

氏 名 山崎 良雄

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第 167 号

学位授与の日付 平成 18 年 9 月 29 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 光高周波電子銃における光電子放出の研究

論文審査委員	主査	教授	大澤 哲
		教授	浦川 順治
		教授	小林 仁
		助教授	早野 仁司
		教授	榎本 收志
		教授	山崎 良成（高エネルギー 加速器研究機構）
		教授	上坂 充（東京大学）
		教授	鷲尾 方一（早稲田大学）

論文内容の要旨

高輝度電子源の開発でカソードからの引出電界強度の増大は、最大引出電荷量の増加、空間電荷効果によるエミッタンス増加の抑制に有効である。マクロパルス幅が μsec 程度のDC電子銃の場合、その電界強度は放電現象により10MV/m程度である。電界強度を上げる方法として、1980年代に高周波電子銃が考案された。Sバンドの高周波電子銃の場合、最大引出電界強度100MV/m以上が可能となっている。カソードとしては熱電子放出あるいは光電子放出型がそれぞれ開発された。熱電子カソードの場合、加速位相に乗り切れない電子がカソードに逆流する現象（バックボンバードメント）の回避方法が困難であった。一方、フォトカソード（光電子放出型カソード）の場合、高周波空洞内に加速電界が生じている時間にもみ電子放出を誘起できることから、バックボンバードメントがない。さらにレーザーの進歩で、モードロックレーザーにより短パルス幅（10psec）で、正確なマルチバンチパルス列の発生ができ、高周波のある位相に同期させることで、マルチバンチ電子ビームの発生が可能となった。現在では加速器の入射器としてフォトカソード高周波電子銃（以下 光高周波電子銃）が採用されることが多くなった。また、光高周波電子銃は、高輝度電子ビームを発生させる電子源としてLINACの入射器に適応されるばかりでなく、コンパクト、高エネルギー（5MeV以上）の電子ビーム発生源として、医療や産業への応用が期待されている。

現在、フォトカソードとして、大きく分けると2つの選択肢がある。一方は、CuやMgなどの金属カソード、もう一方はCs-Teなどの半導体薄膜カソードである。金属カソードは複雑な機構は不要でCuを用いれば、空洞の壁面そのものである。しかし、量子効率が 10^{-4} 程度と低く、レーザーの出力が十分でなくてはならない。一方、Cs-Teなどの半導体薄膜は、量子効率が 10^{-2} 程度と高いメリットの反面、量子効率の低下が真空度や酸素に著しく依存するため、高真空中での薄膜作成、空洞への装着を行う必要があり、真空中でのロードロックシステムを要する。以上のように、両者の選択は一長一短あり、用途によって使い分けているのが現状である。

KEK-ATFでは、高輝度電子源として、高出力のマルチバンチビーム発生のための光高周波電子銃の開発を先行させ、平成13年度から高周波電子銃試験用の専用テストベンチを建設しビーム試験を行った。高周波電子銃の加速空洞にはBNLタイプのSバンド（2856MHz）1.6セル空洞を用い、フォトカソードにはCs-Teを電子銃とは独立して、真空系で蒸着し、移送チャンバーを介してロードロックシステムにより、加速空洞に装着している。高輝度電子ビーム生成実験で、20バンチ（2.8nsec間隔）ではバンチあたり5nCの電荷量が引き出されており、100バンチではバンチあたり3nCのマルチバンチビームの発生に成功している。2.8nsecというバンチ間隔で、しかもバンチあたり3nCの100バンチのマルチバンチビーム発生に、Cs-Teの半導体カソードで達成した意義は大きい。

光高周波電子銃のさらなる高性能化を目指す上で、電子銃空洞内部での電子ビームの振る舞いを理解することは、非常に重要である。その中で特に重要となるのは、光高周波電子銃から電子ビーム発生の際の、高周波位相に対する生成電子ビーム特性に関するレーザー入射のタイミング依存性である。カソードから発生した電子が加速空洞中で加速され、電子銃出口から得られるビームのパフォーマンスは、レーザー入射タイミングに強く依存する。レーザー入射位相に対する放出電荷量の依存性をプロットしたものを、以下フェーズプロットと呼ぶことにする。発生電荷密度によって発生する電界による空間電荷効果が存在し、引出電荷量に影響を与える。本研究では、この効果を明らかにするために、テストベンチ実験装置によってレーザーパワー密度、レーザー入射位相の条件を変えて、フェーズプロットを取得し、高周波電子銃の放出電荷量におけるSchottky効果、空間電荷効果の影響を実験的に検証した。特にカソード近傍での電子ビームの物理は、非常に複雑で数値計算の初期条件を決定することが困難であるのが現状である。そこで、本研究では、カソード近傍の発生電荷量と外部電界、発生電荷から生ずる空間電荷効果による発生電荷量の抑制を実験的に検証することを目的とした。

低電荷発生領域と高電荷発生領域の両者の解析を行い、それぞれの条件から得られるフェーズプロットから、外部電界によるSchottky効果の影響がないパラメータを抽出し、空間電荷効果が量子効率に与える影響を評価した。低電荷領域のデータから、空間電荷効果の影響が少ない場合の電界増倍係数とその際の量子効率の抽出に成功した。Cs-TeカソードとBNL型高周波電子銃の組み合わせで実験的に上記の評価を行ったことは世界で初めての試みであり、高輝度電子源開発の基礎研究として意義深い。

山崎良雄氏の博士論文は、高周波電子銃における光電子放出の研究である。この電子銃は、Cs₂Te陰極にレーザー光を照射し、放出された電子をSバンド高周波空洞の高電界で加速するタイプの電子銃である。照射レーザーの光子数に対する放出電子数の比である量子効率が陰極の状態を表す重要な指標であるが、これまで空間電荷の及ぼす影響が定量的に明らかでなかった。量子効率に対する空間電荷効果を実験的に明らかにした初めての論文である。

山崎氏は高周波電子銃テストベンチの開発とCs₂Te陰極の製作を行い、0.01~3.3 μJ/バンチの領域でレーザー光の光量を変え、レーザー光の照射タイミングと放出電荷量の関係(フェーズプロット)を測定した。連続20バンチのビームを用いて、1.2nC/バンチの放出電荷量までの領域を調査した。フェーズプロットの形は、基本的にはSchottky効果で説明されるが、レーザーの光量が0.01 μJ/バンチと3.3 μJ/バンチでは、フェーズプロットの形が大きく異なる。これは空間電荷効果が無視できないことを端的に表していると考えられる。山崎氏の実験では、レーザー光を $\sigma = 80 \mu\text{m}$, $\sigma = 8 \text{ ps}$ まで絞って陰極に照射した。そのために最大電流密度は 10^5 A/cm^2 オーダーに達している。このような高密度では、100MV/mを超える高い加速電界といえども、空間電荷効果は無視して量子効率を議論することはできない。しかしその効果を実験的に示した報告はこれまでなかった。

山崎氏は測定データから電荷効果が量子効率に及ぼす効果を定量的に評価する方法を考案し、実効的な量子効率が電荷密度に対して指数関数的に減少することを明らかにした。調査した領域では電荷効果が大きく、実効的な量子効率が1桁変化しているが、このような場合でも、その関係式から本来の量子効率と電荷効果を分離することが可能であることを示した。陰極を取り外して別に測定することなく、高周波電子銃を駆動した状態で、陰極本来の量子効率を正しく評価する方法を初めて示した。

また高周波電子銃に限らず、ビームの大電流化と低エミッタンス化が重要な課題であるが、山崎良雄氏の論文は大電流化に対して、空間電荷効果を通してレーザーのスポットサイズの最適化に指針を与えるものと期待される。

本審査委員会は、以上の論文内容を高く評価するとともに、この結果を得るために開発した解析手法の意義を高く評価し、審査委員全員が一致して山崎良雄氏の論文が工学博士の学位に値するものと判定した。