

氏 名 穂積 康文

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 941 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 大電流パルス電子銃用カーボンナノチューブ冷陰極に
関する研究

論文審査委員	主 査	助教授	加藤 茂樹
		教授	大澤 哲
		教授	古屋 貴章
		教授	小林 仁
		教授	榎本 收志
		教授	田中 俊成（日本大学）
		名誉教授	小林 正典（高エネルギー加速器 研究機構）

論文内容の要旨

本論文は、カーボンナノチューブ冷陰極を用いて、電子加速器の数 ns パルス電子銃の性能を大幅に向上することを目的とした研究をまとめたものである。本研究で大電流と安定性が実証されれば、熱陰極と同レベルの 10 A/cm^2 の電流密度を持ち、熱源が不要で扱いやすい電子銃が誕生することになる。将来的にはカーボンナノチューブの持つ高い電流密度のために陰極面積を小さくできる可能性があり、エミッタンス改善に寄与することも期待されている。本研究ではまず、簡易型の冷陰極評価用 3 極管電子銃を製作し、これを用いて複数企業との共同研究で高い電流密度が得られるカーボンナノチューブ冷陰極を見出すことから研究を開始し、 $6 \text{ mm}\phi$ の陰極面から 3 A/cm^2 の電流密度を得た。この成果を受けて、実用的な 100 kV 電子銃テストスタンドを製作し、 100 kV のビームをウォールカレントモニターとビームキャッチャーで直接捉えて、その起電圧からビーム電流を算出するシステムを構築した。電子銃の設計に当たっては、安定した動作が確認されている KEK リニアック電子銃を参考にして EGUN コードを用いて電極構造を決定し、さらに種々の放電対策も行った。グリッド・カソードアセンブリの設計では、グリッド・カソード間の距離が電界強度を算出する際に支配的なパラメータとなることから、その距離の誤差が $10 \mu\text{m}$ 単位に収まり、またグリッド電極とカソード面との平衡度が保たれるよう、アセンブリ構造に工夫を施した。このアセンブリは CF-88 真空フランジを採用し、電子銃で広く使われている EIMAC Y-796 と互換性を持たせたので、これを使用している電子銃の電子源として直ちに使用可能である。またカソード交換時にはアセンブリ全体を交換する必要が無く、カソード部のみ交換すれば良い。各種のカーボンナノチューブ冷陰極を 100 kV 電子銃テストスタンドに組込んで $100 \sim 50 \text{ ns}$ パルス試験を行い、その前後で電子顕微鏡装置を用いて陰極表面形態の観察を行った。それらの結果から、陰極上のカーボンナノチューブの純度と結晶の完全性を上げることにより電界閾値が下がり、より低い電界で大電流領域まで到達できることを示した。さらにパルス幅を 8 ns に縮め、パルス印加時以外の電子放出を抑える役割を果たす逆方向バイアス電圧を、順方向へと極性を変更し、パルサー出力に直流バイアスを重畳した。これにより放電確率が減り、また 3.3 kV の高い出力電圧が得られ、改良を加えて新たに作製したカーボンナノチューブ冷陰極から 9.1 A/cm^2 の電流密度を得た。パルサー出力と直流バイアスを重畳してビームを取出す方式は、電界放出法ならではの方法であろう。 560 時間におよぶ 7.2 A/cm^2 の連続運転の結果、放出電流の減少値は 1.3% に留まり、長寿命を持つことも確認された。今後、 100 A/cm^2 領域の試験をする為には、グリッド・アノード間における空間電荷制限を除くことが必要であり、それは本電子銃の加速電圧を 200 kV に上げ、且つグリッド・陽極間の距離を 15 mm に縮めることで実現できることを示した。また、本研究における電子銃のビーム特性と電子顕微鏡観察の両方の結果から、この目標を達するためには、カーボンナノチューブが金属ベースに強く結合されており、強い電界を印加しても絶対数が減少しないことが重要な要素であることが明らかとなった。以上、カーボンナノチューブ冷陰極を用いた大電流パルス電子銃特性の安定性が実証され、冷陰極を用いた実用的な電子銃開発に成功したことで、加速器の電子銃としての実用化に大きく寄与する成果が得られたことを報告する。

論文の審査結果の要旨

カーボンナノチューブ (CNT) は、大きなアスペクト比の鋭利な先端を持ち、電気伝導度、熱伝導度、そして、機械的強度に優れ、化学的安定性も高いなど数々の特長を持つため、様々な分野での利用が期待されてきた。CNT を電界放出電子源として用いた電子銃も、冷陰極面の小面積化によるビームエミッタンスの改善が期待されるとともに、熱電子源に比べてエネルギー分散を抑制できるため、微小なビームスポットも期待される。しかし、現実には、フラットパネルディスプレイの他、電子顕微鏡などの電子源等への応用は未だ研究段階であり、特に加速器用電子源への実用に関してはまったく報告例がない。

本研究では、CNT の中でも、生産量が多く、品質も安定している多層カーボンナノチューブ (MWNT) を使用して加速器用電子源を開発し、実際の加速器用電子銃への応用を試みた。電子軌道計算に EGUN コードを使って、電子銃設計の最適化を行いながら、100kV の加速電圧を持つ電子銃テストスタンドの組立・整備を行った。また、MWNT 陰極の心臓部であるグリッド・カソードアッセブリの設計と製作も並行して行った。このアッセブリでは、MWNT 陰極・グリッド間の正確な距離とそれらの平行度が重要である。本研究では、陰極のほぼ全面に渡って、これらを約 $10\mu\text{m}$ の精度で決定でき、かつ、1 個の真空フランジで容易に交換できる構造を考案した。さらに、スクリーン印刷法、粉碎法など種々の方法で作成した MWNT 陰極を用意し、透過型および走査型電子顕微鏡、エネルギー分散型 X 線分光法、ラマン分光法等の分析手法を用いてそれらの特徴を実験的に吟味した上で、MWNT 陰極の表面形態・表面状態と電子放出特性との関係に考察を加えた。スクリーン印刷法による陰極はかなり劣る電子放出特性を示したが、この原因として、MWNT 以外に存在するバインダー等、粒子径の大きな不純物が多いこと、結果として陰極の平坦度も悪いことを明らかにした。また、粉碎法で作成した MWNT 陰極は、不純物が少なく平坦度も優れていたが、放電による陰極のダメージが誘発され易いことを見出した。最も良い電子放出特性を示したのは、粉碎処理を施していない、所謂バンドル構造を示す MWNT 陰極であり、8ns パルス、9.2MV/m の条件で、 $9.1\text{A}/\text{cm}^2$ の放出電流密度を得ることに成功した。さらに、この電界強度を保持した状態で約 3 週間の継続試験を行い、電子放出電流の減少は最大時の 1.3% 程度に抑えられ、実用上問題がないと結論付けることができた。これらの成果は従来から使われてきている酸化物熱陰極や含浸型といわれる各種の熱陰極の電流密度に迫るものであり、本研究によって電界放出型電子銃の実用性が一気に高まったと言える。また、本研究で実験的に明らかになった MWNT 陰極の選択基準は、加速器用 CNT 電子源における今後の方向を示唆するものであろう。

以上の論文内容は、工学博士の学位に値するものと認められる。したがって、博士論文審査申請に対する審査の結論を「合格 (工学博士)」とする。