

SiC 半導体を用いた高電圧・超短パルス電源の開発

DEVELOPMENT OF A VERY SHORT AND HIGH VOLTAGE PULSER USING SiC-DSRD

内藤孝^{#,A)}, 福田憲司^{B)}, 岩室憲幸^{C)}, 徳地明^{D)}

Takashi Naito^{#,A)}, Kenji Fukuda^{B)}, Noriyuki Iwamuro^{C)}, Akira Tokuchi^{D)}

^{A)} KEK, ^{B)} AIST, ^{C)} Tsukuba Univ., ^{D)} PPJ Co.

Abstract

A very short pulse width and high voltage pulse power supply has been developed using SiC semiconductor technology for accelerator applications. The high voltage pulse with very short pulse width has an advantage in addressing the discharge problem. The short acceleration gap and/or the low emittance electron gun can be realized using the very short pulse. The key component is the SiC drift step recovery diode (SiC-DSRD). The switching characteristics of the SiC-DSRD define the rise time and the amplitude of the pulse. We developed newly designed SiC-DSRDs, which are optimized the switching speed and amplitude. The achieved output pulse characteristics are at 11kV peak voltage, 220A peak current, 1kHz repetition rate, 2.3ns rise time and 3.7ns pulse width, respectively.

1. はじめに

高電圧超短パルスを用いたビーム加速やキッカー電源として使用するため[1,2,3,4]、開発を行っている。当面の目標は 10kV を超える高電圧で、しかも 10 ナノ秒以下のパルスを目指して開発を進めている。[5] 高電圧で短パルスを用いることによって、放電せずに高電界を印加することが可能となり、例えば Diode-RF Gun では Low Emittance Beam 生成のために高電界を必要としているが、放電を回避するためには非常に短いパルスで高電界を印加する必要がある。また、国際リニアコライダー計画(ILC)ではダンピングリングの入射・取出しキッカーとして 10kV, 3ns のパルス、2MHz のバーストパルス電源が必要とされている。これ等の応用では、いずれも 10kV を超える高電圧で、しかも数ナノ秒以下というパルスを生成する必要がある。既存の半導体のオンスイッチを使った回路では、個々の半導体の耐圧が高くないため多段化する必要がある、多段化すると単体のスイッチング速度より遅くなる傾向があるため高電圧化すると立ち上がり速度が遅くなり、短パルスを生成することが難しくなる。高電圧超短パルスを生成する方法として、導性エネルギーを高速でスイッチすることによってパルスを得る方法を採用した。スイッチングデバイスとして、SiC 半導体を用いた Drift Step Recovery Diode(SiC-DSRD)と呼ばれるデバイスを開発した。SiC 半導体はワイドギャップ半導体であり、高耐圧であることから高電圧化に適しており電力ロスも少ない、高温環境下での使用にも耐え得ることから高繰り返しでも使用出来ることが期待される。

2. オフスイッチによるパルス電源の動作

Figure1 にオフスイッチによるパルス生成の動作を示す。[6] 上段が回路構成であり、中央の図が電流波形、下段が負荷に現れる電圧波形である。a) 先ず、スイッチを閉じてダイオードに順方向に電流を流す。b) 電流を反転させるとダイオード内にキャリアが残っている間はダイオードがオン状態であるため、逆方向にもわずかの時間、電流が流れる。この時間は逆回復時間と呼ばれダイオードの特性を表す一つのパラメータになっている。ダイオードがオン状態である間はダイオード両端にはほとんど電圧が現れない。c) ダイオード内のキャリアがなくなるとダイオードはオフになり、電流はゼロになる。このオフになる時の速度が高速になるような設計になっているダイオードを Step Recovery Diode (SRD) と呼ぶ。

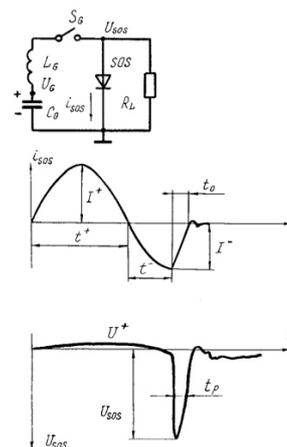


Figure 1: Simplified layout of the off switch pulse generation and the waveforms of the current and the voltage. ([6] Y. Kotov *et al.*)

[#]takashi.naito@kek.jp

通常使われるダイオードでは、このような特性はノイズとなるため、緩やかにオフなるようソフトリカバリ特性に設計される。ドライブ回路は LC で構成されているため、L に蓄積されたエネルギーは突然負荷がオフになったため、 $L di/dt$ に比例した電圧が負荷側に現れ、出力となる。

このオフスイッチによるパルス生成は通常のオンスイッチによるパルス生成に対して、次のような特徴がある。1)出力のピーク電圧は $L di/dt$ に比例するためスイッチング速度が速ければ印加した電圧以上の出力を得ることが出来る。通常のオンスイッチによるパルス生成ではインピーダンスマッチングをとるために印加した電圧の半分しか出力することが出来ない。2)出力のピーク電流はオフスイッチの半導体を流れないため、大出力化した時にスイッチングデバイスの電流容量が出力の制限とはならない。オンスイッチによるパルス生成では出力のピーク電流が半導体を流れるため、最大電流以上の容量を持つスイッチが必要となる。3)多段化して高電圧を得る場合、オフスイッチ動作は連続して起きるためスイッチング速度がほとんど劣化しない。オンスイッチによるパルス生成では段数が増えるとスイッチング速度が遅くなる。4) オフスイッチのスイッチング特性は出力の立ち下がり（立ち上がり）特性のみを決める。パルス幅や立ち上がり（立ち下がり）特性はドライブパルスによる。従ってこの方式ではパルス幅の短いデルタパルスを作るには適しているが任意のパルス幅を生成することは難しい。

このオフ動作によって大きなパルス出力が得られるように設計されたダイオードを Drift Step Recovery Diode(DSRD) または、Semiconductor Off Switch (SOS)と呼んでいる。すでにシリコン半導体を使ったものが開発されているが、我々は SiC 半導体を用いて DSRD を製作し、高電圧化、高繰り返しに耐えるパルス電源を開発することを目指した。

3. デバイスの開発

上述のようにパルス電源の性能はオフスイッチ動作をするダイオードの性能に強く依存する。市販のダイオードではこのような特性を持つダイオードはなく、自分たちでデバイスの設計製作を行うことが

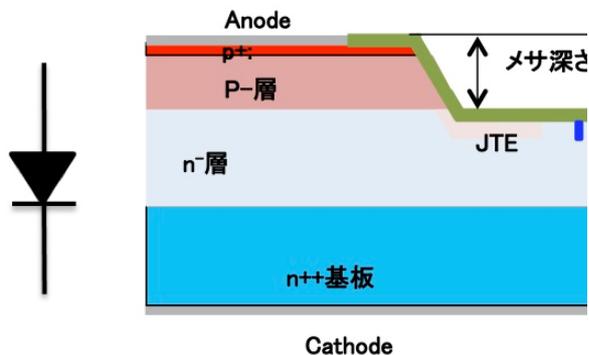


Figure 2: Layer structure of the SiC-DSRD.

開発の中心である。我々はシミュレーションと実験から、ダイオードの最適設計を行い、スイッチング特性の優れたデバイスの開発を目指した。Figure 2 はダイオードのレイヤー構造であるが、それぞれのレイヤーの厚さ、ドーピングの濃度、メサ構造をどの程度にするかなど、多くのパラメータを決定する必要がある。産総研では既に 10kV 耐圧の p/n/n 構造の SiC PiN ダイオードの製作技術を有している。実験ではこの PiN ダイオードを使い 10ns 以下のスイッチング特性が得られたため、このダイオードの構造を元にスイッチング速度が速くなる構造を検討したが、十分高速のスイッチング特性を示すのは耐圧を下げた構造であることがシミュレーションの結果から解り、1200V, 2400V 耐圧の DSRD が設計製作された。低い耐圧の DSRD でパルス電源を構成する場合、複数の DSRD を直列に接続する必要があり、前述のようにスイッチング速度の劣化はそれほどないが順方向電流を流した時に電圧降下による電力ロスが増加する。

また、スイッチング特性はダイオードのチップ面積依存性があることが解り、同じレイヤー構造でチップ面積の違うものを製作し評価した。Figure 3 は 1200V, チップ面積 3mm², SiC-DSRD を 3 段カスケード接続での波形を示す。立ち上がり時間 1.5ns, ピーク電圧 2000V が得られている。

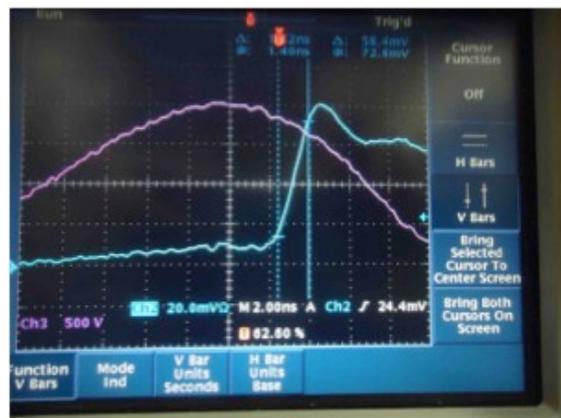


Figure 3: The output pulse waveform of the SiC-DSRD (Diode maximum voltage 1200V, Diode size 3mm², 3 diodes are cascaded.) and the drive pulse. Pink: drive pulse, Blue: output pulse (peak pulse voltage 2000V, rise time 1.5ns).

スイッチング速度が 1ns 前後になると SiC-DSRD のパッケージのリード線のインダクタンスが出力の妨げとなる。SiC-DSRD は Figure 4 のような TO-268 パッケージであるが、アノード、カソードに約 2cm のリード線が使われており、これを数個接続すると結線の長さは 10cm を超えインダクタンスが無視出来なくなる。この問題を回避するために、Figure 5 に示すような SiC-DSRD ベアチップのスタックを作りスイッチング特性が劣化しないようにした。



Figure 4: Picture of the SiC-DSRD TO-268 type package.

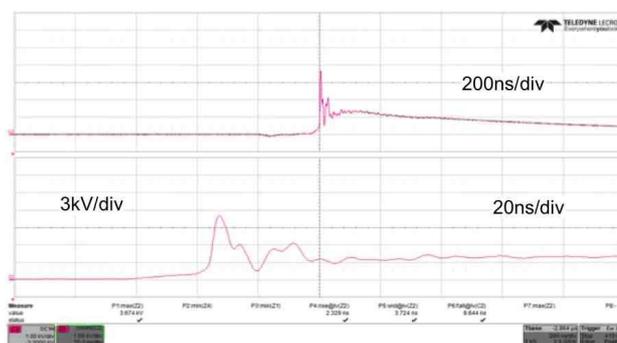


Figure 7: Waveforms of the SiC-DSRD. (Diode maximum voltage 2400V, Diode size 6 mm², 4 diodes are cascaded.)



Figure 5: Cascade stuck using the SiC-DSRD bare chips.

Table 1: Output Pulse Characteristics

	測定値
パルス出力	11.0kV
ピーク電流	220A
立上がり時間	2.3ns (20-80%)
立下がり時間	8.6ns (20-80%)
パルス幅	3.7ns
繰り返し	1kHz

4. パルス電源の性能

開発した SiC-DSRD を用いたパルス電源としての性能を評価した。Figure 6 は SiC-DSRD の評価回路で、多段の MARX 回路を 2 組用いて SiC-DSRD に順方向の充電、逆方向の放電動作を別々に行う。この回路を用いて 2400V 6mm² SiC-DSRD 4 段をドライブし、出力特性を測定した。

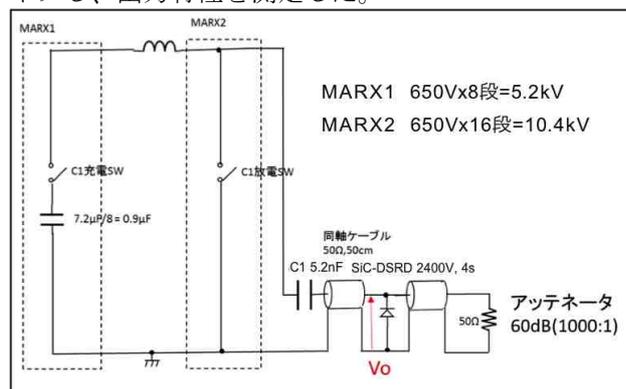


Figure 6: Schematic drawing of the SiC- DSRD Drive circuit.

Figure 7 に波形を示す。現在までに得られているパルス電源のパラメータを Table1 に示す。波形は後方に反射波形やテールを残しているが、これ等は微分回路等を入れることで改善出来る。また、他のドライブ回路を使い 2400V 3mm² SiC-DSRD 3 段で立ち上がり時間 1.8ns, ピーク電圧 5.0kV を実現している。

5. まとめ

シミュレーションと実験から SiC-DSRD デバイスの設計、製作を行い、超短パルス・高電圧パルス電源を開発した。10kV を超え 2ns 前後で立ち上がるパルス電源は他の半導体スイッチでは実現出来ないものであり、今後、この技術を発展させることで加速器に応用されることが期待される。ILC に使用されるキッカーのパルス電源としては、このパルス電源をパルスの波形整形と繰り返しを 2MHz のバーストにすることによって実現出来る。

また、最適なスイッチング特性を得るには SiC-DSRD デバイスの特性に合ったドライブ回路の最適化が必要であることが解った。チップ面積の小さい SiC-DSRD は高速スイッチングに適しているが、多段化して高電圧化するには高速のドライブ回路が必要となる。反対にチップ面積の大きい SiC-DSRD は、多段化して高電圧出力を取り出すことが可能であるが、スイッチング速度を速くするのが難しい傾向にある。また、それぞれの SiC-DSRD とドライブ回路の組み合わせを十分行ったわけではなく、今後、評価を進める予定である。多段化してさらに高電圧パルスを作る場合のドライブ回路も大きなドライブ電圧が必要となり目的にあった最適設計をする必要がある。

謝辞

本研究は NEDO 次世代パワーエレクトロニクス先端研究の委託研究として進められています。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ました。また本研究の一部は科研費 JP16K05034 の助成を受けたものです。本研究を支援していただきました山口施設長、道園主幹に感謝致します。

参考文献

- [1] G.J. Caporaso *et al.*, LLNL-JRNL-416544, SEP. 2009.
- [2] R. Ganter *et al.*, “Electron beam characterization of a combined diode rf electron gun”, PRST-AB 13, 093502 (2010).
- [3] K. Hasegawa *et al.*, “パルス高電圧を用いた電子銃の実験”, PASJ2005 pp361-363, July (2005).
- [4] T. Naito *et al.*, PRST-AB 14, 051002 (2011).
- [5] T. Naito *et al.*, PASJ2016.
- [6] Y. Kotov *et al.*, Proc. of IX Int. P.P.C. 1993, pp134-139.