

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360030

研究課題名(和文)半導体結合共振器による面型テラヘルツ波発生素子の研究

研究課題名(英文)Fundamental studies on semiconductor coupled multilayer cavity for novel planar-type terahertz emission devices

研究代表者

北田 貴弘(KITADA, Takahiro)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・特任准教授

研究者番号：90283738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：結合した半導体多層膜共振器に生じる2つの異なる周波数の共振器モードの差周波発生を利用した新しい面型テラヘルツ波発生素子の実現を目指し、本研究では、ガリウム砒素とアルミニウム砒素からなる結合共振器薄膜を設計・作製する基盤技術を確立し、フェムト秒パルスレーザー光照射で生じる周波数混合信号の多角的評価によりテラヘルツ波光源としての有用性を示した。重要となる要素技術の一つとして、結合共振器内での非線形感受率の符号反転によるテラヘルツ波発生の高効率化があげられる。高指数面上のエピタキシャル成長とウエハ接合を組み合わせる手法が有効であることを示し、符号反転による信号増強を実験的にも検証できた。

研究成果の概要(英文)：Difference-frequency generation (DFG) of two cavity modes in a semiconductor coupled multilayer cavity is a new concept for compact and useful planar-type terahertz emission devices. In this study, we developed fundamental technologies for design and fabrication of the coupled multilayer cavity based on GaAs/AlAs multilayer structures and demonstrated its usefulness as a terahertz light source by measuring various types of frequency-mixing signals using femtosecond laser pulses. We found that the nonlinear susceptibility inversion inside the coupled cavity structure is one of the most important technologies for strong DFG in the terahertz region. The susceptibility inversion was successfully introduced by direct wafer-bonding of two epitaxial films grown on high-index substrates. Signal enhancement due to the inversion was clearly observed in both simulated and experimentally measured terahertz waveforms using femtosecond laser pulses.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：テラヘルツ/赤外材料・素子 微小共振器 非線形光学応答 MBE, エピタキシャル 半導体ナノ構造

1. 研究開始当初の背景

光と電波の境界領域にあるテラヘルツ電磁波は、新しい周波数資源として、医療診断、環境モニタリング、超高速無線通信等への応用が期待されている。テラヘルツ波利用の普及には小型で高性能な光源素子が望まれており、半導体デバイス技術を活かした素子開発が盛んである。代表的なものとして、共鳴トンネルダイオードや量子カスケードレーザがあるが、前者は高周波化するのが難しく、後者は室温動作が困難といった問題がある。

我々は、2つの等価な微小光共振器を直列に結合することで、周波数差がテラヘルツ波領域にある2つの共振器モードが実現できることを見出し、共振器内部での差周波発生(DFG)を利用した面型テラヘルツ波発生素子を提案した。本素子は、3つのGaAs/AlAsブラッグ反射多層膜(DBR膜)と2つの等価な共振器層により構成され、原理的には広い周波数領域をカバーし、室温での動作が可能である。2つの共振器モードの光電場は、共振器内部で著しく増強されるため、周波数混合信号の高効率発生が期待できる。実際、2次非線形光学効果が生じる(113)B基板上的結合共振器構造に超短パルスレーザ光を照射すると、各モードの第二高調波発生(SHG)及び和周波発生(SFG)信号が室温で明瞭に観測された。得られたSFG信号の強度は、(113)B GaAsバルク結晶で観測されるSHG信号強度の400倍以上であった。

2. 研究の目的

本研究では、全く新しいタイプの面型テラヘルツ波発生素子を実現する半導体多層膜結合共振器を設計・作製する基盤技術を確立し、光学評価によりテラヘルツ波光源としての有用性を明らかにすることを目的とした。GaAs/AlAs半導体多層膜によるDBR膜で構成する高指数(113)B GaAs基板上的結合共振器構造をターゲットとし、2つ共振器モードはDBR膜に対して透明な波長領域($\sim 1.5 \mu\text{m}$)に設定した。以下に具体的項目を示す。

- (1) 結合共振器に生じる非線形分極、テラヘルツ帯DFG信号のシミュレーション技術の確立とテラヘルツ波発生に適した構造設計
- (2) 高品質な結合共振器薄膜の作製技術の確立と共振器層に用いる2次非線形光学特性に優れた半導体量子ナノ構造の探索
- (3) 超短パルスレーザ照射で生じる2次非線形光学応答信号(SFG及びDFG信号)の緻密な計測と応答信号特性の理解

3. 研究の方法

(1) 伝達マトリックス法により結合共振器構造における光電場の空間分布の周波数依存性を求め、この電場分布と半導体結晶の2次非線形感受率を用いて100 fsのガウシアンパルス光を照射した場合に生じる差周波分極の空間分布を求めた。ここで、パルス光のスペクトル幅は2つの共振モード周波数差

よりも広く、その中点をパルス光の中心周波数とした。さらに、求めた差周波分極により発生するテラヘルツ波の時間波形とフーリエスペクトルをシミュレートすることで、テラヘルツ帯差周波発生に適した結合共振器構造を模索した。

(2) 波長 $1.5 \mu\text{m}$ 近傍に2つの共振器モードをもつGaAs/AlAs結合共振器構造を(113)B GaAs基板上に分子線エピタキシー(MBE)法により成長した。まず、結合共振器内での2次非線形光学現象の基本的な理解を深めるため、この波長域で透明でかつ比較的高い2次非線形感受率をもつGaAsを2つの共振器層とする試料を作製した。研究成果で後術するが、テラヘルツ帯差周波発生には、2つの共振器層で感受率の符号が反転した構造が望ましいことがわかった。これを実現するため、MBE法による結晶成長と表面活性化法による常温ウエハ接合を組み合わせた作製手法に取り組んだ。共振器層に用いる2次非線形光学特性に優れた量子ナノ構造として、共鳴波長を $1.5 \mu\text{m}$ 付近にまで長波長化したInAs量子ドットに着目した。これを(113)B GaAs基板上にMBE成長し、さらに共振器層に埋め込む技術の開発に取り組んだ。

(3) 作製した結合共振器構造に超短パルスレーザ光を照射し、2次非線形光学効果で生じるSFG及びDFG信号を測定した。赤外領域に現れるSFG信号の測定には、繰り返し周波数100 kHzの100 fsパルスレーザ光とSi CCD検出器を備えた分光器を用いた。SFG信号の起源を理解するため、光学異方性及び2パルス光による時間分解測定を行った。テラヘルツ帯のDFG信号は、時間領域分光法により測定した。構築した測定系を図1に示す。光パラメトリック発振器(OPO)からの波長 $\sim 1.5 \mu\text{m}$ の100 fsパルス光(繰り返し周波数: 80 MHz)を結合共振器構造に照射し、発生するテラヘルツ波は、低温成長GaAs薄膜を用いた光伝導アンテナ検出器により検出した。検出するための光キャリアはOPOに用いる $\sim 0.8 \mu\text{m}$ パルス光の一部を使って生成し、試料に照射する $1.5 \mu\text{m}$ パルス光に対して時間遅延を与えることで時間領域分光測定を行った。テラヘルツ波の取り出し効率を高めるため、Si半球レンズを試料にとりつけた。光学測定はすべて室温で行った。

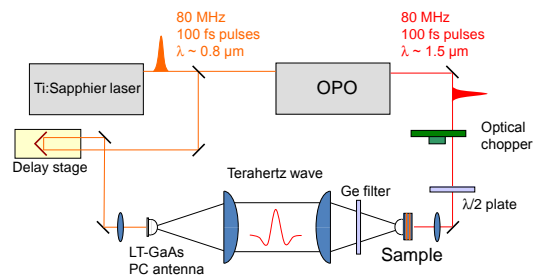


図1：時間領域テラヘルツ分光測定系

4. 研究成果

(1) GaAs/AlAs 結合共振器構造に形成される 2つの共振器モード(モード波長は 1489 nm と 1504 nm)を、100 fs のガウシアンパルス光(中心波長: 1497 nm)で同時励起した場合に生じる非線形分極のフーリエ係数の空間マップを求めた。そのカラーマップを図 2 に示す。2つの $\lambda/2$ GaAs 共振器層(220 nm)は、13.5 周期の GaAs/AlAs(110/130 nm) DBR 膜で結合され、その両側には 13 及び 17 周期の GaAs/AlAs DBR 膜が配置されている。パルス光が入射する表面近傍では、広い周波数幅をもつ非線形分極が生じている。一方、各共振器層では、2つの共振器モードの周波数差(2.0 THz)で大きなピークをもつが、互いの共振器層でその符号が反転している。2つの共振器層は、中央の DBR 膜により 3.25 μm 離れているが、この距離は2つの共振器モードにより発生するテラヘルツ電磁波の結晶内での半波長 $\sim 20.4 \mu\text{m}$ よりもかなり短い。(結合共振器内での波長は、屈折率を 2 THz 付近での GaAs 結晶の値 ~ 3.65 を用いて求めている。)2つの共振器層が同じ非線形感受率を持つ場合、発生するテラヘルツ波の相殺が顕著となることを意味している。感受率の符号が互い異なる共振器層の結合ができれば、テラヘルツ波発生効率の飛躍的に高められると予測できる。

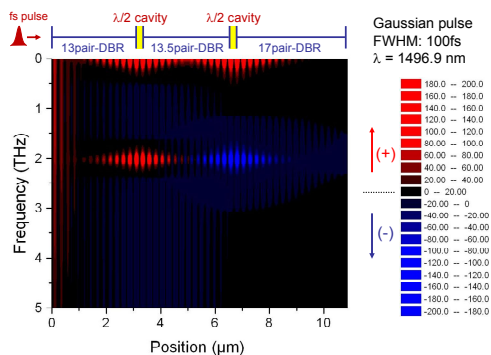


図 2 : 結合共振器内部に生じる非線形分極のフーリエ係数の空間マップ (正値は赤、負値は青で示す)

求めた非線形分極を使って、発生するテラヘルツ帯 DFG 信号の時間波形をシミュレートした。図 3 は、結合共振器の非線形感受率が結晶内で一様である場合と、中央で感受率の符号が反転している場合を仮定して求めた時間波形である。両者にみられる時間幅の狭い DFG 信号の立ち上がり形状には、表面近傍で生じる非線形分極が大きく寄与している。その後に見られる 2 THz の振動成分は、2つの共振器層で生じる巨大な非線形分極によるもので、感受率を反転させることで振幅が著しく大きくなっている。フーリエスペクトルを求めると、モード周波数差 2 THz における発生強度は、感受率の符号の反転により 15 倍程度増強されることがわかった。

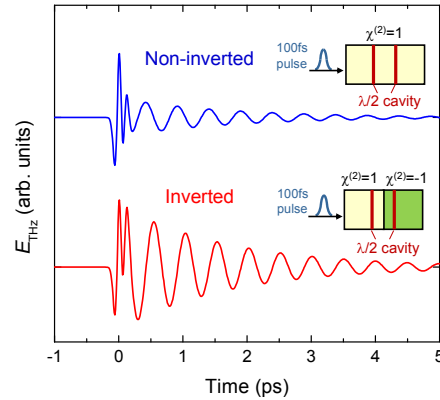


図 3 : 分極非反転型の結合共振器構造と反転型構造についてシミュレートしたテラヘルツ帯 DFG 信号の時間波形

(2) 結合共振器構造内で 2 次非線形光学効果による周波数混合を引き起こすには、その結晶構造がエピタキシャル成長軸方向に対して空間反転対称性を破っている必要がある。GaAs や AlAs がとる閃亜鉛鉱型結晶構造の 2 次非線形感受率テンソルの回転操作を行って、実効的感受率の面方位依存性を求めると、[112]方向に成長した場合に最も大きな値となる。しかし、(112)A または(112)B 面上への MBE 成長では、2次元成長する結晶成長条件が著しく限定され、光学的に高品質な薄膜を得るのが難しい。本研究では、実効的感受率の大きさが(112)面上より若干だけ劣るが、MBE 成長が比較的容易となる(113)B 面の GaAs 基板を用いた。実際、光学・構造的に優れた品質の GaAs/AlAs 結合共振器構造が(113)B GaAs 基板上に MBE 成長することが可能であった。しかし、研究成果(1)で述べたようにテラヘルツ帯差周波発生効率を高めるには、実効的な 2 次非線形感受率の符号が互いの共振器層で反転している必要がある。ここで再び感受率テンソルの回転操作を考えると、符号反転は結晶構造を 180 度反転することで実現可能である。そこで本研究では、(113)B 基板上に単一共振器構造を MBE 成長した 2つのエピウエハを用意し、これを直接接合することで結合共振器構造を得る手法を試みた。図 4 a 及び 4 b は、ウエハ接合に用いた 2つの(113)B エピウエハの薄膜構造とその反射スペクトルである。接合前の各々ウエハには、高反射バンドの中央に 1つのブロードな反射率のディップがみられるだけである。図 4 c は、接合後の薄膜構造とその反射スペクトルである。2つの(113)B エピウエハは、表面活性化常温ウエハ接合法により直接接合した。接合後、光学評価を行うために片方の GaAs 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。反射スペクトルには、2つの共振器モードによるディップが明瞭にみられ、その周波数差(~ 2 THz)は設計値とほぼ一致する。

接合後の反射スペクトルは、伝達マトリックス法によるシミュレーションでよく再現できた。(113)B 基板上的 MBE 成長と表面活性化常温ウエハ接合を組み合わせることで、高品質の分極反転型結合共振器構造が得られることがわかった。

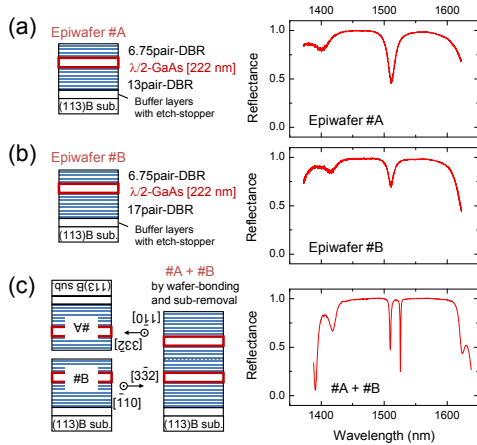


図4：エピウエハ2枚の直接接合による結合共振器の形成（右図は(a), (b)接合前、(c)接合後の反射スペクトル）

共振器層に導入する2次非線形光学特性に優れた材料として、共振モード波長（ $\sim 1.5 \mu\text{m}$ ）近傍に共鳴波長をもつ量子ドット構造に着目した。これを実現するため、自己形成型 InAs 量子ドットを InGaAs 歪緩和バリア層に埋め込んだ構造を(113)B GaAs 基板上に MBE 成長する技術を確認した。図5は、歪緩和 InGaAs バリア層上に成長した自己形成 InAs 量子ドットの原子間力顕微鏡 (AFM) 像である。ドットの密度は約 $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ で、平均高さは約 6 nm であった。さらに、この量子ドット構造を、AlAs を共振器層とする結合共振器構造の片方の共振器層に一層だけ埋め込んだ構造を MBE 成長し、超短パルスレーザー光によるテラヘルツ帯の DFG 信号を測定した。AlAs の非線形性が低いため、量子ドットをもたない試料では共振器モードによるテラヘルツ波発生がみられなかったが、量子ドットを有する試料では明瞭にみられた。一層の挿入だけで明瞭になることから、量子ドットは、その共鳴波長近傍領域で優れた非線形性を示すといえる。

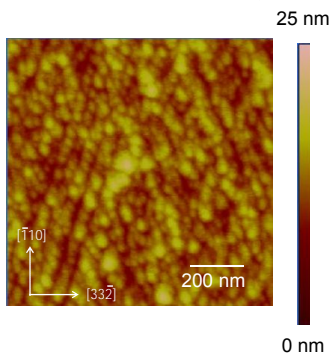


図5：(113)B GaAs 基板上に MBE 成長した歪緩和 InGaAs 膜上の自己形成 InAs 量子ドットの AFM 像

(3) 結合共振器に生じる2つの共振器モードを使った周波数混合の理解を深めるため、SFG, SHG 信号の光学異方性と2パルス光による時間分解測定を行った。図6は、100 fs のパルスレーザー光照射で生じる SFG 及び SHG 信号スペクトルの偏波面依存性である。周波数成分に2つの共振器モードを含む超短パルスレーザー光を(113)B 基板上的 GaAs/AlAs 結合共振器に照射すると、その半波長領域に3本のピークが観測される。両端にみられる2つのピークは、各々モードの SHG 信号で、真ん中の強いピークが SFG 信号である。信号強度は照射するパルス光の偏光方向に強く依存し、[33-2]に偏光した場合に最も強い信号が得られ、この時、SFG, SHG 信号も[33-2]方向に偏光している。一方、[1-10]方向に偏光したパルス光を照射しても[1-10]方向に偏光した SFG, SHG 信号は観測されず、直交する[33-2]方向に偏光した信号が観測される。信号の光学異方性は、(113)B GaAs 基板上における2次非線形分極の面内異方性の計算値とよく一致していた。また、時間遅延した2つのパルスレーザー光を用いて測定した SFG, SHG 信号スペクトルの遅延時間依存性も、伝達マトリックス法でシミュレートした共振器層における2次非線形分極の振る舞いとよく一致していた。(113)B 基板上的結合共振器で観測される SFG 信号の顕著な増強は、共振器層内で増強された2つのモード光の電場を介した2次非線形光学効果に起因していることが示された。

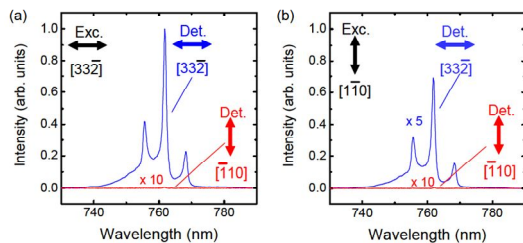


図6：SFG 及び SHG 信号スペクトルの偏波面依存性（励起レーザー光は直線偏光で、(a)は[33-2]方向に、(b)は[1-10]方向に偏光した場合のスペクトル）

図1に示した時間領域テラヘルツ帯分光測定系を構築し、超短パルス光照射で生じる2つの共振器モードのテラヘルツ帯 DFG 信号を測定した。測定に用いた試料は、GaAs を2つの共振器層とする GaAs/AlAs 結合共振器で、その一つは(113)B 基板上的 MBE 成長とウエハ直接接合により作製した分極反転型の試料で、もう一つは(113)B 基板上的 MBE 成長のみで作製した分極非反転型の試料である。図7に得られたテラヘルツ帯 DFG 信号の時間波形とそのフーリエスペクトルを示す。[33-2]方向に偏光したパルス光で励起し、[33-2]方向に偏光した DFG 信号を検出した。時間波形には、モード周波数差 (2.1

THz) に一致する振動が明瞭にみられ、その周波数でピークをもつフーリエスペクトルが得られた。2つの共振器モードによるテラヘルツ帯 DFG が顕著であることを示している。実験結果に対応する時間波形、フーリエスペクトルのシミュレーション結果と比較すると、高周波数領域で著しく異なることがわかった。周波数に対して指数関数で減衰する検出感度をシミュレーションに取り入れると実験結果をよく再現でき、シミュレーションの精度を高めることができた。分極反転型の試料と非反転型の試料を比較すると、モード周波数差の 2.1 THz 近傍で、反転型の試料が約 5 倍大きなテラヘルツ波強度を示した。ウエハ接合による分極制御がテラヘルツ波発生に有効であることを示す結果である。実験で得られた分極反転による増強因子(約 5 倍)は、シミュレーションで予測される値の 15 倍よりも小さいため、多層膜構造の品質を高めることでさらなる改善が見込める。

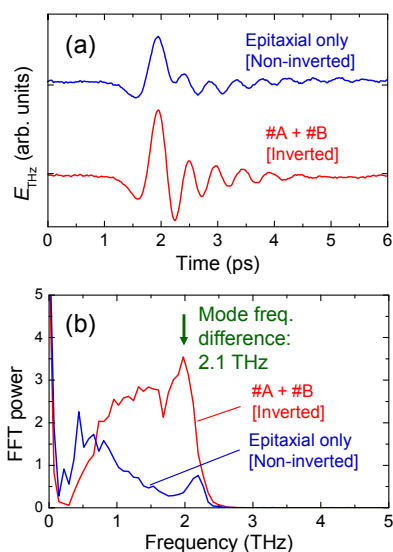


図7：時間領域分光法により測定したテラヘルツ帯 DFG 信号の(a)時間波形と(b)そのフーリエスペクトル(青線は MBE 成長のみで作製した分極非反転型の結合共振器構造、赤線は MBE 成長とウエハ接合による分極反転型構造からの DFG 信号)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

T. Kitada, S. Katoh, T. Takimoto, Y. Nakagawa, K. Morita, and T. Isu, "Terahertz emission from a GaAs/AlAs coupled multilayer cavity with nonlinear optical susceptibility inversion", Applied Physics Letters, Vol.102, No.25, pp.251118-1-4, 2013. 査読有

DOI: 10.1063/1.4813012

T. Kitada, S. Katoh, T. Takimoto, Y. Nakagawa, K. Morita, and T. Isu, "Terahertz Waveforms Generated by Second-Order Nonlinear Polarization in GaAs/AlAs Coupled Multilayer Cavities Using Ultrashort Laser Pulses", IEEE Photonics Journal, Vol.5, No.3, pp.6500308-1-8, 2013. 査読有

DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2267536

S. Katoh, T. Takimoto, Y. Nakagawa, K. Morita, T. Kitada, and T. Isu, "Terahertz Radiation from a (113)B GaAs/AlAs Coupled Multilayer Cavity by Ultrashort Laser Pulse Excitation", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.51, No.4, pp.04DG05-1-4, 2012. 査読有

DOI: 10.1143/JJAP.51.04DG05

K. Morita, S. Katoh, T. Takimoto, F. Tanaka, Y. Nakagawa, S. Saito, T. Kitada, and T. Isu, "Generation of Terahertz Radiation from Two Cavity Modes of a GaAs/AlAs Coupled Multilayer Cavity", Applied Physics Express, Vol.4, No.10, pp.102102-1-3, 2011. 査読有

DOI: 10.1143/APEX.4.102102

F. Tanaka, T. Takimoto, K. Morita, T. Kitada, and T. Isu, "Time-Resolved Measurements on Sum-Frequency Generation Strongly Enhanced in (113)B GaAs/AlAs Coupled Multilayer Cavity", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.50, No.4, pp.04DG03-1-4, 2011. 査読有

DOI: 10.1143/JJAP.50.04DG03

T. Kitada, F. Tanaka, T. Takahashi, K. Morita, and T. Isu, [招待講演論文]

"Novel terahertz emission devices based on efficient optical frequency conversion in GaAs/AlAs coupled multilayer cavity structures on high-index substrates", Proceedings of SPIE, Vol.7937, pp.79371H-1-6, 2011. 査読無

DOI: 10.1117/12.872103

K. Morita, F. Tanaka, T. Takahashi, T. Kitada, and T. Isu, "Optical Anisotropy of Strongly Enhanced Sum Frequency Generation in (113)B GaAs/AlAs Coupled Multilayer Cavity", Applied Physics Express, Vol.3, No.7, pp.072801-1-3, 2010. 査読有

DOI: 10.1143/APEX.3.072801

F. Tanaka, T. Takahashi, K. Morita, T. Kitada, and T. Isu, "Strong Sum Frequency Generation in a GaAs/AlAs Coupled Multilayer Cavity Grown on a (113)B-Oriented GaAs Substrate", Japanese Journal of Applied Physics,

Vol.49, No.4, pp.04DG01-1-3, 2010. 査読有
DOI: 10.1143/JJAP.49.04DG01

[学会発表](計30件)

北田 貴弘, 加藤 翔, 原山 千穂, 大柄根 齊宣, 井須 俊郎, “GaAs/AlAs 結合共振器によるテラヘルツ波発生への膜厚不均一の影響”, 2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014年3月17日~2014年3月17日, 青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県相模原市)

大柄根 齊宣, 加藤 翔, 中河 義典, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, “(113)B 基板上の InAs 量子ドットを有する GaAs/AlAs 結合共振器へのフェムト秒パルス照射によるテラヘルツ帯差周波発生”, 2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月16日~2013年9月20日, 同志社大学京田辺キャンパス(京都府京田辺市)

森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, [招待講演] “半導体多層膜結合共振器によるテラヘルツ光発生”, 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 2012年12月17日~2012年12月18日, 東北大学(宮城県仙台市)

加藤 翔, 安長 千徳, 中河 義典, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, “(113)B GaAs 基板上に作製した歪緩和 $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ バリア層に埋め込んだ InAs 量子ドット”, 2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会, 2012年9月11日~2012年9月14日, 愛媛大学・松山大学(愛媛県松山市)

北田 貴弘, 滝本 隼主, 加藤 翔, 森田 健, 井須 俊郎, “超短パルス光照射による GaAs/AlAs 結合共振器からのテラヘルツ帯差周波発生とそのシミュレーション”, 2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会, 2012年3月16日, 早稲田大学(東京都新宿区)

井須 俊郎, 北田 貴弘, 森田 健, 中河 義典, [招待講演] “GaAs/AlAs 多層膜結合共振器構造によるテラヘルツ発光素子”, (社)レーザー学会学術講演会第32回年次大会, 2012年1月31日, TKP 仙台カンファレンスセンター(宮城県仙台市)

K. Morita, T. Takimoto, S. Katoh, F. Tanaka, Y. Nakagawa, T. Kitada, and T. Isu, “GaAs/AlAs coupled multilayer cavity with polarization inverted structure fabricated by wafer-bonding method”, The 38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2011), 2011年5月24日, Maritim proArte Hotel (ベルリン、ドイツ)

T. Kitada, F. Tanaka, T. Takahashi, K. Morita, and T. Isu, [招待講演] “Novel terahertz emission devices based on efficient optical frequency conversion

in GaAs/AlAs coupled multilayer cavity structures on high-index substrates”, SPIE Photonics West2011, 2011年1月26日, The Moscone Center (サンフランシスコ、米国)

北田 貴弘, 田中 文也, 滝本 隼主, 森田 健, 井須 俊郎, “GaAs/AlAs 多層膜結合共振器における非線形分極構造の制御”, 2010年秋季 第71回 応用物理学会学術講演会, 2010年9月16日, 長崎大学(長崎県長崎市)

K. Morita, F. Tanaka, T. Takahashi, T. Kitada, and T. Isu, “Optical Anisotropy of Enhanced Sum-Frequency Generation Signal in (113)B GaAs/AlAs Coupled Multilayer Cavity”, The 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2010), 2010年6月4日, 高松シンボルタワー(香川県高松市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.frc.tokushima-u.ac.jp/frc-na/no/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

北田 貴弘 (KITADA, Takahiro)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・特任准教授

研究者番号: 90283738

(2)研究分担者

井須 俊郎 (ISU, Toshiro)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・特任教授

研究者番号: 00379546

森田 健 (MORITA, Ken)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30448344

(3)連携研究者

溝口 幸司 (MIZOGUCHI, Koji)

大阪府立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 10202342