

2012年 1月提出

学籍番号1Y08B079-3

所属学科	応用物理学科	氏名	溝間 青樹	指導 教員	片岡 淳	印
研究 題目	ASTRO-H 衛星搭載 APD の放射線試耐性験及びアナログ処理系の最適化					

1. はじめに

日本で6番目の X 線天文衛星である Astro-H 衛星には硬 X 線撮像検出器(HXI)と軟ガンマ線検出器(SGD)が搭載され、5keV から300keV の広い領域で、従来より1桁以上高い観測感度の実現を目指す。とくに HXI/SGD では検出器全体を BGO 結晶で囲む「アクティブシールド」を採用し、目的天体以外からのイベントを反同時係数をとることで効率よくバックグラウンドを除去する。ASTRO-H 衛星では BGO 結晶の読み出しにアバランシェ・フォトダイオード(APD)を採用するが、APD は従来用いられてきた PMT に比べ、コンパクトかつ低消費電力で、量子効率が非常に高い優れた光センサである。しかしながら PMT に比べて増倍率が低く、 ~ 270 pF と大きな容量を持つのでノイズに弱い。雑音特性に特化した電荷有感型前置増幅器(CSA)と後段のアナログ信号処理回路の開発が必要不可欠であり、本研究で最適化を行った。また、APD は軌道上で厳しい放射線環境に曝されるので、要求性能を維持できる放射性耐性を備える必要がある。本研究では APD の放射線耐性についても実験と理論の両面から詳細に検討した。



Fig.1 ASTRO-H 搭載予定 1 cm² APD

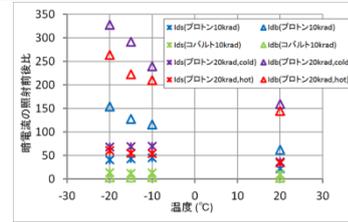


Fig.4 I_{ds}, I_{db} の照射前後の暗電流比

2. APD の放射線耐性試験

この実験では、APD の表面及び内部損傷に対する雑音性能の劣化度合をそれぞれ評価するため、 ^{60}Co (ガンマ線)及びプロトン線をそれぞれ10 krad 照射し (軌道上5年相当、安全ファクタとして2倍を仮定)、照射前後の暗電流とエネルギー閾値 (テストパルス幅)を測定した。測定には1 cm³ BGO と1 cm² APD を使用した。照射前後の APD の暗電流及びエネルギー閾値をそれぞれ Fig.2、Fig.3に示す。 -15°C では、ガンマ線を照射した APD の暗電流 (@ゲイン M=50) は約5倍に増加したのに対し、プロトン照射では約100倍も増加した。 -15°C でのエネルギー閾値の悪化はガンマ線を照射した APD に対し1.2倍であったが、プロトンでは5.3倍にまで悪化した。この結果を定量的に理解するため、APD の暗電流(I_d)が表面成分(I_{ds})と内部増幅されるバルク成分(I_{db})に分けられ、その関係は、 $I_d = I_{ds} + M \times I_{db}$ の式で近似されると想定した考察を行った。 I_{ds}, I_{db} の照射前後の暗電流比を Fig.4に示す。ガンマ線照射では I_{db} より I_{ds} の増加が大きく、プロトン照射では I_{ds} より I_{db} の増加が顕著にみられた。これより、ガンマ線照射では表面成分へのダメージが大きく、プロトン照射ではバルク成分への損傷が大きかったことがわかった。温度が低くなると I_{db} の増加率が上がったのはプロトン照射によって APD 内部の活性化エネルギーが変化し、低温になっても I_{db} がさがりにくくなったことが原因である。本論文ではさらに考察を進め、軌道上の任意の積算線量、温度に対して期待されるノイズレベルを予想する新たな手法を確立した。

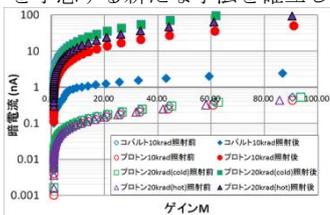


Fig.2 照射前後の暗電流 (-15°C)

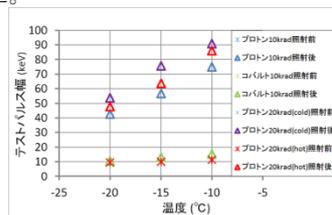


Fig.3 照射前後のエネルギー閾値

3. アナログ処理系の最適化

Astro-H における APD 信号処理系の概略 (ブロック図) を Fig.5に示す。不要なバックグラウンド事象を効率よく除去し、主検出部の不感時間を最小に抑えるため、BGO で検出した禁止 (VETO)信号を5 μs 以内に立ち上げる必要がある。この条件の下でバックグラウンドのエネルギー閾値が最も低くなる様にアナログ信号処理部(アナログフィルタ)の最適化を行った。アナログフィルタは一段微積分回路とツイン T 型回路を用い、上記の条件下で回路時定数の最適化を行った。APD は1 cm²を、BGO 結晶はフライトで使用するものと同程度の大きさである $8 \times 8 \times 4$ cm³を使用し、フライトで想定される温度 -15°C で測定を行った。アナログ処理系のノイズ評価は、エネルギー閾値と等価であるテストパルスの幅を参照して行った (Fig.6)。この結果、一段微積分回路は積分時定数が1.1 μs のときに最適となり、テストパルス幅が24.3 keV (FWHM; BGO 等価エネルギー換算)であった。一方ツイン T 型回路では、積分時定数は同様に1.1 μs のときに最適となり、テストパルス幅は23.4 keVであった (Fig.7)。

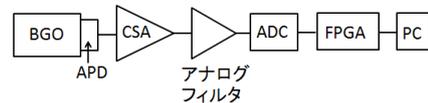


Fig.5 BGO 信号処理のブロック図

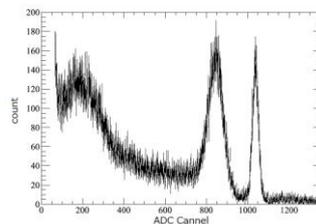


Fig.6 ^{137}Cs とテストパルスのスペクトル

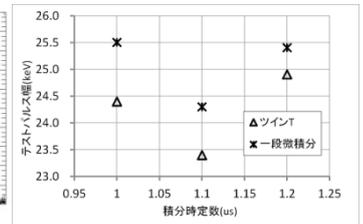


Fig.7 アナログフィルタの評価

4. まとめと今後

本論文では BGO の読み出しセンサである APD の放射線耐性の実証と、アナログ信号処理部の回路時定数最適化を行った。APD 素子への各種照射試験(^{60}Co ,プロトン)の結果より放射線損傷の影響を定量的に分析することに成功した。アナログ信号処理回路は一段微積分回路よりツイン T 型回路の方が良い性能が出たが、今後は後段のデジタルフィルタとの組み合わせや、大信号応答での性能をさらに調べていく必要がある。

参考文献

- J.Kataoka et al., NIM-A, (2012) submitted
- T. Saito et al., NIM-A, (2012) submitted