

氏 名	酒井 忠司
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 7569 号
学位授与年月日	平成 27 年 11 月 30 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	数理物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	ダイヤモンド半導体の放電灯冷陰極応用に関する研究

主 査	筑波大学教授	理学 博士	山崎 聡
副 査	筑波大学教授	工学 博士	山部 紀久夫
副 査	筑波大学教授	博士(工学)	佐々木 正洋
副 査	物質・材料研究機構	工学 博士	小泉 聡

論 文 の 要 旨

冷陰極放電灯は、加熱機構を持たない陰極を電子源とする放電灯で、その代表的な市場製品が CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp) と呼ばれる冷陰極蛍光灯である。CCFL は、一般の熱陰極蛍光灯 (HCFL: Hot Cathode Fluorescent Lamp) がフィラメント構造を持つ熱陰極を有しているのに対して、加熱機構の無い単なる金属からなる電極を陰極に用いている。熱陰極がフィラメントの通電加熱による熱電子を電子源として管内の希ガスをイオン化しているのに対して、冷陰極では希ガスイオン等が金属陰極表面に作用することによって生じる二次電子放出を用いている。このため、HCFL ではフィラメントへの通電のために管両端の端子は 2 極となっているのに対して、CCFL の端子は 1 極である。このような単純な陰極構造から、CCFL は HCFL にはできない細径化が可能で、かつフィラメント切れがなく長寿命であるという特長を有している。細径で切れにくいという特長は一般照明のように交換することが難しい産業機器光源や薄型化が求められるバックライトに適しており、液晶用バックライトを中心に広く産業用光源として活用されてきた。薄型・大面積対応が可能で交換不要という優れた特長を有する一方で、CCF の課題となってきたのは HCFL に比べて大きく劣る発光効率である。HCFL は現時点においても LED を含む全一般照明用光源デバイスの中で最高クラスの発光効率 (最高 110 lm/W) を有している。これに対して CCFL の発光効率は HCFL の約半分強の 60lm/W 程度である。両者の効率の違いは陰極での損失にあり、これゆえに冷陰極の損失低減が強く求められてきた。

一方、ダイヤモンドは、表面水素終端により負の電子親和力 (NEA: Negative Electron Affinity) を示すこと、希ガス放電中で高い二次電子放出を示すことが報告されている。さらに、水素終端ダイヤモンドの NEA 特性は劣化しても表面への水素プラズマ照射で回復することが示されている。

本研究では、これらの先行知見から放電灯冷陰極としてのダイヤモンドの可能性に着目した。論文では、まず CCFL の動作原理と課題、放電用二次電子源としてのダイヤモンドの可能性と課題について述べる。次に B ドープ多結晶ダイヤモンド薄膜の放電関連特性の検証結果についてまとめる。更にバックライト用 CCFL 陰極としての応用を想定した冷陰極構造および放電管の作製・評価結果について述べる。

ダイヤモンド半導体の他の材料にない安定な負性電子親和力特性に着目し、液晶用バックライトに代表される冷陰極蛍光灯 (CCFL) で課題となっている陰極降下電圧 (陰極近傍での放電ガス中の電位降下した後の電圧) の低減可能性を検討した。平面 Mo 基材上に成膜した B ドープダイヤモンド薄膜の平行平板上放電特性評価において、成膜条件最適化により最小で Mo の約 30% となる極めて小さい陰極降下電圧を実証した。さらにダイヤモンド薄膜の陰極降下電圧と各種励起方法による電子放出性能の相関を系統的に調べ、光励起による電子放出収率 TPY と陰極降下電圧との間に強い相関が得られることを見出した。光励起による電子放出収率 TPY のスペクトル測定から NEA 特性は酸処理によっても失われず、バンドギャップ近傍の光励起によって水素プラズマ処理表面と同レベルの高い電子放出を示すことがわかった。まず、Auger 中和過程により励起されたダイヤモンドの価電子帯電子は、NEA 表面特性により表面から直接放出される。同時に、価電子帯の電子は、Ar のエキシマ発光が候補として考えられる真空紫外光 (UVU) 照射により、ダイヤモンド表面近傍だけでなく内部においても光励起される。この伝導帯に励起された電子が表面に向かって移動し、表面障壁のない NEA 特性により放出する。上記のプロセスは、放電ガス中の水素プラズマによるダイヤモンド表面の水素終端修復⇒NEA 特性保持によって安定的に保持される。ダイヤモンドの NEA 特性の源泉となっている水素終端を自己修復するプロセスを、放電という本来の目的機能と一体に組み込むことが可能な点が放電陰極応用の重要な利点といえる。以上に加えて、バックライト用 CCFL への応用を想定して、各種構造の Mo 陰極基材にダイヤモンドを成膜し、細径の陰極を作製し、放電特性を評価した。その中で、ロッド形・細径ロッド形・細径カップ形と陰極構造をより実際の冷陰極放電灯に近づけ、放電管に実装して放電特性を評価した。そこでも水素微量添加中の放電が動作電圧維持や試料表面の水素終端修復に有効であることを実験的に示すとともに、実用時に求められる電流の大出力化可能性を最高放電電流で 6.5mA を得ることに成功した。以上、ダイヤモンド薄膜の放電灯陰極応用の可能性について、その背景から膜の基本評価、放電管での機能実証の結果までを述べた。放電電流、耐久性、コストなど技術的課題はまだ多いが、最高で既存陰極の 1/3 以下という極めて小さい陰極降下電圧、放電管での動作電圧低減等により、ダイヤモンドの省エネ可能性を示すことができた。なかでも、放電ガス中の水素プラズマによる放電特性の回復と保持はダイヤモンドの放電陰極応用への適用性の良さを示す重要な結果と考えられる。本研究の開始時点で市場を席卷していた液晶バックライト用 CCFL は、その後急速に白色 LED に置き換えられ、現在の CCFL は長寿命・高配向角などの特長を有する省エネ照明用途等に活路を見出そうとしている。市場状況は大きく変化したが、低損失な二次電子源あるいは安定な NEA を有するワイドギャップ半導体としてのダイヤモンドの可能性は広がっており、今後も様々な用途に適用可能と考えられる。

〔批評〕

本研究内容は、ダイヤモンド半導体を利用し、半導体材料を初めて冷陰極放電管として利用し、画期的な省電力化に成功し、その物理的な背景についても言及している。実用化のための開発においても実デバイスに近い形での実験にも成功している。ダイヤモンドを使った冷陰極放電管の基礎的な物理現象から実用化研究まで、多面的にかつ俯瞰的に行った研究である。

〔最終試験結果〕

平成27年 11月 5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。