

# 高精度な第一原理計算手法による InAs/GaSb 超格子のバンド構造の解析

Analysis of InAs/GaSb Superlattice Band Structures by High-Accuracy First-Principle Calculation

大塚 順\*  
Jun Otsuka

加藤 隆志  
Takashi Kato

榊原 寛史  
Hirofumi Sakakibara

小谷 岳生  
Takao Kotani

本研究では、赤外線センサ開発に向けて、第一原理手法のひとつであるハイブリッド準粒子セルフ-コンシステントGW (QSGW) 法をタイプ-II 超格子  $(\text{InAs})_n(\text{GaSb})_n$  ( $n=1, 2, 3$ , および  $4$ ) に適用し、超格子のエネルギーバンドとして信頼性の高い結果を得ることに初めて成功した。算出されたバンドギャップは層数  $n$  の関数として得られ、光ルミネセンス (PL) 法による実験値の  $n$  に対する傾向をよく再現できていることを確認した。また、バンド端アラインメントの実空間分析により、 $n=4$  に対する InAs/GaSb のバンドオフセット (0.5 eV) は X 線光電子分光法による実験値と一致した。

We applied a hybrid quasiparticle self-consistent GW (QSGW) method to a type-II superlattice  $(\text{InAs})_n(\text{GaSb})_n$  ( $n=1, 2, 3$ , and  $4$ ) for infrared sensors and succeeded in the calculation of reliable energy bands. The band gap changes depending on  $n$ , showing the same tendency seen in a photoluminescence experiment. The real-space analysis of core-level band-edge alignment shows that, when  $n=4$ , the band offset of InAs/GaSb is  $\sim 0.5$  eV, which is also consistent with the value obtained in an X-ray photoelectron spectroscopy experiment.

キーワード：中赤外、受光素子、センサ、超格子、第一原理計算

## 1. 緒言

3~14  $\mu\text{m}$  波長帯には多数の分子が振動エネルギーを持っており、有害ガス検知器、暗視カメラ、サーモグラフィなどへの応用を目指して、この波長帯を検出できる中赤外センサの開発が進められている<sup>(1)~(6)</sup>。従来、HgCdTe 製のセンサが用いられてきたが、有害重金属 (水銀、カドミウム)<sup>(7)</sup> の含有や、大型の極低温冷却装置が必要となるなどのマイナス面がある。

これを打開するため、次のような長所を有する InAs/GaSb タイプ-II 超格子が広く注目されるようになった<sup>(8)~(11)</sup>。タイプ-II 超格子は HgCdTe よりキャリアの有効質量が大きく、これによりオージェ再結合が抑制されて理論上暗電流がより小さくなるため、大型の冷却装置が不要になる<sup>(12)</sup>。さらに、カットオフ波長は合金組成ではなく InAs および GaSb 層の厚さによって決まるため<sup>(13)</sup>、エピタキシャル成長条件を制御することで比較的容易に所望のカットオフ波長を実現することができる。

センサ用 InAs/GaSb 超格子の理論的設計には、信頼性の高い第一原理計算を実行し、当該超格子のバンドギャップや有効質量をはじめとするエネルギーバンド構造を決定することが必須である。第一原理計算を活用することで試作回数の低減、物理現象の把握、センサ素子構造の最適化などが期待される。バンドギャップ制御ならびに暗電流低減などの課題を解決して、感度や温度安定性の改善を実現す

るためには、バンド構造の理解は必要不可欠である。

しかしながら、局所密度近似 (LDA) のような標準的な第一原理手法では超格子の合理的なバンド構造は得られない。実際、我々の知る限りにおいては、InAs/GaSb タイプ-II 超格子のエネルギーバンド構造に関する論文は発表されていない。これは LDA のような標準的手法では、この超格子のバンドギャップの計算値がゼロになってしまうからである。

故に、 $k \cdot p$  法<sup>(14)</sup>、経験的擬ポテンシャル法 (EPP)<sup>(15)</sup>、経験的強結合近似 (ETB) 法<sup>(16)</sup> のような経験法がこれまで超格子に対して適用されてきた。しかし、実験値からすべての経験的パラメータを決定することはできないため、たとえばバンドギャップの実験値を再現するようにパラメータを選択したとしても、ブリルアンゾーン (BZ) 全体としてのエネルギーバンドは不確かである。

以上を踏まえ、本研究は準粒子セルフコンシステント GW (QSGW) 法、すなわち QSGW80+SO<sup>(17)</sup> を適用する。ここで、+SO はスピン軌道カップリング (SO) が含まれることを指す。これは、経験的パラメータを用いない、最も正確な第一原理手法のひとつである。QSGW80+SO は計算が大規模となり計算時間が非常に長くなるため、本研究では 16 個の原子から成る  $(\text{InAs})_4(\text{GaSb})_4$  までの小さい超格子のみを扱うものとする。赤外線センサへの実応用を目的として、直接 QSGW80+SO を超格子  $(\text{InAs})_{20}(\text{GaSb})_{20}$  の

実質サイズに適用することはできない。しかしながら、未だエネルギーバンドに関する論文発表がないという現状から、たとえ層数が4以下の小さい超格子を対象とする研究結果でも、今後の研究基盤として有用であることは間違いなく、たとえば光吸収のような物理量を計算する際にもBZ全体のエネルギーバンドは必須となるであろう。今後、本研究結果<sup>(18)</sup>を層数の大きな超格子へと発展させる必要がある。強結合近似 (TB) 法の開発が課題となっており、検討を進める上で本成果は有用と考える。

本論文には、GW近似の手法を超格子構造に初めて適用したシミュレーション解析結果を示す。バンドギャップおよびバンドオフセットが実験値とよく一致することから計算方法の妥当性が確認され、さらにInAs/GaSb超格子のバンド特性について新たな知見が得られたので報告する。

## 2. 実験手法

本研究では、QSGW80+SOを実装したecaljパッケージ<sup>(17), (19), (20)</sup>を用いてエネルギーバンドを計算した。

従来のQSGW+SO法は体系的にバンドギャップを過大算出することが課題である<sup>(17)</sup>。過大算出は、クーロン相互作用の遮蔽効果が過小評価されていることによるもので、これはフォノンと電子-正孔の相互作用による寄与がランダム位相近似<sup>(21)~(23)</sup>において考慮されていないことが理由である。

この問題への解決手段として、ハイブリッドQSGW法 (QSGW80) を活用した。この手法では、80%のQSGW自己エネルギーが20%のLDA交換-相関項と共に用いられる。小谷らによる先行研究<sup>(17)</sup>でQSGW80+SOがInAsおよびGaSbを含む広範囲の材料に対して、~0.1 eVの精度でバンドギャップの実験値を再現することが確認されている。本研究はQSGW80+SOですべての計算を実行した。表現簡素化のため、以降はQSGW80+SOをQSGWと記す。

QSGWの実行には、 $(\text{InAs})_n(\text{GaSb})_n$  ( $n=1, 2, 3$ , および4) に対する正方晶スーパーセルモデルが必要である。ここで、 $(\text{InAs})_n$ はInAs層が $n$ 回繰り返された積層構造を意味する。(001)GaSb基板の上部で超格子が成長するという実験条件を想定し、超格子の面内緩和<sup>(24)</sup>は許容しない。つまり、基板の面内格子定数を4.30 Åに保持するものとする。一方で、積層方向 (平面に直交方向) の格子定数はVan De Walleによる連続体近似<sup>(25), (26)</sup>を用いて決定し、応力と歪みはフックの法則に従うと仮定、バルク結晶の弾性ステイフネス係数を用いた。本研究では零温度の場合を想定し、用いる格子定数は実験結果<sup>(27)</sup>から外挿により求めた。超格子の点群対称性は $C_{2v}$ であり、界面のうちの一つはAs-Ga結合を、他はSb-In結合<sup>(15)</sup>を持つ。例として表1に $n=3$ の超格子に対する規格化座標系を示す。スーパーセルモデルに対する連続体近似の有効性を確認するため、密度汎関数法による平面波擬ポテンシャル基底を用いた第一原理電子

状態計算プログラムパッケージVASP<sup>(28)~(30)</sup>を用い、一般化勾配近似 (GGA) により緩和構造を計算した。積層方向の格子定数および原子配置はGGA計算で緩和した。 $n=3$ での積層方向の格子定数を比較すると、連続体近似とGGAの結果としてそれぞれ18.15および19.06 Åが得られた。この差はGGAが通常、格子定数を過大算出することによって由来する<sup>(31)</sup>。一方で、積層方向の規格化座標は驚くほど一致した (表1のとおり)。このように連続体近似は、本研究に適した格子定数および内部座標を合理的に決定する。

表1 連続体近似とGGA計算により求めた $(\text{InAs})_3(\text{GaSb})_3$ の格子定数と規格化座標

(x, y, z) は参考文献24と同じように定義

$(\text{InAs})_3(\text{GaSb})_3$	連続体近似	GGA
面内の格子定数(Å)	4.30	4.30
平面に直交方向の格子定数(Å)	18.15	19.06
In (x, y, z)	(0.0, 0.0, 0.0000)	(0.0, 0.0, 0.0000)
As (x, y, z)	(0.5, 0.0, 0.0828)	(0.5, 0.0, 0.0826)
In (x, y, z)	(0.5, 0.5, 0.1656)	(0.5, 0.5, 0.1658)
As (x, y, z)	(0.0, 0.5, 0.2485)	(0.0, 0.5, 0.2484)
In (x, y, z)	(0.0, 0.0, 0.3313)	(0.0, 0.0, 0.3310)
As (x, y, z)	(0.5, 0.0, 0.4141)	(0.5, 0.0, 0.4147)
Ga (x, y, z)	(0.5, 0.5, 0.4862)	(0.5, 0.5, 0.4864)
Sb (x, y, z)	(0.0, 0.5, 0.5699)	(0.0, 0.5, 0.5700)
Ga (x, y, z)	(0.0, 0.0, 0.6536)	(0.0, 0.0, 0.6536)
Sb (x, y, z)	(0.5, 0.0, 0.7374)	(0.5, 0.0, 0.7373)
Ga (x, y, z)	(0.5, 0.5, 0.8211)	(0.5, 0.5, 0.8215)
Sb (x, y, z)	(0.0, 0.5, 0.9049)	(0.0, 0.5, 0.9041)

## 3. 結果および考察

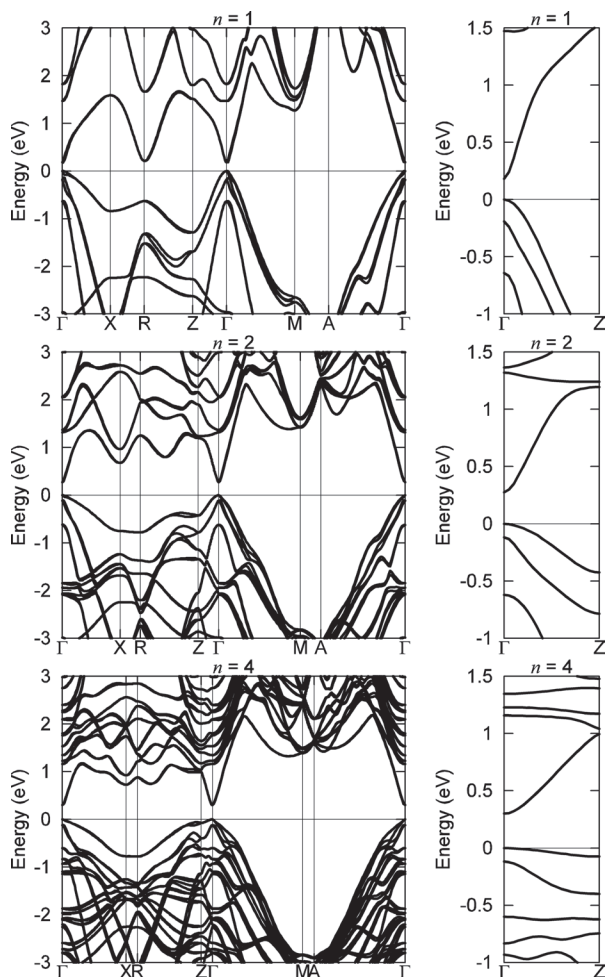
バンド構造はセクション3-1に、実空間解析はセクション3-2にてそれぞれ説明し、バンド端アラインメント、価電子帯上端 (VBM) および伝導帯下端 (CBM) における波動関数を示す。この解析は本QSGW計算の検証に有用であるばかりでなく、QSGWに基づき大規模な系<sup>(32)</sup>に応用可能な信頼性の高いTB法を開発するための知見を与える。

### 3-1 バンド構造、バンドギャップ、有効質量

#### (1) バンド構造

QSGWを用い、 $n=1, 2$ , および4における $(\text{InAs})_n(\text{GaSb})_n$ のバンド構造の計算結果を図1に示す。第一BZは、 $n$ 値の増大に伴い、z-方向に沿ったバンドが折り畳まれている。 $n=1$ の場合を除き、 $\Gamma$ 点でVBMとCBMが発生しており直接ギャップが確認された。 $n=1$ の場合は、R点にCBMがあり、ここではエネルギーが $\Gamma$ 点よりも30 meV低い。 $n=4$ では、CBM/VBM近辺に複数のバンドがあり、それらは $\Gamma$ -Z線に沿って他のバンドとは明らかに分離していることを確認した。これは、他の方向では分離していない、ミニバンド構造と呼ばれるものである。バンド構

造が電子／正孔の再結合を決定づけるが、オージェ過程<sup>(33)</sup>により生成されるキャリアと関係する可能性がある。暗電流を低減するにはミニバンドを他のバンドから完全に分離する方策が考えられる。我々が知る限りではInAs/GaSb超格子のフルバンド構造はこれまでに報告がなく、QSGWにより精緻に予測できることを示した。



エネルギーはVBM

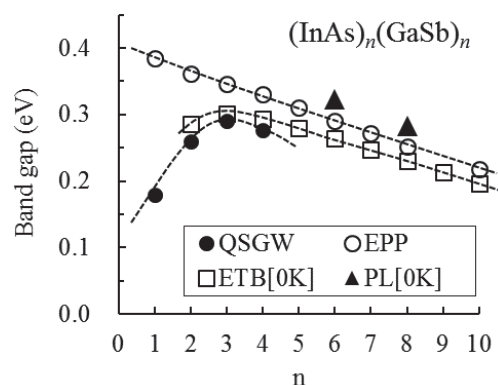
Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics

図1 QSGW80+SO法で計算された(InAs)<sub>n</sub>(GaSb)<sub>n</sub>のバンド構造

## (2) バンドギャップ

$n$ の関数としての $\Gamma$ 点におけるバンドギャップの計算結果を、他の3つの参考文献から入手したデータとともに図2に表示する。これら参考文献のうち二点はEPP法<sup>(15)</sup>およびsp3s\* ETB法<sup>(16)</sup>を用いた理論的研究である。もう一点の参考文献は光ルミネセンス (PL) 法<sup>(34)</sup>を用いた実験的研究である。EPP法およびETB法では $n$ が大きな領域で、 $n$ の増大とともにバンドギャップが単調的に低下している

が、本研究のQSGW法は $n=4$ までであり、 $n$ の大きな領域については議論できないため、ここではQSGWとETBについて比較する。これら二つの手法にはよい一致が確認されており、ともに $n=3$ でバンドギャップが最大となる。したがって、ETB法を大きい $n$ 値に対するQSGWの外挿に用いることが可能であり、図2の結果からPL実験値とよく一致することがわかる。さらに、QSGW値をより正確に再現するために、ETB法の強結合近似パラメータをわずかに修正することもできる。本検討により、QSGW法<sup>(17)</sup>は限界があるものの、センサの吸収波長に直接対応するバンドギャップを $n$ に対する傾向も含めて精度よく予測できる可能性があることが確認された。



Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics

図2 QSGW80+SO法で計算された(InAs)<sub>n</sub>(GaSb)<sub>n</sub>のバンドギャップ

## (3) 有効質量

有効質量はバンドの曲率の逆数に比例する。表2に、 $\Gamma$ -Z線およびR-X線に沿ったCBMでの電子の有効質量 $m_e$ を示す。QSGW+80とETB法の計算値および実験値である。 $n=1$ の場合、得られた値はVegard則に従って得られたものと近い；

$$m_e = [m_e(\text{InAs}) + m_e(\text{InSb}) + m_e(\text{GaSb}) + m_e(\text{GaAs})]/4 = 0.036m_0.$$

ここで、 $m_0$ は電子の静止質量を表す。 $n=2, 3$ , および4の場合の質量 $m_e$ はETB法で得られた値とほぼ等しく、よ

表2 (InAs)<sub>n</sub>(GaSb)<sub>n</sub>およびバルクの有効質量

手法	(InAs) <sub>n</sub> (GaSb) <sub>n</sub> 超格子				バルク	
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	InAs	GaSb
QSGW( $\Gamma$ )	0.037	0.029	0.028	0.029	0.024	0.043
QSGW(R)	0.140	-	-	-	-	-
ETB( $\Gamma$ )	-	0.027	0.025	0.024	-	-
Expt.( $\Gamma$ )	(0.036)	-	-	-	0.026	0.039

単位:  $m_0$

く一致していることがわかる。本手法ではBZ全体のバンド構造の計算によりバンドの曲率を解析できるようになった。その結果、有効質量も高精度に予測できることを確認した。有効質量はTB理論を発展させるのに重要な情報となる。有効質量も計算できる本手法は極めて有用である。

### 3-2 バンド端アライメント及びVBM/CBMでの波動関数

#### (1) バンド端アライメント

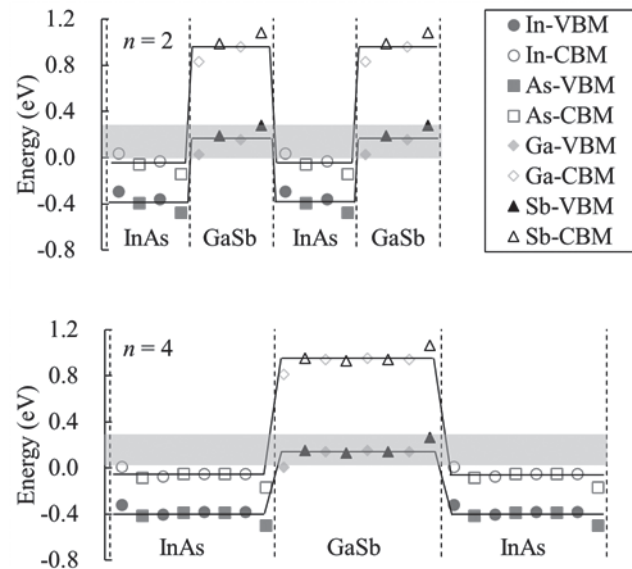
光電子分光法による測定と同様に各原子のコアレベルのエネルギーシフトを評価することができる<sup>(35), (36)</sup>。各原子サイトでのバンド端アライメントを図3に示す。バンド端プロットではInAsのCBMはGaSbのVBMよりも低くなっており、タイプII超格子の特徴が明確に示されている。バンド端プロットに示されているバンドオフセット算出値は $n=4$ の場合に0.51 eVである。 $n=2$ および3の場合は、それぞれ0.58および0.53 eVであり、バンドオフセットが $n$ の関数として急峻に収束していることを示している。これはバンドギャップの場合と対照的である。 $n=4$ のときに0.51 eVという値はX線光電子分光法 (XPS) の実験値  $0.51 \pm 0.1$  eV<sup>(37)</sup>と一致する。また、界面におけるバンドの曲がりに着目すると、Sb-In界面でのスパイク波形およびAs-Ga界面でのV字型ディップを確認した。界面でバンド端の曲りが最大0.15 eVである。 $n=2-4$ の範囲ではエネルギー差の変化はわずかなため、この曲りは1原子層内においてのみ見られ、積層方向に広がっていないとわかる。これらのバンド端アライメントの解析からもQSGW80+SO法を用いることでInAs/GaSbヘテロ結合の電子状態を正し

く予測できていると考えられ、本手法が別のヘテロ接合をもつ構造を設計するときにも有用なアプローチになりうることを示した。

#### (2) 波動関数

図4 (a) と4 (b) は、 $(\text{InAs})_n(\text{GaSb})_n$ 超格子のVBMおよびCBMの波動関数の絶対値の2乗を示す。考察は以下のとおりである。

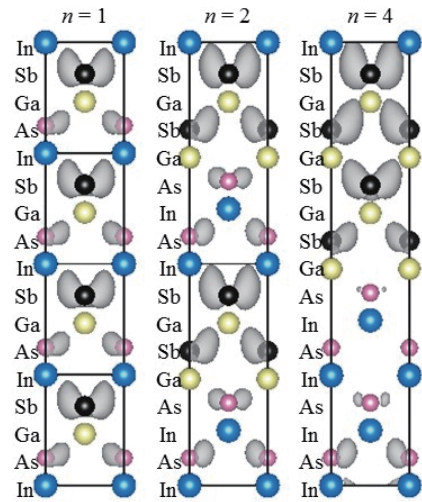
(i) VBM波動関数はアニオン-カチオン結合上に局在しており、結合状態が示されている。VBM波動関数の重みのほとんどは、 $n$ 値が大きい場合GaSb層内にあり、近接するInAs層に僅かに溢れ出ている。実空間で見た場合、InAsバリアをトンネルして、正孔が主にGaSb層に局在するという描像になると考えられる。



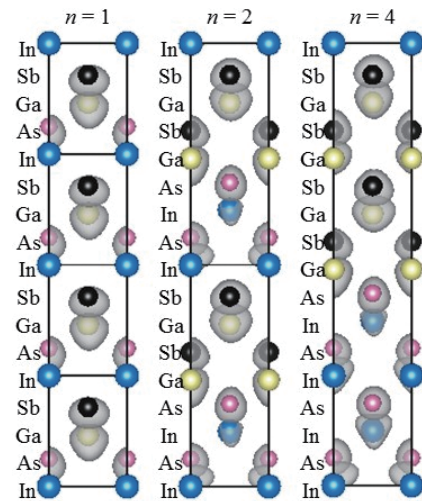
エネルギーはVBM基準  
実線：VBM、CBMに対応  
灰色網掛：禁制帯

Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics

図3  $(\text{InAs})_n(\text{GaSb})_n$  ( $n=2, 4$ ) のバンド端アライメント



(a) VBM



(b) CBM

黒線：スーパーセルの境界

原子：In→青、As→紫、Ga→黄、Sb→黒

Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics

図4  $(\text{InAs})_n(\text{GaSb})_n$ 超格子 ( $n=1, 2, 4$ ) のVBMおよびCBMの波動関数の絶対値の2乗の等数値面

(ii) CBM波動関数は原子サイト近隣に分散しており、InAsおよびGaSbの両層に対しCBMで反結合状態が示されている。この分散は $n$ 値にほとんど依存しない。実空間では、電子の自由運動があると考えられる。

## 4. 結 言

QSGW80+SO法を適用することにより、初めて $(\text{InAs})_n(\text{GaSb})_n$  ( $n \leq 4$ ) 超格子のエネルギーバンド構造(バンドギャップと有効質量)を得ることができた。 $n \leq 4$ ではバンドギャップの計算値がETB法による結果と一致したこと、バンドオフセットの計算値はXPS実験値0.51 eVとよく一致したことから計算の信頼性を確認した。その計算の結果、伝導バンド端の電子の有効質量は $n$ 値にほとんど依存しないことに加えて、VBMおよびCBMの波動関数の局在特性の違いについて新たな知見を得た。QSGW法では小さな超格子しか扱えず、赤外線センサ構造設計のための実用的な計算機マテリアルデザインには、TBモデルのような簡便な計算手法を用いて、大きな超格子構造モデルについて数多くの計算実験を繰り返し実施していく必要がある。今回得られた解析結果は、TBモデルの作成に非常に有用と考える。

## 5. 謝 辞

本研究は九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータを利用して実施しました。感謝いたします。

### 用語集

#### ※1 第一原理計算手法

実験データや経験パラメータを使用せずに電子状態を理論計算する手法。

#### ※2 バンド構造

結晶内で電子が取りうるエネルギー準位を表す帯(バンド)状の構造。

#### ※3 バンドギャップ

バンド構造において電子が存在できない領域。その材料の光吸収波長に対応する。

### 参 考 文 献

- (1) K. Miura, Y. Iguchi, T. Katsuyama, Y. Kawamura, SEIテクニカルレビュー第184号, 55 (2014)
- (2) H. Mohseni, M. Razeghi, G. J. Brown, and Y. S. Park, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2107 (2001)
- (3) H. J. Haugan, F. Szmulowicz, G. J. Brown, and K. Mahalingam, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 5410 (2004)
- (4) P. Delaunay, B.-M. Nguyen, D. Hoffmann, and M. Razeghi, *IEEE J. Quantum Electron.*, **44**, 462 (2008)
- (5) H. J. H. Å, G. J. Brown, F. Szmulowicz, L. Grazulis, W. C. Mitchell, S. Elhamri, and W. D. Mitchell, *J. Cryst. Growth*, **278**, 198 (2005)
- (6) G. J. Sullivan, A. Ikhlassi, J. Bergman, R. E. DeWames, J. R. Waldrop, C. Grein, M. Flatté, K. Mahalingam, H. Yang, M. Zhong, and M. Weimer, *J. Vac. Sci. Technol. B* **23**, 1144 (2005)
- (7) Council of the European Union, *Off. J. Eur. Union*, L 37, 19(2003)
- (8) S. Arikata, T. Kyono, K. Akita, K. Machinaga, H. Inada, Y. Iguchi, SEI TECHNICAL REVIEW No.83, 84 (2016)
- (9) H. Katayama, J. Murooka, M. Naitoh, R. Sato, S. Kawasaki, Y. Itoh, S. Sugano, T. Takekawa, M. Kimata, M. Patrashin, I. Hosako, and Y. Iguchi, *Proc. SPIE*, **8704**, 870416 (2013)
- (10) Y. M. Niquet and C. Delerue, *Phys. Rev. B*, **84**, 075478 (2011)
- (11) J. Wang and Y. Zhang, *J. Appl. Phys.*, **116**, 104101 (2014)
- (12) H. Mohseni, E. Michel, J. Sandoen, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1403 (1997)
- (13) S. Das, S. L. Tan, S. Zhang, Y. L. Goh, C. H. Tan, and J. David, *6th EMRS DTC Tech. Conf.*, 2009, B7
- (14) M. Lestrade, Z. Q. Li, and Z. S. Li, *Opt. Quantum Electron.*, **46**, 1345 (2014)
- (15) P. Piquini, A. Zunger, and R. Magri, *Phys. Rev. B*, **77**, 115314 (2008)
- (16) Y. Wei and M. Razeghi, *Phys. Rev. B*, **69**, 085316 (2004)
- (17) D. Deguchi, K. Sato, H. Kino, and T. Kotani, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 051201 (2016)
- (18) J. Otsuka, T. Kato, H. Sakakibara, and T. Kotani, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 021201 (2017)
- (19) T. Kotani, *J. Phys. Soc. Japan*, **83**, 094711 (2014)
- (20) <https://github.com/tkotani/ecalj> <http://www.lmsuite.org/>
- (21) M. Van Schilfgaarde, T. Kotani, and S. Faleev, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 226402 (2006)
- (22) M. Shishkin, M. Marsman, and G. Kresse, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 246403 (2007)
- (23) S. Botti and M. A. L. Marques, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 226404 (2013)
- (24) W. F. Sun, M. C. Li, and L. C. Zhao, *Superlattices Microstruct.*, **49**, 81 (2011)
- (25) C. G. Van De Walle, *Phys. Rev. B*, **39**, 1871 (1989)
- (26) Y. Wei, 2005 Dr. Thesis Northwestern University
- (27) I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan, *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001)
- (28) G. Kresse and J. Hafner, *Phys. Rev. B*, **48**, 13115 (1993)
- (29) G. Kresse and J. Furthmüller, *Phys. Rev. B*, **54**, 11169 (1996)
- (30) G. Kresse and D. Joubert, *Phys. Rev. B*, **59**, 1758 (1999)
- (31) P. Haas, F. Tran, and P. Blaha, *Phys. Rev. B*, **79**, 085104 (2009)
- (32) A. Sawamura, J. Otsuka, T. Kato, and T. Kotani, *in print*.
- (33) Y. Kamakura, T. Kotani, K. Konaga, N. Minamitani, G. Wakimura, and N. Mori, *IEDM Tech Dig.*, 2015, 5.2.1
- (34) A. P. Ongstad, R. Kaspi, C. E. Moeller, M. L. Tilton, D. M. Gianardi, J. R. Chavez, and G. C. Dente, *J. Appl. Phys.*, **89**, 2185 (2001)
- (35) S. P. Kowalczyk, J. T. Cheung, E. A. Kraut, and R. W. Grant, *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 1605 (1986)
- (36) T. M. Duc, C. Hsu, and J. P. Faurie, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 1127 (1987)
- (37) G. J. Gualtieri, G. P. Schwartz, R. G. Nuzzo, R. J. Malik, and J. F. Walker, *J. Appl. Phys.*, **61**, 5337 (1987)

執筆 者

---

大塚 順\* : 解析技術研究センター 主査



加藤 隆志 : 伝送デバイス研究所 主幹  
工学博士



神原 寛史 : 鳥取大学大学院工学研究科 助教  
理学博士



小谷 岳生 : 鳥取大学大学院工学研究科 教授  
理学博士



---

\*主執筆者