

一般論文

サイラトロン代替半導体 スイッチの開発

Development of Semi-Conductor Switch for Modulator

原田 瞬* 佐藤 尚登*
S. Harada H. Sato
大下 英次*
E. Oshita

概要

電子リニアックに用いられるクライストロンモジュレータの主スイッチには、以前より半導体スイッチの採用が提案されているが、いまだにサイラトロンが使用されているのが実情である。今回我々は、サイラトロン代替スイッチとして使い勝手の良いIGBTを使用した半導体スイッチを開発したので、その概要について報告する。

Synopsis

At present, many thyratrons still have been applied to klystron modulator as high voltage and large current switch, despite several presentations of replacement to semi-conductor switch were proposed in the past.

It is desired for modulator to apply semi-conductor switch, because of its stable operation and requirement of little maintenance. We have developed an alternative semi-conductor switch for thyratron and the outline is mentioned in this paper.

1. 開発の背景

電子リニアックの電子加速に用いられているクライストロンモジュレータの高電圧・大電流パルス電源用スイッチとして使用されているサイラトロンは、安定動作のためにヒータ、リザーバの調整が必須である。また、サイラトロンは寿命を有するため数年程度で交換が必要になるという問題がある。特に、数GeVクラスの電子加速を行う施設においては、使用されているサイラトロンの台数も多く、ヒータ、リザーバ調整に多くの労力と時間を要するため、これらの作業が不要で寿命も半永久的な半導体スイッチ化が望まれている。

2. スwitchの仕様概要

今回開発したIGBT半導体スイッチの主要仕様を表1に示す。

表1 スwitch主要仕様

定格電圧	25kV
定格電流	2kA
パルス幅	8 μ s (半値幅)
パルス繰返し	25pps
使用素子	IGBT

*日新パルス電子株式会社

本スイッチの仕様については、電子加速エネルギーが数10MeV程度の低エネルギーの電子リニアックに用いられるモジュレータを対象とした。また、中性子発生への応用においては高繰返し性能が、自由電子レーザへの応用においては長パルス性能が要求されるが、IGBT素子の冷却方法を変更することにより、高繰返し・長パルスに対応出来るスイッチも製作可能と考えている。

3. 開発課題

今回の半導体スイッチの開発にあたっては、以下のポイントを課題に掲げ、検証に必要な社内試験なども行い、慎重に開発を行った。

- 1) 駆動回路含め安定に動作するスイッチとすること。
- 2) ON時のスイッチング損失には特に注意し、必要に応じてスイッチング損失の低減を図ること。
- 3) クライストロンのブレイクダウン（管内放電）時、2倍の通電電流にも耐えうること。
- 4) サイラトロンとサイラトロンドライバを合わせたスイッチ全体と寸法面で同程度とすること。
- 5) スwitch素子は市販品で入手可能かつ安価なものであること。

4. 開発経緯

前述の開発課題をクリアするため、以下のような検討と社内試験を実施した。

1) 素子選定

素子選定にあたっては、サイリスタ、IGBT、SiC素子を候補にして、当社が得意とするインバータパルス電源（出力電圧～10kV、繰返し～100kV）の知見も活用し検討を行った。

SiC素子は高速スイッチング動作による低損失が特徴であるが、ドライブの安定動作に懸念があること、市販品として大電流素子が無いことにより採用を見送った。

サイリスタ素子については、1素子あたりの耐圧が高いという利点はあるものの、高価であること、電流立ち上り (di/dt) 性能の面で難がある。

流量や価格と性能面を総合的に判断し、IGBT素子を用いたスイッチを開発する方針を決定し開発を進めた。

2) 社内試験

社内試験については、スイッチに印加される波形がPFN回路により発生する矩形波となるため、以下の点を考慮しながら実施した。

- (1) 実波形に近い波形が出せるようPFN回路を組み、通電電流試験を実施する。
- (2) 素子の実力を把握するため、単発にて最大通電電流の実力値を調査する。
- (3) 損失を検討する上で、可飽和リアクトルによる損失低減効果試験も合わせて実施する。
- (4) 複数メーカーの同一定格の素子を用いて試験する。

上記の試験を実施し、IGBT素子の基本的な特性を明らかにした。

5. 試験結果

1) 通電電流試験

社内検証試験用として、電圧4kV 電流2kAのPFN回路を試作した。主要パラメータを表2に示す。また、図1に代表的なIGBT素子の端子間電圧・通電電流波形を示す。

表2 試作回路パラメータ

充電電圧	4kV (最大)
定格電流	2kA
Maxパルス幅	30μs (半値幅)
パルス繰返し	25pps
di/dt	～1. 5kA/μs

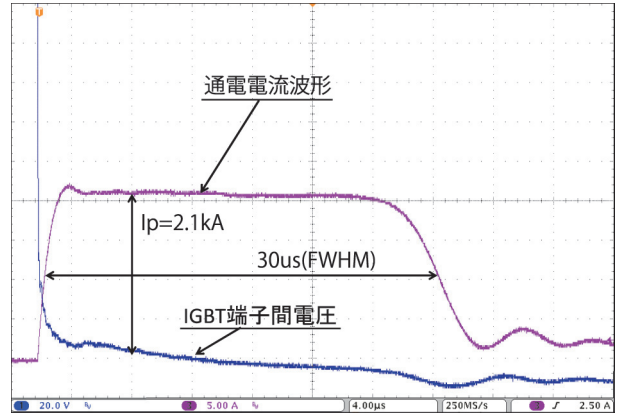


図1 試作回路電流波形

これらの試験回路による実測データを基に、各特性を調査した。

2) 損失測定結果

IGBT素子のスイッチング損失の基礎特性を把握するために、単発動作による1ショットの損失特性を測定した。図2に代表例を示す。

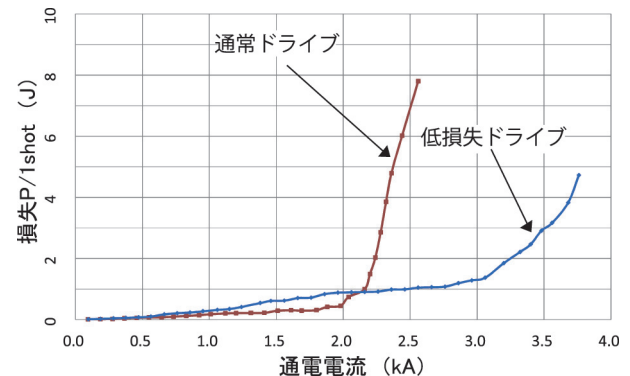


図2 損失特性

IGBTについては、経験的にゲートドライブ方法を工夫することにより損失低減が図れることがわかっている。通常ドライブでは、ある電流値を超えると急激に損失が立ち上がるが、ドライブ方法を工夫することでより高い通電電流が可能と判明した。また、この結果より、今回応用を考えているパルス幅数10μsの使用においては、素子定格の約10倍程度までの通電が可能と判断した。

3) 可飽和リアクトルによる損失低減

パルス繰返し運転を考慮し、IGBTのON時のスイッチング損失の低減を目的として、PFN回路に可飽和リアクトルを挿入しON時のスイッチング損失低減を行った。図3に代表波形を示す。

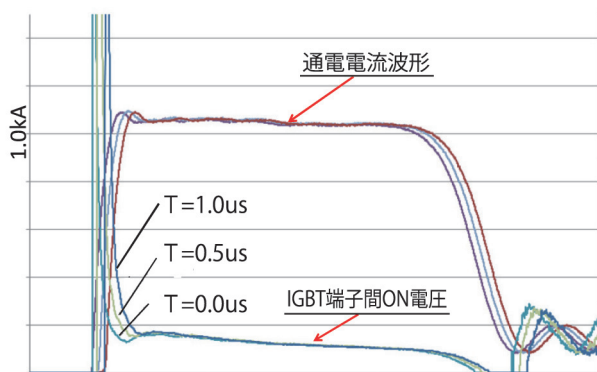


図3 可飽和リアクトルによるON電圧特性

IGBTのON時のスイッチング損失を可飽和リアクトルにより低減できると考えていたが、スイッチングトリガー入力後の電流通電開始時間を過飽和リアクトルにより遅らせても、損失低減には大きく寄与しないことが判明した。これは、IGBT素子のスイッチング速度がおおよそ $\sim 200\text{ns}$ 程度であり電流立上り (di/dt) $\sim 1\ \mu\text{s}$ に比べて速いため、ON時の損失に大きな影響を与えないためと考えられる。

6. 25kVスイッチ組立

損失特性など必要なIGBT素子の基礎データを取得後、開発目標の25kVスイッチについての冷却設計検討を行った。冷却設計は、素子温度上昇値がカタログ値を超えないようにヒートシンクを検討し、25kVスイッチとして組み上げた。組み上がりの外観を図4に示す。

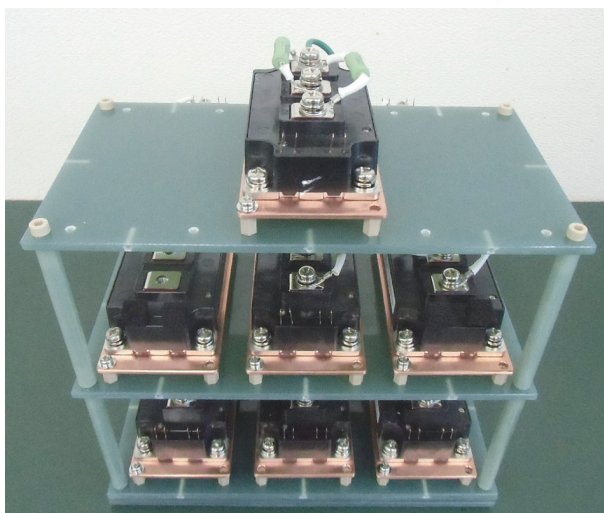


図4 25kVスイッチ外観

7. フィールド試験

このスイッチ用い、早稲田大学鷺尾研究室殿所有のクライストロンパルス電源へ組み込み、フィールド試験を実施した。

最初に模擬負荷抵抗による通電試験を行った。サイラトロン使用時とIGBTスイッチ使用時のON電圧測定波形を図5、図6に示す。

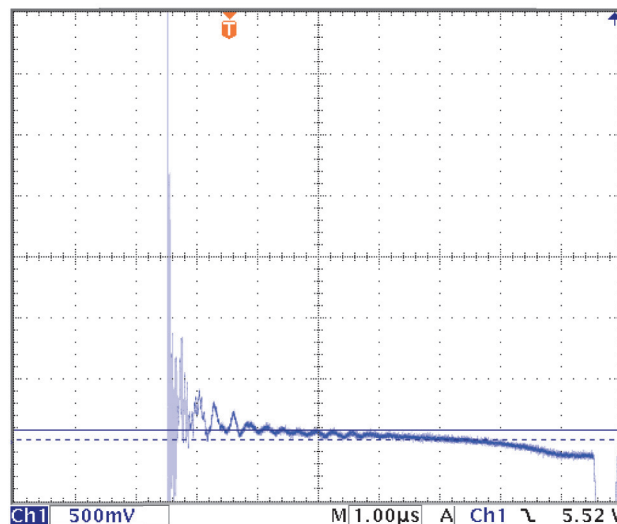


図5 サイラトロンON電圧波形

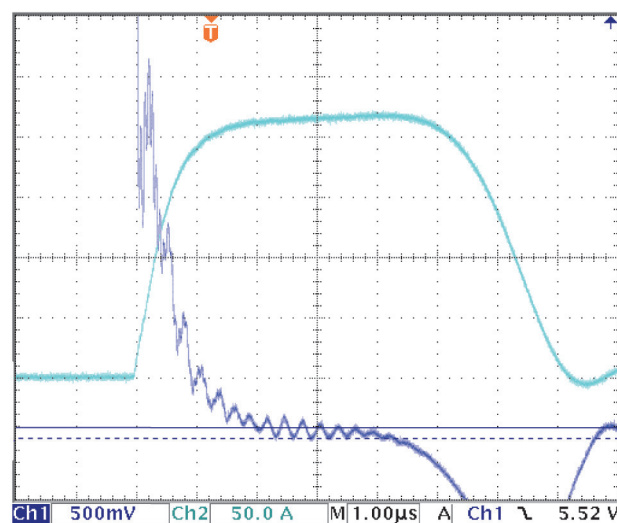


図6 IGBT ON電圧波形

測定の結果、スイッチングトリガー入力直後のON電圧はサイラトロンの方がIGBTに比べて小さいが、

$2\ \mu\text{s}$ 後はほぼ同等 (約170V程度) となっている。これより、25kV用として組み上げたスイッチに置換しても、電子ビームを出力するフラットトップ部の波形に顕著な違いが見られないことより、使用に耐え得るものと判断できる。

上記のように、サイラトロンをIGBTスイッチに置換

してもモジュレータの出力波形に顕著な違いが無いことを確認し、実際にクライストロンへの電圧印加を行った。クライストロンに印加されるビーム電圧波形について、サイラトロンを使用した場合とIGBTスイッチを使用した場合での波形を図7に示す。

図5、6のON電圧の違いからも分かる通り、IGBTスイッチを用いた方が電圧立ち上がり時間に若干の遅れを生じているが、実際に電子ビーム加速を行ない問題ないことを確認できた。

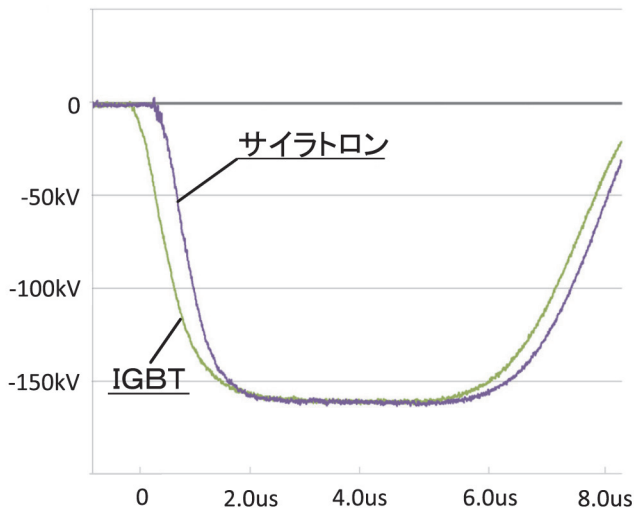


図7 クライストロン印加波形

8. 今後について

このIGBTスイッチを累計500時間超の期間で運転頂き問題のないことを確認した。今後、信頼性や寿命について更なる評価・確認を行っていく。

また、数GeVクラスの大型の加速器施設においては定格電圧・電流が50kV・6kA級の半導体スイッチ化が強く望まれており、この仕様を満たすスイッチの開発にも鋭意取り組んで行く予定である。

9. 謝辞

今回の半導体スイッチの開発にあたり、御支援頂きましたJASRI 花木博文先生、小林利明先生、ならびにフィールド試験にご協力頂きました早稲田大学 鷲尾方一先生、坂上和之先生にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

執筆者紹介



原田 瞬 Shun Harada
日新パルス電子株式会社
技術部 開発課



佐藤 尚登 Hisato Sato
日新パルス電子株式会社
技術部 次長



大下 英次 Eiji Oshita
日新パルス電子株式会社
技術部 部長