SWIR InGaAs FPAを用いた光子放射故障解析

ラフ・ファンデルミッセン、パトリック・メルケン

冷却された非常に感度の高い検出器は、半導体故障解析を含む、分光法、蛍光画像処理、光子放射計測における低照度測定の必須要素である。

高分解能分光法やナノチューブ蛍光画像処理、そして特に、半導体故障解析などに見られる光子放射計測といった分野において、ノイズを最小限に抑え、感度を最大限に高めるには、特別に設計された焦点面アレイ（FPA:focal plane array）が必要となる（**図1**）。このような回路は、非常に照度が低い、短波長赤外域（SWIR）や可視から近赤外域（VisNIR）のその他の画像処理においても必須となる場合がある。

低暗電流、低ノイズ、SWIR域における感度という要件に対応するために、ベルギーのキセニクス社（Xenics）は、77Kでの動作に向けて最適化されたInGaAs（インジウムガリウムヒ素）検出器「XFPA-1.7-640-LN2」を開発した。回路は、ソースフォロワ検出器（SFD：source follower detector）読み出しをベースとしており、640×512ピクセルの解像度と20μmのピクセル間隔で高い感度を実現する。

フレームレートは2.5Hz（4出力モードの場合）で、小さな関心領域を選択した場合はそれ以上に上げることができる。非破壊読み出しモードは、蓄積時間が長い場合の動作を簡素化する。液体窒素（LN_2）冷却によって、ノイズは非常に低いレベルに抑えられている（<20e-）。このような低い温度では、暗電流も低く（<5e-/s/ピクセル）することが可能だ。同素子は、0.9～1.6μmの範囲の波長域で感度を持つ（オプションで0.4～1.6μmに対応可能）。

センサー設計

光検出器はシリコンベースのROICとともに集積されている。ROICには、キセニクス社が自社開発したハイブリダイゼーション技術が採用されている（**図2**）。ピクセル構造は、優れたノイズ性能を特長とするSFD段をベースとする。基本的な（簡略化された）ピクセル回路図を**図3a**に示す。

SFDの主要な利点は、設計が簡素であることと、電力を供給する必要なく電荷を蓄積できることである。この利点からSFDは、ピクセルサイズの小さい大型アレイに最適である。さらに、ピクセル内に存在する素子が非常に少ないことから、いわゆるナルシサス効果が低減されるという利点もある。ナルシサス効果は、低温アプリケーションにおいて検出器の性能を著しく低下させる可能性がある。

SFDの主な欠点は、入力ノード電圧の変化が電荷として現れ、それが回路の入力ノードの静電容量に蓄積されることである。しかし、低温動作で使用することを目的としているため、これは深刻な欠点ではない。低温動作では、不安定なバイアスの影響が、完全には消えないものの、大幅に低減される。

すべてのピクセルは、共通の列バスを介して相互接続されており、アナログマルチプレクサ回路を介してシーケンシャルに読み出される。相互接続と信号経路は、ノイズ性能を最適化するために複雑さを排除した形で配線されている（**図3b**）。

動作モード

センサー素子は、NDR（非破壊読み出し、IWR〔integrate while read：読み出しながら蓄積〕とも呼ばれる）とITR（integrate then read：蓄積してから読み出し）という2つの動作モードを持つ。両方の動作モードのタイミング図を**図4**に示す。

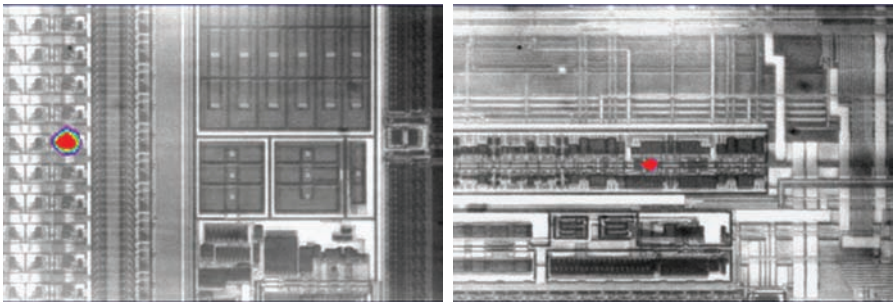


図1　故障点標定用に光子放射オーバーレイを搭載するメモリ素子の裏面写真。SWIR InGaAsカメラで撮影（提供：セミキャップス社（SEMICAPS Pte Ltd.）、シンガポール）

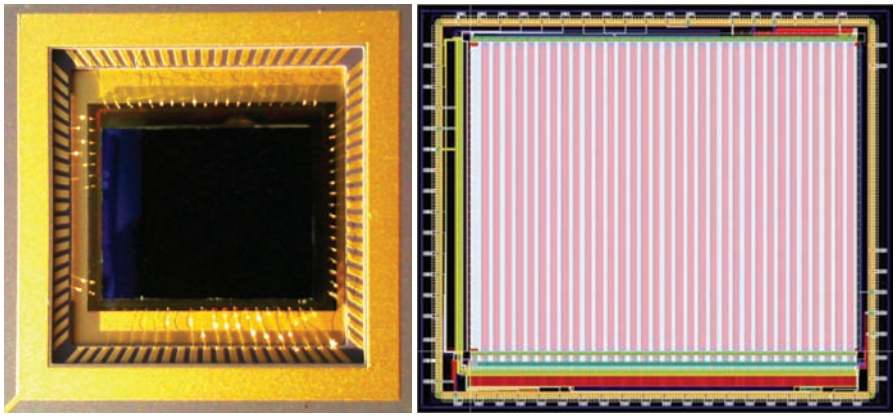
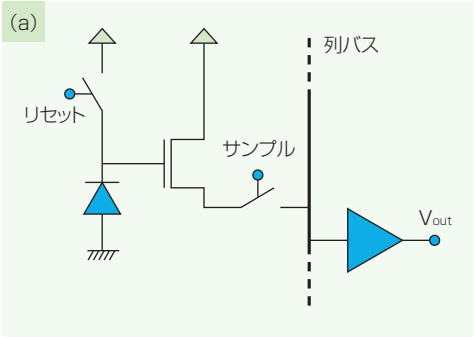


図2　キセニクス社の「XFPA-1.7-640-LN2」は、LN_2冷却採用の高分解能SWIR検出器である。



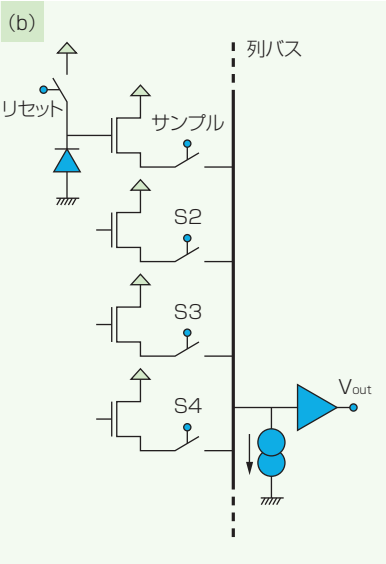


図3　XFPA-1.7-640-LN2のピクセル構造は、ソースフォロワ検出器段（a）と列マルチプレクサ回路（b：簡略図）をベースとする。

NDRモード動作は、アレイ全体に対する同時グローバルリセットによって開始する。すべてのピクセルが同時にIR励起キャリアの蓄積を開始する。ただしピクセルの読み出しは、このモードでは同時には行われない（最初のピクセルと最後のピクセルの蓄積時間は異なる）。そのため、外部電子回路は必ず、最初のフレーム読み出しを後続フレームに対するリファレンスとして使用する。リークは非常に低く、蓄積時間は長いため、マルチサンプルの信号取得手法を適用し、複数のフレームを使用して結果の画像を構成することができる。

ITRモードでは、すべてのピクセルが同時に蓄積を開始し、シーケンシャルに読み出される。この場合の積分時間は単純に、リセットとサンプルの間の時間となる。

センサー素子には、容量性負荷を駆動可能な4つの異なる（選択可能な）出力がある。センサーは、WOI（window of interest）またはWindowingモードでの動作が可能である。冷却手段と素子の動作を容易にするために温度センサーが集積されている。チップは、実際のFPAとROIC検出器インターフェースに、多重化と信号転送のためのデジタル回路、アナログインターフェー

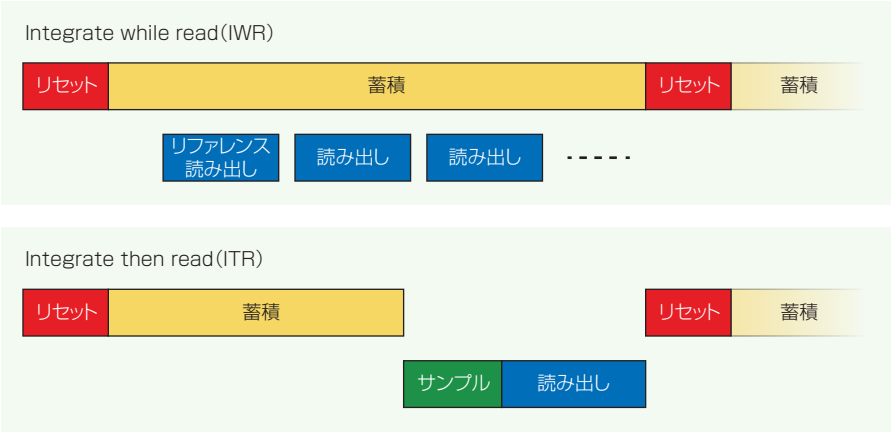


図4　センサー素子は2つの動作モードを持つ。非破壊読み出し（またはIWR：integrate while read）モードとITR（integrate then read）モードである。両方の動作モードのタイミング図を示す。

ス、そしてテスト回路が組み合わされた構成になっている。

ナノチューブ画像処理

ナノチューブ蛍光は一般的に、ナノテクノロジ画像処理の分野において研究されている。最終的な目標は、より高速なナノエレクトロニクス素子と、好都合な構造的特徴を持つ非常に強力で軽量な材料を作成することである。特に関心を集めているのはナノチューブである。ナノチューブは炭素原子が平面状の六角形の環を固定するため互いに結合する場合に形成される。

ナノチューブの形成は、その製造プロセスの改良を目的として広く研究されている。完全な分子レベルで製造されると、フラーレンチューブはナノメートルスケールで画期的な電気的、熱的、機械的性質を示す。ナノチューブは、化学および生物系における蛍光タグとして応用できる可能性も秘めているため、その光学的性質にも関心が寄せられている。

LN_2冷却採用の高感度のInGaAsカメラの登場によって、研究者らはナノマテリアルに起因するSWIR領域（900～1600nm）における低照度蛍光発光事象をキャプチャできるようになっている（**図5**）。

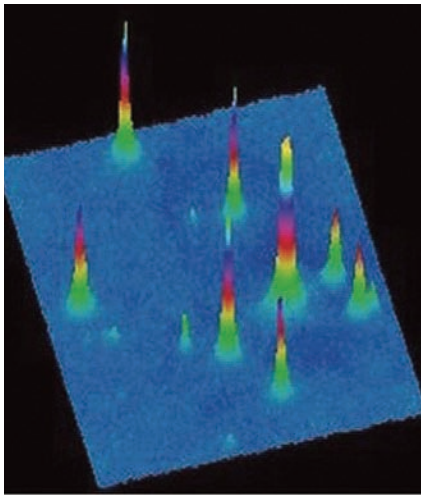


図5　LN_2冷却採用のInGaAsカメラを使用して単層ナノチューブから取得した3次元蛍光グラフ（提供：ライス大学のR.B.ワイズマン教授（R.B. Weisman））

量子ドット研究

量子ドット研究は、オプトエレクトロニクスと量子情報処理における新しい用途を対象とする比較的新しい分野である。ここでは、量子ドットの物理的な性質を調査し、より深く理解するために、高感度のSWIR カメラが使用される。

量子ドットは、「人工原子」とみなすことができる。量子ドットのフォトルミネッセンスは、遠赤外線から深紫外線までの広い範囲にわたって、ドットサイズを変更することによって調整することができる。

光子放射顕微鏡法

光子放射顕微鏡法（PEM：photon emission microscopy）は、半導体素子における欠陥の位置標定のための故障解析手法として使用できる。システム感度（つまり、InGaAs検出器の感度）が、このような量子放射応用における鍵となる。

欠陥の影響として一般的に発生する、900～1600nmの波長域における非常に弱い放射を検出することができるならば、この手法を用いて、リークが生じている接合部や、光を放射するその他の電流リーク現象を素早く特定することができる。

非常に感度の高いInGaAs検出器は、LN_2冷却を採用することによって、暗電流とノイズをかなり低く抑えることができる。これによって、蓄積時間が長く、SN比に優れた動作モードが可能となる。

半導体故障解析

半導体故障解析は、光子放射顕微鏡法が多用される可能性を秘めた分野である。LN_2冷却採用のInGaAsカメラをベースとするハイエンドの光子放射顕微鏡は、生産品質制御、返品保証（RMA：return merchandise authorization）マネジメント、電子回路のデバッグを目的とした、部品のファブやファウンドリにおける故障点標定に使用することができる。

故障点標定とは、故障ユニットのダイ上の欠陥領域を特定することを目的とした製造工程である。これは、分析

が必要な領域を大幅に減少させることのできる重要な工程である。また、位置標定された欠陥を特性評価した後には、その根底にある故障メカニズムをさらに詳しく調査することができる。

故障点標定は、能動型と受動型という2つのカテゴリに大きく分類される。能動的手法では通常、イオン化ビーム（レーザビームなど）の走査によって故障源を活性化する。受動的手法として最も一般的なのは、（適切に冷却された）高感度カメラを採用する光子放射顕微鏡法である。多様な種類の故障が、発生時に少量の光を放射する（光子放射、またはエレクトロルミネッセンスを伴う場合もある）ことを利用する。

光子放射顕微鏡によるフロントサイドのチップやウエハの解析には限界がある。複数レベルのメタライゼーションが適用されるケースが増えているためである。これによって欠陥部分からの光子放射が、検出器まで到達できない。バックサイドのチップやウエハの解析においては、マイクロエレクトロニクスにおいて最も一般的に採用される材料であるシリコンが、波長が1100nmよりも長い近赤外光に対してかなり高い透過率を示すことが好都合となる（図1）。

これこそまさに、1000～1600nmの範囲で高い量子効率（QE：quantum efficiency）を示すSWIR InGaAsカメラが、その利点を発揮できる分野である。また、マイクロエレクトロニクス素子は、ますます進む小型化に伴って動作温度がさらに低くなっていることから、光子放射の波長は長い帯域へとシフトしつつあり、一般的には1300～1500nmの範囲で最大となる。

PEMにおけるFPAとCCDの比較

シリコンベースのCCD検出器は、量子放射顕微鏡法において広く採用されてきた。特に、背面照射と冷却を採用する科学的レベルのCCD検出器は、バックサイドのチップおよびウエハに対する解析に使用されている。しかし、波長が300～1100nmの範囲のCCDカメラは、シリコンバンドギャップを超えるエネルギー遷移を伴う光子放射の観測にしか適用できない。この放射が最も強くなる、1100nmを超えるバンド内放射を観測することはできない。

また、化学的な不純物、物理的な欠陥、深いトラップ、その他の再結合中心に関連するバンドギャップ未満の放射も、CCD検出器では観測できない。さらにバックサイド解析では、1100nm未満の波長は透過させないシリコン基板を介した観測が必要である。

以上より、量子効率が高いInGaAsベースのカメラは、900～1600nmの帯域における高感度光子放射の分野に対して最良の候補であるといえる。特に、LN_2冷却を採用すれば暗電流とノイズレベルをかなり低く抑えることができ、この帯域における最も感度の高い検出器となる。

SWIRにおける光子放射のスペクトル解析は、個々の半導体故障メカニズムがそれぞれ独自のスペクトル上の特徴を持つ可能性があることを考慮に入れるならば、非常に有望な分野である。ただしこれには、SWIR域における非常に感度の高い検出器に、ハイエンドな回折光学系、または波長を調整可能なフィルタを組み合わせて使用することが必要になる。

著者紹介
ラフ・ファンデルミッセン（Raf Vandersmissen）は、ベルギーのキセニクス社（Xenics）傘下のエスインフラレッド社（sInfraRed、シンガポール）の最高経営責任者（CEO）。パトリック・メルケン（Patrick Merken）は、ベルギー王立士官学校ブリュッセル（RMA Brussels）とキセニクス社に所属。
e-mail: patrick.merken@xenics.com　URL: www.xenics.com

LFWJ

LaserFocusWorld JAPAN

e-DMプログラムをご存じですか？

Laser Focus World Japanのe-DMプログラムなら、業種・職種・購買関与製品・担当製品など、ご希望の対象者に限定してメール配信を行うことが可能です。
弊誌読者の皆さまは、レーザー／フォトニクス／オプトエレクトロニクス応用技術／製品の開発、研究、マーケティングなどに携わっている方だけ。
光産業に特化した専門誌ならではの広告プログラムです。

こんなご要望にお応えできます。

■既存顧客以外に新製品DMを送りたい
■製品カタログを送りたい
■人材募集を行いたい
■研究者対象の製品アンケートを実施したい
■技術者限定でセミナー告知を行いたい

e-DM 広告掲載料金（税抜）
データ使用料金　@70円
（抽出条件1項目につき＋@10円）
データ配信料金　@20円

お問い合わせ・お申し込みは…
株式会社ICSコンベンションデザイン
電話：03-3219-3641　Email：led@ics-inc.co.jp