

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390104

研究課題名(和文) 側面X線照射方式を用いた低被曝線量X線CT用高感度X線センサの研究開発

研究課題名(英文) Research of high sensitivity X-ray sensor for low radiation dose X-ray CT using side X-ray irradiation method

研究代表者

有吉 哲也 (Ariyoshi, Tetsuya)

九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・助教

研究者番号：60432738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：CTスキャナなどの医療用X線画像診断はX線被曝の問題が付きまとう。X線センサーの感度を従来よりも桁違いに高くしてX線被曝線量を桁違いに抑えることで、高度で安全で様々なX線画像診断を気軽に制限なく誰もが受けることができる。本研究ではトレンチ構造型フォトダイオードを採用した次世代の直接変換型シリコンX線センサーを提案する。この提案X線センサーは高感度・高速応答・長デバイス寿命・低消費電力・高エネルギー分解能の特徴を並立する。提案X線センサーを試作し、理論限界に迫る吸収X線-電流信号変換効率を実証した。

研究成果の概要(英文)：Medical X-ray diagnosis devices such as CT scanners entails the problem of X-ray radiation dose. By improving the sensitivity of the X-ray sensors, the X-ray radiation dose can be decreased and everyone can easily use various kinds of safe X-ray diagnosis without restrictions. In this study, we propose a direct conversion type silicon X-ray sensor adopting a trench-structured photodiodes. This proposed X-ray sensor has the features of high sensitivity, high speed response, long device lifetime, low power consumption, and high energy resolution. The prototype X-ray sensor was fabricated, and this sensor demonstrated the absorbed X-ray-to-current signal conversion efficiency approaching the theoretical limit.

研究分野：放射線計測

キーワード：X線センサー トレンチ構造型フォトダイオード 低被曝線量 半導体デバイス

1. 研究開始当初の背景

X線CTなどの医療用X線画像診断は病気の早期発見のために幅広く利用されており、この照射X線による人体への医療被曝の低減化が求められている。この要望を満たすために、高感度なX線センサーの開発が求められ、様々なX線検出感度の向上を目指した研究が行われている。

X線センサーはX線の検出の仕方によって間接検出方式と直接検出方式に分類される。直接検出方式では蛍光物質でX線を一旦可視光へ変換してこの可視光を計測する間接検出方式で見られる変換損失や変換可視光の等方的拡散がなく、X線の電気信号変換効率と時間・空間分解能が高い。従って、直接検出方式では汎用の間接検出方式と比べて感度を改善でき、被曝線量の抑制が実現できる。直接検出方式でシリコンをX線センサーの母材とした場合、電荷キャリアの寿命が他のCdTe、HgI₂センサー材料と比べて桁違いに長い、素材コストが安い、加工が容易などの利点がある。但し、X線はシリコン中を数十mm透過するので、センサー構造を工夫する必要がある。現在、ストリップライン構造のフォトダイオードを形成したシリコンX線センサーが提案されているが、シリコンウエハ基板の不純物濃度を限界近い $3.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ まで低くし、且つフォトダイオード電極間隔が $500\mu\text{m}$ と広く、600ボルトもの高いバイアス電圧をフォトダイオードへ印加する必要がある。よって、デバイス寿命が短くなることや応答時間が短くなるという課題がある。

2. 研究の目的

本研究では高感度・高速応答・長デバイス寿命・低消費電力・高エネルギー分解能・高位置分解能・素材が安価という特徴を並列して有する直接検出方式用トレンチ構造型シリコンX線フォトダイオードを提案する。このトレンチ型フォトダイオードは図1に示すように、ウエハ基板をP型シリコン半導体、信号検出側をN型シリコン半導体としたフォトダイオードをトレンチ状に形成したX線検出センサーである。

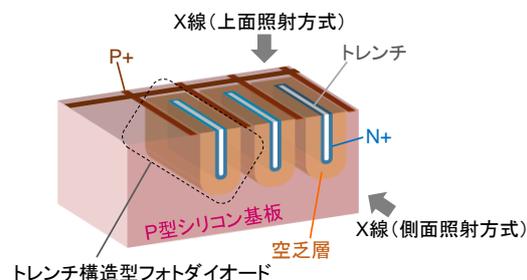


図1：トレンチ型フォトダイオードによる直接検出方式X線センサーの概略

このセンサーはトレンチの深さ・長さ・幅・間隔の調整、センサーへのX線の照射方向(上

面から、側面から)などの自由度が高く、利用目的や作製条件など多様なニーズに合ったX線センサーを自由を作ることができる。また、このトレンチ型フォトダイオードはある程度濃い不純物濃度のシリコンウエハから作製でき、且つ数十ボルトの低バイアス電圧にて画素内をほぼ空乏化できる。また、トレンチ長さをX線の透過長程度に設計し、センサーの側面方向からX線を入射させることで高いX線の電気信号変換効率を実現できる。高感度・低バイアス電圧・高速応答など、様々な利点を有する直接検出方式用トレンチ構造型シリコンX線フォトダイオードを設計・試作し、X線検出器としての基本機能を実証していくことを目指した。

3. 研究の方法

トレンチ構造型フォトダイオードの設計、試作、評価の順に行う。設計ではデバイスシミュレータにて適切なトレンチフォトダイオードの形状を導き出し、その結果をもとにトレンチフォトダイオードのレイアウト図を作成する。次にトレンチフォトダイオードを含むX線センサーチップを試作し、断面SEM写真と半導体パラメータを利用した電流-電圧特性を測定し、トレンチ構造型フォトダイオードが正常なダイオード特性を示すことを確認する。次にX線を試作したX線センサーに上面から照射し、センサーに吸収されたX線のうち、どの割合がトレンチフォトダイオードに回収されて電気信号に変換されたかを見積もる。

4. 研究成果

提案するトレンチ構造型フォトダイオードを形成し、数十ボルトの低いバイアス電圧で画素内の大部分を空乏層で満たすために、抵抗率が $1500 \pm 500 \Omega\text{cm}$ 、厚さが $550\mu\text{m}$ のP型FZウエハ基板を用いた。

まずは上面照射方式での感度特性を評価する。ウエハ基板をP型半導体、信号検出側をN型半導体としたフォトダイオードをトレンチ状に形成した。トレンチ周囲に形成した空乏層がX線の検出領域となり、この長い空乏層に沿ってX線を入射させることで高いX線の検出効率が達成できる。図2に提案X線センサー全体のレイアウト図を、図3に画素のレイアウト図をそれぞれ示す。

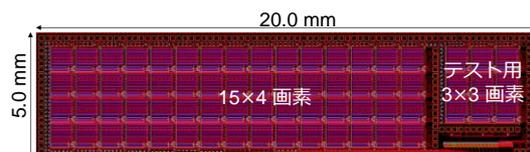


図2 X線センサーの全体レイアウト図

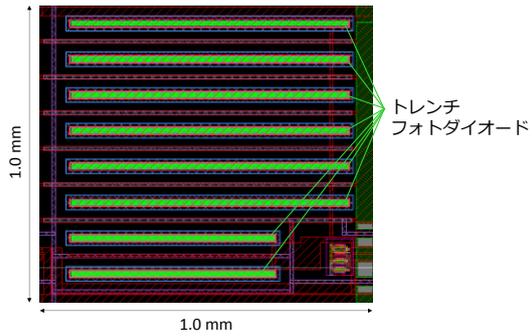


図3 X線センサー画素のレイアウト図

センサーチップは $0.35\mu\text{m}$ 、1-Poly、1-Metal プロセスを用いて試作した。チップサイズは $5.0 \times 20.0\text{mm}^2$ である。画素のサイズは $1.0 \times 1.0\text{mm}^2$ であり、一つの画素に8個のトレンチフォトダイオードを形成している。トレンチフォトダイオードの間隔は、逆バイアス電圧の印加時に形成される空乏層幅の二倍となるように設計している。今回は、トレンチフォトダイオードの間隔は $120\mu\text{m}$ 、幅は $17\mu\text{m}$ である。図4に試作したX線センサーの写真を、図5にトレンチフォトダイオードの断面 SEM 写真を示す。トレンチフォトダイオードの深さは約 $300\mu\text{m}$ である。

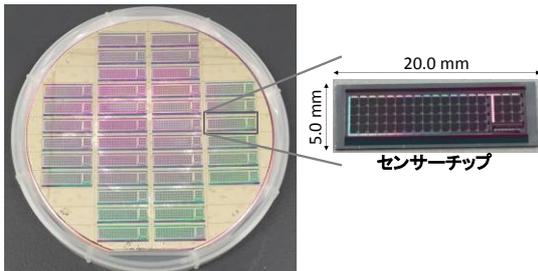


図4 試作したX線センサー

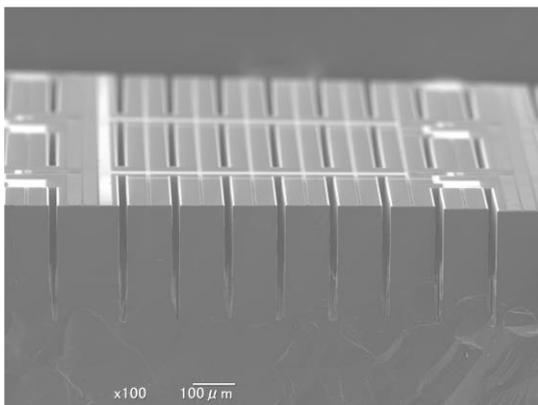


図5 トレンチ構造型フォトダイオードの断面 SEM 写真

試作した深さ $300\mu\text{m}$ のトレンチ構造型PN 接合フォトダイオードの電流-電圧特性を 図6 に示す。

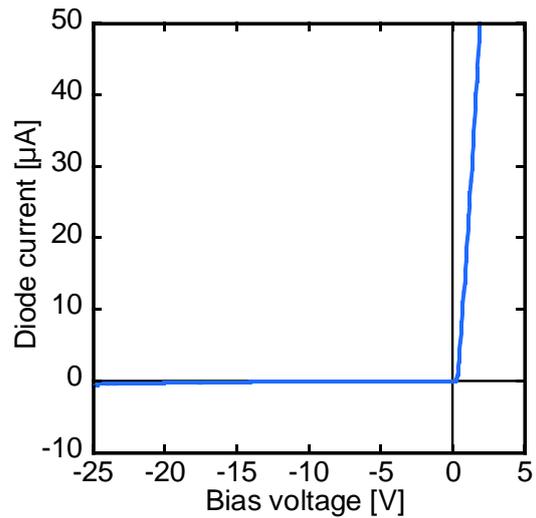


図6-1 試作したトレンチフォトダイオードの電流-電圧特性1

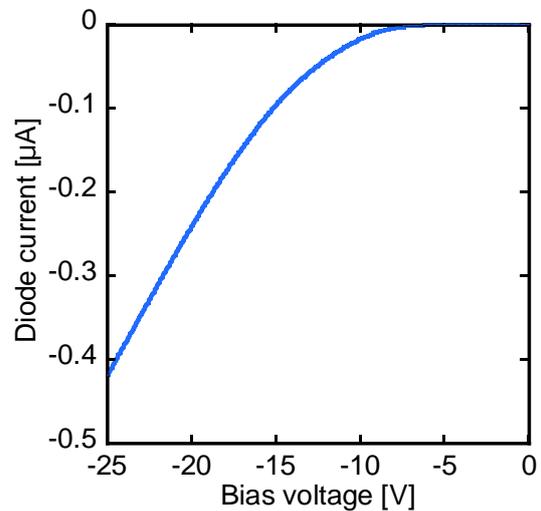


図6-2 試作したトレンチフォトダイオードの電流-電圧特性2

逆バイアス時の漏れ電流は 500nA 以下で降伏現象は観測されず、また、順バイアス時のダイオード電流は数十 μA であることから試作したトレンチフォトダイオードはダイオードとして正常な電流-電圧特性を示し、X線検出に有効であることを確認した。今後は 10nA 以下の、更に低い漏れ電流を示すトレンチフォトダイオードを形成していく。

X線を試作センサーに照射し、センサーが吸収したX線エネルギーのうちどの割合がトレンチフォトダイオードによって電気信号に変換されたかを評価した。

タングステンターゲットを有するX線管を用いてX線を得る。今回はX線管の管電圧を 80kV 、管電流を $1.0 \sim 3.0\text{mA}$ とした。画素サイズは 1mm 角であるので、X線スペクトロメータを用いて、まずは 1mm 角当たりに入射するX線のエネルギースペクトルを測定する。次にセンサー画素をX線発生装置とX線スペクトロメータとの間に挟み、センサー画素を透過後のX線のエネルギースペク

トルを測定する。前者のエネルギースペクトルから後者を差し引き、センサー画素体積 (1mm×1mm×550μm) にて発生する電気信号キャリアの電流換算値を算出した。この電流換算値が、センサー画素が検知できる上限の電流信号値となる。

次に、フォトダイオードに印加する逆バイアス電圧値を 1,5,10,15,20,25V とし X 線照射時と X 線無照射時での画素からの電流信号を測定し、X 線無照射時オフセット電流を差し引くことで X 線検知電流を導出した。図 7 に試作した X 線センサーを用いて X 線検知電流を測定する様子を示す。図 8 に電流信号の測定概略図を示す。電流信号は汎用の半導体パラメータアナライザを用いて測定した。

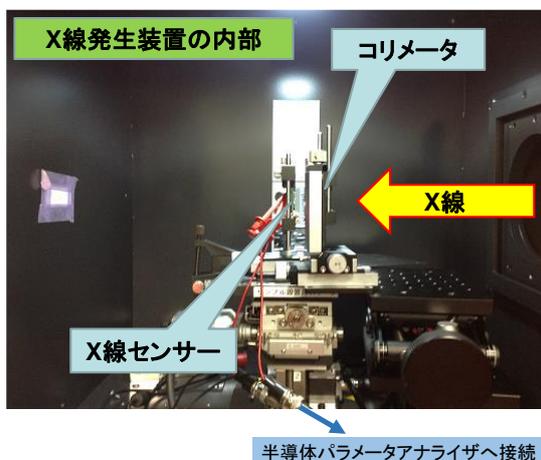


図 7 試作したトレンチフォトダイオードを組み込んだ X 線センサーによる X 線検知電流の測定風景



図 8 半導体パラメータアナライザを用いたトレンチフォトダイオードの X 線検知電流の測定方法

以上の、センサー画素体積で発生する上限電流換算値と X 線センサー画素からの X 線検知電流をまとめ、トレンチフォトダイオードの逆バイアス電圧と X 線検知電流の関係を図 9 に示す。図中のマーカーは X 線検知電流を、実線は上限電流換算値をそれぞれ示す。図 9 からバイアス電圧の上昇に伴い空乏層幅がトレンチ間隔に迫り、X 線検知電流が上限値に近づく傾向が観測された。今回試作した X 線センサー構造では 20V 程度の低いバイアス電圧で十分に動作できることが確認された。

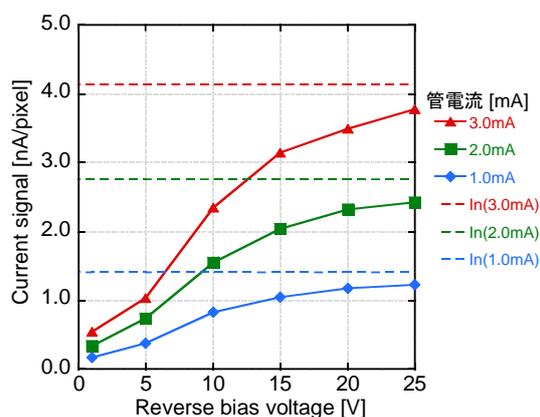


図 9 トレンチフォトダイオードによる X 線検知電流と印加逆バイアス電圧との関係図。実線は正味の X 線検知電流を示し、点線は上限電流換算値を示す。X 線発生装置の管電圧は 80kV 一定、管電流は 1.0、2.0、3.0mA とした。

表 1 吸収 X 線-電流変換効率

Reverse bias voltage [V]	Conversion efficiency (%) at specific tube current		
	1.0 [mA]	2.0 [mA]	3.0 [mA]
1	12.2	12.3	13.1
5	26.2	26.7	24.8
10	58.4	56.1	56.6
15	74.0	74.0	75.9
20	83.6	84.0	84.4
25	87.5	87.6	91.1

表 1 に、X 線検知電流を上限電流換算値で割って得た吸収 X 線-電流変換効率を示す。管電流 3.0mA、印加逆バイアス電圧 25V の条件の下で得られた変換効率は 91.1%である。今回試作した X 線センサーにおける不感領域であるトレンチ空洞部の体積は画素中の 5.7%であった。従って、吸収 X 線-電流変換効率の理論限界は 94.3%となる。試作した X 線センサーのトレンチの深さは約 300μm であり、センサー厚の 550μm と比べるとやや浅いことと、裏面にバイアス電極を設けなかったことなどから、変換効率はそれらの改善によって更に向上できると考えられる。

今後は側面照射方式による照射 X 線-電流変換効率、トレンチフォトダイオードの狭間隔による信号電荷収集時間の短縮化、逆バイアス 20V 時の漏れ電流を実用上問題ない程度の数 nA にすること、シリコン中における X 線のコンプトン散乱による X 線画像のぼやけ、次世代の X 線 CT の要素技術であるシングルフォトンカウンターの各評価実験を行っていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

T.Ariyoshi, S.Funaki, K.Sakamoto, A.Baba, and Y.Arima: “X-ray-to-current signal conversion characteristics of trench-structured photodiodes for direct-conversion-type silicon X-ray sensor”, Japanese Journal of Applied Physics, Volume 56 Issue 4S, pp.04CH06-1~04CH06-5 (2017).
(Doi: 10.7567/JJAP.56.04CH06)
(査読あり)

[学会発表] (計 1 件)

T.Ariyoshi, S.Funaki, K.Sakamoto, A.Baba, and Y.Arima: “Sensitivity Properties of a Direct Conversion Silicon X-ray Sensor with Trench-Structured Photodiodes”, 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp.141~142 (2016). 2016.9.27, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有吉 哲也 (ARIYOSHI TETSUYA)
九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・助教
研究者番号：60432738

(2) 研究分担者

有馬 裕 (ARIMA YUTAKA)
九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・教授
研究者番号：10325582

馬場 昭好 (BABA AKIYOSHI)
九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・准教授
研究者番号：80304872