

# InP 基板上 InAs/GaSb 超格子を用いた 中赤外センサ

Mid-infrared Sensors with InAs/GaSb Superlattice Absorption Layers  
Grown on InP Substrates

三浦 広平\*

Kohei Miura

河村 裕一

Yuichi Kawamura

猪口 康博

Yasuhiro Iguchi

勝山 造

Tsukuru Katsuyama

中赤外センサの受光材料として注目を集めている type-II InAs/GaSb 超格子は、結晶成長には通常 GaSb 基板が使用される。しかし、GaSb 基板は赤外領域での透過率が低く、2次元センサアレイのような基板裏面から受光するセンサの作製には GaSb 基板の除去という困難な工程が必要になる。そこで我々は、透過率が高く GaSb との格子不整合が比較的小さい InP 基板に着目した。InP 基板上に GaSb バッファ層を厚く成長した後、InAs/GaSb 超格子を成長することで、格子不整合に起因する貫通転位が低減し、結晶学的および光学的特性の優れた超格子が得られることを見出した。さらに、InP 基板上 InAs/GaSb 超格子を用いて初めてカットオフ波長約 6.5  $\mu\text{m}$  のセンサを作製した。

Type-II InAs/GaSb superlattices (SLs), which are attractive for absorption layers of mid-infrared sensors, are usually grown on GaSb substrates. However, since GaSb substrates absorb infrared light, other substrates with high transparency are favorable for back-illuminated sensors. We have focused on InP substrates with high transparency and relatively small lattice mismatch to GaSb. The crystallographic and optical properties of SLs have been improved as GaSb buffer layer thickness increases due to the reduction of threading dislocations. We have successfully fabricated sensors with cutoff wavelength of 6.5  $\mu\text{m}$  using InAs/GaSb SL absorption layers grown on InP substrates for the first time.

キーワード：GaSb, InAs, type-II 超格子, InP, 中赤外センサ

## 1. 緒言

波長 3  $\mu\text{m}$  以上の赤外光を検知できる赤外センサは、環境ガスや有毒ガスの検知、暗視カメラ、医療・非破壊検査用サーモグラフィ等への応用が期待できる。受光材料には HgCdTe が広く利用されているが、近年新たな材料として InAs/GaSb 超格子が注目を集めている。InAs と GaSb を交互に短周期で積層すると、InAs の導電帯は GaSb のそれよりも低く、一方で GaSb の価電子帯は InAs のそれよりも高くなる。バンド構造を図 1 に示す。このようなバンド構造を持つ超格子は type-II と呼ばれ、電子と正孔のミニバンドが形成される。狭いバンドギャップが得られるために、長波長の光を吸収できる<sup>(1)</sup>。InAs/GaSb 超格子は、HgCdTe と比較して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ることから、理論上暗電流を低くできる<sup>(2)</sup>。また、カットオフ波長は組成ではなく InAs と GaSb の厚さで決まるので、容易に制御できる<sup>(3)</sup>。

センサの中でも 2次元センサアレイ (focal plane array; FPA) は、微細なセンサを配列したセンサチップと、Si からなる読み出し回路 (read out integrated circuit; ROIC) が bumps を介して接合された構造を持ち、赤外線を画像化できる。これまで InAs/GaSb 超格子を受光層に用いた FPA が多数報告されているが<sup>(4)~(6)</sup>、いくつかの問題点があ

る。まず、赤外線は InAs/GaSb 超格子の基板の裏面から入射する。基板は通常 GaSb 基板が使用されるが、GaSb 基板は赤外領域での透過率が低く、十分な感度が得られない<sup>(7)</sup>。また、FPA は 100 K 程度もしくはそれ以下に冷却して使用するが、GaSb 基板は Si との熱膨張係数差が大きいためセンサチップと ROIC 間に応力が生じ、接合が剥がれる恐れがある。これらの問題を避けるため、GaSb 基板を薄化あるいは除去するという非常に難しい工程が必要になる<sup>(8),(9)</sup>。

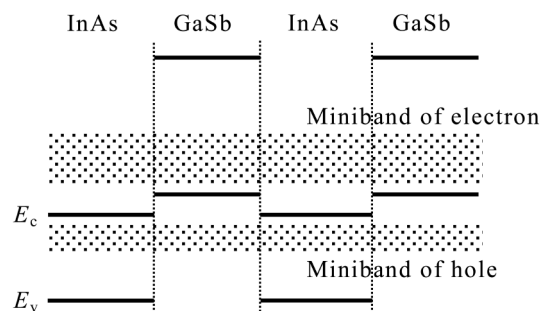


図 1 InAs/GaSb 超格子のバンド構造

GaSbの代わりに赤外光の透過率が高いGaAs基板を用いることも提案されているが<sup>(7)</sup>、GaAsはGaSbとの格子定数差が7.8%と大きく<sup>(10)、(11)</sup>、良好な品質の結晶成長が難しい。またGaAs基板はSiとの熱膨張係数差も大きい。

そこで我々はInP基板に着目した。InP基板は赤外領域での透過率が高い上、表1(a)、(b)にまとめたようにGaSbとの格子定数差がGaAsと比較して小さく、かつGaSbやGaAsよりもSiとの熱膨張係数差が小さいという利点がある。本論文では、InP基板上に高品質のInAs/GaSb超格子が得られることを示し、かつその超格子を用いて赤外センサを作製した結果を報告する。

表1 GaSb、GaAs、InPの物性定数

(a) 格子定数

|      | 格子定数(Å) | GaSbとの<br>格子不整合 | 参考文献 |
|------|---------|-----------------|------|
| GaSb | 6.096   | -               | [12] |
| GaAs | 5.653   | 7.8%            | [12] |
| InP  | 5.870   | 3.9%            | [12] |

(b) 熱膨張係数

|      | 熱膨張係数<br>( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) | 参考文献 |
|------|---------------------------------------|------|
| Si   | 3.34                                  | [13] |
| GaSb | 7.74                                  | [12] |
| GaAs | 6.86                                  | [12] |
| InP  | 4.75                                  | [12] |

## 2. 実験

まず最初に、InP基板の赤外領域での吸収係数を調べた。図2に各種基板の吸収係数スペクトルを示す。p型のアンドープGaSb基板やn型のTeドープGaSb基板と比べて、高抵抗のFeドープInP基板は波長3~12 μmの広い範囲で小さい吸収係数を示した。自由キャリアによる吸収が少ないためと考えられる。そこで本研究では、FeドープInP基板を使用することにした。

結晶成長には分子線エピタキシー (Molecular beam epitaxy) 法を用いた。InとGaはクヌーセンセルを用いて供給した。AsとSbの供給にはバルブクラッカーセルを用い、クラック温度はAsは600°C、Sbは800°Cとした。

本研究では、3種類の構造の結晶を成長し、評価を行った。一つ目はGaSbである。GaSbはInP基板とInAs/GaSb超格子の間のバッファ層として用いるが、InPとGaSbの格子不整合がGaSbの結晶性に与える影響を調べることを目的としたものである。面方位(100)のFeドープInP基板を成長室に投入した後、Asを照射しつつ昇温してサーマルクリーニングを施し、表面の酸化膜を除去した<sup>(14)</sup>。その後、表面平坦化のために厚さ0.15 μmのIn<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As層を

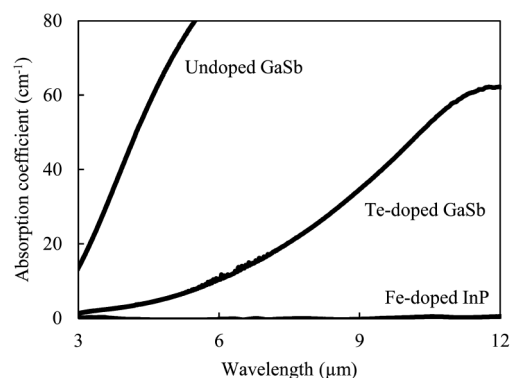


図2 各種基板の吸収係数スペクトル

成長した。続けてGaSb層を成長した。

二つ目はInAs/GaSb超格子である。前述と同じ手順で面方位(100)のFeドープInP基板上にIn<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As層とGaSbバッファ層を順番に成長した後、InAs/GaSb超格子を成長した。厚さ3.5 nmのInAsと2.1 nmのGaSbを交互に50ペア成長した。成長速度はGaSb、InAsともに0.55 μm/hとした。結晶品質の比較対象として、GaSb基板にもInAs/GaSb超格子を成長した。面方位(100)のアンドープGaSb基板上に厚さ0.15 μmのGaSbバッファ層を成長した後、同じ構造の超格子を成長した。

三つ目はセンサ用結晶である。前述のInP基板上InAs/GaSb超格子の成長法と同じ方法で厚さ3.6 nmのInAsと2.1 nmのGaSbを交互に100ペア積層した超格子を成長した。pin構造とするため、GaSbバッファ層にBeをドープしてp型とし、最初の30ペアの超格子のGaSbにもBeをドープした。また、最後の30ペアの超格子のInAsにSiをドープするとともに、超格子の上に厚さ20 nmのSiドープn型InAsからなるキャップ層を成長した。中間の40ペアの超格子はアンドープとした。成長速度はGaSb、InAsともに前述と同じである。p型GaSbバッファ層の厚さは4.5 μmとした。次節で述べるようにGaSbバッファ層が厚いほど超格子の結晶品質が優れていることが判明したためである。比較のため、面方位(100)のTeドープGaSb基板に厚さ0.5 μmのBeドープp型GaSbバッファ層を成長した後、同じ構造の100ペアの超格子とSiドープn型InAsキャップ層を成長した試料も作製した。

結晶品質の評価は、光学顕微鏡観察、X線回折(X-ray diffraction; XRD)、透過型電子顕微鏡(Transmission electron microscopy; TEM)による断面観察、フォトルミネッセンス(Photoluminescence; PL)で行った。

センサの構造を図3に示す。まず結晶にウェットエッチングを施して、円形のメサ構造を形成すると同時にp型GaSbバッファ層を露出させた。メサ構造の直径は30~920 μmで変化させた。エッチングマスクにSiN膜を用い、

エッチング液にはリン酸、クエン酸、過酸化水素水、水の混合溶液を用いた。メサ側壁にはプラズマ化学気相堆積法にてSiO<sub>2</sub>からなる保護膜を形成した。メサ頂上と露出したバッファ層にTi/Pt/Auからなるn型電極およびp型電極をそれぞれ蒸着法で形成した。同時にGaSb基板上センサ用結晶にも加工を施し、センサを作製してInP基板上センサの特性と比較した。

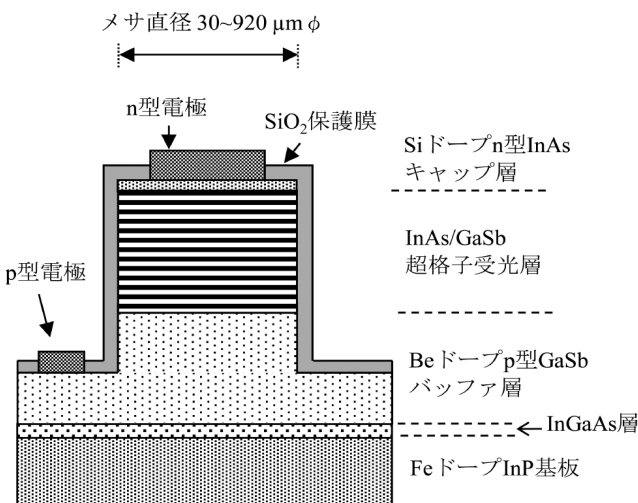


図3 InP基板上センサの構造

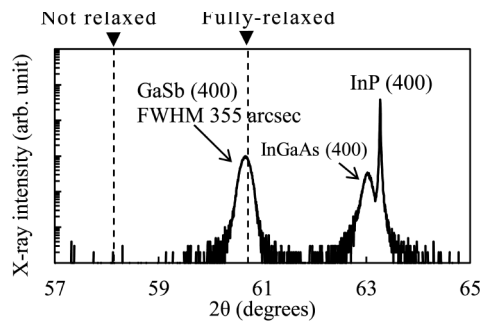
### 3. 実験結果

#### 3-1 InP基板上GaSbエピの評価

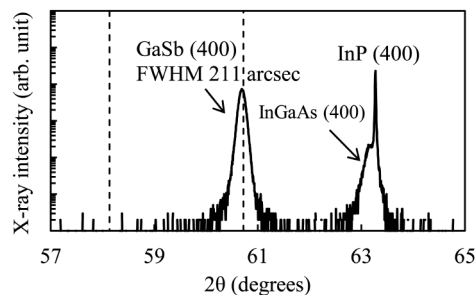
厚さの異なる2種類のGaSbをエピ成長し、特性を比較した。厚さは0.5 μm、2 μmとした。XRDで得られた回折曲線を図4に示す。GaSb (400)はブロードだが単一の回折ピークを示した。図中の点線は完全に格子緩和したGaSbおよび格子緩和なしに成長したGaSbのピーク位置を表す。いずれのGaSbもほぼ完全に格子緩和していると考えられる。しかし、いずれのGaSbも光学顕微鏡を用いたノルマスキー像レベルでは表面にクロスハッチは観察されなかった(図5)。厚さ2 μmのGaSbの方が回折ピークの半値全幅(Full width at half maximum; FWHM)が狭く、厚く成長するほど結晶品質が改善されると考えられる。

#### 3-2 InP基板上InAs/GaSb超格子の評価

InP基板上に厚さの違うGaSbバッファ層を用いてInAs/GaSb超格子を成長した。X線回折曲線を図6に示す。いずれの超格子も回折ピーク位置がGaSbと一致していた。InAsの格子定数はGaSbよりも小さいためにInAs/GaSb超格子の平均の格子定数はGaSbよりも小さくなり、InAs/GaSb超格子のメインの回折角度はGaSbの高角側に出る。本研究で超格子のメインの回折角度がGaSbバッファ層のそれ

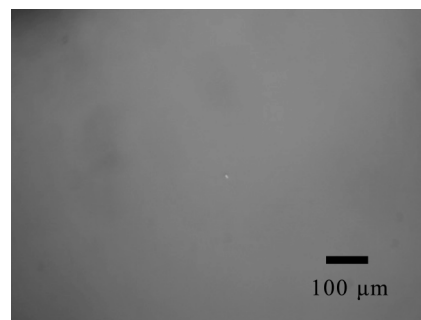


(a) 厚さ 0.5 μm

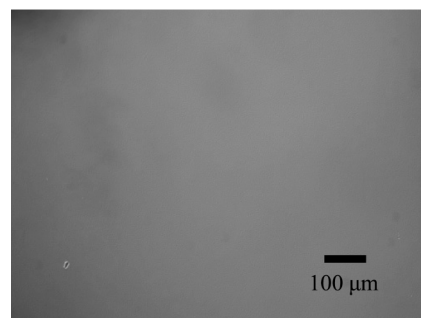


(b) 厚さ 2 μm

図4 InP基板上GaSbのX線回折曲線



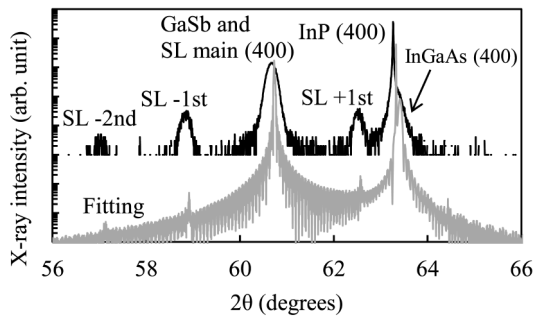
(a) 厚さ 0.5 μm



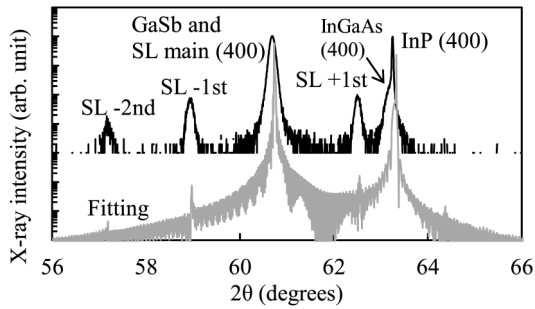
(b) 厚さ 2 μm

図5 InP基板上GaSb表面の光学顕微鏡像

と一致した理由は、InAsにSbが混入してInAsSbとなり、InAsSb/GaSb超格子の平均の格子定数がGaSbに一致したためと考えられる。いずれの超格子も周期構造を示すサテ



(a) GaSb バッファ層 0.5 μm

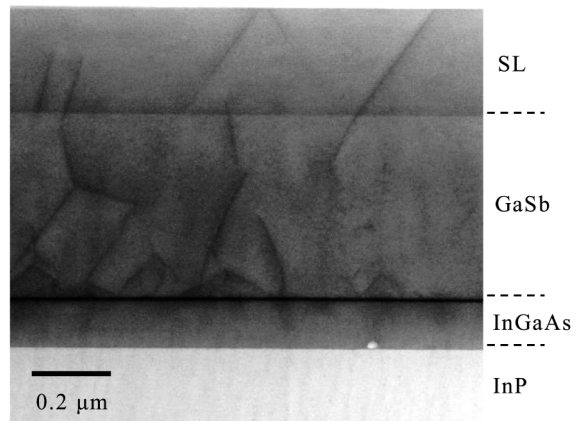


(b) GaSb バッファ層 2.5 μm

図6 InP 基板上 InAs/GaSb 超格子の X 線回折曲線

ライトピークが明確に見られる。フィッティングの結果、GaSb バッファ層厚さが 0.5 μm の超格子は周期が 5.60 nm、2.5 μm のものは 5.72 nm であった。超格子の +1 次のサテライトピークの FWHM は、GaSb バッファ層厚さが 0.5 μm の超格子は 344 arcsec、2.5 μm のものは 175 arcsec で、GaSb バッファ層を厚くした方が狭いという結果を得た。GaSb バッファ層が厚いほど超格子の結晶品質が優れていると考えられる。

次に、InP 基板上超格子の断面 TEM 観察を行った。GaSb バッファ層厚さを 0.5 μm としたものは、超格子内の幅 0.8 μm の範囲に 5 本の貫通転位が見られた (図 7 (a))。貫通転位の線密度は約  $6.3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  である。貫通転位は GaSb バッファ層の成長初期に発生し、超格子まで伝播していることが見て取れる。GaSb バッファ層の上の方の領域では貫通転位が減少している。これは GaAs 基板上 GaSb で報告されているように、成長が進むにつれて貫通転位が打ち消し合うことの効果と思われる<sup>(11)</sup>。厚さ 4.5 μm の GaSb バッファ層を用いて超格子を成長し、数箇所断面 TEM 観察を行った。そのうちの一つを図 7 (b) に示す。合計 40 μm の範囲を観察し、超格子中に伝播した貫通転位が 2 本見られた。貫通転位の線密度は  $5.0 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$  で、前述の厚さ 0.5 μm の GaSb バッファ層を用いた超格子と比較して 2 桁低減している。InP 基板上 InAs/GaSb 超格子は、GaSb バッファ層を厚くした方が貫通転位の伝播が抑えられて品質が改善されると言える。こ



(a) GaSb バッファ層 0.5 μm



(b) GaSb バッファ層 4.5 μm

図7 InP 基板上 InAs/GaSb 超格子の断面 TEM 像

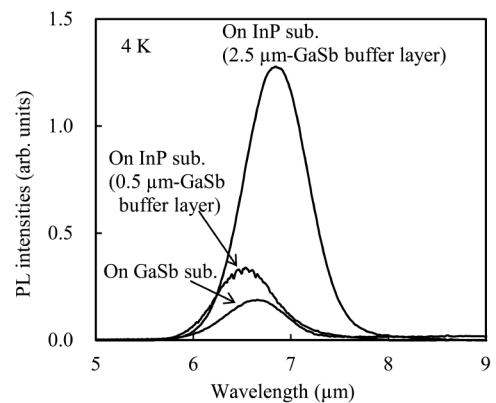


図8 InAs/GaSb 超格子の PL スペクトル

れは 3-1 項で述べた、InP 基板上 GaSb はエピ層の厚みを厚くするほど結晶品質が改善されるという知見と一致する。

GaSb バッファ層の厚さが 0.5 μm および 2.5 μm の各場合の超格子の PL スペクトルを、温度 4 K で測定した (図 8)。

比較のため、GaSb基板上超格子のPLスペクトルも示す。いずれの超格子も波長約6.5 $\mu\text{m}$ で発光した。PLピーク波長がばらついている原因は、超格子の周期の成長バッチ間ばらつきと思われる。InP基板上超格子はいずれもGaSb基板上より強い発光を示した。特にGaSbバッファ層の厚さが2.5  $\mu\text{m}$ の場合は、0.5  $\mu\text{m}$ の場合と比較して超格子の発光ピーク強度が3倍以上と大きい。GaSb基板上超格子より発光強度が大きい理由は不明だが、InP基板上で光学特性の優れた超格子が得られることが分かった。

### 3-3 InP基板上InAs/GaSb超格子を用いたセンサ

InP基板上超格子及びGaSb基板上超格子を用いて作製したセンサの205 K、145 K、112 K、各温度における電流電圧特性を図9に示す。GaSb基板上センサの順方向電流がInP基板上センサより小さい理由は、p型GaSbバッファ層の厚みがエッチングによって0.5  $\mu\text{m}$ よりも薄くなり、バッファ層を横方向に流れる電流の抵抗が高くなったためと考えられる。一方、逆方向領域では、205 KではInP基板上センサの暗電流はGaSb基板上センサとほぼ同等であるが、低温ほど差が顕著になりInP基板上の方が暗電流が大きい。温度112 Kでの電流電圧特性から、InP基板上センサの理想係数を計算すると1.7であった。暗電流は生成・再結合電流が支配的であると考えられる。今回作製したInP基板上センサには3-2項で述べた貫通転位がpin構造を貫通している可能性が高く、この貫通転位が生成・再結合電流増加の原因になっていると考えられる。超格子への貫通転位の伝播を抑制することで、InP基板上センサのさらなる暗電流の低減が期待できる。

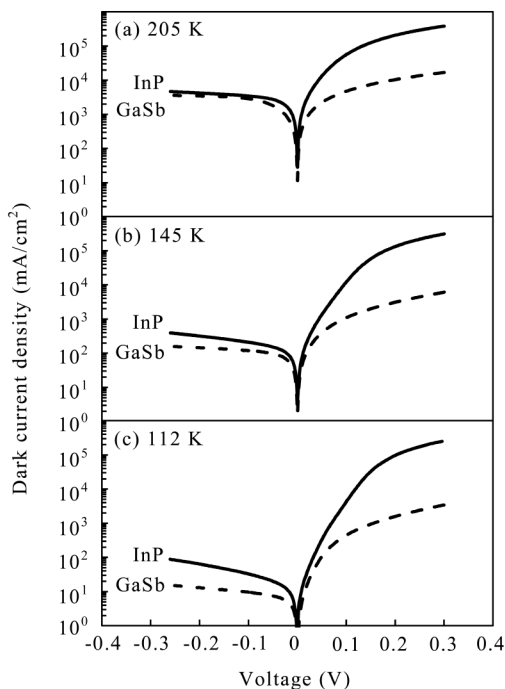


図9 InP基板上、GaSb基板上センサの電流電圧特性

## 4. 結 言

InP基板上InAs/GaSb超格子を用いて、カットオフ波長約6.5  $\mu\text{m}$ の赤外センサを初めて作製した。GaSbバッファ層の厚みを厚くすることで転位密度を低減して、光学特性に優れたエピ成長に成功した。暗電流の改善が必要であるが、超格子への転位の伝播を抑制して暗電流を低減することで、裏面入射型センサへの応用が期待できる。

### 参 考 文 献

- (1) J. B. Rodriguez, C. Cervera, and P. Christol, "A type-II superlattice period with a modified InAs to GaSb thickness ratio for midwavelength infrared photodiode performance improvement," *Appl. Phys. Lett.*, vol.96, no.25, pp.251113 (2010)
- (2) H. Mohseni, E. Michel, J. Sandoen, and M. Razeghi, "Growth and characterization of InAs/GaSb photoconductors for long wavelength infrared range," *Appl. Phys. Lett.*, vol.71, no.10, pp.1403-1405 (1997)
- (3) S. D. Das, S. L. Tan, S. Zhang, Y. L. Goh, C. H. Tan, and J. David, "Development of LWIR photodiodes based on InAs/ GaSb Type II strained layer superlattices," *Proc. of 6th EMRS DTC Technical Conference*, pp.B7 (2009)
- (4) M. Walther, J. Schmitz, R. Rehm, S. Kopta, F. Fuchs, J. Fleißner, W. Cabanskib, J. Ziegler, "Growth of InAs/GaSb short-period superlattices for high-resolution mid-wavelength infrared focal plane array detectors," *J. of Cryst. Growth*, vol.278, pp.156-161 (2005)
- (5) 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, "Mid-IR focal plane array based on type-II InAs/GaSb strain layer superlattice detector with nBn design," *Appl. Phys. Lett.*, vol.92, no.18, pp.183502 (2008)
- (6) P.-Y. Delaunay, B. M. Nguyen, D. Hoffman, M. Razeghi, "320x256 infrared focal plane array based on type II InAs/GaSb superlattice with a 12  $\mu\text{m}$  cutoff wavelength," *Proc. of SPIE*, vol.6542, pp.654204 (2007)
- (7) B.-M. Nguyen, D. Hoffman, E. K. Huang, S. Bogdanov, P.-Y. Delaunay, M. Razeghi, and M. Z. Tidrow, "Demonstration of midinfrared type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes grown on GaAs substrate," *Appl. Phys. Lett.*, vol.94, no.22, pp.223506 (2009)
- (8) J. W. Little, S. P. Svensson, W. A. Beck, A. C. Goldberg, and S. W. Kennerly, T. Hongsmatip, M. Winn, and P. Uppal, "Thin active region, type II superlattice photodiode arrays: Single-pixel and focal plane array characterization," *J. of Appl. Phys.*, vol.101, no.4, pp.044514 (2007)
- (9) M. Razeghi, S. A. Pour, E.K. Huang, G. Chen, A. Haddadi, and B. M. Nguyen, "Type-II InAs/GaSb photodiodes and focal plane arrays aimed at high operating temperatures," *Opto-electron. Rev.*, vol.19, no.3, pp.46-54 (2011)
- (10) B. Brar, and D. Leonard, "Spiral growth of GaSb on (001) GaAs using molecular beam epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol.66, no.4, pp.463-465 (1995)
- (11) P. M. Thibado, B. R. Bennett, M. E. Twigg, B. V. Shanabrook, and L. J. Whitman, "Evolution of GaSb epitaxy on GaAs(001)-c(4x4)," *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol.14, no.3, pp.885-889 (1996)
- (12) I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan, "Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys," *J. of Appl. Phys.*, vol.89, no.11, pp.5815-5875 (2001)
- (13) W. M. Yim, and R. J. Paff, "Thermal expansion of AlN, sapphire, and silicon," *J. of Appl. Phys.*, vol.45, no.3, pp.1456-1457 (1974)

- (14) S. F. Yoon, H. Q. Zheng, P. H. Zhang, K. W. Hah, and G. I. Ng,  
"Molecular beam epitaxial growth of InP using a valved phosphorus  
cracker cell: optimization of electrical, optical and surface  
morphology characteristics," Jpn. J. Appl. Phys., vol.38, part 1,  
no.2B, pp.981-984 (1999)
- 

執筆者

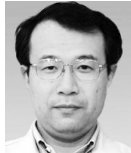
三浦 広平\* : 伝送デバイス研究所 主査  
博士 (工学)



猪口 康博 : 伝送デバイス研究所 グループ長  
博士 (工学)



勝山 造 : 伝送デバイス研究所 部長 工学博士



河村 裕一 : 大阪府立大学大学院 工学研究科  
教授 理学博士



---

\*主執筆者