

P119 パワー半導体における放射線起因バーンアウト電流の実測評価

○中本耀 (京都工芸繊維大学), 古田潤 (岡山県立大学), 簗内美智太郎, 坂本浩則 (ルネサスエレクトロニクス株式会社), 中島隆一, 小林和淑 (京都工芸繊維大学), 酒井真理 (群馬大学), 熊代成孝 (ルネサスエレクトロニクス株式会社)

Experimental Evaluation of Radiation-Induced Burnout Current in Power Semiconductor Devices
Hikaru Nakamoto (Kyoto Institute of Technology), Jun Furuta (Okayama Prefectural University), Michitarou Yabuuchi, Hironori Sakamoto (Renesas Electronics Corporation), Ryuichi Nakajama, Kazutoshi Kobayashi (Kyoto Institute of Technology), Makoto Sakai (Gunma University), and Shigetaka Kumashiro (Renesas Electronics Corporation)

Key Words: Radiation Effects, Power Semiconductor, Single-Event Burnout (SEB), Neutron Irradiation

Abstract

This study investigates radiation-induced burnout in a power diode under neutron irradiation. By varying applied voltage and external capacitance, the SEB occurrence conditions were clarified. The measured current waveforms were compared with device simulations, revealing the significance of excess impact ionization in SEB triggering.

1. 研究背景

宇宙空間では、高エネルギーの放射線（中性子、陽子、重イオンなど）が絶えず飛来しており、宇宙機に搭載された電子機器や電源系統にさまざまな影響を及ぼす。その中でも、パワー半導体は、電力供給や制御に不可欠な素子である一方、放射線に起因する故障に対する耐性は十分とは言えない。

特に問題となるのが、Single-Event Burnout (SEB) と呼ばれる現象である。SEB は、パワー半導体がオフ状態にある際に、高エネルギー粒子がデバイス内部に突入することで発生する。このとき、デバイス内部に生成された電子正孔対が局所的な電界を増加させ、しきい値を超えると、インパクトイオン化が誘発される。インパクトイオン化とは、加速されたキャリアが原子と衝突し、新たなキャリアを生成する現象であり、電流の急激な増大を引き起こす。最終的には、局所的な高温によりデバイスが焼損し、永久的な故障に至る。

SEB は不可逆的な障害であり、宇宙機の長期信頼性に対して深刻なリスクとなる。また、SEB は発生頻度が低く、再現性のある評価が難しいため、その発生メカニズムや対策に関する研究は未解明な点が多い。

これまで SEB に関する研究は主に断面観察 [1], [2] やデバイスシミュレーションが中心であり、SEB が実際に発生した際の電流波形を測定した例は極めて限られている。そのため、SEB の発生メカニズムの理解やシミュレーションモデルとの整合性検証が十分とは言えない。

本研究では、宇宙環境で問題となる中性子による SEB の実態を明らかにするため、白色中性子源を用いた照射実験を行い、パワー半導体に誘起される SEB 電流をオシロスコープにより直接測定した。また、印加電圧や並列容量の影響を評価し、得られたデータをもとにデバイスシミュレーションと比較することで、SEB 発生の再現性や要因を検討した。

本研究は、宇宙機に搭載されるパワー半導体の放射線耐性評価の高度化および信頼性向上に資する知見を提供する。

2. 測定方法

図 1 に示す測定回路を用いて、SEB 電流波形をオシロスコープにより測定した。SEB の発生条件と電流特性を明確にするため、印加電圧と並列容量の変化による影響を評価した。並列容量は SEB の発生に大きく影響することが知られており [3], 本研究では一般に使用される容量よりも小さい値を使用することで、SEB による破壊領域を制限し、破壊痕の解析

を行いやすくした。また、電源電流が SEB 発生に寄与するため、回路には高抵抗を挿入して電源電流を制限した [4]。測定対象として、耐圧 1200 V の Si Fast Recovery Diode (FRD) を用いた。逆バイアス時の FRD での SEB を評価しているため、順方向バイアス時に注入されるキャリアの影響がない。これにより、二次イオンによって誘起されるキャリア倍増過程だけを評価することを可能としている。FRD に逆方向電圧を印加し、オシロスコープにより SEB 電流 I_R を測定した。SEB 電流は変動範囲が極めて広いので、3 本の測定プローブ (V1, V2, V3) を同一点に接続し測定を行った。また、印加電圧 V_R と並列接続された V4 をモニタリングし、SEB 発生時の電圧降下を検出した。

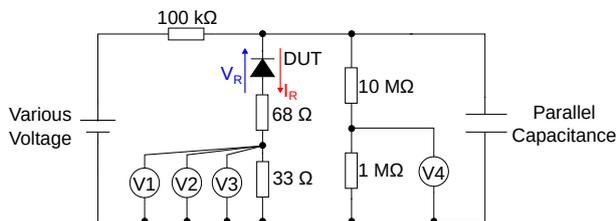


図 1 SEB 電流測定回路。

中性子照射は、大阪大学核物理研究センター (RCNP) の白色中性子線 [5] および群馬大学医学部附属病院重粒子線医学研究センター (GHMC) の医療用炭素線起因中性子 [6] を用いて実施した。GHMC における測定系を図 2 に示す。炭素線をアクリルブロックに照射することで、ブラッグピーク付近で主に、中性子、陽子、アルファ粒子で構成される二次粒子が生成される。SEB は高エネルギー中性子により発生する [7] ため、低エネルギー陽子やアルファ粒子は無視できる。生成された中性子を DUT に照射する。DUT の設置場所での中性子のエネルギースペクトルは、汎用モンテカルロ粒子輸送コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) [8] を用いて算出した。RCNP, GHMC および地上 [9] における中性子のエネルギースペクトルを図 3 示す。

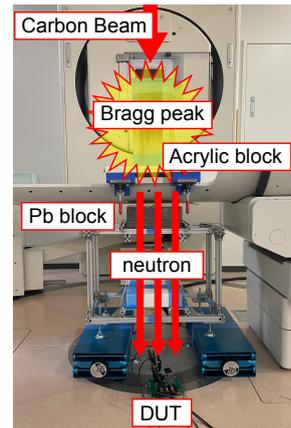


図 2 医療用炭素線起因中性子を用いた測定系。Pb ブロックは荷電粒子の遮蔽に使用。

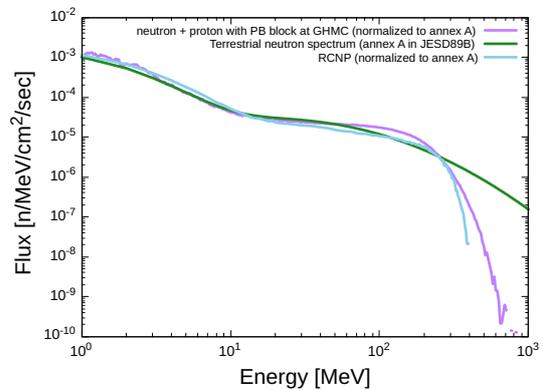


図 3 DUT 設置場所における中性子エネルギースペクトル。1 MeV 以上の中性子数と 50 MeV 以上の陽子数で規格化。

3. 測定結果

SEB 発生時の電流とその時の電圧変化、および SEB 未発生時の電流を図 4 に示す。これらの測定条件は、 $V_R=980$ V、並列容量 2 nF である。SEB 発生時の V_R の電圧降下を SEB 発生時の基準としている。オシロスコープの測定限界により、1400 mA 以上の電流は測定することができない。測定結果より、SEB 発生時、電流が 1000 mA 到達した時刻より V_R が減少し始めている。つまり、この時点から破壊痕の形成が始まることを示唆している。その後の電圧降下は、破壊痕の拡大に対応している。

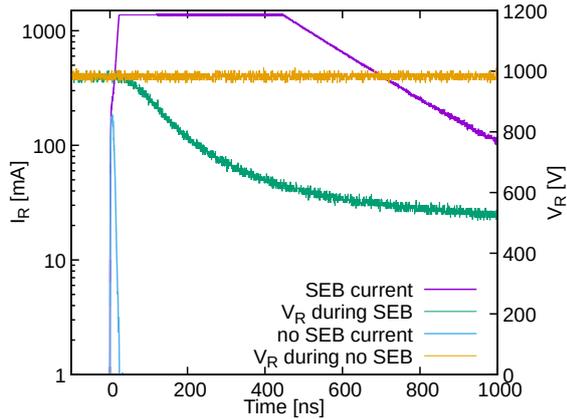


図4 GHMCで測定した $V_R = 980$ V, 並列容量 2 nF の SEB 発生時と未発生時の電流と SEB 発生時の電圧変化.

$V_R = 960$ V から 1000 V までをスイープさせた時の SEB 電流波形を図 5 に示す. I_R が 1 mA に到達する時刻を 0 ns とし, 並列容量はいずれも 2 nF である. 時刻 2.5 ns までは, 初期電流に若干のばらつきがあるものの, 電流の立ち上がりは電圧に依存せず, 全ての V_R で同様の挙動を示している. しかし, 時刻 2.5 ns 以降は, 電圧によって電流の上昇に違いが確認された. 高い電圧は電界の増加により破壊に至るまでの時間が短縮するはずであるが, 今回の測定結果ではこの傾向は確認されなかった. この原因は, 中性子によって生成される二次イオンの LET (Linear Energy Transfer) に起因する. 高い LET の 2 次イオンは発生するキャリアを増加させ, 1000 mA に到達する時間 (破壊に至るまでの時間) を短縮する [10]. したがって, スイープさせる電圧範囲が狭い場合, 電圧と LET の両方が SEB 電流に大きく影響する.

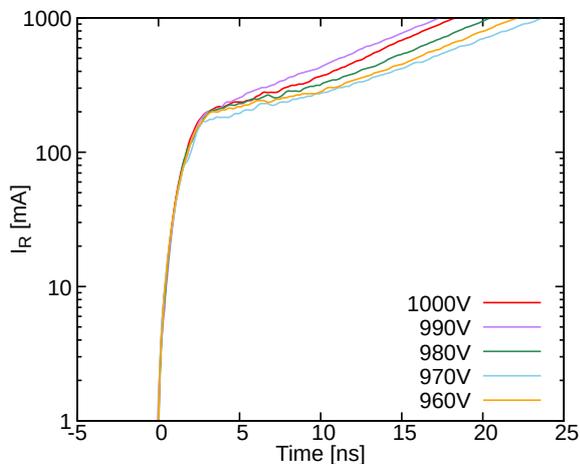


図5 GHMCで測定した並列容量 2 nF で $V_R = 960$ V から 1000 V までスイープさせた時の SEB 電流.

並列容量なしで $V_R = 940$ V と 930 V 時の SEB 電流波形を図 6 に示す. 初期電流のピーク値は SEB の発生に関わらず同じであった. しかし, 時刻 1.5 ns に同じ初期電流ピークが観測された測定において, 印加電圧 930 V では連続して 9 回は SEB が発生せず, 10 回目で初めて SEB が発生した. また, 940 V では 11 回連続で SEB が発生せず, 12 回目に初めて発生した. すなわち, 約 10% の確率で SEB に至る電流の増加が確認された. SEB 電流を詳細に評価すると, 初期電流ピーク後, 電流は一時的に減少し, その後, 変動を繰り返しながら上昇することが確認された. このような挙動は, 過剰なインパクトイオン化が確率的かつ散発的に発生し, その頻度が十分に高い場合にのみ SEB に至ることを示唆している. さらに, SEB 未発生時の電流波形でも同様の変動が測定されたことから, インパクトイオン化は発生するが, その強度が十分になければ SEB は回避することができる可能性が示唆された.

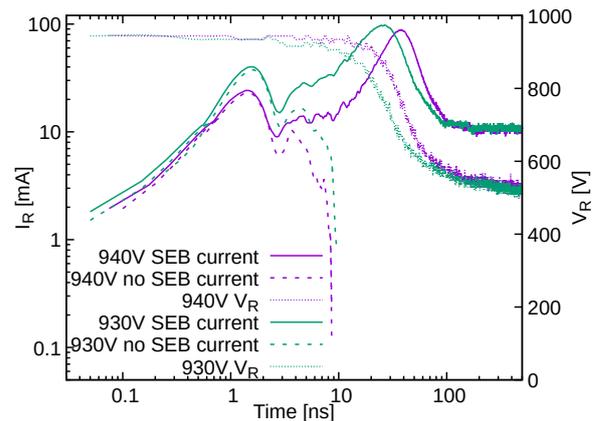


図6 RCNPで測定した, SEB 発生時の電圧降下も含む並列容量なしで $V_R = 940$ V と 930 V の時の SEB 発生時と未発生時の SEB 電流.

4. 考察

4.1. デバイスシミュレーションでの SEB 電流の再現

PHITS [8] を用いて FRD 内の中性子誘起二次イオンの最大 LET とトラック長を計算した. 表 1 は異なるトラック長に対して得られた最大 LET 値である. この中でトラック長 30 μm , 最大 LET 1.5 MeV-cm²/mg が最も発生電荷量が多い組み合わせである. 発生電荷量は LET とトラック長の積で求めることができる. この組み合わせを使用してデバイスシミュレーションと実測の比較を行った. デバイスシミュ

レーションは、FRD の不純物濃度と構造を再現したデバイスモデルを用いて、シノプシス社の Sentaurus により行った。重イオン照射シミュレーションにより SEB 電流を評価した。実測条件、シミュレーション条件ともに $V_R=1000\text{ V}$ に設定した。図 7 は、実測波形とシミュレーション波形を比較したもので、シミュレーション波形のピーク値は実測波形のピーク値よりも大幅に低く、SEB 電流を再現できていないことがわかる。これは従来のデバイスシミュレーションでは SEB 電流を定量的には再現できないことを示唆している。

表 1 PHITS を用いて計算した FRD における中性子起因二次イオンのトラック長別の最大 LET 値。

Track Length [μm]	Maximum LET [$\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$]
0.5	3.5
1	4.5
6	5.5
10	3.5
20	1.5
30	1.5
50	0.5

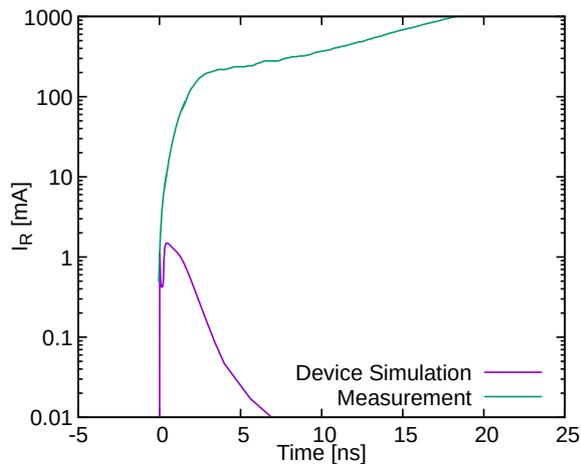


図 7 従来の設定による実測結果とデバイスシミュレーション結果の比較。実測条件、シミュレーション条件ともに、 V_R は 1000 V に設定している。

図 6 から示唆されるように、低確率で発生する過度のインパクトイオン化を再現するために、初期発生電荷を 30 倍に増加させ、インパクトイオン化係数の電界感度を 1.4 倍に増加させた。その結果、図 8 に示すように、シミュレーション結果は実測結果と一致した。このシミュレーション条件の物理的妥当性については、さらなる検討が必要である。しかし、SEB の発生確率が二次イオンの発生確率よりも著しく低く、 V_R とともに指数関数的に増加することを考慮す

ると、散発的な過剰なインパクトイオン化が SEB において重要な役割を果たしている可能性が高い。

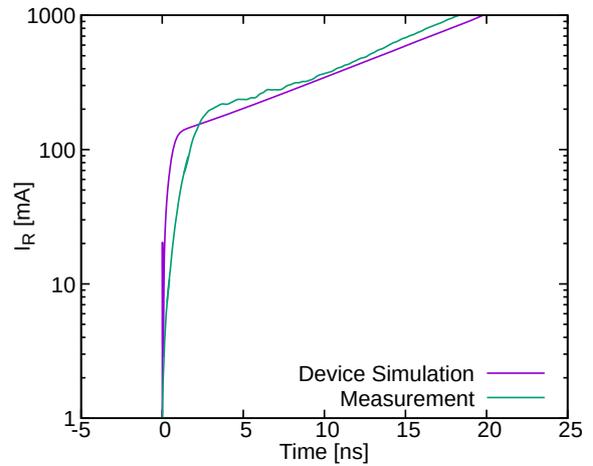


図 8 初期発生電荷量を 30 倍に増加させ、インパクトイオン化係数の電界感度を 1.4 倍に増加させた時の実測結果とシミュレーション結果の比較。実測条件とシミュレーション条件はいずれも $V_R=1000\text{ V}$ に設定している。

4.2. SEB による破壊痕の断面観察

本研究の測定回路を用いることで、並列容量をなしにすることで SEB による破壊痕を抑制できた。光ビーム誘起抵抗変化 (OBIRCH) 法 [11] により破壊痕の位置を特定した 2 種類の SEB による破壊痕に対して電子顕微鏡を用いて断面解析を実施した。図 9 (並列容量なし) と図 10 (2 nF) は、 1000 V 印加時の破壊痕の断面を比較したものである。両方とも永久故障に至ったが、並列容量なしの場合は、2 nF に比べて破壊痕の大きさが小さくなった。2 nF の条件では、電極 Al の浸透、Si の溶融、熱応力によるクラックが顕著であったが、並列容量なしの条件では、これらの影響は緩和され、特にアルミニウムの浸透は小さくなった。破壊痕を抑制することで破壊プロセスの明確な解析と破壊に至る最小電流の測定が可能となり、熱シミュレーションの精度向上に寄与する。

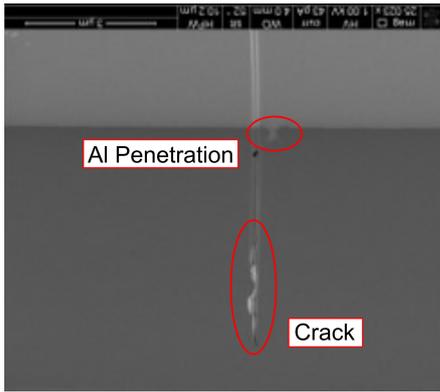


図9 1000 V 印加時の並列容量なしの条件での SEB による破壊痕の断面写真。

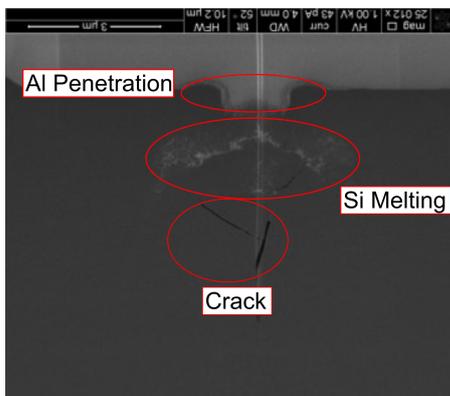


図10 1000 V 印加時の並列容量 2 nF の条件での SEB による破壊痕の断面写真。

5. 結論

本研究では、オシロスコープを用いて SEB 電流を測定した。その結果、SEB 電流は印加電圧と二次イオンの LET の両方に依存し、過剰なインパクトイオン化が重量な役割を果たしていることがわかった。デバイスシミュレーションの結果、従来のモデルでは測定された SEB 電流を完全に再現することができないことがわかった。しかし、初期電荷量とインパクトイオン化係数を調整することで、実測結果との一致が改善された。破壊痕の断面解析の結果、並列容量を小さくすることで破壊痕を抑制できることが示されたが、電極 Al の浸透、Si の熔融、熱応力によるクラックが観察された。

今後の研究では、SEB 発生確率とインパクトイオン化の関係をさらに解析し、シミュレーションモデルの物理的妥当性を改良する必要がある。加えて、S さらなる EB による破壊痕を抑制することで、破壊メカニズムの理解を深める。

6. 謝辞

本研究は、東京大学 VDEC 活動を通して、日本シノプシス合同会社の協力で行われたものである。

参考文献

- 1) T. Shoji, S. Nishida, K. Hamada, and H. Tadano, "Observation and analysis of neutron-induced single-event burnout in silicon power diodes," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 2474-2480, 2015.
- 2) S. Kuboyama, C. Kamezawa, N. Ikeda, T. Hirao, and H. Ohya, "Anomalous charge collection in silicon carbide schottky barrier diodes and resulting permanent damage and single-event burnout," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, no. 6, pp. 3343-3348, 2006.
- 3) T. A. Fischer, "Heavy-ion-induced, gate-rupture in power mosfets," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 34, no. 6, pp. 1786-1791, 1987.
- 4) "MIL-STD-750E," Test method standard – Test methods for semiconductor devices, 2006.
- 5) C. W. Slayman, "Theoretical correlation of broad spectrum neutron sources for accelerated soft error testing," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 6, pp. 3163-3168, 2010.
- 6) R. Nakajima, S. Sugitani, H. Sugisaki, T. Ito, J. Furuta, K. Kobayashi, and M. Sakai, "An approach to neutron-induced ser evaluation using a clinical 290 mev/u carbon beam and particle transport simulations," in *2024 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, 2024.
- 7) D. Oberg, J. Wert, E. Normand, P. Majewski, and S. Wender, "First observations of power mosfet burnout with high energy neutrons," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, no. 6, pp. 2913-2920, 1996.
- 8) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe et al., "Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – phits version 3.33," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 127-135, 2024.
- 9) "Measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor devices," in *JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION.*, October 2006.
- 10) A. Sengupta, D. R. Ball, A. L. Sternberg, S. Islam, A. S. Senarath, R. A. Reed, M. W. McCurdy, E. X. Zhang, J. M. Hutson, M. L. Alles, J. M. Osheroff, B. Jacob, C.

W. Hitchcock, S. Goswami, R. D. Schrimpf, K. F. Galloway, and A. F. Witulski, "Let and voltage dependence of single-event burnout and single -event leakage current in high-voltage sic power devices," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 71, no. 4, pp. 809-815, 2024.

- 11) K. Nikawa, "Optical beam induced resistance change (obirch): overview and recent results", in *The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2003. LEOS 2003.*, vol. 2, 2003, pp. 742-743 vol.2.