

半導体デバイスの宇宙放射線影響に関する研究の最新動向と今後の展望

坂本 敬太

Sakamoto Keita

新藤 浩之

Shindou Hiroyuki

1. はじめに

半導体デバイスに対する放射線影響の研究は、20世紀半ばから始まり、現在も続く長い歴史を持つ研究分野である。太陽電池や半導体検出器の変位損傷に関する研究が1960年代に始まったのを皮切りに、1970年代以降、ICや集積回路等の半導体デバイス全般を研究対象に広げた電離損傷の研究も精力的に行われ、非常に多くの研究論文報告がなされている（研究の歴史的経緯含めた詳細は、参考文献1-2）を参照）。宇宙空間に眼を向けると、そこは高エネルギーの陽子や電子、重粒子イオン等が飛び交う空間であることが知られている。地球周辺の宇宙空間には、銀河遠方での超新星爆発に由来する銀河宇宙線、太陽活動に伴って発生する太陽宇宙線（主には陽子や電子で構成される）、地球磁場に捕捉された陽子や

電子で構成される帯状の地帯（ヴァン・アレン帯）が存在する。人工衛星やロケットに搭載される半導体デバイスは、これら宇宙放射線の影響を避けて通ることができず、その結果として発生する誤動作や損傷のメカニズムを理解し、宇宙機システムが機能不全に陥ることを防ぐ対策技術構築が非常に重要なことになる。本稿では、半導体デバイスの放射線影響に関する基本的な解説と研究動向、今後の展望を述べる。

2. 半導体デバイスの宇宙放射線影響の分類

半導体デバイスは一般に、SiやGaAs等の半導体、配線層を構成するAlやCu等の金属、 SiO_2 等の絶縁膜から構成される。このうち、特に放射線影響を受けるのが、半導体と絶縁膜の部位である。半導体に放射線が入射した際の基本相互作用は、電離損傷

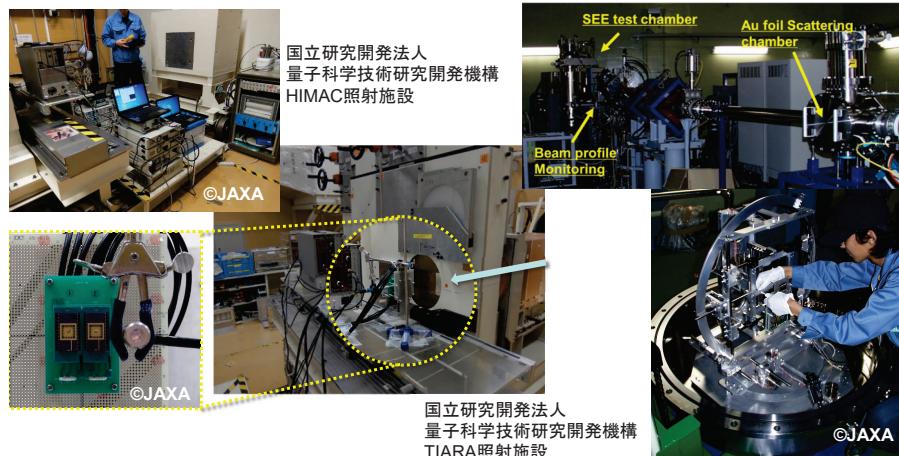


図1 加速器を用いた半導体デバイスに対する放射線照射試験

(左側3枚) HIMACでデバイスと粒子計測用のセンサをセットした様子
(右側2枚) TIARAで評価ボードを取り付けている様子

と変位損傷の2つである。電離損傷とは、放射線粒子が半導体を構成する原子の軌道電子を弾きだすことによって多数の電子正孔対を生成することがきっかけとなり、半導体デバイス中の電界によってこれらの電荷が収集され、デバイスに対するパルス状のノイズとなり、その結果としてデジタル情報のビット反転や誤動作、損傷を引き起こすモードである。電離損傷は更に、たった1つの放射線粒子が入射したことによる影響（シングルイベント効果：Single Event Effect）と、長期間の被ばくによる累積的な影響（トータルドーズ：Total Ionizing Dose）に分類される。一方、変位損傷とは、半導体を構成する原子が弾き出されることによって欠陥が生じ、これがデバイスの電気特性を劣化させる事象である。これらを観測する手段として通常、加速器を用いた照射試験（図1）が行われる。

3. 試験解析手法

照射試験の一般的な構成の概略を図2に示す。照射試験で重要なポイントとなるのは、放射線を生成・放出する線源部、放射線が通る照射コース、及び評価対象のデバイス等を配置する被照射部のセットアップである。ここでは、シングルイベント効果及びトータルドーズの一般的な試験方法について述べる。

シングルイベント効果の評価を行う場合、放射線の発生として高エネルギーの荷電粒子を人工的に生成可能な加速器を用いることで、荷電粒子のエネルギーと照射線量（毎秒・単位面積当たりに飛来する粒子の数）が既知の陽子や重粒子を射出することができる。照射コースとしては、真空中で荷電粒子を輸送する真空照射と、大気中で輸送する大気照射の2つの方法があり施設によって異なる。シングルイベント効果の評価に際しては、1発の荷電粒子がデバイス内部に与えるエネルギーを表す線エネルギー付与（LET：Linear Energy Transfer）が重要な指標となる。真空中と大気中とでは、荷電粒子のエネルギーの減衰速度が異なるため、加速器の出射端からデバイスまでの距離が同一であったとしても、肝心のデバイス内部のLETは一致しない。このため、照射コースも含めた上で照射目的に合致しているかをおさえることが重要となる。被照射部には、評価したいデバイスを設置する。加速器で発生可能な荷

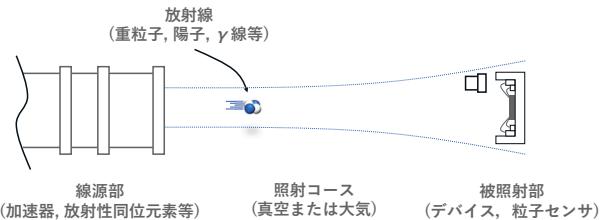


図2 照射試験の概略図

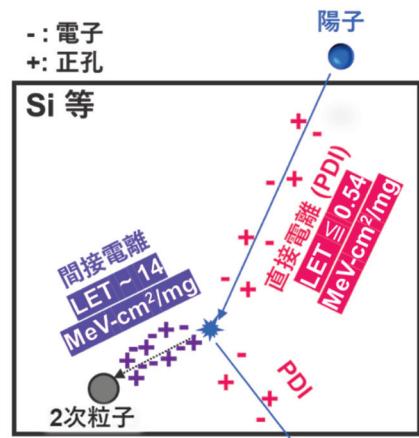


図3 陽子と半導体との相互作用

電粒子は、数MeV～数百MeV程度が一般的である（GeVオーダーまでの発生可能な装置もあるが少ない）。このため、事前にデバイスのパッケージを開封して蓋を外し、チップを露出させておくことで荷電粒子を確実にデバイスに照射可能な状態とすることも重要である。また、デキヤップは荷電粒子を届かせるためだけではなく、パッケージによるエネルギー減衰の効果を除外できるため、より精度の高いLETを照射することにも繋がる。被照射部には、粒子計測用のセンサを設置することも多い。図2に示したように、線源部から被照射部までは距離があるため、加速器運用側で保有している荷電粒子のエネルギーと照射線量をそのまま使うことができない。このためデバイスの近くにセンサ等を設置して荷電粒子の特性を取得する必要がある。

トータルドーズの評価では、⁶⁰Coのような放射性同位元素を用いて放射線（γ線）を照射することが主流である。⁶⁰Coを用いたγ線照射の場合、エネルギーは固定でかつほとんど減衰を考慮する必要がないことから、照射コースは大気照射となる。線源からの照射線量は放射性同位元素の数量によって決まるため、線源とデバイスとの距離を変えることでデバイスへの照射量を調整することができる。被照射

部にはデバイスを設置するが、加速器とは異なり放射性同位元素は線源を中心として放射状に放射線を放出すること、線源とデバイスとの距離によるエネルギー減衰がほとんどないことから、照射領域内であれば複数のデバイスを同時に設置可能であることが多い。またトータルドーズ試験においても、デバイスの直近に照射量（ドーズ量）を計測するためのセンサを設置しておき、照射後にデバイスの線量を知ることができる。

4. 最新の研究動向～先端半導体デバイスで顕在化する新たな事象

ここでは、最新の研究動向として、シングルイベント効果の1つである低エネルギー陽子の直接電離（PDI：Proton Direct Ionization）によるソフトエラー発生頻度への影響について紹介する。荷電粒子による半導体の電離損傷は、直接電離によるものと間接電離によるものの2つがある。図3に示すように、陽子とシリコンとの相互作用の場合には、直接電離で付与する最大LETが $0.54\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ であるのに対して、間接電離の場合は約 $14\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ である。対して、デバイスの閾値LET（エラーに要する最小のLET）はテクノロジーノードに対してトレンドがあることが知られており³⁾、回路線幅が 100 nm より大きい世代の閾値LETは $1\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 以上であったことから、従来は間接電離によるソフトエラーのみが脅威として認識されていた。ところが近年、宇宙用としても 100 nm 未満の世代のプロセスで製造された半導体デバイスの利用機会が増えてきたため、直接電離によるソフトエラーの報告事例が増えてきた。

2008年にはHidelらにより 65 nm 世代のSOI(Silicon on Insulator)プロセスで製造されたメモリデバイスにおいて、陽子の直接電離の寄与により、デバイスの放射線耐性である反転断面積の増大が初めて報告された⁴⁾。同様に、2009年にはLawrenceによって 90 nm 世代のバルクシリコンプロセスで製造されたメモリでも反転断面積の増加が示された⁵⁾。間接電離に加え、新たに直接電離がシングルイベント効果の原因となり反転断面積が増加することは、軌道上でのエラー発生頻度の増加を引き起こそ。Doddsらは、陽子の照射試験結果を、直接電離

の影響と間接電離の影響とに分離してエラー発生頻度を算出する方法を考案し⁶⁾、 $100\text{ nm}\sim20\text{ nm}$ のプロセスで製造された種々の回路における直接電離の寄与率を調べた結果、ソフトエラーに5倍のセーフティマージンを掛けることで発生頻度の推定値を安全側に見積もることができると報告した⁷⁾。筆者らは、 20 nm 未満の世代のプロセスから採用されている3次元のゲート構造を持つトランジスタ（フィンフェット）において、陽子の直接電離の影響を研究し、 $16/14\text{ nm}$ 世代のフィンフェットの場合にはほとんど影響がないことを明らかにした⁸⁾。

5. 今後の展望

半導体デバイスの宇宙放射線影響とは何か、その研究の動向も交えて紹介した。半導体デバイスは、新材料の適用と微細加工の進化が常に続いている、過去のデバイスで観測された現象とのアナロジでは説明ができない新たなデバイス挙動の発現、事象の複雑化が進んでいる。このため、従来の照射実験ベースの分析手法だけでなく、デバイス内部の過渡応答を解析するシミュレーション技術も導入した高度な解析手法も今後構築が必要で、この研究を開始したことである。引き続き、産官学の英知を結集した研究を推進していきたい。

参考文献

- 1) B.L.Gregory., et al., *Proceedings of the IEEE.*, **62**, 9, 1264-1273 (1974)
- 2) T.R.Wetherford., et al., *IEEE Transactions on Nuclear Science.*, **50**, 3, 704-710
- 3) D.Kobayashi., et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **68**, 124-148 (2021)
- 4) D.F.Heidel., et al., *IEEE Trans.Nucl. Sci.*, **55**, 3394-3400 (2008)
- 5) R.K.Lawrence., et al., *IEEE Radiation Effects Data Workshop.*, 123-126 (2009)
- 6) N.A.Dodds., et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **61**, 2904-2914 (2014)
- 7) N.A.Dodds., et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **62**, 2440-2451 (2015)
- 8) K.Sakamoto., et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **74**, 1470-1478 (2025)

(宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第一研究ユニット)