

報告番号	甲 第 11906 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Si系量子ドット多重集積構造の弾道電子放出特性に関する研究**
(Study on Ballistic Electron Emission Characteristics of Si-based Quantum Dots for Their Application to Field Emission Devices)

氏 名 竹内 大智

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、Si系半導体ナノ結晶の電子放出デバイス応用を見据えて、ナノメートルサイズのSi量子ドットが厚さ1~2nm程度の極薄シリコン酸化層を挟んで高密度に多重集積した構造に着目した。Si量子ドットはモノシランガスの減圧化学気層堆積(Low Pressure Chemical Vapor Deposition : LPCVD)法により形成し、Si量子ドット形成およびドット表面酸化を繰り返し行うことで、Si量子ドット多重集積構造を作製した。作製した構造からの電子放出の高空間分解能検出技術として、導電性探針を用いた非接触二次元電流像測定を提案している。この手法では、測定時における試料-探針間距離の制御により高電圧印加時においても探針と試料が接触することなく安定して非接触測定が可能であり、各々のナノドットからの電子放出が検知できることを実験的に明らかにしている。また、X線光電子分光分析の測定系を用いることで、放出電子のエネルギー計測を独自考案するとともに、エネルギーバンド構造の考察により電子放出メカニズムを明らかにしている。さらに、Si量子ドットへの不純物添加による価電子制御にも取り組み、イオン化不純物が電子放出特性に及ぼす影響を明らかにし、エミッション効率の向上を見出している。本論文の各章における概要は下記の通りである。

第1章では、本論文の基礎事項である電子放出について、歴史的背景等の概要を説明した後、電界電子放出の原理および電界電子放出材料の特徴について説明する。また、陽極酸化手法を用いて作製したSiナノ結晶からの弾道電子放出に関する基礎事項および放出メ

カニズムについて述べる。

第 2 章では、本研究を推進する上で重要となる実験事項である化学気層堆積 (CVD) 法および原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope : AFM) の原理を説明する。

第 3 章では、先端への電界集中により電子放出が期待できる柱状 Si ナノ構造に着目し、Si 酸化膜に内包された Si ナノ結晶を柱状 Si ナノ構造上に高密度形成した系からの電子放出を議論している。具体的には、Si ナノ結晶/柱状 Si ナノ構造上に極薄 Au 電極を形成し、試料間に電圧印加した状況において、先端の曲率半径が $\sim 10\text{nm}$ の導電性 AFM 探針を用いた非接触二次元電流像測定により電子放出を検出し、個々のナノ結晶からの電子放出の高空間分解能検出を議論している。尚、非接触二次元電流像測定では、電圧印加時のフォースカーブ測定から非接触測定時の探針-試料間距離を $\sim 200\text{nm}$ に決定し、表面形状像と二次元電流像の同時測定を行った。表面形状像では、電圧印可の有無にかかわらず、一様な平坦像となり非接触測定できていることが確認できるのに対し、二次元電流像では、 -21V 以下の電圧印加において、柱状 Si ナノ構造と同程度の直径である $\sim 50\text{nm}$ の高伝導領域が認められ、個々のナノ構造からの電子放出の検出には導電性 AFM 探針を使用した非接触測定法が有効であることを明らかにしている。さらには、低電圧駆動実現への知見を得るため、矩形波パルス電圧を印加し、同様に非接触二次元電流像測定した場合、 $V_H : 3\text{V}$ 、 $V_L : -14\text{V}$ において明瞭な電子放出が認められ、Si ナノ結晶への電子注入・放出を繰り返し行うことで低電圧・高効率放出が実現できることを見出している。

第 4 章では、電子放出における Si 量子ドットの役割について知見を得るため、一次元に縦積み連結した Si 系量子ドットを形成し、前章で確立した導電性探針を用いた非接触二次元電流像観察により電子放出メカニズムを議論している。低密度の一次元連結 Si 量子ドットでは試料間に -5V 以上の負電圧を印加することで、ドットサイズと同程度の高伝導領域が明瞭に認められた。高密度一次元連結 Si 量子ドットにおいても、試料間印加負電圧 -5V 以上で電子放出に起因した高伝導領域が測定領域ほぼ全面で認められた。また、得られた非接触二次元電流像の放出電流値を F-N プロットに纏め、電子放出は F-N トンネリングが支配的であることを明らかにしている。さらに、放出電子のエネルギー分布を測定した結果、基板電圧 -10V を印加した場合において、運動エネルギー 2eV 付近にピークを有するスペクトルが認められ、印加電圧の増加にともないピーク位置が高エネルギー側に僅かにシフトすることを明らかにした。この結果は、一次元連結 Si ドットからの電子放出は、弾道電子が寄与していることを示している。

第 5 章では、Si 量子ドットを単純 6 層積層した構造において電子放出特性を評価し、Si 量子ドット系からの電子放出メカニズムの議論を行っている。Si 量子ドット 6 層積層構造では、試料間印加負電圧 -6V 以上において、印加負電圧の増加に伴い放出電子数が指数関数的に上昇することを明らかにしている。さらに、放出された弾道電子のエネルギー分布は、運動エネルギー 2.5eV 付近にピークを有し、印加負電圧の増大による顕著な変化は認められないことを明らかにしている。エネルギーバンド構造を考慮すると、この結果は、試料に

均一電界が印加されていることでは説明できず、上層 Si 量子ドットから上部電極への価電子放出に伴う正帯電の顕在化に起因して、上層ドットに電界が集中する結果、上層から 2-3 層付近のドットから電子が放出されていることが考えられる。尚、試料電圧印加時の硬 X 線光電子分光測定から、各ドット層の電位変化量を定量評価した結果、上層ドットに電界が集中していることを実験的にも確認し、電子放出メカニズムを明らかにしている。

第 6 章では、Si 量子ドットからの電子放出の高効率・低電圧化を目的として、価電子制御 Si 量子ドット集積構造を作製し、Si 量子ドットへの P 添加が電子放出に及ぼす影響を評価している。真性 Si 量子ドットおよび P- δ ドープ Si 量子ドット多重集積構造からの電子放出を比較した結果、試料間印加負電圧-11V 以下では P 添加 Si 量子ドットに比べ真性ドットからの電子放出強度が強いものの、-11V 以上では P 添加 Si 量子ドットの放出強度が強いことを明らかにした。この結果は、印加電圧-11V 以下では、P ドナーの顕在化により上層 Si 量子ドットでの電界集中が緩和されるものの、高電圧印加では、P ドナーの顕在化による基板からの注入電子の増加に起因して、放出電子が大幅に増大することで説明でき、Si 量子ドットからの電子放出の高効率化には価電子制御が有効であることを明らかにした。

第 7 章では、本研究の総括と残された課題および今後の展望について述べる。