣化の原因はイオンバックボンバードメントと SPV であることが示唆された。また、パワー密度増加による SPV の時間変化を考慮した量子効率の時間変化モデルを用いることで、SPV 効果を抑制できれば見かけの寿命とともに連続稼働時間が増加することが見積もられた。

本章後半では、加熱による量子効率の長寿命化の検証及び寿命と加熱温度の関係調査を目的とした。

カソード温度を 150°Cにすることで、室温の 2 倍の長寿命化が確認され、20 μA における

連続稼働時間 27 h が達成された。この時の電流変動率は 0.13%であった。一方で、カソード温度を 250°Cにすると寿命が室温の 2/7 に減少することが確認された。また、カソード温度に伴い電流変動率も上昇することが確認された。

以上から、フィードバックシステムとカソード温度制御により、InGaN フォトカソードから電流 20 μA、変動率 0.13%の安定した電流を 27 h 連続で得られることが確認された。これより InGaN フォトカソードは産業応用に要求される電子ビームの安定性を十分満たすことが明らかになった。

本研究結果から、高量子効率、高耐久化が実現された InGaN フォトカソードを用いることで、あらゆる分野で飛躍的な技術革新が期待される。まず、高輝度、高安定化により、半導体検査装置の検査スループット 10 倍以上が期待される。透過電子顕微鏡応用に関しては、クライオ顕微鏡を用いた生体分子の構造決定スループットの向上、液中ホルダーと高輝度パルス電子ビームを組み合わせた新たな微細動的観測の実現が近づいた。加工方面では、マルチ電子ビームを用いた電子線描画スループットの向上などが期待される。