

宇宙機搭載用時間計測アナログデジタル混合 ASIC への 放射線による影響に関する研究

Study on the influence of radiation on analog digital mixed ASIC for space application

水野 貴秀¹⁾

Takahide MIZUNO

¹⁾ 宇宙航空研究開発機構

(概要)

近年、世界的に太陽系起源の解明を目的に、小惑星や彗星といった始原天体に対する本格的な科学観測活動が行われ、我が国の小惑星探査機はやぶさ、はやぶさ2等多くの探査機が送り込まれている。これらの探査機の多くがレーザ高度計を搭載し、惑星探査における誘導航法や科学観測に利用しており、惑星探査機の誘導航法および科学観測に重要な装置として位置づけられている。また、軌道上での宇宙ステーションへのランデブードッキング用途として距離と姿勢測定のため、数百mからレーザを使って距離画像が取得可能な距離センサが強く望まれている。このような背景で、JAXAでは民生用プロセスにてレーザ高度計や3Dイメージセンサ用ASICを試作しており、本研究ではこの民生用プロセスにて製造されたASICへの宇宙放射線の影響を評価することにより、宇宙機への搭載性を確認するとともに、将来の宇宙用デバイスの設計に資することを目的としている。

平成29年度および30年度において、AVFサイクロトロンメインコイル損傷により、重イオンの加速エネルギーを60%程度に抑えた代替カクテルM/Q=5ビームによる実験を行っていた。代替カクテルM/Q=5の線エネルギー付与(LET)の分布はメインコイルが正常の場合と大差がないが、シリコンへの貫入深さは代替ビームでは全体的に約10 μ m短くなることに加えて、最大のLETを持つXeの加速エネルギーが454MeVから350MeVに低下していたため、ラッチアップ耐性の確認が不十分であった。このため、令和元年度の実験では、火星衛星サンプルリターンMMX搭載レーザ高度計用のASIC(FMと同一ロット品)についてカクテルM/Q=5ビームを使用してシングルイベント特性を再確認した。また、3Dイメージセンサについては、平成29、30年度は32 \times 32画素であった画素数を128 \times 128画素に拡張したデバイスについて実験を行った。この結果、火星衛星探査機搭載レーザ高度計用のASICおよび3Dイメージセンサについて、代替カクテルM/Q=5ビームで測定したシングルイベント特性と大きな変化がないこと、およびLET<69.2 MeVcm²/mgではラッチアップは発生しないことを確認することができた。

キーワード : LIDAR、レーザ高度計、3Dイメージセンサ、はやぶさ、MMX、ASIC

1. 目的

本研究では、一般に開示された回路資産^{*1)}によって設計、民生用プロセスにて製造されたアナログデジタル混合ASICへの宇宙放射線の影響を評価することにより、宇宙機への搭載性を確認するとともに、将来の宇宙用デバイスの設計に資することを目的としている。

具体的には、上記回路資産を用いて開発されたASICの実例として、レーザ高度計用の光パルス検出ASIC(CMOS0.35 μ m)、および3Dイメージセンサ用に開発された測距用ASIC(CMOS0.18 μ m)について、重イオン照射試験によって高感度アンプおよびロジックに対する放射線の影響を評価する。特に、レーザ高度計用のASICについては、FMと同一ロットのチップの耐放射線特性の測定評価を行う。これによって、(1)火星衛星サンプルリターンMMXおよび将来の月・惑星探査プロジェクトに高性能LIDARを供給して、探査機の誘導航法および科学観測に役立てること、および、(2)3Dイメージセンサ用のASICを搭載化することにより、月・惑星探査機の着陸技術の向上、スペースステーション等の軌道上ランデブードッキング技術の向上に役立てることが目標である。

本年度は、昨年度までの代替カクテルM/Q=5ビームで得られたシングルイベント特性を、加速エネルギーが正常なカクテルM/Q=5ビームで再測定して確認することを目的とした。加えて3Dイメージセンサについては、画素規模を前年度比で16倍に拡張したためその評価を行うことを目的としている。

※1) Analog-VLSI Open-IP Project <http://research.kek.jp/people/ikedai/>

2. 実施方法

本実験は AVF サイクロトロン の HD2 ポートにて、カクテル M/Q = 5 ビームを使用して行った。照射ビームの核種は、N (56)、Ne (75)注1、Ar (150)、Kr (322)、Xe (454)から成る5種類のイオンの中から選択された。試験対象はレーザ高度計用の光パルス検出 ASIC LIDARX (FM 同一ロット品)、3D イメージセンサ用 ASIC H16K (128×128 画素、画素ピッチ 55μm タイプ) および A16K (128×128 画素、画素ピッチ 100μm タイプ) である。

実験は供試デバイスを実装した基板を HD2 ポートに設置して実施した。SEU の測定対象となる FF について、光パルス検出 ASIC LIDARX および 3D イメージセンサ用 ASIC には D (Data) 型と、反転耐性の高い DICE (Dual Interlocked Cell) 型の 2 種類の FF が使用されている。中でもゲインや閾値電圧の設定値といった、測距における重要な情報は、DICE-FF のみに格納されている。LIDARX の実験では、全 FF を対象に、1 秒間隔でパラメータの書き込みと読み出しを行い、両者の値が一致しているか否かを照合する事で、bit 反転の有無を確認した。3D イメージセンサの実験では 1 秒間隔で距離測定動作を繰り返し、画素回路のカウンタ値およびバイアス回路の設定値を読み出すことで反転の有無を確認した。また、両デバイスとも、寄生サイリスタの発生により電源が短絡状態となる SEL (Single Event Latch-up) については、電源消費電流を測定・記録し、SEL による異常電流の発生を検出する。デバイス温度に関しては、レーザ高度計用の ASIC LIDARX は使用上限温度である 80°C に過熱した状態評価、3D イメージセンサについては使用上限温度の 40°C 程度での評価を行った。ただし、3D イメージセンサについては、デバイスの発熱を排熱する機構に不備があり、局部的に 40°C 以上に加熱された状態での試験になったと考えている。

注 1 : () 内の数値は、核種のエネルギー [MeV]

3. 結果及び考察、今後の展開等

一般に LET と散乱断面積 σ の関係は、(1) 式で示された Weibull 曲線に近似可能な事が知られている[1]。

$$\sigma = \sigma_0 \times \left\{ 1 - \exp\left(-\left|\frac{L - L_0}{W}\right|^S\right)\right\} \quad (1)$$

式中の L は実効 LET (MeV·cm²/mg) を、L₀ は LET の閾値を、 σ_0 は飽和散乱断面積 (cm²/bit)、S と W (MeV·cm²/mg) は Weibull 係数をそれぞれ表す。LET に対する反転断面積の分布に式(1)を近似させることで、シングルイベント特性の特徴である L₀ および σ_0 を求めることができる。

CMOS0.35μm プロセスで製造された LIDARX については、デバイス温度 80°C の状態で、D-FF が L₀=6.3 (MeV·cm²/mg)、 $\sigma_0=3 \times 10^{-7}$ (cm²/bit)、DICE-FF が L₀=15.3 (MeV·cm²/mg)、 $\sigma_0=3 \times 10^{-7}$ (cm²/bit) であり、前年までの代替カクテル M/Q=5 ビームと大きな違いはみられなかった。また、SEL についても 69.2 (MeV·cm²/mg) まで発生せず、火星衛星サンプルリターン MMX での使用に問題がないことを確認した。

CMOS0.18μm プロセスで製造された 3D イメージセンサについては、55μm ピッチのデバイス H16K については廃熱機構をつけていなかったためデバイス温度が高くなり、PLL がロックせず 40°C 程度以下での実験ができなかった。100μm ピッチのデバイス A16K については、ペルチェを使った廃熱機構をつけ約 40°C での実験を行った。A16K は平成 29 年度に実施した B1K (32×32 画素) と同様の回路構成を持っているため、シングルイベント特性についても B1K と同様の特性が予想された。A16K の D-FF については L₀=3.3 (MeV·cm²/mg)、 $\sigma_0=1 \times 10^{-10}$ (cm²/bit) と測定され、B1K と同様の結果であった。これに対して、A16K の DICE は反転が測定されず、平成 29 年度に測定した B1K の DICE-FF の特性 $\sigma_0=10^{-7}$ (cm²/bit) と異なる結果となった。今後試験方法を確認の上、再実験の必要がある。SEL については 69.2 (MeV·cm²/mg) まで発生していない。

3D イメージセンサについては、現在 55μm ピッチのデバイス H16K および 100μm ピッチのデバイス A16K の改良版を製造中であり、実験手法を見直した上で再実験を行う予定である。

4. 引用(参照)文献等

- [1] J. Barak, "Simple Calculations of Proton SEU Cross Sections from Heavy Ion Cross Sections," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, pp. 3336-3342, DECEMBER 2006.
 [2] CREME Site: <https://creme.isde.vanderbilt.edu/>