テラヘルツ量子カスケードレーザーの進展

平山 秀樹^{1,2}, 寺嶋 亘^{1,2}, 林 宗澤¹

¹理化学研究所・光量子工学研究領域(〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399)

²理化学研究所(〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1)

Recent Progress of Terahertz Quantum Cascade Lasers

Hideki HIRAYAMA^{1,2}, Wataru TERASHIMA^{1,2}, and Tsung-Tse LIN¹

¹RIKEN Center for Advanced Photonics (RAP), 519-1399 Aoba Aramaki, Sendai, Miyagi 980-0845

²RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

(Received May 2, 2016)

Terahertz quantum cascade laser (THz-QCL) is a compact, high output power, narrow linewidth and low cost terahertz laser, and is very attractive for a lot of applications as a practical use terahertz light source. In this report, we demonstrate our recent research activities on the development of high performance THz-QCLs, i.e., realization of higher temperature operation of THz-QCL using an indirect injection scheme QC design, high output power operation of THz-QCLs at 77 K liquid nitrogen temperature and development of unexplored frequency THz-QCLs using nitride semiconductors. Through these studies, we also discuss on the future prospects of THz-QCLs.

Key Words: Terahertz, Quantum-cascade laser, LO-phonon scattering, MBE, Nitride semiconductors

1. はじめに

テラヘルツ量子カスケードレーザー (THz quantum-cascade laser: QCL) は小型, 高出力, 狭線幅, 安価, 連続動作可能なテラヘルツレーザー光源として今後の実用化が期待されている. 既にテラヘルツパラメトリック発振器などを用いて実用化しているテラヘルツ分析装置, 各種透視・非破壊検査用の光源の置き換えとして, また, 携帯用の検査用レーザー光源としての応用が期待されている. テラヘルツ光源は, 郵便物や税関検査などのセキュリティ検査, 食品などの異物混入検査, ICチップ検査など電子産業への応用, 火傷診断, 癌細胞の識別, 虫菌の検査など医療応用, 農作物検査, 構造物内部の検査など, 非常に広範囲の応用が考えられている.

Fig. 1にTHz-QCLの外観写真, 構造模式図, 活性層のバンド図の例を示す. THz-QCLは, 半導体超格子のサブバンド間遷移発光を用いたレーザーである. 発光層の1ユニットは4量子井戸などで構成されており, これを200ユニット程度積層し, トータルの厚さが10 μm 程度の活性領域とする. 超格子活性層に電界を印可し, 量子準位の階段を人工的に作り, 電子を滝の様に流すことによって, 一つの電子が何回も遷移発光を繰り返す. キャリアリサイクリングによる高出力動作が特徴である. テラヘルツ周波数帯では, 半導体のドーピング層は光吸収が大きくて導波路として使えないため, 活性領域の一方または両方に金属を設けた表面プラズモン導波路が用い

られる.

Fig. 2に, 現在までに報告されているTHz-QCLの発振周波数と動作温度の関係を示す. THz-QCLは, 2002年に初めて実現され¹⁾, 現在までに報告されている発振周波数範囲は1.2~5.2 THz^{2,3)}, 最高動作温度は約200 K (3.2 THz)⁴⁾である. また, パルス動作で1 W程度の高出力動作も報告されている⁵⁾. THz-QCLの実用化のためには, 室温発振と周波数の拡大が重要な課題である. 我々は, GaAsおよびGaN系半導体を用いたTHz-QCLの開発に2005年から取り組んでおり, これまでに分子線エピタキシー (MBE) 結晶成長装置を3台導入しTHz-QCLの開発を行ってきた^{6,7)}. Fig. 2に本研究で最近までに達成した実験結果を書き加えた. AlGaAs系QCLの研究では, 2011年に3.7 THzで143 K⁸⁾, 2012年に3.8 THzで150 K⁹⁾の発振に相次いで成功し, さらに, 2013年になって, 低周波領域の世界最高レベルの動作温度における発振 (160 K, 1.9 THz)¹⁰⁾に成功した. また, 未開拓波長 (5~12 THz) のQCLを実現するために, 窒化物半導体QCLの開発を早くから行っており¹¹⁻¹³⁾, 最近, 世界初のレーザー発振を実現した. Fig. 2に同様に, 我々が最近行っているTHz-QCL高性能化へのアプローチを示した. 我々は最近, 「間接注入機構を利用した低周波数QCLの動作高温化」と, 「窒化物半導体を用いた未開拓波長QCLの開発」を行っている. 本稿では, 我々が取り組んでいるTHz-QCL高性能化へのアプローチと今後の展望について紹介する.

Fig. 1 (a) Digital camera image of THz-QCL sample mounted on CuW heat sink, (b) schematic structure and (c) example of conduction band profile and wavefunctions of QC active region of GaAs/AlGaAs THz-QCL.

2. 間接注入機構を用いたTHz-QCLの動作温度の向上

本研究ではTHz-QCLの動作温度の向上を図るために、間接注入機構¹³⁾の導入を行っている。THz-QCLの低周波数側(< 2 THz)の動作は、レーザー発振の準位間隔が4~8 meVと狭くなるにしたがって、電子が発振上下準位の両方に同時に注入され、反転分布が制限される。低周波数QCLで高温動作を得るためには、発振の上位準位に選択的に電子を注入することが重要である。

Fig. 3に、従来までに用いていた共鳴トンネル注入機構(3準位系)と今回用いた間接注入機構(4準位系)の量子

Fig. 2 Current status of operating temperature and lasing frequency of THz-QCL and our approaches for realizing next generation high-performance THz-QCLs.

Fig. 3 Schematic view of quantum well design used for (a) resonant tunneling (RT) injection scheme (three-level system) and (b) indirect injection scheme (four-level system).

構造の特徴を示す。3準位機構は、LOフォノン散乱により発振下位準位の電子を高速に抜き取り、反転分布をアシストする機構である。しかし、注入に関しては通常の共鳴トンネル注入を用いており、発振エネルギー間隔が小さくなると、発振上位準位と下位準位に同時に電子が注入され、反転分布を阻害する。一方、間接注入機構を取り入れた構造では、一段高い準位からLOフォノン散乱を用いて発振上位準位のみを選択的に電子注入を行うことが可能となり、この機構を用いれば、低周波数THz-QCLの高温動作が可能となる^{13,14)}。

Fig. 2に、間接注入を用いた場合に期待されるQCLの動作範囲を書き加えた。間接注入の導入は、特に低周波数QCLの動作温度の向上に効果が期待され、熱的な制限ライン($k_B T$ ライン)以上の動作温度範囲を大きく広げることが期待される。Fig. 2のオレンジ点線ラインで示した動作温度は、厳密な計算によるものではなく、注入準位の電子のエネルギー分布を考慮して発振上位準位への選択的電子注入が行われる様子から大まかに予測したも

のである。我々の結果も含め最近報告されている実験結果も考慮しているが、200 K以上の高温動作に関しては希望的な見方も含まれている。間接注入機構を用いた先行研究(2.4 THzにおける152.5 K発振¹⁵⁾、2.67 THzにおける151 K発振¹⁶⁾から、間接注入を用いても150 K程度で平行線になるとの予測もある。一方、1~2 THz低周波領域で注入機構による制限要因がなくなればもっと高温化が期待されるという見方もある。我々は、温度上昇に伴う注入準位の電子エネルギー広がりによって発振上位準位への注入選択性が変化すると考え、 $k_B T$ ラインに沿って動作温度が上昇すると考えている。

間接注入を用いたTHz-QCLの結果は再現実験の報告が少なく傾向がつかみにくい。我々の結果についても、今後、構造最適化による動作温度の高温化の可能性が十分考えられる。間接注入THz-QCLに関しては、今後、詳細な解析による効果の予測を行う必要がある。

Fig. 4に作製した両面金属導波路THz-QCLの電子顕微鏡(SEM)写真、及び、通常作製している3準位系量子構

(a)

(b)

Fig. 4 (a) Scanning electron microscopy (SEM) image and (b) current-light output (I - L) characteristics of fabricated 3-level design GaAs/AlGaAs THz-QCL with double metal waveguide (DMW) structure.

造を用いたGaAs/AlGaAs THz-QCLのレーザー発振スペクトルおよび電流-電圧(I - V)、電流-光出力(I - L)特性を示す。QCL構造は、MBEによって半絶縁性のGaAs(100)基板上に成長した。初めに $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ エッチングストップ層を250 nm成長させ、さらに $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ /GaAs活性層を、4量子井戸を1周期とし185周期成長させた。一番厚い注入層には $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーピングを行った。活性層は100 nm厚のn-GaAsコンタクト層で挟み込んだ構造とした。導波路層の伝搬損失を低くするために、両面金属(DMW)プラズモン導波路を形成した。

DMW構造は、メタルボンディングと基板リフトオフプロセスなどを用いて形成した。高い熱伝導と低い導波路損失が得られる銅(Cu)をDMWのメタル層に用いた。測定はTHz FT-IRと冷却したSiボロメーターを用い、パルス電流注入において行った。Fig. 4(b)に示す様に、我々は通常レファレンスサンプルとして3.5~3.8 THzの3準位系QCLを作製しており、最高動作温度140 K程度を得ている。

Fig. 5に、今回作製した間接注入型(4準位系)GaAs/Al-GaAs THz-QCLのレーザー発振スペクトルおよび I - V 、 I - L 特性を示す。1.89 THzにおいて最高動作温度160 Kでの発振に成功した。また得られた発振は、周波数が印加バイアス電圧によって切り替わらない安定動作であった。今回得られた動作は、 $k_B T$ ラインの1.8倍という高い動作温度であり、2 THz以下の低周波数QCLにおける最高動作温度を実現した。THz-QCLの高温動作の実現において新しい領域の結果であると考えられる。これまで3準位系の共鳴トンネル注入機構でこのような結果は得られなかったので、間接注入機構は低周波域QCLの高温動作に適した構造であるといえる。

4準位系の間接注入機構では低バイアス印加時に3準位系の構造になり、意図しない高周波域でレーザー発振が起こりやすいという特徴がある。MITのグループは2010年に4準位系の間接注入型THz-QCLで1.8 THzにおいて163 Kの発振を報告したが¹⁴⁾、低バイアス印加時には4 THz付近で発振してしまい、2周波数を行き来する不安定動作

Fig. 5 Current-voltage (I - V) and I - L characteristics of indirect injection scheme (4-level design) GaAs/Al-GaAs THz-QCL with DMW structure.

となった。本研究では、低バイアス印加時の波動関数の重なり積分が小さくなるようにディチューニングし、また、注入準位と発振上位準位のエネルギー差をGaAsのLOフォノンエネルギーである36 meVに近い値にすることで、意図しない高周波でのレーザー発振を阻止している。

3. 実用型高出力THz-QCL開発の現状

THz-QCLの室温発振までにはまだ大きなバリアがあり実現が難しい。本研究では、液体窒素デューワー、もしくは小型スターリング冷凍機に搭載して高出力動作する実用型THz-QCLの作製を試みている。スターリング冷凍機は液体窒素の供給なしに長時間安定動作ができる点で優れている。冷凍機搭載を目的として、70~100 K程度の温度で高出力が得られるTHz-QCLの開発を行っている。

前節までに述べたTHz-QCLの高温動作を追求するためには、光閉込め係数が99%以上と大きくとれるダブルメタル導波路(DMW)構造が優れている。一方、DMW構造では共振器端面における反射が大きくなるため、高出力動作が難しいという問題がある。それに対して、片面金属導波路構造を用いた場合、光閉込め係数は30%程度と低くネットゲインが低くなるため、120 K以上の温度での動作は難しい。一方、DMWの時の様な共振器端面での高反射効果は起こらないため、低温ではむしろ高出力が得られる。

最近、片面金属導波路型GaAs系THz-QCLでリッジ幅を大きくし、また共振器を片面高反射(HR)コートすることによって、温度10 Kで1 Wを超える高出力動作が報告されている⁵⁾。77 Kでも最大400 mW程度が実現されており¹⁷⁾(いずれもパルス動作ピーク出力)、冷凍機搭載型THz-QCLにおいて100 mWクラスの高出力光源の実現が期待されるようになった。我々は、高出力動作を目指した3準位系THz-QCL¹⁸⁾を作製した。

Fig. 6に、作製した片面金属導波路型GaAs/AlGaAs THz-QCLのレーザー発振スペクトルおよびI-V、I-L特性を示す。4.2 THz付近で発振し、温度10 Kにおいてパルス動作ピーク出力248 mWが観測された。また、平均出力は2.2 mWであった。このように低温で200 mW以上の高出力が得られることが確認できた。片面金属導波路型のQCLでは、光閉込め係数が小さいため、80 K以上の温度では急激に出力が低下し最高動作温度は100~120 Kとなる¹⁶⁾。本サンプルでは60 K程度から急激に出力低下し80 Kでは2 mW程度まで出力が減少してしまっており、今後の改善が必要である。レーザー発振準位間の斜め遷移の割合を調節することにより、より高温動作に適したQCLが実現できると考えられ、現在検討中である。

Fig. 7に、本研究で作製した液体窒素デューワー一体型THz-QCLの外観及び内部機構を示す。デューワー内部に角度と位置の調節機能を有する放物面鏡が取り付けられており、レーザー光は出射窓から平行光として取り出すことができる。また、QCLからの光出力を前方にフォーカスするためにQCLチップにSiレンズを取り付けてい

Fig. 6 (a) Lasing spectra and THz camera image and (b) I-V and I-L characteristics of 3-level design GaAs/AlGaAs THz-QCL with single metal plasmon waveguide (SP) structure.

る。QCLチップは8メサを1ユニットとしてCuWヒートシンクに張り付けている。8メサのうち高出力が得られるメサを出力用として用いている。

Fig. 8に、77 Kデューワー搭載QCLからのI-VおよびI-L特性を示す。QCL構造としては、これまで用いてきた3準位系GaAs/AlGaAs系QCLで両面金属導波路構造を用いた。Fig. 8のサンプルでは、ピーク出力2.5 mW、平均出力は2.5 μ Wが得られている。その後、電流のパルス幅と繰り返し周波数を変化させることにより、最高ピーク出力3.1 mW、最高平均出力6.2 μ Wが観測された。

冷凍機搭載型QCLの高出力化は本研究でまだ開発途上であるが、今後は、片面金属導波路型QCLにおける発振準位間遷移の制御と注入層のドーピング濃度の最適化などを行うことで出力は大幅に向上すると考えられ、実用型THz-QCLの実現を可能にしたいと考えている。

4. 窒化物半導体を用いた未踏波長THz-QCLの開発

5-12 THzのQCLはまだ実現されておらず、これらの未開拓波長QCLの実現は大変重要な課題である。本研究では、窒化物半導体の特異な物性パラメータを用いて、QCLの動作周波数領域を飛躍的に広げること検討している。窒化物半導体の電子LOフォノン散乱エネルギーは90 meV程度でGaAsなどに比べ3倍程度大きく、また、伝導帯のバンド不連続値も最大で1.8 eV(GaN/AlNの場

Fig. 7 Schematic image and pictures of liquid nitrogen 77 K dewar type THz-QCL light sources. THz-QCL mesas mounted on heat sink with Si lens and parabolic mirror are located inside the vacuum chamber.

Fig. 8 Lasing spectra, I-V and I-L characteristics of a 3-level design GaAs/AlGaAs THz-QCL with DMW structure measured at 77K using liquid nitrogen dewar.

合)と大きく、GaAs系(最大値: 0.6 eV(InGaAs/AlGaAs))に比べ約3倍大きい。Fig. 9に、これまでのQCLの実現波長領域と、GaN系半導体の導入により実現が期待される周波数領域を示す。GaAsのLOフォノン散乱吸収の影響でこれまで発振が不可能だった領域(5-12 THz領域)は、GaN系半導体を用いることにより可能になり、THz-QCLの周波数帯を3~20 THzに拡張することが期待できる。また、GaAs及びInP基板を用いた中赤外領域のQCLの波長は3~20 μm に限られているが、GaN系半導体を用いれば伝導帯のバンド不連続が大きいので、さらに短波長領

域の1~8 μm 帯のQCLの実現が期待される。つまり、GaN系半導体を用いることにより、従来半導体で不可能だったちょうど間の領域が実現され、広大な波長領域をカバーすることができる。

Fig. 2に同様にGaN系半導体を用いたTHz-QCLの動作温度の予測を青色の点線で示した。これについても厳密な解析に基づくものではなく、希望の見方を含むものである。LOフォノン吸収の周波数帯がGaAs系半導体よりシフトするため20 THz以下の周波数での動作が期待される。また今後、GaN系QCLの量子構造、導波路構造の作製技術が確立すれば、 $k_B T$ ライン付近までの動作温度が可能であると考えられる。

我々は、未開拓周波数QCLの実現を目指しGaN/AlGaIn超格子構造を用いたQCLの作製を行った¹¹⁻¹³⁾。Fig. 10に作製したGaN/AlGaIn系THz-QCLの構造模式図と、GaN系QCL実現のために導入した「純粋3準位系」量子構造の設計について示す。

サファイア基板上に、まず有機金属気相成長(MOCVD)法を用いて高品質AlN/AlGaInバッファ層を製膜し、その後MBE法を用いてn+GaInプラズモン導波路層、GaIn/AlGaIn量子カスケード活性層を製膜した。サファイア基板上の高品質AlNバッファ層は、本研究で並行して行っている「深紫外LED」研究において開発したもので、貫通転位の低減により深紫外270 nm波長帯のAlGaIn量子井戸において60%以上の内部量子効率を実現している。QCLで用いるバンド内遷移発光においても高効率発光が可能であると考えられる。サンプルは、ドライエッチングによりリッジ加工を施し、蒸着により片面金属プラズモン導波路層構造を形成した。

2量子井戸3準位系QCL構造に関しては先行して、A. Wackerら¹⁹⁾(GaAs系QCL)、ならびに安田氏ら^{20,21)}(GaN系QCL)によって提案されている。我々は当初、GaAs系THz-QCLで用いられているのと同様な4量子井戸型を用いてGaN/AlGaIn系QCLを作製したが発振動作には至らなかった。C軸方向に成長されたGaN系半導体では、ピエゾ電界・自然分極による分極が超格子に生じるため、内部電界を考慮した設計を行う必要がある。特に、大きな内部電界に起因し量子準位が縮退しにくいため、縮退が解かれた準位間でダイポールモーメントが発生し、予期しない準位から発光することが問題となる。本研究では、そのような実験失敗の経緯から、我々は「純粋3準位系」量子構造を導入した。無駄な発光準位を排除して設計通りの順位からの発光を得ることにより、GaN系QCLの初めてのレーザー発振を成功した。

本構造は、間接注入機構も同時に取り入れた構造となっている。また、GaN系半導体では、電子-LOフォノン相互作用がGaAsなどに比べて大きく、量子準位のエネルギー広がりが問題となり、その結果、光利得が減少することが指摘されている²¹⁾。それを防ぐために、発振準位間の対角遷移の割合を大きく設計している²¹⁾。

Fig. 11に、作製したGaN/AlGaIn系量子カスケード活性層のX線回折ロックアップカーブと断面透過電子顕微鏡(TEM)像の例を示す。X線回折のサテライトピークを観

Fig. 9 Operating frequency range of GaAs and InP-based THz and mid-infrared (MIR)-QCLs and IR-laser diodes (LDs), and expected frequency range which will be developed by nitride semiconductor QCLs.

Fig. 10 (a) Schematic structure and (b) conduction-band diagram and wavefunctions of "Pure three-level" design GaN/AlGaIn THz-QCL fabricated on AlN/ sapphire substrate.

測することにより、膜厚の絶対精度1%程度を実現している。また断面TEM像に見られるように、原子1層の急峻さで多重超格子構造が形成されている。研究開始当初、AlGaIn系MBE結晶成長においてQCLで必要となる数百周期に及ぶ多重超格子の形成が難しく、通常の成長

Fig. 11 (a) X-ray diffraction (XRD) (0002)-plane 2θ - ω scans and the simulation curve and (b) cross-sectional transmission electron microscopy (TEM) image taken for GaN/AlGaIn QC structures.

では不可能であった。本研究では、独自に考案した「過渡的アニールドロップレット除去法(DETA法)」を用い、原子層平坦な高品質AlGaIn/GaN多重超格子の形成に成

Fig. 12 Lasing spectrum and I-V and I-L characteristics obtained from a GaN/AlGaIn THz-QCL fabricated on AlN/sapphire template measured at 5.2 K.

功している¹¹⁻¹³⁾。また、本研究では最近GaN系QCL層をMOCVDを用いて作製している。

GaN/AlGaIn THz-QCLにパルス電流注入を行い、世界初の窒化物QCLの発振を観測した。Fig. 12にGaN/AlGaIn THz-QCLのレーザー発振スペクトルおよび電流－電圧、光出力特性を示す。本サンプルのQC構造はMOCVDを用いて作製した。これまでの未踏周波数である7 THzでレーザー発振が得られた。レーザー発振は注入電流が1.1～1.5 Aの範囲で得られ、閾値電流密度は0.75 kA/cm²、閾値電圧は27 Vであった。本研究ではMBE法で作製したサンプルも含め5.4～7 THzの領域でGaN系QCLの発振動作を確認している。いずれもGaAs系では実現しなかった周波数領域でありGaN系半導体に特徴的な結果である。現段階の構造では活性層厚が薄く光閉じ込め係数が小さいため、十分なレーザー発振特性が得られないと考えられる。今後は構造を改善することにより、より広範囲な周波数でのレーザー発振と高温動作が可能になると考えられる。

5. まとめ

THz-QCLの高温、高出力動作と周波数の拡大に関する取り組みに関して紹介した。間接注入機構の導入によ

り低周波数QCLにおいて熱的制限ライン($k_B T$ ライン)を1.8倍上回る温度でのレーザー発振を実現し、今後の動作温度の向上に向けて希望の持てる結果が得られた。またGaN系QCLの初めての発振動作を達成し、未開拓周波数である5.4～7 THzのレーザー発振を実現した。今後これらの研究を進めれば、THz-QCLのさらなる動作範囲の拡大が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Lotti, and F. Rossi: *Nature* **417** (2002) 156.
- 2) C. Walther, M. Fiser, G. Scalari, R. Terazzi, N. Hoyler, and J. Faist: *Appl. Phys. Lett.* **91** (2007) 131122.
- 3) C. W. I. Chan, Q. Hu, and J. L. Ren: *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 151108.
- 4) S. Fatholouloumi, E. Dupont, C. W. I. chan, Z. R. Wasilewski, S. R. Laframboise, D. Ban, A. Matyas, C. Jirasek, Q. Hu, and H. C. Liu: *Opt. Express* **20** (2012) 3866.
- 5) L. Li, L. Chen, J. Zhu, J. Freeman, P. Dean, A. Valavanis, A. G. Davies and E. H. Linfield: *Electron. Lett.* **50** (2014) 309.
- 6) 平山 秀樹, 寺嶋 亘, 林 宗澤: *Optronics* **5** (2013) 81.
- 7) 平山 秀樹: *オプトニューズ* **9** (2014) 27.
- 8) T. T. Lin, L. Ying, and H. Hirayama: *Appl. Phys. Express* **5** (2011) 012101.
- 9) T. T. Lin and H. Hirayama: *Phys. Status Solidi (c)* **10** (2013) 1430.
- 10) M. Sasaki, T. T. Lin, and H. Hirayama: *Phys. Status Solidi (c)* **10** (2013) 1448.
- 11) W. Terashima and H. Hirayama: *Proc. SPIE* **8625** (2013) 861516.
- 12) W. Terashima and H. Hirayama: *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 125501.
- 13) W. Terashima and H. Hirayama: *Phys. Status Solidi (a)* **208** (2011) 1187.
- 14) M. Yamanishi, K. Fujita, T. Edamura, and H. Kan: *Opt. Express* **20** (2008) 207408.
- 15) S. G. Razavipour, E. Dupont, S. Fatholouloumi, C. W. I. Chan, M. Lindskog, Z. R. Wasilewski, G. Aers, S. R. Laframboise, A. Wacker, Q. Hu, D. Ban, and H. C. Liu: *J. Appl. Phys.* **113** (2013) 203107.
- 16) S. G. Razavipour, E. Dupont, C. W. Chan, C. Xu, Z. R. Wasilewski, S. R. Laframboise, Q. Hu, and D. Ban: *Appl. Phys. Lett.* **104** (2014) 041111.
- 17) S. Kumar, C. W. I. Chan, Q. Hu, and J. L. Reno: *Nature Phys.* **7** (2012) 166.
- 18) B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu and J. Reno: *Electronics Lett.* **42** (2006).
- 19) A. Wacker: *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 081105.
- 20) H. Yasuda, I. Hosako, and K. Hirakawa: *CLEO 2012 Technical Digest, JW2A.91*, May 2012.
- 21) H. Yasuda, T. Kubis, I. Hosako and K. Hirakawa: *J. Appl. Phys.* **111** (2012) 083105.