

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686010

研究課題名(和文)極性ワイドギャップ半導体の量子情報処理応用に関する研究

研究課題名(英文)Research on quantum optical application of novel polar widegap semiconductors

研究代表者

片山 竜二 (Katayama, Ryuji)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：40343115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 22,000,000円、(間接経費) 6,600,000円

研究成果の概要(和文)：窒化物半導体に代表されるワイドギャップ半導体における強い二次光学非線形性と励起子光子相互作用に基づき、光パラメトリック下方変換過程と共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程を利用した新規量子相関光子対発生素子の実現を目標とし、その要素技術を開発した。特に導波方向に沿って周期的に極性を反転した縦型擬似位相整合Ga_{0.5}N導波路を作製し、高効率紫色第二高調波発生を実証することで、本材料系の量子光学素子への有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：Based on the strong second-order optical nonlinearity and the exciton-photon interaction in wide-gap semiconductors such as nitrides, fundamental technologies for realizing novel quantum optically correlated photon pair sources have been developed, which will be operated via optical parametric down conversion and resonant hyper parametric scattering processes. Especially the successful demonstration of the high-efficiency violet-colored second harmonic generation from a quasi-phase-matched Ga_{0.5}N waveguide with a periodic-polarity-inverted structure attested the applicability of this material system to the quantum optical devices.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：量子光学 タリング 非線形光学 窒化ガリウム 酸化チタン 分子線エピタキシー 有機金属気相成長 スパッタ

1. 研究開始当初の背景

(1) 量子相関光子対による量子情報処理

現在、計算機が古典論に基づく原理ゆえに素因数分解に莫大な時間がかかることを利用し、秘匿性が要求される通信には、公開鍵暗号が用いられる。ところが、量子演算を用いることで、そのよりどころとなる鍵暗号が容易に破られることが証明されて以来、量子演算・暗号通信の研究が急加速した。量子情報は電子・核スピン、量子準位、光の偏光・位相など様々な量子力学的状態の重ね合わせで表現できるが、このうち光を用いる系は、既存の光ファイバー通信とシームレスにつながり長距離伝送することが容易であるため、最も量子暗号通信に適した系と考えられている。ただし、これらの演算や情報の中継に必須とされる純粋な光の量子状態、特に量子もつれ光子対（量子力学的に相関を持つ二粒子）の発生法は未だ確立されたものは無く、今後材料と素子開発の研究の担う役割が極めて大きい。

(2) 量子相関光子対の実現方法

実際に量子相関を有する光子対の生成方法は、大きく分けて二種類提案されている。

①二次光学非線形性の利用

物質の二次非線形光学応答を用いると、光パラメトリック下方変換 (OPDC) 過程により、一つの光子から二つのもつれた光子対が生成し、生成された二光子に量子力学的相関を持たせることができる。ただし、一般に非線形光学効果は微弱な効果であることから、大きな非線形光学定数、高出力の励起光、分極と光の相互作用を増強するための導波路などのナノ構造の実現が要請される。

②励起子光子相互作用の利用

一方で、励起子の安定な物質中での三次非線形光学応答を用いると、共鳴ハイパーパラメトリック散乱 (RHPS) 過程により、二つの光子から二つのもつれた光子対が生成する。つまり、励起子と光子が強結合した励起子ポラリトンが存在する場合、二つの光子により励起子分子を共鳴励起すると、ポラリトン分散の上枝・下枝の波数ゼロの位置に散乱され、二つのもつれた光子が発生する。

2. 研究の目的

本研究では上記の背景のもと、III-V 族窒化物、II-VI 族酸化物、I-VII 族銅ハライドなどのワイドギャップ半導体による導波路型光学素子作製技術確立し、特に材料に内在する光学非線形性と励起子・光子相互作用を有効に引き出し、量子もつれ光子対の発生を実証することを目的とした。具体的には、高品質な薄膜作製技術と素子加工プロセスを組み合わせ、新規な導波路構造の作製法を確立した。続いて、擬似位相整合導波路からの OPDC、フォトニック結晶等の共振器中のモードと強結合した励起子ポラリトンの RHPS による量子もつれ光子対発生の実証技術の

開発を行い、量子情報処理応用への道を拓くことを目指した。

3. 研究の方法

申請時に検討したワイドギャップ半導体材料のうち、本研究では成膜・素子構造作製技術の確立が最も容易と見込まれる III-V 族窒化物半導体に絞って研究開発を行った。

(1)窒化物半導体非線形光学素子の原理実証

本研究で扱う GaN に代表されるワイドギャップ半導体は、イオン結合性が強い光学非線形性が強く、その非線形光学定数 $\chi^{(2)}$ は、現在非線形光学結晶として用いられる LiNbO₃ に匹敵する。かつウルツ鉱構造が安定相であり、*c* 軸方向に反転対称性が欠如することから、図 1(a,b) に示すように Ga 極性 (+*c*) と N 極性 (-*c*) の二種類の結晶配向が存在する。これらを人為的に作り分け、表裏を反転することで、二次非線形光学テンソルの符号を反転することが可能となれば、非線形光学素子への応用が可能であると考えた。まずこのワイドギャップ半導体が有する光学非線形性が、高効率非線形光学素子に応用できることを実証するために、第二高調波発生の実証実験を行った。素子構造としては図 2(a) に示す、導波路方向に沿って非線形分極を周期的に反転した縦型擬似位相整合 (縦 QPM) 構造とした。

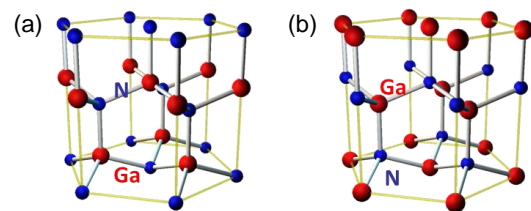


図 1 GaN の結晶構造と配向の表裏: (a) Ga (+*c*) 極性、(b) N (-*c*) 極性。

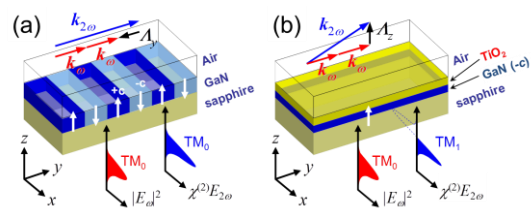


図 2 スラブ導波路型波長変換素子の構造: (a)縦 QPM 構造、(b)横 QPM 構造。

(2)量子光学素子作製の要素技術開発

①光パラメトリック下方変換 (OPDC)

本研究で扱う量子光学素子は、発光ダイオード (LED) やレーザーダイオード (LD) といった、これまでの固体照明・光記録システム用の素子への応用とは切り口を全く異にし、まず世界に先駆けて光学非線形性と OPDC 過程を利用した量子光学的機能の発現を狙うものである。さらに、2010 年には InGaN を用いた青紫色レーザーにおいて、ピーク出力 100 W もの高出力・高繰り返し動作が実証されており、将来的にこれを励起光と

して用い、本研究で新規に開発する導波路型半導体非線形光学素子をエピタキシャルに集積できれば、これまでに例の無い超コンパクトで電流注入型の量子もつれ光源が実現する。本研究で提案する具体的な構造は図2(b)に示す横型 QPM 構造であり、サファイア基板上に GaN 薄膜からなる下部導波層と、アモルファス TiO_x による上部導波層を堆積した単純な構造であり、従来の縦 QPM 構造に比べて作製難度が低いという利点がある。その際、導波方向に沿った位相整合は高調波 $\text{TE}(\text{M})_1$ 高次モードと発生波 $\text{TM}(\text{E})_0$ モードとのモード分散により実現し、一方で、面直方向の位相整合は非線形光学不活性な TiO_x を用いることで二波の横モードの重なり積分を最適化し実現する点に、特徴がある。

②共鳴ハイパーパラメトリック散乱 (RHPS)

本研究で扱うワイドギャップ半導体は共通して、励起子の束縛エネルギーが大きく、室温でも安定である。2004 年には InGaN 量子井戸の室温励起子ポラリトンが観測され、より安定な ZnO や CuCl 中の励起子の利用や、さらなる強結合による励起子・励起子分子の安定化も期待される。ZnO の場合、量子井戸を形成しなくともラビ分裂量は 190 meV と予測されており現存のエピタキシャル成長技術で作製できる共振器構造では最大と目され、さらに CuCl の縦横分裂量（バルク中の励起子ポラリトンの安定性の指標）は、ZnO の更に倍と巨大であり、2004 年にはバルク結晶における 4 K での量子もつれ光子対発生が実証された。特に本研究の後半では、上記の励起子分子を利用した RHPS 過程を想定し、ワイドギャップ半導体からの良質な量子もつれ光子対の実現にかかる要素技術の開発に研究項目を絞り、InGaN 薄膜の高品質化と、量子井戸構造による励起子分子の安定化、新規共振器構造の提案を行った。

4. 研究成果

(1) 平成 23 年度

初年度は、縦 QPM 構造として周期的極性反転 GaN 導波路を作製し、その導波モードの実効屈折率分散測定などの線形光学特性評価により導波路として機能することを確認するとともに、高効率な紫色第二高調波発生を実証した。

①縦 QPM GaN 導波路の作製

まず試料の作製プロセスを図 3 に示す。結晶成長には分子線エピタキシー装置 (MBE, ULVAC MBC-1000S) を用い、まずサファイア(0001)基板表面を低温窒化処理後、厚さ 33 nm の GaN を成長することで、 $-c$ 極性の GaN テンプレートを作製した。続いて、電子線リソグラフィと反応性イオンエッチングを用い、部分的にサファイア基板が露出するよう、周期 2.0~50 μm のラインアンドスペース状に加工した。このテンプレートを再度成長室に導入し、 $+c$ 極性 GaN を実現する成長条

件にて 1.3 μm 再成長した。その際まず高温窒化処理し、厚さ 20 nm の AlN バッファ層を 700°C にて成長したうえで GaN を再成長した。つまり、基板の露出した部分に成長する領域は $+c$ 極性、一方で $-c$ 極性 GaN 上では下地の極性を引き継ぎ $-c$ 極性になることを狙った。

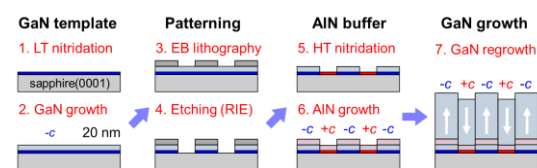


図 3 周期的極性反転 GaN (縦 QPM) 導波路の作製プロセスフロー。

②縦 QPM GaN 導波路の面内極性分布評価

図 4 にピエゾ応答顕微鏡を用いて測定した、(a) 段差像と (b) ピエゾ応答位相の面内分布を示すが、図中の赤・青のコントラストで示されるように、電場印加に対する c 軸方向の伸縮変位の位相が、隣り合うドメイン間で 180° 異なることから、極性反転構造が形成されていることを確認できた。また図 4(a) に原子間力顕微鏡像から、極性反転したドメイン間に高さ 200 nm の段差が存在することが分かった。光学反射率測定による評価によると、 $\pm c$ 両極性領域の平均の膜厚は 1.33 μm と見積もられることから、この周期的な起伏はグレーティングとして働き、グレーティング共鳴を利用することで特定の導波モードを選択励起が可能であることが予測された。

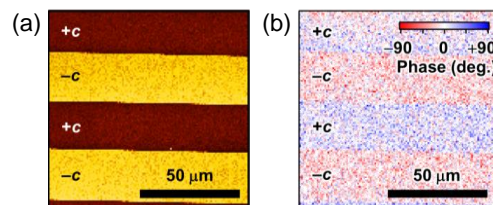


図 4 縦 QPM GaN 導波路試料の(a)原子間力顕微鏡像、(b)ピエゾ応答顕微鏡像。

③縦 QPM GaN 導波路の線形光学特性評価

極性反転周期を 2.0 μm として作製した導波路について、角度依存反射スペクトル測定を行った。キセノンランプからの白色光を、検出角 θ を変化させ試料に集光照射し、CCD・フォトダイオードアレイを検出器として持つファイバ分光器にて検出し、鏡面反射光のスペクトルを測定した。偏光はグラントムソンプリズムを用い、TM 偏光とした。図 5(a,b) に示すように、複数の導波モードに結合するグレーティング共鳴に対応した反射率のディップが明瞭に観測された。これらは図 5(c) に示すように、グレーティングによる回折次数の異なる前方回折と後方回折の共鳴の組み合わせにより構成されており、三層スラブにより近似して計算で求めた共鳴条件とよく一致した。この結果より、導波モードの実効屈折率分散を求め、1 次の QPM 条件を求めたところ、基本波として 800~900 nm の

波長を用いることで、第二高調波発生が実現できることが分かった。

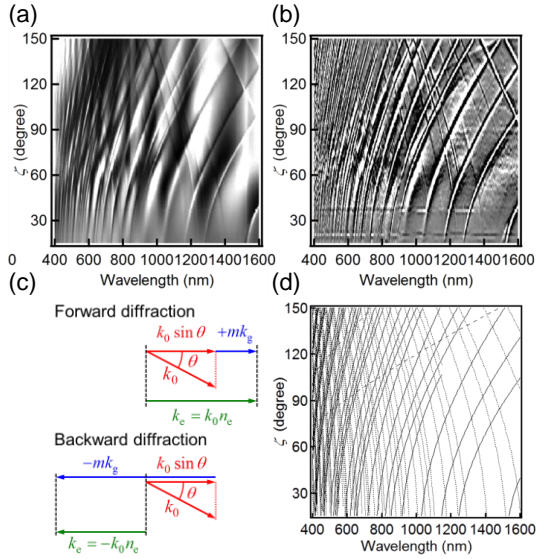


図5 縦 QPM GaN 導波路の角度依存反射スペクトル (TM 偏光) : (a)生データ、(b)微分データ、(c)グレーティング結合共鳴条件の概念図、(d)三層スラブ近似による共鳴条件の計算データ (実線: 前方回折、点線: 後方回折)。

③縦 QPM GaN 導波路による第二高調波発生

以上の評価結果を踏まえ、第二高調波発生の実証実験を行った。基本波の光源としてモード同期 Ti:sapphire レーザー (Spectra Physics Tsunami) を用い、角度依存反射スペクトル測定から求めた共鳴角度における TM_0 モードの選択励起を試みた。発生光はフィルタにて基本波成分を除去した後に分散型分光器に導き、光電子増倍管により検出した。この測定を、ゴニオメータにて入射角 θ 及び出射角 ψ を変化させ繰り返し、基本波と第二高調波のグレーティング結合条件を独立に変化させ、最大の第二高調波強度を実現する QPM 条件を求めた。図 6(a,b) に基本波波長 850 nm における第二高調波強度の入出射角依存性を示す。 $\theta=55^\circ$ 、 $\psi=12^\circ$ において波長 425 nm の発生光強度が最大となり、目視観察可能な第二高調波発生を確認した (図 6(c))。図 6(b) に最大の第二高調波強度を与える共鳴条件近傍を拡大して示すが、これは非共鳴条件に比べ約 1000 倍の増強にあたり、この角度は入射基本波が +4 次回折により TM_0 モードに結合し、QPM 構造により導波路中で発生した第二高調波の TM_0 モードが +7 次回折により前方回折し出射した条件にあたり、どちらも線形光学測定により求めた共鳴条件 (図 5) と良く一致した。このときのグレーティング共鳴と QPM 条件の関係を図 6(d) にベクトル表示にて示すが、導波路内に励起された二波の導波モードの波数差が極性反転の波数 $2\pi/\Lambda_{QPM}$ と良く一致し、1 次の QPM 条件を実現していることが分かった。

上記位相整合条件のもとで第二高調波発生強度の基本波パワー依存性を測定したと

ころ、図 7(a) に示すように基本波パワーの二乗に比例することから、二次非線形光学過程であることを確認した。また図 7(b) に示す偏光依存性においても、TM 偏光励起のもと TM : TE 偏光比は 200 : 1 となり、 d_{33} 成分を用いた過程であることを確認した。

以上より、本研究で着目した III-V 族窒化物半導体である GaN の非線形光学素子への有用性を明確に実証することができた。

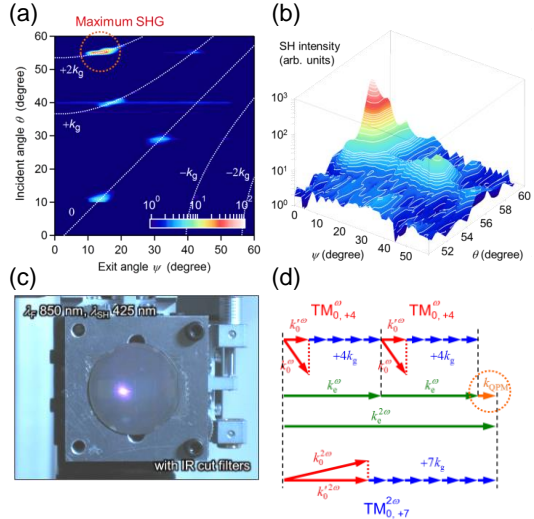


図6 縦 QPM GaN 導波路からの第二高調波発生強度の入出射角度依存性 : (a) 二次元表示、(b)最大強度近傍の三次元表示。(c)遠視野像 (紫色散乱光検出)、(d)位相整合条件。

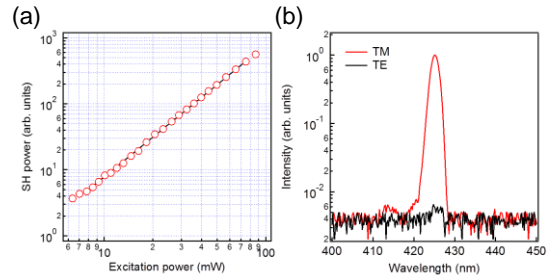


図7 縦 QPM GaN 導波路からの第二高調波の(a)基本波パワー依存性、(b)偏光依存性。

(2) 平成 24 年度

第二高調波発生を実証した縦 QPM 構造について波長変換効率を見積った。また作製の比較的困難な縦 QPM 構造に代えて、 TiO_2/GaN 導波路による横 QPM 波長変換を実現するべく、導波路素子の作製技術を開発した。

①縦 QPM GaN 導波路の波長変換効率評価

波長変換効率を算出するために、グレーティング結合効率を数値計算により見積もった。計算には時間領域差分 (FDTD) 法を用い、周期 $2.0 \mu m$ ・深さ $200 nm$ のグレーティング構造を有する空気/GaN/サファイアの三層スラブ導波路に対し、広帯域パルス平面波を入射し、導波路端でのポインティングベクトルを計測することで、結合効率の入射角・波長依存性を求めた (図 8)。最大の第二高調波を呈する入射角・波長においては、1.0% であ

ると見積もられた。この値とパワーメータにより実測された基本波・第二高調波パワーに加え、入射・出射位置から求めた相互作用長を用いて規格化変換効率を求めると、745%/Wcm²となった。この値は同帯域の強誘電体導波路(LiNbO₃)の波長変換素子の第二高調波変換効率と同等であることが分かった。

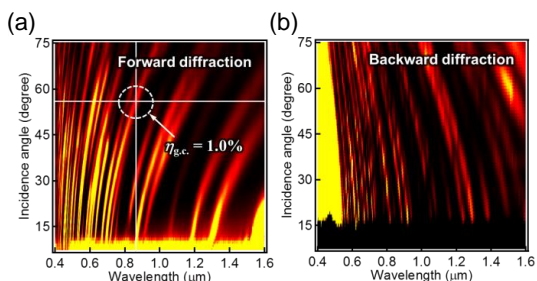


図8 FDTD法により計算した縦QPM GaN導波路のグレーティング結合効率の角度・波長依存性：(a)前方回折、(b)後方回折。

②横 QPM TiO_x/GaN 導波路の作製

まず下部導波層として用いる非線形光学活性材料として、サファイア基板上 GaN を有機金属気相成長 (MOVPE) 法により成膜した。本研究で目指すスラブ導波路の下部導波層の厚さは 200 nm 程度と薄いですが、MOVPE 法において通常広く用いられる+c 極性膜では初期に島状成長が発生し、これらが会合する 500 nm 以上の膜厚でなければ光学的に平坦な膜が出来ない。そこでこれに代えて-c 極性膜による薄膜の平坦化を試みた。微傾斜角 0.8° の c 面サファイア基板を用い、成長直前に基板表面を窒化後、550°C で GaN 緩衝層を堆積したうえで 1070°C に昇温し成膜した。参照試料として、+c 極性 GaN の成長も行った。光反射率を用いたその場観察により、成長の進行に伴う表面平坦性の変化を観察した。図 9 に光反射率の成長時間依存性を示すが、+c 極性膜の成膜では成長開始直後に反射率が顕著に低下し回復に時間がかかる一方で、-c 極性膜の成長においては成長開始の初期から反射率の低下がみられず薄膜干渉による反射率振動が持続することから、二次元成長モードの実現を確認した。また成長後の走査型電子顕微鏡、原子間力顕微鏡による表面モロロジー観察により、膜厚 100 nm 以下でもサファイア基板を完全に被覆した十分に平坦な膜ができることが分かった。

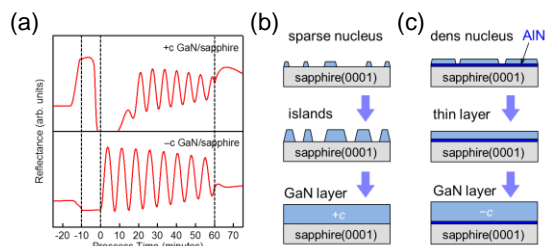


図9 サファイア基板上±c 極性 GaN 薄膜の (a)MOVPE 成長中の光反射率変化、成長機構：(b)+c 極性、(c)-c 極性 GaN。

続いて上部導波層として用いる、反転対称性を有する非線形光学不活性な材料として、TiO_xの成膜条件を探索した。まず静電結合型反応性 RF スパッタリング装置を用いて、ガラス基板上に2インチ金属Tiターゲットを用い、RF 出力は 200 W、成膜時間は 180 分、Ar 流量を 10 sccm と一定とし、一方 O₂ 流量を 0.5~5.0 sccm と変化させて成膜した。スパッタリング圧力 1.75~2.50 Pa のうち特定の O₂ 流量の条件において、表面粗さ 2.0 nm の平坦膜が得られることが分かった。

(3) 平成 25 年度

横 QPM 構造による OPDC に向けて TiO_x/GaN および極性反転 GaN 導波路の作製を進め、並行して RHPS の実現を目指し InGaN 量子井戸の高品質化を行った。

①横 QPM TiO_x/GaN 導波路の作製

前年度に用いた静電結合型反応性 RF スパッタリングに変えて、新規パルスレーザー堆積・反応性マグネトロンスパッタリング装置を導入し成膜したところ、図 10 に示すように従来の TiO_x膜と比べ平坦性・膜厚均一性が顕著に向上した。また下部導波層として MBE 法により成膜した GaN も併用し、これらを組み合わせることで作製した TiO_x/GaN 導波路について、m-line 法により導波モード分散を評価した。TE₁ 高次モードのポンプ光と、TE₀・TM₀ 基底モードのアイドラ・シグナル光との位相整合条件の存在を確認した(図 11)。今後は、波長可変パルスレーザーをポンプ光として用いての OPDC の実証を試みる予定とする。

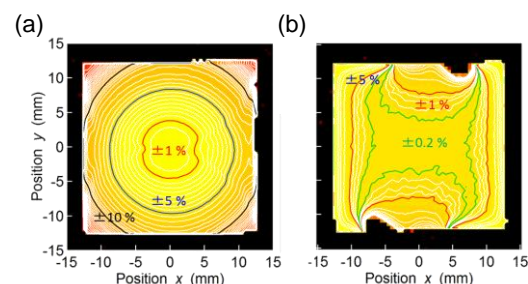


図10 スパッタリング成膜した TiO_x の実効膜厚の面内均一性の比較：(a) 従来装置、(b) 新規装置で成膜。

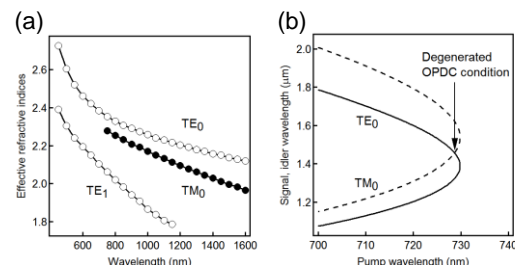


図11 横 QPM TiO_x/GaN 導波路の (a)導波モードの実効屈折率分散、(b)OPDC 過程における位相整合条件。

②横 QPM 極性反転 GaN 導波路の作製

①で最適化した-c 極性 GaN 薄膜成膜後に AlN 中間層を堆積し、酸化処理によりその表

面を反転対称性のある AlON_x に改質後、再成長により+c 極性への反転を試みた。酸化処理の雰囲気・温度・時間を最適化することでエピタキシャル成長の最適条件を求め、現在は各条件での極性反転の分析を進めている。

③InGaN 量子井戸の高品質化

活性層となる InGaN 混晶薄膜の光学的品質改善を行い、一定の成果が得られた。RHPS の実証には狭線幅・高強度発光を呈する量子井戸の実現が必要となる。本研究では-c 極性 InGaN/GaN 量子井戸の作製を通じて、発光ブロードニングの起源である熱力学的相分離傾向のみならず、ラフニングにともなうミクロステップ形成とステップ・テラス間のインジウム取込効率の差に起因した組成むらの抑制が、極めて重要であることを解明した。得られた知見を元に、今後は超平坦化量子構造の作製による狭線幅化の実現と、共振器構造の形成により、ポラリトンの強結合の実現と RHPS の実証を引き続き目指す予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ①J.H. Choi and R. Katayama (他 4 名、5 番目), "Effect of Sapphire Nitridation and Group-III Source Flow Rate Ratio on In-Incorporation Into InGaN Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 査読有, 14 (8), 2014, 6112-6115, 10.1166/jnn.2014.8306
- ②K. Shojiki and R. Katayama (他 6 名、7 番目), "Effect of c-plane sapphire substrate miscut angle on indium content of MOVPE-grown N-polar InGaN", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 53(5S1), 2014, 05FL07-1-5, 10.7567/JJAP.53.05FL07
- ③T. Tanikawa and R. Katayama (他 6 名、7 番目), "Enhancement of surface migration by Mg doping in the metalorganic vapor phase epitaxy of N-polar (000-1) GaN/sapphire", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 53(5S1), 2014, 05FL05-1-4, 10.7567/JJAP.53.05FL05
- ④J.H. Choi and R. Katayama (他 4 名、5 番目), "Investigation of indium incorporation into InGaN by nitridation of sapphire substrate in MOVPE", phys. stat. sol. (c), 査読有, 10(3), 2013, 417-420, 10.1002/pssc.201200667
- ⑤J. H. Choi and R. Katayama (他 5 名、6 番目), "Effect of Nitridation on Indium-composition of InGaN Films", Key. Eng. Mater., 査読有, 508, 2012, 193-198, 10.4028/www.scientific.net/KEM.508.193
- ⑥K. Shojiki and R. Katayama (他 4 名、5 番目), "Tilted domain and indium content of MOVPE-grown InGaN layer on m-plane GaN substrate", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 51, 2012, 04DH01-1-4, 10.1143/JJAP.51.04DH01
- ⑦R. Katayama (他 7 名), "Optical properties of the periodic polarity-inverted GaN

waveguides", Proc. of SPIE, 査読有, 8268, 2012, 826814-826913, 10.1117/12.909831

[学会発表] (計 11 件) うち招待講演 5 件

- ①R. Katayama (他 8 名), "Nonlinear Optical Application of Periodic Polarity-inverted GaN Waveguide", 2013 JSAP-MRS Joint Symposia (Invited), Sept. 18, 2013, Kyoto.
- ②N. Yoshinogawa and R. Katayama (他 5 名、6 番), "Crystallographic Polarity Dependence of Surface Morphology Evolution during MOVPE Growth of GaN/Sapphire", The 32nd Electron. Mater. Symp., July 11, 2013, Shiga.
- ③片山 竜二 (他 7 名), 「窒化物半導体フォトニックナノ構造の量子光学応用」, 第 5 回窒化物半導体結晶成長講演会 (招待講演), 2013 年 06 月 21 日, 大阪.
- ④吉野川 伸雄, 片山 竜二 (他 5 名、6 番), 「サファイア基板上 GaN 薄膜の有機金属気相成長挙動の格子極性依存性」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 28 日, 神奈川.
- ⑤R. Katayama (他 8 名), "Violet second harmonic generation from polarity inverted GaN waveguides", Int. Workshop on Nitride Semiconductors (Invited), Oct. 18, 2012, Sapporo.
- ⑥R. Katayama (他 5 名), "Enhancement of violet second harmonic generation in periodic polarity-inverted GaN waveguides", Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy, Sept 25, 2012, Nara.
- ⑦R. Katayama (他 5 名), "Linear and nonlinear optical investigations of periodic polarity-inverted GaN waveguides", Int. Conf. on Superlattices, nanostructures, and Nanodevices, July 26, 2012, Dresden, Germany.
- ⑧R. Katayama (他 5 名), "Linear and nonlinear optical investigations of periodic polarity-inverted GaN waveguides", 4th Intern. Symp. on Growth of III-nitrides, July 19, 2012, St. Petersburg, Russia.
- ⑨R. Katayama (他 8 名), "Violet-colored enhanced second harmonic generation from periodic polarity-inverted GaN waveguide", The 31st Electron. Mater. Symp., July 13, 2012, Shizuoka.
- ⑩片山 竜二 (他 5 名), 「極性ワイドギャップ半導体フォトニックナノ構造の新規光機能」, 第 59 回 応用物理学関係連合講演会 (招待講演), 2012 年 3 月 15 日, 東京.
- ⑪R. Katayama (他 7 名), "Optical properties of the periodic polarity-inverted GaN waveguides", SPIE Photonics WEST 2012 (Invited), Jan. 23, 2012, San Francisco, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片山 竜二 (KATAYAMA, RYUJI)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号: 40343115