

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月24日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656018

研究課題名（和文）半導体多層膜結合光共振器による波長変換デバイス

研究課題名（英文）A wavelength conversion device by a semiconductor-multilayer-coupled cavity

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：

低パワーで超高速動作できる面型波長変換デバイスの実現を目指して、三つの波長の光強度を増強することができる三結合光共振器構造の光学特性をしらべた。分子線エピタキシー法により GaAs/AlAs 多層膜三結合共振器構造を作製し、ほぼ設計どおりの三つの共振器モードを有することを確認するとともに、空間分離による四光波混合信号の観測において大きな信号を観測し、三結合共振器構造の有用性を検証した。

研究成果の概要（英文）：

Optical properties of the three-coupled-cavity structures for planar type wavelength conversion devices operating at a low power with ultrafast response were investigated. We fabricated GaAs/AlAs multilayer three-coupled-cavity structures by molecular beam epitaxy, and observed three cavity modes as designed. We also observed large nonlinear signals in the spatially separated degenerate-four-wave-mixing measurements.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	0	1,900,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	360,000	3,460,000

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：光エレクトロニクス、波長変換

1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会の構築に向けた超高速光ネットワークにおいては全光システムが望まれており、そのための基盤となるデバイスとして、“全光スイッチ”の実用化が期待されている。全光スイッチは、材料の非線形光学応答を利用して光信号のスイッチング動作を行うものである。半導体は、材料組成や構造によって非線形光学応答特性を制御でき、超高速光スイッチを実現するため様々な研究がなされてきた。半導体多層膜の微小光

共振器構造は共振器モードの波長の光強度をその内部で著しく増大するので非線形光学応答を利用する上で有用である。本研究代表者のグループでは、半導体多層膜の微小共振器構造と InGaAs 格子歪緩和層内に埋め込んだ InAs 量子ドットを用いた面型全光スイッチを提案し実験的に大きな光カー信号強度が得られることを示してきた。しかし波長変換を行うためには同時に複数の周波数の光強度を増強する必要がある。我々は二つの半導体多層膜共振器を結合することで、二つ

の共振器モードを生成し、その二つのモードを使って周波数混合信号を得るための半導体多層膜結合光共振器構造を考案した。実際に、GaAs/AlAs 多層膜からなる結合共振器構造を作製し、幅広いスペクトル幅を持つ超短パルス光の照射により、その二つの共振器モード光の和周波の発生を確認した。このような結合光共振器構造を利用することにより、非線形光学応答過程を効率よく生じさせ、通信波長帯における波長変換も可能になることが期待される。

## 2. 研究の目的

半導体多層膜による微小光共振器構造を用いて低パワーで超高速動作できる面型波長変換デバイスの実現を目指し、三つの共振器モードを持つ半導体多層膜結合光共振器構造を用いて3次の非線形光学効果である四光波混合信号を効率よく生成し、その構造が波長変換デバイスとして有用性を持つことを明らかにすることが目的である。特に、実用化において有利な GaAs 基板上に作製可能な III-V 族化合物半導体材料を用い、波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯で動作する面型デバイスとして、新規に考案した結合光共振器構造の有用性を明らかにすることを目的としている。このため、1 ピコ秒程度のパルス光の波長変換のために適正な構造をシミュレーションにより探索するとともに、シミュレーションで得られた結合光共振器構造を MBE 法によって作製し、実際に作製可能な構造の基本的光学応答特性とその非線形光学応答特性を観測する。このことにより、効率のよい波長変換素子の実現可能性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

結合微小共振器構造による波長変換素子の実現可能性を明らかにするため、結合共振器構造の設計、MBE 結晶成長による試料作製、非線形光学応答測定の一つを基本的実施項目とした。

結合光共振器構造の設計においては、透過率スペクトルや非線形光学応答信号をシミュレーションで求めることにより、目標とする波長変換に適した結合光共振器構造を探索する。我々のグループではこれまでに微小共振器構造における非線形光学効果を用いた超高速光スイッチを提案しその研究を実施する中で、マトリックス法による内部電場強度分布のシミュレーションを行ってきた。Q 値や共振器モードの波長などは構成する DBR 層の膜厚、層数、共振器層の膜厚など、共振器の構造によって大きく変化するので、三つの共振器層を持つ三結合共振器構造に対して、内部電場とともに四光波混合信号をシミュレーションできるように計算プログラムを改良し、透過スペクトルに現れる共振

器モードをはじめとする共振器の光学特性のシミュレーションを行なった。又、その共振器特性に対する作製条件の実験的揺らぎの影響についてもシミュレーションを行なった。シミュレーション結果に基づき、波長変換デバイスとして適正な構造パラメータを明らかにした。また、作製された試料の透過スペクトルの解析を行い、設計構造との差異を評価する。さらに、特性向上のための新たな因子をシミュレーションにより探索した。

試料の作製においては、GaAs(100)基板上への GaAs 系化合物半導体材料により分子線エピタキシー (MBE) 結晶成長法を用いて、DBR の各層や共振器層の層厚を精密に制御して行なった。結合光共振器構造は全体の層厚が大きくなるので、結晶成長条件の長時間の安定化が課題となるが、作製試料の透過スペクトルの解析から成長条件の変動を見極め、フィードバックをすることで層厚制御性の向上を図った。共振器層としては主に GaAs 半波長層とし、DBR 層として GaAs/AlAs ペアの多層膜とする構造を対象にしたが、非線形性の高い材料として、別途研究を進めている量子ドット層を共振器層に用いることも検討した。

非線形光学応答測定においては、既存のフェムト秒パルスレーザを用いたポンプ・プローブ法による透過率変化測定と直線偏光のクロスニコル配置による光カー信号測定を行う光学系をもとに、四光波混合信号を空間分離して検出できる光学系を付け加え、二ビーム入射の時間分解四光波混合信号測定光学系を構築して行なった。また、既存のフェムト秒パルスレーザからのパルス光を結合共振器の共振器モードのスペクトル幅に合わせたパルス光を生成し、二つの共振器モードの光による四光波混合信号測定を行うことができるように改良を図った。そのため、グレーティングとスリットを用いたスペクトル制限光学系の構築を実施した。バルク試料および単一共振器に対する縮退四光波混合信号の空間分離による信号検出をおこない、三結合共振器構造に対しては、時間分解測定とともに、さらに信号のスペクトル測定を行なった。

## 4. 研究成果

三つの多層膜共振器を DBR 膜で結合した三結合共振器構造は、そのストップバンド中に三つの共振器モードを有する構造であるが、その共振器モードの光の電場強度はいずれのモードの光も共振器層で増強され、大きな重なりを持つ。三つの共振器モードが入力光 ( $\omega_1$ )、制御光 ( $\omega_2$ )、信号光 ( $\omega_3$ ) となるようにすることで、非線形光学応答の四光波混合過程を利用した同一波長帯での波長変換を

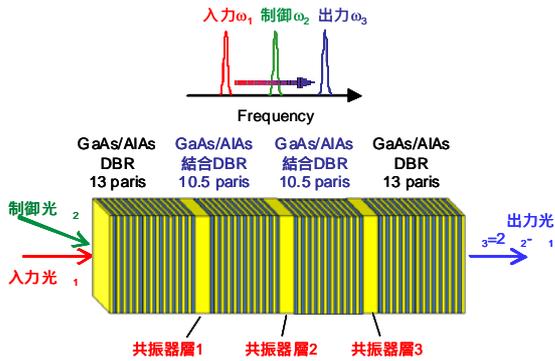


図1 .GaAs/AlAs 多層膜三結合共振器による波長変換素子の概念図

行なうことができる。四光波混合信号の周波数は  $2\omega_2 - \omega_1$  であるので、3つの共振器モードの周波数の間隔 ( $\Delta\omega_{12}$ ,  $\Delta\omega_{23}$ ) が等しくなることが必要である。図1はそのようなGaAs/AlAs三結合共振器構造による波長変換素子の概念を示したものである。共振器モードの周波数間隔は、GaAs/AlAs結合DBR膜の層数によって変化するが、左右の結合DBR膜の膜数が等しければ、周波数間隔  $\Delta\omega_{12}$ ,  $\Delta\omega_{23}$  は常に  $\Delta\omega_{12} = \Delta\omega_{23}$  となることが、伝達マトリックス法によるシミュレーション結果より確認できた。また、GaAsとAlAsの膜厚比が設計からずれた場合には、共振器モードの周波数が変化するとともに、周波数間隔も等しくなくなることが分かった。しかし、周波数差のずれは膜厚比のずれ5%に対して波長で0.5nm程度とわずかであり、共振器の光子寿命がサブピコ秒以下の共振器構造では共振器モードの幅に収まることが分かった。又、作製中に成長速度の変化があると共振器モードのそれぞれの透過率が等しくなくなり、 $\Delta\omega_{12}$ ,  $\Delta\omega_{23}$  もわずかに変化するが、 $\Delta\omega_{12} = \Delta\omega_{23}$  と等しい関係は保つことが分かった。実験的な成長条件を勘案し、1.5ミクロン帯での波

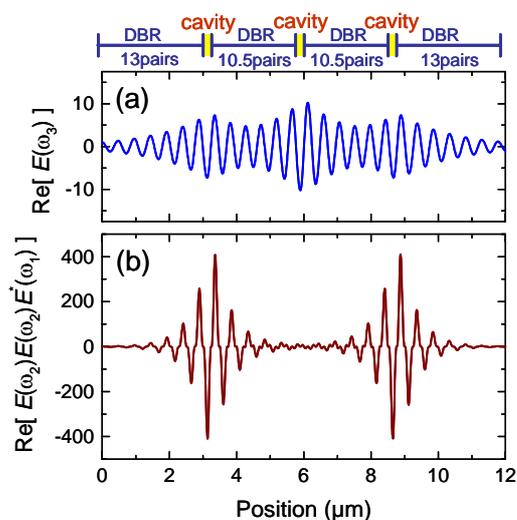


図2 . (a)信号光 $E(\omega_3)$ の光電場と(b)三次非線形分極  $P^{(3)}(2\omega_2 - \omega_1)$

長変換の実験に適した構造の一候補として、図1に示したような、GaAs半波長共振器層と、外側のDBR膜として、13ペアのGaAs/AlAs、結合DBR膜として、10.5ペアのGaAs/AlAsの結合共振器構造が適切であることがわかった。

大きな非線形信号を得るためには、四光波混合信号の周波数が、共振器モードの周波数に一致するだけでなく、それぞれの共振器層内で強く発生する四光波混合信号の位相の一致が必要となる。それを確認するため、非線形分極波の空間分布をシミュレーションで求めた。図2は共振器モード光 ( $\omega_3$ ) と入射光 ( $\omega_1$ ) と制御光 ( $\omega_2$ ) からできる非線形分極の空間分布を示したものである。非線形分極と共振器モード光 ( $\omega_3$ ) の位相は一致しており、いずれの共振器層で発生した非線形分極波も信号光として伝播することが分かった。

シミュレーションより求めた適切な構造を、現有するMBE装置を用いてGaAs(100)基板上に作製した。作製した試料の反射率スペクトルを測定した結果を図2に示す。ストップバンド中にほぼ等間隔な三つの共振器モードを明瞭に観測した。さらに、そのうちの2つの共振器モードの周波数にまたがるスペクトルを持つ100フェムト秒パルス照射し、その透過光強度の時間変化を、100フェムト秒パルスとの相互相関測定により観測したところ、スペクトル測定から予想される周期のビート信号が観測された。これらのことから、設計に近い三結合共振器が作製できていることが確認できた。

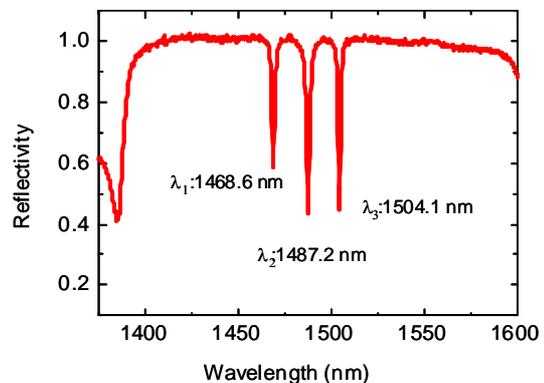


図3 . 作製した三結合共振器構造の反射スペクトル

四光波混合信号を測定するため、まず、空間分離による四光波混合信号の測定系を構築した。ポンプ・プローブ測定系と同様に、フェムト秒レーザーからの出力光を2分岐し、それらを試料に対してほぼ垂直入射であるが、わずかに角度の異なる波数  $k_1$ ,  $k_2$  として照射し、 $2k_2 - k_1$  方向の四光波混合信号を  $k_1$ ,  $k_2$  の光と空間的に分離することにより検出した。なお、時間分解測定のために、一方の光を時間遅延できるようにしてある。まず、大きな

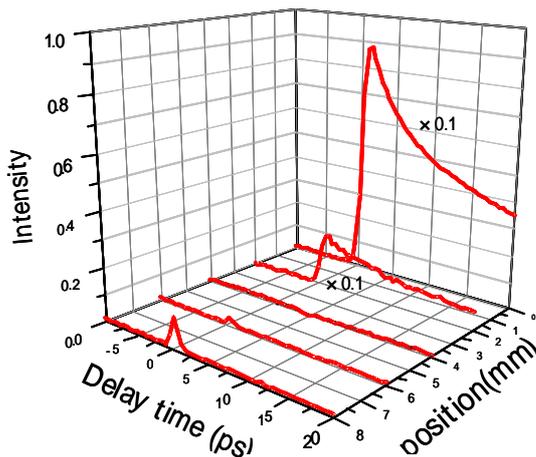


図4 . 時間分解測定信号の測定場所依存性

非線形光学応答が得られることが分かっている歪緩和層に埋め込んだ量子ドットを含む単一の共振器構造の試料について観測をおこなった。図4は検出光の空間分離のためのアパーチャ位置を変化させて観測した時間分解信号である。位置 $z=0$ では透過したプローブ光を検出しているの、透過率変化測定を示しており、この試料の量子ドットのキャリア緩和時間である10数ピコ秒の減衰が観測されている。アパーチャ位置を移動するとこの信号は消え、 $2k_z - k_x$ 方向に対応する $z=8$ において信号が検出された。この信号は、空間分離によって検出された四光波混合信号であると考えられる。これを確認するため、この信号の時間分解信号の時間依存性をより詳細に観測した。その結果、図5に示すように信号の遅延時間依存性は減衰時間0.38ps、立ち上がり時間0.19psであり、これらの値は共振器の透過光の相互相関測定より求めた共振器の光子寿命とその2乗に一致した。このことにより、測定された信号が $E_2^2 E_1^2$ に基づく四光波混合信号であり、その応答速度は共振器の光寿命によって説明できることが確認できた。さらに又、量子ドットを含む共振器の信号はGaAs共振器の信号と較べて二桁の増大が観測されており、同じ3次の非線形光学効果の光カー効果で確認済

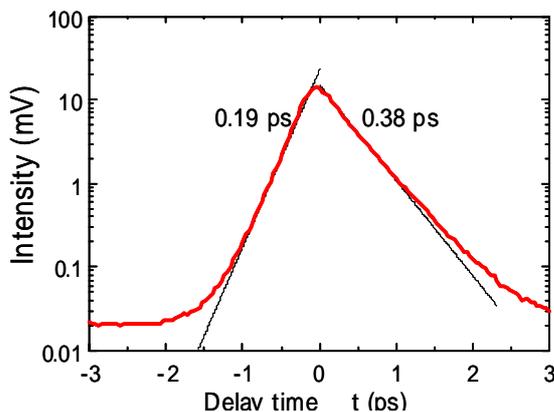


図5 . 四光波混合信号の時間分解測定

みなので当然ではあるが、四光波混合信号においても量子ドットを使うことで大きな信号が得られることが確認できた。

試作した三結合共振器構造に対しても、ま波長スペクトルを制限しない100フェムト秒パルスの照射によって、四光波混合信号の測定を行なった。その遅延時間依存性から複数周波数のビート信号となっていることが観測された。これは、複数の共振器モードのそれぞれの縮退四光波混合信号と異なる周波数間の四光波混合信号がともに観測されているものである。スペクトル観測では、入射光、制御光とも全ての共振器モードの光が含まれているため、四光波混合信号もほぼ同様な全ての波長が含まれたものであり、強度比による波長変換過程の解析は困難であった。今後、波長制限をした入力光を用いて、入射光スペクトルを限定し、四光波混合信号のスペクトル測定を行うことにより、波長変換の検証を直接行なう必要はあるが、本研究で得られた結果は、三結合共振器構造が波長変換素子として有用であると期待できることを明らかにしたものと考えられる。

## 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

上山日向, 安長千徳, 森田健, 北田貴弘, 井須俊郎, 歪緩和とバリア層に埋め込んだInAs量子ドットを有するGaAs/AlAs多層膜共振器の四光波混合信号測定, 第59回 応用物理学関係連合講演会, 2012.3.15 -3.18, 早稲田大学(東京).

安長千徳 他, 波長変換機能を実現するGaAs/AlAs多層膜三結合共振器中の非線形分極, 第72回 応用物理学学会学術講演会, 2011.8.29-9.2, 山形大学(山形).

安長千徳 他, GaAs/AlAs多層膜三結合共振器構造を用いた四光波混合による波長変換素子, 2011年度応用物理学中国四国支部学術講演会, 2011.7.30, 鳥取大学(鳥取).

北田貴弘 他, GaAs/AlAs多層膜三結合共振器の面型波長変換素子への応用, 第58回 応用物理学関係連合講演会, 2011.3.24, 神奈川工科大学(厚木).

T. Isu, et al., Frequency-Mixing-Signal Generation on a GaAs/AlAs Coupled Multilayer-Cavity, 9th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials(EXCON'10), 2010.7.11, Novotel Hotel, Brisbane(Australia).

〔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

井須 俊郎 ( ISU TOSHIRO )

徳島大学・大学院シテクノサイエンス研究部・特  
任教授

研究者番号 : 00379546

(2)研究分担者

北田 貴弘 ( KITADA TAKAHIRO )

徳島大学・大学院シテクノサイエンス研究部・特  
任准教授

研究者番号 : 90283738

森田 健 ( MORITA KEN )

徳島大学・大学院シテクノサイエンス研究部・特  
任講師

研究者番号 : 30448344

(3)連携研究者

( )

研究者番号 :