

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04285

研究課題名（和文）広ダイナミックレンジと高感度を両立した新構造シリコンX線センサーの開発

研究課題名（英文）Development of a New Silicon X-ray Sensor with Both Wide Dynamic Range and High Sensitivity

研究代表者

有吉 哲也 (Ariyoshi, Tetsuya)

福岡工業大学・情報工学部・准教授

研究者番号：60432738

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：X線は画像、構造、元素等の各分析で利用されている。近年、X線を量子的な光子として捉え、そのエネルギー情報も利用して従来の濃淡X線画像に加えて元素濃度マッピングを施す光子計数型X線イメージングが考案されている。その中でX線光子検出器はX線画像を得るための重要な機器である。本研究では安価で無害で加工性に優れているシリコンをX線光子検出器材料として利用する。X線光子検出部である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、X線光子の検出効率を改善する。X線のコンプトン散乱による画像にじみを抑える画素構造のシリコンX線光子検出器を提案した。また、単一（X）線光子の検出にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光子計数型X線イメージングは本質的に検出器の暗電流の影響を抑えることができ、照射X線量を少なくできる。更に本提案のX線光子センサーは安価で無害なシリコンを利用しており、製造時及び廃棄時の環境負荷が非常に少ない。X線の検出効率に依存する検出器材料の原子番号について、シリコンは14と高くはないが、PN接合フォトダイオードを溝状にするなど素子構造を工夫すれば検出効率を改善できる。本研究成果で鮮鋭なX線像を得られることも示された。また、他の検出器材料と比べてシリコンは移動度寿命積も優れ、高速にX線像を得ることができる。よって、被曝線量を従来よりも桁違いに抑制したうえに検査時間の短縮効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：X-rays are used for image, structural, and elemental analysis. Recently, photon-counting X-ray imaging, which treats X-rays as photons and uses their energy information to perform elemental density mapping in addition to conventional gray-scale X-ray images, has been proposed. The X-ray photon detector is an important instrument for obtaining these X-ray images.

In this study, silicon, which is inexpensive, non-toxic, and has excellent processability, is used as the X-ray photon detector material. The X-ray photon detection part, a PN junction silicon photodiode, is formed in the trench shape to improve the detection efficiency of X-ray photons. A silicon X-ray photon detector with a pixel structure that suppresses image blurring due to Compton scattering of X-rays is proposed. A charge amplifier to obtain a photon detection signal was designed and fabricated, and the proposed silicon X-ray photon sensor was implemented. We have also succeeded in detecting single (X)-ray photons.

研究分野：電気電子工学

キーワード：X線 光子 センサー シリコン フォトダイオード 半導体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光はモノを照らして視覚的にモノを判別するだけではなく、画像分析、元素分析、構造解析などミクロな非破壊分析でも利用されており、これまでの間、材料科学や医療画像などで新素材の開発や画像診断などで人類に多大な恩恵をもたらしてきた。特にX線は透過力がある光であり、レントゲン写真やCTスキャナなど、人体や物体の内部構造を透視する手段として幅広く利用されている。このうちX線CTスキャナは人体や物体の断面構造を得て病気などの発見に貢献してきた。しかし、X線センサーの暗電流を凌駕するためには高線量のX線を利用せざるを得ず、X線による被曝は避けられないとされてきた。近年はX線を量子的な光子として計数してCT像を得るフォトンカウント型X線CTが開発されている。この手法では閾値を超えたX線光子のみを計測するので暗電流の影響を回避でき、低線量のX線でCT像を得ることができる。また、X線光子のエネルギー情報も利用でき、CT像の元素マッピングも可能となる。X線は透過力があるので透視撮影ができるが、言い換え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。現状ではX線を効率よく検出できる高原子番号材料のX線センサーが利用されているが、有害物質や高価な希少元素を利用しており、また、X線光子の検出時間がマイクロ秒にも及ぶ場合がある。そこで、無害で安価で高X線検出効率で高速なX線光子センサーの開発が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では半導体材料として集積回路等で幅広く利用されているシリコンをX線光子センサーの材料として採用する。シリコンは地殻中に多く分布している元素で安価であり、無害でもある。また、電子・正孔移動度やキャリア寿命も他の半導体材料と比べて優れている。加工性にも優れており、半導体製造の工程であるRIE (Reactive Ion Etching : 反応性イオンエッチング) や光検出部の構成要素であるPN接合フォトダイオードの形成が容易である。しかし、シリコンは原子番号が14と低く、また、PN接合フォトダイオードの空乏層領域の厚さが数マイクロメートル程度であり、このままでは透過力のあるX線の検出は困難である。そこで本研究ではシリコンウエハ基板中に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、センサー内の大部分を空乏化したうえで、基板側面方向からX線を照射する方式を提案し、シリコンX線センサーにて高検出効率を実現することを試みている。既に管電圧80kVの連続X線に対してはX線-信号電流の変換効率83.8%を達成している[1]。このX線のエネルギー帯域ではシリコン中ではコンプトン散乱の割合が多くなり、X線画像の位置分解能の低下の影響が出始める。コンプトン散乱とは、X線が物体に入射したときに、入射X線より長い波長をもってX線が散乱する現象である。そこで本研究では(1)コンプトン散乱X線の隣接画素への侵入を抑止する素子構造の設計を試みた。また、X線光子計測用の信号処理回路を試作し、提案X線センサーと組み合わせ、(2)単色 γ (X)線光子照射実験を行い、その応答特性を調査した。

3. 研究の方法

提案するX線センサーの断面構造を図1に示す。ウエハ基板をP型半導体、信号検知側をN型半導体として、トレンチ側面と底面に沿ってPN接合型フォトダイオードを形成する。このトレンチ構造型X線フォトダイオードによって実効的なセンサー長を拡張することができ、X線を効率よく検出することができる。さらに数十ボルトの低逆バイアス電圧にてセンサー内を空乏化するために、抵抗率 $1500 \pm 500 \Omega \text{ cm}$ 、厚さ $550 \mu \text{ m}$ のP型FZシリコンウエハをセンサー基板として利用する。

試作したX線センサーのチップ写真を図2に示す。このX線センサーチップは108個の画素セルで構成され、1画素セルには1列に5個のトレンチ型フォトダイオードが並んでいる。センサー長は22.6mmであり、試作した溝の深さは約300 μm である。この試作X線センサーチップ

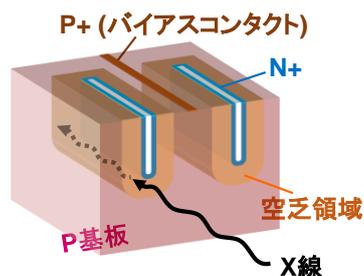


図1 提案X線センサーの概略図

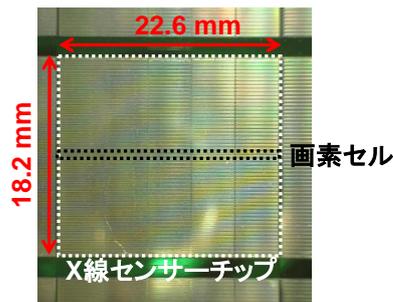


図2 試作したX線センサーチップ

プを利用して、以下のような各評価を行った。

4. 研究成果

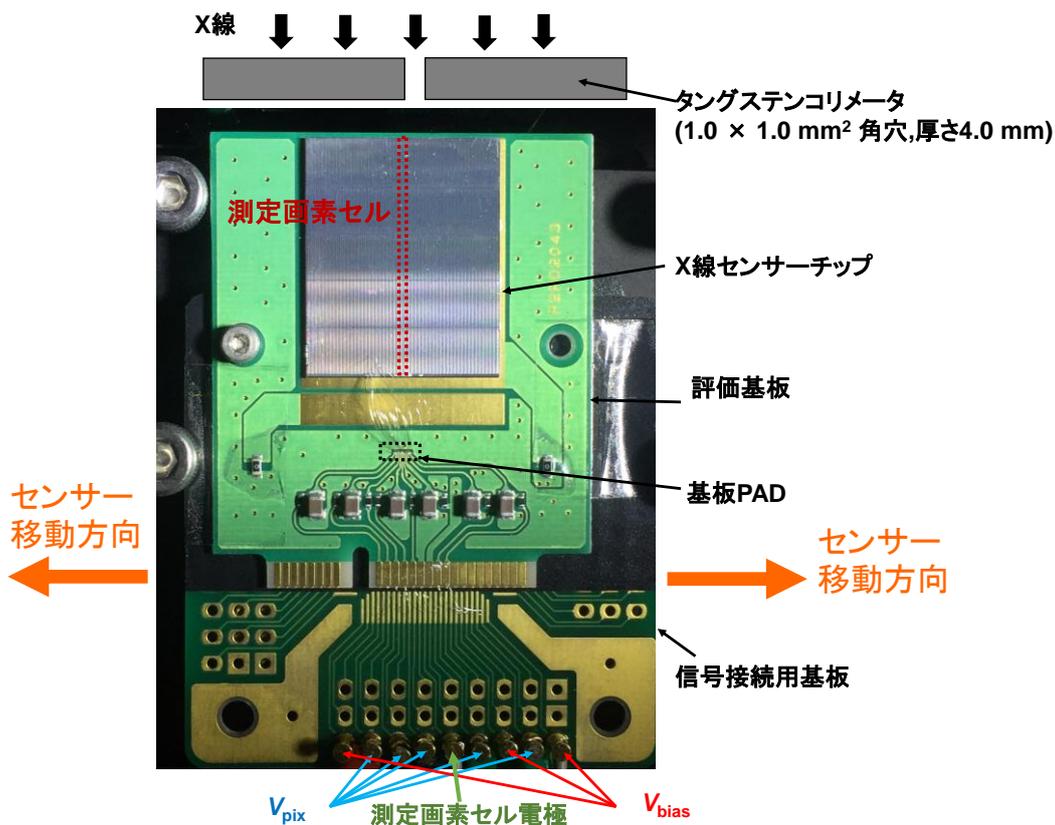


図3 試作 X 線センサーのアセンブリ構成写真

(1) コンプトン散乱 X 線の隣接画素への侵入を抑止する素子構造の設計

コンプトン散乱による画像鮮鋭度を MTF (Modulation Transfer Function: 光学系の変調伝達関数) によって評価する。また、コンプトン散乱による位置分解能の低下を抑えるセンサー構造を提案する。今回評価に用いる X 線センサーチップとそれを搭載した評価用基板のアセンブリ構成写真を図3に示す。測定セルには半導体パラメータアナライザを接続し、X 線検出電流を測定する。測定セル両側の各3セルのカソード電極にはリセット電圧 V_{pix} を与え、周辺セルで生成した信号電荷はそのセルで収集されるようにして測定セルへの影響を防ぐ。各トレンチフォトダイオード間とチップ裏面へ接続したアノード電極には逆バイアス電圧 V_{bias} を与える。X 線センサーには 1mm 角穴がある 4mm 厚のタングステンコリメータを通して X 線を照射する。X 線管からセンサーまでの距離は 34.5cm である。入射 X

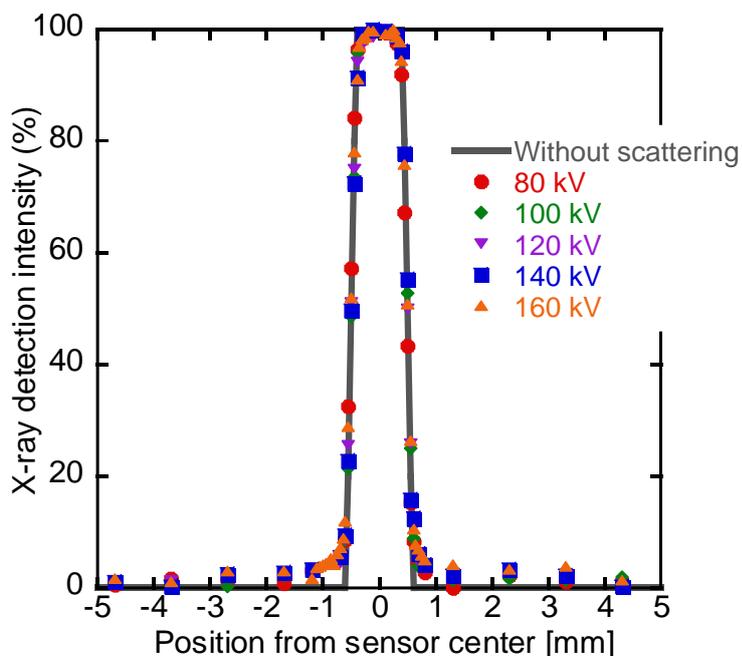


図4 X 線検出強度と X 線センサーの位置の関係

線センサーには 1mm 角穴がある 4mm 厚のタングステンコリメータを通して X 線を照射する。X 線管からセンサーまでの距離は 34.5cm である。入射 X

線に対して垂直方向にセンサーを平行移動させ各位置における測定セルからの X 線検出電流を計測することで、X 線のコンプトン散乱程度を評価する。

図4は、管電圧 80~160kV、管電流 2mA、逆バイアス電圧 25V をセンサーに印加した場合の、各センサー位置での測定画素セルの X 線検出強度を示している。図4の縦軸は、開口部に対する測定画素セルの検出電流比を示す。また、散乱のない場合は灰色線で示し、各測定点は散乱 X 線によるものである。

図4の、エッジ画像を微分して線広がり関数 (LSF: Line Spread Function) を求め、この LSF に対して離散フーリエ変換を実行して変調伝達関数 (MTF) を得る。図5は、図4のデータから得た X 線センサーの管電圧 120kV における MTF と、参考として示した CsI シンチレータ型センサー[2]、CdTe センサー[3]の MTF を示している。シリコンではコンプトン散乱が大きくなるため、作製したセンサーの MTF は CdTe の MTF に劣っている。

MTF、すなわち空間分解能を向上させるためには、散乱 X 線を抑制することが必要である。画素の周囲に別のトレンチを掘り、このトレンチに金を充填することで、散乱 X 線が隣接する画素に漏れることを防ぐことができる。埋めた金の幅を 10~40 μm とした場合の MTF シミュレーション結果も図5に示している。幅 30 μm の金膜を用いた場合、高空間周波数領域で MTF が CdTe を上回る値まで向上すると予想される。高空間周波数でのコンプトン散乱 X 線の遮蔽効果を予測でき、X 線画像の鮮鋭度を向上させる予測ができた。

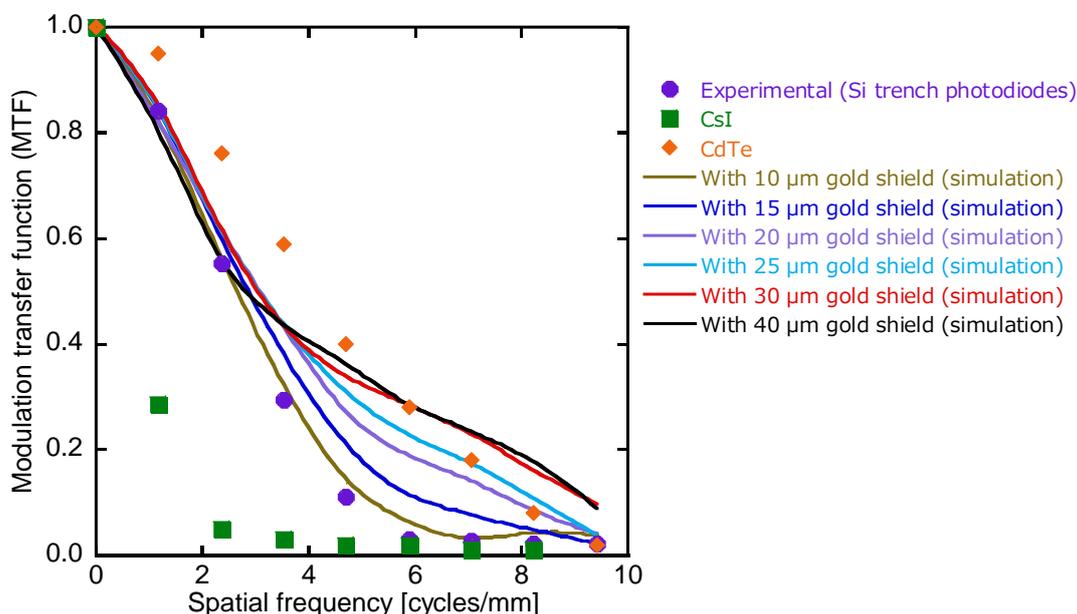


図5 MTF の評価結果

(2) 単色 γ (X)線光子照射実験

光子計数型 X 線 CT に向けて、 γ (X)線光子計数用の信号処理回路を設計した。基本は電荷増幅器で、帰還容量 25fF として、 γ (X)線光子の検出電流パルスを電荷増幅器の帰還容量に収集して電圧パルスをつづつ得る。図6に、測定系を示す。試作 γ (X)線光子センサーを信号処理回路搭載のプリント基板上に実装し、センサーに 8kBq の ^{241}Am 線源からの 60keV の γ 線光子を側面から照射する。センサーにはバイアス電圧: -20V、プリント基板には電源電圧が与えられている。センサーが γ 線光子を光電吸収し、信号処理回路 (電荷増幅器) から γ 線検出パルス信号を得て、主増幅器経由で波高スペクトルを得る。

図7に、電荷増幅器にて観測した γ 線検出パルス信号を示す。波高値は約 104mV を観測し、理論値約 107mV とほぼ一致した。また、信号の立ち上がり時間は 12ns 程度であった。また、試作センサーの γ 線計数率は $1.09 \times 10^{-1}\text{cps}$ と観測し、センサー長や線源と試作センサーとの間の幾何学的効率から計算・予測される γ 線計数率: $1.07 \times 10^{-1}\text{cps}$ とほぼ一致した。以上より、提案の X 線センサーの試作に成功し、 γ (X)線光子の検出の諸特性は理論予測とほぼ一致した。

今後はセンサー内で光電生成した信号電荷が隣接画素へ漏れることを抑えたセンサー構造の検討を進める。また、電荷収集時間に比例する信号の立ち上がり時間 12ns の理論的裏付けを行い、更に早い信号立ち上がり時間を示す素子構造を検討する。

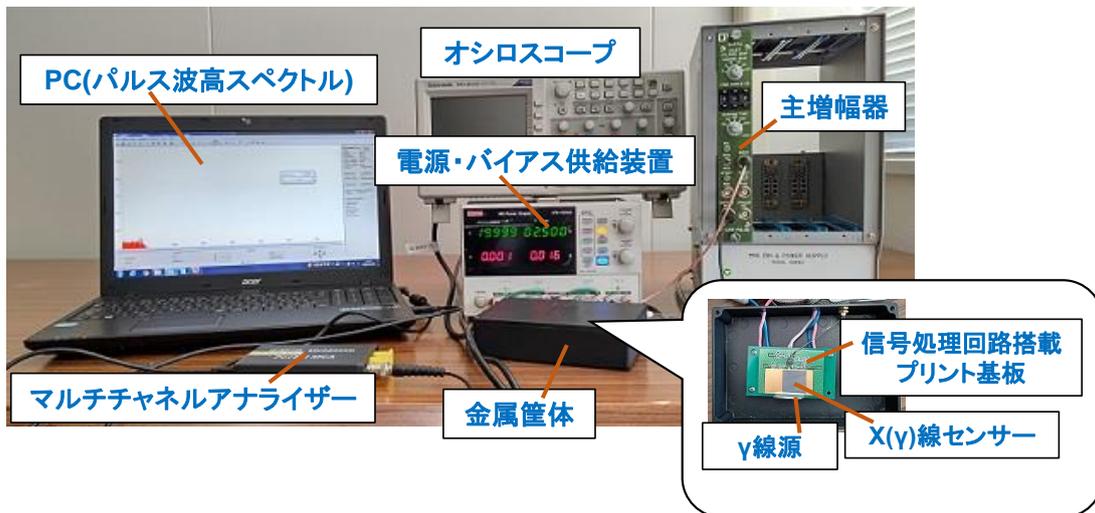


図6 提案 X 線センサーによる $\gamma(X)$ 線光子検出実験

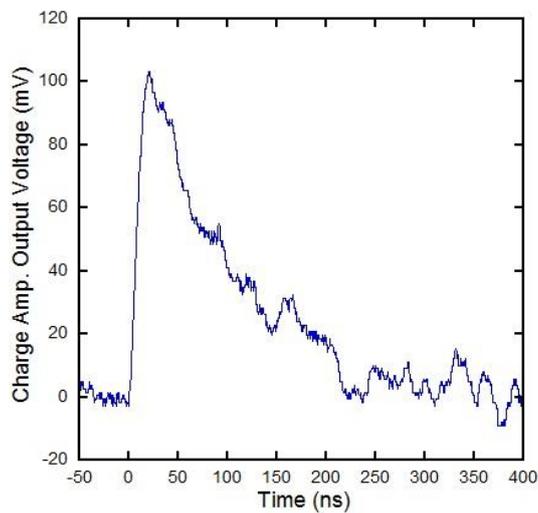


図7 γ 線光子検出パルス

参考文献：

- [1] T. Ariyoshi et al.: "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, 2018, 04FH04.
- [2] P. Büchele, et al.: "X-ray imaging with scintillator-sensitized hybrid organic photodetectors," Nat. Photonics 9 (2015) 843.
- [3] K. Spartiotis, et al.: "A CdTe real time X-ray imaging sensor and system," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A 527 (2004) 478.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tetsuya Ariyoshi, Jumpei Iwasa, Yuta Takane, Kenji Sakamoto, Akiyoshi Baba, and Yutaka Arima	4. 巻 15
2. 論文標題 Modulation transfer function analysis of silicon X-ray sensor with trench-structured photodiodes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20180177-1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.15.20180177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ariyoshi Tetsuya	4. 巻 10
2. 論文標題 Response Properties of Silicon Trench Photodiodes to Single - and -Ray in Pulse Mode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 56218 ~ 56231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3177624	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	有馬 裕 (Arima Yutaka) (10325582)	九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・教授 (17104)	
研究分担者	坂本 憲児 (Sakamoto Kenji) (10379290)	九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・准教授 (17104)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------