

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：14701

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K21005

研究課題名（和文）半導体ナノフォトニクス材料による革新的超小型オールインワン・テラヘルツ波源

研究課題名（英文）Proposal and proof-of-principle demonstration of an innovative all-in-one terahertz source using semiconductor nanophotonics materials

研究代表者

尾崎 信彦（Ozaki, Nobuhiko）

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：30344873

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、半導体フォトニック結晶導波路(PhC-WG)を用いた高効率差周波発生(DFG)による超小型テラヘルツ(THz)波源の提案と、その原理実証を行った。低群速度かつ低分散の導波路モードを数THz程度の帯域で有するPhC-WGを設計し、その帯域内で周波数差を持つ二つの基本光を導入することで、基本光の電場強度増大および位相整合を実現し、DFGの増強を図った。数値シミュレーションにより、約0.5～2 THzの範囲でバルク材料と比べて二桁以上のDFG強度増加が確認された。また、基本光源を含む集積型PhC-WG構造により、超小型オールインワンTHz波源の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、ナノフォトニクス材料を利用した高効率テラヘルツ(THz)波源開発の可能性が示された。この結果は、THzギャップを埋める新たなTHz波源の提供につながる意義ある成果といえる。既存光源を凌駕する超小型THz波源を半導体材料によって提供できるため、モバイル端末やウェアラブル端末など他の半導体デバイスとの融合による新たなTHz技術の応用展開も期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, an ultra-small terahertz (THz) source was proposed based on semiconductor photonic crystal waveguides (PhC-WGs) with highly efficient difference frequency generation (DFG), and a proof-of-principle demonstration was performed. The structurally optimized PhC-WG provided a waveguide mode with low-group-velocity and low-dispersion (LVLVD) for two introduced fundamental lights; thus, the electric fields of the lights were enhanced, and a phase matching between them was achieved. Numerical simulations indicated that the DFG intensity was enhanced by more than two orders of magnitude compared with that of the bulk material in the range of approximately 0.5-2 THz. The possibility of an ultra-compact all-in-one THz wave source using an integrated PhC-WG heterostructure was also demonstrated, including the fundamental light sources formed in two PhC-WGs connected to the LVLVD PhC-WG.

研究分野：半導体材料、光応用

キーワード：フォトニック結晶導波路 テラヘルツ波源 差周波発生

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ(THz)波は、電波と光波の間周波数帯(100GHz-10THz)の電磁波であり、透過性や直進性が高く、また人体に対し安全といった特長から、センシングやイメージング、次世代通信技術などへの応用が期待されている[1,2]。しかしながら、周波数が THz 領域の電磁波は熱の影響を受けやすく、また、適当な光学利得媒体が少ないといったことから、高出力な THz 波発生源の開発が困難であった。この状況は THz ギャップと呼ばれ、その克服のために様々な THz 波発生技術の研究がなされてきた。その一つに、非線形光学(NLO)現象である差周波発生(DFG)の利用がある。DFG は、NLO 媒体に周波数の異なる二つの高強度な基本光を導入する際に、基本光の周波数差に相当する電磁波が発生する現象で、電子の反転分布を必要としないため、室温下での高出力動作が可能である。さらに、出力する電磁波の周波数が基本光間の差周波数で決定されるため、広い周波数可変性を持つ。このような特長から、DFG を利用した THz 波発生 (THz-DFG) の研究が多くなされてきているが、現状利用できる NLO 媒体の種類に限られており、より高効率な THz-DFG を実現する新規材料の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、高効率な THz-DFG に資する新たな NLO 媒体として半導体ナノフォトニクス材料を用いた THz 波源の提案と、その原理実証を目指した。具体的には、人工的に光分散関係を制御可能な二次元フォトニック結晶導波路(PhC-WG)を半導体薄膜に形成し、PhC-WG を伝搬する二つの基本光からの THz-DFG を高効率に発生させる。半導体薄膜に形成される二次元 PhC-WG は、光の閉じ込めが非常に強く、NLO 現象を高効率に発生する[3]。また、導波路を伝搬する光のモードの分散関係を、フォトニック結晶の構造設計により制御できるため、広帯域にわたり低群速度かつ低分散な分散関係を実現できる[4]。これらの特性を利用して、高効率 DFG に必要な、基本光の電場増強や位相整合といった条件を満たすことが可能となる。さらに、分散関係を変化させた複数の PhC-WG 構造を集積化し、それぞれの内部に量子井戸や量子ドットなどの発光材料を埋め込むことで、増強された異なる波長の基本光を発生するヘテロ PhC-WG 構造を作製できる[5]。本研究では、この構造を用いた外部励起光不要のオールインワン THz 波源も提案し、これらの提案手法の原理実証を、数値シミュレーションを中心に行った。

3. 研究の方法

(1) 低群速度・低分散フォトニック結晶導波路による高効率 THz-DFG の検証

DFG の高効率化には、(1)高い非線形係数、(2)強い基本光電場、(3)位相整合、を満たす必要がある。我々が提案する手法は、二次元 PhC-WG における光導波路モードの分散関係を最適設計することで、上記の条件を満たす。PhC-WG は、半導体薄膜に周期的な空孔を形成して得られる二次元フォトニック結晶に、一列の線欠陥 (空孔除去列) を設けて実現される (図 1)。この半導体薄膜材料に反転対称性のない GaAs を用いることで、高い二次の非線形係数が得られる。さらに、PhC-WG 近傍の空孔列の構造変調により、数 THz 程度の帯域の低群速度かつ低分散(LVLD)の分散関係を有する導波路モードが実現され、その中を伝搬する二つの基本光に対し、低群速度による光電場増強と、低分散による位相整合が得られる。これらの効果により、LVLD-PhC-WG から高効率な THz-DFG が期待できる。

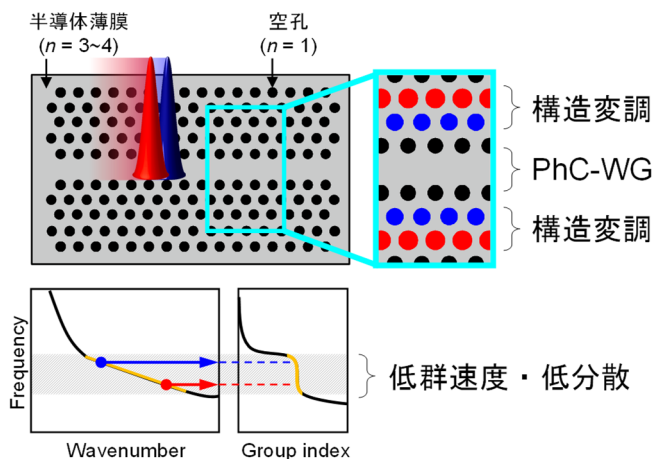


図 1 LVLD-PhC-WG(上)と、その導波路モードの分散関係および群屈折率(下)の模式図

本研究では、まず LVLD-PhC-WG の導波路モードの分散関係（フォトニックバンド）を平面展開法によって求め、導波路近傍の空孔の構造変調に対する導波路モードの変化を系統的に評価した。導波路モードの低群速度化と低分散領域の帯域幅はトレードオフの関係にあり、DFG に必要な周波数差として数 THz 程度の低分散帯域幅を確保しながら、できるだけ低群速度な導波路モードを実現するような LVLD-PhC-WG 構造を目指した。次に、構造最適化された LVLD-PhC-WG 構造に二波長のパルス光を伝搬させ、両者の DFG による THz 波発生を、有限差分時間領域（Finite-difference time-domain: FDTD）法を用いた数値シミュレーションにより検証した。

(2) 集積型ヘテロ PhC-WG 構造によるオールインワン THz 波源の検討

先述の LVLD-PhC-WG に対し、集積化が可能な PhC-WG の特性を活かして、基本光源を含むオールインワン THz 波源を検討した。図 2(上)に示すように、半導体(GaAs)薄膜にヘテロ PhC-WG 構造を形成する。薄膜内には広帯域近赤外発光を示す InAs 量子ドットが埋め込まれ、図 2(下)に示す PhC-WG 導波路モードの低群速度領域で光強度が増強され、レーザー発振に至る[6]。PhC-WG の構造パラメータ（空孔半径 r や格子定数 a ）によって低群速度波長は制御できるため、異なるフォトニックバンドを有する二つの PhC-WG(STD-PhC-WG1, 2)を直列に接合すれば、各領域で発振した異なる周波数のレーザー光が、単一の PhC-WG を伝搬して、比較的群屈折率の近い LVLD-PhC-WG 領域へ高い結合効率で導入されるため、高効率な THz-DFG が期待できる。この構造に対し、FDTD 法による数値シミュレーションによって THz-DFG 強度の検証を行った。

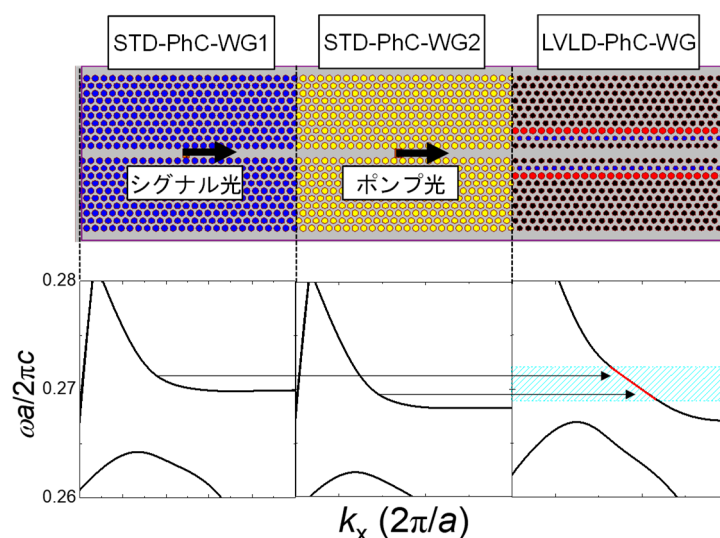


図2 ヘテロ PhC-WG 構造によるオールインワン THz 波源の模式図(上)と、各領域のフォトニックバンド図(下)

4. 研究成果

二次元平面波展開法によって LVLD-PhC-WG のフォトニックバンド構造を求め、構造最適化を行った。PhC-WG 近傍の空孔半径を、導波路に近い方から r_1, r_2, r_3 とし、その他の列の空孔半径 r に対してそれぞれ拡大あるいは縮小したときの PhC-WG モードの分散関係を求め、数 THz 程度の低分散帯域幅を確保しながら、できるだけ低群速度な導波路モードを実現する構造を決定した。なお、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の光が導波路を透過するよう、空孔の格子定数 a を 343 nm 、半径 r を 106 nm （格子定数に対する空孔半径の比 r/a を 0.31 ）とした。図 3 に、構造最適化によって得られた PhC-WG モードの分散関係（実線）の例を示す。導波路近傍の空孔半径 r_2 を $1.1r$ 、 r_3 を $1.25r$ とすることで、点線で示す通常の PhC-WG (STD-PhC-WG) とは異なる分散関係が出現した。 $k_x = 0.4$ 付近に分散関係が一定の傾きを持つ群速度の低分散領域が存在し、その群速度は約 $c/30$ (c : 真空中での光速)であった。この LVLD 領域（図中網掛け部）は、約 2 THz の帯域幅を有しており、この帯域内の周波数を有する二つの基本光（ポンプ光およびシグナル光）を入射すれば、それらの差周波に相当する最大周波数 2 THz の DFG が期待できる。

次に、二波長パルス光の波長を差周波数 1 THz を維持しながら変化させ、導波路を通過するパルス光強度の時間領域変化を計測した結果を図 4 に示す。GaAs 直線導波路（図 4(a)）では、どの入射光波長においても二波長パルス光が空間的に重なり、差周波数に対応したほぼ一定の強度変調が確認された（図 4(d)）。STD-PhC-WG では（図 4(b)）、高群速度領域では低分散特性を有するため二波長パルス光が重なり、差周波数に対応した強度変調が発生した。しかし、低群速度領域では大きな群速度分散によって両パルス光が空間的に分離し、差周波数に対応した強度変調は確認されなかった（図 4(e)）。

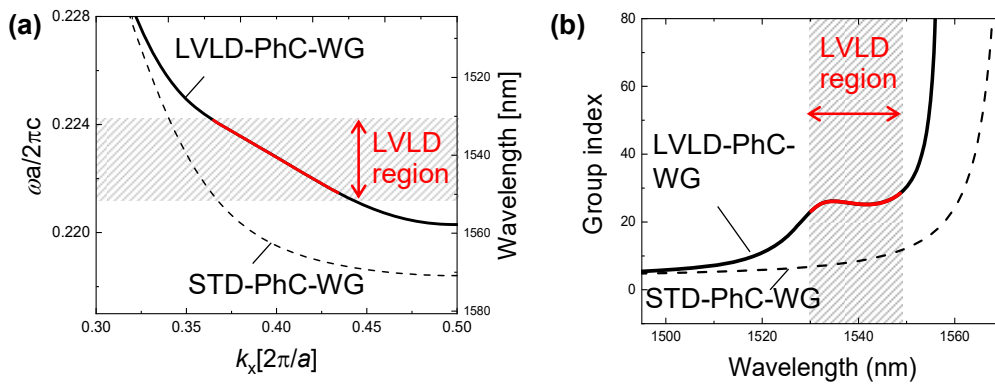


図3 LVLD-PhC-WG(実線)および STD-PhC-WG(破線)の分散関係(a)と群屈折率分散(b)

一方で、LVLD-PhC-WG では (図 4 (c))、LVLD 領域において両パルス光は等しい低群速度で伝搬するため、導波路内で高強度の光電場と差周波数に対応した信号変調が同時に発生していることが確認された(図 4 (f))。これらの結果から、LVLD-PhC-WG で、「高強度の光電場」および「屈折率の一致(位相整合)」が実現されており、差周波に対応した THz-DFG の高効率な発現が示された[7]。

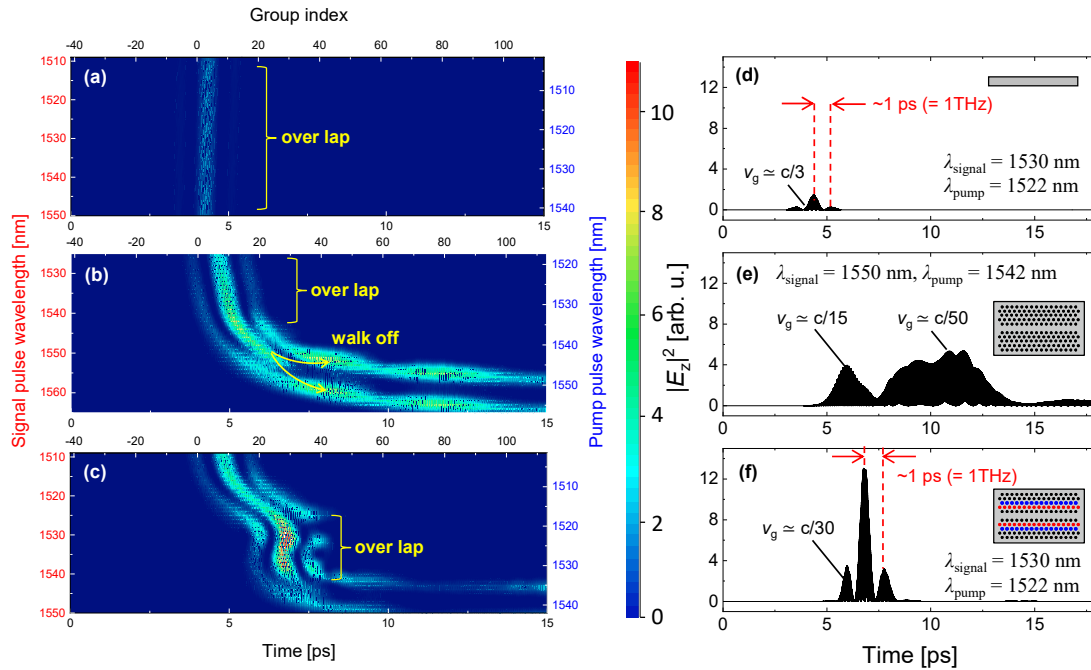


図4 GaAs 直線導波路、STD-PhC-WG、LVLD-PhC-WG の各導波路に差周波数 1THz の二波長パルス光を伝搬させた際の時間領域での光強度の変化

THz-DFG の発生強度を定量比較するため、GaAs 直線導波路と LVLD-PhC-WG で得られた時間領域での信号強度 (図 4 (d), (f)) をフーリエ変換し、周波数領域のスペクトルを求めた (図 5 (a))。両導波路から、周波数 1 THz にピーク強度を有する THz 波の発生が確認されたが、LVLD-PhC-WG では GaAs 直線導波路で発生した THz 波と比較して、約 280 倍のピーク強度が確認された。この結果は、LVLD-PhC-WG を伝搬する二波長パルス光に対する群屈折率が GaAs 直線導波路と比較して約 10 倍にそれぞれ増大し、さらに、PhC-WG 内の強い光閉じ込め効果が作用したことで、THz 波発生効率が増大したためと考えられる。また、LVLD-PhC-WG において、異なる差周波数に対して同様に得られた THz-DFG の発生強度を比較すると、ほぼ同じ強度が得られ (図 5 (b))、約 0.5–2 THz の周波数可変性が確認できた。

最後に、ヘテロ PhC-WG 構造を用いたオールインワン THz 波源 (図 2) における THz-DFG のシミュレーション結果を図 6 に示す。差周波数 1 THz の二つの基本光 (CW 光) を、二つの PhC-WG(STD-PhC-WG1, 2)領域から LVLD-PhC-WG へ導入したときの THz-DFG 強度(図 6 (a)赤線)は、LVLD-PhC-WG 部分を同幅の GaAs 直線導波路に置き換えた構造(図 6 (a)黒線)に比べ、約 136 倍のピーク強度となっており、強度増強効果が確認された[8]。

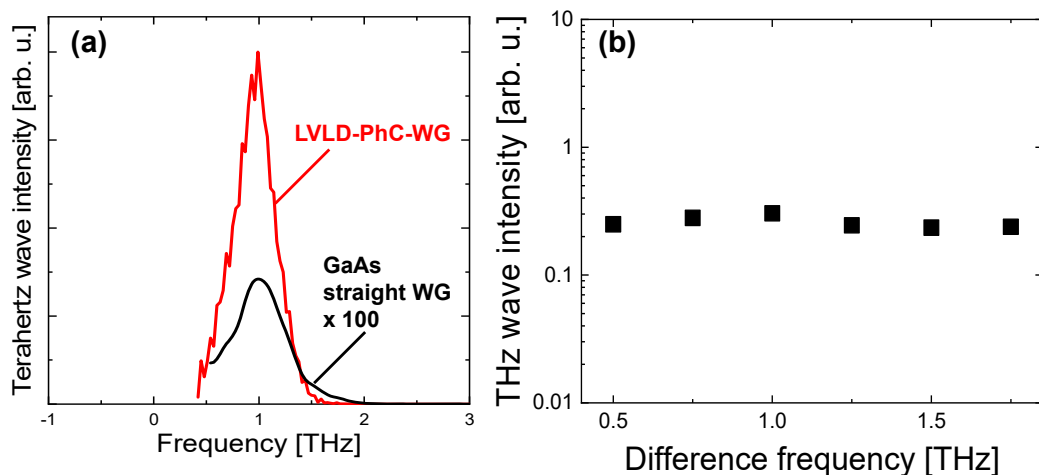


図5 (a) GaAs 直線導波路(黒線)、LVLD-PhC-WG(赤線)の各導波路内で発生した、差周波数 1THz の DFG スペクトルの比較 (b)異なる差周波数に対する THz-DFG の強度

また、伝搬光の強度から、LVLD-PhC-WG への結合効率を算出したところ、STD PhC-WG1 から LVLD PhC-WG へのシグナルパルス光の結合効率は 90.2%、STD PhC-WG2 から LVLD PhC-WG へのポンプパルス光の結合効率は 98.8%であった。外部光源から LVLD PhC-WG へ導入した際の結合効率約 13%に比べ約 7 倍の結合効率であり、オールインワン光源の優位性が示された。さらに、THz-DFG 強度の励起光強度依存性を調べた結果、図 6 (b)に示すように THz-DFG 強度が励起光強度増加に対して二次的増加傾向を示した。この結果から、シミュレーションによって得られた THz 波は二次的非線形分極による DFG であることが改めて確認された。

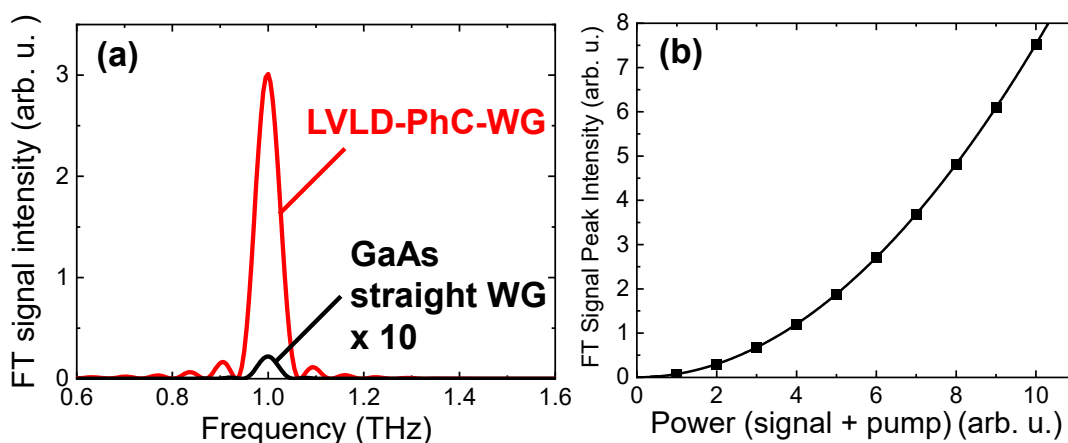


図6 (a)GaAs 直線導波路(黒線)、LVLD-PhC-WG(赤線)の各導波路内で発生した差周波数 1THz の DFG スペクトルの比較 (b)フーリエ変換によって得られたパワースペクトルのピーク強度 (■)の入射光強度依存性

以上の結果から、二次元 LVLD-PhC-WG を活用した高効率 THz-DFG の原理実証がなされた。PhC-WG モードの分散関係を制御することで、DFG に適した LVLD 特性が実現され、約 0.5–2 THz の範囲でバルク材料と比べて二桁以上の DFG 強度増加が見込まれた。また、この構造を集積型ヘテロ PhC 構造に導入し、基本光源を含む超小型のオールインワン THz 波源の可能性が示された。今後、これらの提案手法を活用した革新的な THz 波源の実用化が期待される。

<引用文献>

- [1] M. Tonouchi, Nat. Photon. **1**, 97 (2007).
- [2] M. Hangyo, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 120101 (2015).
- [3] M. Soljačić and J. D. Joannopoulos, Nat. Mater. **3**, 211 (2004).
- [4] S. Kubo, D. Mori, and T. Baba, Opt. Lett. **32**, 2981 (2007).
- [5] S. Uchida, N. Ozaki, T. Nakahama, H. Oda, N. Ikeda, and Y. Sugimoto, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 050303 (2017).
- [6] H. Oda, A. Yamanaka, N. Ozaki, N. Ikeda, and Y. Sugimoto, AIP adv. **6**, 065215 (2016).
- [7] T. Nakahama, N. Ozaki, H. Oda, N. Ikeda, and Y. Sugimoto, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 090903 (2020).
- [8] Y. Koyama, H. Oda, N. Ikeda, Y. Sugimoto, and N. Ozaki, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SG1033 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koyama Yota, Oda Hisaya, Ikeda Naoki, Sugimoto Yoshimasa, Ozaki Nobuhiko	4. 巻 62
2. 論文標題 Proposal and numerical verification of an ultrasmall terahertz source using integrated photonic crystal waveguides for highly efficient differential frequency generation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1033 ~ SG1033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acc18d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Oda Hisaya, Hosokawa Youhei, Hayashi Kazuki, Ozaki Nobuhiko, Ikeda Naoki, Sugimoto Yoshimasa	4. 巻 16
2. 論文標題 Broadband optical wavelength conversion through four-wave mixing in W3-type AlGaAs photonic crystal waveguides	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 022004 ~ 022004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acba7c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Oshima Jin, Ozaki Nobuhiko, Oda Hisaya, Watanabe Eiichiro, Ohsato Hiroataka, Ikeda Naoki, Sugimoto Yoshimasa, Hogg Richard A.	4. 巻 61
2. 論文標題 Near-infrared dual-wavelength surface-emitting light source using InAs quantum dots resonant with vertical cavity modes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1003-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5b24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakahama Teruyuki, Ozaki Nobuhiko, Oda Hisaya, Ikeda Naoki, Sugimoto Yoshimasa	4. 巻 59
2. 論文標題 Numerical investigation of highly efficient and tunable terahertz-wave generation using a low-group-velocity and low-dispersion two-dimensional GaAs photonic crystal waveguide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 090903 ~ 090903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abaa93	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小田 奈菜穂, 小山 陽太, 尾崎 信彦
2. 発表標題 低群速度低分散フォトニック結晶導波路の広帯域化に向けた構造探索
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2023年度第2回講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎 信彦
2. 発表標題 フォトニック結晶を利用した高効率差周波発生と超小型テラヘルツ波源への応用
3. 学会等名 大阪公立大学・和歌山大学 第10回工学研究シーズ合同発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yota Koyama, Hisaya Oda, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, and Nobuhiko Ozaki
2. 発表標題 Integrated heterostructure of photonic crystal waveguides for ultra-small terahertz source applications
3. 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山 陽太、小田 久哉、池田 直樹、杉本 喜正、尾崎 信彦
2. 発表標題 高効率テラヘルツ波発生へ向けた低群速度・低分散フォトニック結晶導波路のヘテロ接合モデル(II)
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小山 陽太、尾崎 信彦、小田 久哉、池田 直樹、杉本 喜正
2. 発表標題 高効率テラヘルツ波発生へ向けた低群速度・低分散フォトニック結晶導波路のヘテロ接合モデル
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山 陽太、尾崎 信彦、小田 久哉、池田 直樹、杉本 喜正
2. 発表標題 ヘテロ接合型低群速度・低分散フォトニック結晶導波路を用いた高効率テラヘルツ波発生を検討
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 尾崎信彦、小田久哉	4. 発行年 2024年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 -
3. 書名 テラヘルツ波の発生、検出、制御技術と応用展開	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	池田 直樹 (Ikeda Naoki) (10415771)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・技術開発・共用部門・主任エンジニア (82108)	

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	小田 久哉 (Oda Hisaya) (60405701)	公立千歳科学技術大学・理工学部・准教授 (20106)	

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