

氏名	工藤唯義
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博乙第 2762 号
学位授与年月日	平成27年 9月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	

ダイヤモンド半導体を用いた低電圧印加による真空への電子放出

主査	山崎 聡 筑波大学教授	理学博士
副査	山部 紀久夫 筑波大学教授	工学博士
副査	佐々木 正洋 筑波大学教授	博士(工学)
副査	岡野 健 国際基督教大学教授	工学博士
副査	山田 貴寿 産業技術総合研究所主任研究員	工学博士

論 文 の 要 旨

ダイヤモンドを半導体として用いた、今までにない構造による真空への電子放出について、その放出特性及び放出機構に関する研究を行った。

ダイヤモンドはワイドバンドギャップ半導体に分類され、次世代電子デバイスの開発を目指して、世界中で研究が進められている。半導体としてのダイヤモンドには特徴的な物性が多数存在するが、そのなかでも負の電子親和力表面は特徴的なものである。この負の電子親和力表面を利用することで、印加電圧の低い電子放出源が開発できると期待されている。真空中の電子は半導体中と異なった特性を示すことから、真空中に取り出した電子を用いるような真空デバイスには様々な用途が考えられる。そのためには電子放出源が不可欠である。そこで、熱陰極とは異なった低消費電力で集積が容易であるような、次世代電子放出源の開発が求められている。

第 1 章では、序論として本研究の背景紹介と目的、方針について述べた。特に、窒素を不純物として含んだダイヤモンドからの、低印加電圧での電子放出について幾つか報告されていることを紹介し、本論文では窒素が添加されたダイヤモンドに注目したことを述べた。また、低消費電力と集積容易性を両立するような、電子放出源を開発するためには電子放出メカニズムの理解が重要であることを述べた。印加電圧を低減しつつ、電流特性の解析がしやすいような単純な構造である、狭間隔共平面電極を用いることを述べた。

第 2 章では、高温高压法により人工的に作製された、窒素を含んだ Ib ダイヤモンドを用いて、試料表面上に狭間隔共平面電極を形成し、真空中で電流電圧測定を行い、得られた結果について議論した。Ib ダイヤモンドは室温において非常に高抵抗であるが、電極の間隔を 1  $\mu\text{m}$  以下と狭めることで、表面電

極間に電流を流せること、またそれと同時に真空への放出電流を観測した。その際の放出電流は、ダイヤモンドの酸素終端処理を行った正の電子親和力(PEA)を持つ表面を用いた場合においても得られ、その電流量は水素終端処理を行った負の電子親和力(NEA)を持つ表面と同程度であった。

そこで、Ib ダイヤモンド表面上の電極間電流(コンタクト電流)と、真空中に設置したコレクタ電極への放出電流(コレクタ電流)についてそれぞれ議論した。その結果、コンタクト電流については Ib ダイヤモンドの内部を流れていること、またその際バルク内部には、電子と正孔の双方が定常的に存在することが示唆された。また、コレクタ電流はダイヤモンド表面から放出されていることが示唆され、ダイヤモンドを流れるコンタクト電流の内一部の電子が、何らかのメカニズムによって真空へ放出されたのち、三つの電極の電圧の大小を反映し、一定の効率で真空中のコレクタ電極まで到達すると考えられることを述べた。

第3章では、この電子放出現象が Ib ダイヤモンドに特有であるのか調べるため、リン添加 n 型ダイヤモンド、ホウ素添加 p 型 IIb ダイヤモンド、不純物を含まない IIa ダイヤモンドを用いて同様の測定を行った。その結果、それら全ての試料において、それぞれ放出効率は異なるものの真空への放出電流が、酸素終端処理 PEA 表面を用いても観測された。その際、最も放出効率が高いのは Ib ダイヤモンドであった。

第4章では、第2章、第3章で得られた実験結果をふまえて、コンタクト電流のキャリア伝導メカニズムと、コレクタ電流の放出メカニズムについて考察した。コンタクト電流については、バルク中に電子と正孔が存在するためのメカニズムとして、「インパクトイオン化」と「ダブルインジェクション」を挙げた。また、ダイヤモンド PEA 表面からも真空中への電子放出が起こったことから、真空との界面に存在する障壁を越えられるだけのエネルギーを持ったホットエレクトロンの関与が示唆されるが、その中でも「真空の方向へ十分なエネルギーを持ったホットエレクトロン」のみがコレクタに到達することができ、放出電流に寄与できることを述べた。その発生メカニズムは、ダイヤモンド内の伝導、特に電子と正孔の同時存在がその鍵を握ると考え、メカニズムの確定には至らなかったものの、「インパクトイオン化」と「ダブルインジェクション」の場合に考えられる、ホットエレクトロンの発生メカニズムについて、それぞれ議論した。

本論文での実験結果及び考察から得られた知見は、ダイヤモンド内部で発生したホットエレクトロンの電子放出への関与を示唆している。これは、電子放出源としての特性を更に向上させるために、重要な情報となると考えられる。

## 審 査 の 要 旨

本論文では、次世代の半導体材料として期待されるダイヤモンドを電子放出源として応用するため、新規試料構造の提案から測定、その特性の評価と電子放出メカニズムの考察を行っている。

特に、以前から注目されている負の電子親和力表面ではなく、正の電子親和力表面を用いても同等の放出電流が得られることを発見し、また不純物の異なるダイヤモンドを用いて比較することで、ダイヤモンドからの電子放出について新たな知見が提供された。電子放出メカニズムの最終的な解明には至らなかったものの、電子放出にホットエレクトロンが関与することを示し、その生成メカニズムについて考えられる

案を挙げるなど、よく議論されているといえる。

〔最終試験結果〕

平成27年8月4日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、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。