

奨励金No.1449

短受検時間・低被曝線量な光子計数型 X 線 CT 用 新構造シリコン X 線センサーの創製

有吉 哲也
福岡工業大学 准教授

Development of a new structure silicon X-ray sensor for photon counting type X-ray CT with short inspection time and low radiation dose

Tetsuya Ariyoshi,
Fukuoka Institute of Technology, Associate Professor



光子計数型 X 線 CT スキャナ用のシリコン X 線光子センサーを研究している。X 線光子検出効率及び応答時間を改善するために、半導体加工技術を応用して PN 接合シリコンフォトダイオードをトレンチ（溝）状に形成する。試作した長さ 20 mm のセンサーに 60 keV の γ 線光子を照射したところ検出信号を観測することに成功した。信号電荷を損失なく収集でき、ナノ秒に迫る信号立ち上がり時間を達成でき、X 線光子センサーとしての要素技術を構築した。

Silicon X-ray photon sensors for photon-counting X-ray CT (Computed Tomography) scanner were studied. This silicon material is inexpensive and has excellent processability. To improve X-ray photon detection efficiency and response time, PN-junction silicon photodiodes are formed in a trench shape by applying semiconductor processing technology. The fabricated 20 mm-long sensor was irradiated with 60 keV γ -ray photons used in the photon-counting CT scanner, and the detection pulse signal was successfully observed. The signal charge generated by photoelectric conversion could be collected without loss, and signal rise time approaching nanoseconds level could be achieved. We have developed the elemental technology as an X-ray photon sensor.

1. 研究目的

物体識別や物体内の構造解析や物質の元素分析などの非破壊検査で、我々は光を利用している。ここでいう「光」とは可視光線はもちろん、赤外線や X 線などの不可視光も含める。特に、透過力があり放射線の一種である X 線は健康診断でレントゲン写真撮影として広く利用されており、身近である。また、物体や人体の断面像を得る CT スキャナも X 線が利用されている。従来ではこの X 線の強度情報のみ利用されて像は濃淡のみであったが、近年は X 線の光量子（光子）のエネルギー情報も活用して、撮像素素毎に元素濃度マッピン

グを得る光子計数型 X 線 CT スキャナの開発が行われている。この方式ではまた、閾値を超えた X 線光子のみを計測するので、従来型の CT スキャナと比べて検出器の暗電流の影響を避けることができる。よって高 SN 比が実現でき、余計な X 線の照射を抑えることができ、被曝線量の低減にも貢献する。情報量が多い元素濃度マッピング CT 像を得るためにはナノ秒レベルの X 線光子検出信号を得て、1000 万カウント／秒以上の X 線光子計数率を有する X 線光子検出器が求められる。実現すれば短受検時間及び従来比で一桁以上少ない被曝線量での CT スキャナが実現でき、被験者の負

担軽減となる。本研究では無害で加工が容易で安価で高いキャリア移動度寿命積を示すシリコン材料を用いて新構造のX線光子検出器を提案する。具体的な目的として、シリコン基板中にPN接合シリコンフォトダイオードをトレンチ（溝）状に形成し、センサー基板の側面方向から γ (X) 線光子を照射し、応答特性を評価する。

2. 提案するシリコン X 線光子センサー

X線は透過力があるので人体や物体の内部構造のイメージングができるが、別の見方をすると、透過力があるが故に、センサーで効率よくX線を検出することが課題である。シリコンは上述の通り無害で加工が容易で安価で高いキャリア移動度寿命積を示す有用な検出器材料である。しかし、唯一の問題点として原子番号が低く、通常のイメージセンサー用PN接合シリコンフォトダイオードでは光子計数型CTスキャナで利用される硬X線は検出されにくく、検出効率が1%以下と低い。そこでこの問題を解決すべく、図1に新たな高検出効率X線光子検出器として提案するトレンチ（溝）構造型シリコンフォトダイオードの概略図及び試作した素子の断面SEM（走査型電子顕微鏡）写真を示す。

半導体加工技術を応用し、PN接合シリコンフォトダイオードをトレンチ（溝）状に形成して、数十ボルト程度の低い印加逆バイアス電圧にて実効

的なX線有感領域（空乏領域）をセンサー中に広げ、センサー基板の側面方向からX線を照射することで検出効率を80%以上に改善できる。先の研究では抵抗率 $1500 \pm 500 \Omega\text{cm}$ のFZシリコンウエハ基板中に作製するトレンチフォトダイオードの奥行きを20 mm、印加逆バイアス電圧を -20 V として、管電圧80 kVのX線に対して83.8%のX線-信号電流変換効率を達成している[1]。

3. γ (X) 線光子検出実験

信号処理回路系として図2に示すような、単一X線光子検出パルスを検出できるように帰還容量 C_f を備えた電荷増幅器系をプリント基板上に製作した。試作したX線センサーをこのプリント基板上に実装し、法規制対象外の強度 $I=8 \text{ kBq}$ で60 keVの γ 線光子を放出する ^{241}Am 線源を用いて光子検出信号を評価する。図3に、その幾何学的関係を示す。センサー長 L は20 mm、センサー開口面積 $2a \times 2b$ は $120 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 、線源とセンサー間距離 d_0 は1.5 mm、使用した円板型線源の半径 R_s は1.2 mmであった。電荷増幅器の帰還容量を25 fF、センサーに印加する逆バイアス電圧を -20 V としたところ、図4に示すような60 keVの γ 線光子検出パルス波形を電荷増幅器にて観測した。波高値は104 mVであり、理論予測の107 mVとほぼ一致し、 γ 線光子による光電変換電荷を損失なく収集することを実証した。また、電荷収集時

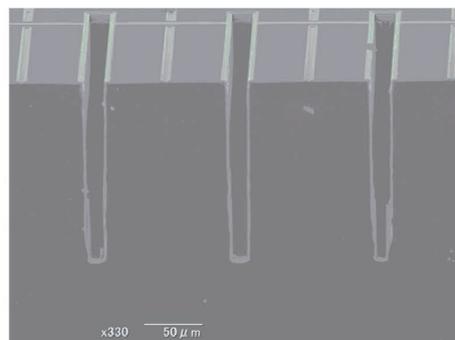
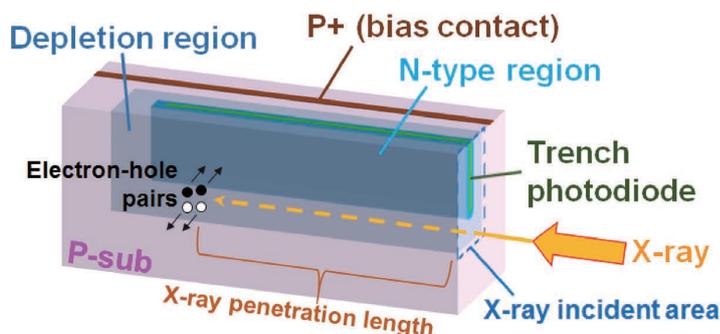


図1. 提案するトレンチ（溝）状PN接合型シリコンフォトダイオード
左図：概略図、右図：断面SEM（走査型電子顕微鏡）写真

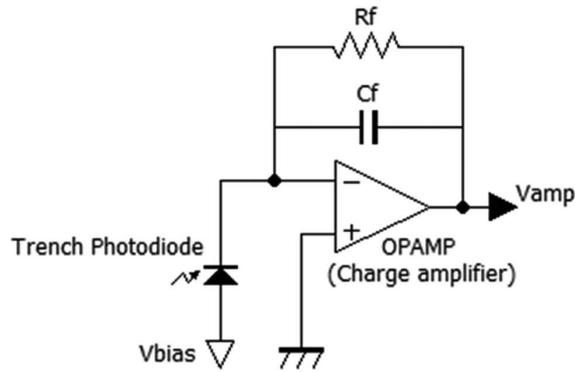


図2. γ (X)線光子検出用信号処理回路

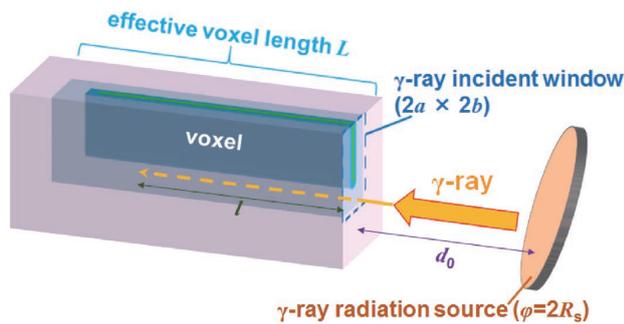


図3. 試作センサーと γ (X)線源との幾何学的関係図

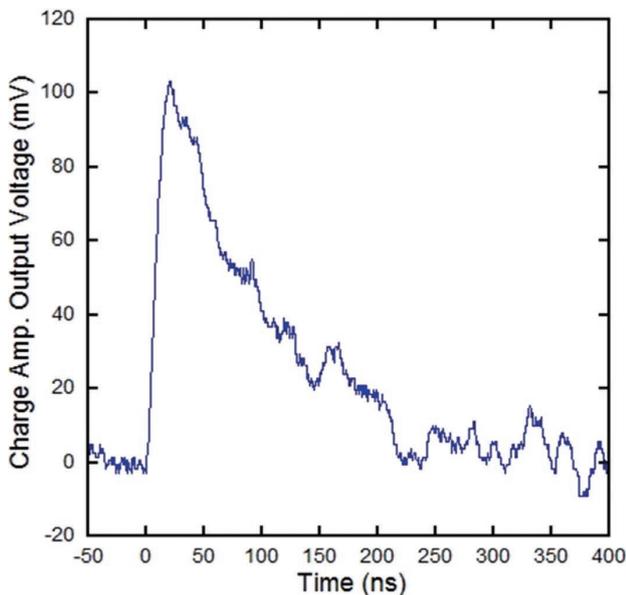


図4. 60keVの γ 線光子検出パルス波形の観測

間に比例する信号立ち上がり時間は12 nsであり、本提案センサーは光子計数型CTスキャナ用のX線光子検出器として高速で、目標とする光子計数率1000万カウント/秒を達成できる可能性も実証した。

線源の強度 I 、 γ 線放出確率 P 、線源がセンサー入射窓（開口部）を見込む立体角 $\Omega(l)$ [2]、素子中のトレンチ部の割合 v_{trench} 、線減弱係数 μ 、センサー長 L 、とすると、試作センサーの γ (X)線の計数率 r は、以下ようになる。

$$r = I \cdot P \cdot (1 - v_{trench}) \cdot \frac{1}{4\pi} \int_0^L \Omega(l) \cdot \exp(-\mu l) \cdot \mu dl$$

この γ (X)線計数率 r の理論値は 1.07×10^{-1} [cps] である。一方、実測値では 1.09×10^{-1} [cps] という結果となり、両者で近い値となった。以上の各実験によって試作センサーは γ (X)線光子を正常に検出・計数していることが実証された。但し、今回は法規制外の弱い線源を用いての実験だったので、より強度の高い線源を用いての評価が必須である。

今後の課題として、得られた γ 線光子検出パルスの立ち上がり時間12 nsの理論的裏付け、及び、より高速に生成電荷を収集できる素子構造を検討する。また、画素間に溝を掘り、画素中に生成した信号電荷が隣接画素に漏出することを防ぎ、画像のにじみを抑制するセンサー構造も検討する。以上はプロセスデバイスシミュレーションにて検証可能とされ、その評価結果をもとに実際のセンサーを試作していく。

参考文献：

[1] T. Ariyoshi, Y. Takane, J. Iwasa, K. Sakamoto, A. Baba, and Y. Arima, "Silicon trench photodiodes on a wafer for efficient X-ray-to-current signal conversion using side-X-ray-irradiation mode," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, no. 4S, pp. 04FH04-1~04FH04-6, Mar. 2018.
[2] N. Tsoulfanidis and S. Landsberger, Measurement and Detection of Radiation, 5th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2021.

4. 発表（研究成果の発表）

(1) T. Ariyoshi, "Response Properties of Silicon

Trench Photodiodes to Single α - and γ -Ray in Pulse Mode”, IEEE Access, vol. 10, pp. 56218-56231, 2022.

(2) (採択決定) T. Ariyoshi and T. Matsunaga., “Experimental and Simulating Demonstration of Fast Response by Using a Silicon X-ray Photon Sensor”, 55th Int. Conf. on Solid State Devices and Materials.