

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05034

研究課題名(和文)超短パルス電源を用いた電子銃の開発研究

研究課題名(英文)A high voltage pulse power supply with very short pulse width for electron gun

研究代表者

内藤 孝(Naito, Takashi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：90391713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：科学実験のみならず多くの応用に使用されるようになった加速器で電子ビームを発生させるための電子銃は数10kVを超える高い電圧が必要であり、電流も必要であるために大電力のパルス電源が必要となる。現状ではサイラトロンと呼ばれる放電管により大電力パルスが作られているが、これを半導体のアバランシェ効果を使用することによってコンパクトで安定な高電圧パルス電源とすることを目指した。本研究によって、出力パルスは、ピーク電圧65kV、ピーク電流43A、パルス幅(FWHM)347ns、立ち下がり時間(10%-90%)115nsを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は科学実験に使用する電子銃の加速電源の開発に関するものである。電子銃の高性能化によって、医療応用に使われている電子加速器をコンパクト化、低コスト化することに貢献する可能性がある。また、高電圧パルスを使用する多くの分野での応用が期待される。半導体回路技術として、サイリスタをアバランシェモードで使用する技術は、まだ、2、3の研究所で試されている状況であり、今後、実用化に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：A high voltage pulse power supply has been developed for electron gun in accelerator application. Avalanche mode thyristors(AMT) are used for the high-power pulse switch. AMT has many advantages compare to thyatron switch, for example, high-speed switch, small timing jitter, long life time, etc. We realized following pulse parameters, peak pulse voltage: 65kV, peak current: 43A, pulse width (FWHM): 347ns, Fall time of pulse(10%-90%): 115ns.

研究分野：加速器

キーワード：電子銃

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー物理実験や放射光利用に用いられる加速器で電子ビームを生成する装置は電子銃と呼ばれる。電子銃は、高電圧のパルス電圧によって高い電界を作り真空中の金属表面から電子を引き出し、初期加速を行っている。高電圧パルスはパルス幅：数マイクロ秒、電圧：数 10kV 以上、電流：数 10A 程度を印加し加速電界を得るものが一般的である。サイラトロンスイッチによって数 kA のパルスが作られ、パルストランスによって昇圧し高電圧を得ている。このサイラトロンスイッチを使ったパルス電源は周辺回路も含めると大型となり価格も高価である。サイラトロンスイッチは放電管であるために寿命があり、安定な動作をさせるために常時調整が必要になるなど多くの問題がある。

近年、サイラトロンスイッチを使ったパルス電源は、安定性と長寿命、コンパクト化をめざし半導体に置き換える努力がなされている。しかし、市販の半導体単体で数 10kV、数 kA をスイッチ出来るものはなく、多段、多並列接続することによって実現する努力がなされているが多くの素子を使うため複雑な回路構成となり、コスト的にもサイラトロンスイッチに比べ安価にすることが出来ず、簡単に置き換えられる状況にはない。

サイラトロンスイッチを使ったパルス電源はスイッチ速度から数マイクロ秒のパルス幅となるが、パルス幅を短くすることが可能であれば多くのメリットが期待される。パルスを短くすることによってパルスのパワーを小さくすることが出来るため消費電力も少なくなり、構成する回路部品も小電力のものを使用することが出来、結果的にコンパクトな電源にすることが出来る。また、パルス幅が短くなると放電の閾値が下がり高電圧を印加しても放電しなくなる。高電圧を扱う上で問題となるのは、放電のために絶縁距離を取る必要があり、構成する電源回路や電子銃を構成する絶縁体も大きくならざるを得ない。放電が回避出来ればコンパクトな電子銃を実現することが可能となる。そのために高速でスイッチする高電圧、大電流スイッチが必要となる。

他方、電子銃は高電界で加速することによって電子ビームの性能を向上させることが出来るため出来るだけ高電界を印加する必要がある。上述のように放電の問題があるため直流よりパルスの方が有利である。さらに高電界にするために最近では高周波で加速する高周波電子銃が開発され使用され始めている。短パルスと高周波加速を組み合わせ、さらに電子ビームの性能を向上させる研究もなされている。

本研究では、高速でスイッチする高電圧、大電流スイッチの候補として、幾つかのデバイス进行评估することとした。

2. 研究の目的

加速器の電子銃で使用可能な高電圧パルス電源を開発することを目指し、当面の目標としてパルス出力電圧 50kV 以上、電流 40A 以上、パルス幅 400ns 以下を生成することを目指した。パルススイッチを半導体化するにあたって、使用するデバイス、回路方式など幾つかの方式が考えられるが、それぞれにメリット、デメリットがある。それらの候補を評価することも目的とした。

3. 研究の方法

半導体を用いて高電圧、大電流のスイッチをまず開発する必要があり、1)産業総合研究所と共同開発した SiC 半導体を用いたドリフトステップリカバリダイオード、2)市販のサイリスタをアバランシェモードでスイッチさせるアバランシェモードサイリスタの2つの候補を試験した。

1)ドリフトステップリカバリダイオードは一度順方向にオンしたダイオード電流をインダクタンスに流し、オフするときの急激な電流遮断効果を利用して高速の立ち上がりを持つパルスを生成するもので、数ナノ秒以下の高速のパルスを生成出来る可能性がある。シリコン半導体を使用したドリフトステップリカバリダイオードは1個あたりの耐圧が大きくないために高電圧化するために非常に多くのダイオードを直列接続することになり、安定性や長期使用に問題があると考え、産業総合研究所で開発された SiC 半導体をドリフトステップリカバリダイオードと使用するために最適化し、その可能性を検討した。

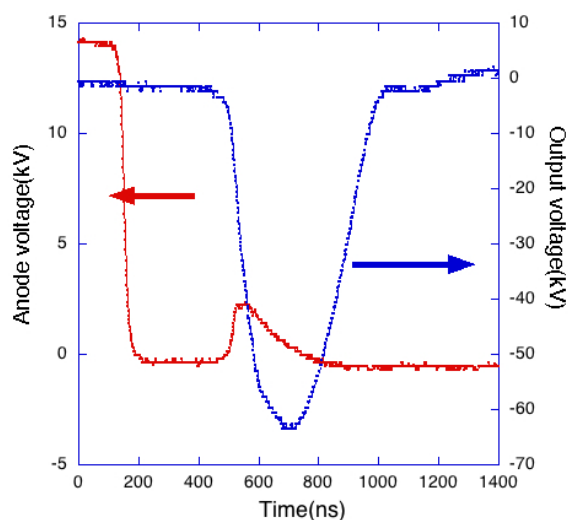
2)アバランシェモードサイリスタは、通常のサイリスタの動作では電流は kA に達する電流を流すことが出来るがスイッチング速度はマイクロ秒程度と遅い。サイリスタをアバランシェモードでスイッチさせることによってスイッチング速度を高速化し、また、1つのトリガー信号で連続的にスイッチさせることによってトリガー回路の大幅な簡略化が期待される。しかし、アバランシェモードでスイッチする回路は小電力のバイポーラトランジスタでは実現されているが、大電力のサイリスタでの実績はほとんどない。そのためアバランシェモードの基礎データを実験から得る必要があり、開発に多くの時間を要した。

この2つの方式について試験を行った。

4. 研究成果

ドリフトステップリカバリダイオードに関しては、2017年にパルス電圧 11kV, パルス電流 22A, パルス幅 3.7ns, 立ち上がり時間 2.2ns を実現した。トリガージッターも 30ps と非常に安定であることを確認した。しかし、当初予定した 10kV ドリフトステップリカバリダイオードが使用出来ず、2.2kV ドリフトステップリカバリダイオードを使用したため、50kV 以上の出力を得るのは難しいとの判断に至った。

アバランシェモードサイリスタを用いたスイッチは 1.5kV のサイリスタを 12 段使用し、直流電圧を 20kV 近くまで印加することによって 1.4kA のピーク電流を得た。この値は小型のサイラトロンに匹敵する値であり、パルストランスを用いた回路を使って昇圧することによって出力パルスは、ピーク電圧 65kV, ピーク電流 43A, パルス幅(FWHM)347ns, 立ち下がり時間(10%-90%)115ns を得た。得られた波形を下に示す。



アバランシェモードサイリスタに印加されているアノード電圧(赤)の変化と出力パルス(青):パルストランスにより昇圧することで 65kV の出力を得ている。

アバランシェモードサイリスタを用いて、ほぼ目標の高電圧パルスを生成することが出来た。今後、このパルス電源を用いて電子銃のビーム生成試験を行うことによって、電子銃の性能向上が期待される。

また、アバランシェモードサイリスタを用いたスイッチは、サイラトロンスイッチが使われている他の機器にも用途が期待され、今後、高繰り返し運転や寿命、安定性の評価が行われ、実用化が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 内藤孝, 明本光生	4. 巻 1
2. 論文標題 サイリスタのアバランシェモードを用いた高電圧高電流パルス電源の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 pp249-252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 内藤孝, 福田憲司, 岩室憲幸, 徳地明	4. 巻 1
2. 論文標題 高速、高電圧パルス電源の開発	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 pp1254-1256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 内藤 孝
2. 発表標題 高速、高電圧パルス電源の開発
3. 学会等名 加速器学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 高電圧大電流パルス生成装置	発明者 内藤孝	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-126427	取得年 2018年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----