

# 波長15 $\mu\text{m}$ まで感度を有する量子型赤外イメージセンサ

Quantum Well Infrared Imaging Sensor with High Sensitivity in the Wavelength Range of up to 15  $\mu\text{m}$

**木村 大資\***  
Daisuke Kimura

**スダララジャン バラセカラン**  
Sundararajan Balasekaran

**稲田 博史**  
Hiroshi Inada

**猪口 康博**  
Yasuhiro Iguchi

**酒井 理人**  
Michito Sakai

**木股 雅章**  
Masafumi Kimata

現在、広く使われているHgCdTeを材料とした量子型赤外センサに比べ、理論的な性能向上が期待できかつ環境負荷の小さいType-II超格子を用いた赤外センサが注目されている。センサ開発に関する報告が多数なされているが、ハイパースペクトルイメージングに必要とされる14  $\mu\text{m}$ より長波長域に関する報告は少ない。今回、我々は受光層材料にInAs/GaInSb超格子を適用し、波長15 $\mu\text{m}$ まで感度を有する32万画素（VGAフォーマット\*1）の赤外イメージセンサを開発した。バイアス電圧-20 mV、温度77 Kにおける暗電流密度は $3.7 \times 10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup>を得た。温度分解能（NE $\Delta$ T）は0.29 K（F/1.4レンズ、積分時間200  $\mu\text{s}$ 、バイアス0 mV、温度95 K）であり、イメージセンサとして人物画像取得に成功した。

Infrared detectors with Type-II superlattices are attracting increasing attention due to their theoretically higher performance and lower environment impact than HgCdTe detectors. While quite a number of reports have been made on sensor development, only a few of them have discussed a long wavelength region over 14  $\mu\text{m}$ , which is required for hyper-spectral imaging. Using a Type-II InAs/GaInSb superlattice, we have developed an infrared imaging sensor (640  $\times$  512, VGA format) that functions in the wavelength range of up to 15  $\mu\text{m}$ . At a temperature of 77 K and a bias voltage of -20 mV, the sensor obtained a dark current density of  $3.7 \times 10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup>. The noise equivalent differential temperature (NE $\Delta$ T) of 0.29 K was achieved under an experimental condition using F/1.4 optics, a bias voltage of 0 mV, integration time of 200  $\mu\text{s}$ , and temperature of 95 K. We succeeded in taking thermal images of a person.

キーワード：赤外イメージセンサ、Type-II超格子、VLWIR、VGA

## 1. 緒 言

波長3  $\mu\text{m}$ 以上を高感度に検出可能な赤外センサは有毒ガスセンシング、暗視用カメラ、サーモグラフィ、宇宙からの地球環境観測などへの応用が期待される。現在はHgCdTeを受光材料に用いたセンサが主流であるが、水銀、カドミウムの地球環境への負荷が懸念される。昨今、地球環境に優しい新規材料としてInAsとGaSbを短周期積層構造にしたType-II超格子が注目され研究開発されている。そのバンド構造を図1に示す。InAsの伝導帯はGaSbの価電子帯よりも低くなり、電子と正孔のミニバンドが形成され、狭いバンドギャップにより長波長の光が吸収可能となる。InAs/GaSb超格子はHgCdTeと比較し

- ①キャリアの有効質量が大きく、オージェ再結合が抑えられ、理論上暗電流を低くできる
  - ②波長の感度域は組成ではなくInAsとGaSbの膜厚で調整でき、3  $\mu\text{m}$ から30  $\mu\text{m}$ の範囲で波長感度の制御が可能である
  - ③III-V属エピタキシャル成長技術が利用可能で、面内均一性の高い製造が可能である
- という優位性を持つ。

InAs/GaSb超格子を用いた赤外線センサは世界中で活発に開発されており、大気窓の中波長赤外帯（MWIR、波長3~5  $\mu\text{m}$ ）、長波長赤外帯（LWIR、波長8~14  $\mu\text{m}$ ）に関しては多数報告されている<sup>(1)~(4)</sup>。一方、量子型の特徴である高感度、高速応答性を生かせるハイパースペクトルイメージングやリモートセンシング応用ではより長波長域（VLWIR）での検知が期待されている<sup>(5)~(7)</sup>。

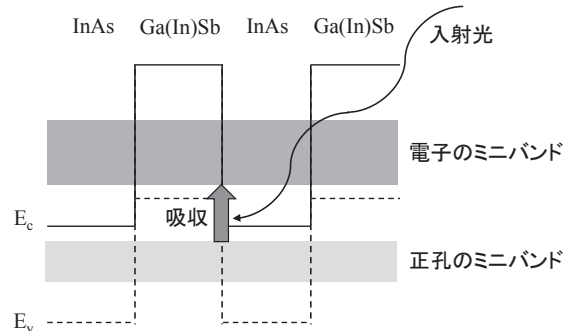


図1 Type-II超格子のバンド構造

今回我々は波長15 μmまで感度を有する32万画素の赤外イメージセンサを開発したので報告する。

## 2. 素子構造

エピウェハ構造を図2に示す。我々はInAs/GaSb超格子と比較し電子と正孔の波動関数の重なりが大きいため吸収係数が大きくなり、高い量子効率、感度向上が期待されるInAs/GaInSb超格子をセンサの受光層材料に使用した<sup>(6)</sup>。また、暗電流の低減を目的に受光層よりもバンドギャップの大きい電子、正孔の障壁層を受光層の両隣に設けるPBIBN構造を採用した<sup>(6)、(8)、(9)</sup>。

作製した赤外イメージセンサの構造を図3に示す。高精度化に有利なメサ型構造を採用し、画素間隔は15 μm、32万画素 (VGAフォーマット<sup>\*1</sup>) で、n型電極はInAsSb層上に形成した。

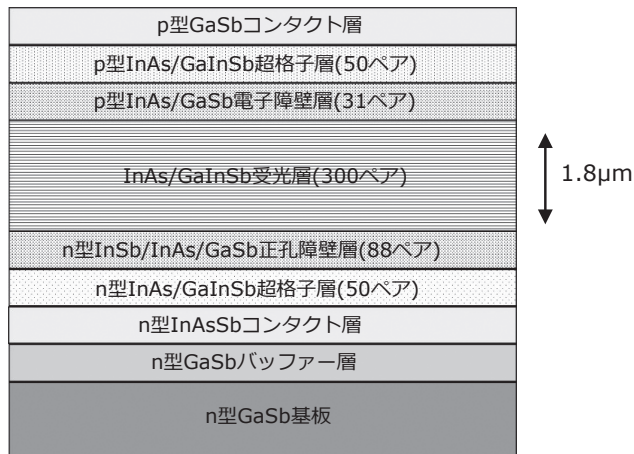


図2 エピウェハ構造

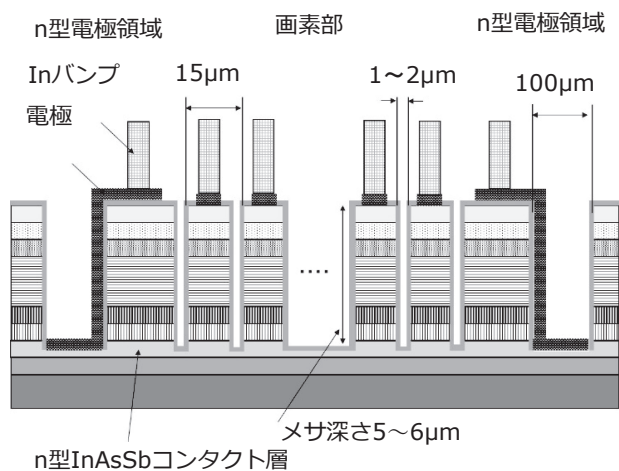


図3 赤外イメージングセンサ構造

## 3. 作製プロセス

図4に赤外イメージセンサの作製プロセスを示す。分子線エピタキシー法により、n型のGaSb基板の上にn型GaSbバッファ層 (厚さ0.5 μm)、n型InAsSbコンタクト層 (厚さ3 μm)、n型InAs/GaInSb超格子層 (50ペア)、n型InSb/InAs/GaSb正孔障壁層 (88ペア)、InAs/GaInSb受光層 (300ペア、厚さ1.8 μm)、p型InAs/GaSb電子障壁層 (31ペア)、p型InAs/GaInSb超格子層 (50ペア)、p型GaSbコンタクト層 (厚さ0.2 μm) を順に結晶成長させた。その後、SiN膜を成膜し、フォトリソグラフィを用いて画素間隔15 μm、32万画素の赤外イメージセンサのパターンを形成した。続いて半導体エッチング用SiNマスクを形成した後、ドライエッチングで半導体層をエッチングしメサ構造を形成した。リン酸系溶液を用いたウェットエッチングによりメサ側面のダメージ層を除去した後、バッファードフッ酸を用いてSiNマスクを除去した。続いて、N<sub>2</sub>プラズマによる表面処理により自然酸化膜除去と再酸化を抑制し、同一チャンバー内で待機時間無く連続処理でSiO<sub>2</sub>パッシベーション膜を成膜した<sup>(10)</sup>。コンタクト開口し、蒸着、リフトオフによりTi/Pt/Au/Ni/Au層からなる電極、材質Inのバンプを形成した。ウェハをダイシングしてチップ化し、フリップチップボンディングによりセンサチップとROIC<sup>\*\*2</sup>とをバンプ接合し、アンダーフィルを充填した。最後にGaSb基板を50 μmまで化学機械研磨 (CMP) により減厚し、光吸収を抑制した。作製した赤外イメージセンサの電子顕微鏡写真を図5に示す。均一性よくメサが狭ピッチ、高アスペクトで作製できていることがわかる。

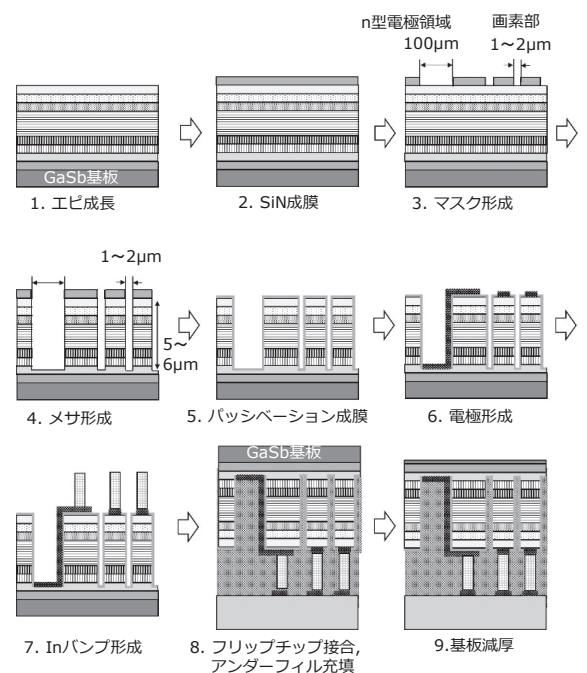


図4 赤外イメージングセンサの作製プロセス

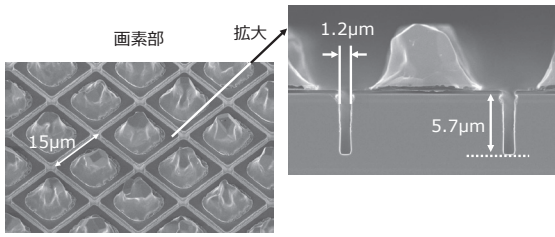


図5 作製した赤外イメージングの電子顕微鏡写真

また、暗電流、受光感度等の特性を評価するための単素子センサを赤外イメージセンサと同一ウェハ上に作製した。

## 4. センサの特性

### 4-1 暗電流・受光感度・量子効率特性

単素子センサをLCC (Lead-less Chip Carrier) パッケージにワイヤボンディングし暗電流、受光感度、量子効率を評価した。電流電圧特性を図6に、受光感度を図7に、量子

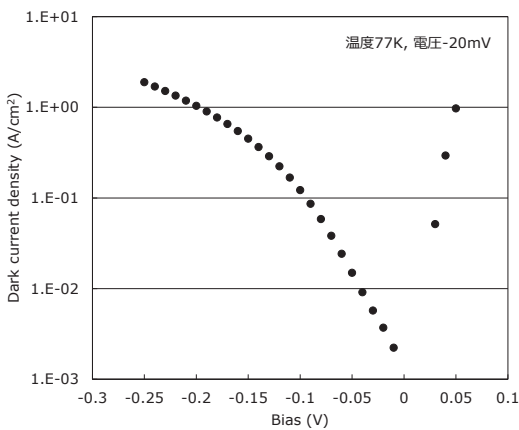


図6 電流電圧特性

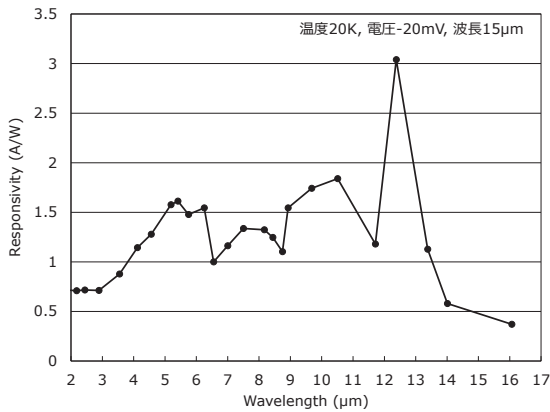


図7 受光感度

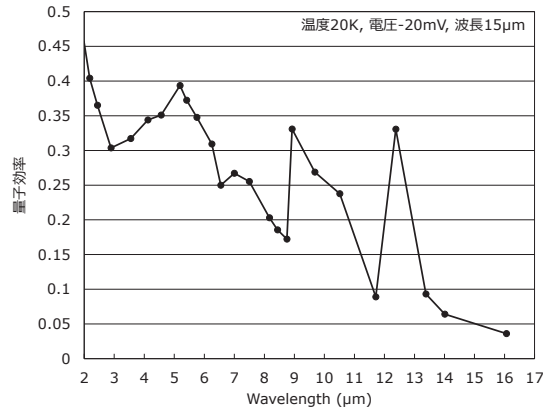


図8 量子効率

効率を図8に示す (図7、図8でグラフがギザギザしているのは周辺からの干渉の影響である)。温度77 K、電圧-20 mVでの暗電流密度 $J$ は $3.7 \times 10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup>であった。温度20 K、電圧-20 mV、波長15 μmにおける受光感度は0.5 A/W、量子効率は5%であった。

### 4-2 イメージセンサ特性

センサチップを液体窒素で94 Kに冷却し、F/1.4のLWIRレンズ、積分時間60 μs、バイアス0 mVで人物を撮影 (写真1) および液体窒素を入れた容器の近くでかざした手を撮影した (写真2)。写真1に示すようにセンサ全面で人物



写真1 人物画像



写真2 液体窒素容器画像

の画像が撮影できていることが確認できる。写真2に示すように手の温度勾配が確認できるとともに、室温以下の液体窒素容器も識別できた。

図9に温度95 K、積分時間200  $\mu$ s、バイアス0 mVでの赤外イメージセンサの温度分解能 (NEdT: Noise equivalent differential temperature) のヒストグラムを示す。NEdTの最頻値は0.29 K、 $\pm 3\sigma$ でのオペラビリティは85 %であった。

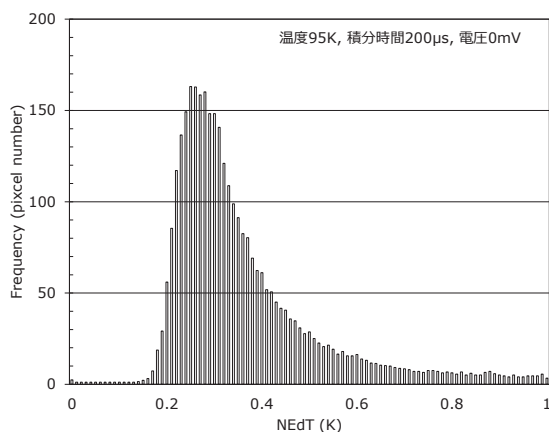


図9 温度分解能のヒストグラム

## 5. 結 言

我々は Type-II 超格子を受光層に用い、15  $\mu$ m まで感度を有する32万画素の赤外イメージセンサを開発した。InAs/GaSb超格子を受光層材料に用いることで感度を向上させ、電子、正孔の障壁層を受光層の両隣に設けることで暗電流を低減させ、NEdTは0.29 Kを観測し、イメージセンサとして人物画像の取得に成功した。NEdTのパラツキに課題は残すが、今後のハイパースペクトルイメージング等への応用が期待できる結果を得た。

### 用語集

#### ※1 VGA

Video Graphics Array: 横に640画素、縦に512画素を配列した形式。

#### ※2 ROIC

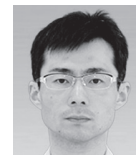
Read-Out Integrated Circuit: 信号読み出し回路。

### 参 考 文 献

- (1) H. S. Kim, E. Plis, J. B. Rodriguez, G. D. Bishop, Y. D. Sharma, L. R. Dawson, S. Krishna, J. Bundas, R. Cook, D. Burrows, R. Dennis, K. Patnaude, A. Reisinger and M. Sundaram, Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 183502
- (2) V. Daumer, V. Gramich, R. Müller, J. Schmidt, F. Rutz, T. Stadelmann, A. Wörl and R. Rehm: Proc. of SPIE. (2017) 10177. 1017711
- (3) L. Höglund, R. M. V. Würtemberg, C. Asplund, H. Kataria, A. Gamfeldt and E. Costard, Proc. of SPIE. (2017) 10177. 1017713
- (4) A. Rogalski, M. Kopytko and P. Martyniuk, Proc. of SPIE. (2017) 10177. 1017715
- (5) Y. Wei, A. Gin and M. Razeghi, Appl. Phys. Lett. 81 (2002) 3675
- (6) M. Sakai, J. Murooka, A. Kumeta, H. Katayama, T. Kimura, H. Inada, Y. Iguchi, Y. Hiroe and M. Kimata, Proc. of SP2E. (2016) 9933. 993306
- (7) D. Jiang, W. Xiang, F. Guo, H. Hao, X. Han, X. Li, G. Wang, Y. Xu, Q. Yu, and Z. Niu, Appl. Phys. Lett. 108 (2016) 121110
- (8) N. Gautam, H. S. Kim, M. N. Kuttly, E. Plis, L. R. Dawson and S. Krishna, Appl. Phys. Lett. 96 (2010) 231107
- (9) P. Martyniuk, M. kopytko and A. Rogalski, Opto-Electron. Rev. 22 (2014) 127
- (10) H. Inada, K. Machinaga, Sundararajan, B, K. Miura, Y. Tsuji, M. Migita, Y. Iguchi, H. Katayama and M. Kimata, Proc. of SPIE. (2014) 9070, 90700Z

### 執 筆 者

木村 大資\*: 伝送デバイス研究所 主査



スングララジャン パーラセカラン:

伝送デバイス研究所 主査  
博士 (工学)



稲田 博史: 伝送デバイス研究所 グループ長



猪口 康博: 伝送デバイス研究所 部長  
博士 (工学)



酒井 理人: 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
博士 (理学)



木股 雅章: 立命館大学 教授  
博士 (工学)



\*主執筆