

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560358

研究課題名(和文) 広波長域偏波無依存な 2 光子吸収型全光スイッチへの 3 次非線形感受率テンソルの検討

研究課題名(英文) Study on third-order nonlinear optical susceptibility tensor for ultrafast and polarization-independent all-optical switching of two-photon absorption type

研究代表者

坂東 弘之 (BANDO, Hiroyuki)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・助教

研究者番号：70298149

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000 円、(間接経費) 1,260,000 円

研究成果の概要(和文)：3 次の非線形感受率テンソルの各成分の測定精度を上げるために、1 光束系にて入射光の偏光状態を円偏光から楕円偏光、直線偏光へと連続的に変化させかつ Z-scan 法と組み合わせた新しい測定方法を考案・構築した。測定結果は考案した 2 光子吸収伝搬モデルから導出した光強度伝搬式を用いて解析を行った。その結果、InP(001)、(110)、(111)のどの場合も実験結果と計算値とは非常に良く一致し、本研究にて得られた (3) 虚部の各値と偏光依存性の計算方法、および提案した 2 光子吸収伝搬モデルとその伝搬の解析式などが、全て適切であることが示された。

研究成果の概要(英文)：To improve the precision of the components of third-order nonlinear optical susceptibility tensor, a measurement system has been developed using a polarized single beam combined with Z-scan method. The polarization of the beam is continuously varied from a linearly polarized one to a circularly polarized one through an elliptically polarized one. The values of the third-order susceptibility tensor have been measured on InP (001), (110), and (001) plane. The values have been analyzed using my expression derived from my light-propagating model of Gaussian beam with two-photon absorption. The measured polarization results have shown the good agreement the calculated those based on the values of the tensor components obtained in this study.

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子・電気材料工学

キーワード：2光子吸収 光スイッチ 光物性 半導体物性 超高速光デバイス 光非線形デバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、情報通信量の増大により、光通信の高速化・帯域の増大化が必要となっている。これは、光信号(光パルス)の時間幅を小さくし、光パルスの時間間隔を短くし、対応波長域を広くすることである。それには、光通信に使用される各機器が、この高速度に対応した動作速度を持つことが必要である。信号(光パルス)は光ファイバ中を伝播しているが、現在の光通信網では各経路の分岐点にて、光スイッチ内で光信号が一度電気信号に変換され、次の送信経路を判断し、再び光信号に戻して次の経路へと信号を送信する。つまり、現在の光スイッチでは、光信号 電気信号 光信号として制御が行われている。当然ながらこの電気信号を処理するのは電子回路であるが、電子回路はCR時定数のために100GHz程度の周波数までしか追従できない。つまり時間幅が約10ps程度までのパルス信号しか扱えない。しかしながら、光パルスの時間幅は現在でも100fs程度のフェムト秒レーザーが市販されており、1ps以下のパルス幅の光信号を作製することは容易である。つまり、光通信を高速化するにあたり、ボトルネックとなる箇所の一つは、光スイッチにおいて一度電気信号に変換する箇所である。そこで、光信号を光信号のまま直接スイッチングできればこの問題は解消される。このような、光信号 光信号のように光信号を電気信号に変換することなく直接制御を行うものを全光スイッチといい、各研究機関にて研究が行われている。

(2) 全光スイッチは国内・国外にて盛んに研究されているが、ほとんどは可飽和吸収を利用した系で研究が行われており、2光子吸収を直接全光スイッチに利用している研究はない。可飽和吸収とは、強い光強度を照射すると、遷移する電子が枯渇もしくは遷移先の空状態が飽和してしまうために、光吸収係数が低下する減少である。可飽和吸収を利用した場合、以下の様にして光信号をスイッチングできる。通常時の光吸収係数の大きい状態にて光信号が来ると、その光信号は試料に吸収されて透過できないが、制御光(光強度:大)を照射時の可飽和吸収により光吸収係数の小さい状態に光信号が来ると、その光信号は透過する。このように可飽和吸収を利用した場合、実際の高速動作を得るためには、励起キャリアが再結合過程により元の状態に戻る必要がある。したがって、可飽和吸収を利用した系では、いかにしてこの再結合過程を高速にするか、つまり、光励起キャリアのライフタイムをいかに短くして可飽和吸収状態からノーマル状態に戻すかが重要であり研究対象となっている。

(3) この可飽和吸収を生じる系としては、III-V族、II-VI族系の化合物半導体を用いたMQWや量子ドットにおけるサブバンド間遷移(ISBT)、InGaAs/InAlAs MQWの励起子などがある。しかし、これらは先に述べたよ

うに原理的に励起キャリアの緩和時間が律速であり、パターン効果の心配も大きい。また、量子準位を利用するために対応波長が限定されており偏波依存性が激しく、試料構造が複雑でありさらに試料作製条件が非常に厳しいものである。2光子共鳴型の系(三菱電機)もあるが、これも構造上利用できる波長は設計波長のみである。

(4) このように、全光スイッチ実現に向けての従来技術は、物理現象の可飽和吸収を利用したものであり、さらに量子井戸を作製して量子準位を利用したものが主であるため、光励起キャリアの再結合時間を短くするために試料作製に種々の工夫が必要である。設計波長でしか利用できない、偏光依存性も大きいといった問題点があり、超高速性と広波長帯域性とを同時に達成できていない。

(5) これに対し、申請者が着目して今まで研究および特許取得をしてきた2光子吸収型の全光スイッチでは、超高速・広波長帯域な特性が期待される。このことを示す測定結果、InP、InGaAsにおける2光子吸収による応答速度の波長依存性(ポンプ・プローブ測定)を図1に示す。これより、波長1200nm - 1650nmの広波長域にて、2光子吸収による1ps以下の超高速応答が得られていることがわかる。

(6) 以上より、2光子吸収型では全光スイッチの実用化に向けて「広波長域にて超高速応答」までの材料レベルでの成果は得られており、今後は残された「偏波無依存性」(厳密には許容範囲内の依存性)を示すことが実用的には最も重要である。そしてこのためには、2光子吸収特性に参与している物理パラメータである3次の非線形感受率テンソル⁽³⁾を知ることが、根本的な理解となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、広波長域にて超高速応答性を有する全光スイッチングデバイスの実現に向けて、2光子吸収型全光スイッチにてその2光子吸収特性の偏波依存性を、広波長域(1200nm - 1650nm)にわたり測定し、広波長域に渡る3次の非線形感受率テンソル⁽³⁾を求め、この値から偏波依存性の小さい2光子吸収型全光スイッチの構造を設計し、2光子吸収型全光スイッチのプロトタイプを作製およびその特性を測定することである。

3. 研究の方法

(1) 広波長域にて2光子吸収特性の偏光依存性を測定出来るよう、ポンプ・プローブ測定系を利用し、アクロマティックな $\lambda/2$ 位相板および $\lambda/4$ 位相板を導入した測定系の構築を行った。これにより、波長域1200nm - 1800nmにて2光の偏光状態を独立に変えられるようになった。2光子吸収測定では、波長可変フェムト秒レーザー(パルス幅~200fs、波長可変域1640nm - 1900nm)を使用し、

スポット径約 5 μm に集光したレーザー光を試料に入射した。

(2) 従来の方法により 3 次の非線形感受率テンソル $\chi^{(3)}$ の各成分の値を測定するためには、直線偏光した 2 光束を使用し、それぞれの偏光方向を独立に変えることによるの偏光方向依存性の結果から求める必要があった。そのため、試料中での 2 光の重なり量の見積りに不確定な点があり、さらに 2 光とも偏光素子を回転させるために、その重なり量が一定とは限らなかった。そのために、 $\chi^{(3)}$ の精度は 2 桁が限界であった。そこで、試料の $\chi^{(3)}$ の各成分の測定精度をあげるために、この測定系を用いた 1 光束系にて、 $\chi^{(3)}$ の 4 位相板を回転させることで入射光の偏光状態を円偏光から楕円偏光、直線偏光へと連続的に変化させて 2 光子吸収係数を測定する方法を考案した。測定の際には、入射光の入射状態を試料の出射側から顕微鏡にて観察する必要があるが、この際に照明光として入射レーザー光を利用することで色収差による結像位置ずれの問題を解決でき、正しい入射光状態の設定が可能となった。さらに、この方法と Z-scan 法を組み合わせた測定方法を考案し実験を行った。

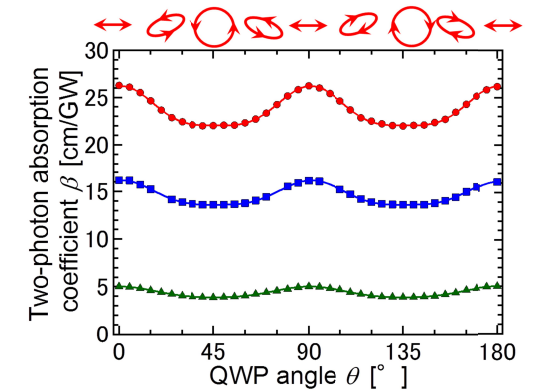
(3) 上記実験方法にて得られた結果は、2 光子吸収を有する試料中でのガウスビーム伝搬モデルを考案し、それに基づき導出した光伝搬式により解析を行った。その際、ビームパルス波形の時間変化や、ガウスビームの空間強度分布も考慮した。2 光子吸収特性の偏光依存性は、Dvorak らの式を適用した。これらにより、InP(001)面での実験結果から求めた $\chi^{(3)}$ の各値を使用し、(1-10)面における直線偏光した 2 光束での 2 光子吸収特性の偏光依存性を計算した。また実際に測定も行い、計算値との比較・検討を行った。

(4) 実際のデバイス形状での特性の知見を得るために、測定試料として導波路構造を InP(001)基板上にドライエッチングにより作製した。この際、ドライエッチング面の粗さを定量的に評価する手法として、レーザー顕微鏡による表面粗さ評価の方法を複数組み合わせることを考案した。作製した導波路構造にて、2 光子吸収特性の測定を行った。2 光子吸収特性の評価には、入射光強度の変化に対する 2 光子吸収量の変化量である 2 光子吸収効率 β を導入し、評価を行った。

4. 研究成果

(1) 1 光束系による、楕円偏光と Z-scan 法を組み合わせた、2 光子吸収係数 β の偏光状態依存性の結果を、図 1 に示す。試料は InP(001)基板を使用し、波長 1640, 1700, 1800nm にて測定を行った。測定結果は、考案した 2 光子吸収伝搬モデルから導出した光強度伝搬式を用いて解析を行い、 $\chi^{(3)}$ の各成分

の虚部を求めた。得られた $\chi^{(3)}$ の各成分の値を、表 1 に示す。その結果、今までは 2 桁の精度でしか得られていなかった $\chi^{(3)}$ の各成分の値を、3 桁の精度にて求めることができた。



$$\beta(\theta) = \frac{\omega}{2n^2c^2\epsilon_0} \text{Im} \left\{ \chi_{xxxx}^{(3)} - \chi_{xyyy}^{(3)} - 2\chi_{xyyx}^{(3)} \left(\frac{1}{8} \sin^2 4\theta + \frac{1}{2} \right) + \chi_{xyxy}^{(3)} \cos^2 2\theta + 2\chi_{yyxx}^{(3)} \right\}$$

図 1 : InP(001)における、2 光子吸収係数の偏光状態依存性

表 1 : InP の 3 次非線形感受率テンソル

Im{ $\chi^{(3)}$ }の測定結果

波長[nm]	$\text{Im}\{\chi_{xxxx}^{(3)}\} \times 10^{-18} [\text{m}^2/\text{V}^2]$	$\text{Im}\{\chi_{xyyy}^{(3)}\} \times 10^{-18} [\text{m}^2/\text{V}^2]$	$\text{Im}\{\chi_{xyyx}^{(3)}\} \times 10^{-18} [\text{m}^2/\text{V}^2]$
1640	2.78 ± 0.01	1.61 ± 0.01	0.527 ± 0.004
1700	1.97 ± 0.006	1.12 ± 0.004	0.362 ± 0.002
1800	0.614 ± 0.010	0.302 ± 0.006	0.150 ± 0.003

(2) InP(001)面での実験結果から求めた $\chi^{(3)}$ の各値を使用し、(1-10)面における直線偏光した 2 光束での 2 光子吸収特性の偏光依存性を測定した結果と計算した結果を、図 2 に示す。これから分かるように、計算値と実験結果とは非常に良く一致した。このことは、本研究にて得られた $\chi^{(3)}$ 虚部の各値および偏光依存性の計算方法、および提案した 2 光子吸収伝搬モデルとその伝搬の解析式などが、全て適切であることを示している。

(3) SEM 観察による視覚的な定性的な評価を、レーザー顕微鏡による定量的な評価と対応づけることが可能となった。作製した導波路構造にて、2 光子吸収特性の測定を行った。その結果を図 3 に示す。導波路幅 $w = 6.9 \mu\text{m}$ の導波路ではバルクに比べて β が約 15%増加していることが分かる。しかし、 $w = 10.6 \mu\text{m}$ ではほぼバルクと同程度の効率であった。このことは、入射光を、伝搬によるビーム径の拡大を生じさせず光強度密度を弱めない工夫が、2 光子吸収効率の向上に有効であることを示している。また、導波路長を 110 μm から 320 μm まで変えたところ、バルクでは β は約 12%の増加であったが、導波路 ($w = 6.9 \mu\text{m}$) では β は約 80%増加した。このことは、伝搬に伴うビーム径

の広がりを制限している導波路構造では相互作用長を長く取ることができ、デバイスとして2光子吸収の効率が増加することを示している。

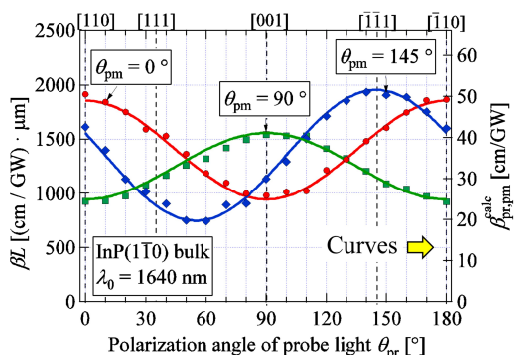


図2: InP(1-10)における, 2光束による2光子吸収特性の偏光方向依存性 (プロット: 測定結果, 実線: 計算結果)

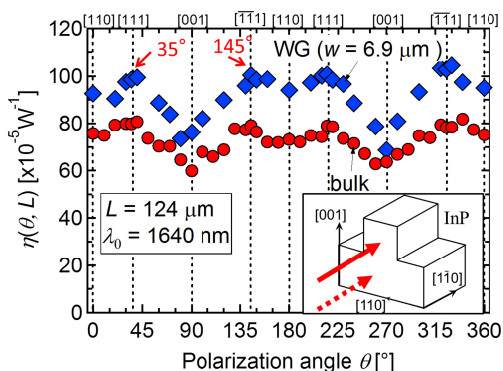


図3: InP(1-10)における, 2光子吸収効率の偏光方向依存性のバルクと導波路の比較

5. 主な発表論文等

[学会発表](計10件)

李修平, 坂東弘之, 篠崎智文, 大石真樹, 松末俊夫, 「2光子吸収下での半導体中の光伝搬シミュレーション」, COMSOL CONFERENCE TOKYO 2013, 2013年12月6日, 東京

大石真樹, 坂東弘之, 篠崎智文, 佐山武尊, 松末俊夫, 「InP(1-10)面における2光による2光子吸収の偏光方向依存性」, 第74回応用物理学学会学術講演会, 2013年9月16日, 同志社大学

原皓, 坂東弘之, 篠崎智文, 大石真樹, 松末俊夫, 「楕円偏光入射によるInPの非線形感受率テンソル $\chi^{(3)}$ の1光束測定」, 第74回応用物理学学会学術講演会, 2013年9月16日, 同志社大学

篠崎智文, 坂東弘之, 大石真樹, 原皓, 松末俊夫, 「InP(001)基盤の2光子吸収効率の集光位置依存性」, 第74回応用物理学学会学術講演会, 2013年9月16日, 同志社大学

篠崎智文, 坂東弘之, 大石真樹, 原皓, 松末俊夫, 「1光束2光子吸収測定によるInPの非線形感受率テンソル $\chi^{(3)}$ の評価」, 第60回応用物理学関係連合講演会, 2013年3月27日, 神奈川工科大学

Masaki Oishi, Masatoshi Tsunoda, Hiroki Kobayashi, Tomohisa Shinozaki, Hiroyuki Bando, Toshio Matsusue, Two-photon absorption property in one-dimensional guided structure of InP in wavelength of 1.6 - 1.8 μm , T-LWS 2012, July 5, 2012, Chiba University.

Tomohisa Shinozaki, Masatoshi Tsunoda, Hiroki Kobayashi, Masaki Oishi, Hiroyuki Bando, Toshio Matsusue, Polarization dependence of two-photon absorption in InP (-1 1 0) plane, T-LWS 2012, July 5, 2012, Chiba University.

大石真樹, 角田勝健, 小林大樹, 篠崎智文, 坂東弘之, 松末俊夫, 「1次元閉じ込めInPにおける2光子吸収の偏光依存性」, 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

小林大樹, 角田勝健, 坂東弘之, 松末俊夫, 「InPの2光子吸収係数の波長依存性ICP-RIE加工表面の粗さ評価」, 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

角田勝健, 大石真樹, 小林大樹, 坂東弘之, 松末俊夫, 「InP1次元閉じ込め構造における2光子吸収特性」, 第72回応用物理学学会学術講演会, 2011年8月31日, 山形大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂東 弘之 (BANDO, Hiroyuki)
千葉大学・大学院融合科学研究科・助教
研究者番号: 70298149

(2) 研究分担者

松末 俊夫 (MATSUSUE, Toshio)
千葉大学・大学院融合科学研究科・講師
研究者番号: 20209547