

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560049

研究課題名(和文) 光多重安定現象の利用による波長選択検出機能を有したフォトダイオードの研究

研究課題名(英文) Wavelength selective functions by using optical multistabilites in quantum well photodiodes

研究代表者

徳田 安紀 (Tokuda, Yasunori)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：80393502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)： フォトダイオードの光吸収層に非対称型の結合量子井戸を用い、自己電気光学効果とトンネル効果を組み合わせて、ある特定の波長領域のみに高い感度を有する波長選択受光を実現する方法をシミュレーションを用いて示した。さらに、その選択受光領域の波長幅は電氣的に制御でき、原理的にはある波長のみに応答する受光素子が実現できる。

あわせて、結合量子井戸を用いた自己電気光学素子の使用や、通常の自己電気光学素子を光学的に直列に配置することで、不可逆的な光双安定特性、すなわち、孤立した光安定状態が生まれることを示した。

前者は波長多重通信システム、後者は光情報処理における情報秘匿などへの応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)： For photodiodes with asymmetric coupled quantum well optical absorption layers, it was showed that an optical signal detection with a wavelength-selective function is realized in combination of a self-electro-optic effect and a tunnel effect. Furthermore, the wavelength-selective width is electrically controllable, and thus the optical detection for a single wavelength light is possible in principle.

By using a coupled-quantum-well optical multistable device or by stacking of optical bistable devices, we also showed that an irreversible optical bistable characteristic, i.e., an isolated optical state can be created.

The former function may be promising for wavelength multiplex communication systems, while the latter seems to be very interesting from the viewpoint of concealing data in optical information processing systems.

研究分野：量子・光エレクトロニクス

キーワード： photodiode optical bistability optical multistability coupled quantum well quantum effect tunnel effect

1. 研究開始当初の背景

半導体量子ナノ構造が示す特異な物理現象を利用することにより、これまで多くの半導体デバイスの高機能化が図られてきた。特に、多彩な材料の組合せが可能な - 族化合物半導体をベースにした光デバイスの研究開発は、量子効果を積極的に利用することにより大きな進展を遂げ、今日の光ファイバ通信や光情報処理に代表される光・量子エレクトロニクスの隆盛につながり、人類の生活を豊かにしてきた。

量子井戸構造では、閉じ込め効果により電子と正孔の結合が強くなり、透過スペクトルにおいて励起子（電子・正孔対）によるシャープな吸収ピークが観測される。さらに、電界を印加することで、この励起子吸収ピークの波長は大きく移動する。この現象は量子閉じ込めシュタルク効果と名付けられ[1]、レーザダイオードの直接変調が困難になる超高速の光通信システムに対する光変調器を生み出した[2]。

レーザダイオードや光変調器と並んで光エレクトロニクスにおいて最も重要なデバイスのひとつであるフォトダイオードに関しても、これまで高感度化や高速化などに関する研究開発が精力的に行われてきた。さらに、もし、フォトダイオード自体で受光波長が選択できれば、波長多重光通信システムなどにおいて非常に有用な素子になることは言うまでもない。しかし、通常のフォトダイオードは半導体の光吸収特性をそのまま利用するため感度帯域はブロードで、波長選択受光を行うには光学フィルタなどが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、光エレクトロニクスのキーデバイスのひとつであるフォトダイオードにこれまでにない全く新しい機能を持たせることである。

具体的には、ある特定の波長領域のみに高い感度を有する波長選択機能を実現する方法について検討した。加えて、新しい現象として、不可逆的な光双安定特性、すなわち、孤立した光安定状態を得る方法についても検討した。

3. 研究の方法

本研究では、専用の半導体デバイスシミュレータや汎用のソフトウェアを用いたシミュレーション検討を行った。材料系は、主に GaAs/AlGaAs 系に対して行った。

図 1 に本研究で検討した素子構造を示す。イントリンシック光吸収層に GaAs 量子井戸を含む pin 型のフォトダイオードに逆バイアス V_{ex} を加え、フィードバックをかけるための負荷抵抗 R を挿入した素子である。素子の材料や構造パラメータ、負荷抵抗 R や電源電圧 V_{ex} の外部パラメータをうまく選ぶことで、自己電気光学効果により入射光強度や入射

波長に対して、透過光や光電流に双安定特性が得られることが知られている[3, 4]。

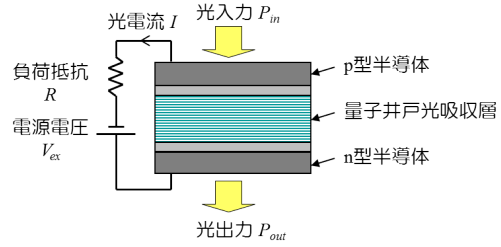


図 1 自己電気光学効果素子

4. 研究成果

(1) 波長双安定特性と波長選別

図 1 のような量子井戸構造を光吸収層にもつフォトダイオードでは、シャープな励起子吸収特性を反映して「電流こぶ」をもった応答関数（印加電圧-光電流特性）が得られる[3]。さらに、この「電流こぶ」は量子閉じ込めシュタルク効果により図 2(a) に示したように入射波長が長くなるほど高電圧側にシフトする[1]。

一方、図 1 に対する負荷直線は

$$I = (1/R)(V - V_{ex}) \quad \dots (1)$$

で与えられるので、図 2(a) から変わるように適当な波長（領域）の応答関数（図では緑線）と 3 点（真ん中の交点は不安定点）で交わり、図 2(b) に示したような波長に対する光双安定特性が得られる[4]。

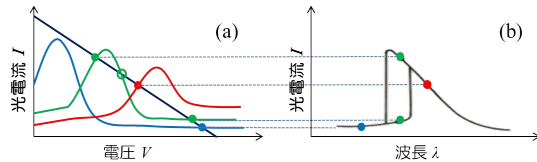


図 2 (a) 応答関数と負荷直線, (b) 波長双安定

本研究では、この波長に対する双安定特性をシミュレーションを用いて検討するために、励起子による光吸収特性をローレンツ型で記述し、応答関数を

$$I(\omega) = P_{in} \Delta\omega / [\{\omega - \gamma V - \omega_0\}^2 + (\Delta\omega/2)^2] - I_0 \exp(eV/kT) \quad \dots (2)$$

で表した。右辺第 1 項はローレンツ型吸収による項で、 ω は入射光の角周波数、 P_{in} は入射光強度、 ω_0 は吸収ピークの中心角周波数、 $\Delta\omega$ はその半値全幅、 γ は量子閉じ込めシュタルク効果の大きさを与える係数、 A は比例定数である。また、右辺第 2 項は pn 接合の順方向電流である（逆方向電流をプラスにとってあるので符号はマイナス）。ここで、(1)式と(2)式を連立させて解くことで、図 1 の自己電

気光学素子の特性を求めた。

まず、順方向電流を考慮しない場合のシミュレーション結果を示す。図 3(a)は、負荷抵抗 R を $30 \text{ M}\Omega$ に固定して外部電圧 V_{ex} を $0, 0.5, 1 \text{ V}$ と変化させたときの結果である。どの場合も双安定領域が生じ、外部電圧を大きくするほど、量子閉じ込めシュタルク効果の影響で、双安定領域は長波長側にシフトしていることが分かる。図 3(b)は、外部電圧 V_{ex} を 1 V に固定して負荷抵抗 R を変化させた場合のシミュレーション結果である。負荷抵抗が大きくなるにつれて、フィードバック効果が大きくなり双安定領域の幅が広がっていることが分かる。

次に、ダイオードの順方向電流を考慮したシミュレーション結果を図 3(c)に示す。負荷抵抗が $30 \text{ M}\Omega$ までは順方向電流を考慮していない図 3(b)の場合と大きな違いはないが、 $50 \text{ M}\Omega$ の負荷抵抗に対しては顕著なピークの減少が起こっていることが分かる[5]。これは IR によるフィードバック効果が大きいいため、順方向電流の影響が顕著になったためである。

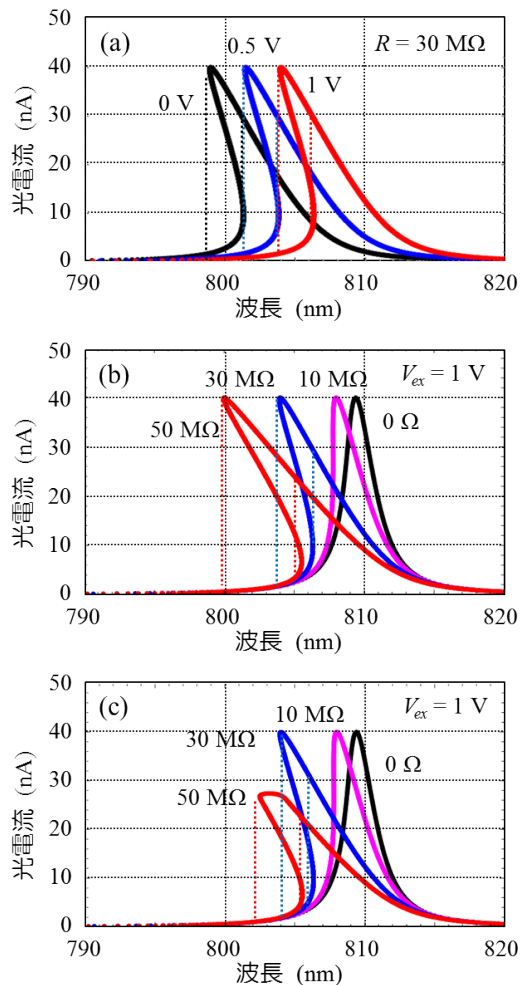


図 3 入射波長に対する光双安定特性の外部電圧および負荷抵抗依存性

ここで、双安定領域にある波長の単色光が入射する場合を考えると、素子は双安定の下の方のレベルで応答する[6]。したがって、光検出器としての応答は図 4 に示したように、双安定特性の長波長側のエッジ波長において不連続的に激変し、極めて敏感な波長選別ができることが分かる。

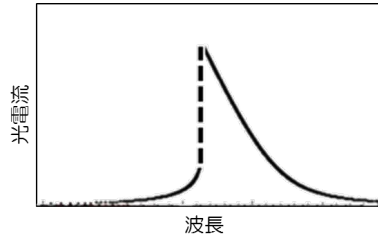


図 4 波長双安定による波長選別

(2) 結合量子井戸を用いた波長選択受光

次に、2 つの「電流こぶ」を考え、入射波長が長くなるにつれ、図 5 に示したように応答関数が変化する場合、すなわち、応答関数と負荷直線の関係が次の二つの条件を満足する場合を考える。

- ・条件 1
二つの「こぶ」に挟まれた谷のレベルは、負荷直線に対して、はじめは下にあり(λ_1, λ_2)、その後、一度超えて(λ_3)、再び下になる(λ_4, λ_5)。
- ・条件 2
左の低電圧側の「こぶ」のピークは、負荷直線に対して、はじめは下にあり(λ_1)、その後、一度超えて($\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$)、再び下になる(λ_5)。

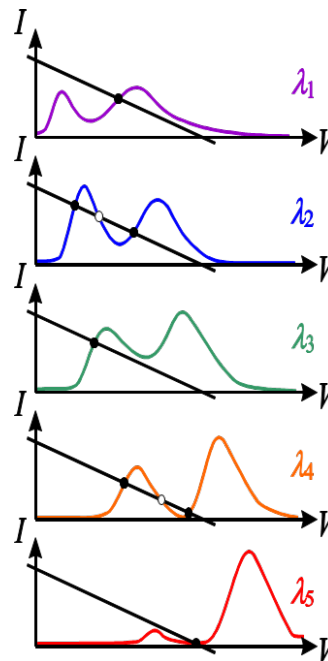


図 5 波長選択機能を得るための応答関数

このとき、図 6(a)に示したように単安定領域が双安定領域で挟まれた応答特性を得ることができる。そして、この場合も双安定領域にある波長の単色光に対しては下のレベルで応答するため、図 6(b)に示したようにある波長域のみで高い感度をもった波長選択受光機能を実現できることになる。

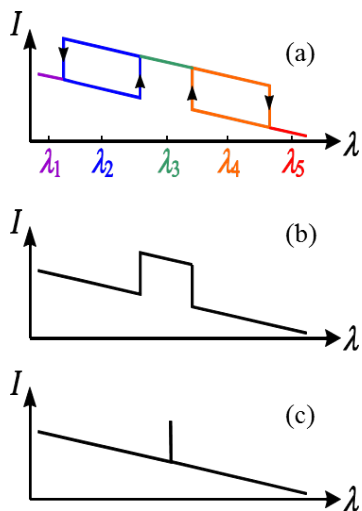


図 6 波長選択受光

本研究では、図 5 のような応答関数を実際に得るために、結合量子井戸における反交差現象 [7] とダイオードの順方向電流の利用を検討した。図 7 はある非対称結合量子井戸のエネルギーバンド構造を示したものである。図のように電界を印加することで、量子井戸に形成される電子のエネルギー準位が交差するように設計すれば、量子井戸の間のバリア層の厚さが十分薄いとトンネル効果によりエネルギーレベルは交差点近傍で反発を起こすと考えられる。

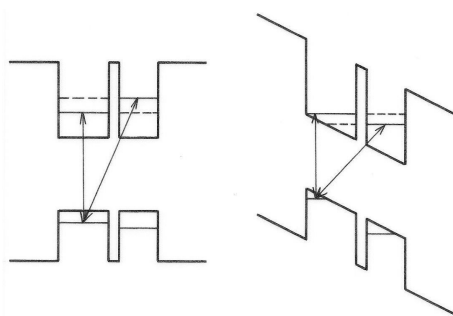


図 7 結合量子井戸構造のバンド図

図 8 は GaAs 量子井戸の幅が 6 nm と 10 nm で、その間の $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ バリア層の厚さが 1.5 nm と 6.0 nm の非対称二重量子井戸構造に対して、半導体デバイスシミュレータを用いて計算した光学遷移エネルギーの電界依存性である。図 8(a) のバリア厚が 6.0 nm の場合では二つの量子井戸の結合は弱いため、交差点でもわずかな反発しか見られない。しかし、図 8(b) のバリア厚が 1.5 nm の場合では井戸間

の結合が強くなり、交差点近傍で顕著な反発を起こしていることがわかる [7]。

ここで、印加電圧（電界強度）が大きくなるにつれて、高エネルギー側の遷移の振動子強度は徐々に大きく、低エネルギー側の遷移の振動子強度は徐々に小さくなり、交差点近傍で二つの遷移の振動子強度はほぼ同じになると考えられる [8]。さらに、二つの遷移は交差点で最接近するため、二つの「電流こぶ」の間の谷のレベルは図 5 に示したように、波長が長くなるにつれて、一度上昇するが、その後、再び下がるため、条件 1 を満足する特性が得られる。

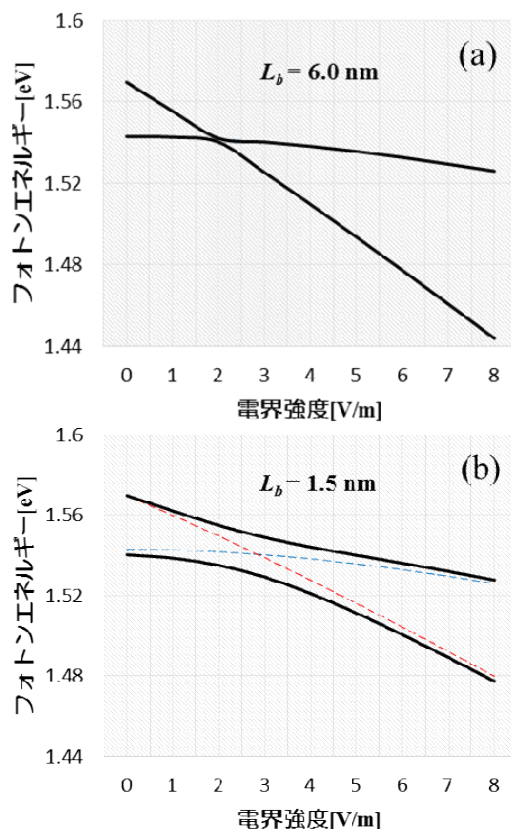


図 8 反交差特性のシミュレーション結果

次に、条件 2 を満たす特性を得るために、低電圧側の「こぶ」が図 9 で示したように pn 接合の順方向電流の影響を受けるように設計する。これにより低電圧側の「こぶ」の高さを下げることができ、条件 2 も満足する応答関数が得られる。

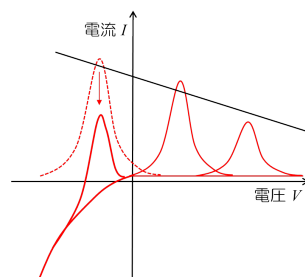


図 9 順方向電流の効果

以上のように結合量子井戸構造における光学遷移の反交差現象と pn 接合の順方向電流をうまく利用することで、ある特定の波長領域のみ高い感度を示すフォトダイオードが得られることを示した。さらに負荷直線のレベルを電氣的にコントロールすれば、その波長選択領域の幅を変化でき、原理的には図 6(c) に示したように、ある特定の波長の入射光のみに応答するフォトダイオードが得られる。

(3) 不可逆的光双安定

本研究では、さらに光多重安定特性を利用して、不可逆的な双安定特性を生み出し、その結果として孤立した光安定状態を得る方法を検討した。ここでは、それを実現するための二つの方法について示す。

結合量子井戸の反交差特性の利用

まず、波長選択受光特性を得るために利用した結合量子井戸の反交差特性の利用について述べる。図 5 において「電流こぶ」の谷間がずっと負荷直線の下にあれば、図 10(a) のような双安定状態が得られる。

この特性では、矢印の向きがどちらも下向きであることから分かるように、最初に上のレベルにあって、一度下のレベルに落ちれば、再び波長を変えるだけでは、上のレベルに戻ることはできない(電氣的パラメータ(R や V_{ex}) を変化させれば可能である)。なお、透過強度特性は図 10(b) のように光電流に対する特性と上下逆のようになる。

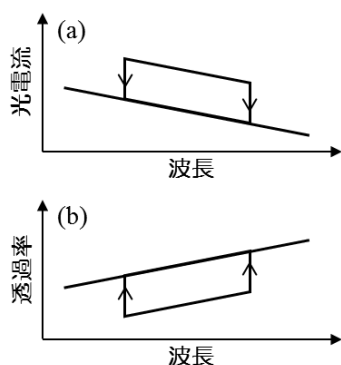


図 10 不可逆的双安定特性

双安定素子の多段化の利用

次に、不可逆的な双安定を得る別の方法を示す。図 11 のように、通常の高量子井戸を光吸収層にもつ二つの電気光学効果素子を光学的に直列に繋いだ場合を考える[6]。机上検討から、このとき出力光 P_{out} 、すなわち二段目の素子の光電流 I_2 の波長依存性は、双安定領域の重なり方から 24 通りのパターンに分類できることが分かった。本研究では、このような系をローレンツ型吸収を仮定してモデル化し応答特性のシミュレーションを行った。

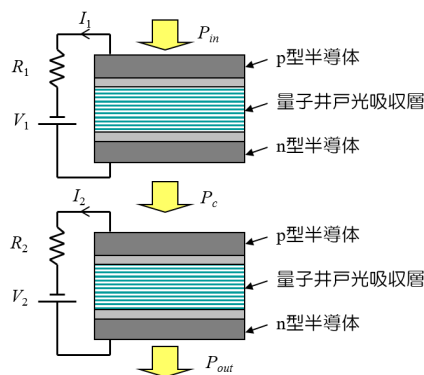


図 11 光双安定素子の多段化

図 12 にそのシミュレーション結果の例を示す。赤線は上段の双安定素子の吸収が小さなレベルに対する応答、青線は吸収が大きなレベルに対する応答を示す。トータル特性はこの二つをつなげることで得られる。ここで、図 12(a) において赤の点線で示したところが不可逆的な安定状態になっていることが分かる。なお、このような不可逆的双安定状態を含んだ特性は 24 パターンのうち 8 パターンあることが分かった。

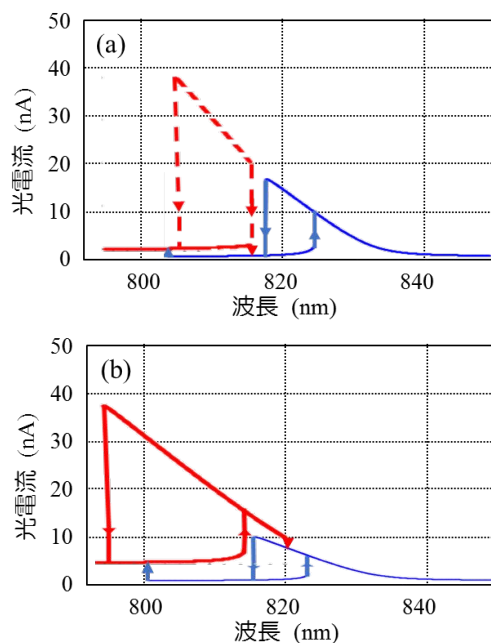


図 12 多段化による多重安定特性

このような宙に浮いたような不可逆的な双安定状態は、もしその存在を知らなければ、図 10 や図 12(a) の矢印の向きから分かるように、その状態にセットすることはできない。また、その状態から一度外れると元の状態には戻せないという興味ある特性を示し、光メモリにおける情報秘匿等への応用が期待される。

(4) まとめと課題

本研究では、まず、非対称の結合量子井戸

で得られる光学遷移の反交差現象を利用して得られる光多重安定特性を利用して、ある特定の波長（領域）のみに高い感度を示す波長選択機能を持ったフォトダイオードが実現できることを示した。この原理は、波長多重光通信などへの応用上極めて有意義であると考えられる。

さらに、不可逆的な光安定状態が得られることを二つの方法を用いて示した。この現象は、光情報処理システムなどにおける情報秘匿等への応用などが考えられる。

今後、前者については、光通信波長を想定したInGaAsP系の長波長素子に対する検討を、後者については、光情報処理における応用を考えてAlGaInN系などの短波長素子に関する検討を行うことは意味があると考えられる。

<引用文献>

D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood, and C. A. Burrus, "Band-edge electroabsorption in quantum well structures: The quantum-confined Stark effect," Phys. Rev. Lett. **53**, 2173 (1984).

T. H. Wood, C. A. Burrus, D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, "High-speed optical modulation with GaAs/GaAlAs quantum wells in a *p-i-n* diode structure," Appl. Phys. Lett. **44**, 1 (1984).

D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood, and C. A. Burrus, "Novel hybrid optically bistable switch: The quantum well self electro optic effect device," Appl. Phys. Lett. **45**, 13 (1985).

Y. Tokuda, K. Kanamoto, and N. Tsukada, "Self-deformed and hysteretic photocurrent spectra of quantum wells with a load resistor," Appl. Phys. Lett. **54**, 2324 (1989).

Y. Tokuda, K. Kanamoto, and N. Tsukada, "Incident wavelength dependence of photocurrent bistability by external bias voltage control in a quantum well *p-i-n* diode," Appl. Phys. Lett. **55**, 711(1989).

Y. Tokuda, Y. Abe, K. Kanamoto, and N. Tsukada, "Complex multistable response of serially connected optical bistable devices," Appl. Phys. Lett. **59**, 1016 (1991).

Y. Tokuda, K. Kanamoto, Y. Abe, and N. Tsukada, "Observation of excitonic effects on electroabsorption in coupled quantum wells," Phys. Rev. B (RC) **41**, 10280 (1990).

Y. Tokuda, K. Kanamoto, and N. Tsukada, "Self-electro-optic effect based on anticrossing of excitonic transitions in a coupled quantum well structure," Appl. Phys. Lett. **56**, 166 (1990).

5 . 主な発表論文等

[学会発表](計3件)

坂口浩一郎, 河原浩平, 福嶋丈浩, 徳田安紀, 「自己電気光学効果を利用した波長

選択受光素子」, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 2013年3月27日~2013年3月30日, 神奈川工科大学

坂口浩一郎, 福嶋丈浩, 徳田安紀, 「非対称結合量子井戸における励起子吸収の反交差現象を利用した波長選択受光素子」, 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

坂口浩一郎, 船木洸希, 福嶋丈浩, 徳田安紀, 「非対称結合量子井戸における励起子吸収を考慮したフォトダイオードの光応答特性シミュレーション」, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年3月11日~2015年3月14日, 東海大学

6 . 研究組織

(1)研究代表者

徳田 安紀 (TOKUDA, Yasunori)
岡山県立大学・情報工学部・教授
研究者番号: 80393502

(2)研究分担者

坂口浩一郎 (SAKAGUCHI, Koichiro)
岡山県立大学・情報工学部・助教
研究者番号: 10551822