

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02631

研究課題名（和文）スクイーズド光発生用半導体レーザ励起窒化物半導体導波路型非線形光学デバイスの開発

研究課題名（英文）Development of semiconductor laser pumped nitride semiconductor waveguide nonlinear optical devices for squeezed light generation

研究代表者

上向井 正裕（Uemukai, Masahiro）

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80362672

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：高分解能リソグラフィや結晶再成長を必要としない比較的簡便なプロセスで作製可能な高次結合深溝DBRグレーティング及び周期的スロット構造を用いた400 nm帯半導体レーザの作製・評価を行い、後者から単一モード発振と波長可変特性がこの波長帯で初めて得られた。また窒化物半導体の極性を反転して積層した新規構造導波路型非線形光学デバイスの設計・作製を行い、229～438 nmの広範囲の波長帯で第二高調波発生を確認した。励起光をこの構造においてスクイーズド光発生に必要な高次モード導波光に結合するグレーティング入力結合器を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光集積デバイスの光源となりうるInGaN波長可変単一モードレーザの開発に成功したことから、波長変換デバイスや導波路型マッハツェンダー干渉計などと1チップに集積した小型で高機能なモノリシック光集積デバイスの実現に向け前進したといえる。

また窒化物半導体の極性を反転して積層した新規構造導波路型非線形光学デバイスの設計・作製手法を確立するとともに、超短パルスレーザ励起においてウォークオフを考慮した理論値が実験値と比較的一致するなど評価手法においても多くの知見を得た。

研究成果の概要（英文）：400 nm band semiconductor lasers using a high-order deep groove DBR grating and periodically slotted structure, which can be fabricated by a relatively simple process without high-resolution lithography and crystal regrowth, were fabricated and evaluated. From the latter, single-mode oscillation and tunable characteristics were obtained for the first time in this wavelength band.

In addition, novel waveguide nonlinear optical device with vertical polarity inversion of nitride semiconductors were designed and fabricated, and second harmonics generations were confirmed in a wide wavelength range of 229-438 nm. A grating input coupler that couples a pump light to a high-order mode guided light required for squeezed light generation in the structure was developed.

研究分野：光工学・光子科学

キーワード：窒化物半導体 半導体レーザ 非線形光学デバイス 量子情報処理

1. 研究開始当初の背景

近年、ビッグデータ解析や人工知能 (AI) 開発のため、劇的な計算速度向上が見込まれる量子コンピュータの実現が期待されている。種々の方式の量子コンピュータの研究が進む中で、光を用いる系は室温・大気中での動作が可能で量子ビットの緩和時間が長いことから有力視されている。光量子コンピュータは励起光源・量子光源・量子回路・検出器から構成されるが、量子回路部分については数 cm オーダのシリカ系導波路型光集積デバイスを用いて量子計算が実証され大幅な小型化がなされた。

しかし光量子コンピューティングに必要なスクイズド光の発生には、励起光源として大型のチタンサファイアレーザが、量子光源としてバルク擬似位相整合 (QPM) 強誘電体非線形光学結晶がまだに用いられている。しかも強誘電体結晶は光損傷耐性が低いことから強励起できず、高品質なスクイズド光を得るためにはボウタイ型共振器中に強誘電体結晶を配置した複雑・不安定な光パラメトリック発振器 (OPO) に頼らざるを得ない。励起光源・量子光源をそれぞれ半導体レーザとシングルパス導波路型光パラメトリック増幅器 (OPA) に置き換えることができなければ、いかに量子回路が小型化されようとも小型で実用的な光量子コンピュータは実現しない。

2. 研究の目的

本研究では、強誘電体結晶に匹敵する高い光学非線形性を有する GaN 極性窒化物半導体結晶を用いた高効率な導波路型非線形光学デバイスおよび、これを励起する InGaN 量子井戸波長可変単一モードレーザを開発し、光量子コンピューティングに応用可能な小型・低消費電力で実用的なスクイズド光発生源を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

InGaN 量子井戸波長可変単一モードレーザについては、高分解能リソグラフィや結晶再成長を必要としない高次結合深溝 DBR グレーティングや周期的スロット構造を用いた波長可変単一モードレーザを作製・評価する。これらの深溝周期構造を採用した 800 nm 帯半導体レーザで実際に単一モード発振と波長可変特性が得られており、この構造を InGaN 量子井戸半導体レーザに適用する。

窒化物半導体導波路型非線形光学デバイスについては、GaN の極性を反転して積層することで効率化を測った横型擬似位相整合 (QPM) 構造を新規開発し、まずはスクイズド光を発生する光パラメトリック下方変換 (OPDC) の逆過程である第二高調波発生 (SHG) を実証し、横型 QPM 構造の有効性を確認する。その後、励起光を高次モード導波光に結合させるグレーティング入力結合器を集積したデバイスを作製して、OPDC を実証する。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

InGaN 波長可変単一モードレーザとして、高分解能リソグラフィや結晶再成長を必要としない比較的簡便なプロセスで作製可能な高次結合深溝 DBR グレーティング及び周期的スロット構造を用いた 400 nm 帯半導体レーザの作製・評価を行った。特に後者から単一モード発振と波長可変特性がこの波長帯で初めて得られたので、[図 1](#) で報告する。

また窒化物半導体導波路型非線形光学デバイスについては、強誘電体結晶で広く用いられている光軸方向に極性を周期的に反転させる擬似位相整合 (QPM) 構造の形成が窒化物半導体は困難なことから、極性を垂直方向に反転して積層する横型 QPM 構造を採用した。この構造において単層導波路と比較して非線形光学定数の大幅な増大が得られことを確認し、実際に表面活性化接合または極性反転エピタキシャル成長の手法を用いて GaN または AlN 横型 QPM 構造チャンネル導波路を作製した。特にグレーティング入力結合器 (GC) を集積したことで効率評価が可能になった GC 集積 GaN 横型 QPM SHG デバイスおよび、人体に無害な殺菌・消毒が可能な波長 230 nm 帯遠紫外光を発生する SHG デバイスにおいて得られた成果を、[図 2](#) で報告する。

InGaN 波長可変単一モードレーザ

InGaN 周期的スロット構造レーザはリッジ型活性チャンネルおよび周期的スロット構造で構成される ([図 1](#))。スロット構造の凹凸の長さをそれぞれ 1/4 波長の奇数倍にして、各境界で生じる反射波の位相を揃えることで単一モード発振が得られる。また、スロット領域に電流注入を行うことで波長可変特性が実現できる。伝達行列法を用いて反射スペクトルを計算した。周期的に反射ピークが現れるが、InGaN 量子井戸の利得帯域幅が 20 nm 程度であることを考慮して、反射ピ

ークの間隔が 10 nm となるよう
 スロット周期を 3.3 μm とした。
 スロット長 0.45 μm 、スロット深
 さ 520 nm、スロット数 60、利得
 係数 40 cm^{-1} のとき、反射率と透
 過率はそれぞれ 0.35 と 1.52 と見
 積もられた。

InGaN 周期的スロット構造レ
 ーザの作製を行った。EB 描画に
 より活性チャンネルとスロット構
 造のパターンを形成した。p 側電
 極とマスクを蒸着とリフトオフ
 により形成した。誘導結合型
 (ICP) 反応性イオンエッチング
 (RIE) を用いて活性チャンネルと
 スロット構造を同時に形成した
 (図 2)。SiO₂ 絶縁膜を形成し、
 パッド電極を活性チャンネルと
 スロット領域にそれぞれ形成した。
 基板の研磨後、基板の裏面に n 側
 電極を蒸着した。劈開により両端
 面を形成し、出射端面に無反射コーティングを行った。

活性チャンネルとスロット領域の p 側電極を接続してパルス電流 (幅 1.0 μs , duty 1.0%) を注入
 すると、しきい値電流 223 mA でレーザー発振し、最大出力は 0.37 mW であった。サイドモード抑
 圧比 18.6 dB の単一モード発振を確認した。両領域の p 側電極を分離し、活性チャンネルに 300 mA
 のパルス電流を注入しながら、スロット領域に連続電流 (I_{slot}) を 80 mA まで注入していくと、
 発振波長を 395.9 nm から 396.2 nm まで 0.3 nm シフトさせることに成功した (図 3)。

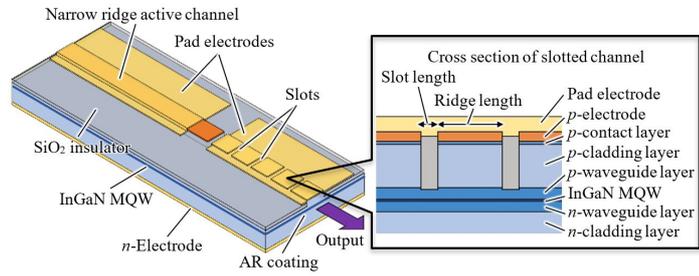


図 1 InGaN 周期的スロット構造レーザー

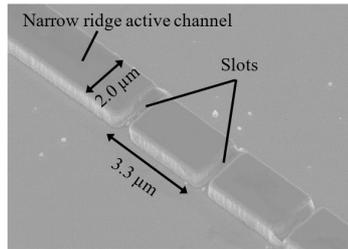


図 2 スロット領域 SEM 像

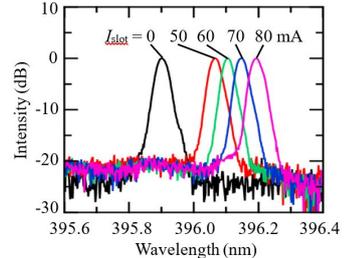


図 3 波長可変特性

グレーティング結合器集積 GaN 非線形光学デバイス

グレーティング結合器 (GC) 集積 GaN SHG デバイスは、入力 GC とスラブ導波路、横型 QPM
 チャンネル導波路で構成される (図 4)。GC に照射されたレーザー光は収束円筒波に波面変換され、
 チャンネル導波路に結合して SH 波に波長変換される。基本波 TM₀₀ モード (波長 825.0 nm) と SH
 波 TM₀₂ モード (波長 412.5 nm) の間でモード
 分散位相整合条件が満たされるよう、幅 1.0
 μm のチャンネル導波路の膜厚を 455 nm とした。
 SH 波 TM₀₂ モードの電界分布の節の 1 つ
 で GaN の極性を反転することによって、非
 線形結合係数 κ は 1.89 $\text{W}^{-1/2}\text{cm}^{-1}$ に増加する。
 GC 開口 $64 \times 82 \mu\text{m}^2$ 、入射角 40° とすると、
 GC 溝深さ 126 nm のとき入力結合効率は
 43% と見積もられた。GC の内部焦点距離は、
 収束導波光のビームウエストがチャンネル導
 波路における導波光の $1/e^2$ 全幅に一致する
 よう 106 μm とした。入力結合効率が 40% に
 低下する位置ずれ許容幅は $\pm 10 \mu\text{m}$ と見積も
 られた。

サファイア基板上的 GaN 極性反転積層導波路を用い
 て、GC 集積 SHG デバイスの作製を行った。EB リソグ
 ラフィと 2 段階の ICP-RIE により、周期 544 nm の GC
 (溝深さ 126 nm) と長さ 3.0 mm のチャンネル導波路 (高
 さ 455 nm) を形成した (図 5 (a))。クラッド層として
 SiO₂ を堆積し、ダイシングと研磨によって導波路出射
 端面を形成した (図 5 (b))。

波長可変チタンサファイア超短パルスレーザー (パル
 ス幅 217 fs、波長半値全幅 13 nm) を用いて波長変換特
 性を評価した。レーザー光を GC に照射し、入射角を調
 整しながらレーザー中心波長を変化させていったとこ
 ろ、波長 877 nm、入射角 34.8° のとき、目視で SH 波が
 観測された。チャンネル導波路端面からの出射光を分光
 器で測定したところ、基本波中心波長は 876.2 nm (半
 値全幅 6.3 nm)、SH 波中心波長は 438.4 nm (2.9 nm) で
 あった (図 6)。また導波路損失からチャンネル導波路に
 入力された基本波パワーを見積り、波長変換効率を求

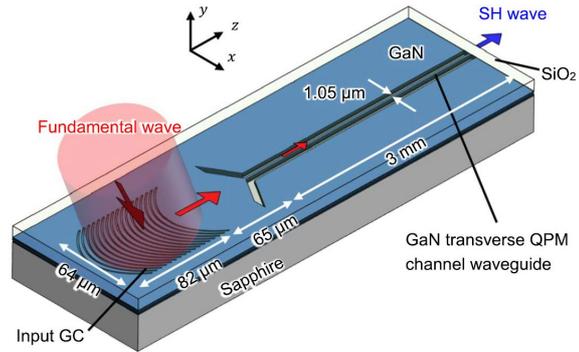


図 4 GC 集積 GaN SHG デバイス

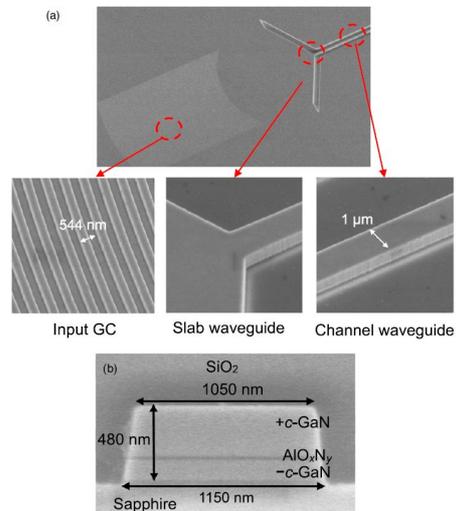


図 5 作製したデバイスの SEM 像

めた。基本波パワーが 0.9 mW 以下の範囲では波長変換効率は基本波パワーにおおよそ比例し、規格化変換効率 η_{SH} は $4.7 \times 10^{-4} \% W^{-1}$ と見積もられた。基本波と SH 波の群屈折率はそれぞれ 2.4 と 3.4 であり、SH 波同士が干渉する範囲（ウォークオフ長）は $69 \mu m$ と計算された。縦モードごとに導波路損失とウォークオフ長を考慮した結合波方程式を解くことで得られた SH 波の波長幅は 1.6 nm であり、規格化変換効率は $1.5 \times 10^{-4} \% W^{-1}$ と計算された。波長幅と効率の実験値との差はそれぞれ膜厚不均一、非線形光学定数の文献値との差に起因すると考えられる。

遠紫外第二高調波発生 AIN 非線形光学デバイス

極性反転 AIN 横型 QPM チャネル導波路の模式図を図 7 に示す。波長 460 nm の基本波 TM₀₀ モードと波長 230 nm の SH 波 TM₀₄ モードが位相整合条件を満たすよう、チャネル導波路の幅と高さをそれぞれ 600 nm、358 nm と決定した。 $-c$ -AIN/ $+c$ -AIN の極性反転界面を SH 波 TM₀₄ モードの節の位置にして非線形光学定数 d_{33} の符号を反転させることで、非線形結合係数 κ は $4.2 W^{-1/2} cm^{-1}$ まで増大した。

スパッタアニール法により成長した極性反転 AIN 薄膜を、設計膜厚までエッチングした。化学的に不安定な $-c$ -AIN 表面の保護を目的として、プラズマ CVD により SiO₂ を堆積した。EB 描画でネガレジストのパターニングを行い、CF₄/H₂ ガスを用いた容量結合型 RIE で SiO₂ ストライプマスクを形成した。その後、Cl₂ ガスを用いた ICP-RIE により 2 層極性反転 AIN チャネル導波路を形成した。Ni マスクに代わって SiO₂ マスクを採用したことで、導波路側壁粗さの大幅な低減が見られた（図 8）。最後に、導波路保護のための SiO₂ クラッド層堆積と端面形成を行った。

波長可変チタンサファイア超短パルスレーザを BBO 結晶に入射し、発生した SH 波をデバイスの励起光とした。波長 458 nm、平均パワー 3 mW のレーザを導波路入射端面に照射し TM モード導波光に結合させたとき、波長約 229 nm の遠紫外光が発生した。SH 光強度の基本波パワー依存性や偏光特性から、最大の非線形光学定数 d_{33} を介した SHG であることを確認した（図 9）。

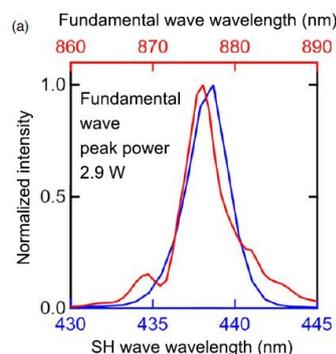


図 6 基本波・SH 波スペクトル

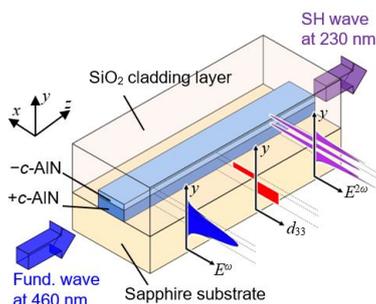


図 7 AIN 横型 QPM 導波路

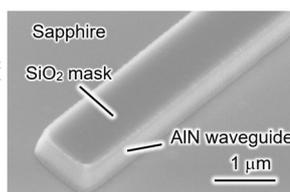


図 8 チャネル導波路 SEM 像

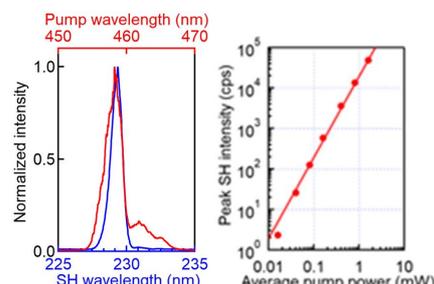


図 9 229 nm SHG 特性

(2) 国内外における位置づけとインパクト

高分解能リソグラフィや結晶再成長を必要としない比較的簡便な作製プロセスを用いて、400 nm 波長帯の波長可変単一モードレーザを開発した。国内外のグループで研究されていた単一モードレーザでは 1 枚のチップ上にほとんどの素子を集積するモノリシック光集積デバイスの光源とはなり得なかったが、この成果により半導体レーザを含む高機能光集積デバイスの実現に向け前進したと言える。

窒化物半導体の極性を反転して積層した新規構造導波路型非線形光学デバイスにおいて、OPDC の逆過程である SHG で原理実証を行った。種々の手法で作製した GaN または AIN 非線形光学デバイスにおいて 229 ~ 438 nm の広範囲の波長帯で SHG を確認した。さらに微小共振器を構成することで極性反転を不要とした全長 $10 \mu m$ 程度の超短尺 SHG デバイスの開発にも成功した。特に短波長紫外光発生インパクトは高く、複数の半導体関連メーカーから共同研究の申し込みがあり、協業を開始している。

(3) 今後の展望

光集積デバイスの光源となりうる InGaN 波長可変単一モードレーザの開発に初めて成功したことから、今後は波長変換デバイスおよび導波路型マツハツエンダー干渉計などを 1 チップに集積したモノリシック光集積デバイスの開発を進める。また励起光を基本モード導波光に結合するグレーティング結合器を集積した SHG デバイスの開発に成功しており、また新規構造非線形光学デバイスにおいて OPDC に必要な高次モード導波光を生成するグレーティング結合器の動作確認を行ったことから、今後グレーティング結合器集積 OPDC デバイスを作製し波長変換特性を詳細に調査する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishihara Hiroki, Shimada Keiya, Umeda Soshi, Yokoyama Naoki, Honda Hiroto, Kurose Kazuhiro, Kawata Yoshimasa, Sugita Atsushi, Inoue Yoku, Uemukai Masahiro, Tanikawa Tomoyuki, Katayama Ryuji, Nakano Takayuki	4. 巻 61
2. 論文標題 Fabrication and evaluation of rib-waveguide-type wavelength conversion devices using GaN-QPM crystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SK1020 ~ SK1020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac727a	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 Yokoyama Naoki, Morioka Yoshiki, Murata Tomotaka, Honda Hiroto, Serita Kazunori, Murakami Hironaru, Tonouchi Masayoshi, Tokita Shigeki, Ichikawa Shuhei, Fujiwara Yasufumi, Hikosaka Toshiki, Uemukai Masahiro, Tanikawa Tomoyuki, Katayama Ryuji	4. 巻 15
2. 論文標題 Second harmonic generation in GaN transverse quasi-phase-matched waveguide pumped with femtosecond laser	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 112002 ~ 112002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac9511	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 Murata Tomotaka, Ikeda Kazuhisa, Yamasaki Jun, Uemukai Masahiro, Tanikawa Tomoyuki, Katayama Ryuji	4. 巻 -
2. 論文標題 Polarity Inversion of GaN via AlN Oxidation Interlayer Using Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2200583 ~ 2200583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202200583	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 Hiroto Honda, Soshi Umeda, Kanako Shojiki, Hideto Miyake, Shuhei Ichikawa, Jun Tatebayashi, Yasufumi Fujiwara, Kazunori Serita, Hironaru Murakami, Masayoshi Tonouchi, Masahiro Uemukai, Tomoyuki Tanikawa, Ryuji Katayama	4. 巻 16
2. 論文標題 229 nm far-ultraviolet second harmonic generation in vertically polarity inverted AlN bilayer channel waveguide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Nambu Tomoaki, Nagata Takumi, Umeda Soshi, Shiomi Keishi, Fujiwara Yasufumi, Hikosaka Toshiki, Mannan Abdul, Bagsican Filchito Renee G., Serita Kazunori, Kawayama Iwao, Tonouchi Masayoshi, Uemukai Masahiro, Tanikawa Tomoyuki, Katayama Ryuji	4. 巻 14
2. 論文標題 Monolithic microcavity second harmonic generation device using low birefringence paraelectric material without polarity-inverted structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 061004 ~ 061004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abff9e	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 Yokoyama Naoki, Tanabe Ryo, Yasuda Yuma, Honda Hiroto, Ichikawa Shuhei, FUJIWARA Yasufumi, HIKOSAKA TOSHIKI, Uemukai Masahiro, TANIKAWA Tomoyuki, KATAYAMA Ryuji	4. 巻 61
2. 論文標題 GaN channel waveguide with vertically polarity inversion formed by surface activated bonding for wavelength conversion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac57ab	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63件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 H. Honda, K. Shujiki, H. Miyake, S. Ichikawa, Y. Fujiwara, M. Uemukai, T. Tanikawa, R. Katayama
2. 発表標題 Design and Fabrication of Transverse Quasi-Phase-Matched HfO ₂ /AlN Channel Waveguide for 230-nm Far-UV Second Harmonic Generation
3. 学会等名 International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Honda, S. Umeda, K. Shojiki, H. Miyake, M. Kushimoto, Y. Fujiwara, M. Uemukai, T. Tanikawa and R. Katayama
2. 発表標題 Design of Transverse Quasi-Phase-Matched Non-Polar/AlN Waveguides for 230-nm Far-UV Second Harmonic Generation
3. 学会等名 2022 Materials Research Society Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田 啓人、正直 花奈子、上杉 謙次郎、三宅 秀人、芹田 和則、村上 博成、斗内 政吉、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 HfO ₂ /AlN横型擬似位相整合チャネル導波路を用いた230 nm遠紫外第二高調波発生
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田 啓人、正直 花奈子、上杉 謙次郎、三宅 秀人、芹田 和則、村上 博成、斗内 政吉、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 2層極性反転AlN横型擬似位相整合チャネル導波路を用いた230 nm遠紫外第二高調波発生
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田 和久、村田 知駿、市川 修平、藤原 康文、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 MOVPEエピタキシャル極性反転技術を用いたGaN横型擬似位相整合光子対発生デバイスの作製
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Honda, S. Umeda, K. Shojiki, H. Miyake, S. Ichikawa, J. Tatebayashi, Y. Fujiwara, K. Serita, H. Murakami, M. Tonouchi, M. Uemukai, T. Tanikawa and R. Katayama
2. 発表標題 Second Harmonic Generation of 230 nm DUV Light from Transverse Quasi-Phase-Matched -c-AlN/+c-AlN Channel Waveguide
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Murata, K. Ikeda, J. Yamazaki, T. Tanikawa, M. Uemukai and R. Katayama
2. 発表標題 Polarity Inversion of GaN via AlN Oxidation Interlayer using Metalorganic Vapor Phase Epitaxy
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Nambu, M. Uemukai, T. Tanikawa, R. Katayama
2. 発表標題 Blue Second Harmonic Generation from GaN Monolithic Microcavity
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Ikeda, T. Murata, S. Ichikawa, Y. Fujiwara, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama
2. 発表標題 Fabrication of GaN Transverse Quasi Phase Matching Photon Pair Generation Device using MOVPE-Based Epitaxial Polarity Inversion Technology
3. 学会等名 第41回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Furukawa, H. Honda, K. Shojiki, K. Uesugi, H. Miyake, K. Serita, H. Murakami, M. Tonouchi, M. Uemukai, T. Tanikawa and R. Katayama
2. 発表標題 Demonstration of 230-nm Far-UV Second Harmonic Generation from HfO ₂ /AlN Transverse Quasi-Phase Matched Channel Waveguide
3. 学会等名 第41回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田 啓人、正直 花奈子、上杉 謙次郎、三宅 秀人、市川 修平、舘林 潤、藤原 康文、芹田 和則、村上 博成、斗内 政吉、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 2層極性反転AlN横型擬似位相整合チャネル導波路による遠紫外第二高調波発生
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 嶋田 慶也、石原 弘基、梅田 颯志、横山 尚生、本田 啓人、井上 翼、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二、中野 貴之
2. 発表標題 GaN-QPM結晶を用いた波長変換デバイスの作製および諸特性評価
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野呂 諒介、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 高効率スクイーズド光発生に向けた MgO:CLN/GaN横型擬似位相整合導波路波長変換デバイスの作製
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古川 裕也、池田 和久、本田 啓人、村田 知駿、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 グレーティング結合器集積化GaN横型擬似位相整合光子対発生デバイスの設計と作製
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本田 啓人、百崎 怜、玉野 智大、正直 花奈子、三宅 秀人、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 多層極性反転 AlN 構造を用いた横型 QPM 導波路の設計
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 玉野 智大、正直 花奈子、本田 啓人、上杉 謙次郎、肖 世玉、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二、三宅 秀人
2. 発表標題 マルチ・スパッタアニール法による多層極性反転AlN構造の作製
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 N. Yokoyama, Y. Morioka, T. Murata, H. Honda, F. R. G. Bagsican, K. Serita, H. Murakami, M. Tonouchi, S. Ichikawa, Y. Fujiwara, M. Uemukai, T. Tanikawa, R. Katayama
2. 発表標題 Experimental Determination of Wavelength Conversion Efficiency in Transverse Quasi-Phase-Matched GaN SHG Waveguide Excited with Femtosecond Laser
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本田啓人、梅田颯志、正直花奈子、三宅秀人、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 230 nm遠紫外第二高調波発生に向けた横型擬位相整合HfO ₂ /AlN導波路の設計
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅田颯志、本田啓人、南部誠明、市川修平、藤原康文、正直花奈子、三宅秀人、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 230 nm遠紫外第二高調波発生に向けた横型擬似位相整合2層極性反転AlN導波路の作製
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田知駿、谷川智之、上向井正裕、片山竜二
2. 発表標題 有機金属気相成長法を用いたGaNエピタキシャル極性反転技術の開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Yokoyama, H. Honda, T. Murata, K. Serita, H. Murakami, M. Tonouchi*, S. Tokita, S. Ichikawa, Y. Fujiwara, M. Uemukai, T. Tanikawa and R. Katayama
2. 発表標題 Efficiency Evaluation of GaN Transverse Quasi-Phase-Matched Wavelength Conversion Device under Femtosecond Laser Excitation
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Murata, T. Tanikawa, M. Uemukai and R. Katayama
2. 発表標題 Fabrication of GaN Polarity Inverted Structure via Ultrathin AlN Oxidation Interlayer using Metalorganic Vapor Phase Epitaxy
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Honda, K. Shojiki, H. Miyake, M. Uemukai, T. Tanikawa and R. Katayama
2. 発表標題 Design of Non-Polar/AlN Transverse Quasi-Phase Matched Channel Waveguides for 230-nm Far-UV Second Harmonic Generation
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Umeda, H. Honda, T. Nambu, S. Ichikawa, Y. Fujiwara, K. Shojiki, H. Miyake, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama
2. 発表標題 Improved Fabrication of Transverse Quasi-Phase-Matched Double-Layer Polarity Inverted AlN Waveguide for 230-nm Second Harmonic Generation
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野呂 諒介、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 高効率スクイーズド光発生に向けたLiNbO3/GaN横型擬位相整合波長変換デバイスの設計
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 本田 啓人、依 悠弥、藤原 康文、正直 花奈子、三宅 秀人、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 230 nm遠紫外第二高調波発生に向けたHfO2/AlN横型擬位相整合チャネル導波路の作製
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 A. Higuchi, D. Tazuke, M. Uemukai, T. Tanikawa, R. Katayama
2. 発表標題 Fabrication process of InGaN high-order deeply etched DBR laser
3. 学会等名 The 8th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Umeda, T. Nagata, M. Uemukai, T. Tanikawa, R. Katayama
2. 発表標題 Design of AlN doubly-resonant waveguide microcavity SHG device
3. 学会等名 The 8th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山尚生、森岡佳紀、森川隆哉、藤原康文、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 グレーティング結合器集積GaN横型擬似位相整合第二高調波発生デバイス
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋口晃大、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 周期的スロット構造を用いたInGaN波長可変単一モードレーザ
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山竜二、上向井正裕、谷川智之
2. 発表標題 ワイドギャップ半導体の分極制御と量子光学応用：遠UV-C固体光源
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Nagata, S. Umeda, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama
2. 発表標題 Design of GaN Waveguide Microcavity Device for Broadband Photon Pair Generation
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Hisada, A. Tomibayashi, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama
2. 発表標題 Design of Waveguide Directional Coupler for Electric-Field Driven GaN Mach-Zehnder Interferometer
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Honda, N. Yokoyama, A. Yamauchi, T. Komatsu, K. Shojiki, H. Miyake, M. Uemukai, T. Tanikawa and R. Katayama
2. 発表標題 Design of Transverse Quasi-Phase-Matched Double-Layer AlN Waveguide for 230-nm DUV Second Harmonic Generation
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Higuchi, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama
2. 発表標題 First Demonstration of Tunable Single-Mode InGaN Laser with Periodically Slotted Structure
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Umeda, T. Nagata, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama
2. 発表標題 Design and Fabrication of AlN Waveguide Microcavity SHG Device
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Murata, N. Yokoyama, T. Komatsu, Y. Morioka, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama
2. 発表標題 Transverse Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation using Polarity-Inverted GaN Channel Waveguide with Input Grating Coupler
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山竜二、上向井正裕、谷川智之
2. 発表標題 ワイドギャップ窒化物半導体波長変換デバイスによる紫外光発生
3. 学会等名 応用物理学会 応用電子物性分科会 研究例会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Katayama, M. Uemukai, and T. Tanikawa
2. 発表標題 Novel Method of Short-Wavelength Emission from Polarity-Inverted Nitride Semiconductor Waveguides
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Katayama, M. Uemukai, and T. Tanikawa
2. 発表標題 Novel wavelength converters made of nitride semiconductors: transverse QPM waveguides and monolithic microcavities
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山尚生、村田知駿、本田啓人、市川修平、藤原康文、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 GaN模型擬似位相整合第二高調波発生デバイスの効率評価
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南部誠明、矢野岳人、永田拓実、田辺 凌、梅田颯志、市川修平、藤原康文、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 AlN微小二重共振器型面発光DUV第二高調波発生デバイスの検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本田啓人、永田拓実、市川修平、藤原康文、正直花奈子、三宅秀人、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 230 nm深紫外光発生に向けた2層極性反転AlN導波路の設計と作製
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永田拓実、梅田颯志、隈部岳瑠、安藤悠人、出来真斗、本田善央、天野 浩、トーマスポージン、山田和輝、岩谷素顕、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 広帯域光子対発生に向けたGa _N 導波路型微小共振器デバイスの作製
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋口晃大、松下就哉、上向井正裕、谷川智之、片山竜二
2. 発表標題 InGa _N 高次結合ディープエッチDBRレーザ
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田辺 凌、横山 尚生、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 表面活性化接合により作製した Ga _N 分極反転積層構造の接合強度評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森岡 佳紀、上向井 正裕、上杉 謙次郎、正直 花奈子、三宅 秀人、森川 隆哉、藤原 康文、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 AlN導波路第二高調波発生デバイスのための集光グレーティング結合器
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内 あさひ、小松 天太、池田 和久、上杉 謙次郎、正直 花奈子、三宅 秀人、彦坂 年輝、布上 真也、森川 隆哉、藤原 康文、上向井 正裕、谷川 智之、片山 竜二
2. 発表標題 2層極性反転積層 AlN導波路を用いた深紫外第二高調波発生デバイスの設計
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Uemukai , S. Yamaguchi , A. Yamauchi , D. Tazuke , A. Higuchi , R. Tanabe , T. Tanikawa , T. Hikosaka , S. Nunoue , Y. Hayashi , H. Miyake , Y. Fujiwara and R. Katayama
2. 発表標題 InGaN Laser Pumped Nitride Semiconductor Transverse Quasi-Phase-Matched Waveguide Second Harmonic Generation Devices
3. 学会等名 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Morioka , M. Uemukai , T. Tanikawa , K. Uesugi , K. Shojiki , H. Miyake2 , T. Morikawa , Y. Fujiwara and R. Katayama
2. 発表標題 Input Focusing Grating Coupler for AlN Deep UV Waveguide SHG Device
3. 学会等名 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Komatsu , R. Noro , M. Uemukai , T. Tanikawa and R. Katayama
2 . 発表標題 Benchmark of nonlinear optical crystals for single path waveguide optical parametric amplifier
3 . 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 D. Tazuke , A. Higuchi , T. Hikosaka , T. Oka , S. Nunoue , M. Uemukai , T. Tanikawa and R. Katayama
2 . 発表標題 Design and fabrication of InGaN single mode laser with periodically slotted structure
3 . 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Higuchi , D. Tazuke , T. Hikosaka , T. Oka , S. Nunoue , M. Uemukai , T. Tanikawa and R. Katayama
2 . 発表標題 Optimization of annealing temperature to reduce contact resistance on p GaN toward fabrication of InGaN single mode laser
3 . 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Nagata , S. Umeda , T. Hikosaka , S. Nunoue , T. Morikawa , Y. Fujiwara , M. Uemukai , T. Tanikawa and R. Katayama
2 . 発表標題 Fabrication of GaN doubly resonant waveguide microcavity SHG device
3 . 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Umeda , T. Nagata , T. Hikosaka , S. Nuoue , T. Morikawa , Y. Fujiwara , M. Uemukai , T. Tanikawa and R. Katayama
2 . 発表標題 Design of GaN doubly resonant waveguide microcavity SHG device
3 . 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Morioka , M. Uemukai , K. Uesugi , K. Shojiki , H. Miyake , T. Morikawa , Y. Fujiwara , T. Tanikawa and R. Katayama
2 . 発表標題 Input grating coupler for AlN channel waveguide wavelength conversion device
3 . 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Yamauchi , T. Komatsu , K. Ikeda , K. Uesugi , K. Shojiki , H. Miyake , T. Hikosaka , S. Nunoue , T. Morikawa , Y. Fujiwara , M. Uemukai , T. Tanikawa and R. Katayama
2 . 発表標題 Design of deep ultraviolet second harmonic generation device with double layer polarity inverted AlN waveguide
3 . 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ryo Tanabe , Naoki Yokoyama , Masahiro Uemukai , Tomoyuki Tanikawa and Ryuji Katayama
2 . 発表標題 Bonding Strength of Polarity-Inverted GaN Structure Fabricated by Surface-Activated Bonding
3 . 学会等名 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Nagata , Masahiro Uemukai , Toshiki Hikosaka , Shinya Nunoue , Takaya Morikawa , Yasufumi Fujiwara , Tomoyuki Tanikawa and Ryuji Katayama
2. 発表標題 Design and Fabrication of GaN Doubly-Resonant Waveguide Microcavity SHG Device
3. 学会等名 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Asahi Yamauchi , Tenta Komatsu , Kazuhisa Ikeda , Kenjiro Uesugi , Kanako Syojiki , Hideto Miyake , Toshiki Hikosaka , Shinya Nunoue , Takaya Morikawa , Yasufumi Fujiwara , Masahiro Uemukai , Tomoyuki Tanikawa and Ryuji Katayama
2. 発表標題 Design of Deep Ultraviolet Second Harmonic Generation Device with Double-Layer PolarityInverted AlN Waveguide
3. 学会等名 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Yamauchi , T. Komatsu , K. Ikeda , K. Uesugi , K. Shojiki , H. Miyake , T. Hikosaka , S. Nunoue , T. Morikawa , Y. Fujiwara , M. Uemukai , T. Tanikawa and R. Katayama
2. 発表標題 Second harmonic generation devices with transverse quasi-phase-matched polarity-inverted stacked AlN waveguide
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅田 颯志 , 永田 拓実 , 彦坂 年輝 , 布上 真也 , 上向井 正裕 , 谷川 智之 , 片山 竜二
2. 発表標題 AlN 導波路型微小二重共振器第二高調波発生デバイスの設計
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松 天太, 彦坂 年輝, 布上 真也, 上向井 正裕, 谷川 智之, 片山 竜二
2. 発表標題 横型擬似位相整合GaN 導波路型波長変換デバイスの開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ http://www.qoe.eei.eng.osaka-u.ac.jp/
--

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	片山 竜二 (Katayama Ryuji) (40343115)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	

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
---------	---------