低ノイズ・広帯域の近赤外2次元センサ開発

猪口 康博*・森 大樹・右田 真樹
永井 陽一・稲田 博史・藤井 慧
石塚 貴司・秋田 勝史

Two-Dimensional Near Infrared Sensor with Low Noise and Wide Wavelength Range —— by Yasuhiro Iguchi, Hiroki Mori, Masaki Migita, Youichi Nagai, Hiroshi Inada, Kei Fujii, Takashi Ishizuka and Katsushi Akita —— A two-dimensional near infrared image sensor with the cut-off wavelength of 2.4 μm has been successfully developed by using InGaAs/GaAsSb type-II quantum well structures as its absorption layer. The 250-pair InGaAs (5 nm) / GaAsSb (5 nm) quantum well structures lattice-matched to InP substrates were grown by metal organic vapor phase epitaxy. The p-n junctions were formed in the absorption layer of each pixel by the selective diffusion of zinc. The sensor chip with 320 × 256 pixels at 30 μm pitch, in which each pixel had a 18 μm × 18 μm-square light-receiving area, was hybridized to a read-out IC with indium bumps. More than 99% pixels operated properly. A Peltier cooler was used for the cooling system, which enabled the downsizing of sensing systems. The dark current of each pixel was 3 pA at -60˚C, which is lower than that of the conventional sensor at the same temperature. The responsivity showed good linearity with respect to the input power. Therefore, this sensor is expected to be used for the detection of weak optical signals and the quantitative, real-time image analyses of various materials in the food and pharmaceutical industries.

Keywords: near-infrared, sensor, type-II quantum well, low noise, imaging

1. 緒　言

波長1.0 μmから2.5 μmまでの近赤外領域には、分子の基準振動の倍音や結合音が存在する。これらは3 μm以上の中赤外領域に現れる基準振動と比較して吸収が弱い半面、物質の内部にまで光が侵入することから、非破壊計測への応用が期待される(1)。近年、製薬業界や食品業界を始めとする多くの製造現場における安全管理や品質管理の観点から、また、ライフサイエンス分野における診断の観点から、近赤外分光法への関心が高まりを見せている。当社は、従来の画像検査では判別できなかった組成の違いや濃度の分布を近赤外分光法を用いて非破壊・非侵襲でリアルタイムにイメージングできる検査装置「Compovision®」を製品化した。

近赤外領域では複数の物質の吸収が重なり合うために吸収スペクトルの形状が複雑で、物質の同定が難しいという課題があるが、ケモメトリックスなど統計的データ処理技術の進展によって解決されている。一方、近赤外センサには、①倍音や結合音などの微弱な吸収を検出するために高感度・低ノイズであること、②ノイズを低減するための冷却機構が液体窒素などの大掛かりなものではなくペルチェ素子などの軽微な冷却で使用できること、③リアルタイムに検査できるように応答速度が速いこと、④定量分析のために光強度に対する感度の直線性が高いこと、⑤イメージングのためにアレイ型センサであること（特に、吸収スペクトル測定と空間的な位置測定を同時に行うことができる2次元アレイ型センサが望ましい）、の5点が要求される。本稿では組成イメージングシステムCompovision®のキーデバイスである近赤外2次元センサについて紹介する。

2. タイプⅡ量子井戸型近赤外センサ

近赤外センサには、PbS、PbSeなどの光導電型素子やGe、InAs、InSb、HgCdTe、InGaAsなどの光起電力型素子がある。一般的に、光起電力型素子の方が光導電型素子よりも応答速度が速く、光強度に対する感度の直線性に優れる。光起電力型素子のうち、Ge、InAs、InSbおよびHgCdTeは暗電流が高いために液体窒素などの大掛かりな冷却機構が必要になる。それに対して、InP基板に格子整合するInGaAsは暗電流が低いうえに高感度である。また、光ファイバー通信用フォトダイオードに用いられることから量産技術も進んでおり、2次元アレイ型センサも市販されている。しかしながら、カットオフ波長が1.7 μmであるために分析できる物質が限られる。InGaAsのIn組成を増やすことでカットオフ波長を2.6 μm程度まで長くすることができるが、InPに対して格子整合させることができず、結晶欠陥に起因した暗電流が大きくなる。また、均質なエピタキシャル成長が難しく、チップサイズの大きな2次元ア

レイ型センサへの適用は困難と考えられる。現在、2.5 μmまでの近赤外領域をカバーできる２次元アレイ型センサとしてHgCdTeがあるが、大掛かりな冷却機構のために非常に高価であり、構成材料の環境面への影響も勘案すると汎用分析器への適用は難しい。

近年、通常の半導体バルク材料では実現できないカットオフ波長の長波長化と低暗電流の両立が可能な材料系としてタイプII量子井戸構造が注目されており、2 μm帯赤外センサではInGaAs/GaAsSbタイプII量子井戸構造がある[(2)、(3)]。**図１**にバンド構造を示すように、InGaAsの伝導帯で量子井戸内に閉じ込められた電子の波動関数とGaAsSbの価電子帯で量子井戸内に閉じ込められた正孔の波動関数が重なった部分で起こる吸収が2 μm帯の波長に対応する。この材料系ではInGaAsもGaAsSbも共にInP基板に格子整合するため、格子不整による結晶欠陥の発生を抑制することができ、低暗電流が期待できる。また、大きなバンドギャップを有する材料同士の組合せによって実効的に小さなバンドギャップを実現できることから、熱励起やオージェ再結合によるノイズ電流の低減も期待できる。更に、量子井戸を構成する各層の厚みを変えることによってカットオフ波長を調節することが可能である。

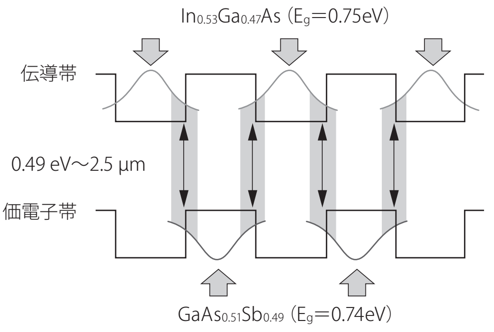

図１　InGaAs/GaAsSbタイプII量子井戸のバンド構造（層厚5 nm/5 nmの場合）

3.　２次元アレイ型センサの作製

画素数320×256の２次元アレイ型センサを作製した。1画素当たりの受光サイズは一辺が18 μmの矩形で、画素は30 μmピッチで並んでいる。製造フローを**図２**に示す。まず始めに、InP基板上にInGaAsバッファ層、InGaAs/GaAsSb量子井戸受光層（層厚5 nm/5 nm、量子井戸ペア数：250)、InGaAs層、InPキャップ層を有機金属気相成長法（MOVPE法）にてエピタキシャル成長した。続いて、個々の画素を形成するためにSiN膜をマスクにして30 μmピッチで並んだ一辺18 μmの矩形領域にZnを選択拡散した。pn接合は量子井戸受光層内に形成されている。p電極

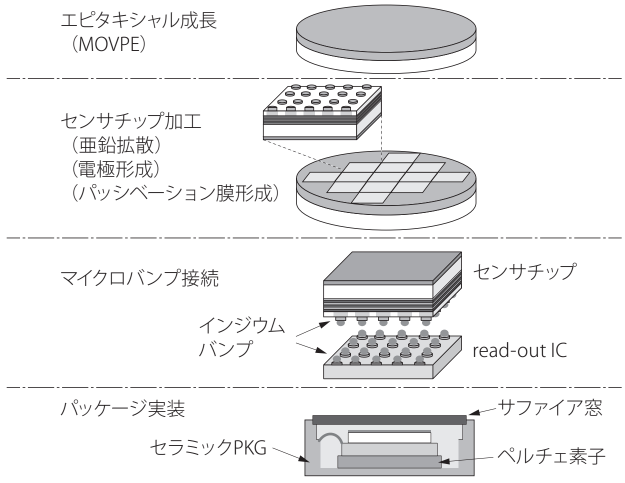

図２　センサの製造フロー

は個々の画素のInPキャップ層の上面に、また、n電極は画素共通の電極としてInP基板の裏面に形成している、電極材料には、それぞれAuZn、AuGeNiを用いた。光はInP基板の裏面から入射するため、反射防止膜としてInP基板の裏面にSiONを形成している。

センサチップは、CMOS読み出し回路（read-out IC）とインジウムバンプにてフリップチップ接続した。その後、**写真１**に示すようにペルチェ素子と共にセラミックパッケージに実装した。窓には反射防止膜のついたサファイアを用いた。センサチップの個々の画素で発生する光電流はread-out ICのCTIA（Capacitive Transimpedance Amplifier）[※1]を介して電圧出力され、外部のFPGA (Field-Programmable Gate Array)[※2]で処理した後、デジタル出力される。

写真１　２次元アレイセンサ

4.　センサの特性

作製した２次元アレイセンサで得た人物画像を**写真２**に示す。ハロゲンランプによる簡易照明の下で、フレーム

写真2　近赤外2次元センサで撮影した人物画像

レート100 Hz、蓄積時間1ミリ秒で撮影した。出力は14 bitである。水分量を反映した肌や毛髪などの明瞭な画像が得られている。センサの欠陥画素率は1％未満である。

4－1　暗電流特性　受光サイズが18 μm×18 μmのセンサのV_R＝60 mVにおける暗電流（Id）の温度依存性を**図3**に示す。暗電流の温度依存性は、受光層のバンドギャップEg、温度Tに対して次式に示すような関係がある。

$$Id \propto \exp(-Eg/nkT)$$

ここで、kはボルツマン定数、nは定数である。低電圧域における暗電流は空乏層近傍で発生する拡散電流と空乏層内のトラップ等を介して発生する生成－再結合電流より成る。定数nは、拡散電流が支配要因の場合に1、生成－再結合電流が支配要因の場合に2となる。**図3**のグラフの傾きから、開発したセンサはEg＝0.49eVとした場合にn＝0.92となり、拡散電流が支配的であった。同じ受光サイズ、同じバイアス電圧で比較したHgCdTeセンサの暗電流の温度依存性を同図に点線で示す[(4)]。開発したセンサは、同一温度で比較した場合、HgCdTeより約1桁低い暗電流が得られている。このことは、InGaAs/GaAsSbタイプII量子井戸構造が低ノイズのセンサ材料として有望であることを示している。また、320×256個の画素の-60℃における暗電流のヒストグラムを**図4**に示す。個々の画素の暗電流は2から4 pAに収まっており、ばらつきは小さい。

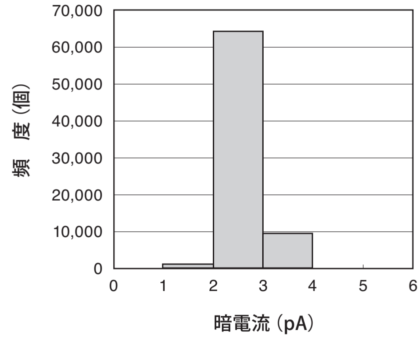

図4　320×256画素面内の暗電流ヒストグラム
V_R=1.2V、T=213Kで測定

4－2　感度特性　分光光度計を用いて2 μmより長波長側の感度特性を測定した結果、**図5**に示すように、タイプII量子井戸構造の実効的なバンドギャップに対応する2.35 μmまで検出可能である結果を得た。

更に、ハロゲンランプから出る赤外光を中心波長1.29 μm、1.53 μm、1.96 μm、2.20 μmの4種類のバンドパスフィルターを用いて分光して、各波長に対する感度特性を評価した。**図6**に示すように、いずれの波長においても光強度に対する出力の直線性は良好であった。99％以上を占める良好な画素は、すべて同等の感度特性を示した。このことは、開発したセンサが物質の組成や濃度分布を定量的にイメージングすることができるセンサとして適していることを示している。

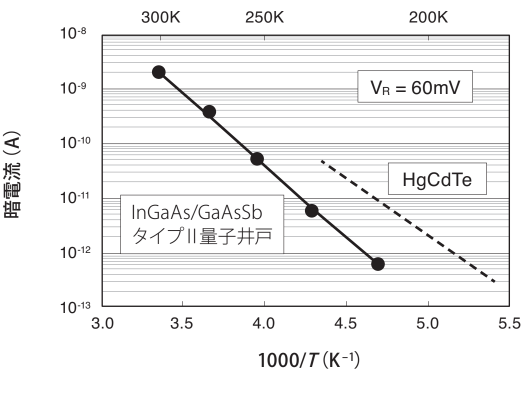

図3　InGaAs/GaAsSbタイプⅡ量子井戸型センサとHgCdTeセンサの暗電流の温度依存性

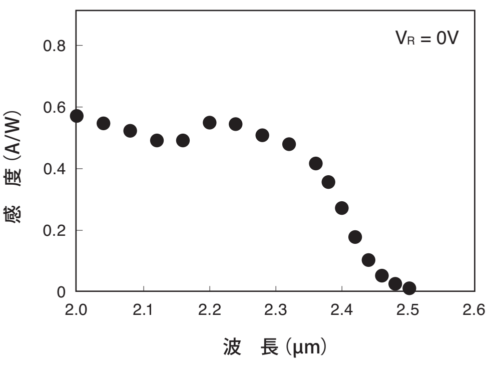

図5　分光感度特性

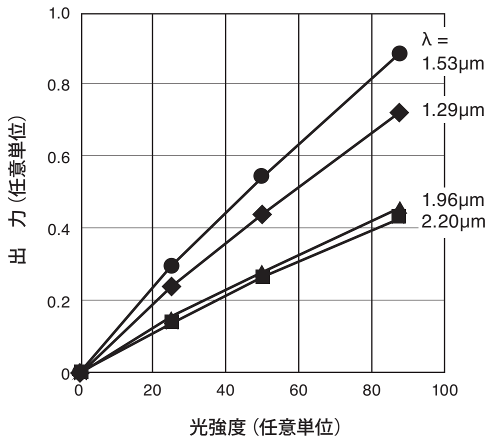

図6　光強度に対する感度の直線性

5. 結　　言

近赤外分光法を用いた非破壊・非侵襲の検査装置への期待が高まるなかで、2 μm帯までの近赤外領域に感度を持つ2次元アレイ型赤外センサが重要になっている。今回、センサ材料にInGaAs/GaAsSbタイプII量子井戸構造を採用し、従来の半導体バルク材料では困難であったカットオフ波長の長波長化と低暗電流の両立を実現した。その結果、波長2.35 μmまで感度を有し、ペルチェ冷却で使用できる320×256画素の2次元アレイ型センサを実現した。更に、このセンサは感度の直線性に優れ、フレームレート100 Hzの高速応答性を有する。

例として、開発した2次元センサで見た砂糖と塩の混合物の画像を**写真3**に示す。CCDなどの可視画像で見た場合は、その違いはわからないが、近赤外画像では砂糖は暗く映るために両者を識別することができる。開発した近赤外2次元センサを用いて物質の識別はもちろんのこと、感度の直線性が優れることから定量的な評価も可能となる。

更に、このセンサは、量産性に優れたMOVPE法によるエピタキシャル成長技術と光通信用フォトダイオードで培った量産技術を用いることによって低コストを実現でき、汎用の高性能な2 μm帯赤外センサとして、これまでにない様々な分野への展開が期待できる。

(a) 可視画像

(b) 近赤外画像

写真3　塩と砂糖の混合物の可視画像と近赤外画像。
両方とも白色のため(a)の可視画像では区別はできない。一方、(b)の近赤外画像では、砂糖は近赤外光を吸収する分、反射が弱くなり黒く見える。

用語集

※1　CTIA
Capacitive Transimpedance Amplifier：光電流を積分して電圧に変換する回路。

※2　FPGA
Field-Programmable Gate Array：製造後でも回路の書き換えが可能な集積回路。

参　考　文　献

(1) 尾崎幸洋 編著、実用分光法シリーズ①近赤外分光法、㈱アイピーシー、東京（1998）

(2) R. Sidhu, N. Duan, J. Campbell and A. Holmes: "A Long-Wavelength Photodiode on InP Using Lattice- Matched GaInAs-GaAsSb Type-II Quantum Wells", IEEE Photon. Technol. Lett., 17（2005）2715

(3) H. Inada, H. Mori, Y. Nagai, Y. Iguchi, T. Saitoh, K. Fujii, T. Ishizuka and K. Akita: "MOVPE grown InGaAs/GaAsSb Type II Quantum Well Photodiode for SWIR Focal Plane Array", Proc. of SPIE, 8012（2011）801220

(4) P. Chorier, P. Tribolet: "High performance HgCdTe SWIR detectors for hyperspectral instruments", Proc. of SPIE, 4540（2001）328

執　筆　者

猪口　康博*：伝送デバイス研究所　グループ長
博士（工学）

森　　大樹：伝送デバイス研究所　主査
右田　真樹：伝送デバイス研究所　主査
永井　陽一：伝送デバイス研究所　主席
稲田　博史：伝送デバイス研究所　主幹
藤井　　慧：半導体技術研究所
石塚　貴司：半導体技術研究所　主査　博士（工学）
秋田　勝史：半導体技術研究所　グループ長　博士（工学）

＊主執筆者