

話 題

粒子加速器用 SiC デバイス開発の最近の進展

福田 憲司^{*1}・辻 崇^{*1,2}・塩見 弘^{*1,3}・水島 智教^{*1,2}
米澤 善幸^{*1}・近藤 力^{*4}・大竹 雄次^{*4}

Recent Progress of Ultrahigh Voltage SiC Devices for Particle Accelerator

Kenji FUKUDA^{*1}, Takashi TSUJI^{*1,2}, Hiromu SHIOMI^{*1,3}, Tomonori MIZUSHIMA^{*1,2}
Yoshiyuki YONEZAWA^{*1}, Chikara KONDO^{*4} and Yuji OTAKE^{*4}

Abstract

Silicon carbide (SiC) is the promising material for next power electronics technology used in the field such as HEV, EV, and railway, electric power infrastructure. SiC enables power devices with low loss to easily operate in an ultrahigh-voltage region because of the high breakdown electric field of SiC. In this paper, we report static and dynamic electric performances of 3300 V class SiC SBDs, IE-MOSFETs, >10 kV PiN diodes and IE-IGBTs. Especially, the electrical characteristics of IE-IGBT with the blocking voltage of 16.5 kV indicate the sufficient ability to convert the thyratron in high power RF system of an accelerator.

1. 諸 言

二酸化炭素などの温室効果ガス排出に伴う地球温暖化は、自然災害の原因となる地球規模での大きな気象変動を引き起こしている。昨年末にパリで開催された COP 21 では、196 ケ国が参加して、2020 年に失効する京都議定書に代わる地球温暖化対策が議論され、最終的に 2020 年以降の地球温暖化対策を定めたパリ協定が採択された。温室効果ガスの削減は、人類が解決すべき大きな課題であり、エネルギーの電力変換効率を向上する必要がある。これまでの電力変換器には、Si パワーデバイスが用いられ、Si パワーデバイスの性能向上に伴い電力変換効率も向上してきた。しかし、最近では Si パワーデバイスの性能向上が飽和してきている。更なる電力変換効率向上のために、Si のパワーデバイスに代わり、炭化珪素 (SiC) を用いたパワーデバイスが低損失デバイスとして注目を集めている。さらに、SiC は物性的な優位性

から 200°C 以上の高温で動作するデバイスや、10 kV 以上の超高耐圧領域で動作するデバイスとしても期待されている。これまでに、SiC の SBD や MOSFET は、自動車、電鉄、家電等の分野における PFC 回路や DC-DC コンバーター、インバーター回路において適用された。その結果、Si-IGBT を用いた場合より、低損失で電力変換効率の向上が可能になるだけでなく、高周波で動作可能であり、パワーエレクトロニクス機器の小型化が可能になることが多くの研究者から報告されている。また、粒子加速器分野でも超高速パルス電源、サイラトロン¹の代替等で SiC デバイスを用いることが検討されている。

本論文では、最初に Si パワーデバイスに対する SiC パワーデバイスの優位点を説明した後に、3300 V 級及び 10 kV 超級の SiC パワーデバイスの静特性、スイッチング特性を紹介する。さらに、加速器用電源のサイラトロンに代わるスイッチングデバイスとして SiC IE-IGBT を検討した結果を

*1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター
Advanced Power Electronics Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
(E-mail: k-fukuda@aist.go.jp)

*2 富士電機株式会社 Fuji Electric Co., Ltd.

*3 住友電気工業株式会社 Sumitomo Electric Industries, Ltd.

*4 国立研究開発法人 理化学研究所 放射光科学総合研究センター RIKEN SPring-8 Center

報告する.

2. SiC デバイスの優位性

表 1 に Si と SiC の主要な物性値とバリガ性能指数の比較を示す. SiC のエネルギーギャップは Si の約 3 倍もあり絶縁破壊電界が約 1 桁大きいので, 通電状態の抵抗 (オン抵抗) を Si パワーデバイスよりも小さくすることが可能である. 具体的には, 図 1 に 3300 V の耐圧の MOSFET を Si と SiC で作製した場合の模式断面図を示して説明する. オン抵抗を下げるためには, ドリフト層の濃度を高くするか, 厚さを薄くする必要があるが, どちらも半導体内部の電界を増加させるので絶縁破壊が低電圧で起こりやすくなる. しかし, SiC の絶縁破壊電界は Si よりも約 1 桁大きいので, SiC-MOSFET のドリフト層の濃度は, Si-MOSFET よりも約 2 桁高く, 厚さは Si-MOSFET よりも約 1 桁薄くすることが可能となり, 理論上は, オン抵抗を約 2 桁下げることができる. しかし, この耐圧領域の Si のパワーデバイスは, 通常, MOSFET ではなく, オン抵抗の低い IGBT が用いられる. 一方, SiC のパワーデバイスでは MOSFET が用いられる. したがって, 通常使わ

れる Si と SiC のパワーデバイスのオン抵抗の差は IGBT と MOSFET のオン抵抗の差になり, MOSFET 同志を比較した場合のように 2 桁にはならない. しかし, SiC-MOSFET のオン抵抗は Si-IGBT のオン抵抗よりも 1 桁程度低く, SiC-MOSFET をパワーエレクトロニクス機器に用いることにより導通損失が低減される. また, MOSFET はユニポーラデバイスであるので, バイポーラデバイスよりも高速でスイッチングが可能である. その結果, スwitching 損失も低減されるだけでなく, 高周波化が可能となるのでリアクトル, コンデンサーが小さくなり, パワーエレクトロニクス機器が小型化される. また, SiC は, エネルギーギャップが Si よりも約 3 倍大きいので高温でも半導体の性質を失わず, 200°C 以上の高温でもスイッチングデバイスとして動作する. したがって, これまでパワーエレクトロニクス機器の冷却のために水冷が必用であったのが, 空冷でも十分になることも大きなメリットである. さらに, SiC の高い絶縁破壊電界は, 10 kV 以上の超高耐圧デバイスを作製することも容易に可能とする. Si では 8 kV 程度のサイリスタが実用化されているが, SiC では, 16 kV の IGBT が報告されている¹⁾. 加速器用電源では 10 kV 以上の超高耐圧デバイスが必要とされているが, この電圧領域の電源の低損失化, 小型化のためには, SiC パワーデバイスは, 最適であると言える.

表 1 Si と SiC の主要な物性値とバリガ性能指数

	Si	SiC	SiC/Si
エネルギーギャップ (eV)	1.12	3.2	2.9
絶縁破壊電界 (V/cm)	3×10^5	2.2×10^6	7.3
電子移動度 (cm^2/Vs)	1450	1000	0.7
熱伝導率 (W/cmK)	1.5	5.0	3.3
バリガ性能指数 ($\epsilon_r \mu_c E_c^3$)	4.1×10^{20}	1100×10^{20}	268

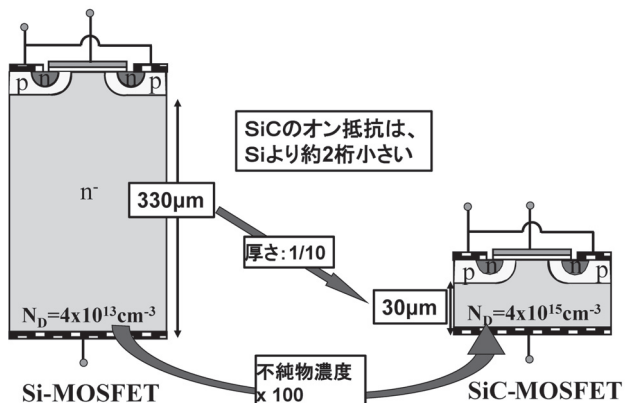


図 1 3300 V Si-MOSFET と SiC-MOSFET のオン抵抗の比較

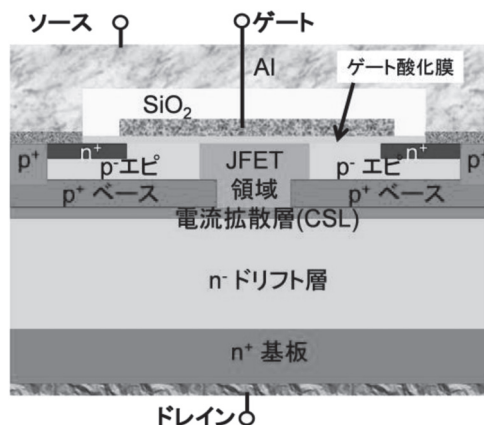


図 2 3300 V IE-MOSFET の模式断面図

base) は、パンチスルー防止のために高濃度の P 型不純物のイオン注入 (Implantation) で形成される。一方、上部 (p⁻ epi) は、低濃度の P 型不純物が含有されたガスをを用いた CVD 法によるエピタキシャル層 (Epitaxial) で形成されており、表面は平滑である。したがって、高チャネル移動度と高信頼性を有するゲート酸化膜を形成できる。この構造は、イオン注入とエピタキシャル層の頭文字をとって IE-MOSFET と呼ばれている。また、p⁺ base の下に電流を拡散する層 (CSL) 層を設けて、電流を流れやすくしてオン抵抗を下げるにより耐圧 4 kV で特性オン抵抗 (R_{onA}) = 11.6 mΩ cm² を達成した。

図 3 に逆方向特性の温度変化を示す。23°C では 3978 V であるが 175°C では 4153 V となり、若干、耐圧が増加する。図 4 に R_{onA} と閾値電圧 (V_{th}) の温度変化を示す。R_{onA} は、温度の上昇と共に増加し、23°C では、11.6 mΩ cm² である、175°C では、33 mΩ cm² になり、約 3 倍になる。一方、V_{th} は、温度の増加と共に減少し、23°C で

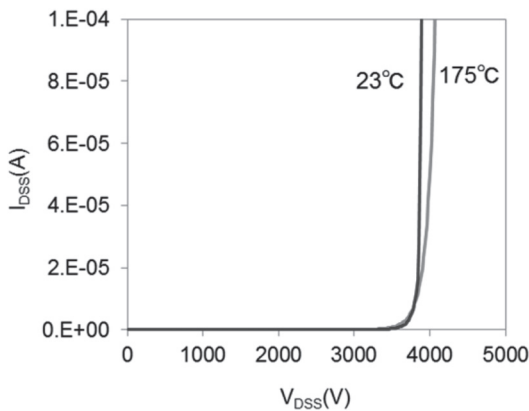


図 3 3300 V IE-MOSFET の逆方向特性

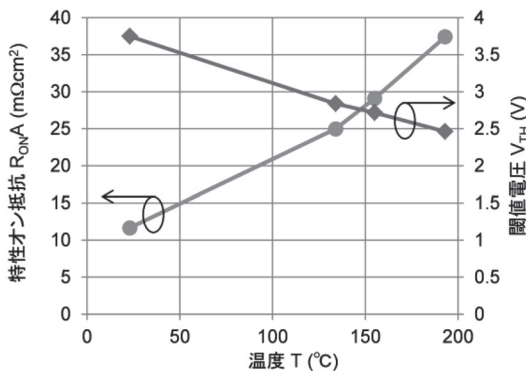


図 4 特性オン抵抗と閾値電圧の温度特性

は 3.8 V であるが 175°C では、2.6 V になる。

しかし、175°C の高温でも閾値電圧は十分に大きく、ノーマリーオフ型デバイスである。動特性については、L 負荷回路においてダブルパルス試験を行った。25°C と 150°C におけるターンオン時とターンオフ時の波形を図 5 と図 6 に示す。試験条件は、V_G=+20 V/-5 V、L=10 mH、R_G=20 Ω、V_{CC}=1700 V、I_{DS}=4.3 A である。立ち上がり時間は、25°C で 55 ns、150°C で 41 ns、立ち下り時間は、25°C で 56 ns、150°C で 60 ns である。これらの現象は、図 4 に示すように高温での閾値電圧の低下に起因していると考えられる。

図 7 にアバランシェ耐量試験における破壊前後のゲート電圧、ドレイン電圧及びドレイン電流の波形を示す。アバランシェ・エネルギーは、

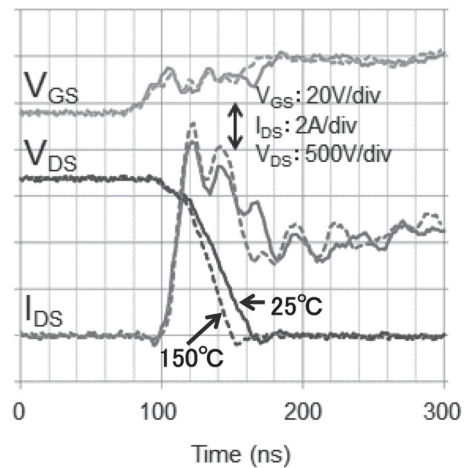


図 5 ターンオン時の波形 (実線: 25°C, 点線: 150°C)

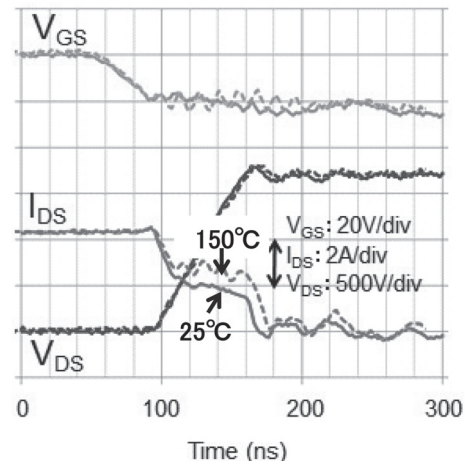


図 6 ターンオフ時の波形 (実線: 25°C, 点線: 150°C)

4639 mJ/cm²であり, Si-IGBT と比較して十分に高い. 図 8 に 3300 V 級 SiC-SBD の順方向特性を示す. 室温での V_f は 1.8 V @ 100 A/cm² であり, 温度の上昇と共に増加する. 200°C では, 4.1 V である. 一方, 逆方向特性の温度変化を図 9 に示す. アバランシェ耐圧は室温で 4020 V あり, 温度の上昇と共に増加し, 200°C で 4190 V に達す

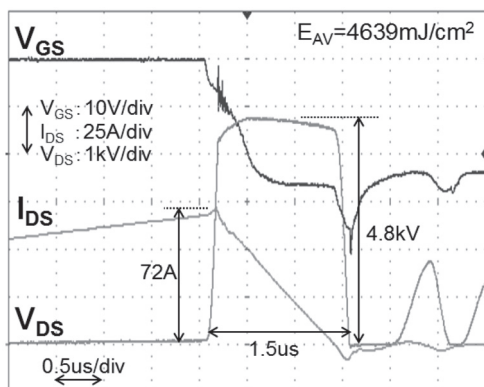


図 7 アバランシェ耐量試験におけるゲート電圧 (V_{GS}), ドレイン電圧 (V_{DS}), ドレイン電流 (I_{DS}) の波形

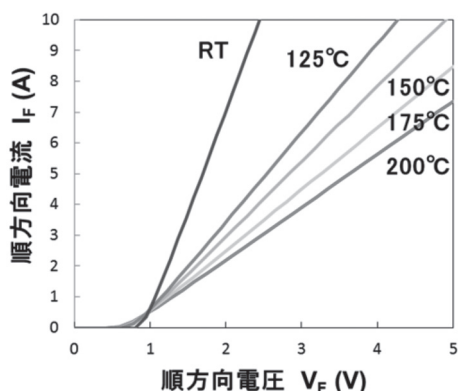


図 8 SBD の順方向特性の温度変化

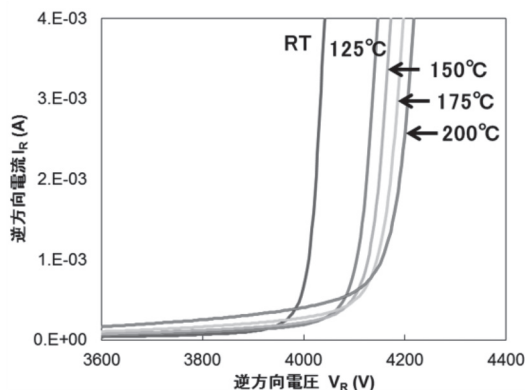


図 9 SBD の逆方向特性の温度変化

るので, 200°C の高温においても 3300 V 級の SiC-SBD として十分に使用することが可能である. また, L 負荷回路におけるアバランシェ耐量は, 6300 mJ/cm² であり, SBD においても十分に高い.

4. 10kV 超 SiC PiN ダイオード, IE-IGBT¹⁾

図 10 に 13 kV 級 SiC-PiN ダイオードの模式断面図を示す. SiC のパワーデバイスでは, 耐圧を持たせるために SiC 基板の上にドリフト層として n 型の低濃度層を形成する必要がある. 1200 V 級なら 10 μm 程度であるが, 13 kV 級では, 高耐圧を得るために非常に低い濃度 (5×10¹⁴ cm⁻³) で厚い (120 μm) ドリフト層を形成しなくてはならず, 高コストの原因となっている.

終端構造はメサ JTE (JTE1 と JTE2) により形成されている. また, 上部の P 型のアノード層はエピタキシャル層で形成されており, 欠陥の少ない良好な PN 接合が可能な構造になっている. 試作された PiN ダイオードの室温での逆方向特性の測定結果 (図 11) は, 13.7 kV の耐圧達成を示している. 図 12 に PiN ダイオードの順方向特性の温度変化を示す. チップサイズは 8 mm □ である. 室温では, 100 A/cm² において V_f=5 V であるが, 温度の上昇につれて V_f は減少し, 250°C では 4 V になる. アノード層を形成する P 型不純物は, 活性化率が大きいのでアルミニウムが用いられている. アルミニウムのイオン化エネルギーが大きいために室温では正孔密度が低くなり, 電流値が小さく V_f が大きい. 一方,

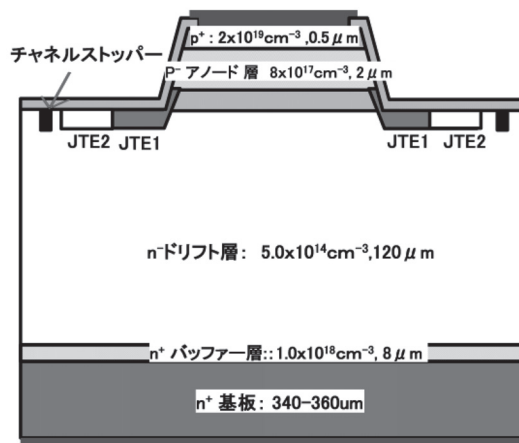


図 10 SiC-PiN ダイオードの模式断面図

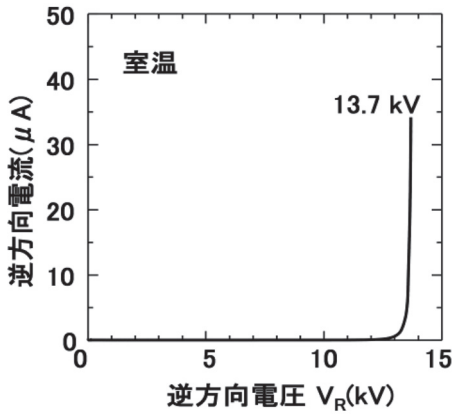


図 11 PiN ダイオードの逆方向特性

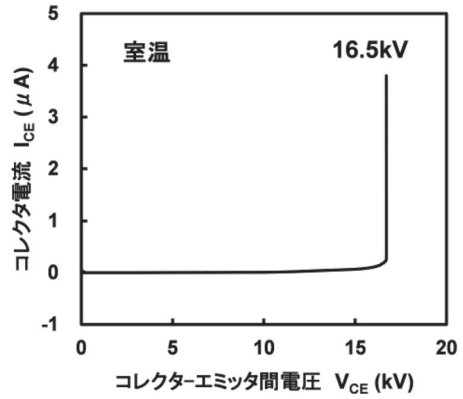


図 14 IE-IGBT の耐圧特性 (チップサイズ: 5.3 mm □)

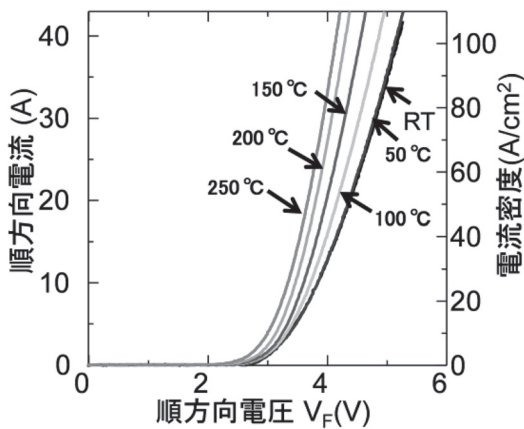


図 12 PiN ダイオードの順方向特性の温度変化

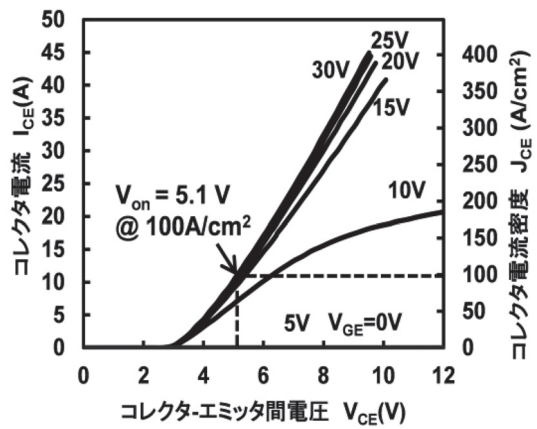


図 15 IE-IGBT の順方向特性 (チップサイズ: 5.3 mm □)

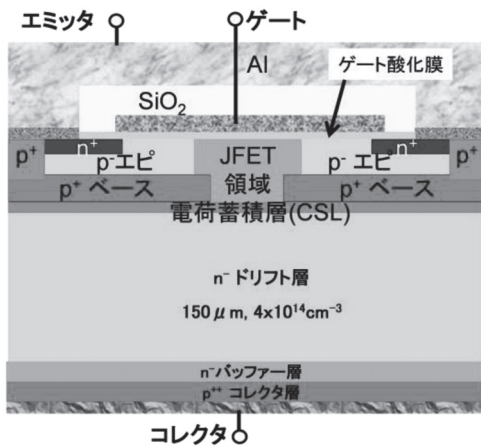


図 13 16 kV 級 IE-IGBT の模式断面図

高温では正孔が増加する。また、キャリアライフタイムが長くなるので電流値が増加することにより V_f が減少する。

図 13 に試作された IE-IGBT の模式断面図を示

す。先に紹介した 3300 V 級の IE-MOSFET の底部の N 型基板が P 型のコレクタ層になる以外は、IE-MOSFET と基本的な構造は同じである。ただし、16 kV の耐圧を得るためにドリフト層は $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ と低濃度でありながら、150 μm もの厚いエピタキシャル層で形成する必要がある。図 14 に示すように室温でのアバランシェ耐圧は、16.5 kV である。一方、試作されたチップサイズ 5.3 mm □ の IE-IGBT の順方向特性を図 15 に示す。図から分かるように、ゲート電圧が閾値電圧以上ならばドレイン電圧 = 0 V 近傍から電流が流れ始めるユニポーラデバイスの MOSFET と異なり、バイポーラデバイスの IE-IGBT では、ゲート電圧が閾値電圧以上でも $V_{CE} = 0 \text{ V}$ 近傍では抵抗が大きく電流は流れない。 V_{CE} が SiC の PN 接合のビルト・イン電圧 (約 3 V) を超えたところで電流が流れ始め、伝導度変調により抵抗が大幅に下がる。試作された IE-IGBT のオン電圧は 5.1 V

(@ 100 A/cm², V_g ≥ 20 V) である。

5. IE-IGBT による加速器用大電力パルス電源のサイラトロン⁴⁾の代替の可能性

国立研究開発法人 理化学研究所 (理研) 放射光科学総合研究センターは, SACLA (Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser, X 線自由電子レーザー施設) における大電力パルス生成時のスイッチングをサイラトロンで行っている。サイラトロンは, 高耐圧, 大電流耐量等の優れた特性を示すが, 自己導通, オン抵抗の増大, サージ電圧による保護素子の破壊等の問題が指摘されており, 長期信頼性のある半導体素子へ代替が望まれている。国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (産総研) と理研は, 超高耐圧 SiC デバイスの加速器電源への応用技術に関する共同研究を実施している。ここでは, ライン型モジュレータ電源の回路図 (図 16) に丸で示されたサイラトロン⁴⁾の代替として検討している SiC IE-IGBT のパルス試験結果を紹介する。図 17 に試験に用いられたパルス形成回路 (Pulse Forming Network (PFN) 回路) を示す。また, 試験用の SiC IE-IGBT が搭載されたパッケージの全体を写真 1 に示す。SiC IE-IGBT は, 10 kV 以上の耐圧を有する金属接合絶縁基板上に半田で固定され, ゲート電極, ソース電極には Al 線がボンディングされている。SiC IE-IGBT と Al 線は 10 kV 超の高電圧用の封止材で覆われている。

高電圧スイッチング時のパルス出力の電圧波形 (図 18), 電流波形 (図 19) とスイッチング時間を測定した。10 kV までの高電圧下でスイッチングによる急峻な電圧降下及びパルス電流の出力が

可能であることがわかる。また, 電圧の立ち下り時間 (10% -90%) から算出したスイッチング時間は, エミッタ電流にも依存するが, 100 ns から 300 ns であった。次に, パルス電流耐量と SiC IE-IGBT のオン抵抗を測定した。パルス電流 200 A までは, 高速スイッチングを確認できたが, 200 A 以上では電圧波形の立ち上がりに瘤がで, 通電状態の電圧波形に残留電圧が発生した。したがって, パルス電流耐量は 200 A 未満と判断される。パルス測定により, 電流対電圧測定を行った。トリガ後 1 μs から 4 μs の電流, 電圧波形を平均して電圧と電流を決定した。200 A までは電流は電圧に対して直線的に増加するが, それ以上の電圧では, 電流が増加せず, 飽和領域になる。線型領域から算出されるオン抵抗は約 0.67 Ω である。

表 2 にサイラトロンを代替するスイッチデバイス

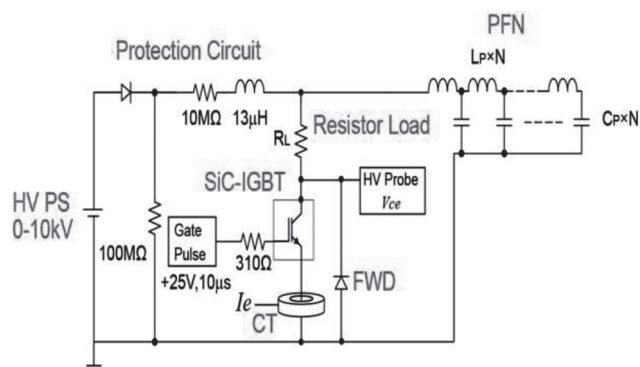


図 17 試験に用いられたパルス形成回路 (Pulse Forming Network (PFN) 回路)

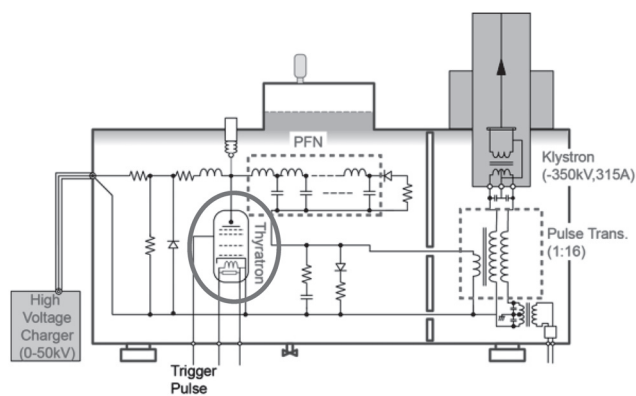


図 16 ライン型モジュレータ電源回路図

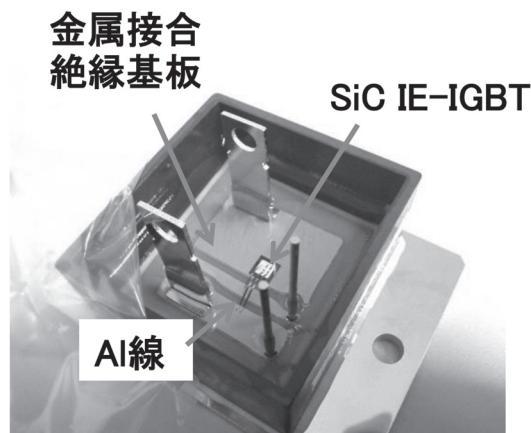


写真 1 試験に用いられた SiC IE-IGBT を搭載した超高耐圧用パッケージ

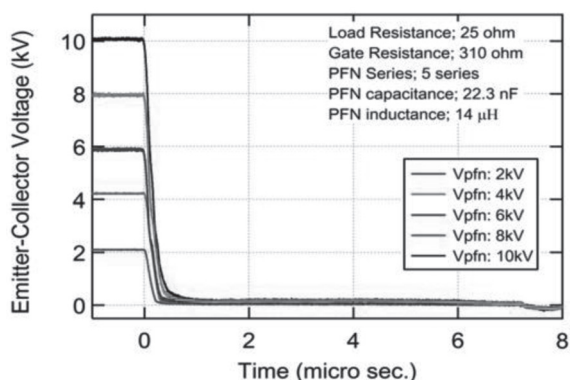


図 18 PFN 回路のパルス出力の電圧波形

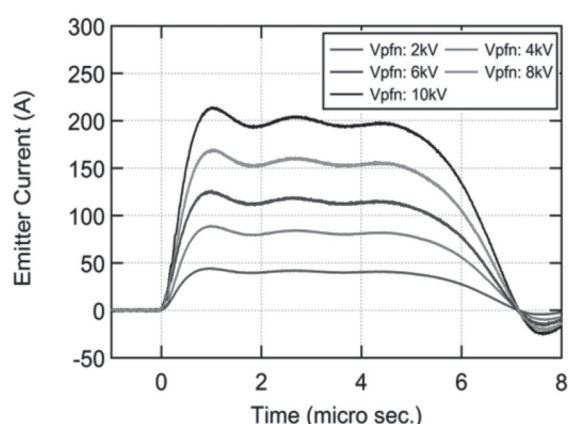


図 19 PFN 回路のパルス出力の電流波形

表 2 サイラトロン代替デバイスへの要求仕様

阻止電圧	50 kV
ピーク電流	50 kA
スイッチング時間	<500 ns
繰り返し時間	1-60 pps
熱損失	<1 kW

に要求される性能を示す。ピーク電流は 5 kA と大電流であり、超高電圧を印加するために 50 kV の耐電圧が要求される。また、熱損失は 1 kW 以下と低損失であることが要求される。これらのサイラトロンの代替要求仕様を満たすための SiC IE-IGBT の構成案は 3 直列 50 並列となる。この構成が可能であれば、耐電圧は 49.5 kV で、パルス電流耐量は 10 kA で、オン抵抗は 40.2 mΩ となり、動作時 (5 kA, 5 μs, 60 pps) の損失は

302 W となり目標とする 1 kW の約 1/3 にすることが可能となる。しかし、そのためには多並列接続を可能とする超高耐圧で大電流用モジュールを開発しなくてはならない。また、SiC IE-IGBT においても、実用化のためには電気特性の長期信頼性の確保や量産技術の確立など解決しなくてはならない課題は多いが、今回の PFN 回路でのパルス試験結果は、SiC IE-IGBT をサイラトロンの代替として用いることが十分可能であることを示している。

6. ま と め

SiC は、報告したように低損失、超高耐圧、高温耐用デバイスを実現するのに優れた材料である。3300 V 級の SiC デバイスは、新幹線への適応例が報告されているが、加速器電源にも適用可能であり、産総研、大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構、理研の 3 機関は共同研究を実施しており、その成果についても報告できるであろう。また、サイラトロンに代わるデバイスとして 10 kV 以上の SiC IE-IGBT を使うことが可能であることを示すことができた。10 kV 以上の SiC バイポーラデバイスは、まだ要素技術開発の段階であるが、国家プロジェクトで開発が進んでおり、近い将来に実用化できることが期待されている。

7. 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。

参考文献

- 1) K. Fukuda et al., IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 62, No. 2, pp. 396-404 (2015).
- 2) T. Tsuji et al., to be published in Mater. Sci. Forum (2016).
- 3) H. Shiomi et al., to be published in Mater. Sci. Forum (2016).
- 4) 近藤 力等, ポスター発表, 日本加速器学会年会 (2015).