窒化物半導体による青色レーザーおよび光電変換素子の現状と展望

竹内 哲也¹, 岩谷 素顕¹, 上山 智¹, 赤崎 勇^{1,2}

¹名城大学 理工学部 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

²名古屋大学 赤崎記念研究センター (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

Status and Prospects of GaN-Based Blue Lasers and Photo Detectors

Tetsuya TAKEUCHI,¹ Motoaki IWAYA,¹ Satoshi KAMIYAMA,¹ and Isamu AKASAKI^{1,2}

¹Faculty of Science and Technology, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya 468-8502

²Akasaki Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601

(Received August 10, 2018)

This paper describes the status and prospects of GaN-based blue laser diodes and solar cells in terms of using optical wireless power transmission systems. Reported values of the power conversion efficiency, which is one of the most important characteristics of the emitters and the detectors in the systems, were summarized. These are the reported values: about 40% for blue edge-emitting laser diodes, less than 10% for blue vertical-cavity surface-emitting lasers, and about 30% for solar cells at 390–400 nm wavelength. Since optical wireless power transmission with blue lasers is beginning to attract attention, device developments towards such an application will be pursued.

Key Words: GaN, Laser diode, Solar cell, Efficiency, Wireless power transmission

1. はじめに

近年、光を用いた無線給電が注目されており¹⁾、窒化物半導体による青色レーザーと受光素子を用いた無線給電に関する報告もなされた²⁾。本稿では、給電技術として重要な要素であるエネルギー変換効率に着目し、端面発光型と近年進展の著しい面発光型の青色レーザー、さらに、窒化物半導体受光素子のひとつである太陽電池に関して、その現状と展望について紹介する。

2. 窒化物半導体による青色レーザー

2.1 端面発光型

電流注入による窒化物半導体からの誘導放出が1995年に実現され³⁾、翌年、レーザー発振が実現した⁴⁾。それ以来、20年以上が経過し、波長域拡大、高出力化、高効率化が着実に進んでいる。現在では、波長約460 nmにおいて、光出力5 W以上、エネルギー変換効率(Power Conversion Efficiency: PCE)約40%という値が複数の研究機関から報告されている⁵⁻⁷⁾。しきい値電流密度も1 kA/cm²以下と良好な値が実現されている。上記を実現する詳細な素子層構造は明らかにされていないが、ITO電極利用による素子抵抗や内部損失の低減(1 cm⁻¹未満)が報告されている⁷⁾。

一般的に高効率半導体レーザーを実現するためには、

①高い注入効率、②高い光閉じ込め係数、③低い内部損失の三つが重要である。ここで、先行しているGaAs系高効率赤外レーザーの設計思想を眺めてみると、①と③を優先するアプローチが採用され、970 nmで動作するInGaAs端面レーザーで73%のPCEが実現されている⁸⁾。比較的低いドーピングにて、高い注入効率(96%)、低い内部損失(～1.5 cm⁻¹)、さらには低い素子抵抗(微分抵抗3.3 mΩ)を実現したと記載されている。この赤外レーザーでのPCEの値に比べ、上述した窒化物半導体青色レーザーのPCEが低い値で留まっている要因は、高い注入効率と低い内部損失の両立、それに加えて低い素子抵抗の実現が困難であるためと考えられる。ワイドギャップ材料では、キャリア濃度が低く、移動度も低い。それゆえ、窒化物半導体において、低い内部損失を求めて低いドーピング濃度を用いると、キャリア注入や素子抵抗の面で大きなデメリットになると思われる。青色レーザーのPCEも赤外に比べ低い値に留まっている(45%)⁹⁾ことも上述した点が理由のひとつになっていると推測される。さらに、駆動電圧の面では、c面窒化物半導特有の自発・ピエゾ分極による内蔵電位増加も解決すべき課題と考えられる。すなわち、今後もPCEのゆるやかな改善は期待されるものの、赤外レーザーと同等の値まで到達し得るかどうか懸念される。

これに対して我々は、①と②を優先するアプローチに青色レーザー高効率化の可能性があるのでないかと考

えている。特に、②の高い光閉じ込め係数実現のために、GaNナノワイヤ周囲にGaInN量子井戸を形成させた量子殻活性層^{10,11)}や、低屈折率AlInNクラッド層¹²⁾などの要素構造の検討を進めている。通常の半導体レーザーでは、光閉じ込め係数は数%であるが、3次元的な構造である量子殻構造では、6.5-9.0%になる可能性が理論検討により見積もられている。また、AlInNクラッド層では、GaNに格子整合しつつ、大きな比屈折率差が得られ、赤外材料で良く知られた、GaAs活性層に対するAlGaAsクラッド層、あるいはInGaAsP活性層に対するInPクラッド層に匹敵する比屈折率差が実現する。特に、窒化物半導体において長波長領域である緑色領域にて、従来のAlGaInクラッド層に対して約5倍の比屈折率差を実現できることが報告されている¹³⁾。このAlInNは、後述するように結晶成長が困難であったが、GaNとの多層膜構造を用いる¹⁴⁾、あるいは結晶成長条件の最適化¹²⁾を進めることで、高性能素子に要求される高品質AlInN結晶が作製され始めている。今後は、こうした新しい要素構造を青色レーザーに適用し、その効果を検証するとともに、赤外レーザー並みのPCEを実現するための方策を明確にしていく必要がある。

2.2 面発光型

電流注入による窒化物半導体面発光レーザーの実現は、2008年であり、端面発光型の実現から12年を要した^{15,16)}。この最大の理由は縦型共振器の形成、すなわち窒化物半導体による高品質多層膜反射鏡(Distributed Bragg Reflector: DBR)の形成が困難だったからであろう。Higuchiらは、上下共に誘電体DBRを利用することで室温連続動作¹⁵⁾を、Luらは、AlN/GaN DBRを下部DBRに利用することで、77 Kでの連続動作¹⁶⁾をそれぞれ初めて実現した。上下共に誘電体DBRを用いると、高反射率を有するDBR自体は容易に形成できる一方、縦型共振器を形成するために、基板を剥離する煩雑な工程が必要になる。一方、半導体によるDBRでは、それ自体の結晶成長が困難である一方、一旦良好なDBRが形成できれば、引き続き活性層を含む共振器まで容易に形成可能である。それぞれメリットとデメリットが対比する関係になっている。

このような状況下で、Cosendeyらは、AlInNとGaNを用いて多層膜反射鏡を形成し、室温パルス発振を実現させた¹⁷⁾。この構造では、AlInNとGaNが格子整合するため、赤外面発光レーザーに用いられる格子整合AlAs/GaAs DBRと同等の高い結晶性の可能性を有する。一方で、AlInNの結晶成長では、In取り込みのため、GaNN

と同様の800°C程度まで成長温度を下げなければならず、高品質結晶を得ることが困難であった。従来、低温成長によるマイグレーション低下を補うため、GaInNと同様、0.2 $\mu\text{m/h}$ 以下の低い成長速度を使用する必要があった。一方で、この低い成長速度は、数 μm 厚を必要とするDBR形成には極めて不利であった。そこで、我々は、AlInNに対する成長パラメータを系統的に検討した結果、成長温度を50°C程度上昇させることで、成長速度が0.5 $\mu\text{m/h}$ 以上であっても良好な表面、かつ結晶性を有するAlInNが成長できることを見出した¹⁸⁾。この成長条件を利用して40ペアのAlInN/GaN DBRを形成したところ、設計波長410 nmで99.9%、520 nmで99.4%の反射率が実現した。さらに、報告されている屈折率値を用いた理論計算と極めて良く一致することもわかった。そして、このAlInN/GaN DBRを用いたGaInN面発光レーザーを作製した結果、最大光出力として計5.2 mW(上部誘電体DBRから1.0 mW、下部AlInN/GaN DBRから4.2 mW)を実現した¹⁹⁾。しきい値電流密度は、10.3 kA/cm^2 であり、微分抵抗は140 Ω であった。一方で、外部微分量子効率13%、PCEは5%であり、依然として改善の余地は大きい。

このPCEを改善するためには、しきい値電流密度の低減、外部微分量子効率の増大、そして素子抵抗の低減が必要である。最初の二つの改善に向けて、現状の窒化物半導体面発光レーザーでは、内部損失の低減が鍵を握っていると考えられる。窒化物半導体面発光レーザーでは、赤外面発光レーザーで用いられている酸化AlGaAs(低屈折率材料)による電流狭窄構造がなく、それによってもたらされる光導波構造も存在しない。Hashemiらは、窒化物半導体面発光レーザーで主流となっているSiO₂開口とITO電極の組み合わせによる電流狭窄構造では、意図せず反導波構造が形成され、横方向への光の散逸による損失が40 cm^{-1} 程度存在することを理論計算により予測した。また、段差構造や埋め込み構造により、疑似的な屈折率段差による導波構造が実現できることも提案した²⁰⁾。これまでに、光導波構造を形成する試みがいくつか行われており、それをTable 1にまとめる。大きく分けて、誘電体などにより屈折率段差を形成する手法²¹⁻²³⁾と、イオン打ち込みにより屈折率段差を形成する手法²⁴⁾が試みられている。これらの手法において、Kuramotoらの埋め込み構造を用いる手法において、最大光出力が6 mW、PCEが7%という良好な素子特性が報告されている²³⁾。現時点では、結晶に直接的なダメージが入らず、かつ物理的段差のない、すなわち光に対する散乱要因の少ない構造が良好な結果をもたらしているように

Table 1 Optical confinement structures in GaN-based VCSELs.

Affiliation	Stanley/Meijo ²³⁾	Meijo Univ. ²²⁾	UCSB ²¹⁾	UCSB ²⁴⁾
Year	2018	2018	2016	2015
Structure	20nm buried SiO ₂	15nm Nb ₂ O ₅ step	30nm air-gap	Al implantation
Refractive index difference (%)	0.26	1.5	2.1	1.8
Light output power (mW)	6	0.88	0.18(pulsed)	0.012(pulsed)

思われる。

最終的に内部損失に関しては、ITO電極による吸収や電流注入のための不純物ドーピングに伴う吸収が課題として残ってくるだろう。我々の簡単な計算によると、それぞれ 10 cm^{-1} 未満の値が見積もられる。赤外面発光レーザーでその有用性が実証されている、埋め込みトンネル接合による電流狭窄構造や、光強度分布を考慮した不純物変調ドーピングによりさらなる損失低減が可能と考えられる。

続いて、素子抵抗の低減に関して述べる。窒化物半導体は抵抗率が高いため、素子抵抗は高くなりやすい。さらに、半導体DBRであっても不純物を添加しない場合は絶縁性であるため、いわゆるイントラキャビティコンタクトとなり、Fig. 1(a)の赤線が示す横方向への電流経路によって素子抵抗が高くなる。ゆえに、赤外面発光レーザーで広く用いられている、Fig. 1(b)に示す導電性DBRによる縦方向電流注入の実現が強く望まれる。我々は、窒化物特有の界面に生じる自発分極の影響を考慮したSi変調ドーピングを上述したAlInN/GaN DBRに施し^{14,25)}、さらにごく最近、AlAs/GaAs DBRでも用いられている組成傾斜層を界面に設けることで、再現性良く導電性AlInN/GaN DBRが実現できることを明らかにした。これを下部DBRとして用いることで、Fig. 2に示すように、これまでアンドープDBRの場合には、上述したように $140\text{ }\Omega$ であった素子抵抗を $90\text{ }\Omega$ まで低減させることができた²⁶⁾。光出力も、現時点で上述した最大出力には及ばないものの、 1 mW 以上の光出力が実現しており、さらなる最適化により高出力と低抵抗の両立が可能と考えられる。

3. 窒化物半導体による太陽電池

窒化物半導体を用いた受光素子としては、太陽電池が研究対象の中心になっている。従来の化合物半導体では

Fig. 1 Current paths in GaN-based VCSELs with (a) insulating DBR and (b) conducting DBR.

Fig. 2 I-L-V characteristics of a GaN-based VCSEL with a conducting DBR.

対応できない短波長領域を担う材料として、さらに近赤外にバンド端を有するInNまでの全組成域GaInN利用を踏まえた新しい太陽電池としての可能性が検討されている。この窒化物半導体太陽電池の動向と課題は、文献²⁷⁾に詳しくまとめられている。ここでは、その窒化物半導体太陽電池の現状と、光無線給電用受光素子としての課題について述べる。

代表的な窒化物半導体太陽電池の構造(吸収層)と特性をTable 2にまとめる²⁸⁻³²⁾。太陽電池のエネルギー変換効率として約3%が報告されている。外部量子効率としては、 390 nm 付近にて約60%を超える高い値が報告されている。これらの構造では、 60 nm GaInN単層や、数10周期の 3 nm GaInN井戸層が利用されており、電極での反射率などを考慮すると90%を超える内部量子効率を実現していると考えられる。ゆえに、無線給電用受光素子としては、波長 $390\text{--}400\text{ nm}$ を設計波長とすることで、この高い内部量子効率を利用可能である。最終的に外部量子効率をさらに向上させるために、GaInN吸収層をさらに厚くする、あるいは面発光レーザーと同様にDBRによる共振器構造を用いて吸収領域の実効光路長を長くすることなどが考えられる。

一方で、課題は開放電圧の低下である。Table 2に記載されているように、吸収のピーク波長は 390 nm (3.2 eV) 付近、吸収端波長は 440 nm (2.8 eV) 付近である。このような状況にもかかわらず、得られる開放電圧は 2 V 程度まで低下しており、電圧におけるエネルギー損失が大きい。この要因を明確にし、対策を講じる必要がある。

さらに、光無線給電用受光素子として検討すべき特性として、照射光密度依存性が挙げられる。通常、太陽電池における照射光密度は 100 mW/cm^2 (1 SUN) である。一方、光無線給電用受光素子では、より高い照射光密度が予想される。ここでは、光無線給電における照射光密度を以下のように概算した。 $100\text{ }\mu\text{m}$ ピッチで面発光レーザーを 1 cm 四方に並べると、その中に10000個の面発光レーザーが存在する。各面発光レーザーが 10 mW の光を出射すると、全光出力は 100 W である。仮に、同じサイズの太陽電池でその光を全て受光すると

Table 2 Structures and characteristics of GaN-based solar cells.

Affiliation	Arizona State Univ. ³²⁾	CNRS ³¹⁾	Meijo Univ. ³⁰⁾	UCSB ²⁹⁾	Texas Tech Univ. ²⁸⁾
Year	2018	2016	2011	2011	2010
absorption layer	30-pair 3nm GaInN	60nm GaInN	50-pair 3nm GaInN	60nm GaInN	12-pair 3nm GaInN
PCE (%)	1.85	0.49	2.5 (1.5 suns)	1.57	2.95
External quantum efficiency (%)	65	79	59 (1.5 suns)	72	–
Peak absorption wavelength (nm)	390	387	390	380	–
Absorption edge wavelength (nm)	450	440	440	430	–
Open-circuit voltage (V)	2.2	0.48	1.78 (1.5 suns)	1.89	1.8
Short-circuit current (mA/cm ²)	1.39	2.56	3.08 (1.5 suns)	1.06	2.56
Fill factor (%)	60.52	40	70 (1.5 suns)	78.6	64

なると光密度は100 W/cm²である。この場合、太陽光受光の場合に比べ、3桁も高い値になる。この照射光強度依存性として、我々はITO電極を利用した太陽電池において、光強度を20 W/cm²(200 sun)以上まで増大させることで、解放電圧が2.2 Vまで向上し、太陽電池としてのエネルギー変換効率が4.0%まで改善されることを報告した³³⁾。これらの改善は、光強度増大によるキャリア密度増大に起因しており、他材料系でも同様の報告がある。一方で、照射強度密度が増大(～10 W/cm²)すると、変換効率が大きく低下する例も報告されている²⁾。これは、高い照射強度に伴う素子温度上昇による特性の低下と報告されている。ここまで示した結果は、広いスペクトルを有する疑似太陽光を用いた場合の結果である。今後は、単色光による窒化物半導体受光素子の特性検討とその理解が望まれる。

最後に、上述した青色レーザーと窒化物半導体太陽電池の特性に関する報告値を用いて、光無線給電システムにおけるエネルギー効率を概算する。青色半導体レーザーではPCEが約40%であった。出射された光が、全くロスなく太陽電池に到達し、かつ太陽電池の受光効率において、照射光密度依存性がないと仮定する。この場合、外部量子効率が70%、開放電圧の低下分が65%(2.0 eV/3.1 eV)、さらに、最適動作点を与える曲線因子がおおよそ70%であることから、波長390–400 nmにおける受光側のPCEは約30%と見積られる。よって、システム全体としてのエネルギー効率は、10%程度である。給電システムとしては低い値であり、効率改善が必須である。一方で、無線であること、そして青色光であることの特徴に着目し、海中での無線給電(および通信)に関する議論が注目され始めている[†]。こうした動きに併せて、光無線給電という観点における窒化物半導体素子の研究開発も早々に必要になると思われる。

4. まとめ

本稿では、光無線給電の観点から、青色レーザーと窒化物半導体太陽電池の現状と課題を記載した。エネルギー変換効率の現状は、端面青色レーザーで約40%、面発光型で10%未満である。そして太陽電池の波長390–400 nmの単色光におけるエネルギー変換効率は約30%と見積られる。赤外領域で動作する半導体素子に比べ、低い値である一方、青色レーザーが必要な光無線給電に関する議論も開始された。今後、光無線給電への利用を見据えた検討を進めることで、素子特性の改善が進み、青色領域で動作する素子の可能性がさらに高まることを期待する。

謝 辞

本研究課題の一部は文科省・私立大学研究ブランディング事業(2016–2020)、文科省「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」、日本学術振興会・科研費基盤研究A(15H02019, 17H01055)、新学術領域研究(16H06416)、JST CREST(16815710)の援助によって行われました。

参考文献

- 1) 宮本 智之: O plus E **40** (2018).
- 2) C. D. Santi, M. Meneghini, A. Caria, E. Dogmus, M. Zegaoui, F. Medjdoub, B. Kalinic, T. Cesca, G. Meneghesso, and E. Zanoni: Materials **11** (2018) 153.
- 3) I. Akasaki, H. Amano, S. Sata, H. Sakai, T. Tanaka, and M. Koike: Jpn. J. Appl. Phys. **34** (1995) L1517.
- 4) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) L74.
- 5) S. Masui, Y. Nakatsu, D. Kasahara, and S. Nagahama: Proc. SPIE **10104** (2017) 101041H.
- 6) H. König: Int. Conf. Nitride Semicon. (2017) 12, B.7.2.
- 7) M. Murayama, Y. Nakayama, K. Yamazaki, Y. Hoshina, H.

[†] ALANコンソーシアム, <https://www.jeita.or.jp/japanese/topics/2018/0521.pdf>

- Watanabe, N. Fuutagawa, H. Kawanishi, T. Uemura, and H. Narui: *Phys. Stat. Sol. A* **215** (2018) 1700513.
- 8) M. Kanskär, T. Earles, T. J. Goodnough, E. Stiers, D. Botez, and L. J. Mawst: *Electron. Lett.* **41** (2005) 245.
 - 9) S. Ruder, T. Earles, C. Galstad, M. Klaus, D. Olson, and L. J. Mawst: *CLEO2018* (2018) STu4Q.4.
 - 10) 上山 智, 竹内 哲也, 岩谷 素顕, 赤崎 勇: GaN系量子殻構造の成長と光学特性評価, 日本結晶成長学会誌 **45** (2018).
 - 11) Y. Kurisaki, S. Kamiyama, M. Iwaya, T. Takeuchi, and I. Akasaki: *Phys. Stat. Sol. A* **214** (2017) 1600867.
 - 12) M. Miyoshi, M. Yamanaka, T. Egawa, and T. Takeuchi: *Appl. Phys. Express* **11** (2018) 051001.
 - 13) T. Lermer, M. Schillgalies, A. Breidenassel, D. Queren, C. Eichler, A. Avramescu, J. Müller, W. Scheibenzuber, U. Schwarz, S. Lutgen, *et al.*: *Phys. Stat. Sol. A* **207** (2010) 1328.
 - 14) K. Ikeyama, Y. Kozuka, K. Matsui, S. Yoshida, T. Akagi, Y. Akatsuka, N. Koide, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, *et al.*: *Appl. Phys. Express* **9** (2016) 102101.
 - 15) Y. Higuchi, K. Omae, H. Matsumura, and T. Mukai: *Appl. Phys. Express* **1** (2008) 121102.
 - 16) T. C. Lu, C. C. Kao, H. C. Kuo, G. S. Huang, and S. C. Wang: *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008) 141102.
 - 17) G. Cosendey, A. Castiglia, G. Roszbach, J.-F. Carlin, and N. Grandjean: *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 151113.
 - 18) Y. Kozuka, K. Ikeyama, T. Yasuda, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki: 2014 MRS Fall Meeting, MRSF14-1736-T13-08.R1.
 - 19) T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki: *Rep. Prog. Phys.* **82** (2016) 012502.
 - 20) E. Hashemi, J. Bengtsson, J. Gustavsson, M. Stättin, G. Cosendey, N. Grandjean, and A. Haglund: *Opt. Express* **22** (2014) 411.
 - 21) J. T. Leonard, B. P. Yonkee, D. A. Cohen, L. Megalini, S. Lee, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura: *Appl. Phys. Lett.* **108** (2016) 031111.
 - 22) N. Hayashi, J. Ogimoto, K. Matsui, T. Furuta, T. Akagi, S. Iwayama, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki: *Phys. Stat. Sol. A* **215** (2018) 1700648.
 - 23) M. Kuramoto, S. Kobayashi, T. Akagi, K. Tazawa, K. Tanaka, T. Saito, and T. Takeuchi: *Appl. Phys. Lett.* **112** (2018) 111104.
 - 24) J. T. Leonard, D. A. Cohen, B. P. Yonkee, R. M. Farrell, T. Margalith, S. Lee, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and S. Nakamura: *Appl. Phys. Lett.* **107** (2015) 011102.
 - 25) S. Yoshida, K. Ikeyama, T. Yasuda, T. Furuta, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** (2016) 05FD10.
 - 26) W. Muranaga, T. Akagi, S. Yoshida, Y. Akatsuka, J. Ogimoto, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki: *ISPlasma-2018*, Nagoya, Japan, March 2018.
 - 27) 山本 嵩勇, プイアンアシュラフル G.: 日本真空学会 **55** (2012) 27.
 - 28) R. Dahal, J. Li, K. Aryal, J. Y. Lin, and H. X. Jiang: *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 073115.
 - 29) E. Matioli, C. Neufeld, M. Iza, S. C. Cruz, A. A. Al-Heji, X. Chen, R. M. Farrell, S. Keller, S. DenBaars, U. Mishra, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **98** (2011) 021102.
 - 30) Y. Kuwahara, T. Fujii, T. Sugiyama, D. Iida, Y. Isobe, Y. Fujiyama, Y. Morita, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, *et al.*: *Appl. Phys. Express* **4** (2011) 021001.
 - 31) M. Arif, J.-P. Salvestrini, J. Streque, M. B. Jordan, Y. E. Gmili, S. Sundaram, X. Li, G. Patriarche, P. L. Voss, and A. Ougazzaden: *Appl. Phys. Lett.* **109** (2016) 133507.
 - 32) X. Huang, H. Chen, H. Fu, I. Baranowski, J. Montes, T.-H. Yang, K. Fu, B. P. Gunning, D. D. Koleske, and Y. Zhao: *Appl. Phys. Lett.* **113** (2018) 043501.
 - 33) M. Mori, S. Kondo, S. Yamamoto, T. Nakao, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano: *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** (2013) 08JH02.