

InGaAs 近赤外線検出器の性能評価

都築 晃子 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

昨今の近赤外線天文装置には、高性能で大規模な二次元アレイ検出器が不可欠であるが、そのような検出器は非常に高価なため、容易に入手できない。そこで、安価に入手可能な、中華立鼎光電社製 FPA640x512・InGaAs 近赤外線検出器 (有効感度波長帯 0.9 μm -1.7 μm の半導体検出器) の、天文用途としての性能を評価する。評価すべき性能として、暗電流、Full Well、量子効率、読み出しノイズがある。これらを適切に評価するには、光電子の数 [e^-] と、A/D 変換後に出力されるカウント値 [ADU] の換算係数 CF [e^-/ADU] を正しく知る必要がある。本研究では、まずこの CF を実験で評価した。光子由来の電子の数が、その数の平方根で揺らぐことを利用して、検出器の出力値と、その時のノイズの大きさから CF を求める。検出器に光を照射し、出力値と分散を測定した。検出器出力が、ピクセル毎に大きくばらつくため、同じ状況で複数回測定を行い、ピクセル毎に出力の平均値および分散を求めた。また、さらに出力値を安定させるために、検出素子に印加するバイアス電圧を調整した。バイアス電圧を調整し、複数回測定を行った結果、CF は 36 e^-/ADU となった。これは、仕様値の約 3 分の 2 である。また、検出素子に印加するバイアス電圧を約 3 倍にすることで、ピクセル毎の出力のばらつきは、出力値の数%から数%程度に低減した。検出素子に印加するバイアス電圧を変化させると、検出素子内部の、光を検知する空乏層の厚さが変化する。バイアス電圧が大きい場合、空乏層の厚さが大きくなるため、出力値がピクセル毎でばらつかなくなると考えられる。今後は、今回求めた CF の値を用いて、上述した評価項目について調査する。

1 はじめに

近年の近赤外線天文装置には、高性能かつ大規模な二次元アレイ検出器が不可欠である。しかし、そのような検出器は大変高価なため、容易に手に入れることはできない。そこで、安価に入手可能な中華立鼎光電社製 FPA640x512・InGaAs 近赤外線検出器の性能を評価する。安価で良質な検出器が存在すれば、大型望遠鏡のみならず中小望遠鏡においても、近赤外線天体観測がより盛んに行われるようになると期待できる。

FPA640x512・InGaAs 近赤外線検出器は、画素数が 640 \times 512 個の二次元アレイ検出器である。各素子は、半導体 InGaAs-p 型と InGaAs-n 型を張り合わせた構造をしている。仕様上の有効感度波長は 0.9–1.7 μm であり、量子効率は 70% である。各素子には、信号を読み出すための CTIA (Capacitive Trans-Impedance Amplifier) 回路が付随している。この読み出し回路の概略を図 1 に示す。半導体素子に光子が入射すると、素子内部で自由電子が発生し電流が流れ、CTIA 回

路のコンデンサに電子が蓄積される。CTIA 回路からは、電圧が出力される。さらに、その先の回路で電圧はデジタル信号に変換され、そのデジタルカウントが最終的な出力値となる。

検出器の評価すべき性能として、暗電流や量子効率、Full Well、読み出しノイズが挙げられる。これらの値を調査するにあたり、検出器に蓄積された電子の数 [e^-] が必要となる。しかし、測定結果として知ることができるのは A/D 変換後のカウント値 [ADU] であるため、その換算係数 CF [e^-/ADU] の値正しくを知らなければならない。加えて、天体観測で検出器を用いる際にもこの換算係数の正確な値が要求される。以上から、本研究では、FPA640x512 InGaAs 検出器の換算係数 CF [e^-/ADU] の値を実験的に求めた。便宜上、本研究では、検出器のコンデンサに蓄積した電子数 e^- と、デジタル変換後の検出器信号の単位 ADU の換算係数を、CF [e^-/ADU] と呼称する。なお、InGaAs 近赤外線検出器の仕様値から計算すると、CF=59 e^-/ADU と予測される。

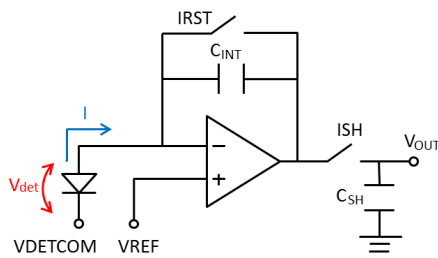


図 1: CTIA 回路の概略図。検出素子に光が当たると内部で自由電子が発生し、素子内部の電場により加速され、電流として取り出される。取り出された電子は回路のコンデンサに蓄積され、それによって生じる電圧を読み出す。検出素子には VREF と VDECTOM の電圧値を調節することにより、任意のバイアス電圧 V_{det} をかける。

2 方法

2.1 CF の導出

一般的に CF は、ノイズを用いて測定される。検出器信号に加わるノイズの合計 n_{total} [e⁻] は、次のように与えられる。

$$n_{total} = \sqrt{n_e^2 + n_{read}^2} \quad (1)$$

n_e [e⁻] は検出器に貯まった電子数のゆらぎノイズ、 n_{read} [e⁻] は回路の読み出しノイズである。検出器に貯まった電子の数を S_e [e⁻] とすると、 $n_e = \sqrt{S_e}$ と表すことができるので、(1) 式は次のように変形できる。

$$n_{total}^2 = S_e + n_{read}^2 \quad (2)$$

ここで、CF [e⁻/ADU] を用いると、 n_{total} は、

$$n_{total} [e^-] = CF [e^-/ADU] \times n_{total,ADU} [ADU]$$

と書き表せる。ただし、 $n_{total,ADU}$ は ADU 単位の合計ノイズである。 S_e 、 n_{read} についても同様に書き換えると、(2) 式は次のようになる。

$$(n_{total,ADU})^2 = \frac{1}{CF} \times S_{e,ADU} + (n_{read,ADU})^2 \quad (3)$$

(3) 式より、検出器に蓄積した電子数 $S_{e,ADU}$ と、そのときのノイズ $n_{total,ADU}$ を測定すれば、CF を求めることができる。したがって、この 2 つの値を測定するための実験を行う。

2.2 実験装置

検出器をアルミの箱の内部に設置し、上部の穴から光を照射した。実験装置の断面図を図 2 に示す。検出器温度を一定に保つため、検出器に内蔵されているペルチェ素子を用いて、温度を 290K に保った。

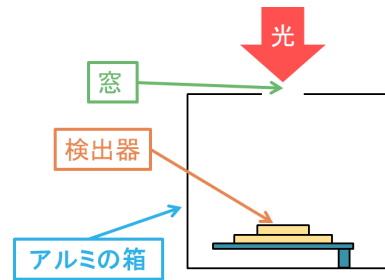


図 2: 実験装置の断面図。上部の穴から検出器に光を照射し、測定を行った。

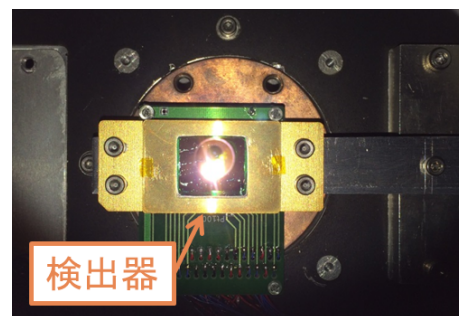


図 3: 実験装置の俯瞰図。

2.3 解析方法

同じ環境下で取得した 10 枚の画像について、各ピクセルの平均値と分散を算出した。各ピクセルの平均値と分散を計算するので、それぞれ平均値の画像と分散の画像を作ることができる。この平均値画像および分散画像の、任意の領域での平均値をそれぞれ $S_{e,ADU}$ 、 n_{total}^2 として、(3) 式を用いて fitting を行い、CF を求めた。また、 3σ の σ クリップを 10 回、異常値を出力するピクセルを除去した。

3 結果

検出素子のバイアス電圧 $V_{\text{det}} = -0.07 \text{ V}$ に設定し、10 枚の画像を取得した。それらの画像を用いて領域 $[x,y] = [400-500, 250-350]$ について解析し、式 (3) を利用して fitting を行った。fitting 結果を次式に示す。

$$n_{\text{total,ADU}}^2 = (1.1 \pm 0.2) \times S_{e,\text{ADU}} + (-4000 \pm 1000)$$

ここから CF を計算すると次式の値を得た。

$$\text{CF} = 0.9 \pm 0.2 e^- / \text{ADU}$$

縦軸の切片が負であるため、読み出しノイズは求めることができなかった。その原因として、出力値がピクセル毎にばらつくことが考えられる。

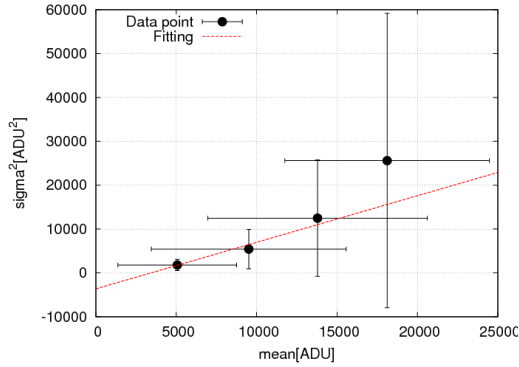


図 4: バイアス電圧 $V_{\text{det}} = -0.07 \text{ V}$ の時の fitting 結果。横軸、縦軸は、それぞれ 100×100 ピクセルの平均値 [ADU]、分散 [ADU²] である。黒丸がデータ点、赤は fitting の結果を示す。

検出素子に印加するバイアス電圧 V_{det} を変化させると、ピクセル毎のばらつきが変化することを利用し、 $V_{\text{det}} = -0.25 \text{ V}$ に設定し、CF 測定を行った。 V_{det} と出力のばらつきの関係を表 1 に、フィッティング結果を図 5 に示す。

$$n_{\text{total,ADU}}^2 = (0.030 \pm 0.004) \times S_{e,\text{ADU}} + (50 \pm 40)$$

これより次式の CF と読み出しノイズを算出した。

$$\text{CF} = 36 \pm 4 e^- / \text{ADU}$$

$$n_{\text{read}} = 300 \pm 70 e^-$$

この値は、仕様書からの予測値 $59 e^- / \text{ADU}$ の約 3 分の 2 である。

表 1: 検出素子に印加するバイアス電圧 V_{det} と出力画面のばらつきの関係。それぞれの値は、各バイアス電圧をかけた時の出力画像の、領域 $[x,y] = [400-500, 250-350]$ の平均値とその標準偏差である。

V_{det} [V]	平均値 [ADU]	ばらつき [ADU]
-0.07	7600	6000
-0.13	9000	1000
-0.19	9300	500
-0.25	9500	400

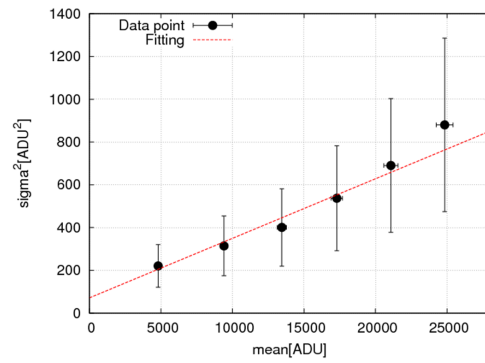


図 5: バイアス電圧 $V_{\text{det}} = -0.25 \text{ V}$ の時の fitting 結果。横軸、縦軸は、それぞれ 100×100 ピクセルの平均値 [ADU]、分散 [ADU²] である。黒丸がデータ点、赤は fitting の結果を示す。

4 考察

検出素子に印加する電圧を変化させると、ピクセル間の出力のばらつきが小さくなるという物理現象について考察する。一般に、検出器の印加電圧が負に大きくなると、空乏層の幅が広がる。光電流が発生するのは空乏層に光が届くときなので、空乏層の厚みが増すと感度が高くなり、出力値が大きくなる。 n 型側、 p 型側の空乏層の厚み w_n 、 w_p は次式のように表せる。

$$w_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0 N_A (\Delta\phi_0 - V_{\text{det}})}{eN_D (N_A + N_D)}} \quad (4)$$

$$w_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0 N_D (\Delta\phi_0 - V_{\text{det}})}{eN_A (N_A + N_D)}} \quad (5)$$

ε_r は半導体結晶の比誘電率、 ε_0 は真空の誘電率、 N_A

、 N_D はそれぞれ、n 型のアクセプター不純物濃度、p 型のドナー不純物濃度、 $\Delta\phi_0$ は印加電圧がかかっていない時の内蔵電位である。式 (4)、(5) は、pn 接合付近の電荷密度についてのポアソン方程式を、境界条件を用いて解くことで導かれる。素子全体での空乏層の厚みは $W = w_n + w_p$ となる。式 (4)、(5) から、空乏層の厚みは不純物濃度 N_A 、 N_D にも依存することがわかる。この不純物濃度は、素子毎にばらつきがある可能性が考えられる。一方で、逆バイアスを強く印加すると空乏層の厚みは広がる。FPA640x512・InGaAs 検出器は、素子毎にそれぞれ印加電圧を加えるのではなく、全素子に一齐に加える仕組みになっている。そのため、全ての素子に同じ印加電圧が加わっていると考えられる。これらを考慮すると、表 1 の結果から、 $V_{det} = -0.07\text{V}$ の時は、印加電圧が弱いため、個々のピクセルの不純物濃度が空乏層の厚みを支配しており、印加電圧を強めると、印加電圧の影響が不純物濃度の影響の方が卓越すると考えられる。

また、光によって半導体内で生成された電子は、空乏層に到達し加速されなければ、電流として検出されることはできない。検出器の構造上、光は p 型半導体側から照射される。つまり、電子は p 型半導体を通り抜け、空乏層に到達しなければならない。空乏層の幅が小さい時、電子が空乏層に到達するまでの距離が長いため、移動中にホールと再結合する確率が高い。そのため、出力値は、素子や測定回によってばらつくことが予想される。一方、空乏層の幅が大きいと、電子が空乏層まで移動する距離が短いため、再結合の確率が低く、出力値は素子や測定回によらず安定することが考えられる。加えて、電子の再結合の観点から、空乏層の幅が小さい時は感度の低下も予想され、出力値も小さくなると考えられる。逆に空乏層の幅が大きい時は出力値が大きくなると予想され、これは、表 1 の結果とも一致する。

5 まとめ

現在、中華立鼎光電社製 FPA640x512・近赤外線検出器の性能評価を行っている。性能評価を行うにあたり、光電子の数と A/D 変換後の出力値の換算係数

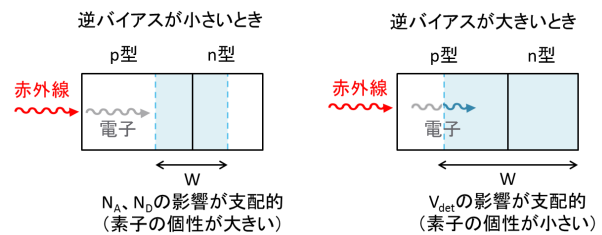


図 6: 検出素子に印されるの逆バイアスと空乏層の幅 W の関係。逆バイアスが小さい時、 W は不純物濃度の大きさに強く影響され、出力値がばらつくと予想される。一方、逆バイアスが大きい時は、 W は全素子に加わるバイアス電圧の影響が卓越し、出力値のばらつきは小さくなると考えられる。

CF [e^-/ADU] が重要となるため、本研究では、この CF の測定を行った。CF は任意の出力値と、その時のノイズを測定することで求められるため、検出器に光を照射し、出力の平均値と分散を測定した。出力値のばらつきが大きかったが、検出素子に印加するバイアス電圧を約 3 倍にすることで、ばらつきを 60 分の 1 に抑えることができた。その結果として得られた CF は $36 e^-/\text{ADU}$ であった。バイアス電圧を大きくすることで出力値のばらつきが小さくなった理由として、空乏層の厚さが大きくなったことが考えられる。今後は、測定した CF の値を用いて、InGaAs 近赤外線検出器の性能について調査を進める。

謝辞

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- 永山貴宏 2004, 名古屋大学博士論文
- 竹内菜未 2015, 名古屋大学修士論文
- フック, & ホール 2002, 『固体物理学入門上』丸善