

SPring-8 高速パルスキッカードライブ電源用 MOSFET の耐放射線性評価

RADIATION DAMAGE EFFECTS AND PERFORMANCE OF POWER MOSFET USING SPRING-8 FAST PULSE DRIVING POWER SUPPLY

小林和生^{#, A)}, 満田史織^{A)}, 中西辰郎^{B)}, 本井傳晃央^{A)}, 佐々木茂樹^{A)}, 大熊春夫^{A)}
Kazuo Kobayashi^{#, A)}, Chikaori Mitsuda^{A)}, Tatsuro Nakanishi^{B)}, Teruo Honiden^{A)}, Shigeki Sasaki^{A)}, Haruo Ohkuma^{A)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} SPring-8 Service Co., Ltd. (SES)

Abstract

We have developed a compact and fast pulsed power supply system using in a fast kicker magnet system which is applied to suppress the perturbation of stored beam at injection to SPring-8 storage ring and to generate short pulsed synchrotron radiation in the SPring-8 storage ring. In this power supply system, we need a special specification to realize rapidity and high power output with compact system volume. We employed the system design to separate the output part from other components of the power supply system in order to place it near a beam pipe of the storage ring. By the employment of this system arrangement, it becomes easier not only to reduce the inductance to achieve above request specifications, but also to protect the main power supply components from radiation damage by placing them outside of the accelerator tunnel. We have employed Si Power MOSFETs as switching devices in the output part of the power supply system. By placing the output part beside of the beam pipe, the life of power MOSFETs naturally becomes to be affected an influence of the radiation. We assessed radiation damage for Si and SiC Power MOSFETs used in the actual operating system. Based on experimental results, we will discuss about the suitable switching device for our next generation power supply system from the point of view of Total Ionizing Dose (TID) effects.

1. はじめに

SPring-8 蓄積リングでは、入射時の蓄積ビーム水平振動抑制のための高速パルスキッカー^{[1][2]}、及び短パルス光生成研究のための垂直キッカー^[3]に使用する高速パルス電源の開発を進めている^[4]。本電源は小型化と高速性能、及び大電流出力を追求するため、負荷であるキッカーマグネットの近傍、すなわちビームパイプの近傍に電源としてのドライブ回路（出力部）のみを配し、電源の他の部分は放射線損傷を避けるべく蓄積リングのトンネル外に置く形にしている。ラティスを構成するマグネット間等の狭小スペースに配置することになるドライブ回路には高速性と低占積率性のあるスイッチング素子としてブレイクダウン電圧 1000V あるいは 1200V を有する高耐圧 Si 型パワー MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) を採用している。本高速パルス電源は開発当初においてビームトンネル内外の電磁ノイズによって引き起こされる回路誤動作によるパワー MOSFET 破壊、ビームパイプ近傍にドライブ回路、その構成要素であるスイッチング素子のパワー MOSFET を設置することによる放射線由来と推測される破壊故障等が頻発しており、使用環境によっては数日という短寿命であることもあったが、外来ノイズ耐性を向上させた回路の採用、放射線を遮蔽する収納 BOX の導入等により 2014 年の時点では、SPring-8 でのユーザー運転時に 3 ヶ月以

上の寿命を達成している。今後、更なる高寿命化を目指すためにも、システム構成上ある程度の放射線照射が避けられないパワー MOSFET についてその耐性を確認しておくことは重要である。また、近年量産が開始され Si 型を凌ぐ性能が期待される SiC 型パワー MOSFET への移行も開始しているため、現在使用している Si 型及び採用を検討している SiC 型の各パワー MOSFET の耐放射線性、ここではトータルの X 線照射線量によるパワー MOSFET の電気的特性の変化を評価した。その結果として SiC 型は Si 型に比べ 10 倍以上のトータルドーズ (TID) 耐性を有する可能性が示唆された。

2. 半導体デバイスの放射線照射効果

半導体に対し放射線が照射されるとその影響として、下記 A) や B) が知られている。

- A) 構成する結晶の元素がその格子位置から変位し欠陥が発生する現象
- B) 放射線の持つエネルギーにより電荷が発生する（電離）現象

パワー MOSFET においては放射線照射の効果として、電離放射線が照射されている間、SiO₂/Si 界面や酸化膜中に電荷が捕獲され続け、その結果しきい値電圧 (V_{th}) の変位、オフ時のリーク電流増大、トランスコンダクタンスの低下をもたらすトータルドーズ (TID) 効果^[5]、1 つの重粒子が入射することで引き起こされるシングルイベントバーンアウト (SEB) やシングルイベントゲートラプチャー (SEGR) 等が知られている。今回、蓄積リングト

[#]kkoba@spring8.or.jp

ンネル内に設置した電源のドライブ回路に実装しているパワーMOSFET に対し確実に起こっていると考えられる TID 効果について、現在使用中の Si 型及び次期候補の SiC 型 それぞれに対する影響を評価した。

3. 試験デバイスと X 線照射方法

X 線照射試験を実施したパワーMOSFET の主な仕様を Table.1 に示す。A(Si)は現在実際にビーム運転に適用している電源に用いている Si 型 MOSFET ($V_{dss}=1200V$) と同一メーカーのもので V_{dss} が 1000V のもの、B(SiC)と C(SiC)は今後の採用を検討している SiC 型のデバイスである。実際の電源ではこれらを平行もしくは平行+シリアルに接続し、コンデンサに蓄積した電荷を外部トリガーにより負荷マグネットであるコイルに急速に放電するためのスイッチング素子として使用し、ピーク出力電流として数百 A の出力を得ている^[4]。

デバイス等の放射線耐性を実験室で確認するために照射する放射線としては中性子線、陽子線、 γ 線、X 線等があるが、電子ビームを蓄積しているトンネル内での影響として、まずは X 線照射による効果を評価した。照射に用いた装置は SPring-8 サイト内の理化学研究所にある照射装置をお借りすることができた^[6]。この装置は照射位置において Si に対し 0.091[Gy/sec]のドーズレイトが得られる。一方、蓄積リングトンネル内に実際に設置した電源においてドライブ回路を収納した遮蔽 BOX 内でガフクロミックフィルムを用いた照射線量評価をビーム運転中に行った結果、最大のドーズレイトとして 1.7[Gy/day] (空気換算) が得られている^[7]。上記照射装置を使用し、Si に対するドーズ量を照射装置の Mo ターゲットからのエネルギーである 17.5keV/19.6keV で換算したドーズレイトを用い、蓄積リングトンネル内の実際の設置条件で最大 700 日~1300 日相当となる X 線照射を各デバイスに対し実施した。照射に際しては 90 日相当まではデバイスに対し $V_{ds}=500V$ 、 $V_{gs}=0V$ のバイアスを掛け、その後に対応する領域は今回、装置の都合上、全端子 =GND 電位で実施している。

Table 1: Specification of Devices under Test

Parameter	A(Si)	B(SiC)	C(SiC)	Unit
ドレイン・ソース間電圧	1000	1200	1200	V
ドレイン電流 (パルス)	110	80	90	A
オン抵抗	220	80	80	m Ω

3. 結果

3.1 $V_{gs} - I_{ds}$ Curve (A(Si), B(SiC))

$V_{ds}=20V$ に於いて取得した代表的な FET 静特性

の一つである $V_{gs}-I_{ds}$ カーブを Figure 1、2 に示す。本測定では $I_{ds}=500mA$ でリミットを設定し、測定を実施している。N-ch MOSFET の TID 効果としてはドーズ量が小さい時は SiO_2 酸化膜内に捕獲された正孔の影響で、ゲート電圧が正方向にオフセットされた状態となり V_{th} が負方向にシフト、更にドーズ量が増えると Si/SiO₂ 界面に捕獲された負電荷の影響が勝り V_{th} が逆に正方向にシフトしていくとされているが^[8]、今回の照射ではドーズ量が増えるに従って V_{th} が負方向にのみシフトする TID 効果による影響が確認された。さらには SiC 型では Si 型に比べ、 V_{th} のシフト量がかかなり小さいことも判る。なお C(SiC)のデバイスも B(SiC)とほとんど同程度の特性シフトの結果を得ている。

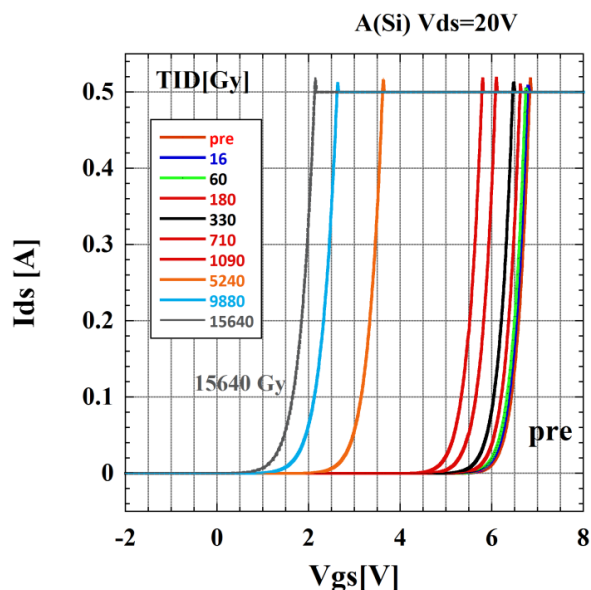


Figure 1: $V_{gs}-I_{ds}$ curve A(Si).

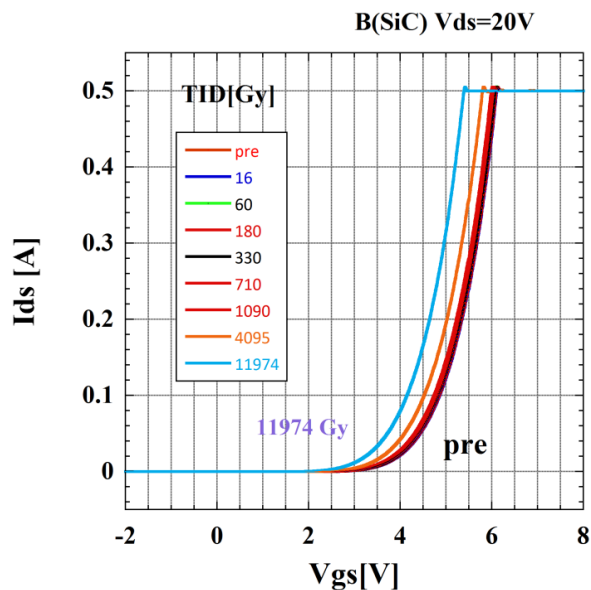


Figure 2: $V_{gs}-I_{ds}$ curve B(SiC).

3.2 Vth Shift (A(Si), B(SiC), C(SiC))

$V_{ds}=V_{gs}$ とし、 $I_{ds}=1mA$ の時の $V_{gs}(=V_{ds})$ を V_{th} と定義し、横軸にトータルドーズ量を、縦軸に照射前の V_{th} 値を基準にした V_{th} のシフト量をプロットしたものを Figure 3 に示す。図中 90days、1000days はトータルドーズ量を前述のトンネル内実設置環境に換算した電子ビーム運転日数相当を示す。Si 型では 90 日でシフト量が 1V を超えるが、SiC 型の 2 種類のデバイス (B、C) では 1000 日を超えてもそのシフト量は 1V 以内である。

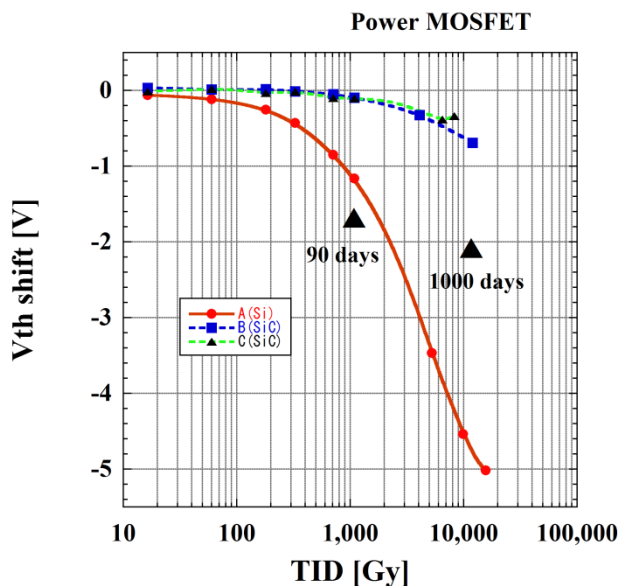


Figure 3: Vth shift ($V_{th}:=V_{gs}@I_{ds}=1mA$).

3.3 ビーム運転を経た電源の FET 特性

蓄積リングトンネル内において実際のビーム運転を経た電源から取り外したパワー MOSFET (D(Si) : $V_{dss}=1200V$) の電気的特性測定結果を Figure 4、5 に示す。これらデバイスに於いては使用前の V_{gs} - I_{ds} カーブは取得していないが、複数を平行接続して使用する本電源のパワー MOSFET はスイッチング特性を合わせるため、電源製造メーカーに於いて FET を実装の際に前述 3.2 の定義を用いた V_{th} による選別を実施している。Figure 4 は電源から取り外した FET、つまりはビーム運転中のトンネル内で一定期間 (この場合は約 3 ヶ月)、動作状態で放射線に照射された FET を $V_{gs}=V_{ds}$ の接続で測定した I_{ds} カーブを示す。“pre use”のラインはその V_{th} がトンネル内でビーム運転を経た FET の実装選別時とほぼ同等の未使用品の測定結果である。この電源では 12 個のパワー MOSFET を使用しており、2 個の FET に故障 (Failure-1:保護 Di を含めたショート故障、Failure-2:FET 動作の不良) が認められ、残りの 10 個に関しても特性の変動が現れている。しかしながらこの特性変動は 3.1 及び 3.2 で示した X 線照射試験時の V_{th} のシフトとは逆方向の測定結果となっている。Figure 5 は V_{th} の測定値をプロットしたもので赤●の pre use は選別時の値、青▲はトンネル内でビーム運転を経た V_{th} の測定値である。この

図からは破壊あるいは故障していないパワー MOSFET において 1.5V 程度、 V_{th} の正方向へのシフトが認められる。また、前述のドーズレートを換算したものは違った新たな遮蔽収納 BOX に単体の FET をユーザービーム運転中に置いた前後の A(Si) の MOSFET の特性変化を Figure 6 に示す。Figure 3 のデータにおいては 20 日程度で 300mV 程度のシフトが起っていたものが、この遮蔽環境ではシフトが 40mV 程度にまで収まっている。

4. 考察

X 線に対する本照射試験の TID 効果に限れば Si 型から SiC 型へのパワー MOSFET の移行はその寿命に対する効果において大変期待が持てる結果となっている。TID 効果による V_{th} のシフト量だけを見ると例えば Si 型デバイスに於ける 3 ヶ月相当、つまり -1V の V_{th} シフトが起こると同時に各デバイスの V_{th} バラツキも大きくなり、平行あるいは平行・シリアル接続使用に於ける各デバイス間の V_{th} 特性が開くことによるスイッチングタイミングの相違で FET を ON する時に特定の FET に出力放電電流の集中が起こり、FET の破壊に至ることが FET の故障原因と仮定した場合、Si 型デバイスの 3 ヶ月に対し SiC 型は 3 年近い寿命を持つ可能性がある。さらに遮蔽を強化した収納 BOX と組み合わせれば X 線照射耐性は大幅に向上することが期待できる。SiC 型への移行は ON 抵抗の低減、ゲート容量の特性等の相違さえ留意して使用すれば、周囲の回路を大きく変更することなく電源自体のスイッチング特性等の向上が期待でき、更には同等の特性を持つデバイスではそのパッケージ体積の縮小というメリットも期待できる。ただし半導体素子を評価する場合、その製造バラツキ (ロット間個体差等) が大きなウェイトを占める事も確かであり。今回の僅かの数による試験結果からの早急な結論は避けたい。また、実際のビーム運転中、トンネル内の環境を経た Si 型デバイス D の TID 効果と考えられる V_{th} シフトが今回実施した X 線照射試験による特性変化とは逆方向のシフトとして現れている理由が不明である。TID 効果に於いて MOSFET 内での電離作用による電子あるいは正孔のトラップのされ方はその照射時のバイアス状態に依存することも知られているので、この電源に於けるパワー MOSFET の使用状況に正方向へのシフトをもたらすなんらかの要因があるか、あるいはこのパワー MOSFET の内部構造に特有の要因がある可能性がある。またドーズ量の見積もり評価に誤りがあり、更に照射試験を実施すると、 V_{th} の正方向へのシフトが再現される可能性も考えられるが、Figure 1 及び 3 の結果からは本照射試験で照射した最大もしくはそれ以上の領域ではパワー MOSFET がノーマリー ON 状態に近い領域に入ることになり、その時点で電源が故障 (スイッチとして動作せず ON のままとなり、本電源の動作仕様では過電流が流れ、デバイスの焼損に至る) してしまうことが考えられる。実際のビーム運転をトンネル内で経た D(Si) のパワー MOSFET に見られる

V_{th} の正方向へのシフトは今後の調査確認項目である。

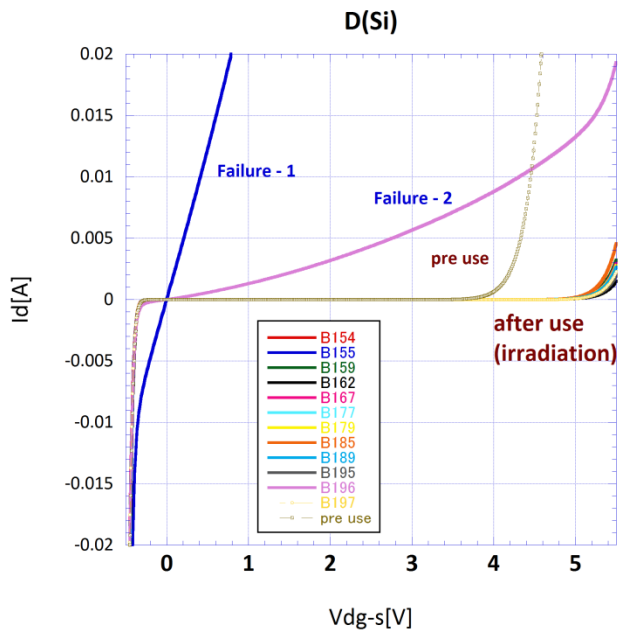


Figure 4: Di connected measurement of irradiated FETs.

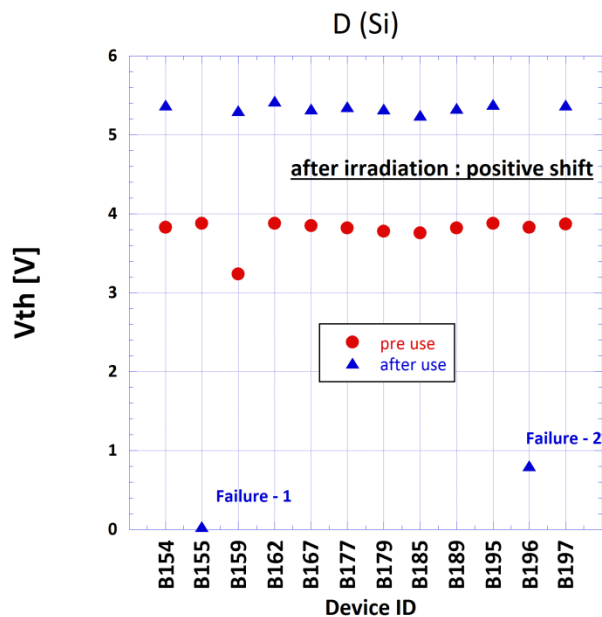


Figure 5: V_{th} shift before and after use.

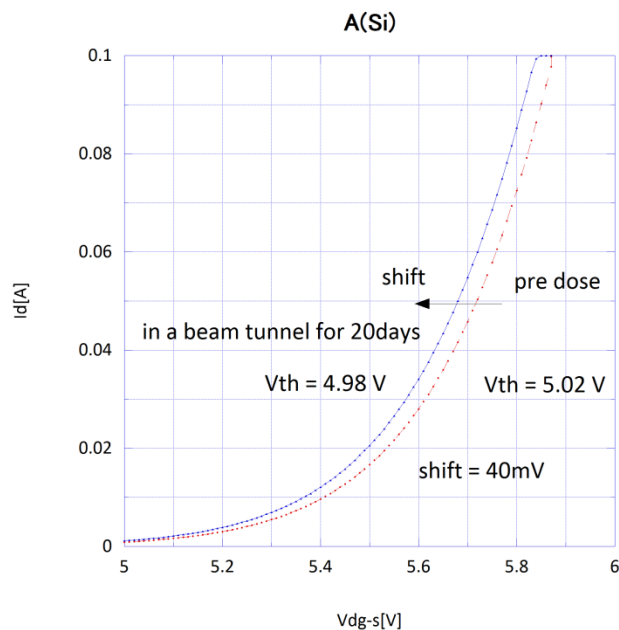


Figure 6: V_{th} shift Si Power MOSFET in a new protection Box.

参考文献

- [1] C. Mitsuda, et al., Proc. of IPAC14, Dresden, Germany, 2014.
- [2] C. Mitsuda, et al., in these proceedings.
- [3] C. Mitsuda, et al., Proc. of the 11th Synchrotron Radiation Instrumentation(SRI2012), Lion, France, 2012, 9 Jul, Journal of Physics: Conference Series, 425 (2013) 042012.
- [4] C. Mitsuda, et al., Proc. of IPAC13, Shanghai, China, 2013, p666.
- [5] J. R. Schwank, et al., "Radiation Effects in MOS Oxides," IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 55, no. 4, pp. 1833-1853, Aug, 2008.
- [6] T. Kudo, et al., IEEE Trans. Nuclear Science, in press.
- [7] T. Nakanishi, SPring-8/JASRI internal report.
- [8] T. P. Ma and P. V. Dressendorfer, Ionizing Radiation Effects in MOS Device and Circuits (J. Wiley & Sons, New York, 1989).