

機関番号：12501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760195

研究課題名（和文） 広波長域にて超高速な2光子吸収型全光スイッチ実現の研究

研究課題名（英文） Study on realizing ultrafast all-optical switching of two-photon absorption type in wide wavelength range

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

研究成果の概要（和文）：広波長域にて超高速な2光子吸収型全光スイッチの実現を目指し InP の2光子吸収特性の測定およびプロトタイプの実験を検討した。その結果、波長域 1640nm～1800nm にて InP の2光子吸収係数の偏光方向依存性が得られ、その結果から3次非線形感受率テンソル  $\chi^{(3)}$  を算出した。また、スムーズな加工面を有する InP 光導波路の作製条件を検討し、作製した光導波路での2光子吸収特性の測定を行った。

研究成果の概要（英文）：I studied on realizing and fabricating a prototype device of an ultrafast all-optical switching of two-photon absorption type in wide wavelength range. Polarization dependences of two-photon absorption coefficient in InP were measured in wavelength range of 1640 nm to 1800 nm. The third-order susceptibility tensor of InP was calculated from the above results. Ridge waveguides of InP were fabricated by dry-etching, which had smooth etched surfaces and almost vertically etched side walls.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：光スイッチ、半導体光物性、2光子吸収、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

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搬しているが、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

換されて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 RC 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は1つは、光スイッチにおいて1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。

全光スイッチは国内・国外にて盛んに研究されているが、ほとんどは動作原理に吸収飽和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。吸収飽和とは、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。この場合、光吸収係数の大きい状態に光信号が来ると、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）を照射して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。

このような吸収飽和を利用した場合、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、吸収飽和を利用した系では、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吸収飽和状態からノーマル状態に戻すかが重要でありこれが主な研究対象となっている。

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）（産総研、上智大など）、InGaAs/InAlAs MQWの励起子（NTT）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、高繰返しによる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、そのために偏波依存性が大きく、試料構造が複雑でありその作製条件も非常に厳しいものである。2光子共鳴型の系（FESTA）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。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、広波長域にて超高速応答を持つ2光子吸収を利用した全光スイッチの実現を目指し、InPやInGaAs系材料の2光子吸収特性の測定およびプロトタイプの実験作製を目的とした。具体的には、まずはMBEにて作製した試料の2光子吸収特性（光透過率の、入射光強度・波長・偏光依存性など）を調べる。次に、実際に使用するデバイス形態である、光ファイバ・光導波路（試料部）・

光ファイバの形態を作製する。そして、そのデバイス特性を評価し、2光子吸収を利用した全光スイッチとして最適な構造を探求することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 光学測定系の構築

長時間にわたる実験や本研究に適した測定系の構築などのために、大学内に故障のため稼動していなかった波長可変フェムト秒レーザーシステムを修理し、光学測定系の構築を行った。これには、補助金にて購入したQスイッチを導入した。また、幅・高さが約 $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ の光導波路にレーザー光を入射させるために、可視・赤外線が同時観察可能な顕微鏡観察測定系の構築も行った。このために、可視光から近赤外光（波長 $\sim 1800\text{nm}$ ）まで対応している長作動距離、アポクロマトなミットヨ製の対物レンズを使用した。

### (2) 2光子吸収係数 $\beta$ の測定と3次非線形感受率テンソル $\chi^{(3)}$ の算出

構築したポンプ・プローブ測定系にて、InPの2光子吸収係数 $\beta$ の測定を、波長 $1640\text{nm} - 1800\text{nm}$ にて行った。光のパルス幅は約 $200\text{fs}$ である。試料は(001)InP基板を使用した。 $\beta$ の値は、入射光が1光束および2光束の場合にて測定を行った。

1光束の場合、入射光（直線偏光）の偏光方向を $\lambda/2$ 位相板にて変え、試料に垂直入射させた。このときの透過率 $T$ は、入射光強度 $I_{in}$ の関数として式(1)のように書ける。

$$\frac{1}{T} = \frac{\beta_{\text{self}}[1 - \exp(-\alpha L)]}{T_s \alpha \exp(-\alpha L)} I_{in} + \frac{1}{T_s T_s' \alpha \exp(-\alpha L)} \equiv A I_{in} + B \quad (1)$$

このとき、 $\alpha$ は1光子吸収係数、 $L$ は試料の厚さ、 $T_s, T_s'$ はそれぞれ試料表面、裏面での透過率である。式(1)から分かるように、2光子吸収が生じているならば、 $1/T$ は $I_{in}$ に線形に依存する。1光子吸収が無視できるような場合（ $\alpha L \ll 1$ ）では、 $A/B \sim \beta_{\text{self}} L T_s$ となる。 $T_s$ は、InPの屈折率から計算し $0.738$ とした。 $L$ は、入射光（ガウスビーム）の伝搬プロファイルを考慮して、実行長 $L_{\text{eff}} = [(2\pi n w_0^2)/\lambda] \cdot \tan^{-1}[\lambda L/(2\pi n w_0^2)]$ の値を採用した。ここで、 $n$ はInPの屈折率、 $\lambda$ は入射光の真空での波長、 $w_0$ は入射光のビームウエスト半径である。

2光束の場合、ポンプ・プローブ測定にて、プローブ光の透過率変化から2光子吸収係数 $\beta_{\text{cross}}$ を評価した。プローブ光強度を $I_{pr}$ 、ポンプ光強度を $I_{pm}$ とすると、今回の実験条件の場合は $\beta_{\text{self}} I_{pm} T_s L < 1$ となるので、 $\Delta(\ln T) \sim \beta_{\text{cross}} I_{pm} T_s L$ となる。ポンプ光、プローブ光の偏光方向は、それぞれ $\lambda/2$ 位相板により独立に変え、 $\beta_{\text{cross}}$ の偏光方向依存性を測定した。

### (3)光導波路構造の設計

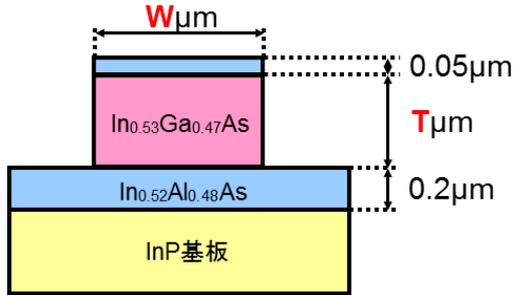


図1 シミュレートした試料構造

光導波路は、図1のようなリブ型の構造にて設計・作製を行う。そこで、ビーム伝搬法(BPM)により光の伝搬状態を計算し、各構造のパラメータ決定を試みた。BPM法は、伝搬方向に逐次計算していく方法のために、前方からの回折や反射がある場合(フォトニック結晶など)には使えないが、光導波路中の導波光伝搬特性(導波モードの伝搬定数や電磁界分布)を求められる。そこで、光導波路デバイスのデザインツールとして定評のあるBeamPROPを使用した。これにより、光導波路中の光パワー密度が高く、ICP-RIE装置やFIB装置で作製可能なサイズであり、シングルモードな、InGaAs系、InAlAs系材料からなる光導波路の設計を試みた。

### (4)光導波路構造の作製

試料は、当大学の施設にて電子線リソグラフィとICP-RIE装置(誘導結合型プラズマ・反応性イオンエッチング装置)を使用して光導波路構造を作製し、デバイス形状での特性評価を行った。そのためには、まずICP-RIE装置でのドライエッチング条件を決める必要があった。ICP-RIEにはCl<sub>2</sub>とArの混合ガスを使用した。エッチング条件には、混合ガスの組成比、ガス流量、チャンバー内の圧力、ICPパワー、RFパワー、基板温度、エッチング時間など、多くの設定条件があるため、プロセス条件などの検討に時間を要した。作製目標とした光導波路のサイズは、シングルモードにするために、幅:約1μm、高さ:約1μm、長さ:約500μm程度である。

## 4. 研究成果

### (1)光学測定系の構築

#### ①波長可変フェムト秒レーザーの立ち上げとポンプ・プローブ測定系の構築

2光子吸収測定を行うための光学測定系の構築をおこなった。Q-スイッチを購入し、レーザーの再生増幅器およびOPAの光学系調整を行うことにより、波長域900nm-1700nmにて波長可変なフェムト秒レーザーを立ち上げた。この際、OPAのIdler光を使用するために、赤外用スペクトロメータによる調整が必要不可欠であった。これにより、従来使用

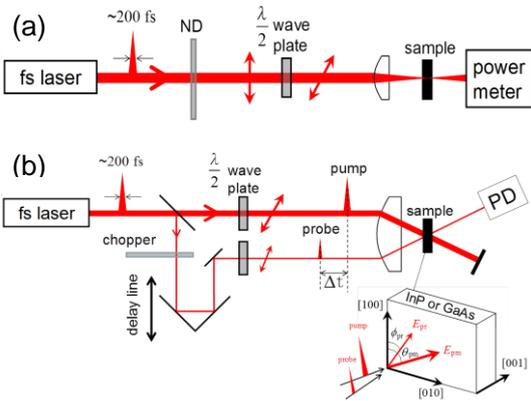


図2 2光子吸収測定系。(a)1光束測定系,(b)2光束測定系(ポンプ・プローブ測定系)

していたレーザに比べ、強度は10倍以上強くなり、さらに長時間安定性も実現できた。これを光源としたポンプ・プローブ測定系を構築した。当初は以前と同じく光ファイバを利用した系を構築したが、レーザ強度が10倍以上強くなったために、光ファイバの光非線形性が測定に支障をきたすようになった。そのため測定系を再検討し、別の光学測定系を構築した。最終的に構築した、1光束測定系およびポンプ・プローブ測定系(2光束測定系)を図2に示す。各光学ラインにλ/2位相板を導入し、直線偏光の偏光方向を変えられるようになっていた。その結果、2光子吸収特性を、入射光強度依存性、波長依存性、時間応答特性についてだけでなく、試料の結晶軸に対する2光の偏光角度依存性についても測定できるようになった。

#### ②可視・近赤外用顕微観察系の構築

光導波路特性を測るために、波長域400nm-1800nmにて同時に同一領域を分解能1μmにて観察可能な顕微測定系も構築した。これには、ミットヨ製のビデオマイクロユニットと赤外対応物レンズを使用した。また、使用した赤外CCDカメラの波長感度特性に合わせた照明光源も、市販のライトガイド光源を改造することで作製した。

### (2)2光子吸収特性の測定結果

構築した測定系を用いて、(001)InP基板の2光子吸収係数βの偏光依存性を測定した。図3に、(b)1光束測定の結果を、(c),(d)2光束測定の結果を示す。各角度θは、基板の[100]軸と偏光方向とのなす角度である。(c),(d)は、ポンプ光の偏光方向θ<sub>m</sub>が、それぞれ[100],[110]方向の時の、プローブ光の偏光方向θ<sub>p</sub>を換えた時の結果である。これらの結果より、β<sub>cross</sub> = 2β<sub>self</sub>となっているが、これは非線形光学の縮退因子の差からくるものである。βは、2光の偏波方向が同一方向のときに極大となり、直交する時に極小となるのがわかる。そして、2光の偏波方向が共に[110]方向のときβは最大となり、波長を1640nmから

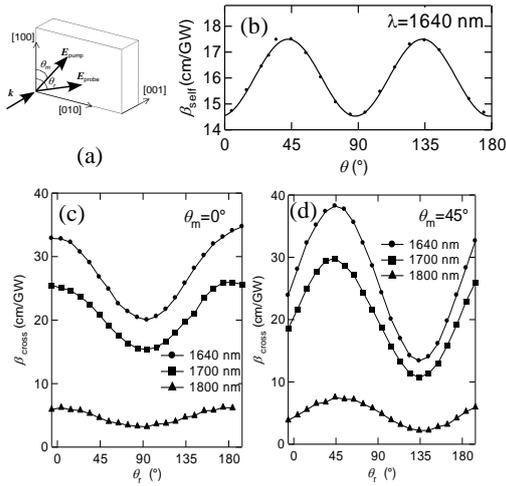


図3 2光子吸収係数の偏光方向依存性

1800nm まで変化させると、 $\beta$  は 38cm/GW から 8cm/GW と波長に対して単調減少した。

これらの結果から、より基本的な物理パラメータである 3 次の非線形感受率テンソル  $\chi^{(3)}$  の独立な成分 ( $\chi_{xxxx}^{(3)}$ ,  $\chi_{yyyy}^{(3)}$ ,  $\chi_{xyyy}^{(3)}$ ) を、式 (2), (3) を用いて各波長にて算出した。

$$\beta_{self}(\theta) = \frac{\omega}{2\epsilon_0 n^2 c^2} \times \text{Im} \left\{ \frac{3\chi_{xxxx}^{(3)} + 2\chi_{yyyy}^{(3)} + \chi_{xyyy}^{(3)}}{4} + \frac{\chi_{xxxx}^{(3)} - 2\chi_{yyyy}^{(3)} - \chi_{xyyy}^{(3)}}{4} \cos 4\theta \right\} \quad (2)$$

$$\beta_{cross}(\theta_r, \theta_m) = \frac{\omega}{2\epsilon_0 n^2 c^2} \text{Im} \left\{ \chi_{xxxx}^{(3)} + \chi_{yyyy}^{(3)} + (\chi_{xyyx}^{(3)} + \chi_{xyyy}^{(3)}) \cos 2(\theta_r - \theta_m) + (\chi_{xxxx}^{(3)} - 2\chi_{xyyx}^{(3)} - \chi_{xyyy}^{(3)}) \cos \theta_r \cos \theta_m \right\} \quad (3)$$

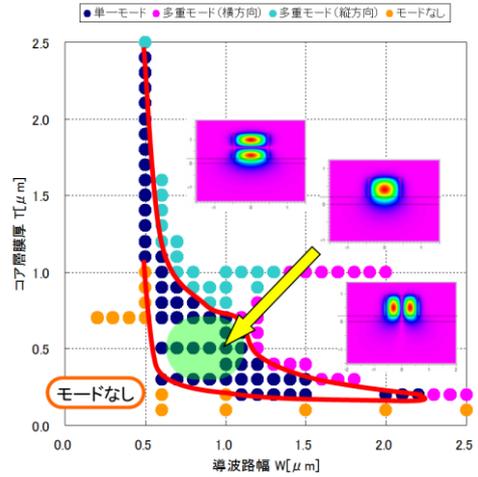
この結果を表 1 に示す。この得られた  $\chi^{(3)}$  の値から、ポンプ光を円偏光に、プローブ光を直線偏光とした場合について、 $\beta$  のプローブ光の偏光方向依存性を計算によりシミュレートした。その結果、 $\beta$  の偏光方向に依らず  $\beta = 26\text{cm/GW}$  (波長 1640nm) 一定の結果となった。実際に実験を行ったところ、 $\beta$  のプローブ光の偏光方向依存性はほとんど無く、値も計算値とほとんど等しかった。これは、得られた  $\chi^{(3)}$  の値が正しいことを示しており、この結果の値を用いれば任意の偏光状態の 2 光子吸収特性を把握でき、導波路中の光伝搬などもシミュレートできることを意味している。

表 1 算出した InP の  $\chi^{(3)}$

$\lambda$ (nm)	$\text{Im} \chi_{xxxx}^{(3)}$ ( $10^{-18} \text{m}^2 \text{V}^{-2}$ )	$\text{Im} \chi_{yyyy}^{(3)}$ ( $10^{-18} \text{m}^2 \text{V}^{-2}$ )	$\text{Im} \chi_{xyyy}^{(3)}$ ( $10^{-18} \text{m}^2 \text{V}^{-2}$ )	$\sigma$
1640	2.066 $\pm 0.015$	1.231 $\pm 0.015$	0.311 $\pm 0.017$	-0.34
1700	1.646 $\pm 0.007$	0.979 $\pm 0.007$	0.231 $\pm 0.017$	-0.33
1800	0.379 $\pm 0.002$	0.219 $\pm 0.002$	0.131 $\pm 0.007$	-0.50

### (3) 光導波路構造の設計

InGaAs 系, InAlAs 系材料からなる単一モード光導波路構造を、ビーム伝搬法を用いて見積もった。その結果の 1 例を図 4 に示す。これは、十分多くのモードを含む入射光を伝搬させ、その結果、伝搬モードの有無および 2 次以上のモードの有無を調べた結果である。各材料の屈折率の波長依存性は、Sellmeier の式を用いて計算した。これらの結果より、単一モードとなるためには、光導波路構造の幅・高さのサイズは、共に約 0.5–1 $\mu\text{m}$  程度であることが必要であることが分かった。



Correlation法による  $t=0\mu\text{m}$  でのモードカットオフ領域

図 4 BPM 法によるモード解析の結果

### (4) 光導波路作製のプロセス条件と試料作製

光伝搬シミュレーションの結果を基に、電子線リソグラフィとドライエッチングにて InP の導波路型構造の作製を検討した。電子線レジストでは、InP の ICP-RIE の際にマスクとしては弱く使用できないために、InP 表面にプラズマ CVD にて  $\text{SiO}_2$  膜を堆積させ、この  $\text{SiO}_2$  膜をマスクとして利用した。 $\text{SiO}_2$  は成長温度 300 $^\circ\text{C}$  にて膜厚  $\sim 300\text{nm}$  堆積させ、電子線リソグラフィのマスクパターンを ICP-RIE (エッチングガス  $\text{CHF}_3$ ) にて転写した。

InP は In を多く含むために、 $\text{Cl}_2$  ガスによるドライエッチングが難しい。これは、反応生成物  $\text{InCl}_x$  の蒸気圧が低いためにガスとして InP 基板から離脱しにくく、InP がほとんどエッチングができなかったり、粒状や針状の析出物がエッチング面に残りやすかったりするためである。この  $\text{InCl}_x$  をガス離脱させるには、約 250 $^\circ\text{C}$  以上の温度が必要である。しかしながら、使用機器の反応室のトレイ温度は 200 $^\circ\text{C}$  までしか昇温できなかったために、プロセス方法に工夫を必要とした。その結果、InP の温度を 200 $^\circ\text{C}$  に制御しながら ICP-RIE の RF bias 値を調節することで、非常に滑らかなエッチング加工面とアンダーカット (サ

イドエッチング)のない垂直性の高いリブ型導波路構造を得ることが出来た。加工例の断面 SEM 像を図 5 に示す。

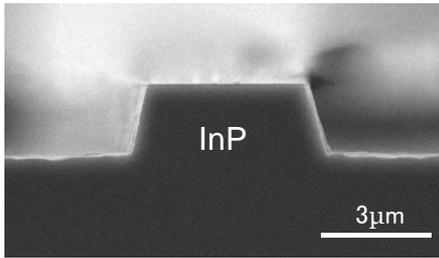


図 5 作製した InP リブ型導波路 (断面)

作製したリブ型導波路構造にて実際に光伝搬特性を測定するには、加工基板中から作製した導波路の領域 ( $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ ) を取り出し、その導波路端面から光を入射して他端面から出射光を検出しなければならない。そこで、導波路が作製された基板から導波路部分を切り出す方法を検討した。その結果、作製した導波路 (幅: 約  $1\mu\text{m}$ , 高さ: 約  $0.2\mu\text{m}$  – 約  $10\mu\text{m}$ , 長さ  $500\mu\text{m}$ ) を傷めることなく基板を厚さ約  $100\mu\text{m}$  まで裏面研磨することで、導波路部分を長さ  $100\mu\text{m}$  –  $400\mu\text{m}$  (精度約  $10\mu\text{m}$ ) の所望の長さに切り出し、試料ホルダにマウントする方法を確立した。作製した試料例を図 6 に示す。

以上の手法を用いて、幅  $16\mu\text{m}$ , 高さ  $10\mu\text{m}$ , 長さ  $225\mu\text{m}$  の InP 光導波路試料を作製し、光導波特性および 2 光子吸収特性を測定した。光入射は、CW の半導体レーザー光 (波長  $1640\text{nm}$ ) またはフェムト秒レーザー光 (波長  $1640\text{nm}$ , パルス幅  $150\text{fs}$ ) をシングルモード光ファイバに入れ、このファイバ他端を導波路端にバットジョイントし行った。ファイバの位置決めや出射光状態の確認などは、作製した顕微測定系を使用した。その結果、弱強度である CW 光 ( $1.7\text{mW}$ ) の光導波路中での伝搬損失は測定されず、少なくともドライエッチングが原因となる光損失は現れていないことが確認できた。これに対し、強強度であるフェムト秒レーザー光では、入射光強度を

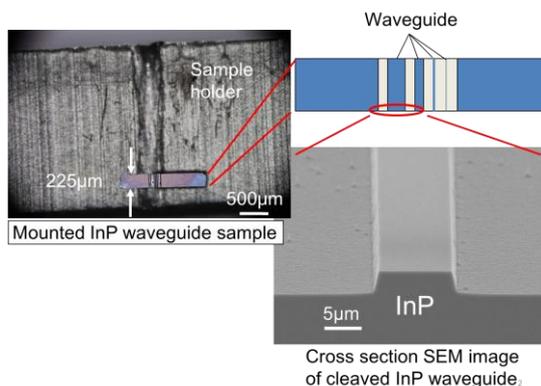


図 6 マウントされた InP 導波路試料

$0.03\text{GW}/\text{cm}^2$  から  $0.3\text{GW}/\text{cm}^2$  まで変えた際に、透過率が約 10% 減少し、導波路中での 2 光子吸収が測定された。そして別の InP 光導波路 (幅:  $5.8\mu\text{m}$ , 高さ:  $13\mu\text{m}$ , 長さ:  $270\mu\text{m}$ ) では、光吸収量変化が InP バルクの結果よりも約 1.4 倍大きな値となり、導波路構造の優位性を検証できた。今後は、これらの更なる精査が必要である。

## 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 2 件)

- ① T. Matsusue, H. Bando, S. Fujita and Y. Takayama, Polarization dependence of two-photon absorption coefficient and nonlinear susceptibility tensor in InP, 査読有, Physica Status Solid (c), Vol. 8, No. 2, 2011, pp. 387-389.
- ② T. Matsusue, H. Bando, S. Fujita and Y. Takayama, Polarization dependence of two-photon absorption coefficient and nonlinear susceptibility tensor in InP, 査読無, Abstracts of iscs2010, 2010, p. 3891.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 坂東弘之, 高山祐介, 角田勝健, 松末俊夫, InP の 2 光子吸収係数の波長依存性, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011 年 3 月, 神奈川工科大学.
- ② 高山祐介, 坂東弘之, 松末俊夫, InP における超高速偏光回転効果, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011 年 3 月, 神奈川工科大学.
- ③ T. Matsusue, H. Bando, S. Fujita and Y. Takayama, Polarization dependence on two-photon absorption, coefficient and nonlinear susceptibility tensor in InP, 2010 年 6 月.
- ④ 高山祐介, 坂東弘之, 松末俊夫, InP, GaAs における 2 光子吸収係数の偏光状態依存性と非線形感受率テンソル  $\chi(3)$ , 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010 年 9 月, 長崎大学.
- ⑤ 藤田祥一, 高山祐介, 坂東弘之, 松末俊夫, 奥野剛史, 舩本泰章, InP における 2 光子吸収係数の偏光依存性と非線形感受率テンソル, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月, 筑波大学.

## 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