

高電圧用半導体デバイスのスイッチング特性

SWITCHING CHARACTERISTICS OF HIGH VOLTAGE SOLID-STATE SWITCH

近藤 力^{#,A)}, 稲垣 隆宏^{A)}, 米澤 喜幸^{B)}, 道越 久人^{B)}, 福田 憲司^{B)}, 大竹 雄次^{A)}

Chikara Kondo^{#,A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Yoshiyuki Yonezawa^{B)},

Hisato Michikoshi^{B)}, Kenji Fukuda^{B)}, Yuji Otake^{A)}

^{A)} National Institute of RIKEN, SPring-8 Center

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Advanced Power Electronic Research Center.

Abstract

Long-term stability of an RF system is one of the most important issues for a low-emittance and short-pulse linear accelerators using the bunch compression method, like the XFEL, SACLA. A line-type klystron-modulator has a thyatron as a high-voltage switch device, which often has troubles, such as the conduction timing and loss, lowering the stability. In order to solve the troubles, we are developing a semiconductor-based switching module to convert the thyatron that is capable of blocking a 50 kV voltage, and handling a 5 kA current with a 5 μ s pulse width. Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and Tsukuba Power-Electronics Constellations (TPEC) are recently developing various silicon-carbide (SiC) based IGBTs. One of the IGBTs, which is based on technology accomplished by the FIRST project, has suitable features, as parts for the replacement, such as a high blocking voltage, a short switching time, a high handling pulsed-current and a low on-state resistance. In order to estimate the features in pulse operation, we measured IGBT characteristics. The results of its characteristics measurement show the above mentioned values are a high blocking voltage of 10kV, a short switching time of 100-300ns, a pulse handling current of 200A, and a low on-state resistance of 0.67 Ω , respectively. These results indicate that the SiC-IGBT device has sufficient performance, as the parts to convert the thyatron to the semiconductor-based switch comprising the devices of 25 connected in parallel and 5 stacked in series.

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 (SPring-8 Angstrom Compact LAsER, SACLA) では、自己増幅自発放射 (SASE) 方式による X 線自由電子レーザー (XFEL) を発生させ、高強度、短パルス、高コヒーレンス性を利用した放射光実験を行っている[1]。このような利用施設では、安定した X 線レーザーを供給する必要があるため、高周波加速を使用した加速器の安定性の維持や、機器の故障率の低減は重要な課題である。特に加速高周波の位相変動は、オフクレスト加速によるビーム圧縮に影響を及ぼし、それは X 線レーザーの強度変動を引き起こす[2]。そのため、加速 RF 位相には非常に高い安定度が要求されており、これを実現するために、RF 源であるクライストロンを駆動する高電圧パルス電源には高い出力安定性が求められている[2]。

SACLA の大電力 RF 源では、クライストロン用高電圧パルス電源として、ライン型のパルスモジュレータ電源を用いている[3]。この電源では 50kV に充電されたコンデンサの電荷を、サイラトロンによって放電し、ピーク電流 5kA、パルス幅 5 μ s の大電流パルスが発生させている。この出力パルスには、先に述べたように高い安定度が要求されており、電圧に対してはショット毎に 0.01% 以下である。SACLA で使用しているサイラトロンは、通常は安定に動作しているが、経年劣化に伴い、オン抵抗の変動やスイッチング遅延時間の変動などが頻発する

ようになり、その都度、出力パルスに不安定性が生じる。また最近では、2 万時間以上運転しているサイラトロンにおいて、グリッドに数 kV もの高電圧サージが発生しトリガ回路の保護素子を破壊する問題が多発している。これらの問題の低減が、加速器運用での大きな課題となっている[4-6]。そこで我々はサイラトロンに替わる、動作が安定し長寿命の高電圧スイッチの開発を目指しており、これに半導体スイッチング素子を用いる事を考えている。Table 1 にサイラトロン代替スイッチに要求される主なスイッチング特性を示す。

このような高電圧スイッチ用の素子には、高い耐電圧だけでなく、低いオン抵抗、高速なスイッチング速度といったスイッチング特性、更には素子が扱える電力を考慮すると高温時の動作安定性や高い放熱性といった熱特性も要求される。特に耐電圧は、

Table 1: Requirements of Switching Properties to Convert the Thyatron of SACLA to a Semiconductor-based Switching Module

Blocking voltage	50 kV
Peak-current	5 kA
Switching time	< 500 ns
Pulse width	5 μ s (FWHM)
Repetition Rate	1-60 pps
Heat Loss	< 1kW

[#] ckondo@spring8.or.jp

それを高くするとオン抵抗も高くなるというトレードオフの関係があり[7]、両特性を同時に向上させるには限界がある。この限界は物性に依存し、従来のシリコン(Si)系素子では、両特性を大幅に向上させることが困難になってきている。近年では、炭化ケイ素(SiC)などのワイドギャップ半導体を用いた高電圧素子の開発が進んでいる[7]。SiCの物性値は、Siに比べて絶縁破壊電圧が約10倍、飽和電子速度が約3倍と高く、より高い耐電圧で、かつ高速なスイッチングが可能なパワーデバイスが開発されている[8]。このような高電圧スイッチング素子が実用化されると、従来まで耐電圧の低い素子を多数組合せることで要求性能を実現しようとして開発が進められているサイラトロン代替スイッチが、より少数の素子での実現できるようになり、小型化や高効率、故障率の低減などが期待できる。

そこで今回、FIRSTプロジェクトでの成果をベースにして国立研究開発法人 産業技術総合研究所(AIST)、つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC)にて開発された13kV高電圧 n-channel SiC IE-IGBT[9](以下、SiC-IGBT)を、サイラトロン代替のスイッチング素子の候補として注目した。そして、理化学研究所と産業技術総合研究所の共同研究として、この素子のパルス動作におけるスイッチング特性として、特に重要な耐電圧、スイッチング時間、電流耐量、オン抵抗の測定を行った。本報告では、試験概要と結果について述べ、サイラトロン代替に向けた高電圧スイッチの構成素子としての可能性を報告する。

2. 高電圧半導体素子によるサイラトロン代替スイッチ

SACLAのモジュレータ電源では、パルス整形回路(PFN)のコンデンサを最大50kVに充電し、それをサイラトロンのスイッチングによって、パルス幅約5 μ s、ピーク電流5kAの大電流パルスが発生させる[3]。このとき、パルス電流の立ち上がり時間(10-90%)は、0.5-1 μ sである。パルス繰り返し頻度は1-60ppsで運転される。更に、このモジュレータ電源は、内部が絶縁油で満たされ、サイラトロンなどの発熱体の冷却は、この絶縁油の自然対流を利用して行っている。このような自然対流による冷却方式は、メンテナンスフリーなどの利点があるが、冷却機構が比較的大きくなり、冷却能力の強化には冷却機構の大幅な改造が必要となる。そのため、冷却機構の改造が必要無いよう、代替スイッチの熱損失は、サイラトロンの発熱量を下回ることが望まれる。この

Table 2: Principle Specification of IE-IGBT[9]

Blocking Voltage (kV)	13.5 kV
Switching Time (Turn ON: 90%-10%)	78 ns (at 100 °C)
Differential specific on-resistance ($R_{onA_{diff}}$)	13 m $\Omega \cdot$ cm ²

ように、サイラトロンの代替となる半導体スイッチには、電気特性以外にも、低損失であることが強く要望される。

この50kV用高電圧スイッチは、未だスイッチング素子単体での実現は不可能であり、複数のスイッチング素子を組み合わせる必要がある。使用する素子数を少なくできると、構造を簡易にでき、小型化や、故障率の低減などの利点がある。だが、それには、使用する素子に対し高い耐電圧と低いオン抵抗が要求される。このような要求に対し、産総研にて開発中のSiC-IGBTに注目した。Table2にこのSiC-IGBT素子の主要定格を示す。この素子は、従来のSi系のスイッチング素子では困難な13kVという高い耐電圧を持ちながら、約13m $\Omega \cdot$ cm²という非常に低い特性オン抵抗($R_{onA_{diff}}$)が実現されている。また、ターンオン時間も100ns以下が確認されている。一方で、使用電流は直流で5A程度と見込まれているが、これは主に熱損失によって制限されており、電流通過時間がマイクロ秒オーダーの極端に短いパルス動作では熱損失も小さいため、我々はこれ以上の電流耐量を期待した。

そこで、サンプルとして供給されたSiC-IGBT素子を用いて、サイラトロンの動作を模擬できる試験回路にて、耐電圧や、高電圧パルス動作時のスイッチング時間、電流耐量、そしてオン抵抗を測定した。

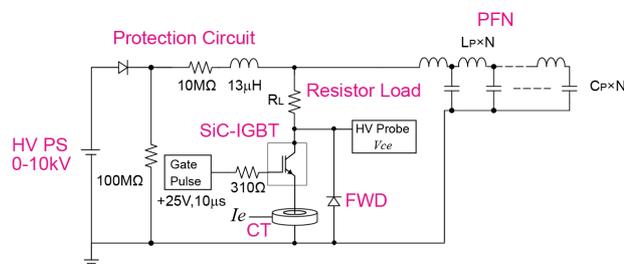


Figure 1: Circuit diagram of a high voltage pulse test for the SiC-IGBT.

Table 3: Circuit Parameters for the Pulse Tests for the SiC-IGBT

Setup mode	Switching test	Large current test
Charging Voltage	0-10 kV	0-10 kV
Output Current	0-200 A	0-500 A
Resistor Load	25 Ω	10 Ω
PFN Capacitance(C_p) /Inductance (L_p)	22.3 nF/14 μ H	22.3 nF/2.2 μ H
Series number of PFN stage	5	12
Pulse width	5.6 μ s	5.4 μ s

3. スイッチング特性試験

3.1 試験セットアップ

我々は、試験供試体である SiC-IGBT のスイッチング特性を測定するため、PFN と負荷抵抗を組み合わせて、モジュレータ電源のパルス出力を模擬できるパルス発生回路を用いた。Figure 1 にその回路図を示す。パルス発生時の SiC-IGBT のコレクタ電圧波形および、エミッタ電流の波形を測定した。このとき、パルス電流は、PFN の充電電圧と、負荷抵抗および PFN の特性インピーダンスの比により決まるため、測定したい電圧および電流範囲に応じて、負荷抵抗や PFN パラメーターを変更する必要がある。また、出力電流パルスが、モジュレータ電源の動作波形に近い矩形パルスとするため、パルス幅を約 5 μ s とし、PFN の特性インピーダンスが負荷抵抗と整合するように PFN のインダクタンスとキャパシタンスを設定した。

使用した回路パラメーターを Table 3 に示す。今回は、10kV での高電圧スイッチング動作の確認やスイッチング時間の評価を行うための回路構成（スイッチング試験）と、電流耐量を評価できるような大電流パルスを発生できる回路構成（大電流試験）にて測定を行った。

なお、この PFN パルス生成回路では、出力パルスは PFN コンデンサが放電し尽くすことで止まるため、SiC-IGBT のターンオフ動作に頼る必要は無い。そのため、SiC-IGBT へのゲート信号のパルス幅 10 μ s 程度の、PFN の出力パルス幅よりも長い信号を加えている。

3.2 高電圧スイッチング特性

まず我々は、SiC-IGBT 素子のスイッチング動作を確認するため、スイッチング試験用の回路構成を用いて、SiC-IGBT 素子のコレクタ電圧波形、エミッタ電流波形を測定した。Figure 2 には、コレクタ電圧波形(上図)と、エミッタ電流波形(下図)を、PFN 充電電圧毎に線色を変えて示す。SiC-IGBT にゲート電圧を印加すると素子がターンオンし、コレクタ電圧が急峻に減少し、パルス電流が負荷抵抗を通じて素子に矩形的に流れる。この結果から 10kV の高電圧印加時でも、急峻な電圧降下や、電流パルス出力が実現できている事が分かる。このとき、スイッチング時間を電圧波形の降下時間(90%-10%)と、電流波形の立ち上がり時間(10%-90%)でそれぞれ定義し、それらをエミッタ電流の関数でプロットした結果を Figure 3 に示す。電圧波形の立ち下がり時間は、電流値が大きくなるほど遅くなることが分かり、エミッタ電流が 200A までの範囲では 100-300ns 程度であった。一方、電流波形の立ち上がり時間は 400-500ns 程度であり、電圧立ち下がり時間よりも長い結果が得られていた。この電流波形の立ち上がりは SiC-IGBT のスイッチング速度だけでなく、PFN 回路や負荷の静電容量やインダクタンスに依存する。そのため、素子のスイッチング時間は、電圧波形の立

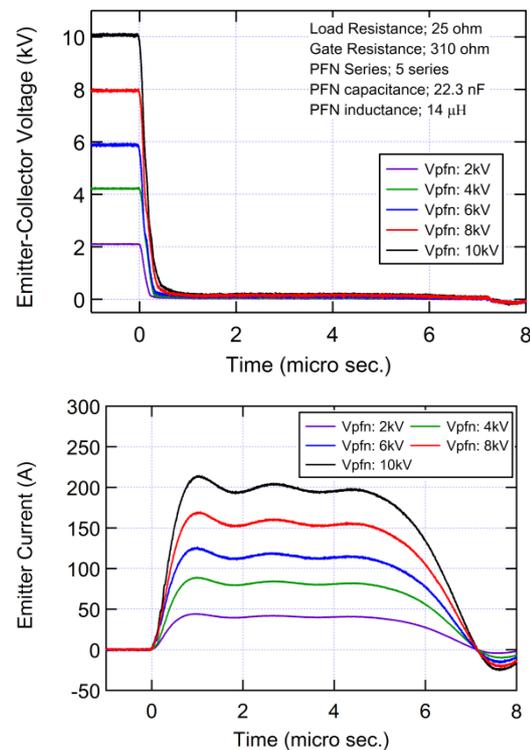


Figure 2: Waveforms of the collector-emitter voltages (upper) and the emitter current (below) of SiC-IGBT. The circuit parameters were the set of the switching test mode, such as shown in Table 3.

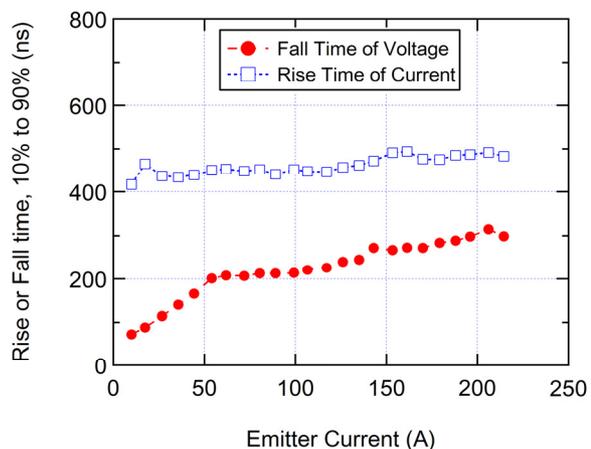


Figure 3: Current dependence of the fall times of the collector-emitter voltage and the rise times of the emitter current pulses.

ち下がり時間のほうが、より直接的に評価できる。

これらの結果から、本素子のスイッチング時間は 100-300ns と見積もられ、これはサイラトロン代替スイッチに要求される 500ns 以下より短く、供試体素子は十分なスイッチング速度を備えていることが分かった。

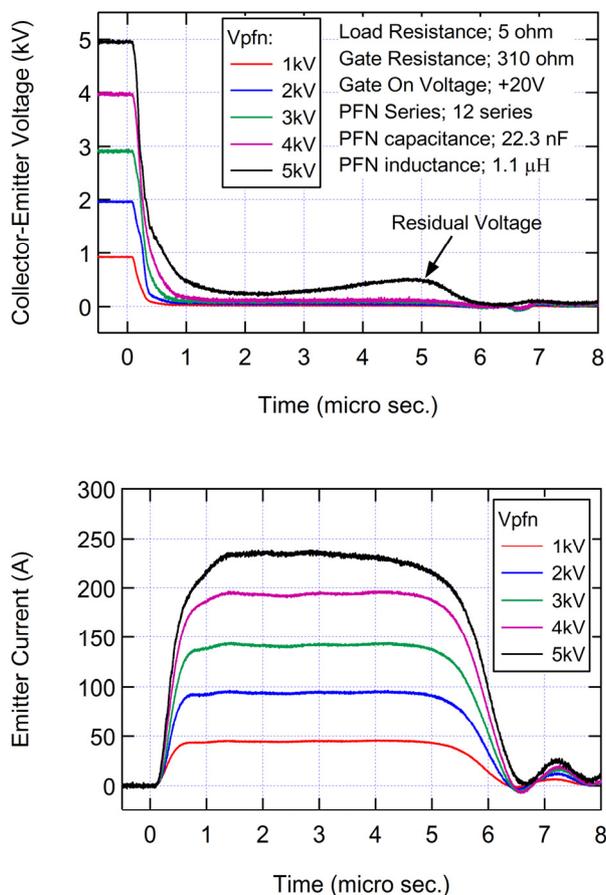


Figure 4: Waveforms of the collector-emitter voltages (upper) and the emitter currents (below). The circuit parameters were the set of the large current test mode, such as shown in Table 3. The residual voltage is shown in the voltage waveform at a 5kV PFN charging voltage (black line).

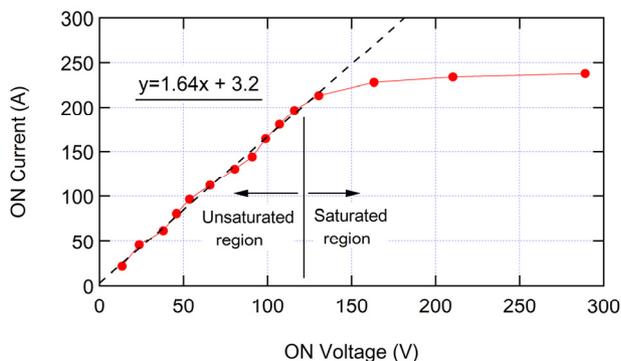


Figure 5: Current-Voltage characteristic in the on-state of the IGBT. The values of the voltages and currents are averaged on the on-states. The dashed line is a linearly fitted curve in the unsaturated region that is indicated in the figure. The on-resistance estimated from the gradient of the fitted line is 0.67Ω .

3.3 I-V 特性およびオン抵抗

我々は、SiC-IGBT 素子の許容パルス電流の上限を確認するため、大電流試験用の回路構成を用いて、パルス波形測定を行った。この時に得られた電圧、電流波形の一部を Figure 4 に示す。先の結果と同様に、ターンオン時に急峻な電圧降下や矩形パルスの出力が見られた。だが、PFN 充電電圧が 5kV 時 (Figure 4 の黒線) のパルス電流が 200A を超える条件では、オン状態において数百ボルトの残留電圧が見られた。これは、オン状態でも抵抗が大きい事を示している。

我々は、オン状態時における電流-電圧特性(I-V 特性)を評価するため、電圧波形と電流波形に対して、ターンオン後 $1.5\mu\text{s}$ から $4\mu\text{s}$ の間の波形平均を行い、その平均値をオン電圧、オン電流とした。その結果を Figure 5 に示す。オン電流が 200A 以下の領域では、オン電流はオン電圧に対して比例的に増加している。だが、200A 以上の領域ではオン電圧が上がっても電流がほとんど増加しない飽和特性が確認された。このような飽和領域では、オン抵抗が大きいために熱損失が急激に増加し、素子を破壊する可能性がある。以上の結果から、SiC-IGBT 素子の通過電流はパルス動作時でも 200A 以下とする必要がある事が言える。実用的な使用電流は、飽和電流に対して余裕をとる必要があり、現時点では 100A 程度を見込んでいる。

オン抵抗を、I-V 特性の線形領域から見積もると約 0.67Ω であった。この結果を基に、サイラトロン代替として想定される運転条件下(100A, 5us の電流パルスを繰り返し 60pps にて動作)における本素子のオン損失を概算すると、約 2.0W と見積もられる。

また、仮にサイラトロン代替スイッチに必要な耐電圧、電流定格を満たすように、本素子を 5 直列 50 並列で構成した場合、スイッチ全体のオン損失は 500W 程度と推定される。この発熱量は、現行のサイラトロンの熱損失の約 1kW(ヒーターを含む)[9]よりも小さい。このことは、素子の放熱機構を小さくできるだけでなく、モジュール電源の冷却機構を現在のままで使用できることを示唆している。

4. まとめ

我々は、寿命の短く、長時間安定性に欠けるサイラトロンに代わる、半導体素子を用いた高電圧スイッチの開発を行っている。今回、このスイッチの構成素子の候補となりうる産業技術総合研究所で開発された SiC-IGBT について、大電力パルス試験を行い、電流耐量、スイッチング時間、またオン抵抗を測定した。その結果、10kV の高電圧印加時においても、電圧立ち下がり時間が 100-300ns の高速なスイッチングが実現できることを確認した。また、パルス動作時の電流耐量は 200A 程度であり、オン抵抗は 0.67Ω であった。これらの結果は、この SiC-

IGB が、サイラトロン代替スイッチに使用できる性能を有していることを示しており、本素子の実用化が大いに期待できる。

謝辞

本研究の一部は、共同研究体「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション (TPEC)」の事業として行われた。本測定を行うにあたり、スプリングエイトサービスの森本理氏に協力してもらい、感謝します。

参考文献

- [1] Hitoshi Tanaka, et al., “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, *Nature Photonics*, 6, 540-544, 2012.
- [2] 田中均, 他, “XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能におよぼす RF 機器変動の影響評価”, 第 4 回加速器学会, 和光, 2007.
- [3] T. Inagaki, et al., “High-gradient C-band linac for a compact x-ray free-electron laser facility”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 17, 080702, 2014.
- [4] 稲垣隆宏, 他, “SACLA 主加速器の運転と保守の状況”, 第 12 回加速器学会, 敦賀, 2015.
- [5] 益田邦和, 他, “SACLA でのサイラトロンのトラブルと対策”, 第 11 回加速器学会, 青森, 2014.
- [6] 中澤伸候, 他, “サイラトロントリガ回路保護用フィルタ回路の導入”, 第 12 回加速器学会, 敦賀, 2015.
- [7] 例えば 大橋弘通, 他, “パワーデバイス”, 丸善, 2012.
- [8] 例えば http://rohms.rohm.com/jp/products/databook/applinote/discrete/sic/common/sic_appli-j.pdf
- [9] K. Fukuda, et al., “Development of Ultrahigh-Voltage SiC Devices”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.62, No.2, 396-404, February 2015.
- [10] J. S. Oh, *Internal information*.