

氏名	織田 哲男
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博理工 690 号
学位授与年月日	令和4年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
学位論文題目	パワーデバイスにおける宇宙線破壊の電界依存メカニズムに関する研究
審査会	委員長 岩本 知広 小峰 啓史 篠嶋 妥 小林 裕

論文内容の要旨

近年、低炭素社会の実現に向けた省エネルギー化が求められている。電力用半導体は電気機器の制御や電力の変換に広く利用されており、エネルギーの変換効率の向上による省エネルギーへの貢献が期待され、これらに用いられる電力変換器に内蔵される電力用半導体の高性能・高信頼化も必須技術となっている。本研究では、最新の電力用半導体デバイスの長寿命化を目的に、特に劣化起因とは異なり偶発故障を引き起こす宇宙線破壊現象について、電界依存メカニズムの解明に取り組んだ。本実験では J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) での中性子照射による加速実験から宇宙線耐量を見積もり、得られたデバイス構造や試験仕様の依存性から、破壊メカニズムを解析した。

(1) 白色中性子を用いた加速試験

J-PARC のビームラインを用いてワイブルプロットで $m=1$ を示す偶発故障を各耐圧クラスの IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) 及びダイオードで再現させ、想定した故障率カーブが得られることを確認した。実験に用いた白色中性子スペクトルは自然放射に比べて 100MeV 以上の高エネルギー側で強度が下がるが、実測とのフィッティングを併せることで所定電圧での故障率を推定可能であることを確認した。

(2) 宇宙線破壊主要因の調査

宇宙線による破壊としてはこれまで大きく2つのモードが報告されている。一つは裏面からのキャリア注入によるバイポーラトランジスタ動作での破壊、もう一つは高電界下でのアバランシェ電流によるジュール熱による破壊である。低耐圧 IGBT クラスの IGBT では n-ドリフト層厚さが薄いため、裏面からのキャリア注入によるバイポーラトランジスタ動作モードでの破壊が支配的との報告があるが、破壊が高電界下でのジュール熱モードからバイポーラモードに変わる耐圧クラスの境界については様々な見解がある。本研究では 1700V 耐圧 IGBT で n-ドリフト層厚さ、抵抗率、裏面 p+コレクタ層の有無を変えたサンプルを用いて、破壊モードが変わる境界を含めて、どちらの破壊モードが支配的かを調査した。結果、通常は 750V クラスの低耐圧 IGBT で用いられる、n-ドリフト層厚さが最も薄い 90 μm 以下においても故障率は裏面 p+コレクタ層の有無には影響されず、n-ドリフト層厚さ及び抵抗率に影響されることを確認した。また、低耐圧 IGBT を含めて、バイポーラ動作による破壊モードが生じないことを明らかにした。

(3) デバイスシミュレーションによる破壊メカニズム解析

TCAD (Technology Computer Aided Design)を用いたシミュレーションにより中性子照射後のデバイス内部に2回の電流ピークが存在することを確認した。1回目のピークは裏面 p+コレクタ層の有無によらず同等の強度であるが、2回目のピークでは裏面 p+コレクタ層を有する構造でのホール電流増加が大きいことが分かった。裏面 p+コレクタ層の有無にかかわらず、ともに1回目のピーク直後にゲート電極下電界が増加して、その後、p+コレクタ層を有する構造においては、コレクタ電極側からのホール注入が開始されている。実験データでは裏面 p+コレクタ層の有無で故障率に差がないことから、裏面からホール注入が開始される前の1回目のピーク電流時の内部状態が破壊に影響している可能性が高いと結論できた。

(4) 広範囲な耐圧クラスの故障率評価による電界影響解析

宇宙線による破壊に対する電界の影響について、これまでにクリティカルな要因として、最大電界強度、またはある閾値を超えた電界強度などが報告されている。本研究ではクリティカルな要因を明らかにするために、750V から 6500V 耐圧の IGBT 及びダイオードを用いて故障率の電界強度依存性を調査した。結果は、低耐圧 IGBT では最大電界強度が高いにも関わらず、高耐圧 IGBT に比べて故障率の増加は見られなかった。ダイオードは IGBT と違い裏面 p+コレクタ層が無い構造であるが、印加電圧を空乏層幅で割った平均電界強度を横軸にした場合に、IGBT、ダイオード及び耐圧クラスによらず、ユニバーサルな関係を示すことが分かり、平均電界強度がクリティカルな要因であることを確認した。また 750V 耐圧の IGBT はドリフト層厚さが 90 μm 以下であり且つ最大電界強度が高く、他の IGBT に比べて裏面からのキャリア注入の影響を最も受けやすい構造であるにも関わらず、故障率の増加は無かった。この結果からもバイポーラ動作による破壊モードが発生していないことが結論できた。

(5) デバイスシミュレーションによる電界影響メカニズム解析

TCAD を用いたシミュレーションにて、平均電界一定で最大電界を変えた場合、及び最大電界と平均電界をともに変えた場合で照射後のデバイス内で生じる電流の時間依存性を調査した。平均電界一定で最大電界を変えた場合は 1 回目のピークに差は生じず、最大電界と平均電界を変えた場合に 1 回目のピークに差が生じたことから、平均電界と 1 回目のピーク電流に関連があることを確認した。これは実験で得た平均電界がクリティカルであるという結果と、前述の 1 回目のピーク電流時の内部状態が破壊に影響する可能性が高いという結果と一致する。

(6) SiC デバイスの宇宙線破壊耐量

SiC デバイスにおける宇宙線破壊耐量を調査し、故障率が同じになる平均電界は Si デバイスの 10 倍程度大きいことを確認した。これは Si に対して、SiC の絶縁破壊電界強度が約 10 倍高いこととほぼ一致する。Si との最大電界強度比 9.3 と完全に一致しない点については、SiC と Si の耐熱性が影響していると考えられる。

(7) まとめ

宇宙線破壊の電界依存メカニズムの解析に取り組み、これまで報告されている主な破壊モードである、1) n/n+境界でのインパクトイオン化から生じたキャリアによるバイポーラトランジスタ動作破壊、2) 高電界下でのアバランシェ電流によるジュール熱破壊のうち、バイポーラトランジスタ動作破壊モードについては、本事象が発生しやすいとされている、通常は 750V クラスの低耐圧 IGBT で用いられるような n-ドリフト層厚さが最も薄い 90 μm 以下の場合においても発生しないことを明らかにした。また、750V から 6500V 迄の IGBT、ダイオードにおいて、印加電圧を空乏層幅で割った平均電界と故障率がユニバーサルな関係であることを確認し、クリティカルな破壊要因が最大電界強度ではなく、空乏層幅で平均した電界強度であることを明らかにした。本研究の成果はパワーデバイスの更なる信頼性向上とロバスト性の高いデバイス設計に貢献できる。

