

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04532

研究課題名（和文）量子ドット超格子を用いた光導電型テラヘルツ発生・検知デバイスの実現

研究課題名（英文）Photoconductive devices based on quantum dot superlattice for THz generation and detection

研究代表者

和田 修（Wada, Osamu）

神戸大学・産官学連携本部・非常勤講師

研究者番号：90335422

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ(THz)波発生および検知デバイスとして有用な光導電性アンテナ(PCA)の広範な応用に向けて、光通信波長帯励起での動作が望まれる。本研究では、InAs/GaAs量子ドット(QD)超格子構造を持つPCAを作製し、光導電特性の詳細と1550 nm励起PCA動作の検討を行った。その結果、暗電流は極めて低く、一方1550 nm励起下で強励起域まで増加する光電流が得られること、また光電流には正孔電流の寄与が大きいこと、かつサブピコ秒の超高速緩和が見込まれること、などPCA動作に向けて有利な特性が得られた。さらにTHz波発生実験により本QD構造PCAの1550nm励起動作が実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案したInAs/GaAs QD超格子構造においては構造中のミッドギャップ準位に起因して1550 nm励起下でもPCA動作が期待できる大きな光電流が確認された。さらに、光Hall効果測定からは、光電流には高易動度の正孔電流が寄与していること、また、光電流の励起強度依存性評価からは、高励起域でキャリア再結合過程が現れること、など本構造の物理特性に関する新たな学術的知見が得られた。また、1550 nm励起によるPCA動作の実証は、成熟した光通信光源の活用が可能で、かつ高性能・安価なTHz発生・検知素子の実現を可能とし、ひいてはTHzシステムの広範な応用を促すものとして社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：Photoconductive antenna (PCA) is one of the key devices for wider application of terahertz (THz) systems, and its operation at the telecom wavelength (1550 nm) is demanded. In this study, a novel PCA consisting of InAs/GaAs quantum dot (QD) superlattice has been fabricated by molecular-beam epitaxy technique and characterized for its application to the THz operation under 1550 nm excitation. The photoconductive property of this structure has been studied by evaluating the photo-Hall effect, the excitation power dependence of photocurrent spectra, and the ultrafast pump-probe reflection measurement. A few interesting features found include that this PCA structure has a low dark current and non-saturating hole dominant photocurrent with sub-ps relaxation time, which are favorable for THz operation of these PCAs. THz wave generation at ~1 THz has been successfully demonstrated with this PCA under 1550 nm, ~400 fs pulse excitation.

研究分野：半導体光エレクトロニクス

キーワード：InAs量子ドット 量子ドット超格子 低温成長GaAs 光伝導アンテナ(PCA) 超高速キャリア緩和 光Hall効果 光電流特性 電場増強構造

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ(THz)波は、近未来の通信・撮像・分光計測など広い応用が期待されており、その中核となる素子として、高効率 THz 発生・高感度 THz 検知が可能な photoconductive antenna(PCA)が不可欠である。しかし、既存の低温成長 GaAs を用いた PCA 素子は 800nm 波長帯での励起が必要であり、成熟した光通信波長帯、特に 1550 nm 帯のレーザ光源が使用できなかった。近未来の THz システムの広範な発展に向けた素子として、1550 nm 帯動作が可能な小型・廉価かつ高性能な PCA 素子の実現が切望されていた。

2. 研究の目的

PCA の THz 発生・検知動作においては、超高速パルス励起に伴う光導電電流の応答特性が THz 発生出力・THz 検出感度の特性を決定する。本研究では、InAs/GaAs 量子ドット(QD)超格子構造を用いた新規 PCA 材料構造を提案し、この材料における光キャリアの生成・伝搬・再結合などの光導電機構や動特性を詳細に研究することを通じて、1550 nm 励起下の光電流特性を明らかにする。さらに、1550 nm 超高速パルスによる励起による PCA 動作を実験的に検証することを目指す。これらの研究によって新規 QD 材料による光通信波長帯励起 PCA の実現可能性を実証する。

3. 研究の方法

(1) 結晶成長と素子製作

InAs/GaAs 量子ドット(QD)超格子構造は、分子線エピタキシ法により半絶縁性 GaAs(001)基板上に InAs QD (2.0 分子層)を含むアンドープ GaAs スペース層 (50 nm) を 20 層積層し、さらに低温 (250°C) 成長(LT)-GaAs のキャップ層 (30 nm) を成長することにより作製した。(図 1(a)参照) この結晶を用いて PCA 素子および Hall 効果測定用素子を製作した。素子作製においては、Ti/Au 電極間隔約 6 μm 、幅約 10 μm の電流路を有するダイポール型電極を形成した後、メサエッチ加工を行ってリーク電流が十分低減された素子を得た。図 1(b)に PCA 素子写真、図 1(c)に暗電流特性を示した。Hall 効果素子として電極間 400 μm 、幅 100 μm の電流路を有する 4 端子素子構造を同一の方法で作製した。

(2) 光電流特性・光 Hall 効果測定

PCA の光電流のスペクトル特性および光励起強度依存性の評価は、低励起強度 (<8 mWcm^{-2}) でハロゲンランプ光源、高励起強度域 (>0.3 Wcm^{-2}) ではパルス幅約 5ps、繰り返し周波数 78 MHz のスーパーコンティニューム光源からの励起光を分光器に通した後試料に照射し、光電流をロックイン検出する方法で測定した。光 Hall 効果の測定は、3730 G の磁場中におかれた Hall 効果素子に 3 種の波長 (940, 1300, 1550 nm) をもつ LED (出力 3.5-12 mW) 出射光を照射しながら Hall 係数の測定を行った。

(3) 超高速分光計測・THz 波発生実験

InAs/GaAs 量子ドット(QD)超格子構造におけるキャリア緩和特性の評価のために、Ti-サファイア・フェムト秒レーザ (波長: 800 nm 帯、パルス幅: 100 fs) 照射下での反射光の時間応答をポンプ・プローブ法により測定した。また、PCA 素子の THz 波発生実験については、Ti-サファイア・フェムト秒レーザとパラメトリック発振器を用いて形成した波長 1550 nm、パルス幅 ~ 100 fs、出力 100 mW の励起光パルスを PCA に照射し、PCA からの THz 波出力は、Ti-サファイアレーザのアイドラー光で励起された別の PCA 素子を検出器として用いる測定系を構築し、実験に適用した。

4. 研究成果

(1) PCA の光電流特性

PCA における THz 波発生は超高速光パルス励起下で生ずる光電流の超高速過渡応答に起因するから、PCA 動作を理解するためには光電流の生成機構を理解することが必要である。そのために測定した PCA 光電流特性 (バイアス電圧: 4 V、励起光強度: 7 μWcm^{-2}) を図 1 に示す。図 2(a)のスペクトルには、QD の量子準位 (基底:GS、第 1 励起:1st ES、第 2 励起:2nd ES) に

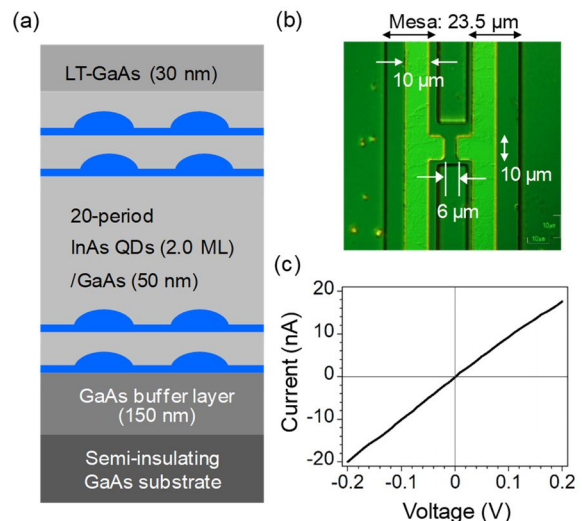


図 1. (a)QD 超格子構造 (b) PCA 素子の顕微鏡写真 (c)PCA の暗電流 - 電圧特性

対応する光電流ピークが見られ、この材料のフォトルミネッセンス(PL)スペクトルともよく一致している。さらに 1250 nm から 1550 nm にわたる波長領域でも GaAs 導電層中に存在するミッドギャップ準位(MGS)に起因する光電流が得られている。各ピーク(図中の縦線)の波長における光電流のバイアス電圧依存性および励起光強度依存性を図 2(b),(c)に示す。バイアス依存性には3 V前後にサブリニア特性が見られるが、これは高電界下での電子の速度飽和の影響を示している。励起強度依存性は線形特性を示す。

PCA 動作は超高速光パルス励起下で行われることを考慮し、光電流の光パルス励起強度依存性を $\sim 600 \text{ Wcm}^{-2}$ の高強度域まで調べた結果を図 3 に示す。光電流(I_{pc})と励起強度(P_{ex})の値はピーク値を使って表示した。図 3 の結果は $I_{pc} \propto P_{ex}$ の関係を示しており、スロープ(α)は約 1 Wcm^{-2} 以下の励起強度で $\alpha=1$ 、約 10 Wcm^{-2} 以上の励起強度では $\alpha=0.66\sim 0.70$ となることが分かった。また、線形領域の関係を外挿すると図 2(c)の結果と合致することが確かめられている。

これらの光電流特性の分析を通じて光電流の形成機構の考察を行った。QD 量子準位、ミッドギャップ準位の励起で生じた光キャリアは QD 直下の InAs wetting 層(WL)、および GaAs 導電層(トップ層、スペーサ層、パフア層を含む)の伝導帯および価電子帯を通じて光電流を形成する。低励起域では光キャリア密度に比例して $\alpha=1$ を示すが、高励起域では電子正孔再結合の影響により $\alpha < 1$ となる。 α 値はエネルギーバンド構造と励起波長などの条件に大きく依存し、類似の QD 構造(InGaAs/GaAs QD)でも $\alpha=0.8\sim 0.25$ などの報告がある[1,2]。しかし、本 PCA では、印加された高電界(3.7 kV/cm)に因るキャリアの高速引抜きにより再結合が抑制されているものと解釈される。このように、本 PCA では再結合による光電流飽和傾向は強くないため、PCA 動作には有利であることが分かる。また一方、図 3 の高強度域ではミッドギャップ準位光電流が QD 光電流より大きく、図 2 とは逆転している。これは、ミッドギャップ準位が励起パルス到着以前には電子充満状態であり到着後の光電流が最大化されるためと考えられ、準位の荷電状態に起因した現象であると推定される。

さらに光電流の形成過程を考察するために、光 Hall 効果測定を行った。図 4 にホール電圧-光電流特性を示す。なお、ホール素子長方位は[100]と[-100]で測定したが有意差はみられなかったので図には[100]の結果のみを示す。この測定で得られたパラメータを表 1 にまとめた。励起波長がミッドギャップ準位域になるとホール係数の符号の反転が見られることが注目される。QD 励起に相当する 940 nm ではホール係数が負で、光キャリアが電子主体であることを示しているが、ミッドギャップ準位励起の 1550 nm では正となり、正孔が主たる光キャリアとなることを表している。同時に決定される移動度は高純度 GaAs 結晶で報告されている値(電子: $8000 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ 、正孔: $400 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ [3])に近いと考えられる。ここで 1550 nm 励起の場合に負のホール係数が出現するのは、電子正孔間の移動度の相違を上回る正孔/電子密度比の増大が起こることを示す。本 QD 材料では伝導帯の InAs/GaAs バンド不連続が大きく[4]、光キャリアのうち電子は QD に補足されて電流に寄与しなくなる一方、価電子帯バンド不連続は極めて小さいため正孔の光電流に対する割合が増大する。これによってホール係数が反転するものと理解できる。さらに、中間波長 1300 nm

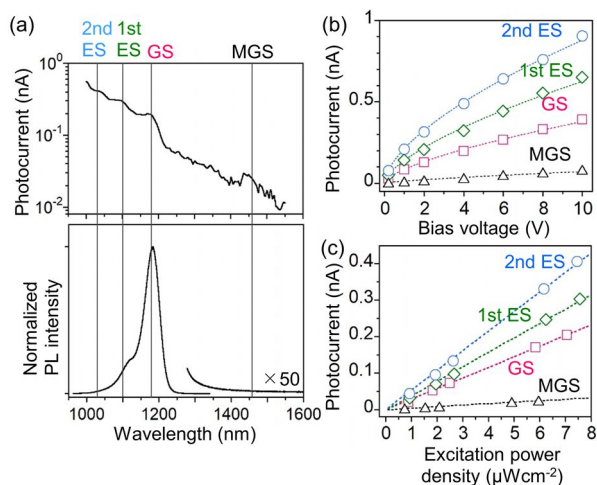


図 2. (a)PCA 光電流と PL スペクトル (b)光電流バイアス電圧特性 (c)光電流-励起光強度特性

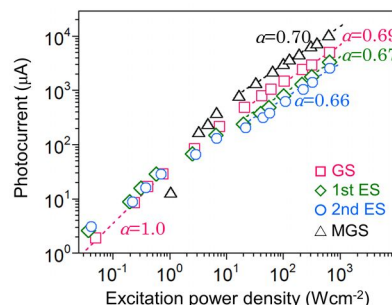


図 3. PCA 光電流-励起光強度特性

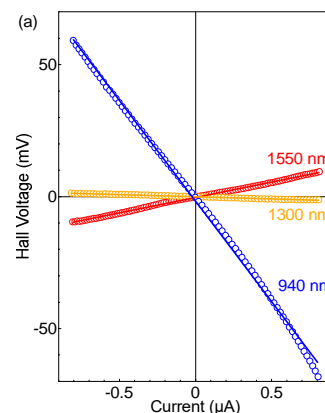


図 4.ホール電圧-光電流特性

表 1. 各照射光波長における光 Hall 効果測定結果

LED wavelength	Dark	940 nm	1300 nm	1550 nm
Sheet resistance (Ω/sq)	167 M	337 k	274 k	337 k
Hall coefficient ($\times 10^7 \text{ cm}^2/\text{C}$)	-	210	4.34	31.3
Sign of Hall coefficient	-	-	-	+
Mobility ($\text{cm}^2/(\text{Vs})$)	-	6200	160	930

では、LED 発光波長域（半値幅: 91 nm）内で QD とミッドギャップ準位両方の励起の競合により極めて低いホール係数と移動度が現れたものと考えられる。この測定結果から、1550 nm 励起下では、高移動度の正孔の寄与を含む比較的高い光電流が得られ、PCA の 1550 nm 動作が期待できることが分かった。

(2) 超高速分光計測・THz 波発生実験

PCA の高出力・広帯域化に向けては、光キャリアが高速緩和特性を持つことが有利である。QD 材料からの反射光の超高速応答特性の測定を行った結果を図 5 に示す。極めて高速な緩和（時定数: 0.7 ps）とそれに続く遅い緩和（25.8 ps）が見られる。この実験では光源波長が 820 nm であるので LT-GaAs トップ層の影響が含まれるが、層厚が 30 nm で極めて薄いことから、本結果は QD スペース層の超高速緩和特性を表すものと考えている。速い緩和はこれまで QD 材料で報告されている結果（数 ps 以上[5]）に比較しても速い。通常 QD 内のキャリア再結合寿命は 10 ps 程度であり、ここで得られた高速緩和特性は QD 成長によって GaAs 層、特にスペース層中に導入される準位に起因するキャリア寿命の短縮化を示すものと考えられる。このような特性は PCA 動作にとっても有利である。

これらの結果を裏付けるために、本 PCA を用い 1550 nm フェムト秒レーザー光励起下で THz 波発生実験を行った。計測した時間応答波形をフーリエ変換して得た出力波電界のスペクトルを図 6 に示す。0.3 - 3 THz の範囲に亘って出力信号が観測されている。この結果は、アンドープ InAs/GaAs QD 材料のミッドギャップ準位に基づく光電流による THz 波発生を初めて示すとともに、本材料の 1550 nm 励起 PCA への適用性を実証したものである。

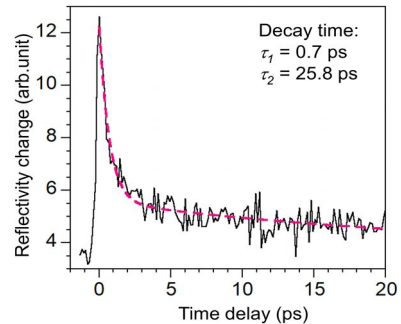


図 5. QD 構造の反射率応答特性

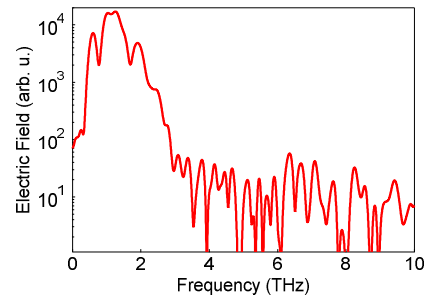


図 6. PCA 放射電界スペクトル

(3) 成果のまとめ

InAs/GaAs QD 超格子構造を用いた 1550 nm 励起 PCA の実験的検討を行い以下の知見を得た。

- (i) 1550 nm 高強度パルス励起下でも光電流は飽和せず増大する特性を確認した。また、800 nm 励起実験で QD に起因する光キャリア寿命短縮化を観測した。
- (ii) 1550 nm 励起下では QD への電子の捕獲が生じ正孔電流の寄与が増大する事など、新たな効果を含む光電流生成機構の詳細が明らかになった。
- (iii) 1550 nm 励起 PCA からの THz 波発生を確認し、本材料の PCA 適用性を実証した。今後 THz 電場増強構造の導入などを含む素子構造の最適化によって更なる性能改善が見込まれる。
- (iv) その他の成果として、走査型光電流マッピング法により PCA 内の光電流分布、少数キャリア拡散長などの評価を行い、素子の最適設計に適用できる結果を得た。また、PCA 応用の一例として THz 時間領域分光システム（800 nm 帯動作）を用いたガラス材料の誘電物性の研究を台湾・ベトナム研究者との共同研究として実施し論文等 7 件を含む成果を得た。

<備考> 上述の成果（2）の詳細内容については以下の論文の出版を予定している。

1. T. Kaizu et al., “Lateral photoconductivity of InAs/GaAs quantum dots for 1550 nm-telecom-wavelength excitation photoconductive terahertz antenna devices”, Submitted to Jpn. J. of Appl. Phys
2. Y. Minami et al., “Photo-Hall Effect Characterization and Terahertz Wave Generation with 1550 nm Excitation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Based Photoconductive Antenna”, Submitted to Phys. Stat. Sol. A: Appl. Mat. Sci.

<参考文献>

- [1] S. Golovynskyi, O. I. Datsenko, L. Seravalli, G. Trevisi, P. Frigeri, I. S. Babichuk, I. Golovynska, and J. Qu, *Nanoscale Res. Lett.*, **13**, 103 (2018).
- [2] S. L. Golovynskyi, O. I. Dacenko, S. V. Kondratenko, S. R. Lavoryk, Yu. I. Mazur, Z. M. Wang, M. E. Ware, G. G. Tarasov, and G. J. Salamo, *J. Appl. Phys.* **119**, 184303 (2016).
- [3] M. Sotoodeh, A. H. Khalid, and A. A. Rezazadeh, *J. Appl. Phys.* **87**, 2890 (2000).
- [4] S. P. Kowalczyk, W. J. Schaffer, E. A. Kraut, and R. W. Grant, *J. Vac. Sci. Technol.* **20**, 705 (1982).
- [5] A. Gorodetsky, N. Bazieva, and E. U. Rafailov, *J. Appl. Phys.* **125**, 151606 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Wada Osamu, Ramachari Doddoji, Yang Chan-Shan, Uchino Takashi, Pan Ci-Ling	4. 巻 135
2. 論文標題 Absorption dispersion below boson peak frequency in oxide glasses studied by THz-time domain spectroscopy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 085108-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0191384	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Osamu Wada, Doddoji Ramachari, Chan-Shan Yang, Yukihiro Harada, Takashi Uchino, Ci-Ling Pan	4. 巻 176
2. 論文標題 Mechanism of THz dielectric constant enhancement in multi-component oxide glasses investigated by infrared and THz spectroscopies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry of Solids	6. 最初と最後の頁 111237-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpccs.2023.111237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Osamu Wada, Doddoji Ramachari, Chan-Shan Yang, Ci-Ling Pan	4. 巻 573
2. 論文標題 Interrelationship among dielectric constant, energy band parameters and ionicity in multi-component oxide glasses revealed by optical- and THz-band spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Non-Crystalline Solids	6. 最初と最後の頁 121135/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnoncrysol.2021.121135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wada Osamu, Ramachari Doddoji, Yang Chan-Shan, Uchino Takashi, Pan Ci-Ling	4. 巻 11
2. 論文標題 Systematic characterization of THz dielectric properties of multi-component glasses using the unified oscillator model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 858 ~ 858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.417771	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ramachari Doddoji, Yang Chan-Shan, Wada Osamu, Uchino Takashi, Pan Ci-Ling	4. 巻 125
2. 論文標題 High-refractive index, low-loss oxyfluorosilicate glasses for sub-THz and millimeter wave applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 151609 ~ 151609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5083091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wada Osamu, Ramachari Doddoji, Yang Chan-Shan, Uchino Takashi, Pan Ci-Ling	4. 巻 10
2. 論文標題 High refractive index properties of oxyfluorosilicate glasses and a unified dielectric model of silicate oxide glasses in the sub-terahertz frequency region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 607 ~ 607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.382686	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Harada Yukihiko, Iwata Naoto, Asahi Shigeo, Kita Takashi	4. 巻 34
2. 論文標題 Hot-carrier generation and extraction in InAs/GaAs quantum dot superlattice solar cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Semiconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 094003 ~ 094003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6641/ab33a2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kojima Osamu, Izumi Ryo, Kita Takashi	4. 巻 2
2. 論文標題 Effects of a thin nitrogen-doped layer on terahertz dynamics in GaAs containing InAs quantum dots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 1621 ~ 1621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.2.001621	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計22件(うち招待講演 0件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 T. Kaizu, I. Kohama, Y. Minami, T. Kitada, Y. Harada, O. Kojima, T. Kita, and O. Wada
2. 発表標題 Lateral Photoconductivity of Multiple-stacked InAs/GaAs Quantum Dot Structure for Photoconductive Antenna Device
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2021 (Stockholm, May 2021) WeC2 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南康夫, 中塚 玲雄, 北田 貴弘, 原田 幸弘, 海津 利行, 小島 磨, 喜多 隆, 和田 修
2. 発表標題 光電流マッピング法を用いた多重積層InAs/GaAs量子ドット構造光伝導アンテナの電気特性評価
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会, 12p-N303-9, 講演予稿集, p. 12-201, オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南康夫, 新免歩, 北田貴弘, 原田幸弘, 海津利行, 小島磨, 喜多隆, 和田修
2. 発表標題 光伝導アンテナ応用へ向けた多重積層InAs/GaAs量子ドットの電気特性評価
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会(講演予稿集 p. 12-258, オンライン, 2021年3月19日)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海津利行, 小濱一晟, 南康夫, 北田貴弘, 原田幸弘, 小島磨, 喜多隆, 和田修
2. 発表標題 光伝導アンテナ応用へ向けた多重積層InAs/GaAs量子ドットの光学特性評価
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会(講演予稿集19a-Z23-3, オンライン, 2021年3月19日)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wada, Osamu, Ramachari, Doddoji, Yang, Chan-Shan, Uchino, Takashi, Pan, Ci-Ling
2. 発表標題 THz spectroscopy analysis of oxifluorosilicate glass and a unified dielectric model of silicate oxide glasses in sub-THz region
3. 学会等名 SPIE.COS Photonics Asia 2019 (Hanzou, China, Oct. 20-23, 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Anup Kumar Sahoo ; Hsiao-Hua Wu ; Yu-Cheng Hong ; Yu-Chen Chang ; Osamu Wada ; Ci-Ling Pan
2. 発表標題 Tail-Suppressed THz Photocurrent by a Bi-Polar Photoconductive Antenna Fabricated on Semi-insulating GaAs
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)(Paris,Sept.1-6, 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 海津利行、北田貴弘、南康夫、原田幸弘、小島磨、喜多隆、和田修
2. 発表標題 多重積層 InAs/GaAs量子ドットを用いた光伝導アンテナの作製
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会(上智大学、2020. 3. 12-15)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田修、Ramachari, Doddoji, Yang, Chan-Shan、内野隆、Pan, Ci-Ling
2. 発表標題 テラヘルツ分光を用いた多成分ガラスの誘電特性モデル
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会(上智大学、2020. 3. 12-15)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Osamu Wada, Doddoji Ramachari, Chan-Shan Yang, Takashi Uchino and Ci-Ling Pan	4. 発行年 2023年
2. 出版社 IntechOpen (ISBN: 978-1-83768-169-3 (PDF))	5. 総ページ数 148
3. 書名 Trends in Terahertz Technology (Ed. Y. Meziani and J. E.Velazquez-Perez) Chap.3 "Systematic Characterization of High-Dielectric Constant Glass Materials Using THz-TDS Technique", DOI: 10.5772/intechopen.102214	

〔産業財産権〕

〔その他〕

小島 磨 http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-photonics/kojima/Kojima.htm 原田 幸弘 http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-photonics/harada/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小島 磨 (Kojima Osamu) (00415845)	千葉工業大学・工学部・教授 (32503)	
研究分担者	海津 利行 (Kaizu Toshiyuki) (00425571)	京都大学・産官学連携本部・特定研究員 (14301)	削除：2022年4月20日 追加：2022年8月10日
研究分担者	原田 幸弘 (Harada Yukihiro) (10554355)	神戸大学・工学研究科・助教 (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	北田 貴弘 (Kitada Takahiro) (90283738)	徳島大学 特任教授 ・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・ (55201)	追加：2020年5月14日 削除：2021年6月4日 現在所属： 松江工業高等専門学校 電気情報工学科 教授
研究分担者	南 康夫 (Minami Yasuo) (60578368)	日本大学・生産工学部・准教授 (16101)	追加：2021年3月17日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
	その他の国・地域(Taiwan)	National Tsing Hua University	National Taiwan Normal University	
ベトナム	Duy Tan University			