

エッジ終端構造を有する IGBT モデルによる UIS 時の電流フィラメント生成および破壊モードの TCAD 解析

三塚 要* 小野澤 勇一 (富士電機)
中川 明夫 (中川コンサルティング事務所)

TCAD analysis of current filament formation and failure mode during UIS of IGBT with edge termination structure
Kaname Mitsuzuka*, Yuichi Onozawa (Fuji Electric Co, Ltd.)
Akio Nakagawa (Nakagawa Consulting Office, LLC.)

We successfully predicted the avalanche energy capability of IGBTs with edge termination structure. We found that the current filament is first formed in the deep Pwell region of the edge termination region. Then, the current filament gradually moves to the active region. The current filament moves around inside the active cell region and does not return to the Pwell. When the local temperature of the current filament exceeds 700 K, a severe latch-up occurs and the device fails. We also revealed the difference of two UIS failure modes. The calculated results agreed well with experiments.

キーワード : IGBT、アバランシェ耐量、エッジ終端構造、ラッチアップ、デバイスシミュレーション
(IGBT, Avalanche capability, Edge termination, Latch up, Device simulation)

1. 背景・導入

近年、産業用途向けだけでなく車載向けなどその用途を拡大している IGBT デバイスは、低損失と高破壊耐量のバランスが取れた優れた素子である。今後、その性能向上とコストダウンのため、より一層のデバイス薄化と高電流密度化が進んでいく見通しとなっている。しかし、デバイス体積の縮小と、高電流密度化は、デバイスの堅牢性（破壊耐量）を低下させる

大きな要素であり、各種の破壊メカニズムを詳細に理解し、その対策手法を見出ししていくことが今後の性能向上に向けて重要となってきた。中でも Unclamped Inductive Switching (UIS) 中の動的なアバランシェ特性は、RBSOA 耐量を決める鍵となるスイッチング特性である。これまで、UIS 時の電流フィラメントを実験的に観測した報告[1, 2]や、TCAD によるシミュレーション解析の報告[3-5]がなされている。シミュレーション検証においては、電流フィラメントの発生や挙動を解析するためには、

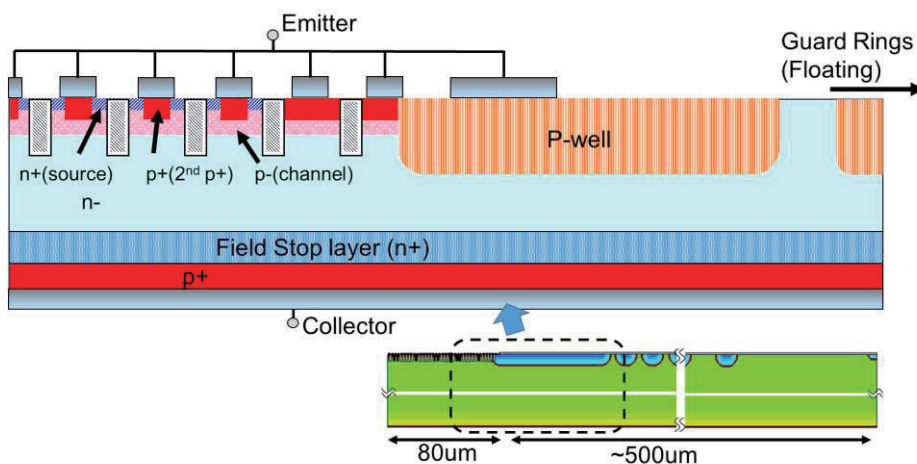


図 1 エッジ終端構造を有する IGBT(A), (B) の 2 次元構造
Fig. 1. 2D structure of IGBT (A) and (B) with edge termination.

IGBT の単位セルでは再現が難しく、複数のセルを結合した大規模なシミュレーションモデルが必要であることが詳細解析への課題であった。また、例え、均一な複数セルを有する IGBT 構造モデルにて UIS シミュレーションを実施した場合、アバラシエ電流のフィラメントは面内ランダムな場所で形成され、計算して得られた破壊時のアバラシエエネルギー（ターンオフ損失）は、再現性がなく、破壊箇所もランダムな結果となることが確認されている。参考文献 5 は、IGBT の活性部に隣接した周辺領域を設けることで、活性部での安定した電流フィラメント形成がシミュレーション上で得られることを報告している。しかしながら、参考文献 5 でも、故障を正確に記述するために依然として構造的に弱い部分を設けて破壊を再現している。本論文では、さらに実態に近いモデルとしてエッジ終端構造を有した IGBT モデルを用い、UIS 時のアバラシエ破壊エネルギーを予測することに成功した。さらに実験結果との比較を実施し、考察を行った。

2. デバイス構造、および Sim.解析方法・結果

図 1 に本解析で用いたエッジ終端構造を有した IGBT モデル

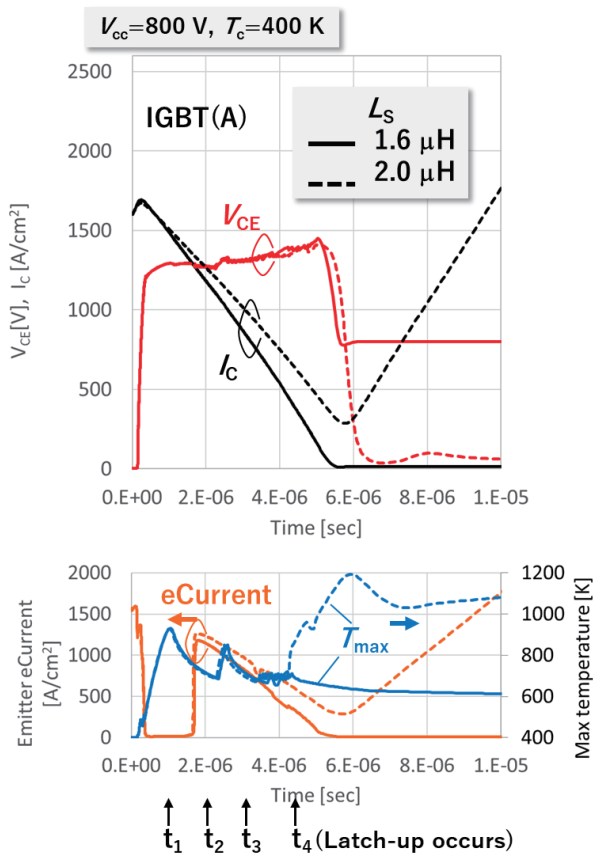
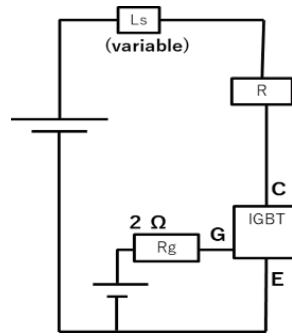


図 2 TCAD シミュレーションによるエッジ終端構造を有した複数 IGBT 構造(A)の UIS 波形。Si 格子内の最大温度とエミッタ部の電子電流密度を下側のグラフに記載。

Fig. 2. Calculated UIS waveform of IGBT multi-cells with edge termination structure (A). Maximum temperature and electron current density of Emitter electrode are shown in the lower figure.



$V_{CC}=800 \text{ V}$, $I_c=400 \text{ A}$, $T_j=125 \text{ deg.C}$

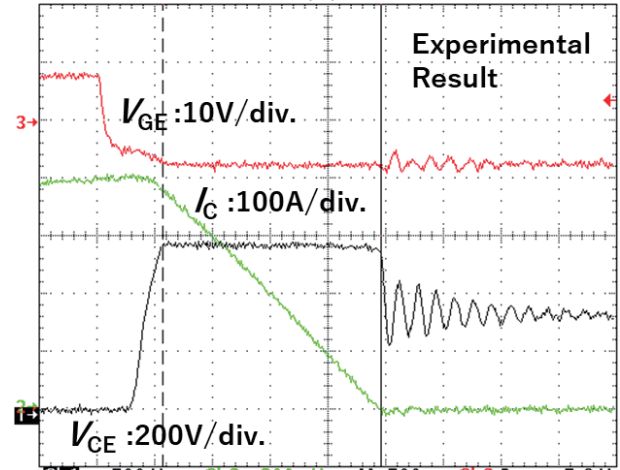


図 3 1200V 定格 IGBT の実測の UIS 波形 および、測定回路図。

Fig. 3. Measured UIS waveforms of 1200V class IGBT and the measurement circuit.

の断面図（2次元構造モデル）を示す。トレンチゲート構造を有する一様な IGBT 構造（ $80 \mu\text{m}$ ）に対し、ガードリング構造のエッジ終端構造（約 $500 \mu\text{m}$ ）が、P ウェルを介して接合されている。本デバイスは、1200V 定格を想定したモデルであり、意図的に弱い部分を構造内に作り込むことなどは行っていない。シミュレーションは、自己発熱による温度変化を考慮して計算を実施している。

図 2 に、このエッジ構造を有する IGBT(A) で計算された UIS 波形を示す。\$V_{CE}\$ 波形は 1250V ほどで、ほぼ平坦な自己クランプ電圧を示し、図 3 に示す実験的に観測した 1200V 定格の IGBT の UIS 波形と良く一致した。シミュレーションでは、回路インダクタンス \$L_s\$ が $1.6 \mu\text{H}$ から $2.0 \mu\text{H}$ に増加させたときに、デバイスの故障が発生した。この \$L_s=2.0 \mu\text{H}\$ の時の波形における時間ステップごとの電流密度と格子温度の分布を図 4 に示す。内部状態の解析から、エッジ終端領域の境界部にある P 拡散層である Pwell 領域（図 1 に記載）で、始めに電流フィラメントが形成されることがわかった。図 5 のように、本構造の活性部セルおよびエッジ終端領域それぞれの \$I_c\$-\$V_{CE}\$ カブを計算すると、エッジ終端領域の降伏電圧が活性 IGBT 領域の降伏電圧よりも低いことが分かり、このためにアバラシエが Pwell 領域より開始していると示唆される。その後、局所的に発

生する大きなジュール熱により、Pwell 部の温度が上昇し、降伏電圧が上昇するので、電流フィラメントは次第に活性 IGBT 領域に移動する。電流フィラメントにより活性部セルも局所的に温められ、その部分の降伏電圧増加にともない、フィラメントは別のセルに移動をし続け、Pwell には戻らない。電流フィラメントの局所温度が 700K を超えると、図 2 の温度波形(破線)に示すように、真性のラッチアップが起これり、急激な温度上昇のためにデ

バイスが故障する。

また、IGBT(A)と比較して 4 倍のコレクタ p+ドーズ量を有する IGBT(B)の UIS 波形を同様に計算した(図 6 (a))。また Tabel 1 は IGBT (A) と(B)の計算結果の比較である。大きな違いとして、IGBT(B)の UIS での破壊箇所は、図 6(b)に示すように IGBT 活性部セルではなく、Pwell 領域であり、破壊に至るアバランシェエネルギーが約 57 %と低い。ここで IGBT(A)と

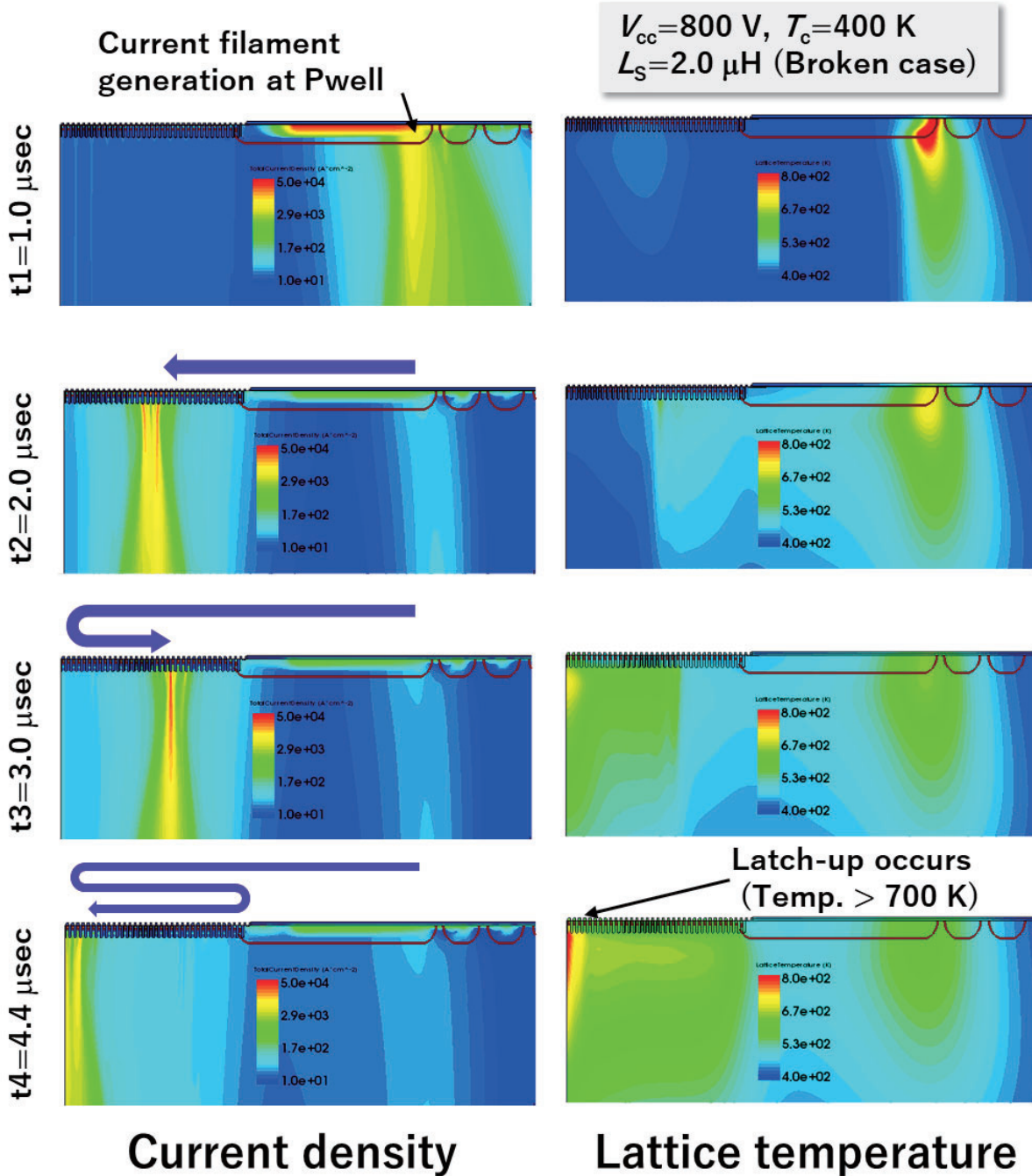


図 4 $L_S=2.0\ \mu\text{H}$ 時の UIS 計算 (IGBT (A)) における各時間での電流密度分布および格子温度分布。紫色の矢印が電流フィラメントの移動経路を示す。

Fig. 4. Current density and lattice temperature distribution during UIS for IGBT (A), when $L_S=2.0\ \mu\text{H}$. The purple allows traces the movement of current filament.

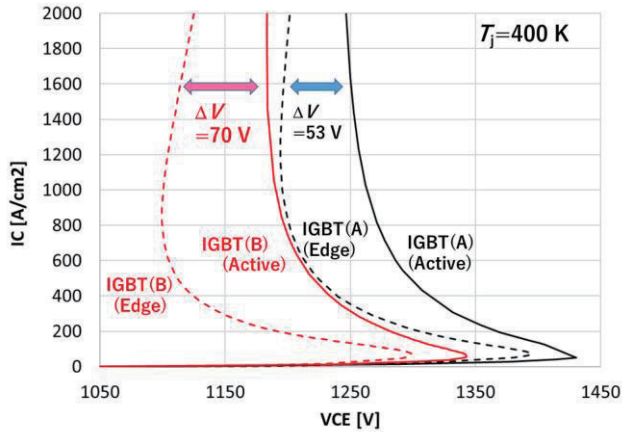


図 5 IGBT (A)および(B)の活性部 IGBT セルとエッジ 終端構造の I_C - V_{CE} カーブ 計算値 ($V_{GE}=0$ V)。

Fig. 5. Calculated static I_C - V_{CE} curves of active IGBT region and edge termination region for IGBT(A) and IGBT(B) ($V_{GE}=0$ V).

IGBT(B)の特性差に着目すると、図 5 で示す活性 IGBT セルとエッジ 終端構造の静的な I_C - V_{CE} カーブに違いが見られる。図 5 のグラフにおいて、1600 A/cm² の電流密度での IGBT セルとエッジ 終端間の電圧差 ΔV は、IGBT(B) で 70 V、IGBT(A) で 53 V である。 ΔV が大きいと、電流フィラメントがエッジ 終端領域から活性部セルへ移動するための降伏電圧の上昇がより大きくなければならず、電流フィラメントがエッジ 領域から活性部領域へ移動しにくくなる。そのため、IGBT(B)では、電流フィラメントが活性部へは移動しないまま、Pwell 部にて破壊が生じたと推定される。この結果、IGBT(B)は IGBT(A)よりも小さな L_s で破壊が生じている。図 7 に実際のデバイスのコレクタ p+ のドーズ量を変化させた場合の破壊に至るアバランシェエネルギーの依存性を示す。シミュレーションの結果と同様に、コレクタ p+ のドーズ量増加 (4 倍) で、破壊耐量が低下する結果が得られ、よく一致する。また、図 8 で、IGBT(B)に相当する高濃度のコレクタ p+ を注入した条件チップについて、UIS での破壊した故障ポイントの写真を示すが、観測されたすべての破壊点は活性部とエッジ 終端領域の境界にある Pwell 領域に位置しており、シミュレーション結果とも符合する結果であった。

表 1 計算結果の比較

Table 1. CALCULATED RESULT SUMMARY

Model	Collector p+ peak concentration	I_C [A/cm ²]	E_{ava} [J]	Failure Point	ΔV at 1600 A (V)
	[Norm.]				
IGBT(A)	x 1	1600	6.13	Active Area	53
IGBT(B)	x 4		3.51	Pwell	70

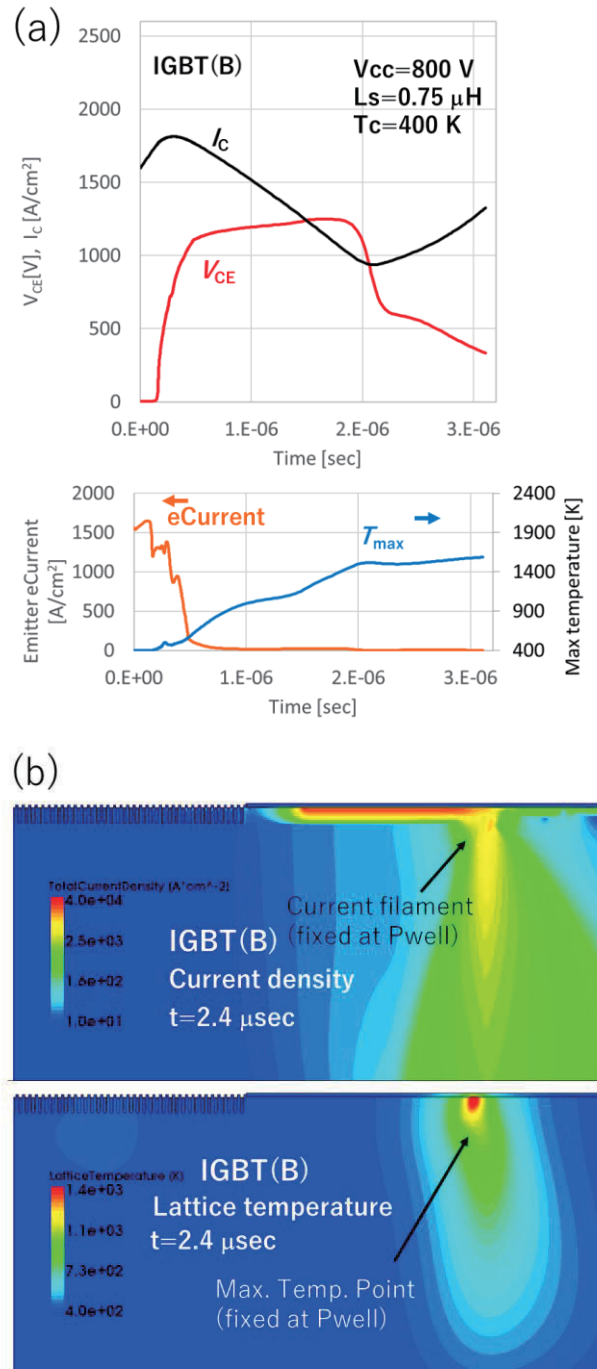


図 6 (a) コレクタ p+ のドーズ量を 4 倍にした IGBT (B) の UIS 計算波形。(b) $t=2.4 \mu s$ 時の IGBT (B) 内の電流密度および格子温度分布。

Fig. 6. Upper figure (a) shows calculated UIS waveform of IGBT (B) with higher Collector p+ dose. Lower figure (b) shows current density and lattice temperature distribution of IGBT (B) at $t=2.4 \mu s$.

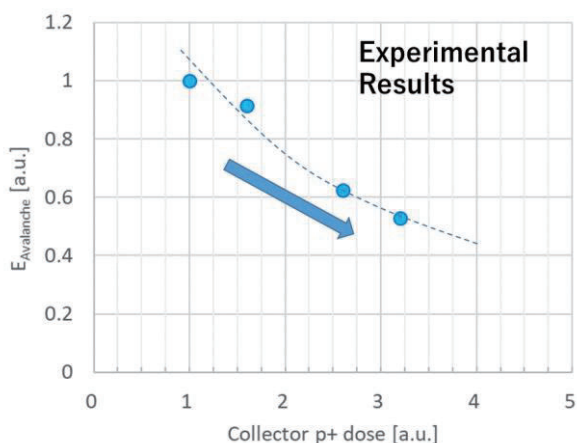


図7 IGBTが破壊に至るアバランシェエネルギーのコレクタp+ドーズ量依存性（実験値）。

Fig. 7. Collector p+ dosage dependence of measured avalanche energy of IGBTs.

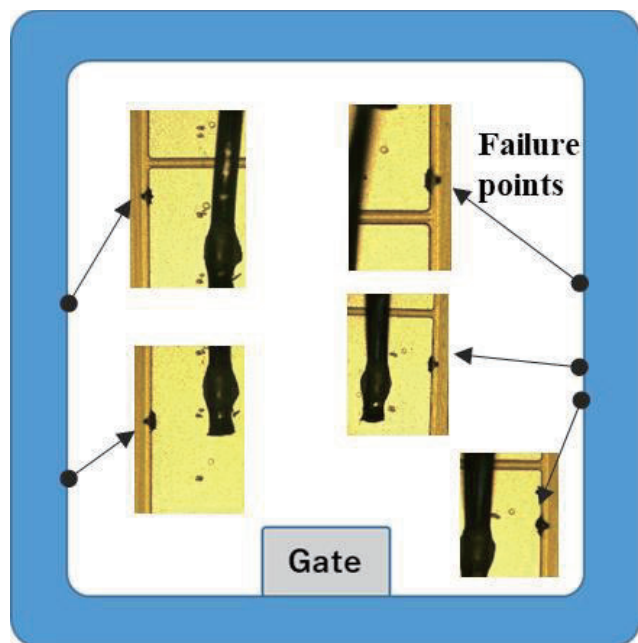


図8 IGBT(B)相当の高濃度コレクタp+条件チップのUIS測定時の破壊位置観察結果(測定数5個)。

Fig. 8. Observed failure points of IGBT(B) with higher Collector p+ after UIS measurements (n=5).

3. 結論

本論文ではエッジ終端構造を有するIGBTのアバランシェエネルギー耐量の予測をシミュレーションにて検証した。UIS時、エッジ終端構

造のPwell部で電流フィラメントが形成され、それが活性部セル領域へ移動し、活性部内で移動を繰り返す。アバランシェ電流により、局所的な温度が700 Kを超えると、真性のラッチアップが発生し、デバイス破壊が生じることがわかった。さらに、故障のモードがコレクタp+のパラメータで変化することを明らかにした。それらは、実験結果とよく一致することを確認した。

文 献

- [1] A. Irace, P. Spirito, M. Riccio, and G. Breglio "Voltage drops, sawtooth oscillations and HF bursts in Breakdown Current and Voltage waveforms during UIS experiments" In Proceedings of ISPSD'2012, p.165-168, June 2012.
- [2] M. Riccio, L. Maresca, G. De Falco, G. Breglio, A. Irace, P. Spirito, and Y. Iwahashi "Cell pitch influence on the current distribution during avalanche operation of Trench IGBTs: design issues to increase UIS ruggedness" In Proceedings of ISPSD'2014, p.111-114, June 2014.
- [3] M. Riccio, A. Irace, G. Breglio, P. Spirito, E. Napoli, and Y. Mizuno "Electro-thermal instability in multi-cellular Trench-IGBTs in avalanche condition: experiments and simulations" In Proceedings of ISPSD'2011, p.124-127, May 2011.
- [4] M. Tanaka, N. Abe, and A. Nakagawa "Impact of 3D simulation on the analysis of unclamped inductive switching" Japanese Journal of Applied Physics 59, SGGD01-01-06, 2020.
- [5] T. Shoji, T. Fukami, T. Ueta and K. Hamada "Investigations on current filamentation of IGBTs under unclamped inductive switching conditions" In Proceedings of ISPSD'2005, p.227-230, May 2005.