

## 話 題

## 加速器を用いた半導体デバイスへの放射線照射試験

牧野 高紘\*

## Single Event Effects Testing by using Accelerators

Takahiro MAKINO\*

## Abstract

Accelerators and their uses for single event effects testing of semiconductor devices in Japan are showed. Single event effects are malfunctions induced by heavy ions incidence to the semiconductor devices. For increase single event effects tolerance of semiconductor devices, accelerator testing is required.

## 1. はじめに

2015年現在、我々の生活において半導体デバイスが必要不可欠となっている。それは、加速器の制御や、計測現場においても例外ではない。一般的な、半導体デバイスのイメージとしては、「安定的な高速動作」、「正確」といったものがあるかと思う。しかし、この高性能、高信頼性を持つ半導体デバイスも、ある条件下においては、ミスをおかしたり、一瞬で壊れたり、信頼性の低下を示すことがある。本稿では、半導体デバイスの性能と信頼性向上において、加速器がいかに重要な役割を果たしているか、その利用法や現状について述べる。なかでも、粒子（イオン）加速器を用いたシングルイベント現象の評価を中心に述べたうえで、今後の要求仕様などについても幅広く触れていく。

## 2. 半導体デバイスと放射線

放射線が半導体デバイスに入射すると、放射線の電離作用によってデバイス内に電荷（電子・正孔対）が生成される。図1に、半導体デバイス（pn接合）内への電子・正孔対生成の模式図を示す。この電子・正孔対の流れによって、半導体デバイス内の保持データが反転したり、場合によっては半導体デバイスの永久的な破壊が引き起こされた

りすることがある。この現象は、単一の放射線によって引き起こされるためシングルイベント効果と呼ばれている。他方、生成された電子・正孔対が半導体デバイスを構成する酸化膜中に固定電荷や界面準位を生成することで、トランジスタのしきい値を変化させ半導体デバイスの動作不良を引き起こす事がある。この現象は、シングルイベント効果と異なり、累積の照射線量に依存するため、トータルドーズ効果と呼ばれている。このように半導体デバイスへの放射線入射による電離作用の影響は、大きく二つに分類される。このことから、「放射線が入射する」といった条件下において、半導体デバイスの信頼性は低下を示すと言える。さらに、先に述べたシングルイベント効果においては、その現象が誤動作であるか、破壊であるか、

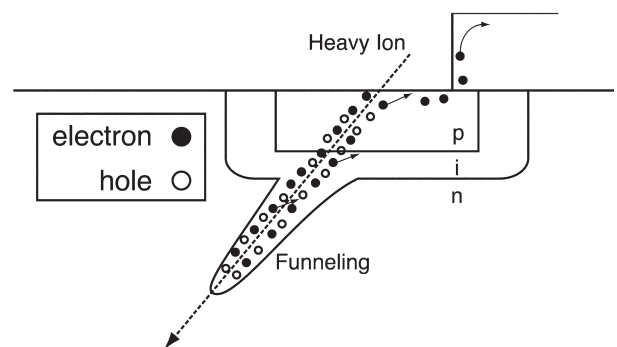


図1 pn接合に重イオンが入射した際に発生する電荷とその動き。

\* (国)日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究センター 半導体照射効果研究グループ  
Semiconductor Radiation Effects Group, Quantum Beam Science Center, Japan Atomic Energy Agency  
(E-mail: makino.takahiro@jaea.go.jp)

誤動作であっても、どのような電荷の流れによる誤動作であるかによってさらに細かく分類される。このような問題は、主に人工衛星に搭載された半導体デバイスと宇宙空間の放射線によるものとして考えられてきた。しかしスマートフォンをはじめとしたコンピュータがここまで普及した現在、宇宙などの特殊な状況だけでなく、地上においてもそれらの信頼性に関わる問題として注目されている。

ここで、地上におけるシングルイベントの発生プロセスは次の通りである。宇宙からの放射線が、大気と相互作用し中性子線（宇宙線）を生む。発生した高エネルギー中性子線は、半導体デバイスに入射し、半導体デバイスの材料と核反応し、二次原子（二次イオン）を生む。この発生した二次イオンの電離作用により、デバイス内部で大量の電子・正孔対が生成されることでシングルイベントを引き起こす。数万個単位のLSIを搭載したスーパーコンピュータにおいて、LSIに何もシングルイベント対策しなかった場合、数分に一回の割合でシングルイベントが発生するともいわれている。ここで、世界中のコンピュータに搭載されているLSIの数を想像してみると、全く遠い世界の話ではないと感じるだろう。さらに、人工衛星、航空機、医療機器、金融機関など、生命・安全を管理するのに用いられている半導体デバイスまで考えたとき、半導体デバイスと放射線の関係について知ることがいかに重要か感じていただけるだろう。

### 3. 宇宙の放射線環境

宇宙空間において、シングルイベントへ寄与する放射線は、高エネルギーの重イオンである。宇宙空間でのイオン種分布を考えると、イオンは、図2に示す通り陽子からPt以上まで存在し<sup>1)</sup>、イオンのFluxは1秒当たり1～10 particles/cm<sup>2</sup>と、半導体デバイスの面積に対して、非常に少ないものの、エネルギーは核子あたりで最大10 GeVまで分布している。そしてFe（鉄）以上の重さを持つ超重核の存在数はFeに比べてさらに1桁以上少なくなることが知られている。

シングルイベントは重イオンがデバイス中に生成する電子・正孔対によって引き起こされるため、電子・正孔対生成量すなわちLET（Linear Energy

Transfer）が非常に重要なパラメータとなる。図3に、高度200～1,200 kmまでの全銀河宇宙線の積算LETスペクトルを示す<sup>2)</sup>。LETは、1～100,000 MeV/cm<sup>2</sup>/gまで分布しており、LET = 400 MeV/cm<sup>2</sup>/g以下は高度の上昇に伴ってFluxが増加する。これは、地球を取り巻く捕足放射線帯の影響である。また、LET = 40,000 MeV/cm<sup>2</sup>/g周辺で急激にFluxが減少する。そのため、宇宙でのLSIの耐放射線性を議論する際の評価基準値としてLET = 40,000 MeV/cm<sup>2</sup>/g（本稿ではLET = 40 MeV/cm<sup>2</sup>/mgとして扱う）が用いられる。ここで、陽子の入射に関しては、それ自身のLETは小さいが、デバイス材料との核反応による二次粒子によるLETを考慮しなければならない。

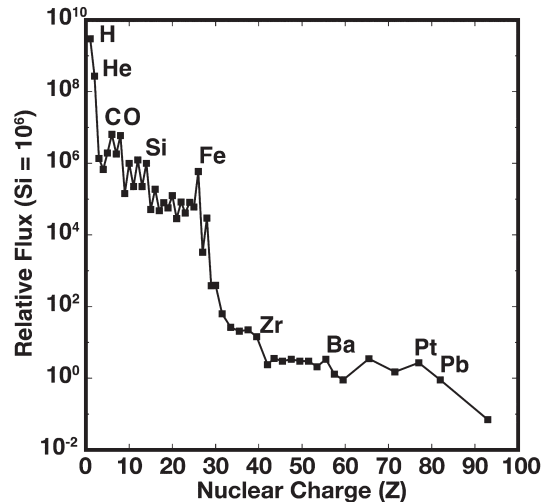


図2 宇宙空間でのイオン種分布<sup>1)</sup>。

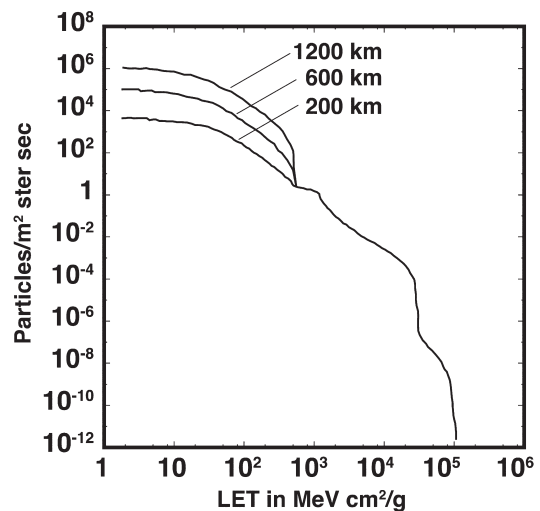


図3 高度200～1,200 kmまでの全銀河宇宙線の積算LETスペクトル<sup>2)</sup>。

#### 4. 加速器を用いたシングルイベント耐性試験

半導体デバイスのシングルイベント耐性を調べる手法として一般的なのは、想定される使用環境より過酷な環境下での耐性を調べる加速試験である。中でも、加速器を用いて対象とする環境を模擬したイオン・中性子を直接半導体デバイスに照射し、その反応を観察する方法が主流である。そして、イオン照射については放射性同位元素からの核分裂片をデバイスに照射することで、シングルイベントを引き起こす方法もある。中性子によるシングルイベントは、大量のデバイスを高高度に設置し、地上に比べ高い中性子線量を利用しシングルイベント発生を加速させることで評価することもある。他には、数値計算に基づくデバイスシミュレーションで半導体への放射性照射を再現する方法も用いられる。

##### 4.1 イオン照射試験

図4に加速器を用いたイオン照射試験結果の一例を示す。縦軸は半導体デバイスのエラー率（エラー断面積＝エラー数/Fluence）、横軸はイオンのLET(陽子の場合はエネルギー)である。エラー断面積は、一般的にイオンのLETに依存し、デバイスのイオン感受面の面積より小さい値で飽和する。この情報に使用環境下での積算LETスペクトルを掛け合わせることで、任意の環境での半導体デバイスのエラー率見積りが得られ、人工衛星をはじめとしたシステムの設計が可能となる。これらのデータ取得を行うためには、以下のビーム条件が求められる。

- ① ビームエネルギーが十分である；半導体材

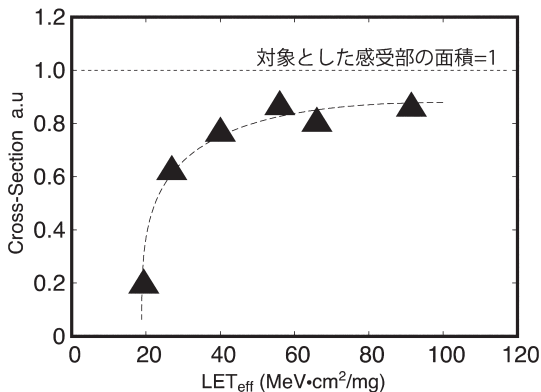


図4 加速器を用いたイオン照射試験結果の例

料中（主にシリコン中）での飛程が 30 μm 以上。

- ② 幅広い LET が得られる；宇宙用半導体デバイスでは半導体材料中（主にシリコン中）で LET = 40 MeV/cm<sup>2</sup>/mg 程度が必須。
- ③ ビームエネルギーの変更が容易である；一度のビームタイム中で 2～3 水準のエネルギーもしくはイオンが照射できる。
- ④ ビーム強度が適当である；陽子の場合、～ 10<sup>8</sup> protons/cm<sup>2</sup>/s 程度、重イオンの場合、～ 10<sup>5</sup> ions/cm<sup>2</sup>/s。
- ⑤ 照射対象半導体デバイス面方向のビーム強度が均一である；面内均一度 10%以内。

日本国内における半導体照射試験の供用施設としては、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設 (TIARA)、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) が挙げられる。この二つの施設では、同型のサイクロトロン (K = 110 MeV) を運用しており、十 MeV の陽子から、数百 MeV までの重イオンビームが利用可能である。また、TIARA では 3 MV タンデム加速器も半導体の耐放射線性研究に利用されている。ここには、タンデム加速器からのビームを磁気レンズで 1 μm 径まで収束させ、ビームスキャナによって半導体デバイスの狙った位置に照射する技術もあり、主に基礎研究用途に用いられている。

TIARA におけるシングルイベントの汎用試験では、主に重イオン照射が行われており、真空チャンバ内に設置したサンプルに対して照射する。He から Os まで多種のイオンが利用可能で、Si 換算で最大 LET が 90 MeV/cm<sup>2</sup>/mg 程度 (Os 490 MeV 入射時) を得ることができる。また、M/Q = 5 (最大エネルギー Xe 454 MeV) をはじめとした数種類のカクテルビームも可能で、20 分以下のビーム切り替え時間により、一度の実験で LET = 6～90 MeV/cm<sup>2</sup>/g までの間で数種のイオン照射を実現している。いずれのビーム条件でもビーム強度は十分である。面内均一度に関しては、サンプルに対してビーム上流に金薄膜を設置し、ビーム透過によるクーロン多重散乱を用いることでサンプル位置での均一度を確保している。他に、ビーム走査マグネットや多重極マグネットを用いてサンプル位置での均一度を確保す



る場合もある<sup>3)</sup>。

一方CYRICでは、陽子照射が主で、 $M/Q = 4$ (最大エネルギー Ne 131 MeV) のカクテルビームや Ar 200 MeV, Kr 405 MeV の重イオンも利用可能である。サイクロトロンからの 70 MeV の陽子は、半導体照射用ビームラインへ輸送され、ビームライン末端に取り付けたカプトン薄膜のビーム取り出し窓を通して空気中での照射に用いられる。エネルギーの変更にはビーム取り出し窓直前に設置されたエネルギー減速体を用いる。減速体には厚さを変えた銅板が用いられており、希望するエネルギーに合わせて減速体厚さの変更が可能である。面内均一度に関しては、TIARA 同様、金薄膜を用いた散乱法を採用しており、サンプル位置でのビーム均一度を確保している<sup>4)</sup>。

#### 4.2 中性子照射試験

地上用半導体デバイスにおいても、特に信頼性が要求されるものに関しては、宇宙用同様シングルイベント耐性が調べられる。加速器を用いた中性子照射試験には、耐性試験を行うことを目的とした白色中性子照射試験と、シングルイベント耐性の中性子エネルギー依存性研究を行うことを目的とした単色・準単色エネルギー中性子照射試験がある。現在国内で一般に供用できる白色中性子照射施設として、大阪大学核物理研究センター(RCNP)があげられる。一方、単色・準単色エネルギー中性子源は東北大学高速中性子実験室(FNL)による単色中性子源とCYRICにおけるLiターゲットを用いた準単色中性子源を合わせて最大70 MeV程度まで利用可能である。

### 5. む す び

このような、半導体のシングルイベント耐性試験の専用設備は、米国、ヨーロッパ諸国では多数設置され、利用されている。それらは、数十 MeV 以上の陽子、数百 MeV 以上の重イオンを生成できる加速器にビームの観測・制御系と照射設備を装備したものである。イオン、中性子問わず、国外で一般に供用している主な施設としては、

Brookhaven National Lab.(米), Texas A&M(米), Lawrence Berkeley Lab.(米), TRIUMF(カナダ), Louvain 大(ベルギー), Uppsala 大(スウェーデン)などがあり、日本の企業や研究所もこれらの多彩な照射環境を利用しているのが現状である。一方、国内に目を戻してみると、供用可能な照射施設は少なく、白色中性子源や、高エネルギーイオンの照射環境はあるものの、利用は概ね物理研究用途に限られている。

今後、半導体デバイスの微細化に伴い多層配線が主流に、また高パワー化に伴い縦型構造の採用が主流になっていくことが考えられる。つまり、これまでよりデバイス表面から深い位置に動作部が構成されていくことを意味しており、これらのシングルイベント耐性を国内で評価しようとした場合、現在の供用施設では、イオンエネルギーの面から飛程が不足するようになることも予想される。加えて現在、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が発議し宇宙用部品のシングルイベント試験の国内標準作成に関する検討が始まった。これらのことから、今後、国内の照射環境の重要度はさらに高くなるであろう。今後は、半導体デバイスの照射効果研究の結果や重要性をより多く発信すると同時に、加速器研究分野とも協力し、既存の照射環境の高度化はもちろん、高エネルギーイオンビームの開発や、各種施設の汎用化が望まれる。

#### 参考文献

- 1) R. A. Mewaldt, "Elemental composition and energy spectra of galactic cosmic rays" Interplanetary Particle Environment, J. Feynman and S. Gabriel, Eds., JPL Pub. 88-29, p. 21.
- 2) J. H. Adams, "Cosmic ray effects on microelectronics, part IV" Naval Research Laboratory Memorandum Report, 5901.
- 3) TIARA Homepage, [http://www.taka.jaea.go.jp/tiara/tiara/index\\_j.html](http://www.taka.jaea.go.jp/tiara/tiara/index_j.html)
- 4) T. Makino, M. Hagiwara, T. Itoga, and M. Baba, "Online monitor of heavy ion flux in an ion irradiation apparatus for semiconductor irradiation test" Nucl. Instrum. and Methods A589 (2008) 345.