

氏名	庄司智幸
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 7660 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	パワーデバイスの宇宙線破壊耐量に関する研究

主査	筑波大学教授 工学博士 只野博
副査	筑波大学教授 理学博士 秋本克洋
副査	筑波大学教授 工学博士 岩室憲幸
副査	産総研主任研究員 工学博士 原田信介
副査	

論 文 の 要 旨

自動車の電動化に伴い、多くのパワーデバイスが自動車の駆動に使用されるようになってきているが、これらのパワーデバイスには高い信頼性の確保が要求される。本論文は、この自動車用パワーデバイスの信頼性に関連し、偶発故障の要因の一つとして考えられる宇宙線によって引き起こされる永久破壊 (Single-Event Burnout; SEB) に関する破壊メカニズムの解明を、実験、シミュレーション、及び熱伝導方程式に基づく理論解析より明らかにした。

対象とするパワーデバイスに宇宙線とほぼ同じエネルギー分布を有する白色中性子線を照射し、SEB 故障現象を評価した。Si-IGBT の場合、故障確立の印加電圧依存性が見られ、故障確立はある閾値を超えた電圧を印加することで急速に増加した。また、パワーデバイスのドリフト層厚さ依存性が見られ、ドリフト層が厚いほど、SEB 閾値電圧は高くなった。従って、Si-IGBT において宇宙線破壊を避けるためには、ドリフト層厚さを厚くするかこの閾値電圧以下の電圧印加で使用する必要があることが分かった。

SEB による破壊痕の観察より、白色中性子線照射による SEB で発生したデバイスの破壊痕は、Si デバイスでは表面の金属配線 (Al) を含めた溶融が起こり円形状の破壊痕として、また SiC では内部での急激な温度上昇により発生した応力による内部クラックとして観察されることを明らかにした。またこの現象は、熱伝導による解析結果とよく一致し、熱的な破壊であることが裏付けられる。破壊痕の大きさは、Si ダイオードの場合 $0.34 \mu\text{m}$ 、Si-IGBT の場合 $1.79 \mu\text{m}$ の直径であった。また SiC デバイスの場合内部に直径 $80 \mu\text{m}$ に及ぶクラックの発生が見られた。

各素子の破壊現象解明のため、デバイスシミュレーションを用いて内部のキャリア状態、電界状態、温度分布の解析を行った。その結果、白色中性子線照射によって生じた電子と正孔が、電界によって移動しキャリア分布を変化させ、その結果として電界分布が変化し大電流が流れることを明ら

かにした。この大電流は、Si-IGBT の場合寄生バイポーラトランジスタの導通を引き起こし、これによって Si-IGBT がラッチアップして破壊に至る。これは、Si-IGBT の SEB が閾値電圧を有し、デバイスのドリフト層厚に依存して変化する実験事実を良く説明する。SiC デバイスの場合、電界分布がハンモック型となり、パンチスルーが起こることによって破壊が引き起こされることが推定された。

これら SEB による破壊現象、破壊痕の大きさ等に対し、熱伝導方程式を用いた解析を試みた。その結果、破壊痕の大きさ(Si ダイオードの場合直径 $0.34 \mu\text{m}$ の円形状破壊痕)は熱伝導方程式から想定される破壊の大きさ(直径 $0.406 \mu\text{m}$)とほぼ同じであり、破壊が中性子線照射によって発生した電子正孔が電界分布を変化させ、それに伴って大電流が流れ発熱することによる破壊であることが分かる。Si-IGBT の場合も同様に直径 $1.09 \mu\text{m}$ と見積もられ、実験結果に近い値を示した。

この熱伝導方程式を用いた解析手法を、SiC-MOSFET の電気的な信頼性評価の項目として重要な短絡耐量評価に適用し、SiC-MOSFET の短絡耐量が熱エネルギーの量で説明できることを明らかにした。また、その時の熱エネルギー量のドリフト厚依存性は実験値 $0.969 \text{J cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 、計算値 $1.048 \text{J cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ と良い一致を見た。

審 査 の 要 旨

[批評]

電力用パワーデバイス、特に自動車に用いられるパワーデバイスは、自動車の駆動に直結し高い信頼性が求められる。一般的には電気的な信頼性であるが、自動車の使用環境を考えた場合、宇宙線照射による破壊も懸念される項目である。著者はこの点に着目し、実験解析を行っている。このような観点で破壊を解析している例はほとんどなく、非常に貴重な研究であり、自動車用半導体の信頼性に対しては重要な観点での研究と言える。

本論文は、宇宙線照射が引き起こす破壊現象に着目し、その現象の詳細な観察・解析と、デバイスシミュレーションを用いた内部現象の推定および破壊に至る過程の同定を行い、破壊現象を説明するメカニズムを示した。この解析は、現在の半導体パワーデバイスの主たるものとして用いられている Si ダイオードと Si-IGBT のみならず、次世代のパワーデバイスとして期待されている SiC ダイオードと SiC-MOSFET にまで及び、その利用価値は高い。

検証内容は詳細にわたり、内部の現象解析からその破壊痕の大きさを見積っており、また破壊痕が Si の場合円形の熔融痕となること、SiC の場合、内部に広範囲にわたるクラックを伴っていることを示し、更に破壊痕の大きさに関し熱伝導方程式を用いた理論的な解析を実施し、原理的な熱伝導の解析が、破壊痕の大きさを良く表現できることを示した。この解析結果は、本論文が単に現象を観察しシミュレーションにてそれを推定するだけに留まらず、熱伝導方程式を用いた理論的・原理的検証を行ったもので、この原理的検討結果から、本論文で結論付けた SEB に伴う破壊メカニズムの妥当性が示される。また、この検討をさらに進め、SiC-MOSFET における短絡耐量の解析にまで発展させて、このような解析の有用性を示しており、得られた知見を広げさらに展開した研究成果である。

前述したように、特に自動車用パワーデバイスの信頼性は重要な研究項目であり、種々の観点から研究開発が行われている。本論文の着目した SEB も重要な信頼性に関する研究課題であり、著者はその現象を解析しメカニズムを示し、破壊が局所的な発熱で説明できることを、原理的な解析も踏まえ説明しており、実際のパワーデバイスの高信頼化に役立つと共に、その原理的解析手法、現象

観察から破壊過程の推定、原理的な裏付けの手法は、破壊解析に関する学問的な価値は高い。

〔最終試験結果〕

平成 28 年 2 月 17 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。