

氏名(本籍)	佐藤貴伸(東京都)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第3913号
学位授与年月日	平成18年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	HfC被覆集積型Si電界放出電子源の電子放出特性及び表面物性に関する研究

主査	筑波大学教授	工学博士	吉崎亮造
副査	筑波大学教授	工学博士	喜多英治
副査	筑波大学教授	工学博士	重川秀実
副査	筑波大学助教授	博士(工学)	佐々木正洋
副査	産業技術総合研究所主任研究員	博士(工学)	長尾昌善
副査	産業技術総合研究所客員研究員	Ph. D.	山本恵彦

論文の内容の要旨

真空ナノエレクトロニクスは、電子管を起源とする真空エレクトロニクスと微細加工技術を融合させた新たなエレクトロニクスの創成をめざすものであり、フラットパネルディスプレイ、赤外からX線領域までを網羅する多彩な光源、新機能センサー、耐環境性の高い電子素子、さらには位相情報を活用した空間多重情報処理などの多様な可能性が期待されている。この真空ナノエレクトロニクス分野において基幹となるのは、集積型電界放出電子源(Field emission arrays; FEA)である。このうち、Siを基板材料とし、半導体微細加工技術を応用して作製されたSi FEAは薄型電界放出ディスプレイ(FED)の電子源として大きな可能性を持つと同時に、駆動回路や演算装置、メモリーなどの各種半導体素子との集積化も比較的容易である。この特長は他の材料で作製されたFEAには無い有望かつ実現可能な優位な点である。しかしながら、Si FEAは、最大放出電流、安定性、寿命など、実用化のためには解決しなければならない課題が多数指摘されている。たとえば、清浄なSi表面は非常に活性であるために、真空系への実装時(封止工程)もしくは電子放出中に真空装置内の残留ガスと反応し、電子放出特性が劣化することが報告されている。また、高温で十分な耐性を持っていないためジュール熱で大電流放出時に破壊される。あるいは、イオン化した在留ガスにより電子放出部が損傷をうける。ここで、電子放出は放出材料表面の物性に大きく依存するので、電子放出部表面を他の材料で被覆し表面改質を行うことは、電子放出特性を向上させる上で最も効果的な手法の一つであるといえる。本論文は、Si FEAの欠点を解消するため、電子放出部の表面被覆を詳細に検討した結果をまとめたものである。

ここでは、被覆材料として、単体金属材料よりも不活性で、耐熱性、耐イオン衝撃特性に優れ、また遷移金属炭化物の中では仕事関数の小さいHfCを選択した。研究の前半では、HfC被覆Si FEAが電子放出特性及び寿命特性においてSi FEAよりも優れていることを本研究によって実験的に証明した。まず、薄膜材料としてHfCの巨視的な物性を確認するとともに、Si微細加工プロセスの中にHfC被覆の工程を付加し、本来のSi FEAの特性を向上させたHfC被覆FEAを実現させた。実際、電界電子放出が始まる閾値電圧の大

幅な低下，放出される最大電流の増大，動作エミッタ数の著しい増大，放出電流の安定化，超寿命化を確認した。

HfC 被覆膜は，X線回折法（XRD）の計測結果より微小な結晶粒の集合体であることや，巨視的計測から仕事関数を低減させていることなど，間接的に電子放出特性の改善に貢献する機構は推察できるものの，本来微視的な現象である電子放出の機構解明のためにはミクロレベルの解析が必要であると判断した。そのため，実際に用いられる強電界下における原子レベルでの電子放出を評価するために新たに電子放出分布計測（Scanning field emission imaging: SFEI）法を開発した。

HfC 薄膜の計測に先立ち，単原子層グラファイト（Monolayer graphite; MG）を用いてこの計測法の基本性能の確認を行った。原子レベルでの仕事関数計測（Local tunnel barrier height; LBH）及び SFEI 計測を行った結果，従来の古典的な解釈の通り，仕事関数の低い領域から高い放出電流を観測した。一方，Si FEA と同一の条件で形成した HfC 薄膜について計測した結果，電子は仕事関数の相対的に大きい結晶粒界から，むしろ優先的に放出されることが分かった。従来，電界放出は表面の仕事関数と電子放出点の幾何的形狀に基づき議論されてきたが，この結果は，従来の予想に反するものである。ただし，このような結果は理論的には予想されていた。微視的スケールでは，電界放出は従来の古典的な機構では必ずしも理解できない現象があることを実験的に初めて示したものである。

得られた結果は，本研究で用いた HfC 薄膜においては，局所仕事関数の小さい結晶粒部と仕事関数の大きい結晶粒界部から同時に電界放出されるが，強電界下では結晶粒界からの電子放出が優先することを示唆するものである。また，HfC FEA からの巨視的な電界電子放出特性において，本来直線になるはずの Fowler-Nordheim (F-N) プロットが傾きの異なる 2 つの成分からなることがわかっているが，これも仕事関数の異なる 2 種類のサイトからの電界放出が共存していることを示している。ここには，結晶粒界に存在する炭素原子群のダンリングボンドが電子放出に貢献していると推察される。また，電子放出特性，電流変動，寿命特性も全てこの考え方で説明できることが分かった。これは従来の電界放出モデルの枠組みを越えるものであるが，HfC 被覆 Si FEA の電子放出特性を統一的に説明することができた。電子放出における特定の結合状態における電子状態の重要性を示唆するものである。

以上，まとめると，本研究の結果，HfC 薄膜被覆によって Si FEA の電子放出特性が大幅に改善し，表面被覆の有効性が示された。また，新たな被覆材料開発の手法として，SFEI 装置を用いることで薄膜からの局所電子放出を容易に観察することが可能となった。この手法は電界放出電子源の実用化に大きく貢献するものであると考えられる。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は，将来大きく発展することが期待される真空ナノエレクトロニクスのキーとなる集積型シリコン電界放出電子源の電子放出特性を改善するために行った電子放出部表面の被覆の効果を詳細に検討したものである。まず第一に，HfC を被覆材として選定し，複雑で緻密な半導体微細構造プロセスの中に HfC 薄膜形成過程を組み入れ，HfC で被覆することにより電子放出特性が大幅に改善することを実験的に検証した。これは，集積型シリコン電界放出電子源の実用化に対し産業上極めて重要な知見である。第二に，この HfC 被覆による電子放出特性改善の機構を理解するために，世界に先駆けてナノスケールでの空間分解能を有する電子放出分布計測法を開発して HfC 薄膜に適用し，観測された電子放出特性を説明した。ナノスケール計測から得られた結果は，従来広く採用されている古典的モデルでは説明できないものであるが，近年著しく発達した第一原理理論計算の結果に対応しており，今後の電子放出研究の新たな方向を示すものとして，学術的に極めて大きな意味を持つ。

前半の巨視的評価に基づく検討と、後半の微視的評価の統一性が不十分ではないかとの意見が一部出されたものの、巨視的現象が微視的計測結果から見事に説明できている点、また双方の研究の質は極めて高い点が十分に認められる。

以上のことから、学位論文として十分なものであると判断できる。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。