

令和元年6月5日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04351

研究課題名(和文) テラヘルツLEDの研究

研究課題名(英文) Research and development on terahertz light emitting diodes

研究代表者

北田 貴弘 (KITADA, Takahiro)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・特任教授

研究者番号：90283738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：半導体多層膜結合共振器への電流注入による赤外二波長レーザー発振とその差周波発生を同一素子内で行ってテラヘルツ光を得る面発光素子「テラヘルツLED」の実現を目的に研究を進めた。GaAs系のヘテロ薄膜を使った結合共振器は、(001)と(113)Bエピウエハの直接接合で作製し、メサ加工や電極形成等の素子プロセスを施して素子を試作した。結合共振器を構成する2つの共振器層の光学的厚さがよく一致した素子は、パルス電流注入により室温で二波長レーザー発振し、その同時性も確かめられた。Ge光伝導検出器を備えたフーリエ分光装置で差周波発生によるテラヘルツ光のスペクトル検出を試みたが、その検出には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ光を利用したイメージング、分光分析、超高速無線通信等の技術は、環境、医療、セキュリティ等を含む様々な分野での活用が期待されているが、その普及促進には小型で取り扱いの容易な光源が欠かせない。本研究のテラヘルツLEDは、電流注入により室温で動作する面発光素子で、一般的な発光ダイオードや垂直共振器面発光レーザーと同様の簡便な光源素子として期待できる。本研究では、動作の基本となる室温での赤外二波長レーザー発振に成功し、差周波発生には必須となる発振の同時性も確かめられた。テラヘルツ光のスペクトル計測にまでは至らなかったが、二波長レーザー発振特性を詳細に評価したことで克服すべき課題点を明確にした。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel kind of terahertz light emitting diodes based on a semiconductor coupled multilayer cavity. The current injection into the device enables two-color lasing in the near-infrared region and its difference-frequency generation (DFG) inside the coupled cavity brings a terahertz emission in one elemental device. The GaAs-based coupled multilayer cavity was fabricated by direct bonding of two epitaxial wafers with (001) and (113)B surface orientations, and it was processed to realize the surface-emitting devices. Two-color lasing of the device was successfully demonstrated by pulsed current injection at room temperature when optical thicknesses of two cavity layers were exactly the same as each other. We also confirmed simultaneous two-color lasing of the device. The terahertz-DFG measurements were performed using a Fourier-transform spectrometer equipped with a cooled Ge photoconductive detector. However, there were no DFG signals in the measured spectra.

研究分野：半導体工学, 結晶工学, 光エレクトロニクス

キーワード：電子デバイス・機器 テラヘルツ/赤外材料・素子 半導体非線形光学デバイス 半導体結合共振器面発光デバイス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

0.1 から 10 THz の周波数領域にあるテラヘルツ光を利用したイメージング、分光分析、超高速無線通信等の技術は、環境、医療、セキュリティを含む様々な分野での活用が期待されている。近年、近赤外のフェムト秒レーザー光を使った発生・検出技術が飛躍的に進展し、その有用性を実証しているが、応用技術の普及促進には小型で取り扱いの容易な光源素子が欠かせない。このため、半導体技術を活かした単色光源の研究開発が活発である。例えば、共鳴トンネルダイオード (RTD) とスロットアンテナによる発振器や、光通信用波長可変レーザーと単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD) を使ったフォトミキサがある。半導体超格子を用いた量子カスケードレーザー (QCL) では、高出力なテラヘルツ光が得られているが、その動作温度は最高でも 200 K 程度である。一方で、中赤外で二波長発振する QCL を使い、その共振器内での差周波発生 (DFG) により室温でテラヘルツ光を得る手法が報告されている。

我々は、GaAs 系のヘテロ薄膜で構成する半導体結合共振器を使った面発光テラヘルツ素子を提案し、その研究開発を進めてきた。半導体結合共振器は、3 つのブラッグ反射多層膜 (DBR 膜) と光学的厚さの等しい 2 つの共振器層で構成され、高反射バンド中央に 2 つの共振器モードを有す。その周波数差は、数 THz の領域にあり、共振器を結合する中央の DBR 膜の積層数で決定づけられる。各モードの電場は、遅い群速度のために共振器層で著しく増大し、かつ空間的重なりも大きい。反転対称性のない方位の基板結晶に結合共振器を作製すると、二次の非線形光学効果により共振器モードの DFG が可能になって、テラヘルツ光を得ることができる。高指数(113)B 基板上に結合共振器を作製し、フェムト秒レーザー光を使った時間領域分光法でテラヘルツ光の発生特性を評価した。その実験結果とシミュレーション結果から、テラヘルツ光の高効率発生には、2 つの共振器層で二次非線形感受率を互いに異なるようにする必要があることがわかった。実効的な二次非線形感受率の値は結晶方位に依存しているため、個別に用意した単一共振器構造のエピウエハを直接接合することで実現できる。実際にウエハ接合で作製した結合共振器に対して時間領域分光測定を行うと、エピタキシャル成長だけで作製した結合共振器よりも、テラヘルツ光強度がモード周波数差付近で著しく増大していることが確認できた。また、一方の共振器層だけに発光媒質となる InGaAs 多重量子井戸 (MQW) を挿入し、pin 構造を組み込んだ結合共振器薄膜をエピタキシャル成長だけで作製した。電極形成等の素子プロセスを施して試作した面発光素子は、電流注入により室温で二波長レーザー発振した。

2. 研究の目的

2 つの共振器モードに利得を与える発光媒質として InGaAs MQW を挿入した pin 構造の単一共振器と、高い二次非線形性が得られる (113)B 基板の単一共振器を個別にエピタキシャル成長し、2 つのエピウエハの直接接合で結合共振器薄膜を作製する。この薄膜構造を使って、近赤外での二波長レーザー発振とその DFG を同一素子内で行うことを原理とする面発光素子“テラヘルツ LED”を実現することを目的とした。電流注入による室温動作、集積容易な面発光型といった特徴をもつ本素子は、一般的な発光ダイオード (LED) や垂直共振器面発光レーザー (VCSEL) と同様の簡便な光源素子として期待できる。以下に具体的項目を示す。

- (1) テラヘルツ LED を作製する基盤技術の確立と電流注入による二波長レーザー発振特性の理解
- (2) DFG によるテラヘルツ光発生には必須となる二波長レーザー発振の同時性の検証
- (3) テラヘルツ光に対応するフーリエ分光測定系の構築と試作素子のテラヘルツ光発生の評価

3. 研究の方法

(1) 図 1 に示す面発光素子を以下の方法で作製した。上部の共振器層にのみ厚さの異なる 2 種類の InGaAs MQW を活性層として導入した。(001)上の MQW の良好な発光特性と(113)B 上の GaAs 薄膜の二次非線形性を活かすため、結合共振器は、(001)エピウエハと(113)B エピウエハの常温表面活性化法による直接接合で作製した。エピウエハは、いずれも固体ソースの分子線エピタキシー法で結晶成長した多層膜構造を有し、共振器となる層の光学的厚さはともに 3/2 波長である。3 つの DBR 膜は GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As 多層膜で構成し、各界面に組成傾斜のある薄い

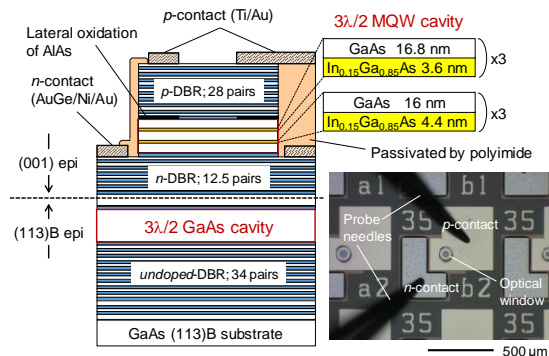


図 1. 素子の断面概略図と実際の表面写真。

Al_xGa_{1-x}As (x = 0-0.9) を挿入することで、バンド不連続による直列抵抗を低減した。互いの共振器層厚が厳密に一致する強結合な構造を得るため、2 つのエピウエハの面内には意図的な膜厚傾斜を付与した。接合界面での光学損失が問題とならないように、2 つの共振器モードとも電場の節となる位置で接合する構造とした。ウエハ接合で作製した結合共振器の(001)側の基板は、機械研磨と選択ウエットエッチングにより完全に除去した。こうして得られた結合共振器ウエハに電流注入のための素子プロセスを施した。ウエットエッチングにより直径 80-100 μm のメサ形状に加工し、水蒸気雰囲気中で加熱して上部共振器直上に挿入した AlAs をメサ側壁から選択的に酸化することで電流狭窄構造を得た。メサ加工で剥き出しとなった n-GaAs 表面に n 電

極 (AuGe/Ni/Au) を真空蒸着膜のリフトオフで形成し、感光性ポリイミドのスピニングでメサ側壁を保護した。電極、光学窓のためのパターニングを行った後、ポリイミド膜の熱硬化処理を施した。最表面に光学窓を有する p 電極 (Ti/Au) を真空蒸着膜のリフトオフで形成し、最後に、コンタクト抵抗を低減するためのアニールを真空雰囲気中で行った。試作した素子の発光特性は、パルス電流源を使って室温で測定した。電流注入は、素子にプローブ針を接触させて行った。InGaAs pin フォトダイオードを使って電流-光出力曲線 ($I-L$) 曲線を測定し、電子冷却型の Si 電荷結合素子 (CCD) を備えた分光器でスペクトルを測定した。

(2) DFG でテラヘルツ光を得るには、二波長レーザー発振が同時に生じている必要がある。モードホッピングで時間的に交互に発振しても、積算して計測するスペクトル中には二波長ピークが観測される。したがって、スペクトル測定だけでは同時性の検証が不十分である。素子からの二波長レーザー光を BBO (beta barium borate) に照射し、同時発振の場合に観測される和周波信号 (SFG) 光の観測を試みた。用いた BBO 結晶の厚みは 1 mm で、タイプ I の位相整合条件を満たすように照射した。透過光に含まれる SFG 光を検出するため、青色バンドパスフィルタを介した後に、二波長光の半波長領域でのスペクトルを測定した。また、二波長発振の動的振る舞いを調べるために、ストリークカメラを使った時間分解測定も行った。

(3) テラヘルツ光に対応するマイケルソン干渉計と冷却型の Ge 光伝導検出器を使ってフーリエ分光測定系を構築し、素子への電流注入で生じるテラヘルツ光のスペクトル計測を試みた。プローブ針を使った電流注入ではフーリエ分光測定を安定的に行うことが難しいため、図 2 の試料ホルダに素子をマウントした。素子プロセスを施したウエハを 2 mm 角のサイズにカットし、二波長発振特性に優れた素子を含むチップを Si 高抵抗基板に光学接着剤でサブマウントした。ワイヤボンディングで配線した後、背面側に Si 半球レンズを機械的に固定することでテラヘルツ光を計測できるようにした。ビームスプリッターとして高抵抗の GaAs 基板あるいは Si 基板を用いたマイケルソン干渉計を自作した。試料から生じるテラヘルツ光は、テラヘルツ光にも対応する平凸レンズを使って平行光とし、ビームスプリッターで 2 つの光路に分けた。各々の光路に配置した Au ミラーで反射させ、合流して生じる干渉信号を液体ヘリウム冷却の Ge 光伝導検出器を使ってロックイン検出した。一方の光路長を機械的な遅延ステージを使って掃引することでインターフェログラムを取得し、これをフーリエ変換することでスペクトルを得た。干渉計はボックス内に収め、窒素雰囲気中での測定ができるようにした (図 3)。



図 2. 試料ホルダにマウントした素子。

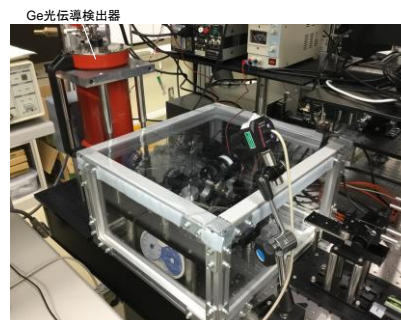


図 3. 自作したフーリエ分光測定装置。

4. 研究成果

(1) 同じウエハ内にある 3 つの素子について、スペクトル測定で得られた二波長発光ピークの積分強度の電流値依存性を図 4 に示す。測定は、パルス幅が 0.5 μ s、繰り返し周波数 1 kHz の条件で行った。ウエハ面内の膜厚分布のため、図 4a から 4c の順に従って上部共振器層の厚さは下部共振器に対して相対的に厚くなっている。上部共振器がやや薄い図 4a の場合、短波モードのみが閾値的振る舞いをするのに対し、やや厚い場合の図 4c では長波モードのみが閾値的振る舞いをみせる。一方、中間の厚さの図 4b の場合では、両モードが閾値的振る舞いをみせる。すなわち、二波長レーザー発振が実現できていることを示す。二波長レーザー発振を示すかどうかは、2 つの共振器層厚の関係に敏感である。共振器層厚の違いが、各モードの電場分布に空間的な偏りをもたらすからである。緻密な膜厚制御が、二波長発振にとって極めて重要である。

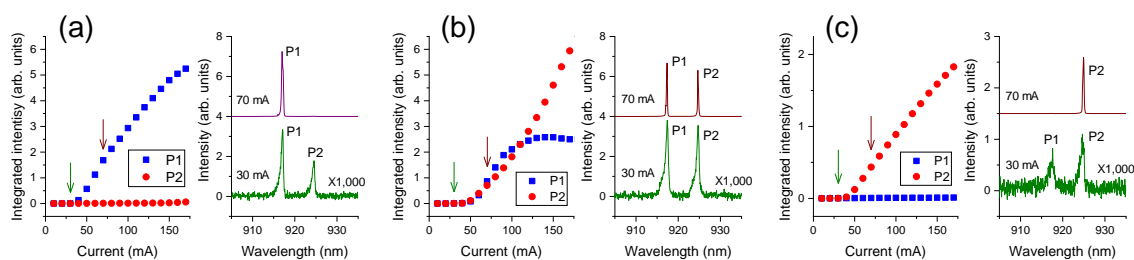


図 4. 3 つの素子について測定した二波長発光ピークの積分強度の注入電流依存性。ウエハ面内での膜厚分布により、(a)から(c)の順で上部共振器層の厚さが相対的に厚くなっている。各図右は、30 mA と 70 mA での発光スペクトル。

図 5a は、異なる 4 つのパルス幅で測定した二波長発振する素子の I - L 曲線である。すべての曲線でレーザ発振が確認できる。電流値が高い領域での出力強度は、パルス幅の増加とともに減少する傾向がみられ、特にパルス幅が $5 \mu\text{s}$ では顕著である。電流注入による素子の発熱が顕著であることを示している。図 5b は、パルス幅が $0.5 \mu\text{s}$ で測定した発光スペクトルの電流値依存性である。すべての電流値で 2 つのピークが明瞭にみられ、その周波数差は 2.7 THz であった。 20 mA と 50 mA の場合のスペクトルを比較すると、レーザ発振に伴う狭線化が明瞭にわかる。 50 mA よりさらに電流を増加させるとスペクトル幅がやや広がる。これは、発熱による長波側へのチャープに起因している。 2 つのピークの発光強度比は電流値に依存している。図 4b に示すように、 100 mA 以上の電流値では短波モードの発光強度が飽和し、長波モードの発光のみが電流値に伴って増大して支配的となった。バンドギャップで決定づけられる InGaAs MQW の利得波長域は、温度上昇に伴って長波側へシフトし、その変化は共振器モード波長よりも大きい。発熱による利得波長域の変化が、強度比の電流値依存性をもたらす一因と考えられる。素子温度が二波長発振に及ぼす影響も調べた。大気雰囲気中で試料ホルダを加熱すると、短波モードの発振が強くなる傾向がみられた。これは、熱勾配によって上部共振器の屈折率が下部よりも小さくなる、すなわち、上部共振器の相対的厚さが薄くなることによるものと考えられる。素子温度で二波長発振の強度比を制御できる可能性があることを示す結果である。

2 つの共振器層で二次非線形感受率の符号が反転した分極反転型の結合共振器を用いると、DFG の効率を最も高められる。分極反転型の構造は、2 つの $(113)\text{B}$ エピウエハを直接接合することで実現できる。また、光学利得を与える InGaAs MQW を $(113)\text{B}$ 面上に形成した場合、振動子強度の異方性によって二波長レーザ発振の偏波制御が期待できる。実際に、2 つの $(113)\text{B}$ エピウエハを直接接合して結合共振器薄膜を作製し、これを使って面発光素子を試作した。試作素子は、パルス電流注入で室温レーザ発振した。しかし、今回は 2 つの共振器層厚の若干のずれにより、長波モードの発振しか得られなかった。偏波特性を調べたところ、二次の非線形光学効果には有利となる $[33\text{-}2]$ 方向に偏波した直線偏光とほぼ見なせる結果であった。

(2) 素子からの二波長レーザ光を BBO 結晶に照射して得られたスペクトルを図 6 に示す。図 6a は青色バンドパスフィルタを介して測定した二波長レーザ光の半波長領域のスペクトルで、図 6b は参照として測定した基本波である二波長レーザ光のスペクトルである。素子は、電流値 290 mA 、パルス幅 $0.5 \mu\text{s}$ 、繰り返し周波数 50 kHz の条件で駆動した。図 6a の半波長スペクトル領域のスペクトルをみると、照射した二波長レーザ光の第二高調波発生 (SHG) による 2 つのピークが明瞭にみられ、その中央には SFG によるピークが存在していることがわかる。二波長発振が同時に生じていることを示す結果である。しかし、観測された SFG 光強度は、SHG 光強度との相対的な関係から期待される値の $1/3$ 程度であった。これは、後述するように、長波モードと短波モードでパルス電流注入時の発振強度の時間プロファイルが異なる、すなわち、二波長発振の時間的重なりが完全に一致しないことによると考えられる。

ストリークカメラを使って測定した二波長レーザ光の時間分解スペクトルマップを図 7 に示す。素子は、電流値 105 mA 、パルス幅 $0.5 \mu\text{s}$ 、繰り返し周波数 1 kHz の条件で駆動した。図 7 をみると、パルス電流注入後の初期は短波モードの発光が支配的で、長波モードの発光はやや遅れて立ち上がっている。この振る舞いも、電流注入による発熱の影響と考えることができる。MQW 活性層へパルス電流が注入されている間、素子は徐々に加熱されている。実際、発熱に伴う屈折率の増大に起因した発光ピークの長波側へのチャープが、2 つのモードともにみられている。この時、 InGaAs MQW の利得波長域は、共振器モードよりも大きく長波側にシフトする。注入初期では、短波モードに対する光学利得は、長波モードよりもやや大きい。この関係は、注入前のモード波長と MQW の利得ピーク波長の関係に依存する。発熱により MQW の利得域が次第に長波側へシフトすると、短波

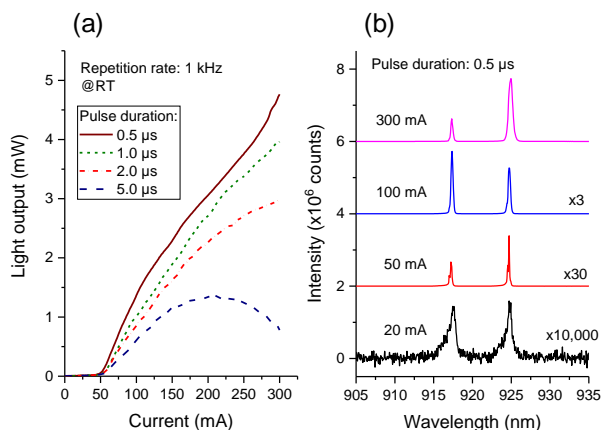


図 5. (a) I - L 曲線のパルス幅依存性. (b) パルス幅 $0.5 \mu\text{s}$ で測定したスペクトルの電流値依存性.

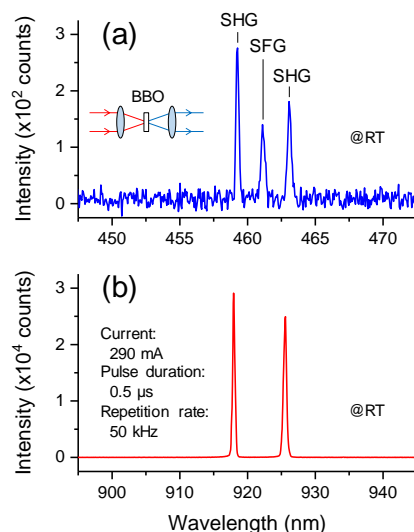


図 6. (a) BBO 結晶に照射して得られた SHG, SFG スペクトル. (b) 照射した二波長光のスペクトル.

モードの発振強度が弱まり、長波モードの発振強度が強まるという現象が起こり得る。電流注入は、MQW 活性層のある上部共振器にのみ行っている。もし、注入パルス時間内に上部共振器から下部共振器へ十分に熱が伝わっていない場合、上部共振器の屈折率が下部共振器よりも大きくなる、すなわち、上部共振器の光学的厚さが相対的に厚くなる。元々は強結合な共振器構造であるため、一方の共振器の屈折率が大きくなった場合でも、両モードともに長波側へシフトする。しかし、上部共振器の光学的厚さが相対的に厚くなった場合、図 4c でもみられたように電場の空間的偏りが生じて長波モードの発振が容易になる。この現象も、二波長発振の同時性を劣化させる要因の一つと思われる。大気雰囲気

中で試料ホルダを加熱して素子温度依存性を評価した。二波長発振の時間的重なりは素子温度に依存し、その振る舞いは薄膜構造中での熱勾配により一応の説明ができる。二波長発振の同時性は、素子の放熱対策と温度制御で大きく改善できると考えている。

(3) 二波長発振する素子についてフーリエ分光測定を行った結果を図 8 に示す。素子は、電流値 300 mA、パルス幅 370 ns、繰り返し周波数 99 kHz の条件で駆動し、光チョッパを使って 250 Hz の周波数で変調してロックイン検出を行った。ビームスプリッタには高抵抗 GaAs 基板を用い、室温、窒素雰囲気中で測定を行った。用いた素子の二波長レーザ光のスペクトル測定から、モード周波数差は 2.65 THz であった。図 8 に示すように、50-230 cm^{-1} の波数領域で熱輻射によるブロードな信号は見られたが、88.4 cm^{-1} (2.65 THz) 付近に生じるはずの DFG 信号は見られなかった。光チョッパを使った測定では、素子を駆動していない場合でもブロードなスペクトル信号が観測されるという問題が生じていた。素子は発熱の影響を抑えるため、マイクロ秒以下のパルス電流で駆動する必要がある。

一方、検出器の応答速度はミリ秒程度である。光チョッパを使用せず、パルス列に対して直接ロックイン検出を行った場合には、光量の時間平均が非常に小さく、高感度検出は困難である。そこで、数百ヘルツの周期でバースト的にマイクロ秒以下のパルス列を発生する電源を自作し、この電源を使って電気的変調でロックイン検出できるようにした。いくつかの駆動条件で測定を行ったが、この場合にも DFG 信号を観測することは出来なかった。現状素子の DFG によるテラヘルツ信号強度は、観測に十分でないことを示している。図 5a に示すように、二波長レーザ光の出力は最大で 5 mW 程度であり、また、図 7 に示すように、パルス駆動時の二波長発振の同時性も完全ではない。DFG 信号の観測には二波長光の出力と発振の同時性を高めることが必要で、これには素子の放熱対策と温度制御が重要となる。また、共振器層厚の一致性も大きな影響を与えるため、これを緻密に制御する作製技術の開発も重要といえる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① [T. Kitada](#), [X. M. Lu](#), [Y. Minami](#), [N. Kumagai](#) and [K. Morita](#), “Room-temperature two-color lasing by current injection into a GaAs/AlGaAs coupled multilayer cavity fabricated by wafer bonding”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.57, No.4S, 2018, 04FH03. DOI: 10.7567/JJAP.57.04FH03
- ② [Y. Minami](#), H. Ota, [X. M. Lu](#), [N. Kumagai](#), [T. Kitada](#) and T. Isu, “Current-injection two-color lasing in a wafer-bonded coupled multilayer cavity with InGaAs multiple quantum wells”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.56, No.4S, 2017, 04CH01. DOI: 10.7567/JJAP.56.04CH01
- ③ [T. Kitada](#), H. Ota, [X. M. Lu](#), [N. Kumagai](#) and T. Isu, “Surface emitting devices based on a semiconductor coupled multilayer cavity for novel terahertz light sources”, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, Vol.E100-C, No.2, 2017, pp.171-178. DOI: 10.1587/transele.E100.C.171
- ④ [X. M. Lu](#), H. Ota, [N. Kumagai](#), [Y. Minami](#), [T. Kitada](#) and T. Isu, “Two-color surface-emitting lasers by a GaAs-based coupled multilayer cavity structure for coherent terahertz light sources”, Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol.477, 2017, pp.249-252. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2017.01.049

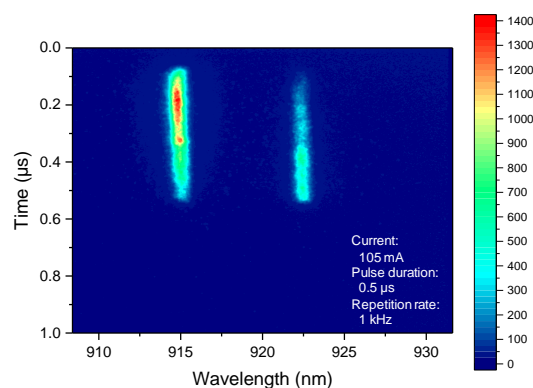


図 7. パルス電流注入による二波長レーザ光の時間分解スペクトルマップ。

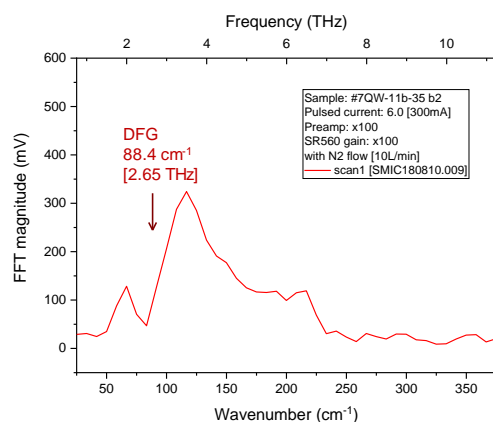


図 8. 二波長発振する素子のフーリエ分光測定で得たテラヘルツスペクトル。

- ⑤ T. Kitada, H. Ota, X. M. Lu, N. Kumagai and T. Isu, “Two-color surface-emitting lasers using a semiconductor coupled multilayer cavity”, Applied Physics Express, 査読有, Vol.9, No.11, 2016, 111201. DOI: 10.7567/APEX.9.111201

[学会発表] (計38件)

- ① X. M. Lu, Y. Minami, N. Kumagai, K. Morita and T. Kitada, “Temperature tuning of two-color lasing using a coupled GaAs/AlGaAs multilayer cavity by current injection”, The 45th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2018), 2018.
- ② Y. Minami, X. M. Lu, N. Kumagai, K. Morita and T. Kitada, “Simultaneous oscillation of two-color laser lights from a GaAs/AlGaAs coupled multilayer cavity”, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2018), 2018.
- ③ 森田 健, 盧 翔孟, 南 康夫, 熊谷 直人, 北田 貴弘, 井須 俊郎, “半導体結合共振器を利用したテラヘルツ波発生”, テラヘルツ科学の最先端 V, (招待講演), 2018.
- ④ 北田 貴弘, 盧 翔孟, 南 康夫, 熊谷 直人, 森田 健, “半導体多層膜結合共振器による赤外二波長レーザー発振”, 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会, (招待講演), 2018.
- ⑤ 小楠 洸太郎, 南 康夫, 盧 翔孟, 熊谷 直人, 森田 健, 北田 貴弘, “GaAs/AlGaAs 結合共振器による二波長面発光レーザーの時間分解スペクトル測定”, 2018年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会, 2018.
- ⑥ 盧 翔孟, 南 康夫, 熊谷 直人, 森田 健, 北田 貴弘, “ウエハ接合で作製した GaAs/AlGaAs 多層膜結合共振器への電流注入による室温二波長レーザー発振”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2018.
- ⑦ T. Kitada, X. M. Lu, Y. Minami, N. Kumagai and K. Morita, “Room-temperature two-color lasing by current injection into a GaAs/AlGaAs coupled multilayer cavity fabricated by wafer bonding”, 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), 2017.
- ⑧ 北田 貴弘, 盧 翔孟, 南 康夫, 熊谷 直人, 森田 健, “高指数面上の副格子交換エピタキシーと面発光テラヘルツ素子”, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, (招待講演), 2017.
- ⑨ 北田 貴弘, 南 康夫, 盧 翔孟, “半導体多層薄膜を使った結合共振器構造によるテラヘルツ発光素子”, 発光型/非発光型ディスプレイ合同研究会, (招待講演), 2017.

[その他]

- ① 学会発表⑤は, 第23回応用物理学会中国四国支部学術講演会発表奨励賞を受賞した。
- ② 徳島大学日亜寄附講座ホームページ <https://www.pled.tokushima-u.ac.jp/frc-nano/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 盧 翔孟

ローマ字氏名: (LU, Xiangmeng)

所属研究機関名: 徳島大学

部局名: 大学院社会産業理工学研究部 (理工学域)

職名: 特任助教

研究者番号 (8桁): 80708800

研究分担者氏名: 南 康夫

ローマ字氏名: (MINAMI, Yasuo)

所属研究機関名: 徳島大学

部局名: 大学院社会産業理工学研究部 (理工学域)

職名: 特任准教授

研究者番号 (8桁): 60578368

研究分担者氏名: 熊谷 直人

ローマ字氏名: (KUMAGAI, Naoto)

所属研究機関名: 国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名: エレクトロニクス・製造領域

職名: 主任研究員

研究者番号 (8桁): 40732152

研究分担者氏名: 森田 健

ローマ字氏名: (MORITA, Ken)

所属研究機関名: 千葉大学

部局名: 大学院工学研究院

職名: 准教授

研究者番号 (8桁): 30448344

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。