

氏名 秋 山 浩

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第32号

学位授与の日付 平成4年 9月28日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 フォトカソードを用いたRF電子銃による高輝度短パ
ンチビーム生成の研究

論文審査委員 主査教授 小早川 久
教授 高田 耕治
教授 北村 英男
助教授 吉岡 正和
助教授 小林 仁
助教授 榎本 收志
助教授 中西 疆（名古屋大学）

論文内容の要旨

最先端の高エネルギー粒子衝突実験に使われる電子・陽電子リニアコライダーにおいては、高いルミノシティを実現するためにマルチバンチ、大電流のビームを最終衝突点でビームサイズを 10 nm 程度まで絞る。このために低エミッタンスのビームを必要とする。このような要求を満たす電子源の候補としてレーザーとフォトカソードを用いた RF 電子銃が注目されている。RF 電子銃は加速空洞の一端に陰極を配置し、発生した電子ビームを高周波電場で加速する電子銃である。これまで使われてきた直流またはパルス電子銃と違い、高電界で加速できるために空間電荷の影響を少なくでき、また大電流を発生させることができる。フォトカソード型の RF 電子銃はレーザーが陰極を照射したときのみ電子が発生するためにリニアコライダーで要求されているようなマルチバンチビームも実現できる可能性がある。また、熱陰極の電子銃で発生するサテライトパルスが原理的に発生しないという利点をもつ。本研究はこのような利点をもつフォトカソード型の RF 電子銃のシステムの構築及び動作試験を目的としている。

フォトカソード型 RF 電子銃においてはカソードから直接バンチしたビームをとりだすためにビームの振舞いは通常の電子銃のような定常ビームの場合と著しく異なる。そこで本論文ではまず RF 電子銃のビームの特性を調べるために 1 次元モデルを用いて数値計算を行った。この数値解析では相対論的な運動方程式を使用し 4 次のルンゲ・クッタ法を用いた。空間電荷の影響はバンチをシート状に分割し各シートに働く力を他のシートから働く力の合計として考慮した。この方法によりビームのエネルギー、エネルギー幅、バンチ長、空洞内経過時間を計算した。加速高周波に対するレーザーの入射位相によってはバンチの圧縮がおこることがこの数値計算により明かとなった。

本研究で構築した RF 電子銃のシステムはレーザー、フォトカソード、高周波源、高周波加速空洞、低電力高周波システム、トリガーシステムなどにより

構成される。レーザー光は Nd:YAG のモード同期レーザーの 2 倍高調波である 532 nm の光を用いている。レーザーパルスのパルス幅はパルス圧縮器を用いて 10 ps に設定されている。レーザーパルスの間隔はモード同期の周波数 178.5 MHz によって決まり 5.6 ns である。フォトカソードは有感波長域が可視光領域にあり量子効率が高く活性化の容易な Cs₃Sb を選択した。本研究での Cs₃Sb フォトカソードの量子効率は 4×10^{-4} 、1/e 寿命は約 2 時間である。この値は実用機を考えると不十分な値であるが本研究の目的である RF 電子銃のシステム構築と原理的な問題を解決するためには問題ない。高周波源は周波数 2856MHz、最大出力 5 MW のパルスクライストロンで出力高周波のパルス幅は 2 μ s である。高周波加速空洞は実験目的を考え、できるかぎり単純な構造の半セルのピルボックス型を採用した。また、空洞の周波数調整をカソードロッドの位置によって行うよう設計した。低電力高周波システムは加速高周波とレーザーパルスの同期をはかる点で重要である。主信号発生器により加速高周波の周波数 2856 MHz の信号を発生させパルス変調し増幅したのちにクライストロンに入力する。レーザーのモード同期用信号は上の 2856 MHz の信号を分周して作りだす。その結果、加速高周波とモード同期用の信号との位相ジッターを約 20 ps 程度に抑えることができた。しかし、本システムではレーザー発振器の冷却水による振動等のためレーザー発振器出口での位相ジッターは約 100 ps である。今後改善できる見通しであるが本研究の実験においてはレーザーパルスは加速位相内でランダムに動く。トリガーシステムはポッケルスセルを用いた光学シャッター、加速高周波信号のパルス変調器などの各構成要素に遅延回路を経由しトリガーパルスを伝送する。遅延回路に入力するクロックは主信号発生器の信号を分周して作りだすために極めてジッターを少なくすることができた。

以上の装置によりビームの測定を行った。本実験では壁電流モニターを用いて電流を、また偏向電磁石及び蛍光板を用いた分析器によりエネルギーを測定した。本実験で用いた壁電流モニターは立ち上がり時間が 100 ps 以下の極めて速い応答性をもつものである。このモニターによりレーザーパルスに同期したビームを取り出すことに成功したことを確認した。このときフォトカソードより引き出した電荷量は約 3.7 nC、電子数にして約 2.3×10^{10} 個であった。エネ

ルギー測定によるとビームの最大エネルギーは約 900 keV であった。また、ビームが電子銃下流まで最も効率よく伝播するエネルギーは約 600 keV 付近であることがわかった。このような結果が得られた理由は数値計算の結果により定性的に説明できる。

以上のように本研究における目的であるフォトカソード型 RF 電子銃のシステムの構築及び動作試験を行い原理的な問題点を解決した。

論文の審査結果の要旨

高エネルギー物理学実験に使われるリニアコライダーにおいては、ルミノシティを上げるため低エミッタンス・短パルスの大電流電子ビームが必要であり、さらにこれには複雑なバンチ構造を要求される。こうしたビームを得るためにはその要請を満たす電子銃を作る必要があり、従って高エネルギー加速器の分野では高性能電子銃の開発は非常に重要な課題である。今回秋山浩君が博士論文として行った研究は、リニアコライダーに組み込む高性能電子銃を実現するための原理的な困難を解決するのが目的である。それにはフォトカソード型RF電子銃が最も実現の可能性が高いとして、秋山君はこの方式を採用した。

この型の電子銃はカソードから直接バンチしたビームをとりだすため、ビームの振舞いは通常ビームの場合と著しく異なり従来の計算機コードは使えない。秋山君は一次元シートモデルの数値計算コードをつくりビームの特性を調べた。これにより加速周波数に対するレーザーの入射位相によってはバンチの圧縮が起こり、目標とする短バンチが実現できるなど基本的な特性が明らかになった。

実験装置は、レーザー、フォトカソード、高周波源、高周波加速空洞、低電力高周波システム、トリガーシステムなどにより構成され大変複雑である。電子を放出させるためのレーザー光は波長532nm（パルス幅10ps）、フォトカソードは可視光領域で量子効率が高いCs₃Sbを選び、加速空洞と同一の超高真空容器内で活性化を行えるようにした。高周波源として2.85GHzのパルスクライストロンを用い、40MV/mの電場で加速した。低電力高周波システムは加速高周波とレーザーパルスの同期をはかる点で重要であるが、回路系のジッターを20ps以内とすることができた。各部の綿密な調整をほかり20ps幅の短パルス列（パルス間隔5.6ns、178パルス）の電子ビームを取り出すことに成功した。パルスあたりの電荷量は約3.7nCという高密度であった。また最大エネルギーは約900keVであり、この値は数値計算と一致する。

以上のように秋山浩君は、フォトカソード型RF電子銃のプロトタイプシステムを構築し、実用機実現の原理的な問題を解決した上、3GHz帯では世界で始めて約200Aという大ピーク電流の電子パルス列のとりだしに成功した。

本論文は以上の研究をまとめたものであり、実用化に貴重な知見を与えるものである。また大規模で複雑な実験装置の構築、運転、測定などに極めて優れた実験技能を発揮してきたことが伺われ、数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文として相応しい内容を有していると判断した。

秋山浩君に対する博士論文にかかわる専門分野ならびに基礎となる分野の学識を口述により試験した。たとえば、フォトカソードから取り出され加速される電子ビームの振舞い、短パルスレーザー光を作るシステム及びパルス光の測定技術、加速空洞・高周波源の設計製作の基本、レーザーと加速高周波との同期システム、電子ビームの電流・エネルギーなどの測定技術、などの基礎的および専門的事項その他について種々の質問を行ったが、同君はこれらに的確に答えた。また複雑な装置を構築し実験を成功させるには広い学識が必要であるが、一般物理学ならびに加速器物理学についても十分な理解と知識があることを示した。さらに、今後の研究の展開に関しても深く考察を行的確な指針を示していた。また、秋山浩君は公開発表会による最終審査にも合格した。