

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, 大下英次

Shun Harada, Hisato Sato, Eiji Oshita

Nissin Pulse Electronics co., ltd.

Abstract

Now, many thyratrons still have been applied to klystron modulator as high voltage and big current switch, once several presentations of replacement to semi-conductor switch were proposed in the past. It is very important for modulator to apply semi-conductor switch, its stable operation and requirement of little maintenance. We have developed an alternative semi-conductor switch for thyatron and the outline is mentioned in this time.

1. はじめに

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、過去半導体スイッチの提案がなされているが、いまだにサイラトロンが採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。

2. スイッチ概要

表 1. に今回開発した IGBT 半導体スイッチの主要仕様を示す。

Table 1: Specifications of Switch

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

今回開発したスイッチについては、パルス幅を 8 μ s としているが、冷却設計などを変更することにより、長パルス・高繰返しに対応出来るスイッチも可能と考えている。

3. 開発課題設定

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、必要な社内試験なども行い、慎重に開発を行った。

- 1) スイッチ素子は市販品で入手可能かつ安価なものであること。
- 2) 駆動回路を含め安定に動作可能なスイッチとすること。
- 3) 万一の故障時には、極力社内で修理対応が可能とすること。
- 4) 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低減を図ること。

- 5) サイラトロンおよびサイラトロンドライバーと寸法面で同一程度とすること。
- 6) クライストロンブレイクダウン時、2倍の通電電流にも耐えうること。

4. 開発経緯

前述の開発課題をクリアするため、社内検討ならびに、社内試験を繰り返し実施した。

1) 素子選定

素子選定にあたっては、サイリスタ・IGBT・SiC を中心に、現在当社が得意とするインバータパルス電源（出力電圧 \sim 10 kV, 繰返し \sim 100 kHz）の知見も活用し検討を行った。SiC はドライブの安定動作に懸念があること、およびサイリスタについては立上り (di/dt) の確保が困難であることより、流通量も多くドライブの安定性を含め IGBT 素子を採用し開発を進めることとした。

2) 社内開発試験

社内試験については、スイッチに印加される波形が PFN による矩形波となるため、以下の点を考慮し社内試験を実施した。

- (1) 素子の実力を知るため、単発にて通電電流最大値の実力を調査する。
- (2) 極力実波形に近い波形が出るよう PFN 回路を組み、通電電流試験を実施する。
- (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. 試験結果概要

1) 通電電流試験

社内試験用として、電圧 4 kV 電流 2 k A の P F N 回路を作成した。主要パラメータを表 2. に示す。また、図 1. に代表的な I G B T 端子間電圧、通電電流波形を示す。

Table 2: Parameter of Test Circuit

充電電圧	4 k V (最大)
定格電流	2 k A
Max パルス幅	30 μ s (FWHM)
パルス繰返し	25 p p s
di/dt	~ 1.5 k A/ μ s

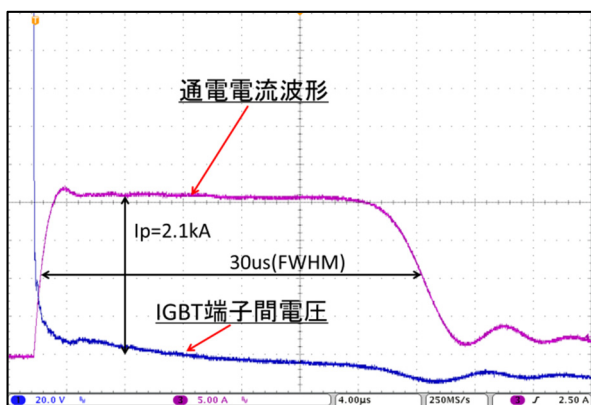


Figure 1: Current and voltage waveform.

これらの試験回路、実測データをもとに、各特性を調査した。

2) 損失測定

図 2. に損失測定の代表例を示す。

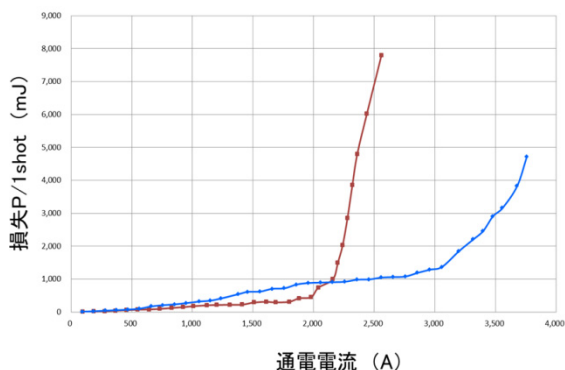


Figure 2: Ross characteristics of IGBT.

この結果より、I G B T 素子がある電流値を超えると急激に損失大となることが判明した。

3) スイッチングロス低減

I G B T ON 時のスイッチングロスが大きいと想定し、P F N 回路に可飽和リアクトルを挿入し ON 時のスイッチングロス低減を行った。

図 3. に代表波形を示す。

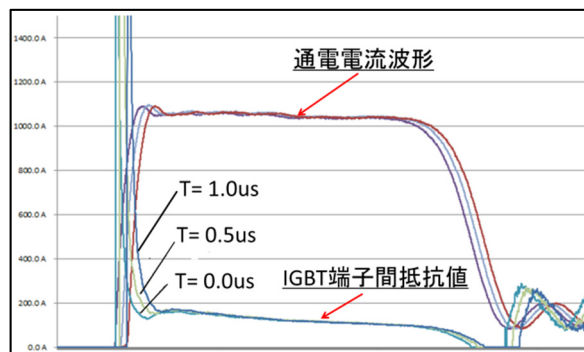


Figure 3: Characteristics of current - resistance.

I G B T ON 時のスイッチングロスを可飽和リアクトルにより低減できると考えていたが、トリガー入力後、電流通電開始時間を遅らせても、損失低減には大きく寄与しないことが判明した。これは I G B T 素子のスイッチングスピードがおおよそ ~ 200 n s 程度であり、電流立ち上り (di/dt) $\sim 1 \mu$ 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. 25 kV スイッチ組立

社内で損失測定など必要な基礎データを測定後冷却検討を行った。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、25 kV 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。

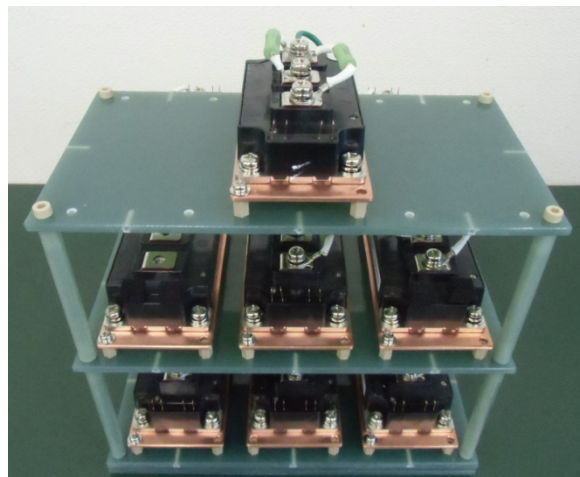


Figure 4: Outline view of switch.

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込み、フィールド試験を実施した。

図 5. 図 6. にサイラトロン、I G B T スイッチの ON 電圧測定波形を示す。

また、図 7. にクライストロンに印加されるビーム電圧波形を示す。

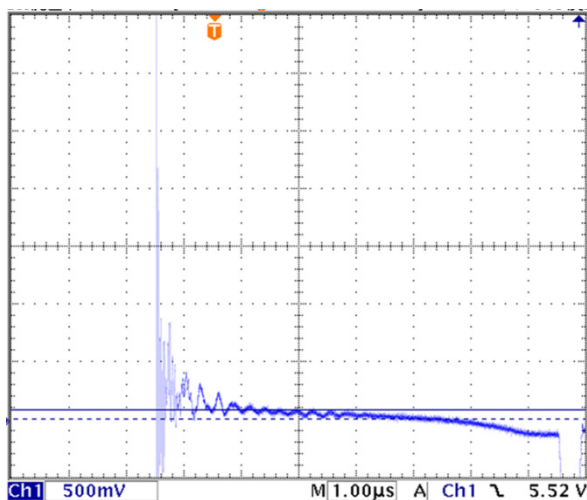


Figure 5: Waveform of thyatron voltage.

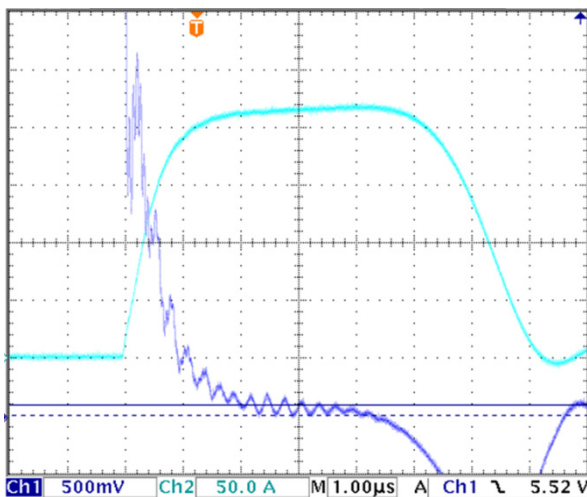


Figure 6: Waveform of IGBT voltage.

測定の結果、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、性能的には問題ないことが分かった。

また、図7. で示すようにクライストロンに印加されるビーム電圧はほぼ変化なく印加されている。実際にIGBTスイッチにてビーム加速が行なわれたが、若干の位相のずれが生じるものの問題なくビーム加速が出来ることを確認頂いた。

このIGBTスイッチを約500時間超運転頂いたが、全く問題が生じなかったことを確認した。

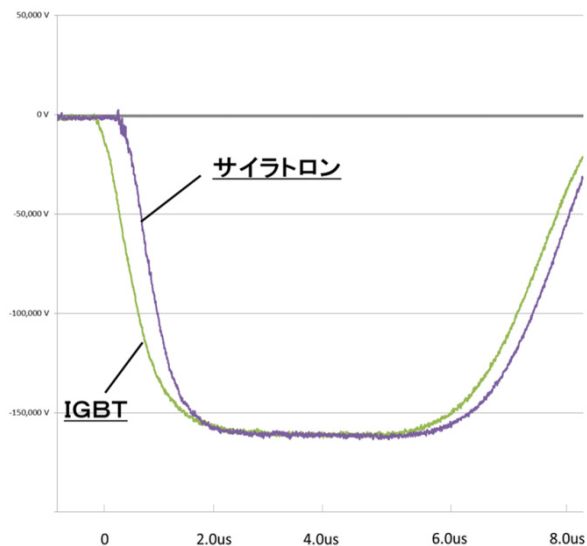


Figure 7: Waveform of beam voltage.

8. おわりに

今回 25kV 2kA 、繰返し 25pps の半導体スイッチを開発したが、実際に半導体スイッチのクライストロンモジュレータへの応用を考えた場合、クライストロンブレイクダウン時のシステム対応が重要になると考えられる。

ブレイクダウン時、次のショットを確実に停止する電源装置であれば、半導体スイッチの裕度を減らすことが出来るが、数ショット続く場合は素子破壊を防ぐためより大きな素子を選定することとなり、寸法・価格に影響が出る恐れがある。

今回の半導体スイッチの開発を機に加速器の安定動作に貢献できることをメーカーとして切に願っている次第である。

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感謝申し上げます。