

宇宙 X 線観測用 SOI ピクセル検出器における 電荷収集効率の改善

京都大学大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室
松村 英晃

X 線トランジェントとは、突然出現する X 線天体であり、その多くは激しい時間変動を伴う。X 線天体観測の初期の時代から確認されていたこの現象は、現代でも非常に興味深いものである。現在に至まで、多くの検出器で X 線トランジェントが観測されてきたが、10 keV 以下の軟 X 線帯域での観測例は非常に少ない。従来の広視野な検出器では、CdTe や CdZnTe など軟 X 線の感度が弱いものを用いており、エネルギー帯域が制限されていたからである。軟 X 線の情報が無いために、サイエンスが限られていた。そこで我々は、10 keV 以下を含む広帯域で X 線トランジェントを観測する次世代の装置を開発することを目指す。

我々の研究室では Silicon On Insulator (SOI) 技術を用いた、検出部・読み出し回路一体型のピクセル検出器である SOI ピクセル検出器を改良し、宇宙 X 線観測用とした XRPIX を開発している(図 1)。SOI 技術とは、シリコンウェハの上に酸化膜 (SiO_2) を作り、その上に別のシリコン薄膜 (SOI 層) を形成する技術である。裏面に電圧 (バックバイアス電圧) をかけることで、高抵抗率のシリコン (センサー層) を空乏化させて X 線検出部として利用し、抵抗率の低い SOI 層に CMOS 回路を搭載して読み出し部として利用できる。XRPIX ではバックゲート効果抑制のために、CMOS 回路の直下のセンサー層表面部に Buried P-Well (BPW) と呼ばれる薄い P 層を形成している。

XRPIX はシリコンのピクセル検出器であり、良いエネルギー分解能 ($E/\Delta E = 6 \text{ keV}/0.14 \text{ keV}$) と位置分解能 (ピクセルサイズ: $30 \mu\text{m}$ 角) が期待できる。さらに、各ピクセルに X 線入射のタイミングを判定するトリガー機能を備え、X 線が入射したピクセルのみを読み出し、優れた時間分解能 (数 μsec) を達成する。このような検出器では周りをアクティブシールドで囲うことで高エネルギー荷電粒子によるバックグラウンド (入射頻度: 1 kHz) を除去することが可能となる。

先行研究において我々はイベント駆動読み出しと、 $30 \mu\text{m}$ 角ピクセルで厚い空乏層 ($500 \mu\text{m}$) を持つ素子 (XRPIX1b) の開発に成功した。私はこの素子に X 線源 ^{241}Am を照射し、得たエネルギースペクトルを詳細に調べた (図 2)。赤線は X 線入射により発生した電荷雲が一つのピクセルのみで回収されたイベントであるシングルピクセルイベントのスペクトル、青線は電荷雲が二つのピクセルにまたがり回収されたダブルピクセルイベントのスペクトルである。シングルピクセルイベントのスペクトルでは、 ^{241}Am の 13.9 keV と 17.7 keV の二本の細い輝線を検出を確認した。それに対して、ダブルピクセルイベントでは輝線が太くエネルギー分解能が悪くなっていた。また輝線的位置もシングルピクセルよりも低いチャンネルに存在する「ピークシフト」の現象が見られた。このピークシフトは、ダブルピクセルイベントでは電荷損失があり、入射した X 線のエネルギーを再現できていないことを示している。また、電荷損失が起こると回収できる電荷量が各イベントでばらつくため、エネルギー分解能は悪くなる。ダブルピクセルイベントはピクセル境界をまたぐチャー

ジシェアリングイベントであるので、電荷損失の原因はピクセル境界付近にあるのかもしれない。この電荷損失の現象は、検出器の電荷収集効率を著しく低くし、ひいてはエネルギー分解能を劣化させる。これは検出器開発上の大きな問題である。そこで、この電荷収集効率の問題の原因追及と改善を行った。

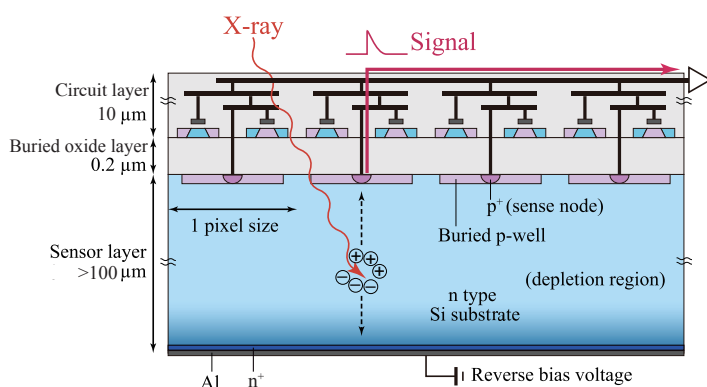


図1 XRPIXの模式図。

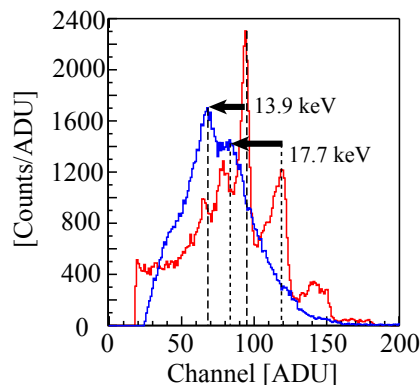


図2 XRPIX1bで取得した²⁴¹Amのエネルギースペクトル。赤線はシングルピクセルイベント、青線はダブルピクセルイベントのエネルギースペクトル。

我々は SPring-8 において、XRPIX1b に $10\ \mu\text{m}\Phi$ の細いビームを $6\ \mu\text{m}$ ピッチで照射し、素子のサブピクセルレベルでの X 線レスポンスを調査した。私はこの実験の準備、測定、データ解析のすべてを主導した。その結果、電荷収集効率および検出効率が悪い場所がピクセルサイズの間隔で存在することを発見した。これらは共に電荷損失が原因であり、これがエネルギー分解能を悪くしている最大の要因でもある。さらに素子にかかるバックバイアス電圧が大きいときほど、電荷損失の影響が大きいことも分かった。

X 線の入射によって発生した電荷は、センサー層内の電場に沿って読み出しノードまで運ばれ、回収される。センサー層内の電場は、読み出しノードの電位とバックバイアス電圧によって決まるはずである。ただし XRPIX ではセンサー層の近くにピクセル回路が存在するため、この回路の電位がセンサー層内の電場に影響を与えている可能性がある。素子のピクセル回路の配置とビーム試験で得た検出効率を比較したところ、読み出しノードや BPW から遠くかつピクセル回路が存在する場所の検出効率は著しく低かった(図3)。これはピクセル回路のある位置(ピクセル境界付近)で電荷収集効率が低下していることを意味する。私はセンサー層内の電場がピクセル回路の電位によって歪められていると推察した。

実際にセンサー層内の電場構造を調査するため、TCAD (Technology Computer Aided Design) シミュレーションを行った。図3において、最も検出効率の悪い場所を含むような読み出しノード間を、本シミュレーションで再現した(図4(a))。センサー層が完全空乏するバックバイアス電圧 200 V を印可したときの電場シミュレーション結果を図4(b)に示す。電場構造を見みると、BPW のある AB 間や EF 間に向かう電場に加えて、ピクセル回路直下の CD 間に向かう電場が存在することが分かった。X 線入射により発生した電荷は、センサー層内の電場に沿って移動するため、CD 間に向いている電場の領域で作られた電荷はピクセル回路直下の領域まで運ばれることにな

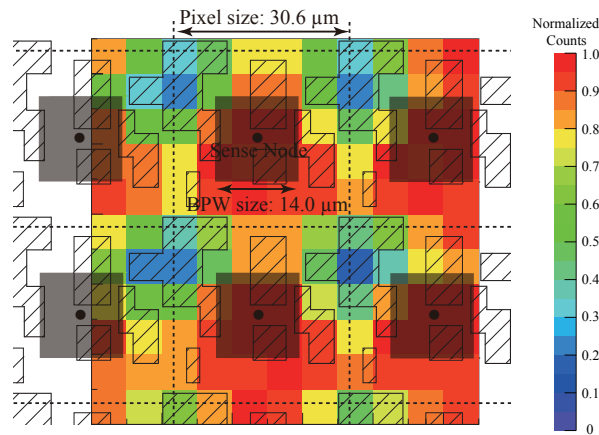


図3 8.0 keV X線ビームの検出効率(カラーマップ)とピクセル回路の比較。黒点は読み出しノード、斜線はピクセル回路の位置。

る。では、センサー層表面のCD間にまで運ばれた電荷はどうなるのであろうか？ 図4(c)は、センサー層表面付近の電位分布のシミュレーション結果である。これをみると、ピクセル回路のあるCD間には凹みのような構造をみることができる。この凹みの両端には、高さが約2.6 Vと1.2 Vの電位障壁が存在する。温度 -50°C での電子の熱運動のエネルギーは約0.02 eVであるので、電荷は電位障壁を超えることができず、その場所に捕えられてしまう。このように、ピクセル回路の影響を受けたセンサー層内の電場構造、およびセンサー層表面の電位分布が電荷収集効率を低下させる原因であった。

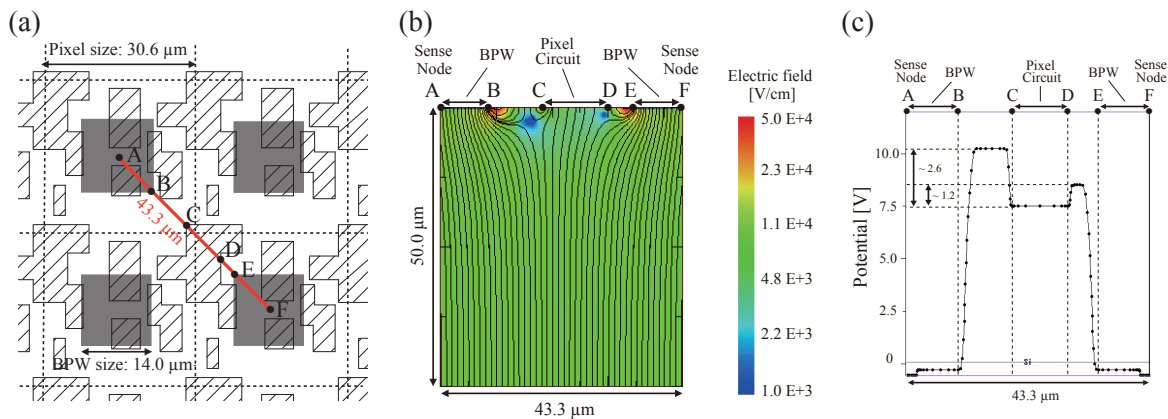


図4 (a) XRPIX1bのピクセル回路のレイアウト図。赤線はシミュレーションを行った領域。(b) 電場シミュレーション結果。(c) センサー層表面付近の電位分布のシミュレーション結果。

ここで私は次のようなことに気づいた。ピクセル回路の配置によって、電場が影響されることを逆に利用することができる。つまり、回路配置から電場をコントロールし、電荷収集効率を向上することが期待できる。そこで、それを新たに試作した素子XRPIX2bで実証した。

XRPIX2bは図5(a)のように、読み出しノードの周りにピクセル回路を配置した素子である。XRPIX1bと同様のシミュレーションを行った結果、電場は読み出しノードへと向かうことが分かった(図5(b))。さらに、センサー層表面付近の電位分布(図5(c))により、読み出しノードへと向

かう勾配ができるため、電場構造は改善されていると予想できる。

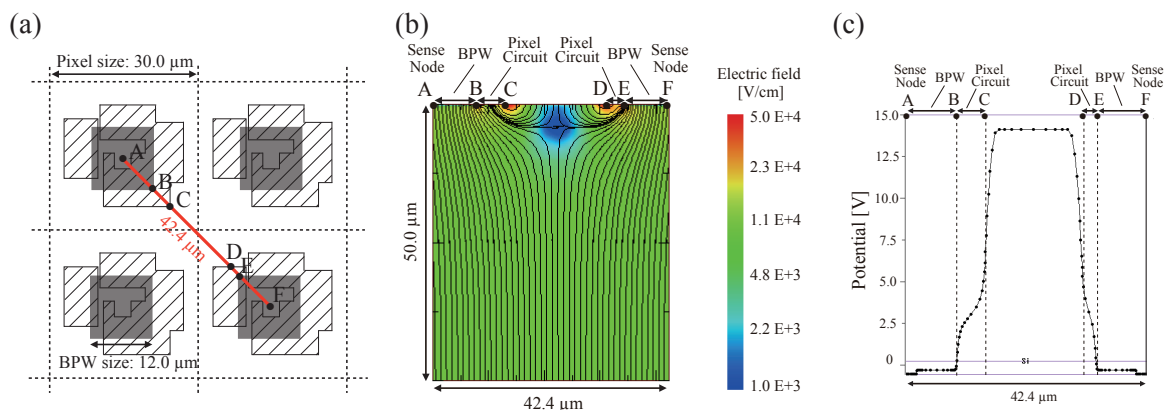


図5 (a) XRPIX2bのピクセル回路のレイアウト図。赤線はシミュレーションを行った領域。
(b) 電場シミュレーション結果。(c) センサー層表面付近の電位分布のシミュレーション結果。

線源 ^{241}Am を用いて、XRPIX2bのX線照射試験を行った。取得したエネルギースペクトルを図6に示す。赤線がシングルピクセルイベント、青線がダブルピクセルイベントのスペクトルである。シングルピクセルイベントだけでなく、ダブルピクセルイベントのスペクトルでも、 ^{241}Am の13.9 keV、17.7 keVの2本の輝線が確認できた。XRPIX1bで取得したスペクトル(図2)で見られたピークシフト現象は起こっていないことから、電荷収集効率の改善に成功したと言える。

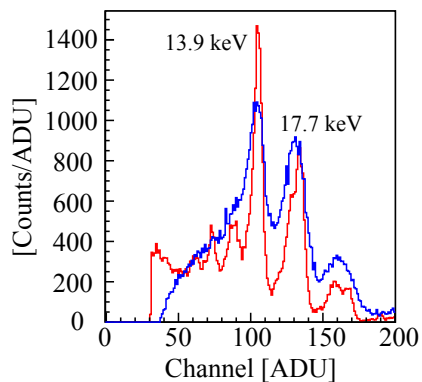


図6 XRPIX2bで取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル。赤線はシングルピクセルイベント、青線はダブルピクセルイベントのエネルギースペクトル。