

AN10: RadEye1 イメージセンサーの量子効率の測定について

はじめに

シリコンフォトダイオードは、可視光線の影響を大きく受けて電荷を発生させます。事実、感光性シリコンは光に対する受容性が高く、200 nW/cm²レベルの入射光子で RadEye™イメージセンサーが飽和してしまうほどです。フォトダイオードが入射光子を電子に変換する際の効率は、量子効率(QE)という名で知られています。しかし、QE は入射光の波長に対する依存性を持っているため、ある波長のときの効率が、他の波長のときよりも高くなることがあります。フォトダイオードは、人間の目のようにそれぞれの色を持つ光のエネルギーに対して反応します。このことは、さまざまな色の光に対する RadEye1 の応答を検討する際に、ご理解いただけるはずですが、

直接光を検出するか、シンチレーターを使用して間接的に X 線を検出するかに関わらず、Radye イメージセンサーは、フォトダイオード表面付近で入射光(電荷ではない)を吸収しなければなりません。入射光源はその時々によって大きく変わります。X 線源と組み合わせるシンチレーターのタイプが異なると、発する光の色もそれぞれ異なります。これは、直接光源を利用する際の入射光の色が、使用する光源のタイプによって異なることと同じようなものです。光検知システムを最適化するには、センサーの量子効率がどのように変化するか知っておくことが重要です。この効率を調べることで、さまざまな直接光源に対するイメージセンサーの感度評価が可能になります。また、その結果得られたグラフからは、特定用途の条件の下でイメージセンサーのモデリングを行うための有益な情報が得られます。

テスト結果による説明

Radye イメージセンサーの量子効率を測定するため、複数のタイプの LED を入手し、分類分けしました。この際、LED に関する既知の情報として重心波長、ピーク波長、標準出力、そして順電圧を入手。これらの LED 光源からの入射光を、校正された放射計のセンサーヘッド、そしてその付近に配置した RadEye イメージセンサーを同時に使用して測定し、検討を行いました。イメージセンサーおよび放射計のセンサーヘッドはともに、光源から 25 cm 下方向に離れた位置に置き、密閉された軽い箱で囲んだ状態としました。

照明を最大限均一にさせるため、白い紙を散光器として使用して光源を減衰。また、イメージセンサーの非線形性による信号の変化を最小にするため、イメージセンサーの複数の固定信号レベルにてテストを行いました。

測定された各 LED について、2 つのデータ(イメージセンサーの信号出力および放射計の出力)を収集。Radye1 の操作には、Shad-o-Box™カメラを使用しました。Shad-o-Box カメラの出力値は、アナログ/デジタルユニット(ADU)にて測定し、一方、放射計は W/cm²を読み取るために校正を行っています。こうして、放射計のスペクトル校正曲線と Shad-o-Box カメラのゲイン補正係数を用いて、Radye イメージセンサーの量子効率曲線を算出しました。

データ収集

狭帯域幅の単色光の入力には、10 タイプの LED(各タイプとも 5 個の LED を用意)を使用しました。放射波長範囲は 466 ~ 741 nm で、表 1 は、標準的な 5 つの LED に関する測定結果を示したものです。光の出力レベルは、目標としている RadEye センサーの出力信号(約 1500、1000、500 ADU)が得られるように調整されています。テスト中に得られたイメージセンサーの実信号レベルを以下の表に示します。

表 1 テスト結果

LED の重心波長	503 nm	520 nm	634 nm	700 nm	742 nm
RadEye の信号 (ADU)	1536	1472	1557	1543	1507
放射計出力 (nW/cm ²)	17.01	15.73	15.36	18.0	17.07
RadEye の信号 (ADU)	1008	990	968	1076	994
放射計出力 (nW/cm ²)	11.55	10.97	9.96	12.94	11.72
RadEye の信号 (ADU)	492	481	528	536	498
放射計出力 (nW/cm ²)	6.06	5.76	5.79	6.94	6.32

計算

量子効率(QE)は、入射光子数に対する生成された電子の比によって定義されます。

$$\text{式 1} \quad QE = \frac{\text{電子の数}}{\text{入射光子の数}}$$

RadEye センサーの QE は、感光性シリコンによって占められていない RadEye センサーのピクセル範囲で吸収された光子も含めた数値です。RadEye センサーのピクセルの充填比は 80%ですが、この数値は計算に含まれていません。入射光子数を計算するために、放射計の出力値は、RadEye センサーのピクセル寸法と積分時間に対して標準化されています。また、550 nm(校正波長)以外の波長で放射計での測定値を調整するには、補正係数も必要とされます。

RadEye イメージセンサーは、1024 × 512 のマトリックスに配置されたシリコンフォトダイオードで構成されており、アレイの各ピクセルの寸法は 48 × 48 μm です。従って、測定値 1 当たりの入射光子数は

$$\text{式 2} \quad N_p \equiv R \times t_{int} \times \frac{r_{\lambda_0}}{r_{\lambda}} \times A_{PD} \div \left[\frac{h \times c}{\lambda} \right],$$

となります。

ここで、

N_p = フォトン数

R = 放射計応答

t_{int} = 積分時間(s)

r_{λ_0} = スペクトル校正点での放射計応答(%)

r_{λ} = LED からの光線の波長における放射計応答(%)

A_{PD} = RadEye のピクセル面積(m²)

h = プランク定数(6.626 × 10⁻³⁴ J·s)

c = 光速(3 × 10⁸ m/s)

λ = LED からの光線の波長(m)

注: r_{λ_0} と r_{λ} は放射計のスペクトル応答曲線から得られたものです。

測定値 1 当たりの電子数は、測定された 100 × 100 ピクセル領域で測定、平均化された RadEye 信号と、カメラのゲイン係数(約 500 e-/ADU)とを単純に掛け合わせることで計算されます。

式 3

$$N_e \equiv S \times 500 \frac{e^-}{ADU}$$

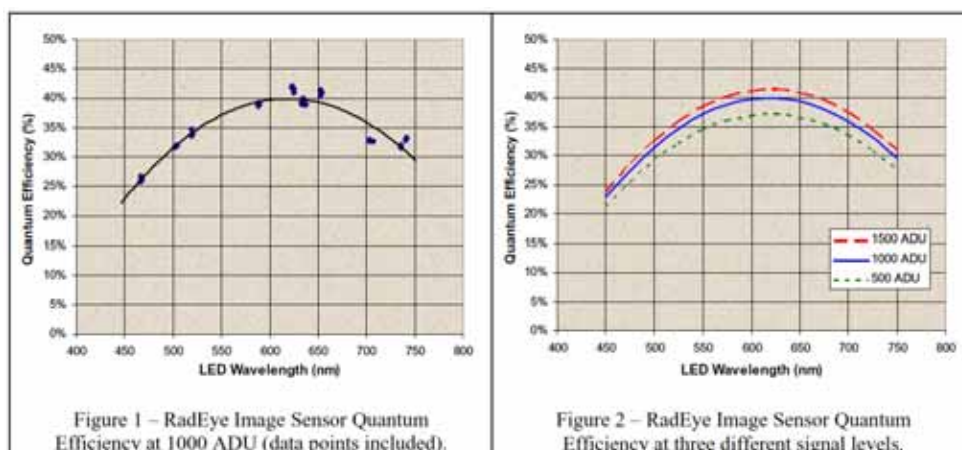
ここで

N_e = 電子の数

S = RadEye の信号

テスト結果

以下のグラフにテスト結果のまとめを示します。この曲線は、有色光に対する RadEye の応答を表したものです。



量子効率 (%)

LED の波長 (nm)

図 1 1000 ADU 時の RadEye イメージセンサーの量子効率(データポイントを含む)

量子効率 (%)

LED の波長 (nm)

図 2 3 つの異なる信号レベルにおける RadEye イメージセンサーの量子効率

RadEye センサーは非線形的応答を持つため、QE 曲線は光の出力値の変化とともに変わります。図 1 のグラフは、目標信号レベル 1000 ADU のときに得られた一連のデータを示しており、各点の間を通る傾向線は、典型的な二次曲線となっています。図 2 は、1500、1000、500 ADU のときに得られた一連のデータを表した 3 つの傾向線を示しています(データポイントは示さず)。予想されたように、応答は入射光の波長によって大きく変化しています。QE のピークは 600 ~ 650 nm の間に現れています。

まとめ

シリコンフォトダイオードの量子効率は、入射光の波長によって変化します。テスト結果では、RadEye イメージセンサーの QE ピーク値(約 40%)が波長 625 nm のときに現れ、波長が 750 nm を上回る、または 450 nm を下回ると急激に QE が下がることが示されています。また、この結果では、センサーの応答が若干非線形性を帯びているため、信号のレベルとともに QE の測定値が変化することも示されています。カメラのゲイン係数が一定という仮定はまったく間違っただけであり、得られた結果の調整は、各信号レベルにおける該当のセンサーの応答に対して行っていくべきものです。これについては、さらに検討を行っていく予定です。