

耐放射線性カメラ用撮像素子の γ 線照射効果

Gamma Irradiation Effects of Image Sensor for Radiation-resistant Camera

日本原子力研究開発機構	武内 伴照	Tomoaki TAKEUCHI	Non-Member
日本原子力研究開発機構	大塚 紀彰	Noriaki OTSUKA	Non-Member
日本原子力研究開発機構	土谷 邦彦	Kunihiko TSUCHIYA	Non-Member
池上通信機株式会社	田中 茂雄	Shigeo TANAKA	Non-Member
池上通信機株式会社	小沢 治	Osamu OZAWA	Non-Member
池上通信機株式会社	駒野目 裕久	Hirohisa KOMANOME	Non-Member
株式会社	渡辺 恭志	Takashi WATANABE	Non-Member
ブルックマンテクノロジー			
東京ニュークリア・サービス株式会社	上野 俊二	Shunji UENO	Non-Member

Abstract

As an advanced surveillance systems in nuclear power plants, a development of a radiation-resistant camera for visual surveillance even under severe accidents. From the result of a gamma irradiation test for a ready-made hi-vision camera, it was revealed that the increase of dark current in the image sensor was the main cause of degradation of image quality by irradiation. To suppress the dark current, three different types of CMOS image sensors with field plate structure and three transistors, photogate structure and three or four transistors were fabricated as a trial. The results of a gamma irradiation for them showed the sensor with the photogate and three transistors was the most advantageous one in terms of dark current and sensitivity. Its radiation resistance was estimated over 200 kGy for gamma radiation environment.

Keywords: Radiation-resistant Camera, Gamma Irradiation, Image Sensor, Transistor, Photogate, Photodiode, Dark Current

1. 緒言

東京電力株式会社福島第一原子力発電事故で得られた教訓から、既設原子力発電所の安全対策高度化として、プラント状態の情報把握能力の向上が必要不可欠である。

これまで、既存高感度ハイビジョン型カメラについて、 γ 線照射試験を行った結果、画像にノイズが発生し、被写体が写らない現象が発生した。この主要因は撮像素子内の暗電流増加によるものと考えられた。そこで、暗電流を抑制するため、構造の異なるカメラ用撮像素子を試作し、 γ 線環境下における特性を調べた。その結果、200kGyにおいても十分に使用可能見通しを得た。

次章以降で、これらの技術開発状況について報告する。

2. 既存カメラの γ 線照射試験

Fig.1に示すように、一般的な3板型ハイビジョンカメラは、レンズとプリズムからなる光学系、撮像素子と、映像処理や映像出力を行う信号処理系で構成される。

耐放射線性カメラの開発を行うにあたり、課題の明確化のため、既存の高感度3板型ハイビジョンカメラの ^{60}Co 線源による γ 線照射試験を実施した。

γ 線照射前の画像をFig.2(a)に示す。照射室内のナトリウム灯の影響で黄色味がかっているが、正常にテストチャートの画像が取得できている。試験開始直後から、画像に白点ノイズが急激に増加した。積算線量が増加するにつれ白点ノイズも増加していき、積算線量74 [Gy] 時点でFig.2(b)の画像となった。さらに γ 線の照射を続けるとFig.2(c)に示すように画像がノイズで埋もれ、被写体の判別が不可能となった。この現象から検討を行い、撮

連絡先: 田中 茂雄、〒210-9533 川崎市川崎区塩浜
4-13-15、池上通信機株式会社、
E-mail: tanaka-si@ikegami.co.jp

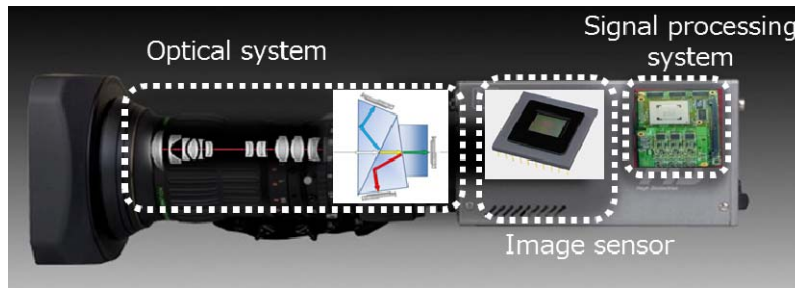


Fig.1 structure of three sensor type hi vision camera

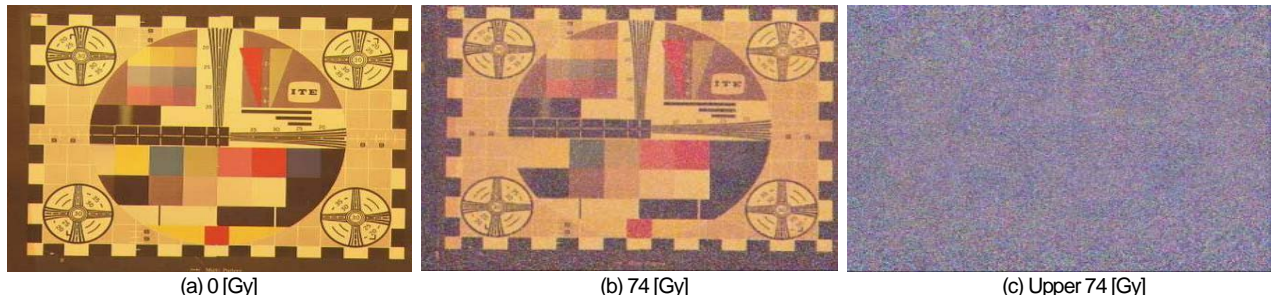


Fig.2 Pictures of test chart

像素子内の暗電流増加がカメラ劣化の主要因であると推測した^[1]。このことから γ 線環境において暗電流発生を抑制できる撮像素子の開発を開始した。

3. 画素回路の構造

撮像素子の画素回路には Fig.3 に示すように、(a) 3 トランジスタ(3Tr)型と(b) 4 トランジスタ(4Tr)型の2つの構造がある。3Tr 型はフォトダイオードに蓄積した電荷をリセットするリセットゲート、蓄積した電荷を読み出す選択ゲート、電荷増幅のアンプと1画素内に3個のトランジスタが組み込まれている。画素の構造が簡単で、初期の CMOS イメージセンサに多く使われていたが、後述する 4Tr 型に比べノイズが多く、近年はあまり採用されない。

4Tr 型は 3Tr 型の構造に加え、転送ゲートと呼ばれるトランジスタが1つ追加されている。これによってフォトダイオードをリセットした際の残存電荷を検出し、リ

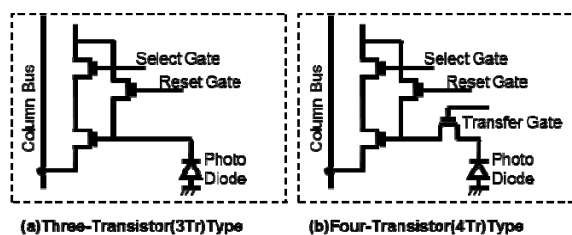


Fig.3 Pixel circuits of image sensors

セットノイズ補正が可能で 3Tr 型よりもノイズが少ない。

通常的环境下では 4Tr 型が優位であるが、3Tr 型の単純構造が放射線による影響を受けにくい可能性を考慮し本研究ではこの2つの構造を評価対象とした。

4. 光電変換素子の構造

Fig.4(a)に示すように、光電変換素子に γ 線を照射すると、表面の厚い酸化膜内に正孔が蓄積され、暗電流発生の原因になる^[2]。

この正孔の蓄積を低減するため、Fig.4(b)に示すように光検変換素子の上部に薄い電極を配置するフォトゲート(PG)構造を採用した。ただし、PG 構造は光を吸収するため、感度低下の懸念がある。そこで、光電変換素子の上部ではなく側面で暗電流の発生を抑制するフィールドド

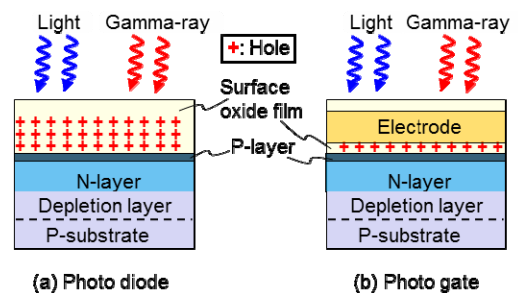


Fig.4 structure of photoelectric conversion element

レート(FP)構造についても評価対象とした。

Fig.5 に、通常の写真ダイオード構造と FP 構造の違いを示す。Fig.5(a)に示す FP 無しの場合、半導体表面でフォトダイオードの端に空乏層が存在する。通常動作では問題ないが、 γ 線照射時には γ 線が持つエネルギーによって空乏層の電子が過剰に励起される。そのため、半導体表面にあふれた電荷はフォトダイオードに流れ込み、暗電流が増加する。

一方、Fig.5(b)に示す FP 構造では、フォトダイオードの端を P 層でガードし、空乏層が半導体表面に現れないようにしている。また、 γ 線によるフォトダイオード表面の正孔蓄積に対しては、半導体表面に配置した FP 電極によって電荷を接地電極へと逃がすことができる。

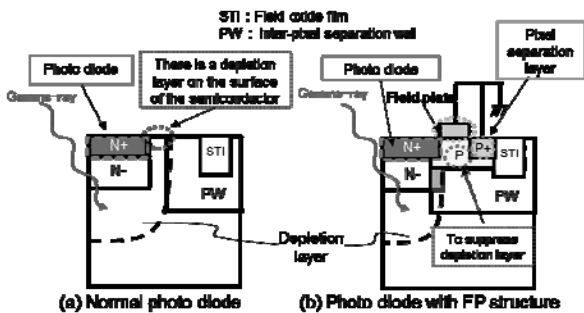


Fig. structure of photo diode

5. 実験

撮像素子のトランジスタ及び光電変換部について 3Tr 型で FP 構造を有する素子 (3TPD)、同型でフォトゲートを有する素子 (3TPG) 及び 4Tr 型でフォトゲートを有する素子 (4TPG) を試作した。これらに対して γ 線の照射中の暗電流と照射後の光電変換感度を測定した。

試験系を Fig.6 に示す。撮像素子と信号処理系を分離した構造とし、信号処理部を鉛ブロックで遮蔽しながら、撮像素子に対してのみ γ 線照射を行うことを可能とした。

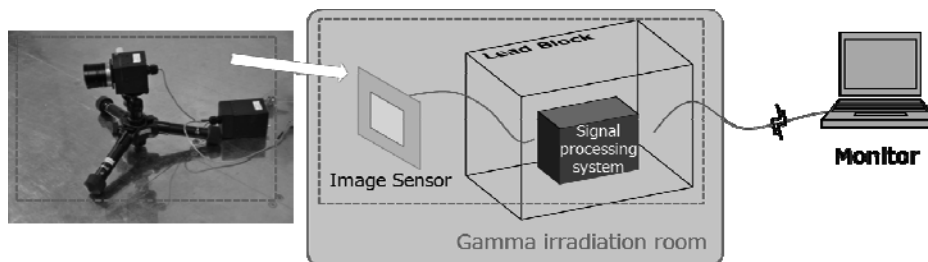


Fig. Test environment of image sensor

6. 結果・考察

Fig.7 に暗電流及び光電変換感度の照射量依存性を示す。照射前は、4TPG の暗電流が 3TPD 及び 3TPG に比べて 1 桁小さかった。また、光電変換感度は 4TPG 及び 3TPG が 3TPD よりも 2 倍程度大きかった。一方、照射後は、4TPG の暗電流は急激に増加し、50kGy までに 3Tr 型を上回るとともに、50kGy 以上では出力最大値、すなわち飽和レベルにまで達した。照射前に対する 50kGy 時の増加率で比較すると、4TPG は、3TPG 及び 3TPD よりもそれぞれ約 70 倍及び 60 倍であった。光電変換感度は、4TPG は上述の暗電流の急増によって 50kGy 以上では光電変換感度がほとんど無くなったが、3Tr 型では 70kGy 照射後も感度をもち、3TPG のほうがわずかに高かった。

これらの結果から、 γ 線照射前は 4Tr 型の方が良い特性を示すが、 γ 線照射下においては 3Tr 型が有利であることが判明した。また、同じ 3Tr 型でも表面に厚い酸化膜を持つフィールドプレート型よりも、酸化膜の薄い PG 型の方が、 γ 線照射による表面酸化膜内の正孔蓄積を抑制し、暗電流を軽減できることが判明した。

次に、3TPG と 4TPG の γ 線照射前後の画像を Fig.8 に示す。4TPG の照射前 (Fig.8(a)) では正常な画像が出力されているが、積算線量 200 kGy 時点 (Fig.8 (b)) では暗電流が増加し、ダイナミックレンジが失われた。一方、3TPG では、照射前 (Fig.8 (c)) は 4TPG 同様にクリアな画像が出力されており、積算線量 200 kGy 時点 (Fig.8(d)) でも、暗電流増加により白浮きが発生しているものの、被写体は十分に認識可能な画質である。また、照射前に白色であった箇所が灰色として映っている。これは γ 線照射によって飽和レベルが低下しているためである。Fig.9 に示す光電変換特性からも、照射量が増えるにしたがって飽和レベルが低下することがわかる。しかし、照射前の半分程度は維持されており、信号処理系で増幅を行うことにより画像コントラストは十分に確保することができると考えられる。

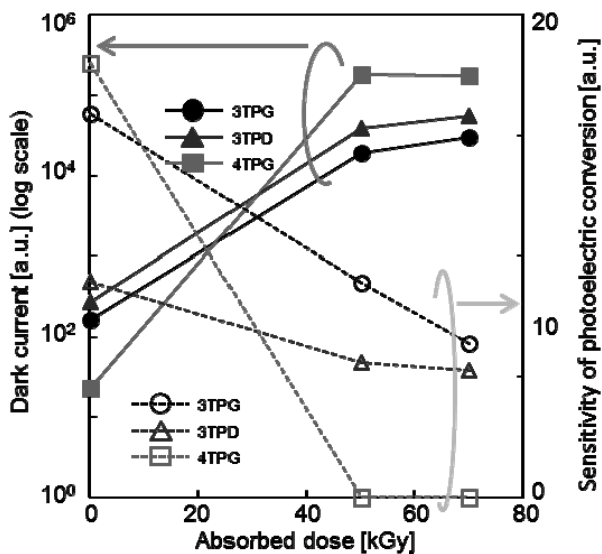


Fig. Absorbed dose dependence of dark current and sensitivity of photoelectric conversion

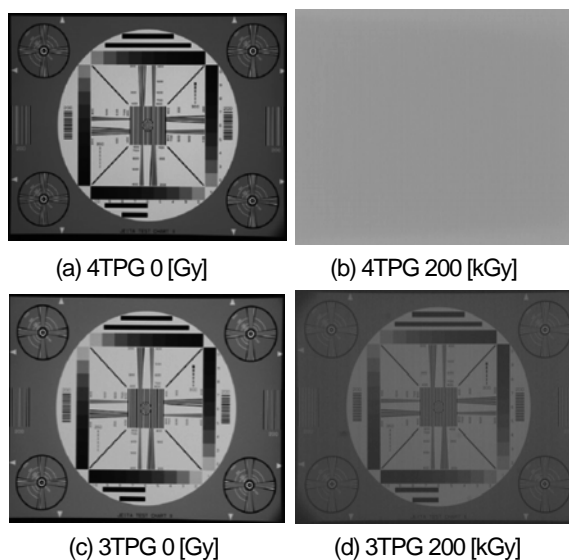


Fig. Pictures taken in 4TP and 3TP

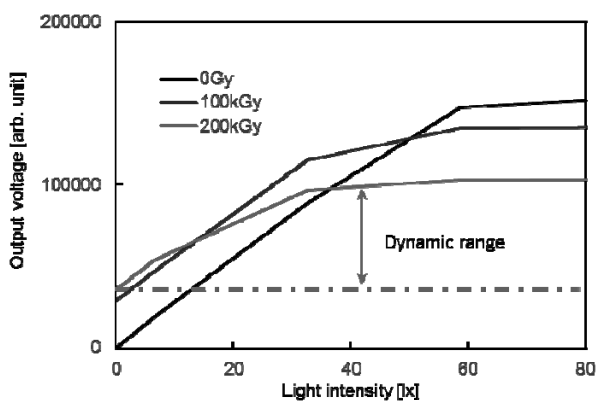


Fig. Photoelectric conversion properties of 3TP

7. まとめ

耐放射線性の向上を狙った撮像素子の検討を行い、3種類の撮像素子を実験・試作した。その結果、3Tr型かつフォトゲートを有する撮像素子はγ線による暗電流の増加を軽減できることから、積算線量200 kGyに達しても十分なダイナミックレンジを維持可能であり、10⁵Gyレベルの耐放射線性を有する監視カメラの開発に目途を付けた。

8. 今後の展開

今回、もっとも良い特性を示した3TPG型であるが、暗電流低減のため、フォトゲートに負電圧を印加している。その結果、暗電流は低減したが、同時に撮像素子の飽和レベルが低下した。そこで、リセットゲート電圧を上げて飽和レベルの維持を試みたが、暗電流が増加した。

これは、フォトゲートに負電圧を印加する事で、電荷検出部とフォトゲートの間の電位差が大きくなることで強い電界が生じ、TAT(Trap-assisted tunneling)効果に由来する暗電流が発生したためだと考えられる。

3TPG型については強い電界が発生しない構造の検討を行い、TAT効果に起因する暗電流低減と映像信号の飽和レベル確保の両立を図る。

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁からの受託事業として実施している「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業（特殊環境下で使用可能な監視システム高度化）」の成果である。

参考文献

- [1] T. Takeuchi et al., Proc. 6th International Symp. on Material Testing Reactors(2013)
- [2] D. Burt et al., Proc. SPIE, "Improving radiation tolerance in e2v CCD sensors" vol.7439_02,(2009)