

高速、高電圧パルス電源の開発

DEVELOPMENT OF A VERY SHORT AND HIGH VOLTAGE PULSE POWER SUPPLY

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

Takashi Naito, Kenji Fukuda, Noriyuki Iwamuro, Akira Tokuchi,

^{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 beam acceleration. The very short pulse width has an advantage in addressing the discharge problem. The short acceleration gap and/or the low emittance beam can be realized using a pulse power supply. The drift step recovery diode (DSRD) is one of the fast switching devices. To improve high voltage characteristics, we used an SiC instead of an Si semiconductor. The single Si-DSRD can be used in the range of 100V and the single SiC-DSRD can be used up to 10kV. The achieved output pulse characteristics are at 6kV peak voltage, 120A peak current, 1kHz repetition rate, 5ns raise time, 12ns fall time and 10ns pulse width, respectively.

1. はじめに

高電界によって加速器をコンパクト化する方法としてDielectric Wall Accelerator (DWA)が提唱されている[1]。DWAはナノ秒の超短パルスを使用することによって高電界でも放電の問題を回避しようという考えに基づいている。この超短パルスを生成する技術として、オープニング・スイッチを使ったパルス電源を使用することも検討されている[1]。また、高電圧・超短パルスが高電界を生成するのに有利なことから、FEL応用のためのDiode-RF Gunに応用されることが期待される[2] [3]。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。別の応用として、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ストリップラインを使用し、ドライブするパルス電源は10kV、3nsのパルスが必要とされている[4]。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、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。また、スパークギャップなどの放電素子は高速のスイッチング特性は得られるが加速器で使用出来るほどの時間安定性と長期の寿命、振幅の安定性はないため使用出来ない。

本研究で開発を進めているのは、SiC半導体を用いたDrift Step Recovery Diode(SiC-DSRD)を使用したパルス電源である。SiC-DSRDはオフスイッチであり高速で大電流を遮断することが出来る。既にSi半

導体を用いたDSRDではスイッチング速度がサブナノ秒のものがあり、DSRDを多段接続することによってパルス幅3ns、100kVを超えるものも作られている[5]。これほど高速で高電圧をスイッチすることは、既存のMOS-FETなどのオンスイッチでは不可能である。SiC半導体を用いて同等のスイッチング速度が実現出来れば、SiC半導体の特徴である高耐圧特性から信頼性の高いパルス電源を開発出来る可能性がある。また、高耐熱であることから高繰り返しを実現することが期待される。このパルス電源の開発状況について報告する。

2. DSRD の動作

DSRD は市販されている Step Recovery Diode (SRD) と同じ動作をする。SRD はオン状態からオフ状態に移行する時に非常に高速のスイッチ特性を示す。SRD は一般的に高周波の発振やサンプリングオシロスコープのTDR用のパルス生成などに用いられている。TDR用のパルスは30psの立ち上がりをもつパル

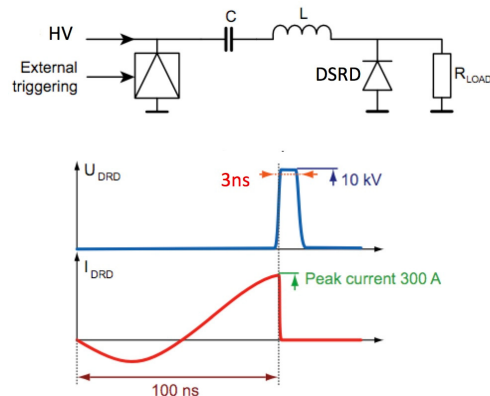


Figure 1: DSRD の動作.

#takashi.naito@kek.jp

スでケーブル等の反射を計測するのに用いられる。

通常の SRD が数 V 程度までしか使用出来ないのに対して DSRD は高い電圧まで使用出来る点が特殊である。Figure1 に DSRD の回路と動作を示す。この回路に LC の時定数のサイン波を入力すると、ダイオードは最初オンになりドライブ電流が逆極性になってもダイオードのレイヤーにキャリアが存在するうちはオン状態であり、ダイオード両端にはほとんど電圧が現れない。キャリアがなくなるとダイオードは突然オフ状態になり、L に蓄えられていたエネルギーは Ldi/dt で放出されるため出力電圧となって負荷に現れる。従って、オフスイッチが速ければ速いほど出力電圧のピークは大きくなる。

このような誘導性エネルギー蓄積は $(LI^2)/2$ のエネルギーをインダクタンスに蓄えたものを放出することによって得られる。容量性エネルギー蓄積がコンデンサにエネルギーを $(CV^2)/2$ で蓄積するのと比較すると導性エネルギー蓄積はエネルギー密度が体積比で約 2 桁高いことが知られている[6]。従って高速のオフスイッチが可能であれば、MOS-FET などのオンスイッチによるパルス電源よりコンパクトなパルス電源が製作可能である。

3. SiC-DSRD デバイスの開発

通常のダイオードでは Figure2 左図に示すようにソフトリカバリー特性になるように設計されている。通常の使用ではオフ特性が高速になるとノイズを発生するため、逆回復時間は短く、オフ特性は緩やかになるように設計される。これに対して Figure2 右図に示すように、オフ特性を出来るだけ急峻にする設計は通常のダイオードの設計と全く逆の特性を強調するよう設計する必要がある。

Si の場合ではデバイスのキャパシタンスに逆比例してオフ特性が急峻になると解析されている[7]。従って、ダイオードの面積が小さいほど高速のスイッチング特性が得られるはずである。低い電圧の予備実験でも 8mm^2 ダイオードより 5mm^2 ダイオードの方が速いスイッチング速度が得られるという結果を得た。先ず p/n/n 構造の PiN ダイオードについて、産総研では既に 10kV 耐圧の p/n/n 構造の PiN

一般産業用pnダイオード逆回復波形 目標とするpnダイオード逆回復波形

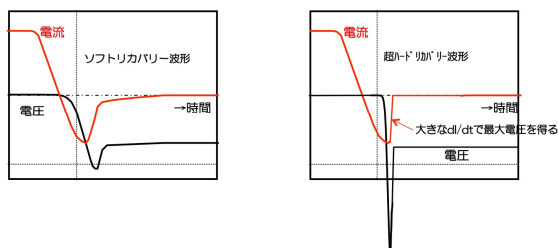


Figure 2: ダイオードのリカバリー特性.

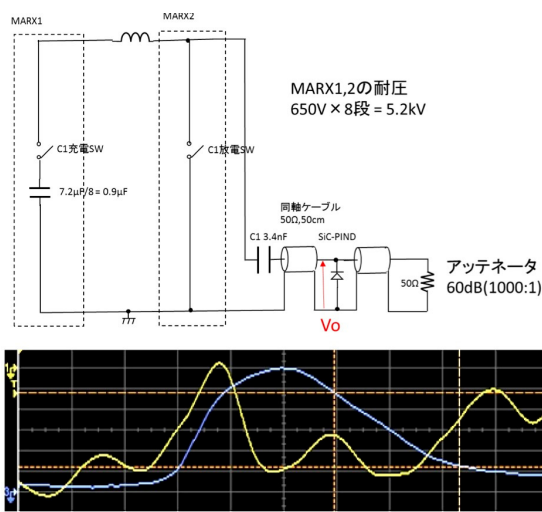


Figure 3: SiC-DSRD の試験回路 (上) と 8mm^2 SiC ダイオードのスイッチング特性 (下) (青: 出力電圧 (1kV/div), 黄: C1 電流 (100A/div), 横軸 5ns/div).

ダイオードを製作しているが、同等のレイヤー構造で面積の違うサイズの PiN ダイオードを製作し、動作の違いを評価し始めている。Si ダイオードの耐圧が 500V 程度であることと比較して、20 倍の耐圧はオン電流による電力ロスの面からも、高電圧を生成する場合に段数を減らすことが出来、信頼性の点からも有利であると考えられる。

さらに高速のスイッチング特性はレイヤー構造を p/p/n 構造とすることによって得られる。すでにロシアのグループが p/p/n 構造で 2kV 耐圧の SiC-DSRD を製作し、8 段スタックして 10kV 以上のパルスを生成している[8]。この出力波形では高速の部分は約 1ns で立ち上がっている。我々は、高耐圧を持つ SiC-DSRD レイヤー構造の開発を進めている。耐圧をあげることによって、直列接続の段数を減らすことが出来、電力ロスも低減出来る予定である。

4. パルス電源としての評価

SiC-DSRD デバイスは開発中であるが、パルス電源としての評価も同時進行で進めている。Figure 3 (上) 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 10kV 耐圧の PiN ダイオード 8mm^2 の動作特性を測定した。Figure 3 (下) 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。このダイオードは、SiC-DSRD として最適化されたものではないが、ある程度ステップリカバリー特性を示すことが解った。

Table 1: 10kV PiN ダイオード 8mm[□]のパルス特性

	測定値
パルス出力	6.0kV
ピーク電流	120A
立上がり時間	5ns(20-80%)
立下がり時間	12ns(20-80%)
パルス幅	10ns
繰り返し	1kHz

5mm[□]PiN ダイオードの方がシミュレーションや低電圧の予備実験では高速のスイッチ特性を示したが、このドライブ回路では有意な高速スイッチング特性は確認出来なかった。SiC-DSRD のキャリアがなくなり電流が遮断されるまでに逆方向の放電ドライブ信号が十分立ち上がらなかった可能性がある。Si のDSRD に比較して SiC-DSRD は逆回復時間が短い傾向がある。ドライブ回路も最適化を行いデバイスに合った設計をする必要があるかもしれない。

この方式のパルス電源の時間安定度、振幅安定度も重要である。加速器ではサイクロトロンなどの大電流スイッチング素子が使われているが、タイミングジッター、振幅ジッターが加速器の安定度を決めている。特にタイミングジッターに関しては、パルス幅が短いために安定であることが要求される。今回は 8mm[□]PiN ダイオードで 1kV の出力を出した時の時間安定度、振幅安定度を測定した。Figure 4 はサンプリングオシロスコープで入力トリガーに対する出力パルスの時間安定度を測定したものであるが、時間ジッターは 30ps 以下であった。この測定は測定ノイズにも影響されるため、実際はさらに小さい値であると推測される。また、振幅安定度は 0.2% 以下でありこれも測定の精度で制限されている。振幅安定度は原理的には直流電源の安定度に近づくはずで、10⁻⁴程度の安定度が期待される。

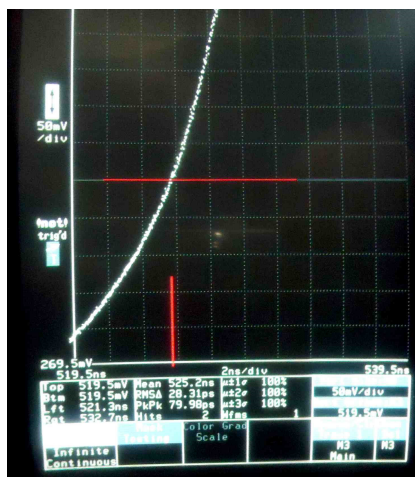


Figure 4: 出力パルスのジッター測定.

5. まとめ

高速・高電圧パルス電源は、加速器のコンパクト化や、高品質のビームハンドリングに有望視されている。我々は SiC-DSRD を用いたパルス電源がその有力候補と考え開発を行っている。現在までに最適化されていない PiN ダイオードを用いてピーク電圧 6kV、立上がり 5ns の特性が得られている。また、時間安定度 30ps 以下、振幅安定度 0.2% 以下が得られている。今後、最適化された SiC-DSRD によってさらに高速・高電圧のパルス電源を目指す予定である。

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。また、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, Jul (2005).
- [4] T. Naito *et al.*, PRST-AB 14, 051002 (2011).
- [5] <http://www.fidtechnology.com>
- [6] T. Namihira *et al.*, J. Plasma Fusion Res. Vol.81, No.5 (2005) 35-358.
- [7] V. Grekhov *et al.*, Solid-state Electronics vo.28, pp.597-599 (1985).
- [8] V. A. Ilyin, ICSCRM2015 Tu-p-55.