

「技術資料AN06」:検出器の寿命と放射線による損傷

はじめに

硬X線（透過率の大きいX線）と電子装置は相性がよくありません。X線放射と敏感な電子回路の相互作用の物理学を研究すると、このような結論になります。X線放射は、生物組織に損傷を与えさらに永久的に破壊するほど強力なので、複雑な電子検出器が同様に破損されても不思議ではありません。理想的な検出器は、あらゆる光子を捕らえるほど敏感で、検出された信号にそれ自体のノイズを加えず、効率が低下することなく永久に動作するものということになります。残念ながら、そのような検出器は存在しません。

エレクトロニクスセンシングの分野では、最初の2つの基準は達成に近づいてきており、第3の基準についてもかなりの進歩が見られます。特にCMOSセンサーは高感度で、X線検出器として用いて、信号にほとんどノイズを加えません。デジタルCMOSエレクトロニクスは「約100 kradまで持ちこたえる」とよく言われます。それは、一般的なマイクロチップが、約1ジュールの光子エネルギーを吸収すると動作が停止するという意味です。1カロリーにも満たないことになります。さいわいなことに、ほとんどのアプリケーションでは、X線フォトンによるエネルギーの蓄積は非常に遅いので、小さなチップの中へこの1カロリーを与えるには長い時間がかかります。

損傷のメカニズム

標準的なICが1ジュールのエネルギーを吸収した後にだめになるといっても、素子が実際にどうなっているのかということを示す指標にはなりません。素子がだめになる前に、内部では変化が起こっています。X線は一般に、(光電効果による)励起あるいは(コンプトン効果による)散乱の電子によって、少なくとも1 MeV以下のエネルギー範囲で物質と相互作用を行います。検出器素材の結晶構造や原子配列には影響しませんが、多数の自由電子や陽イオン(あるいはホール)を生成します。素材が伝導性の場合、電子は急速に再結合して素材の平衡状態は回復します。しかし、素材が絶縁体である場合は、強力な電子が放出されて、プラスに帯電したままの粒子が残ることがあります。

集積回路は、コンダクタを分離して素子内部の電場のコントロールをよくするために、1つ以上の絶縁層あるいは誘電層を備えています。CCD素子もCMOS素子も、ポリシリコン電極を真下のバルクシリコンから分けるために二酸化ケイ素(SiO₂)の薄膜を用いています。このSiO₂層の中で生成される電荷は、基にある電場を直接変化させるので、シリコンの電荷転送特性も変えてしまいます。CCDでは、これは電荷移動が非効率的になり素子がすぐに動作を停止することを意味します。CMOSトランジスターでは、トランジスターのスレッシュヨ

ルド電圧がゆっくりと変化して、素子が常にオンになるか完全に閉じることを意味します。慎重に設計されたアナログ素子と同様にデジタル素子でも、トランジスターが動作を停止して素子が壊れるまで正常に機能し続けられるように、スレッシュホールド電圧の適度の変化を許容しています。

CMOS画像センサーでは、素子の動作中の放射線に起因する可視的な影響は暗電流に見られます。そのような素子のトランジスターの動作に変化が表れるずっと前に、フォトダイオードからの暗電流が増加し始めます。RadEye1画像センサーのような現代のCMOSセンサーは、最初の暗電流は $25\text{pA}/\text{cm}^2$ ほどで非常に小さいので、暗電流が大きく増加しても、しばらくの間は大きな影響を与えません。暗電流が増加する原因となる物理的なメカニズムは、上に述べた酸化物層中の陽電荷の蓄積です。空乏領域が素子の表面と交差するフォトダイオードの周囲の電荷分布および電場は、攪乱に非常に敏感です。酸化物層中の陽電荷は、空乏領域の電荷密度を変えるので、ダイオードのPN結合を通して漏れる電流を増加させて、表面の下に電子を蓄積させます。吸収量が増加するのに伴って暗電流が強くなり、ついにダイオードは読み取れるよりも速く電荷を放出するようになります。

検出器の寿命

放射線イメージングの検出器の寿命は、主に使用環境によって決まります。検出器が典型的アプリケーションでどんなエネルギースペクトルにさらされるのか、線量率はどれくらいか、最大X線エネルギーはいくらか、ビームはフィルターを通るか通らないか、X線は連続照射か断続的か、検出器は通常、日、週、月にどれだけ使用されるか、検出器の前にどんなタイプのオブジェクトが置かれるか、ビームが遮られないで検出器に頻繁に当たるか、それとも、厚い金属板で放射線をほとんど遮断する状態で主に使用されるのか、検出器が放射線下で耐えられるように設計されているか、すぐに劣化するか、最後に「破損」の基準は何か、こういったことがすべて、検出器が特定の環境下でどれくらい動作し続けるかということに影響します。

もちろんこれらの条件の多くは、検出器に吸収される線量の合計を計測することによって整理することができます。しかしエネルギースペクトルによって違いが生じ、50 kVpのX線管と150 kVpのX線管とでは線量と同じでも結果が違ってきます。さらに、シリコンに吸収される実際のエネルギーの測定や計算は困難です。実際は、検出器の入力窓で、大気に対する線量率(radまたはgray)あるいは照射線量(R)を測定するのが簡単です。もしエネルギースペクトルが大きく変わらなければ、これらの値を別の状況でも適用できます。

テスト条件

照射線量の増加に伴うカメラの性能劣化があればどの程度のものなのかということ調べ

るために、異なる条件下でいくつかのShad-o-Boxカメラをテストしました。表1は様々なテスト条件を示しています。スタンダードShad-o-Boxカメラは、25、45、100、160 kVpでテストしました。Shad-o-Box EVは(FO付きのもの)、25 kVpでは実質的に劣化がないので、45、100、160 kVpでのみテストしました。

Table 1: Test Conditions

<i>Peak Energy</i>	<i>25 kV</i>	<i>45 kV</i>	<i>100 kV</i>	<i>160 kV</i>
Target	Tungsten	Tungsten	Tungsten	Tungsten
Filtration	0.5 mm Al	0.5 mm Al	none	none
Source current	1.5 mA	1 mA	100 μ A	100 μ A
Source-detector dist.	100 mm	100 mm	65 mm	65 mm
Dose rate	100 R/min	240 R/min	106 R/min	230 R/min

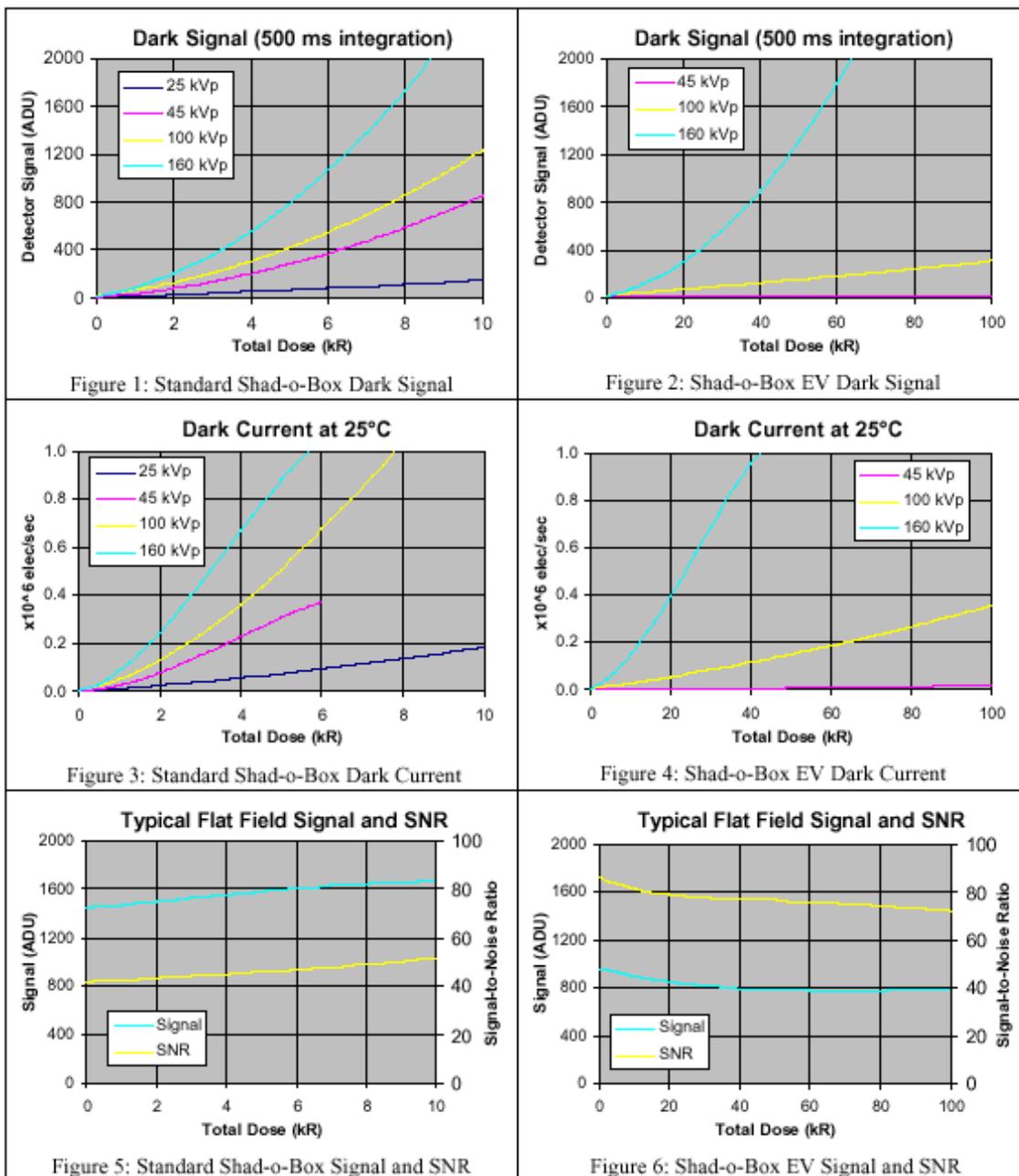
テスト基準

Shad-o-Boxカメラの寿命を制限するような放射線の主な影響は、累積露光による暗電流の増加です。テストしたどのカメラも、室温で暗電流が飽和する前に別の原因で異常になることはありませんでした。もちろん、飽和点はカメラの冷却あるいは積算時間の短縮によって伸ばすことができます。

選択したテスト基準は、積算時間500 msによるカメラのダークシグナル(ADU)とカメラの暗電流(electrons/sec)です。後者は、たとえば500 msと1500 msというように異なった積算時間で撮影した2つの画像のダークシグナルの差から計算できます。さらにカメラによっては、平均カメラゲイン(固定線量での信号レベル)、信号対ノイズ比(これも固定線量レベル)、解像度(規準バー画像のモニターおよび直定規画像からのMTFの計算による)も測定しました。

テスト結果

テスト結果は、図1-6に示したグラフにまとめています。ダークシグナルと暗電流は温度の影響を大きく受けるので(暗電流は8°Cの温度変化につき2倍になります)、データは平均25°Cのカメラ温度で測定しました。フラットフィールド信号と信号対ノイズ比は、X線エネルギーによってあまり変わらないので、これらのパラメーターについては典型的な反応曲線を示しています。MTFは、エネルギーおよび合計線量の両方について一定であることがわかりました。



予想通りに、放射線耐性を強化したShad-o-Box EVカメラは、スタンダードShad-o-Boxと比較して、放射線耐性が少なくとも1桁改善されています。X線エネルギーに応じて、スタンダードShad-o-Boxの暗電流は、合計線量が約10 kRを越えると全ダイナミックレンジのかなりの部分を占めるようになります。他方、Shad-o-Box EVは、100kVのX線エネルギーのもとで数百kRの持続が可能で、また160kVでも使用可能な寿命は約50 kRになっています。これらのテストの照射線量は検出器の入力窓で測定されたものであることに注意してください。入力ウィンドウは通常、一般的なX線撮影装置の撮影物よりはかなり少ない線量を受け取ります。高い温度で動作させると飽和が早くなるように、カメラを0°Cに冷却すると検出器

の使用可能な寿命は1桁延びます。図7は、カメラ温度と積算時間が変わる場合に、Shad-o-Box EVカメラのダークシグナルがどのように変わるかを示しています。

典型的フラットフィールド信号のグラフは、センサーの寿命を越えてカメラゲインの変化を測定したものです。スタンダードShad-o-Boxカメラでは、合計線量に伴ってシグナルゲインがわずかに増加します。EV型では、全体にわたってゲインに同様のわずかな減少がありますが、変化はほとんど最初の20-40 kRの線量で起こっています。これらの変化は、一般的なセンサー内のゲイン変化と比較すると比較的小さいもので、カメラの性能劣化を起こすものではありません。

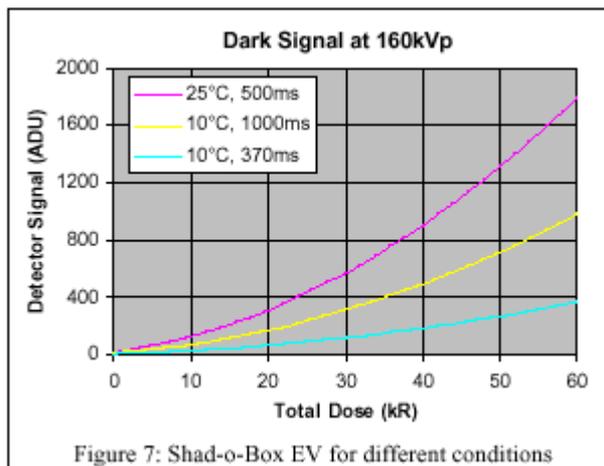


Figure 7: Shad-o-Box EV for different conditions

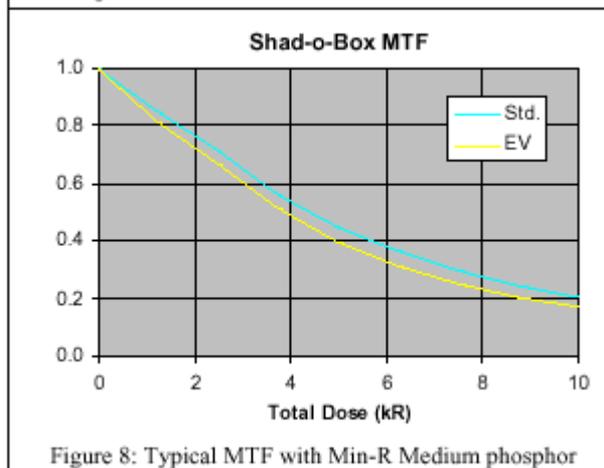


Figure 8: Typical MTF with Min-R Medium phosphor

信号対ノイズ比のグラフは、予想通りにフラットフィールド信号曲線に忠実に沿っています。Shad-o-Box EVは一般にスタンダードShad-o-Boxカメラよりも約20-40%感度が低くても(ADU/mR)、信号対ノイズ比は著しく高いというのが最も重要な特徴です。この理由は、シリコンセンサーで直接吸収されるX線が減少するためです。シンチレーターではなくシリコンに吸収されるX線が生成する多数の電荷パケットは、シグナルに寄与はしても画像中のノイズを増加させる傾向があります。こういうわけで所定の照射線量の全体的なSNRはスタンダードShad-o-Boxカメラより低くなります。

図8は、スタンダードShad-o-BoxとShad-o-Box EVの両方で得られた典型的なMTF曲線を示しています。両方の測定には「傾斜エッジ」の手法を用いました。X線エネルギーについても合計線量についても解像度に大きな変化はありません。(しかし、測定に使用したエッジあるいはスリットの品質や厚さのような実験要素や、X線源の焦点や散乱の量によって、測定値は容易に±5%以上も変動することがあります。) Shad-o-Box EVは一般に、スタンダードShad-o-Boxに比較してMTFがわずかに低く、解像度は画像の部分によってもっと変わりやすくなります。

結論

硬X線と電子装置の相性は改善できます。この説明書で挙げたデータは、イメージング用電子機器が放射線環境下で長寿命を保てるということを示しています。心に留めておくべき最も重要なことは、どのX線イメージングアプリケーションも独自のものなので、ある状況で動作するものが別の状況にもふさわしいわけではないということです。スタンダード Shad-o-BoxカメラもShad-o-Box EVシリーズカメラも、意図したアプリケーション環境中で非常によく動作します。どのカメラが適切か選択するには、まず予定するアプリケーションのエネルギーと線量の条件を慎重に調べなければなりません。長い積算時間が必要な場合は、暗電流をコントロールするためにカメラの冷却を検討しなければならないこともあります。

高エネルギーの放射線環境下で永久に動作する電子機器はありません。しかし、適切な注意を払うことによって、Shad-o-Box X線カメラは、ほとんどの適用環境下で性能があまり劣化することなく長年使用することができます。

* RadIcon社技術報告書より翻訳。 平成14年3月17日