

高感度中赤外センサを実現する 多周期エピウエハ

Epitaxial Wafer of Multiple Periodic Layer for Midwavelength Infrared Detectors with High Sensitivity

有方 卓*
Suguru Arikata

京野 孝史
Takashi Kyono

秋田 勝史
Katsushi Akita

町長 賢一
Kenichi Machinaga

稲田 博史
Hiroshi Inada

猪口 康博
Yasuhiro Iguchi

波長3-5 μm の中赤外帯では、有害ガス検出や地球観測衛星向けとして高感度で応答速度の速いセンサが期待されており、近年そのセンサ材料として理論的に優れた性能を有するInAs/GaSb超格子が注目されている。InAs/GaSb超格子は分子線エピタキシー法 (MBE) による開発例はあるが、生産性に優れた有機金属気相成長法 (OMVPE法) による報告は少ない。今回我々は、OMVPE法による高品質な100周期InAs/GaSb超格子の成長に成功した。これを用いたセンサを作製したところ、整流特性が得られるとともに暗電流密度として印加電圧-50 mV、素子温度77 Kにおいて 2×10^{-4} A/cm²を得た。また、波長3~5 μm にて感度が得られ、波長3.5 μm において量子効率15%、20 Kを観測した。これらの結果より、今回我々が成長したInAs/GaSb超格子は高性能な中赤外帯検出器の実現につながるものと期待できる。

Midwavelength infrared (MWIR: 3-5 μm) detectors with high sensitivity and fast response are strongly demanded for hazardous gas detection and satellite observation. In recent years, InAs/GaSb superlattices (SLs) have been a subject of intense study as the absorption region of the MWIR detector. Although organometallic vapor phase epitaxy (OMVPE) is advantageous for mass production compared with molecular beam epitaxy (MBE), the number of reports on the OMVPE growth of InAs/GaSb SLs is limited. In this work, we fabricated high-quality 100-period InAs/GaSb SLs on GaSb substrates by OMVPE. MWIR detectors with 100-period SLs showed a dark current density of 2×10^{-4} A/cm² at -50 mV and 77 K, and an external quantum efficiency of 15% at 3.5 μm and 20 K. These results indicate that the InAs/GaSb SLs could offer excellent structural and electrical properties for high-performance MWIR detectors.

キーワード：中赤外、受光素子、センサ、超格子、OMVPE

1. 緒言

波長3-5 μm の中赤外帯には分子の基準振動や熱を持つ物質から放出される光の波長が存在する。このため、この波長帯を検出できる高感度・高速応答の中赤外センサは有害ガスの検出や暗視カメラ、サーモグラフィ、地球観測衛星などに応用が期待されている。従来、中赤外帯のセンサ材料として用いられてきた水銀カドミウムテルル (HgCdTe, MCT) に代わる材料として、理論的に優れたセンサを実現できるInAs/GaSb超格子*¹が注目されている⁽¹⁾。InAs/GaSb超格子は理論的に暗電流*²が低いことに加え、検出可能波長を容易に調整できることや、水銀を用いていないことから環境的にも優位性を持っている。

InAs/GaSb超格子をセンサ材料として用いる場合、十分な特性を得るためにはInAs/GaSb界面の平坦性や急峻性といった結晶品質が重要となる。InAs/GaSb超格子の作製は分子線エピタキシー法 (MBE法) による開発例はあるが、有機金属気相成長法 (OMVPE法) による報告は少ない⁽²⁾。これは、一般的にアンチモン (Sb) を含む材料系ではSbが相分離しやすいため、低温成長が可能なMBE法のほうが容易に成長できるためである。表1にOMVPE法と

MBE法の比較を示す。MBE法に比べ、OMVPE法は成長速度が速いことやメンテナンスが比較的容易であることが特徴で、生産性に優れている。我々はこれまでにOMVPE法によるSb系材料として、近赤外 (波長1-2.5 μm) センサ向けのInP基板上InGaAs/GaAsSb超格子の作製に成功し、高性能な近赤外検出器を実現、実用化している⁽³⁾。そこで今回、これら開発で培ったSb系材料の独自低温OMVPE法成長技術を展開し、GaSb基板上のInAs/GaSb超格子の作製を行った。本報告では、OMVPE法により作製したInAs/GaSb超格子のエピウエハ特性と、それを用いて作製したセンサ特性について報告する。

表1 OMVPE法とMBE法の比較

	有機金属気相成長法 (OMVPE法)	分子線エピタキシー法 (MBE法)
Sb系結晶品質	△化学反応利用⇒ 独自成長技術で○	○物理蒸着
成長速度	○速い	×結晶品質両立のため、 遅い
装置メンテナンス	○容易	×困難

2. エピタキシャル成長

表2にGaSbとInAs、InSbの格子定数を示す。GaSb基板上にInAs/GaSb超格子をエピタキシャル成長する場合、GaSb-InAs間の格子定数差(-0.62%)に起因した転位が発生し、センサ特性を悪化させてしまう。この転位を抑制するため、一般的にMBE法ではInAs/GaSb層間にInSbを数原子層挿入することでGaSb-InAs間の格子定数差を擬似的に減少させている^{(4)~(6)}。一方、OMVPE法では一般的な成長時の基板温度に比べ、InSbの融点が527℃と低いことから成長が困難と考えられてきた⁽⁷⁾。そこで今回、我々の独自低温OMVPE法成長技術を用い、成長時の基板温度をOMVPE法によるものとしては低温の500℃まで下げること、InSb層を含むInAs/GaSb超格子の成長を可能とした。

表2 GaSb、InAs、InSbの格子定数

	格子定数 (Å)	GaSb との格子定数差
GaSb	6.096	-
InAs	6.058	-0.62%
InSb	6.479	+6.28%

まず、OMVPE法を用いてInAs/GaSb超格子を受光層とするエピウエハを作製した。図1に成長したエピウエハの構造を示す。TeドーパGaSb (001) 基板上にp型GaSb層を成長後、InAs層とGaSb層を交互に積層した、100周期のInAs/GaSb超格子を成長した。超格子中には転位抑制のため、InSb層を挿入している。最後に、表面コンタクト層としてn型InAs層を成長した。また、カットオフ波長^{*3}の設計は5 μm帯とした。

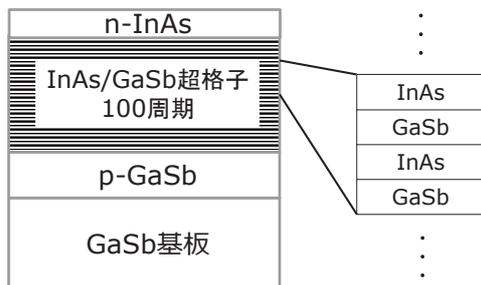


図1 エピウエハの構造

作製したエピウエハの結晶品質の評価は、原子間力顕微鏡 (AFM)、透過型電子顕微鏡 (TEM)、X線回折 (XRD)、フォトルミネッセンス (PL) を用いて行った。

3. エピウエハの特性

図2に作製したエピウエハ表面の、AFM像を示す。図2より、表面に大きな凹凸や欠陥、転位といったセンサ特性に悪影響を及ぼしうるものはみられなかった。また、表面粗さ (Rms) は0.3nmと、十分に小さい値が得られた。

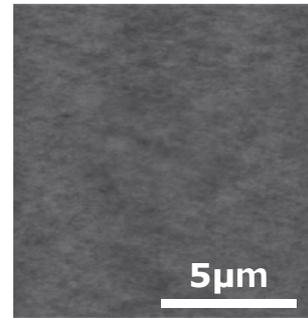


図2 エピウエハ表面のAFM像

次に、エピウエハの断面TEM像を図3に示す。図3より、100周期全体にわたって転位や欠陥は観測されず、急峻かつ平坦な超格子界面が形成できていることがわかった。また、図4にエピウエハの(004)面XRD測定結果を示す。GaSb基板のピークとInAs/GaSb超格子に起因する0次ピークはほぼ重なっているため、InSb層の挿入によりGaSb-InAs間の格子定数差が十分に緩和できていることがわかった。また、InAs/GaSb超格子の-3~+3次サテライトピークも明瞭に観測されており、図3の断面TEM結果に整合して急峻な超格子界面を持つことが明らかになった。これらの結果より、我々の独自低温OMVPE法成長技術によって高品質なInSb層が成長でき、格子定数差を緩

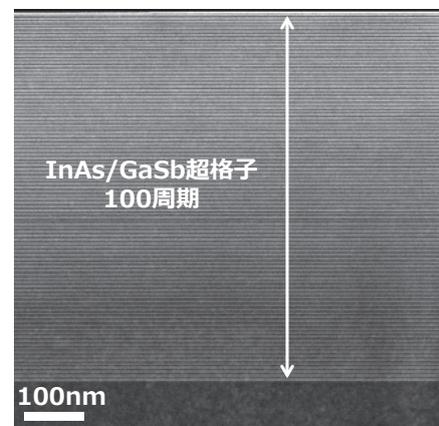


図3 InAs/GaSb超格子の断面TEM像

和することで急峻かつ平坦なInAs/GaSb超格子が形成できていることがわかった。

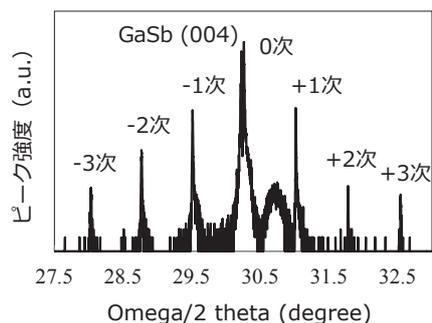


図4 (004) XRD測定結果

図5にエピウエハの光学特性を評価するために行った、PL測定結果を示す。測定は4 K、励起光源にNd:YAGレーザー(波長1064 nm)を用いた。図5より、設計通りPLピーク波長が5.6 μmの、InAs/GaSb超格子に起因する発光スペクトルを観測した。これより、今回作製したエピウエハは設計通り5 μm帯の中赤外帯波長を受光可能であることを示唆している。

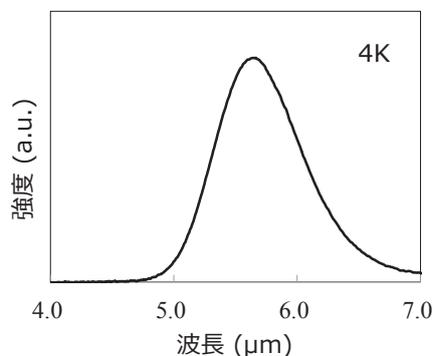


図5 PLスペクトル

4. センサの作製

OMVPE法を用いて作製したInAs/GaSb超格子を受光層とするエピウエハのセンサ特性評価のため、図6に示す構造を作製した。まず、図1に示すエピウエハにドライエッチングを用い、受光層であるInAs/GaSb超格子を物理的に分離した。次に結晶をSiO₂保護膜で覆い、光電流取り出しのためのn型電極をn型InAs層上に、p型電極をp型GaSb層上に形成した。n電極、p電極にはAu/Pt/Tiを用いた。

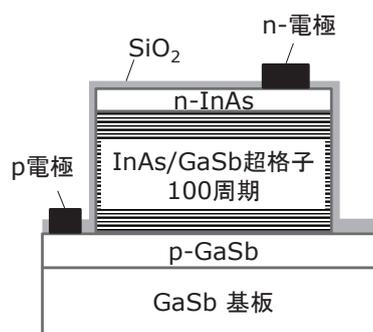


図6 センサの断面図

5. センサの特性

図7に、作製したセンサのI-V特性を示す。測定は77 Kで行った。図7より、作製したセンサは整流特性を示すと共に、暗電流密度として、 $2 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ (印加電圧-50 mV) というセンサ動作可能な低い値が得られた。

次に、作製したセンサの受光感度評価のため、外部量子効率の測定を行った結果を図8に示す。測定は20 K、基板側から光を入射し行った。図8より、波長3~5 μmにおいて感度が得られ、波長3.5 μmにおける外部量子効

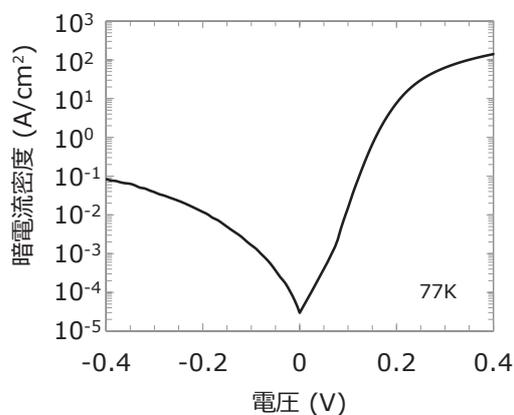


図7 I-V特性

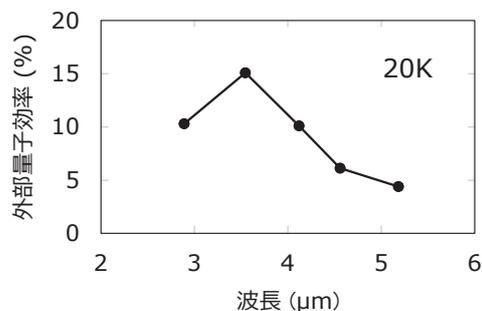


図8 感度測定結果

率は15%であった。今後はInAs/GaSb超格子の周期数を増加させることで、更なる感度向上が期待できる。

6. 結 言

今回、中赤外センサ向けのGaSb基板上InAs/GaSb超格子を、生産性の優れるOMVPE法を用いて作製した。結果、Sb系の独自低温OMVPE技術を用いることで高品質な100周期InAs/GaSb超格子の成長に成功した。また、センサを作製し、評価を行った結果、整流特性が得られるとともに暗電流密度として印加電圧-50 mV、素子温度77 Kにおいて 2×10^{-4} A/cm²を得た。波長3-5 μmにて感度が得られ、波長3.5 μmにおいて量子効率15%を観測した。これらの結果より、今回我々が成長したInAs/GaSb超格子は高性能な中赤外帯検出器の実現につながるものと期待できる。

5. 謝 辞

本報告中の感度評価にご協力いただいた、立命館大学・木股教授、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)・酒井様、片山様に感謝申し上げます。

用語集

※1 InAs/GaSb超格子

数ナノメートルのInAs層とGaSb層を交互に積層した結晶を指す。

※2 暗電流

受光センサにおいて、光が当たっていない時に流れる電流のこと。

※3 カットオフ波長

センサが検出できる最長の波長のこと。

参 考 文 献

- (1) D. L. Smith and C. Mailhot, J. Appl. Phys. 62, 2545 (1995)
- (2) Y. Huang, J. Ryou, R. Dupuis, A. Petschke, M. Mandl, and S. Chuang, Appl. Phys. Lett. 96, 251107 (2010)
- (3) 藤井慧、石塚貴司、永井陽一、猪口康博、秋田勝史、「高感度の近赤外受光素子エピウエハ」、SEIテクニカルレビュー第185号、pp.111-115 (2014)
- (4) H. Mohseni, M. Razeghi, G. J. Brown, and Y. S. Park, Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 2107
- (5) H. J. Huang, L. Granzulis, G. J. Brown, K. Mahalingam, and D. H. Tomich, J. Cryst. Growth 261 (2004) 471
- (6) E. Plis, A. Khoshakhlagh, S. Myers, H. S. Kim, N. Gautam, Y. D. Sharma, S. Krishna, S. J. Lee, and S. K. Noh, J. Vac. Sci. Technol. B 28 (2010) C3G13
- (7) X. B. Zhang, J. K. Ryou, R. D. Dupuis, C. Xu, S. Mou, A. Petschke, K. C. Hsieh, and S. L. Chuang, Appl. Phys. Lett. 90, 131110 (2007)

執 筆 者

有方 卓* : 半導体技術研究所



京野 孝史 : 半導体技術研究所 主席
博士 (工学)



秋田 勝史 : 住電半導体材料(株) 主席
博士 (工学)



町長 賢一 : 伝送デバイス研究所



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)



*主執筆者