

令和元年6月16日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07443

研究課題名（和文）光伝導スイッチによる電界集中型加速方式を用いた超高電荷・低エミッタンス電子銃開発

研究課題名（英文）High charge and low emittance electron gun using a photoconductive switch driven electric field concentration technique

研究代表者

佐藤 大輔 (Sato, Daisuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：40780086

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,520,000円

研究成果の概要（和文）：光伝導スイッチを利用した電界集中型加速方式という、新しい加速方式の電子銃を提案した。この加速方式では、光伝導スイッチを多数用いた多段の電圧重畳により高電圧を発生し、電子ビームの加速に利用する。本加速器に必要な光伝導スイッチとしては、ガリウムヒ素（GaAs）基板上に半導体製造プロセスを用いて電極を形成した。そして、暗電流抵抗やオン抵抗など、電気特性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案した加速技術は、これまで広く利用されてきた高周波加速と比較して、非常に小型の装置で高エネルギーの電子ビームを生成できる可能性がある。また、電圧重畳するパルス電圧の時間遅延を制御することで、任意の加速電圧波形を発生可能である。これらの技術を用いることで医療用加速器や非破壊検査装置の小型化や、多種多様な荷電粒子を用いた顕微技術の高度化など様々な技術の発展に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：We proposed an electron gun using a new acceleration technique, which is named a photoconductive semiconductor switch driven electric field concentration type accelerating structure. In this acceleration method, a high voltage is generated by multistage voltage superposition using a lot of photoconductive semiconductor switches, and is used for electron beam acceleration. A photoconductive semiconductor switches which is required for this accelerator were made of a gallium arsenide (GaAs) substrate using nano-fabrication techniques. Electrical characteristics, such as dark resistance and ON resistance, were measured.

研究分野：加速器科学

キーワード：光伝導スイッチ 電子銃 電子加速器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

電子加速器は、20～21世紀にかけて高エネルギー物理学の発展を支えてきた基盤技術の一つである。2012年7月、標準理論の最後のピースであったヒッグス粒子が発見されて以降、標準理論を超えた新しい素粒子現象の発見が強く望まれており、新たなエネルギーフロンティア加速器やルミノシティフロンティア加速器の建設が急務となっている。現在、日本国内では、世界最高ルミノシティを目指した電子-陽電子円形衝突型加速器が建設されており、極稀な素粒子反応の精密測定による新物理探索などが計画され、各加速器コンポーネントの高性能化が図られている。

高エネルギー加速器を用いた素粒子実験では、注目する素粒子反応の発生頻度が、衝突点でのビーム品質によって決まる「ルミノシティ」という比例係数と、反応断面積の積で決まる。ルミノシティフロンティア加速器では、いかにルミノシティを極限まで高め、極稀な素粒子反応を数多く発生させられるかが鍵となる。一般に、高ルミノシティ化に向けては、ルミノシティがビーム電流量に比例し、エミッタンス（粒子の位相空間分布）に反比例するという性質から、高電荷・低エミッタンスのビームが必要である。特に、エミッタンスに関しては、基本的に保存量であるため、初期ビームのエミッタンスをいかに低減化するかが重要である。

現在、存在する電子銃の中で、高品質かつ最も高電荷の単バンチ電子ビームが生成可能な電子銃としては、擬似進行波型高周波電子銃が挙げられ、5nC/bunchの電子ビームを5.5mm-mradのエミッタンスで生成・加速することが可能である。しかし、このような先進的な高周波電子銃でさえも電荷量が10nC/bunchを超えると、ビームが低速領域でドリフトチューブ内を運動する間に、空間電荷効果による強い発散力を受けてビームが発散・消失し、高輝度でのビーム輸送が不可能であるという問題に直面している。

2. 研究の目的

本研究では、加速空洞とマイクロ波源を用いた高周波電子銃の基本概念から脱却し、光伝導スイッチを利用した電界集中型加速方式という、新しい加速方式の電子銃を提案する。電界集中型加速方式では、図1のような構造を持ち、その動作原理は、コンデンサバンクに蓄積した電気エネルギーを、円周上に配置した多数の光伝導スイッチによって同時に数十～数百psの立ち上がり時間で瞬間的に開放するとエネルギーが中心に向かって伝搬して数十倍～百倍に圧縮され、ビーム軸上には非常に高い電界 (> GV/m) が生じる。本研究では、この超高電界を電子銃に応用し、ビームを引き出しからMeV領域までの加速を数mmの間に行い、空間電荷効果の影響を最小限に低減化することで現在の加速器技術の限界を超える高電荷・低エミッタンス電子銃を実現する。また、この加速器技術に関しては、電子に限らず、陽子や重イオンなど電子より質量が大きい荷電粒子の加速に置いても有効であり、これらの荷電粒子における有効な加速技術として光伝導スイッチを用いた新たな加速技術の提案を行う。

3. 研究の方法

本研究の目的は、超高速光伝導スイッチによる電界集中型加速方式という、全く新しい加速方式を採用した超高電荷・低エミッタンス電子銃の開発であり、その実現ために、超高速光伝導スイッチの開発、並びにその性能評価を重点的に行った。

光伝導スイッチは半導体ウェハに電極を取り付け、側面にレーザーを照射することでスイッチのON/OFFを行う非常に簡単なデバイスである。そこで、本研究では、ガリウムヒ素 (GaAs) やシリコンカーバイド (SiC) といった基板を用いて半導体微細プロセス技術を用いて光伝導スイッチを製作した。光伝導スイッチの作製における代表的なプロセスを以下に示す。

- (1) 基板洗浄、レジスト塗布
- (2) スイッチパターンの露光、現像
- (3) 電極部分の金属蒸着
- (4) リフトオフによるスイッチパターンの作成
- (5) アニールによるオーミック接合の形成
- (6) 酸化膜 CVD による絶縁膜作成
- (7) レジスト塗布、露光、現像
- (8) 酸化膜ドライエッチング
- (9) スクライビング

このようなプロセスを経ることで、多数の光伝導スイッチを一度に大量に製作した。図1には、スクライビング行程前の半導体基板を示している。光伝導スイッチの構造においては、電極間の距離が異なるモデルや、電極を基板の両面に配置することで耐圧を高くしたモデルなどを製作した。また、半導体基板と電極の接合においては、オーミック接合となるように金属蒸着後に急速アニールを行うわけだが、金属膜の種類や厚み、順番などにつ

いて多数の組み合わせで試作し、アニールにおいても昇温時間等をパラメータにして、光伝導スイッチ製作における各パラメータの最適化を試みた。



図1. 製作した光伝導スイッチ（スクライビング行程前）

製作した光伝導スイッチは、図2に示す各性能評価回路を用いて暗電流抵抗やオン抵抗、立ち上がり時間を計測した。光伝導スイッチの駆動においては、10ns程度のパルス幅を有するQスイッチNd:YAGレーザーを使用した。また、同レーザーの基本波(1064nm)、2倍波、(532nm)4倍波(266nm)といった赤外光から紫外光に至る波長の光を用いて光伝導スイッチの駆動特性の評価を行った。光伝導スイッチ開発・評価と並行して、電界集中型加速方式の電磁場計算等を実施して電子銃としての利用可能性を検討した。

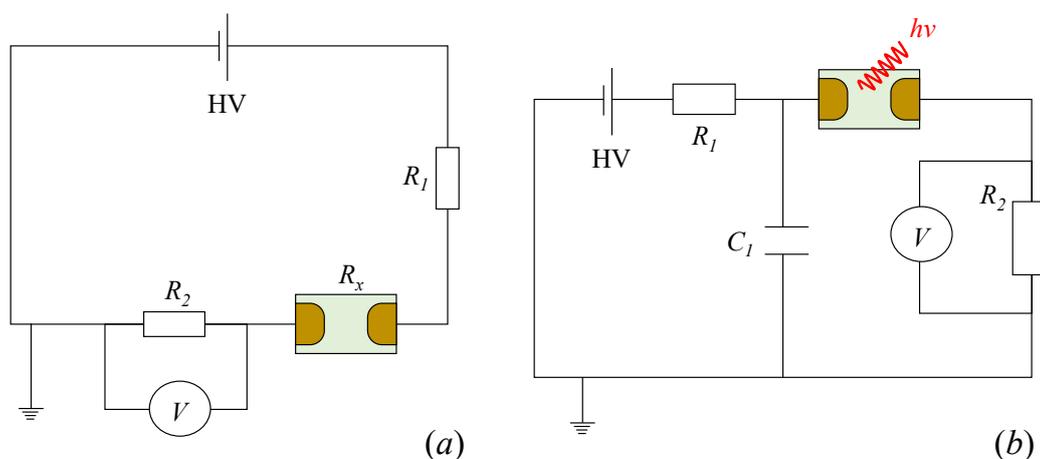


図2. 光伝導スイッチの性能評価回路概念図 (a) 暗電流抵抗測定、(b) オン抵抗、立ち上がり時間測定回路

4. 研究成果

開発したGaAs製光伝導スイッチを図4に示す。図4に示す光伝導スイッチは、半導体基板上の同一平面に電極を設けたもので、電極間距離が異なる3種類のデザインのものである。製作した光伝導スイッチは、図2(a)に示す回路を用いて暗電流抵抗測定を行った。電極間距離が4mmのGaAs製光伝導半導体スイッチの暗電流抵抗測定結果を図5(a)に示す。図5(a)に示すように当該光伝導スイッチは、10kV程度でも十分な絶縁抵抗を有しているという結果が得られた。また、10kV以上に電圧を上げていくと、おおよそ15kV程度で図5(b)に示すように、放電が観察された。一度、放電が発生すると光伝導スイッチには、致命的な損傷が発生し、絶縁抵抗が大幅に減少した。その結果、一つの光伝導スイッチを用いて10kV以上の電圧で駆動するよりは、一素子当たりの電圧はできるだけ下げ、直並列化でことで高電圧での利用することが最適であるという知見を得た。

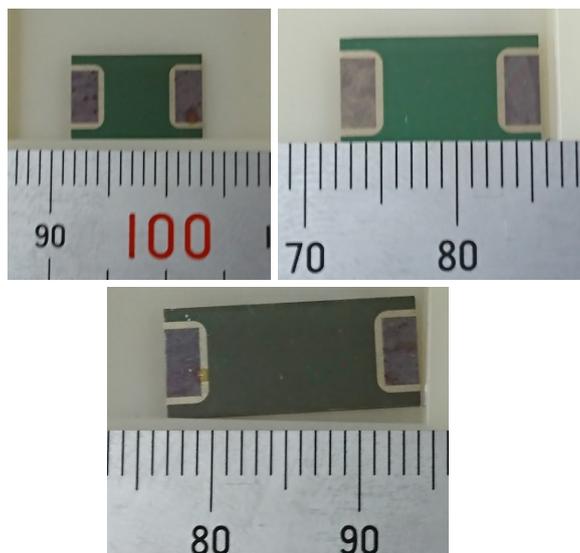


図 4. 開発した GaAs 製光伝導スイッチ

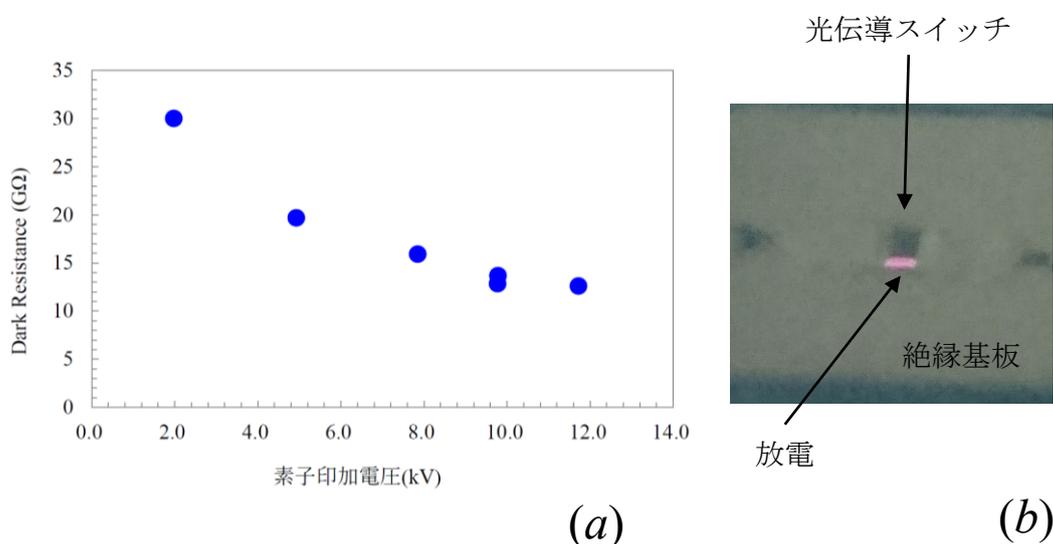


図 5. (a) 暗電流抵抗測定結果、(b) DC 放電の様子

次に、図 5(b)の測定回路を用いて光伝導スイッチのオン抵抗を測定した結果、最もその値が小さいもので約 3Ω のものが実現された。本測定においては、1064nm の赤外パルス光を駆動光源として用いて、そのパルスエネルギーと印可電圧を変えながら計測した。まず、赤外パルス光のパルスエネルギーを高くすることで、徐々にオン抵抗は減少し、20 mJ/pulse 以上のパルスエネルギーでは、オン抵抗はほぼ一定となった。また、印可電圧においては、500V から 3kV まで変化させ計測したが、数%以内の範囲で一定となった。また、光伝導スイッチの製作においてオーミック接合を形成するために行う、高速アニーリング行程は、最高保持温度まで短い昇温時間でアニールすることで、光伝導スイッチのオン抵抗が大幅に改善した。また、同様の測定装置を用いて、立ち上がり（下がり）時間を計測した。その結果、最速で 10ns 程度で駆動するという結果が得られた。しかしながら、電界集中型加速方式においては、十分な駆動速度が得られず、改善の余地が残されている。また、光伝導スイッチの寿命もおおよそ 10^4 – 10^5 程度が現状であり、加速器での利用を想定するとさらなる、長寿命化が必須である。これらの問題を解決するためには、①光伝導スイッチの小型化と②直並列運用による高速・高電圧利用の実証、さらには③GaAs の MOCVD によるドープ層の導入などによって改善されると考えている。

本研究で、既に得られている光伝導スイッチの性能は、電子よりも質量が大きい陽子や重イオンなどにおいては十分利用可能な性能である。そこで、本研究で得られたスイッチ性能を参考にして、新たに同軸線路構造を用いた重イオン加速器の着想に至った。これは、光伝導スイッチを用いた高速バイポーラ電源を用いて同軸線路構造を有する加速構造内を多段加速するという方法であり、雑誌論文への投稿に至った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- [1]. Satoh Daisuke, Ikeda Naoki, Yoshida Mitsuhiro, Uesaka Mitsuru, "A photoconductive semiconductor switch driven ion beam injector for radiobiological experiments", AIP Conference Proceedings, 2011, 90016 (2018).

〔学会発表〕(計 2 件)

- [1]. 池田直樹, 佐藤大輔, 吉田光宏, 小山和義, 上坂充, 日本物理学会・第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 大阪
[2]. 池田直樹, 佐藤大輔, 吉田光宏, 上坂充, ビーム物理研究会 2016, 2016 年 11 月, 兵庫県

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：池田直樹

ローマ字氏名：Naoki Ikeda