

クライストロンモジュレータ用ハイパワー半導体スイッチの開発

DEVELOPMENT OF A HIGH-POWER SOLID-STATE SWITCH FOR A KLYSTRON MODULATOR

上司 文善, 徳地 明, 川瀬 啓悟, 古川 和弥, 加藤 龍好, 藤本 將輝, 大角 寛樹, 矢口 雅貴, 船越 壮亮, 堤 亮太, 末峰 昌二, ○磯山 悟朗

Fumiyoshi Kamitsukasa^{A)}, Akira Tokuchi^{A, B, C)}, Keigo Kawase^{A)}, Kazuya Furukawa^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)}, Hiroki Osumi^{A)}, Masaki Yaguchi^{A)}, Sousuke Funakoshi^{A)}, Ryouta Tsutsumi^{A)}, Shoji Suemine^{A)}, Goro Isoyama^{#, A)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

^{B)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd, ^{C)} Nagaoka University of Technology

Abstract

We have developed a solid-state switch with static induction thyristors for the klystron modulator of the L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. The switch with a rise time of 200 ns is retrofitted in the modulator and an operation test is successfully conducted in normal conditions of the modulator at a peak voltage of 20 kV, a peak current of 4 kA, and a repetition rate of 10 Hz, which demonstrates that the switch can be used as a high-power switch for the modulator. Variations of the klystron voltage are measured to be 0.015 %, and those of the RF power and the phase are 0.05 % and 0.1°, respectively. These values are significantly smaller than those obtained with a thyratron and hence stability of the main RF system is improved. The new switch is used to accelerate an electron beam for a THz free-electron laser (FEL) and stability of FEL intensity becomes significantly higher. The solid-state switch is used in normal operation of the linac with a few troubles in its control circuit due to electric discharge in the klystron tank. Thus we have confirmed its long-term reliability.

1. はじめに

常伝導高周波電子線形加速器(ライナック)の高周波(RF)パワー源としてクライストロンが用いられる。クライストロン用電源であるクライストロン・モジュレータ(モジュレータ)は、パルス生成回路(Pulse-forming network、PFN)に蓄えた高電圧の大電荷をサイラトロンと呼ばれる高速スイッチで導通させ、昇圧トランスを通じてクライストロンに高電圧・大電流パルスを提供して大パワーRFパルスを発生する。電子ライナックで加速する電子ビームの時空間、エネルギー安定性は、加速電場を発生するRFのパワーと位相の安定性に大きく依存する。そのために、クライストロンに印加する高電圧パルス頂上部分の平坦性とパルス毎の安定性を高めるようにモジュレータを設計・製作する。

モジュレータ電源の安定性は、PFNに充電する電圧と高速スイッチ動作が大きな要因である。PFNの充電電圧は、インバータ電源の充電パルス数とパルスあたりの電荷量により決まる。インバータ電源の動作周波数を格段に高めることは難しいため、目標値に近づいた時にパルスの電荷量を減らすことで 10^{-5} 台の高い電圧精度を得ている。一方、スイッチ素子であるサイラトロンは、水素又は重水素封入の放電管で、数10 kVで数千Aの電流を数ナノ秒で導通させることが出来るが、電氣的ノイズが大きい、ガス圧の調整が定期的に必要である、放電現象を利

用するため揺らぎが避けられないなどの問題点がある。これらの問題を解決するため、モジュレータに半導体スイッチを用いる試みが幾つか行われているが、高電圧・大電流用で且つ動作速度が速い半導体素子が入手できないため、国内では市販の半導体スイッチはない。

我々は、大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設のLバンド電子ライナックを用いて遠赤外・テラヘルツ領域の自由電子レーザー(FEL)の開発と基礎研究、更にFEL利用研究を行っている。FELに要求される大強度且つ安定な光を得るためには、エネルギーが一定で強度変動が小さい電子ビームが必要である。そのために高安定化を目指してクライストロンモジュレータを改造し、PFNへの充電電圧変動が0.008%の安定性を実現している。にも拘らずクライストロンに印加するパルス電圧の変動はこれより1桁近く大きい。この原因がサイラトロンに有ると思われるので、より高い安定性が期待できる半導体スイッチを開発した。

2. 静電誘導型サイリスタ

クライストロンモジュレータ用半導体スイッチとして近年、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)がよく使われる。高電圧、大電流用のIGBTのスイッチング時間は1マイクロ秒程度であるので、パルス幅が4又は8マイクロ秒である我々のクライストロンモジュレータで使用するにはスイッチング速度が十分でない。そこでより速い動作速度が期待できる静電誘導

isoyama@sanken.osaka-u.ac.jp

Table 1: Manufacturer's Specifications of SI-thyristor

Blocking voltage	3.2 kV
Maximum current (rms)	50 A

Table 2: Performance Test of SI-thyristor

Conditions	
Charging voltage of PFN	2 kV
Pulse current	1 kA
Results	
Rise time (20-80 %)	200 ns
On-resistance	0.1 Ω

型サイリスタ (Static Induction Thyristor, SI サイリスタ) を用いて半導体スイッチを製作することにした。SI サイリスタは、PIN ダイオードにゲートを付加した半導体素子であるが、現在は市販されていない。ここでは新電源製の SI サイリスタを入手して半導体スイッチの開発研究を行った。

Table 1 に使用した SI サイリスタの仕様を示す。メーカーの仕様では、最大耐電圧 3.2 kV、平均最大電流 50A であるが 10 マイクロ秒以下の短いパルスに対して大きな電流を流せる可能性がある。インピーダンスが 1Ω で 5 段の PFN で発生する 2 マイクロ秒のパルスを用いてこの SI サイリスタ単体の特性を評価した。Figure 1 に PFN 充電電圧が 2 kV で試験した SI サイリスタ単体のアノード - カソード間の電圧と電流波形を示す。ゲートに入力したトリガー信号によりアノード - カソード間が導通して電圧が 2 kV から 100 V 程度まで下がりパルス幅 2 マイクロ秒の電流が流れる。80%から 20%の電圧変化を立下り時間とすると、スイッチ時間が 200 ナノ秒であり、その後約 100V の電位差で 1 kA の電流が流れることからオン抵抗が 0.1 Ω であることが分かる。これらの測定条件と結果を Table 2 にまとめて示す。

これに加えて SI サイリスタの耐電圧を評価するため、漏れ電流を印加電圧に対して測定した。素子の温度が上がるとしだいに漏れ電流が増えるが、いずれの場合にも印加電圧が 2.6 kV を超えると急速に漏れ電流が増える。Table 1 に示すメーカーの仕様では耐電圧が 3.2 kV であるが、ここで使用する素子の最大電圧を 2.5 kV とする。

この SI サイリスタはモジュレータ用半導体スイッチとして十分に高速でオン抵抗も低い。

3. 半導体スイッチ

モジュレータ用スイッチの要求性能は、電圧 25 kV で 5 Ω の負荷に対して 5 kA の電流を流すことである。25 kV の耐圧を得るために SI サイリスタを 10 直列で用いる。IS サイリスタのオン抵抗が 0.1 Ω であるので 10 直列では 1 Ω である。SI サイリスタの最大許容電流は測定していないが 1 kA で試験を

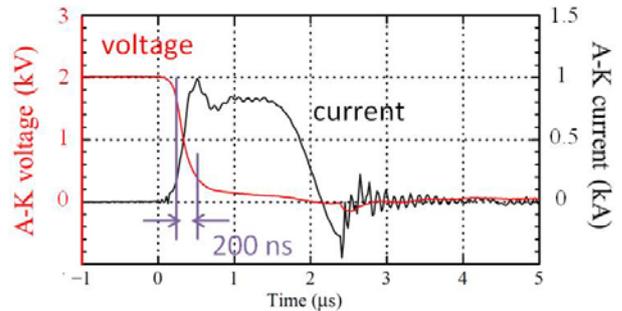


Figure 1: Test waveforms of a SI-thyristor. The characters A-K on the ordinates stand for anode-cathode.

して問題がないため、余裕を見て 6 並列で 5 kA の電流を流す。従って SI サイリスタを 10 直列 6 並列、合計 60 使用する。Figure 2 に製作した半導体スイッチの外形図と写真を示す。対向する短辺の 2 面にはゲート用パルス発生回路など制御用回路を取り付ける。ゲート基板への電源供給は、5 V で 100 kHz の

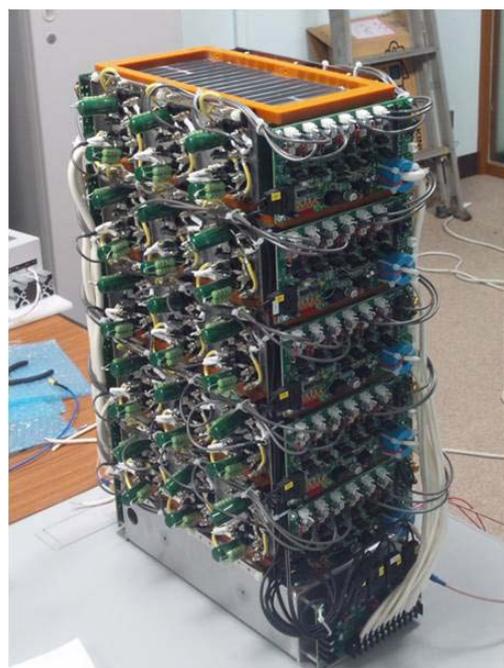
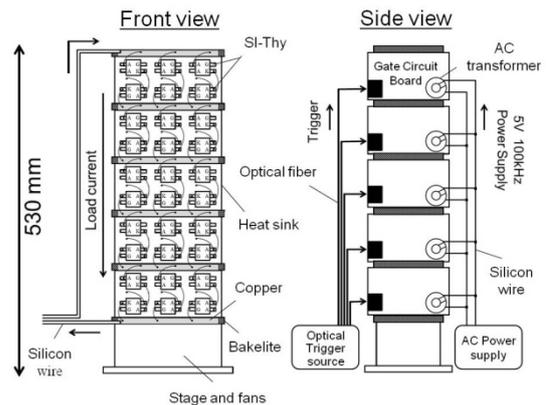


Figure 2: Solid-state switch using SI-thyristors.

絶縁型 DC-DC コンバータで行い、トリガー信号は光ファイバーで各段に送る。冷却は 5 段に組み上げた放熱板の下から上へ送風して 5 段を同時に冷却する。半導体スイッチの高さは 53 cm で、現在使用しているサイラトロンに換えてモジュレータ管体へ取り付けることが出来る大きさである。

4. 動作試験

4.1 模擬負荷

製作した半導体スイッチの動作試験を模擬負荷を用いて行った。半導体スイッチをモジュレータの裏側でサイラトロンに近い場所に置き、モジュレータの PFN を用いてサイラトロンに接続した PFN 配線を半導体スイッチにつなぎ換え、抵抗を模擬負荷とした。試験には低繰返しの運転で十分なため、30 kV で 1.5 mA の小型低電圧電源を用いた。Figure 3 に試験回路の模式図を、Figure 4 に模負荷で測定した電圧と電流波形を示す。PFN の充電電圧は、通常の運転で使用する 20 kV で電流は 4 kA である。電圧波形から求めた半導体スイッチのスイッチング時間は 200 ナノ秒と SI サイリスタの単体試験で得た値と同じである。抵抗負荷に流れる電流も正常な波形を示す。

4.2 クライストロン負荷

次に半導体スイッチをモジュレータに組み込んで試験運転を行った。ただし半導体スイッチは模擬負荷試験と同じで筐体の外側に置いた。PFN の充電電圧は 25 kV で繰返しは毎秒 10 回である。Figure 5 は、半導体スイッチとサイラトロンをモジュレータスイ

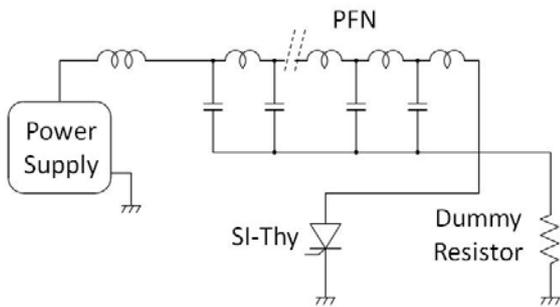


Figure 3: Test circuit for the solid-state switch.

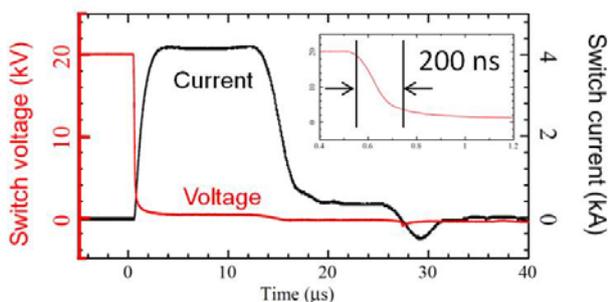


Figure 4: Waveforms of the solid-state switch.

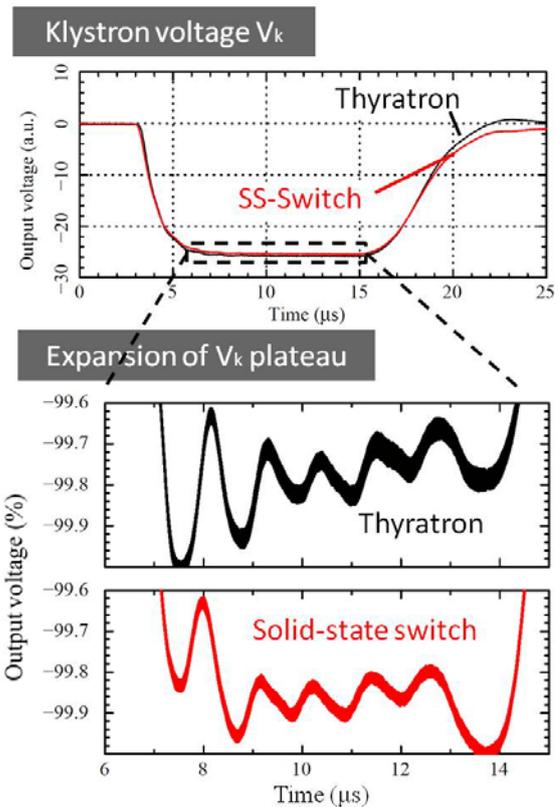


Figure 5: Waveforms of klystron voltage measured with thyatron and solid-state switch. The expansions of the plateau show over-writing of 100 traces.

ッチに使った時のクライストロンにかかる電圧波形を比較する。半導体スイッチの場合、オン抵抗がサイラトロンに比べて高いのでクライストロンにかかる電圧は約 5% 低いですが、Figure 5 ではサイラトロンを使った場合と同じ電圧になるよう設定電圧を高めた。両方の電圧波形はパルス後部の一部を除いて良く一致する。挿入したパルス平坦部の拡大図は、100 パルスを重ね描きしたもので、線の太さはパルス毎の変動を示す。平坦部全部では、サイラトロン波形と半導体スイッチ波形の違いは明確ではないが、後部ではサイラトロン波形の線幅が広い、即ち変動が大きい。

Figure 6 にクライストロン印加電圧のパルス内での平均値からの相対的変動と、同時に測定した出力 RF のパワーのパルス内での平均値からの相対変動と位相の変動を示す。黒線はサイラトロンを使用した場合、赤線は半導体スイッチである。緑線は計測系のノイズレベルを示す。クライストロン電圧の変動は Figure 5 に示すものと同じものである。サイラトロンを使用した場合、前部の 0.017% 程度から後部に向け次第に増大して 0.03% に達する。一方半導体スイッチの場合はパルス内で 0.015% とほぼ一定値を保つ。この変動は計測系のノイズレベル 0.012% よりわずかに大きい程度であり、半導体スイッチを用いた場合のクライストロン電圧の実際の変動は 0.01% 以下で有ると考えられる。これに対して RF パワー

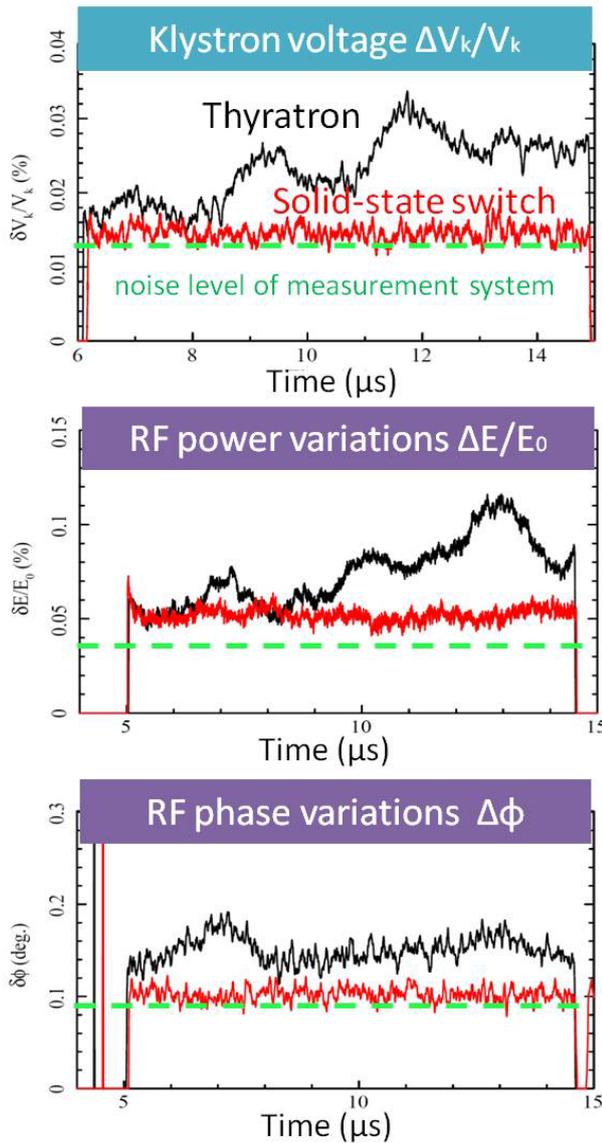


Figure 6: Fractional variations of the klystron voltage and the power and the phase of the output RF in the macropulse measured with thyatron and solid-state switch.

Table 3: Results of klystron test.

	Thyatron	Solid-state switch
Klystron voltage	0.030 %	< 0.015 %
RF power	0.11 %	< 0.05 %
RF phase	0.2 deg.	< 0.1 deg.

の変動は、黒線でサイラトロンの場合、クライストロン電圧変動と同様にパルス後部で増大する。赤線で示す半導体スイッチを用いた時の変動はパルス内ではほぼ一定で 0.05% であるが、計測系のノイズレベルが 0.035% 程度であるので、実際の変動はノイズレ

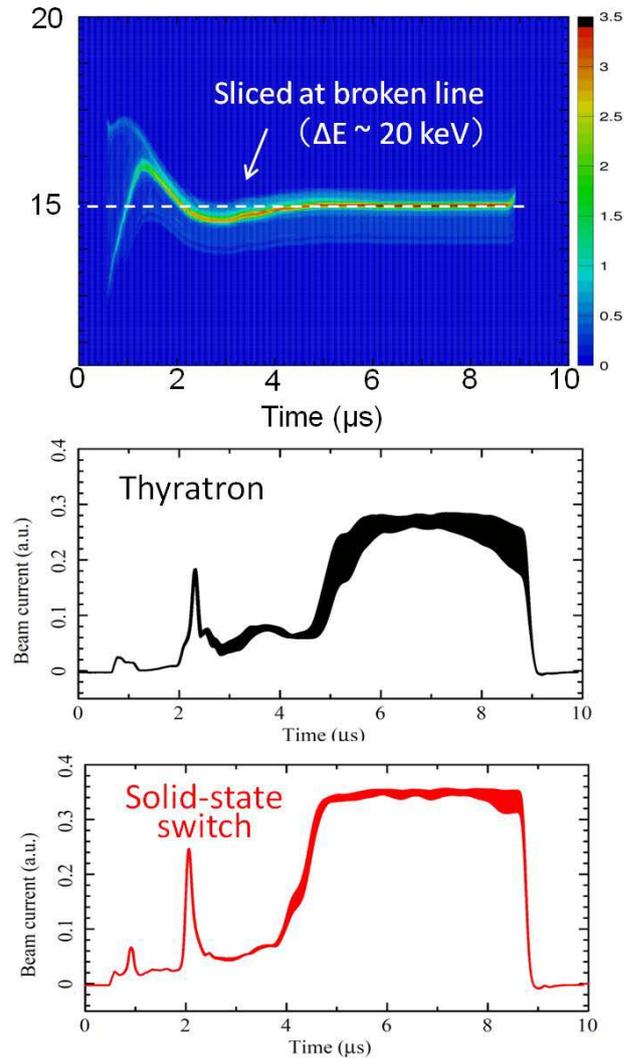


Figure 7: Time-resolved energy spectra and time spectra of energy-sliced intensity with thyatron and solid-state switch for 100 pulses. The thickness of the lines shows intensity fluctuations and it is thinner for the solid-state switch, indicating the electron energy is more stable.

ベル程度ではないかと思われる。位相についても半導体スイッチの場合、計測系のノイズレベルとはほぼ同じ 0.1 度であるため、実際の変動はこれより 1 桁小さいと思われる。

Table 3 に測定結果をまとめる。モジュレータに半導体スイッチを用いた場合、クライストロンで発生する RF パワーと位相の変動は、サイラトロンの場合に比べて大きく減少する。

4.3 ビーム試験

電子ビームを用いた試験では、RF パワーと位相の変動に最も敏感な FEL 用の運転モードを選んだ。この運転モードでは、9.2 ナノ秒間隔の電子バンチが連続して 8 マイクロ秒の電子パルスを構成する。Figure 7 に時間分解エネルギースペクトルを示す。特性のためにエネルギーが変化し、残りの 6 マイク

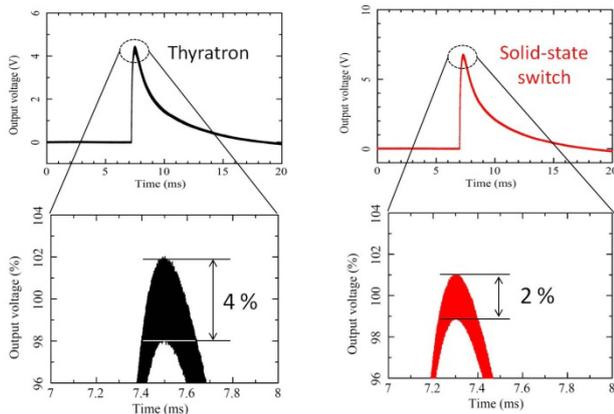


Figure 8: Fluctuations of macropulse energy of FEL at a 100 μm wavelength using electron beams with thyatron and solid-state switch.

ロ秒を FEL 発振に用いる。この時間分解スペクトルに一定になる 15 MeV の強度を切り取り時間の関数として示す。多数のパルスに対する強度を重ね描きしているため、Figure 5 と同様に線の太さはビーム強度の変動を示す。エネルギー分析器の分解能は $\sim 20\text{keV}$ であるが安定な FEL 発振には電子ビームのエネルギー幅がこの範囲にある必要がある。黒線で描くサイラトロンの場合には、ビーム強度の変動が大きい。赤線で示す半導体スイッチでは線幅が格段に狭く、従ってビーム強度変動が小さい。

この電子ビームを用いた FEL のマクロパルスを焦電素子で計測した波形を Figure 9 に示す。焦電素子は、エネルギー検出型の検出器であり、パルス高は FEL マクロパルスのエネルギーに比例する。サイラトロンの場合の強度変動 4%は、最良の状態であるが、半導体スイッチを用いた場合の強度変動 2%はそれより小さく、モジュレータに半導体スイッチを使用した場合の安定性の高さを示す。

5. 結論

阪大産研の L バンドライナック用に SI サイリスタを用いた半導体スイッチを開発、製作した。モジュレータに組み込んで動作試験を行い、立ち上がり時間が 200 ns で、25 kV, 4 kA, 10 Hz の運転に耐え、モジュレータスイッチとして使用できることを確認した。クライストロン電圧変動は 0.015%、RF パワー変動 0.05%、位相変動 0.1 度と、サイラトロン使用時よりも安定度が向上した。電子ビームを加速して FEL の発振試験を行い、ビームと FEL 発振の安定度が格段に向上した。半導体スイッチを日常の運転に使用しているがクライストロン部の放電により半導体スイッチの制御用電源が 1~2 度壊れた程度で長期間の安定性を確認した。