

デジタルアロイを用いた高感度量子井戸型近赤外センサ

High-Sensitivity Quantum Well SWIR Sensor Using Digital Alloy

スンドララジャン バラセカラン*
Sundararajan Balasekaran

村田 誠
Makoto Murata

猪口 康博
Yasuhiro Iguchi

1～2.5 μm の波長域で動作する近赤外センサ（SWIR センサ）は農業、医療、工業から宇宙までの様々な分野での応用が期待されている。当社はこれまで受光層に InGaAs/GaAsSb 量子井戸構造を採用することで2.5 μm まで動作する低暗電流の近赤外センサを開発してきた。量子井戸構造に関する理論計算から InGaAs を InAs と GaAs からなるデジタルアロイに置き換えた (InAs) (GaAs)/GaAsSb 量子井戸構造を用いることにより量子効率が向上することが示唆された。本報告では、実際にデジタルアロイ型量子井戸構造を受光層に持つセンサを試作した結果およびバリア層を追加することによって暗電流の一層の低減に成功したことについて述べる。

A short-wave infrared (SWIR) sensor that operates in the wavelength region from 1 to 2.5 μm is expected to be applied in a variety of fields, such as agriculture, medical diagnostics, industrial inspection, and space observation. Our company has developed SWIR sensors that operate with a cut-off wavelength of up to 2.5 μm and low dark current by using InGaAs/GaAsSb quantum well structures as the light absorption layer. The theoretical calculation of the quantum well structure suggested that the quantum efficiency could be improved is achieved by replacing InGaAs of this quantum well with a digital alloy consisting of InAs and GaAs. This paper describes the performance of the SWIR sensor with (InAs) (GaAs)/GaAsSb quantum well structures as the light absorption layers. It also describes the low dark currents, which have been successfully decreased by adding a barrier layer.

キーワード：SWIR センサ、デジタルアロイ、量子効率、バリア層、暗電流

1. 緒 言

近赤外センサ（SWIR センサ）は、農業、環境モニタリング、資源探索、生体医療診断、リモートセンシングなど多様な分野で使用されており、その需要は増加している。特に1.8～2.5 μm の波長領域はプラスチック、グルコース、タンパク質などを識別する上で重要であり、1～2.5 μm の広い波長領域で動作するセンサが必要になる^{(1)～(5)}。また、近赤外領域に存在する物質固有の吸収は微弱なため、高精度な分析を実現するためには高感度（高量子効率）で低ノイズ（低暗電流）が求められる。この波長領域では、HgCdTe (MCT) を受光層材料とするセンサが主に使われているが、暗電流低減のために液体窒素や冷凍機による冷却を必要とする⁽⁶⁾。冷却機構の付帯は消費電力やサイズおよびコスト増につながり、応用分野拡大への障害となっている。また、Hg や Cd といった RoHS 規制物質を含む課題がある。一方、InP 基板上に格子整合した InGaAs を受光層とするセンサは、低暗電流で冷却機構を必要としない。また、光通信用フォトダイオードにも使用されることから生産性にも優れる。しかしながら、InP に格子整合する InGaAs はカットオフ波長^{*}が1.7 μm にとどまり、1.7 μm より長波長域に感度はない。格子不整合系 InGaAs を用いると、カットオフ波長は2.6 μm に達するが、暗電流が大きくなり、MCT と同様に冷却機構を必要とする^{(7), (8)}。当社は InP に格子整合する InGaAs/GaAsSb タイプ II 量子井戸構造を受光層に用いて、カットオフ波長2.5 μm でペルチェ素子による冷

却で利用できるセンサを開発した^{(9), (10)}。タイプ II 量子井戸構造では 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を利用する。この波動関数の重なりが大きさが量子効率に比例する。今回、量子井戸を構成する InGaAs を InAs/GaAs のデジタルアロイ構造に置き換えることによって波動関数の重なりが増加し、量子効率が向上することを理論計算で明らかにした^{(11)～(13)}。本報告では、(GaAs)(InAs)/GaAsSb デジタルアロイ型タイプ II 量子井戸構造 (Digital alloy Type-II Super Lattice) を受光層に用いたセンサの作製と特性について報告する。さらに、バリア層を追加することによる暗電流の一層の低減についても報告する。

2. デジタルアロイ型タイプ II 量子井戸構造

異なるバンドギャップをもつ複数の半導体を数 nm オーダーで交互に積層した量子井戸構造は、そのポテンシャル構造の違いから幾つかに分類される。電子と正孔が同一の層内に閉じ込められるポテンシャル構造はタイプ I、異なる層内に閉じ込められるポテンシャル構造はタイプ II と呼ばれる。タイプ II では、異なる半導体間で光学遷移が生じるため、バンドギャップの大きな半導体を用いながら狭いバンドギャップでの吸収を実現できる。図1に従来の InGaAs/GaAsSb タイプ II 量子井戸構造 (C-T2SL と呼ぶ)

および今回開発したデジタルアロイ型タイプII量子井戸構造 (DA-T2SL と呼ぶ) の1周期の構成を示す。DA-T2SL は $(\text{GaAs})_3/(\text{InAs})_3/(\text{GaAs})_3/(\text{InAs})_3/(\text{GaAs})_2/\text{GaAsSb}$ で構成されている。ここで、 $(\text{GaAs})_3$ は厚さが3分子層の GaAs を示す。図2 (a) に C-T2SL のバンド模式図を示す。InGaAs 内に閉じ込められた電子の波動関数と GaAsSb 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 $2\mu\text{m}$ 帯の波長に対応する。図2 (b) に今回開発した DA-T2SL のバンド模式図を示す。正孔は従来構造と同様に GaAsSb に閉じ込められているが、電子はデジタルアロイ層全体に広がっており、GaAsSb との界面近傍においても多くの電子が存在できるようになる。その結果、デジタルアロイと GaAsSb 界面近傍の吸収が増加し、 $2\mu\text{m}$ 帯における感度の増加が期待される。

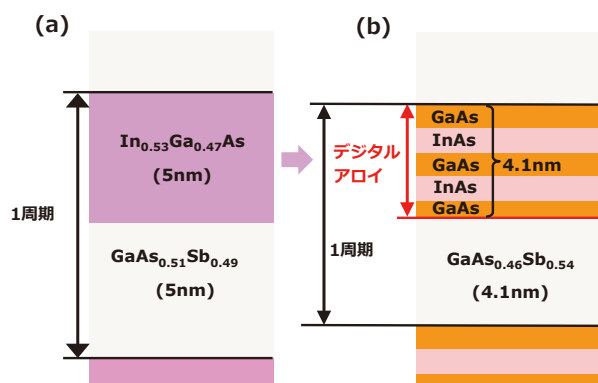


図1 量子井戸1周期の構成 (a) C-T2SL, (b) DA-T2SL

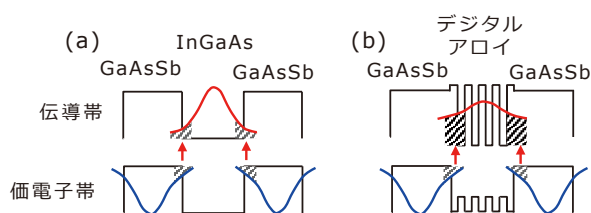


図2 バンド模式図 (a) C-T2SL, (b) DA-T2SL

3. エピタキシャル成長とセンサ作製

3-1 エピタキシャル成長

分子線エピタキシー法 (MBE) を用いて (001) 面 n 型 InP 基板の上に n 型 InGaAs 層 (500nm 厚さ)、InGaAs 層 (50nm 厚さ)、DA-T2SL 受光層 (305周期)、InGaAs 層 (800nm 厚さ) および p 型 InGaAs コンタクト層 (200nm 厚さ) を順次結晶成長した。成長した DA-T2SL の結晶品質は走査型透過電子顕微鏡 (STEM)、高分解能 X 線回折 (XRD)、およびフォトルミネッセンス (PL) を用いて評価した。

また、センサ特性を比較するため、受光層を従来の

C-T2SL (250周期) に置き換えたエピタキシャル成長も実施した。250周期にした理由は DA-T2SL (305周期) と厚さを揃えるためである。さらに、バリア層の効果を確認するために InGaAs 層 (50nm 厚さ) を AlGaInAs バリア層 (100nm 厚さ) に置き換えたエピタキシャル成長も実施した。

(1) 走査型透過電子顕微鏡 (STEM)

図3 (a) に DA-T2SL 受光層を STEM で観察した高角度散乱暗視野像 (HAADF 像) を示す。周期的なコントラストは設計された層厚と密接に対応しており、 $(\text{GaAs})_3/(\text{InAs})_3/(\text{GaAs})_2$ デジタルアロイと GaAsSb の量子井戸が原子スケールで厳密に形成できている。また、転位の発生がなく良好な結晶性を示していることがわかる。図3 (b) は蛍光 X 線分析による各元素の存在量をラインスキャンした結果である。HAADF STEM 像の各コントラストに対応する層が設計通りの元素で構成されていることがわかる。

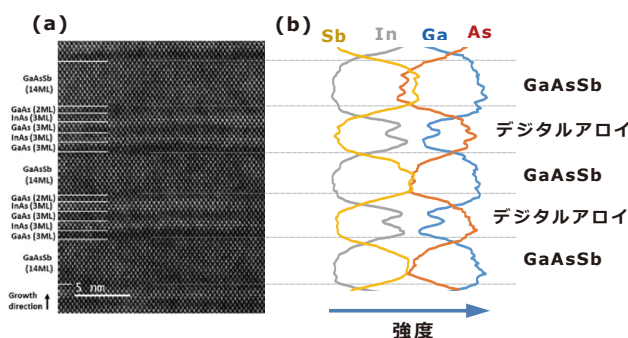


図3 (a) DA-T2SL の断面 HAADF STEM 画像, (b) 蛍光 X 線ラインスキャン

(2) X 線回折 (XRD)

図4 に DA-T2SL 受光層 (305周期) のセンサ作製のためにエピタキシャル成長したウェハの高分解能 X 線回折の結果を示す。 $(\text{GaAs})_3/(\text{InAs})_3/(\text{GaAs})_3/(\text{InAs})_3/(\text{GaAs})_2$ か

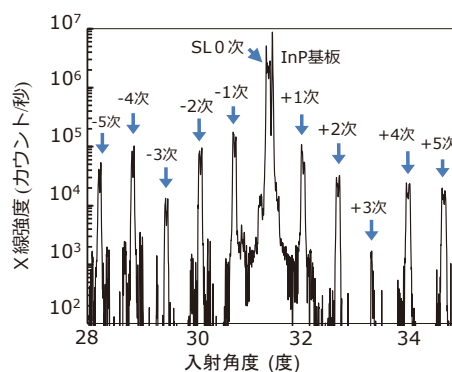


図4 DA-T2SL エピタキシャルウェハの X 線回折

らなるデジタルアロイ層（設計厚み4.1nm）とGaAsSb層（設計厚み4.1nm）の繰り返し周期に対応するサテライトピークが-5次から+5次まで測定できている。各サテライトピークの間隔は量子井戸1周期の厚み（4.1nm+4.1nm=8.2nm）に対応しており、デジタルアロイ層とGaAsSb層が設計通りの厚さで305周期に亘って界面の揺らぎが少なく急峻に作製できていることが確認できた。また、ゼロ次のピークとInP基板のピークの差から見積もったDA-T2SL受光層の格子不整合度は約0.2%で、格子整合性も問題ないことを確認した。

(3) フォトルミネッセンス (PL)

DA-T2SLのフォトルミネッセンスの温度依存性を図5に示す。各温度で明確なフォトルミネッセンスが得られている。250Kにおけるピーク波長と半値全幅（FWHM）はそれぞれ2.41 μ mおよび83meVであった。ピーク位置は200Kから300Kの温度範囲で2.37 μ mから2.46 μ mへシフトした。

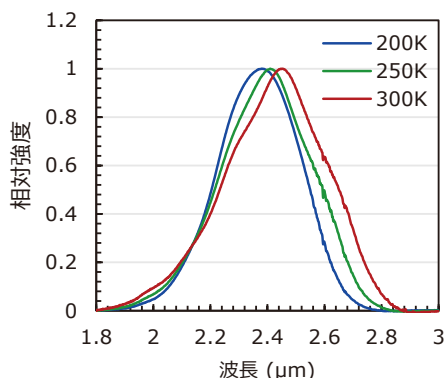


図5 DA-T2SLのPL測定結果

3-2 センサ作製と評価

STEM、XRD、PL測定結果から、エピタキシャル成長したDA-T2SL構造が良好な結晶品質を有することが確認で

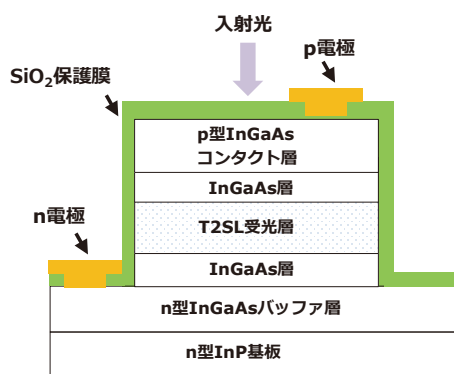


図6 センサの断面模式図（バリア層がない場合）

きたため、センサ作製に進んだ。作製したセンサの構造を図6に示す。T2SL受光層にはDA-T2SL（305周期）のみならず従来型のC-T2SL（250周期）も用いた。それぞれのT2SL受光層を持つウェハに対してドライエッチングプロセスで直径230 μ mの円形のメサを形成した。続いてp型InGaAsコンタクト層表面及びメサ側壁をSiO₂膜で被覆し、n型InGaAsバッファ層およびp型InGaAsコンタクト層にオーミック電極を形成した。また、バリア層の効果を確認するためにDA-T2SL受光層直下のInGaAs層をAlGaInAsバリア層に置き換えたセンサも作製した。作製したセンサの量子効率および暗電流を評価した。

(1) 量子効率

図7はDA-T2SL受光層とC-T2SL受光層を用いたセンサの外部量子効率^{*2}スペクトルを示す。測定は上面入射条件下で、温度250Kにてバイアス電圧-1Vを印加して実施した。本測定に使用した分光応答システムは、機械式チョッパー付き黒体放射源（CL System SR200-33）、モノクロメーター（Acton SP2300）、ロックインアンプ（NF Corporation LI5640）、液体窒素冷却デューワーアセンブリで構成している。

DA-T2SLセンサのカットオフ波長は2.5 μ mで、C-T2SLセンサと同等であった。さらに、1.8~2.5 μ mの波長域においてDA-T2SLセンサはC-T2SLよりも高い量子効率を示した。これは、理論の予想と一致する。

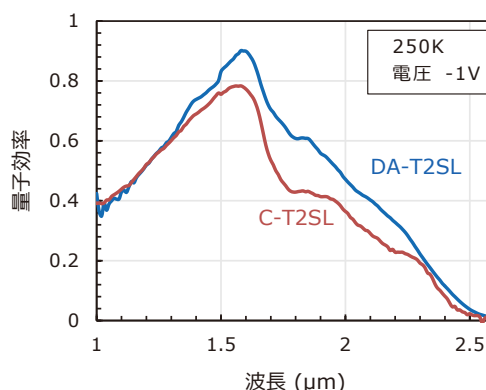


図7 DA-T2SLセンサとC-T2SLセンサの量子効率の比較（250K、電圧-1V）

(2) 暗電流

図8に受光層にDA-T2SLを用いたセンサでバリア層がある場合とない場合の暗電流特性を示す。本センサはゼロバイアス電圧でも使用可能なため、バイアス電圧は-100mVとした。バリア層を追加することで200Kから300Kの全温度範囲で1桁以上暗電流が低減した。バリア層がない場合は200Kで 1×10^{-6} A/cm²であるのに対して、バリア層ありの場合は240Kで 1×10^{-6} A/cm²であった。200Kを実現す

るには4段のペルチェ素子が必要であるが、240Kは2段のペルチェ素子で実現可能である。バリア層を追加することで暗電流が低減し、段数の少ないペルチェ素子で使うことができれば、低コスト、小型および低消費電力が期待できる。

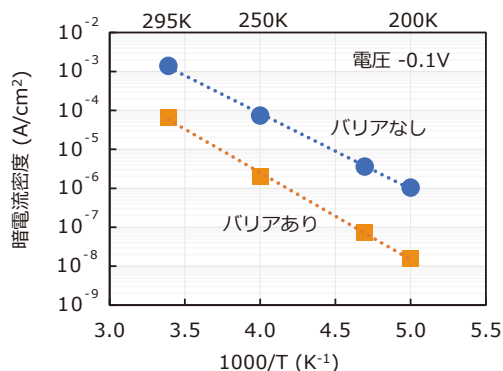


図8 DA-T2SL 受光層センサのバリア層あり／なし比較

4. 結 言

(InAs)(GaAs)/GaAsSb デジタルアロイ型タイプⅡ量子井戸構造を受光層に用いたセンサを開発した。STEM、XRD、PLによる構造解析により優れた結晶品質を確認し、従来のInGaAs/GaAsSbタイプⅡ量子井戸構造と比較して量子効率を向上した。さらに、正孔に対するバリア層としてAlGaInAs層を挿入した結果、暗電流を1桁以上低減することに成功した。これらの特性により、(InAs)(GaAs)/GaAsSb デジタルアロイ型タイプⅡ量子井戸構造を受光層に用いたセンサは1～2.5μmの広い波長域で動作するセンサとして様々な分野での応用拡大が期待される。今後、2次元アレイ化してイメージセンサ開発を進めていく。

5. 謝 辞

この成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP22013）の結果得られたものです。

用語集

※1 カットオフ波長

センサが検出できる光の最大波長。

※2 外部量子効率

センサに入射した光子の数に対して、実際にセンサの外部に取り出された電荷キャリア（電子）の数の比。

参 考 文 献

- (1) T. Kawahara, K. Machinaga, B. Sundararajan, K. Miura, M. Migita, H. Obi, T. Fuyuki, K. Fujii, T. Ishizuka, H. Inada, and Y. Iguchi, "InGaAs/GaAsSb type-II quantum-well focal plane array with cutoff-wavelength of 2.5μm," Proc. SPIE 10111, 1011115 (2017)
- (2) G. A. Tidhar and R. Segal, "New applications with a SWIR imager employing long wavelengths," Proc. SPIE 8012, 801207 (2011)
- (3) L. A. Sordillo, L. Shi, D. C. Sordillo, P. P. Sordillo, and R. R. Alfano, "Advances in medical applications using SWIR light in the wavelength range from 1000 to 2500nm," Proc. SPIE 10873, 108730T (2019)
- (4) J. Roubichou, J. L. Reverchon, A. Evrigen, C. Theveneau, V. Gueriaux, J. L. Gach, and J. L. Beuzit, "Study of new types of detectors in the SWIR (Short Wave InfraRed) : Extension of the operating band beyond 1.7μm," Proc. SPIE 13046, 1304604 (2024)
- (5) M. Delmas, D. Ramos, R. Ivanov, L. Zurauskait, D. Evans, D. Rihtnesberg, S. Almqvist, S. Becanovic, E. Costard, and L. Hoglund, "High performance type-II InAs/GaSb superlattice infrared photodetectors with a short cut-off wavelength," Opto-Electron. Rev. 33, 144555 (2024)
- (6) A. Rogalski, "Infrared detectors for the future," Acta Phys. Pol., A 116, 389 (2009)
- (7) Xiaoli Ji, Baiqing Liu, Hengjing Tang, Xue Li, Ming Shi, Ying Zhou, Yue Xu, Haimei Gong, and Feng Yan, "Improvement of surface leakage current of 2.6μm InGaAs photodetectors by using inductive coupled plasma chemical vapor deposition technology," Japanese Journal of Applied Physics 54, 04DG09 (2015)
- (8) Ying Zhou, Xiaoli Ji, Ming Shi, Hengjing Tang, Xiumei Shao, Xue Li, Haimei Gong, Xun Cao, and Feng Yan, "Impact of SiNx passivation on the surface properties of InGaAs photodetectors," J. Appl. Phys. 118, 034507 (2015)
- (9) H. Inada, K. Miura, H. Mori, Y. Nagai, Y. Iguchi, and Y. Kawamura, "Uncooled SWIR InGaAs/GaAsSb type II quantum wells focal plane array," Proc. of SPIE 7660, 76603N-1 (2010)
- (10) S. Balasekaran, H. Inada, Y. Iguchi, T. Katsuyama, et T. Sasaki, "Photocapacitance characterization of deep levels in InGaAs/GaAsSb type-II MQW photodiodes," Infrared Physics & Technology, vol. 88, p. 194-199 (2018)
- (11) T. Kato and S. Souma, "Optical properties of (GaAs/InAs)-GaAsySb1-y digital alloy superlattices in the short wavelength infrared region calculated by an sp3d5s-tight-binding method," Appl. Phys. A 129, 429 (2023)
- (12) Takashi Kato, Makoto Murata, Sundararajan Balasekaran, Yasuhiro Iguchi, Yojiro Nakayama, and Satofumi Souma, "(GaAs/InAs)-GaAsSb digital alloy type-II superlattice for extended short-wavelength infrared detection," Appl. Phys. Lett. 125, 161103 (2024)
- (13) Sundararajan Balasekaran, Makoto Murata, Y. Iguchi, "Comparative study of digital and random alloy T2SLs on InP substrates" Proc. SPIE. 13469 (2025)

執 筆 者

Sundararajan Balasekaran* :
伝送デバイス研究所 主席
博士（工学）



村田 誠 : 伝送デバイス研究所
博士（理学）



猪口 康博 : 伝送デバイス研究所 主幹
博士（工学）



*主執筆者