

SiCパワーデバイスを用いた革命的応用研究 ～SiC応用で明るい未来を～

大阪大学大学院工学研究科

SiC応用技術共同研究講座 招へい教授

中村 孝

大阪大学大学院工学研究科

電気電子情報工学専攻 教授

舟木 剛

■はじめに

エネルギーの有効利用のための省電力デバイスとしてSiC（炭化ケイ素）パワーデバイスが注目されている。SiCを用いたパワーデバイスは、低オン抵抗、高耐圧、高速スイッチング、加えて高温動作も実現できる。また、スイッチング損が小さいことや容量が小さいことなどよりSiに比べて高周波動作が可能となり、周辺機器の小型化などにも期待されている。主な応用先としては、EV/HEVや電車などの移動体のインバータシステム、太陽光発電など再生可能エネルギーのパワコン、各種電源回路などである。これらの応用はSiパワーデバイスの進化により高性能化されてきたもので、SiデバイスをSiCパワーデバイスに置き換えることによりさらなる高性能化を目指す応用である。これらの応用が今後のSiCパワーデバイス市場をけん引していくという事は間違いない。しかし、これまでSiパワーデバイスでは成し得なかった応用もある。そのような応用は、現在に至るまで真空管などの従来技術を応用している。そのような応用もSiCパ

ワーデバイスを用いることで進化が可能になる場合がある。また、使用方法やシステムを変えることによりSiCの特徴を最大限に引き出す「SiC特有」の応用により、これまでは世の中になかったような製品の創出も可能となる。

SiC応用技術共同研究講座は福島SiC応用技研株式会社の支援のもと、そのような「SiC特有」の応用について研究開発を行い、これまで成し得なかった「革命的」な応用・市場形成を目標にしている。

■SiCパワーデバイスの特性

SiCは半導体材料として優れた材料物性を持ち、特にバンドギャップが広い（ワイドバンドギャップ）ことにより、優れた高絶縁破壊電界・高温安定動作を有する（図1）。そのため、高電圧を扱うパワー半導体としてその特性が発揮できる。絶縁破壊電界が高いことより同耐圧のSiと比較してドリフト層（活性層）を薄くすることが出来る。大電力パワーデバイスは縦型デバイスが主流で、電流は基板を厚さ方向に縦断して流れるため、抵抗の大き

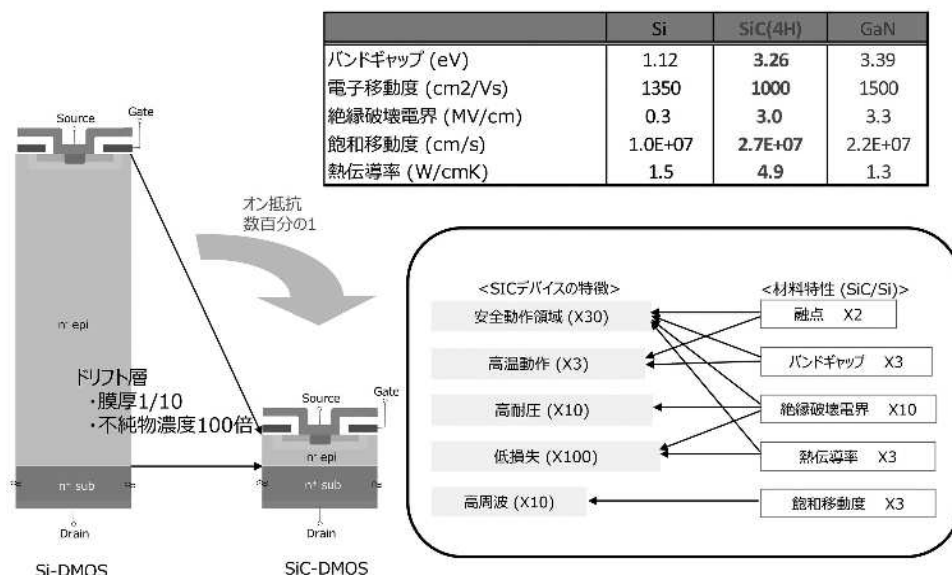


図1. SiCの優れた材料物性

いドリフト層が薄くなるとデバイスの抵抗を低減することが可能となる。さらに、キャリア密度（ドリフト層中の不純物密度）を大きくできるため、理論的には同耐圧・同構造のSiデバイスと比較して数百分の1の抵抗低減が実現できる。そのため、パワーデバイスとしてSiCを用いることにより導通損失が大幅に低減できる。逆に、同じ抵抗のSiデバイスと比較すると飛躍的な高電圧化が可能になる。

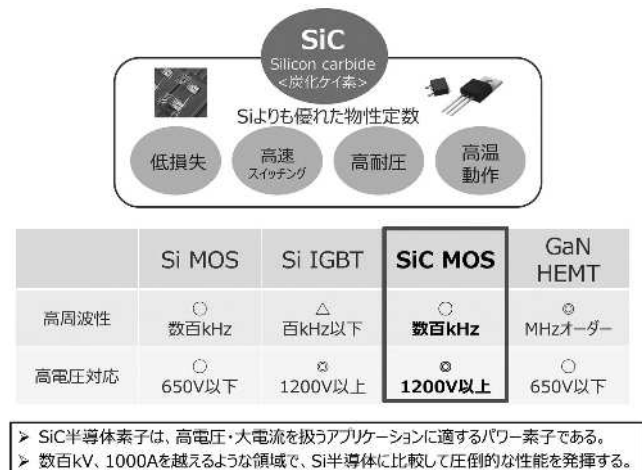


図2. SiCパワーデバイスと他の半導体材料を用いたパワーデバイスの性能比較

また、SiCパワーデバイスの大きな特徴として高速動作が挙げられる。SiCを用いてSi MOSFETと同性能のデバイスを作製するとチップ面積が10分の1以下に低減できる。そのためチップ容量（キャパシタンス）が小さくなり高速動作が可能になる。近年、大電流用途では主流に用いられておるIGBTは、抵抗は低減できているがバイポーラ構造を利用するためスイッチング速度が遅くなってしまう。また、ダイオードにおいてもSiCによる高速化・低損失化が期待できる。通常パワーデバイスとして用いられているダイオードはPN接合を用いている（PINダイオード）。PN接合を用いたダイオードは、オフ時にPN接合に蓄積されたキャリアを吐き出すため逆方向に電流が流れてしまう（リカバリー電流または逆回復電流）。そのため、スイッチング損失が大きくなり高周波動作は難しい。SiCはバンドギャップが大きい為、高電圧ダイオードもSBD（ショットキーバリアダイオード）構造を用いることが出来る。SBDはユニポーラ素子でPN接合を用いないため、前述のようなリカバリー電流は発生せずスイッチング損失を低減でき、高周波動作が可能になる。図2にSiCパワーデバイスと他の半導体材料を用いたパワーデバイスの性能比較を示す。このように、SiCデバイスは「低損失」「高速スイッチング」「高耐圧」、さらにはバンドギャッ

プが広いことによる「高温動作」が可能になる。

■超高電圧機器作製技術

前述のようにSiCパワーデバイスは高電圧応用に対して大きな優位性を示すことが出来る。そのため、1kV以上の耐電圧が要求される製品が応用ターゲットとなっている。現状市場で出回っているSiCパワーデバイスの耐電圧は1.7kV以下で、3.3kVが出始めたところである。さらに高い電圧での使用要求も高い。Siデバイスを使った超高電圧用途ではマルチレベル回路やチャージポンプにより電圧を積み上げて高電圧を得る場合が多い。しかし、この方法では「高速スイッチ」は出来なく、SiCの優位性が活かしにくくなる。実際、超高電圧高速パルス発生に関しては現在でも真空管を用いている場合が多い。そこで、本講座ではSiCパワーデバイスを直列接続して高電圧を発生する開発を行っている。図3のようにMOSFETを直並列に接続し、所望の電圧・電流を発生できるシステムである。構造は単純であるが、すべてのFETを同時にON、OFFすることは難しく、特に直列接続された素子間は電圧バランスが崩れてしまい特定の素子に高電圧がかかって素子破壊してしまう。電圧バランスを取るためにコンデンサなどのバランス素子を挿入する方法が一般的であるが、そのインピーダンスのために動作が鈍くなりSiCの優位性である「高速スイッチ」が損なわれてしまう。本講座では、SiCの優位性を保ったまま直列接続による高電圧回路を得るために、個体差などによる遅延やインピーダンスの差を考慮してすべてのFETのゲートを同時にON、OFFする技術を開発している。そのような緻密な制御により電圧バランスを崩さずにすべてのFETを同時にスイッチングできることを確認している。

FETを直列接続した高電圧パルス発生器はすでに市販されている。しかし、これらは主にディスクリート部品

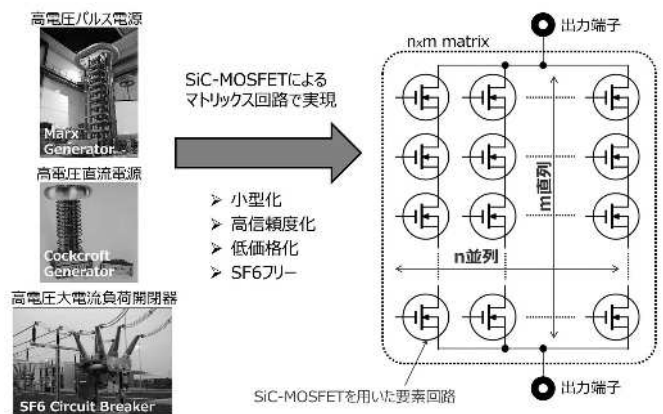


図3. SiC MOSFETを用いた高電圧・大電力スイッチング技術

を並べて構成している。多数のFETを使用するため放熱板を用いると膨大な容積になるため十分な放熱は出来ない場合が多い。パルス幅が短くデューティ比が小さい場合は消費電力が小さいため高電圧や大電流パルスを発生させることは可能であるが、パルス幅が長くなったりデューティ比が大きくなると消費電力が大きくなり素子が熱破壊してしまう。ましてや直流を扱いたい場合はごく小電流しか流せない。そこで、これらの問題を解決するために図4に示すように半導体チップを絶縁された基板上に直接接合しチップを直接冷却できる構造を採用している。この技術により高電圧パルスのパルス幅やデューティ比を大きく取れるだけでなく、大きな直流電流も扱えるようになる。

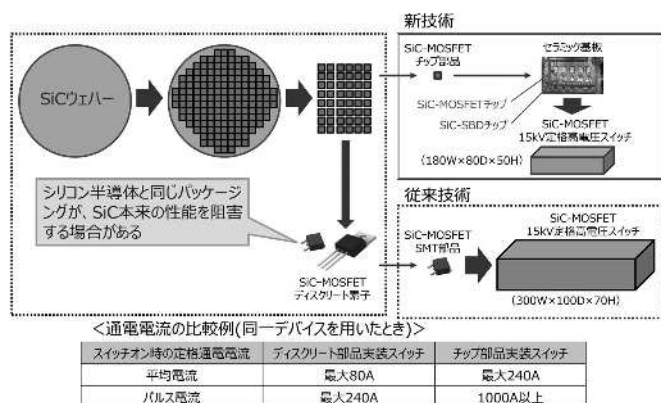


図4. チップ直接実装技術

■SiCパワーデバイスの特長を活かした応用

このようにSiCパワーデバイスは高電圧かつ高速性を必要とする応用に最も適していると言える。当然、現状でターゲットになっている主な応用もその特性を活かしたものであるが、我々はSiでは実現が難しい、またはSiCを使う事により飛躍的に特性が向上するような「革命的」な応用を研究開発している。まだ、設立して日が浅い講座であるため、支援元である福島SiC応用技研株式会社での応用例についていくつか紹介する。

□高電圧パルス発生器

超高速にゲートをコントロールすることにより、SiC MOSFETの直列多接続回路を安定に動作させる事に成功。この技術により単体のFETの耐圧が低くても超高電圧のパルスを発生することが可能となる。SiC MOSFETはIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) のようにビルトインによるオフセット電圧を持たないので、直列動作をさせても動作電圧の増大が生じない。SiC MOSFETの適用により数100kVの電圧パルスが発生可能となり、

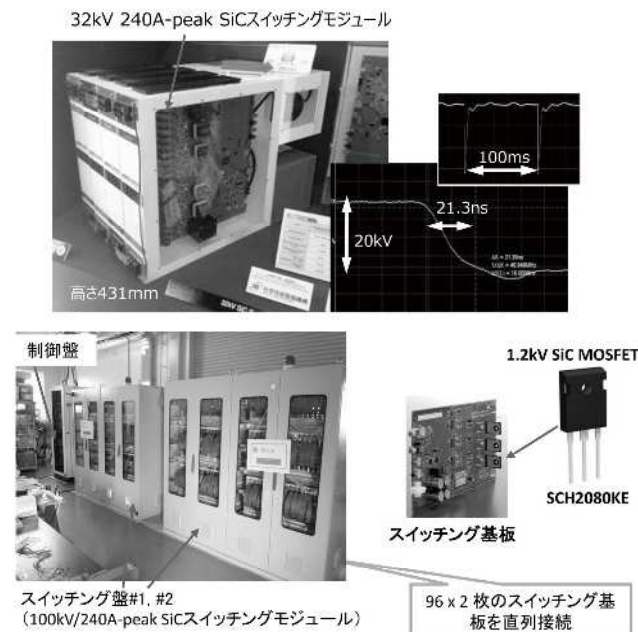


図5. 高耐圧・高速SiCパルス発生器

その立ち上がり速度は数10nsと従来のSiを用いたパルス電源より桁違いで高速化できる。図6には32kV定格の高電圧パルス発生器と20kVで動作させたときの波形を示と、1.2kV SiC MOSFET (3素子並列) スwitchングボードを96枚直列接続させた100kV高電圧パルス発生器を示す。100kV以上のパルスを数10nsで立ち上げることが可能なため、半導体では不可能で真空管などを用いている応用をこのSiCパルス発生器で置き換えることも可能となる。

□LLC直列共振型DC/DCコンバータ

LLC共振回路は周波数を高くすることにより高性能・小型化が期待できる回路である。低耐圧回路ではSiを用いて一般的に用いられている回路である。しかし、高電圧になると電力を得るにはIGBTを使わざるを得なくなり、IGBTはスイッチング高周波を高くすることが出来ないため、かえって損失が大きくなってしまふ。そのため、高電圧分野においてはLLC共振型のコンバータはほとんど

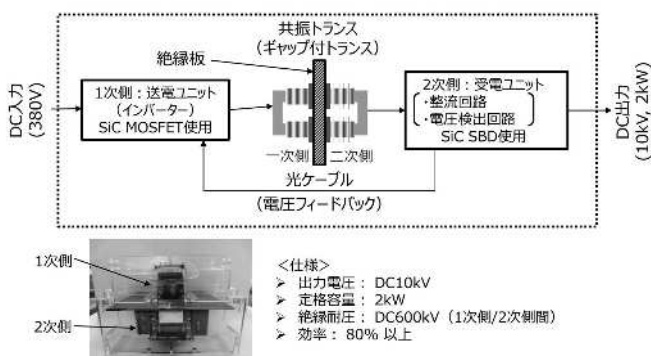


図6. 共振型超高耐圧SiC DC/DCコンバータ

用いられていない。SiCは高電圧動作においても高周波動作が可能で低損失であるため、高電圧・大電力のLLC共振コンバータが高効率で実現可能となる。同等の電力であれば、Si IGBTを用いたブリッジ型コンバータに比べ1/3から1/4の小型化が実現し、効率も高くできる。

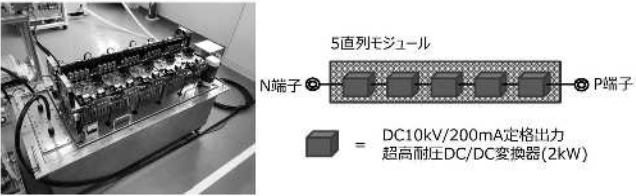


図7. 50kV,10kWDC/DCコンバータ

LLC直列共振回路を用いて作製した超高耐圧DC/DCコンバータの概念図と写真を図6に示す。1台は10kV（2kW）であるが、直列接続して超高電圧コンバータとするために600kVの絶縁性能を保持している。それにもかかわらず変換効率は80%以上と高効率を実現している（通常のコッククロフトを用いた同電力コンバータは50%前後）。1次側（送信側）のインバータにはSiC MOSFETを2次側（受信側）の整流回路にはSiC SBDをそれぞれ用いており、内部周波数は70～90kHzという高速スイッチングを行っている（最適周波数は共振条件により決まる）。このコンバータを直列接続することにより、さらなる高電圧・大電力化が実現できる。図7の写真は5台のコンバータを直列接続して50kV（10kW）のコンバータを実現している。

□SiC-BNCT：がん治療装置への応用

BNCT（ホウ素中性子捕捉療法：Boron Neutron Capture Therapy）は粒子線がん治療装置の一種で中性子を照射する療法である。ここでは原理の詳細は省略する

が、ホウ素製剤をがん細胞に選択的に集積させ、熱中性子を照射することで正常細胞にあまり損傷を与えずにがん細胞だけ破壊する療法である（図8）。

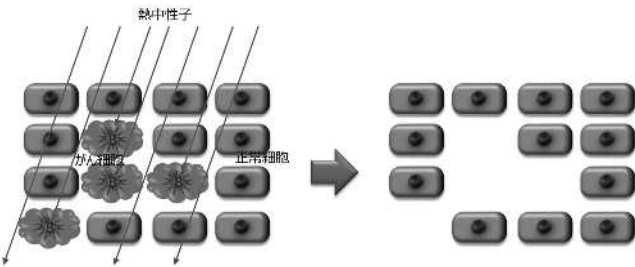


図8. BNCTの原理

BNCTはかつて原子炉を利用した中性子を用いて治験をおこなっていたが、サイクロトロンやRF線形加速器を用いた装置が提案され病院にも設置できるようになり、国内でも数カ所に導入され実用化を目指している。しかし、いずれの方式も分厚い遮蔽が必要になるなど、コスト、スペースに関しての導入ハードルはまだ高い。線形加速器は半導体化させておらず、非常に高価で寿命に問題がある真空管（サイラトロン）が用いられている。

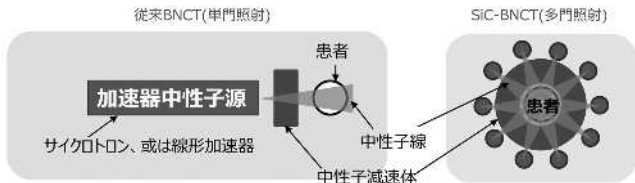


図9. 多門照射BNCT

福島SiC応用技研株式会社では、前述のSiCを用いた電源を採用することにより直流大電流電源がコンパクトに実現するため、これまでには無かった方式である多門照射によるBNCT治療器を提案している（図9）。加速器が小さくなることにより多方向より中性子を照射すること

項目		x線（IMRT）	陽子線	重粒子線	SiC-BNCT
がん細胞を破壊する放射線	種類	光子	粒子線（ ¹ H）	粒子線（ ¹² C）	粒子線（ ⁴ He、 ⁷ Li）※1
	破壊力	1	1.1	3	3
照射回数と治療期間	頭頸部腫瘍	30～40回（6～8週間）	26～39回（5～8週間）	16回（4週間）	16回（4週間）※2
	脾臓がん	25～30回（5～6週間）	20～28回（4～6週間）	8～12回（2～3週間）	8～12回（2～3週間）※2
コンピュータ技術を駆使した高精度なビーム及び患者位置制御機能		要	要	要	不要
広範囲にわたる微小浸潤がんの治療		不可	不可	不可	可
患部周辺臓器への被ばく量		高	中	中	低

※1 腫瘍組織に取り込まれたホウ素薬剤内の¹⁰B原子核と中性子線との核反応により発生した二次粒子線。
※2 既存ホウ素薬剤を適用した場合の目安となる照射回数です。今後、更に腫瘍集積性の高いホウ素薬剤を開発することで、照射回数及び治療期間の削減を図って参ります。

図10. 従来の放射線がん治療装置とSiC-BNCTの比較表（技術面）

項目		x線 (IMRT)	陽子線※1	重粒子線※1	SiC-BNCT
設備 導入費用 (初期費用)	治療装置	5～10億円	50億円	90億円	10～15億円
	建屋	既存建屋に収納可能	20億円	35億円	既存建屋に収納可能
	総計	5～10億円	70億円	125億円	10～15億円
年間光熱費 (治療装置の消費電力)		0.1億円未満 (100kW未満)	1億円 (1000kW)	2.5億円 (3000kW)	0.1億円 (150kW)
年間維持費		0.1億円未満	3.5億円	5億円	0.1億円
年間人件費		1億円	1.5億円	2.5億円	1億円
年間治療人数		150人	350人	600人	200人
患者一人当たり治療費		150万円 (患者負担：1～3割)	284万円	316万円	150万円以下 (目標値)
回収期間※2		7年	20～30年	20～30年	7年
国内治療施設数		500以上	10	5	—

※1 施設により数値が異なってくるため導入事例の代表的な値を示しています。

※2 初期投資（設備導入費用など）を回収までに要する期間を示しています。

図11. 従来の放射線がん治療装置とSiC-BNCTの比較表（経済面）

が可能になり、機器の小型化、低コスト化を実現できるばかりではなく、これまでのBNCTでは不可能であった体表面から深い部位のがん細胞まで均一に照射できる（従来のBNCTは体表面から約7cmが限度）。そのため、あらゆる種類のがん治療に対応可能となる。

現在、すでに実用化されている粒子線がん治療装置（陽子線、重粒子線など）との比較を図10、図11に示す。数値はあくまで参考値であるが、他の粒子線治療と同等以

上の効果が見込まれるにもかかわらず、コスト、スペースでの導入ハードルが非常に低い（X線治療装置と同程度）ことがわかる。

現在、福島県楡葉町にある本社工場に動物実験用検証機を導入し、性能検証中である。図12にSiC-BNCTの完成イメージ図を示す。MRIなどの診断装置と同等のサイズで、自己遮蔽されているので大規模な遮蔽施設は必要無い。

■おわりに

SiC 応用技術共同研究講座では、ワイドバンドギャップ半導体であるSiCを用いたパワーデバイスの応用技術を開発しており、SiC パワーデバイスの特徴である高電圧・高速スイッチ動作を最大限に活かした「革命的」な応用開発を目指している。今後も種々の分野で「SiC 特有」の革命的な応用を広げていきたいと考えている。

中村 孝（学界）

舟木 剛（電気 平成3年卒 5年前期 12年後期）

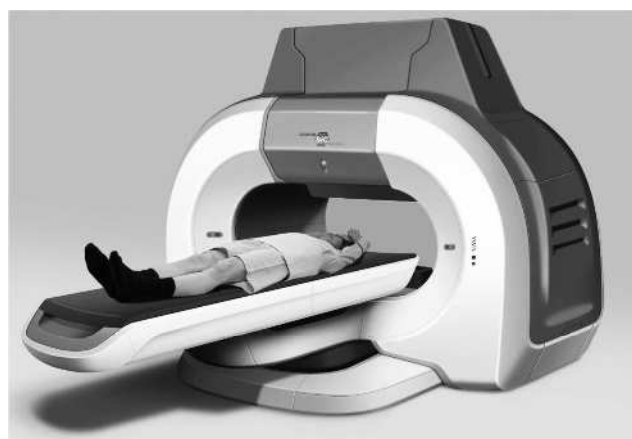


図12. SiC-BNCT完成イメージ図