

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246037

研究課題名(和文) 室温動作ポラリトンレーザ構造のヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシャル形成

研究課題名(英文) Helicon-wave-excited-plasma sputtering epitaxy of polariton laser structures for room temperature operation

研究代表者

秩父 重英 (Chichibu, Shigefusa)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：80266907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円、(間接経費) 10,830,000円

研究成果の概要(和文)：半導体中の励起子と微小共振器の光モードの強結合によりコヒーレント光を得る微小共振器結合励起子ポラリトンレーザは、新たな原理による低閾値コヒーレント光源として興味深い。本研究では、報告者の独自技術でありスパッタ法でありながら高品位半導体エピタキシャル成長が可能な「ヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシー法」を用い、室温動作の可能性が高い、酸化亜鉛活性層を分布ブラッグ反射鏡で挟む微小共振器構造を形成した。そして、共振器モードと結合した励起子ポラリトンによる発光を室温において観測した。本成果を導いたいくつかの技術により、新たなヘテロ構造や量子構造の形成及びナノ構造評価への道が拓けたといえる。

研究成果の概要(英文)：A cavity-coupled exciton-polariton laser, namely cavity-polariton laser, has been attracting attention as a new generation low-threshold current density coherent light source composed of a semiconductor microcavity. In the present research, a microcavity composed of a ZnO active region sandwiched by pairwise distributed Bragg reflectors (DBRs) that most likely operates at room temperature was fabricated using a uniquely designed Helicon-Wave-Excited Plasma Sputtering (HWPS) method, which enables to grow high quality epitaxial semiconductor films. We eventually observed an enhanced emission peak at around 3.25 eV, which originates from an exciton-polariton emission coupled with a cavity mode. We therefore conclude that a way to fabricate new functional quantum heterostructures and to characterize them was cut open using the growth, fabrication, and characterization methods developed by this research project.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子・電気材料工学

キーワード：電子・電気材料 ヘリコン波励起プラズマスパッタ 微小共振器 励起子 励起子ポラリトン 酸化亜鉛 エピタキシー ポラリトンレーザ

## 1. 研究開始当初の背景

時間的・空間的コヒーレンスの高いコンパクトな固体光源として半導体レーザー(LD)が実現されていたが、駆動には百mW程度を要し、純青・純緑色のLDは市販されていなかった。消費電力の低い光の三原色の小型コヒーレント光源ができれば、立体映像や高精細表示が実現できる。また、紫外線LDは細菌の検出や殺菌・物質励起・セキュリティ光源等へ応用ができるため実現への要望が高まっていた。これらの要求を満たす小型コヒーレント光源として報告者らは、既存のLDとは原理が異なり半導体微小共振器の光モードと励起子の強結合によりコヒーレント光を得る「微小共振器結合励起子ポラリトンレーザー」に着目した。ポラリトンレーザーは、励起子ポラリトンそのものがコヒーレントな連成波であり、そのポーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)による発振が原理であるため、理想的には閾値の無い「超低閾値コヒーレント光源」として興味深い。しかし、室温で励起子が安定に存在する半導体は少なく、低温での実験に限られていた。

報告者らは、禁制帯幅が広く励起子束縛エネルギーの大きいGaNやZnOがポラリトン閉じ込めに適すことを、励起子ポラリトンの基礎研究を通じて示していた。特に、ZnOの励起子束縛エネルギーは59meVと大きく、室温の臨界励起子密度を高くとれる。バルクZnOの評価結果を用いて模式的なポラリトンレーザー構造のRabi分裂を計算すると191meV(数ある半導体微小共振器でも最大)となり、室温動作の可能性が最も高いことを示していた。このモデル計算では、B励起子共鳴波長( $\lambda/n$ )に相当する膜厚のZnOを、中心波長をB励起子エネルギー(366nm)に設計した高反射率分布ブラッグ反射鏡(DBR)で挟んだ形を用いた。DBRは、電気が流れ、エピタキシャル単結晶成長を行えるMgZnO系(ないしはAlGaIn系)半導体多層膜が望ましいが、光励起実験は誘電体DBRでも遂行可能である。

本構造を産業に結びつけるには、安価な技術・装置で高品質大面積薄膜を製膜する必要がある。大面積製膜法の代表としてスパッタ法があるが、従来の直流(DC)、高周波(RF)スパッタ法では基板-ターゲット間のプラズマによる膜損傷が大きく、単結晶薄膜の形成は困難であった。報告者この問題点を解決するよう、比較的高真空中で基板から隔離して、高密度低エネルギー有磁界ヘリコン波励起プラズマ(HWP)を発生し、リモートソースとしてターゲットをスパッタする、ヘリコン波励起プラズマスパッタ(HWPS)法を1994年に提案し、開発を行ってきた。HWPS法は低損傷製膜が可能で、低抵抗かつ平坦なAl添加ZnO(ZnO:Al)透明導電膜や、MBE法と遜色の無いZnOのエピタキシャル成長が可能であることを実証してきた。本研究では、本手法を用いたZnOのエピタキシャル成長をベースとし

たポラリトンレーザー構造の形成を行った。

## 2. 研究の目的

(1)ZnO活性層を用いたポラリトンレーザー構造の基盤となる、ZnO超薄膜およびMgZnO/ZnOヘテロ構造をヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシャル(HWPSE)法にて形成する。

(2)ZnO活性層を用いたポラリトンレーザー構造の最適設計を行う。このため、ZnOの価電子帯構造(オーダリング)や励起子ポラリトン分散、光学定数等を実験的に明らかにする。

(3)MgZnO/ZnOおよびAlGaIn/GaN系DBRの設計と光学特性の計算による予測を行う。このため、計測データと第一原理計算によりウルツ鉱型MgOの特性予測を行う。また、AlGaIn系多層構造の有機金属気相エピタキシャル(MOVPE)形成と評価を行う。

(4)反応性HWPS(R-HWPS)法によりSiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>誘電体酸化物多層膜を堆積し、DBRを形成する。また、このDBRによりZnO活性層を挟んだ構造の光励起発光観測を行う。

(5)MgZnO/ZnOおよびAlGaIn/GaN系ワイドバンドギャップ半導体の局所発光ダイナミクスの解析のため、時間空間同時分解カソードルミネッセンス装置を用いた計測を行う。

## 3. 研究の方法

(1)ZnOエピタキシャル薄膜およびMgZnO/ZnOヘテロ構造のHWPSE成長:

材料の本質に迫り高品位化を行うべく、HWPSE法を用いて上記薄膜・構造を形成し、形態や構造評価の他、時間分解フォトルミネッセンス(TRPL)法による発光ダイナミクス解析と陽電子消滅法を用いた点欠陥解析を行い、物性の理解を深めることとした。研究開始当初は気相合成(CVT)法による高純度多結晶ZnOターゲットを用いていたが、AlやSiをはじめとする不純物濃度が下がりきらなかったため、水熱合成によるZnOターゲット開発を業者に依頼し、それを用いた成長を行った。

高真空型HWPSE装置を用い、Zn極性面ZnO基板上に膜厚200~1500nmのZnO単結晶薄膜エピタキシャル成長を行った。また、ZnO上にMgZnO混晶の連続成長実験も行い、構造全体の歪評価やヘテロ界面の評価を行った。成長温度は950~970℃、気相酸素流量比[f(O<sub>2</sub>)=O<sub>2</sub>/(Ar+O<sub>2</sub>)]は0.3~0.4として成長表面のストイキオメトリ制御を行った。

成長時の背圧は $5 \times 10^{-2}$ Torr、RF出力は200~320W、ターゲットバイアスは250~350V、とし、成長レートが~150nm/hour程度となるように設定した。成長後は、点欠陥密度を低減するため、 $10^{-6}$ Torr以下の低酸素圧下で-10

°C/min. の徐冷を行った。

構造評価には X 線回折 (XRD)、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた。薄膜の発光特性は静的フォトルミネッセンス (PL) 及び時間分解フォトルミネッセンス (TRPL) 法により行い、放射・非放射再結合寿命の定量化を行った。また、不純物濃度は 2 次イオン質量分析 (SIMS) 法により評価した。

(2) ZnO 活性層を用いたポラリトンレーザ構造の最適設計：

この目的のため、当時不明であったいくつかの物性パラメータをはっきりさせる必要があった。

(i) ZnO の価電子帯オーダリングについて、規約表現  $\Gamma_7$  の対称性を持つ伝導帯への遷移エネルギーが低い方から順に  $\Gamma_7$ - $\Gamma_9$ - $\Gamma_7$  である (GaN と異なる) という研究グループと、 $\Gamma_9$ - $\Gamma_7$ - $\Gamma_7$  である (GaN と同じ) という研究グループの議論は 50 年以上行われてきているが、決着はついていないと言われている。報告者らは、2003 年頃から静的反射スペクトル解析結果に基づき  $\Gamma_9$ - $\Gamma_7$ - $\Gamma_7$  オーダリングを提唱してきた。本研究では、縮退四光波混合 (FWM) 法を用いて A, B, C 励起子を構成する励起子の対称性を解析することにより、価電子帯オーダリングを決定した。

(ii) ZnO の励起子ポラリトン分散や、DBR 設計の際の基本情報となる屈折率・消衰係数の分散を明らかにするべく、c 面および m 面 ZnO 単結晶の反射測定を行った。

(3) MgZnO/ZnO および AlGaIn/GaN 系 DBR の設計と光学特性予測：

この目的のため、第一原理計算により、仮想的にウルツ鉱構造を取らせた MgO の特性予測を行った。MgO は本来岩塩構造であることから、計算機上で ZnO と同じウルツ鉱をとるように結晶を配置した。得られた格子定数や弾性定数を用い、(1) で成長した MgZnO 混晶のそれを再現できるように、基本的にはベガード則に従うものとして混晶の物性値を予測した。また、AlGaIn 系多層構造の MOVPE 成長と評価を通じ、導電性 DBR の検討を行った。

(4) R-HWPS 法による  $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$  誘電体多層膜堆積、DBR 形成、光共振器形成とキャビティポラリトン観測：

金属 Zr と半導体 Si をターゲットとして用い、 $\text{Ar}+\text{O}_2$  雰囲気中で R-HWPS 法にて  $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$  誘電体多層膜の堆積を行った。まずガラス基

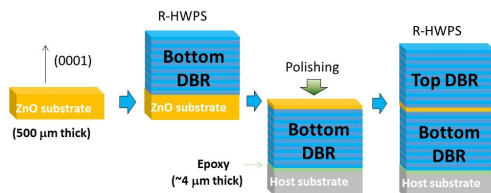


図 1 ZnO を研磨して活性層として用いるポラリトンレーザ構造の形成プロセス

板上に単膜を堆積し、分光エリプソメトリーによって屈折率・膜厚の評価を行い堆積レートを算出した。そして屈折率の測定結果をもとに DBR の設計を行い、8~12 ペアの DBR を形成し、透過率測定を行った。また、これらの DBR を機械的に張り合わせて共振器を形成し、透過率測定から Q 値の見積もりを行った。

ZnO エピタキシャル層を活性層とする光励起ポラリトンレーザ構造を実現するためには、ZnO エピタキシャル薄膜の成長と基板の除去が不可欠である。そこで、水熱合成 ZnO 基板を波長オーダーまで研磨することによって薄膜化する技術を開発した。このプロセス・フローを図 1 に示す。本手法を用い、単結晶 ZnO 活性層が 8 ペアと 12 ペアの DBR で挟まれた光共振器構造を作製した。発光特性評価にはひとまずフォトルミネッセンス (PL) 測定を用いた。

(5) MgZnO/ZnO および AlGaIn/GaN 系ワイドバンドギャップ半導体の時間空間同時分解カソードルミネッセンス (STRCL) 計測：

ポラリトンレーザ構造を形成する活性層や半導体 DBR および材料の局所発光ダイナミクスを解析するため、図 2 に概念図を示す STRCL 装置を用いて、主に AlGaIn 系多層膜構造の評価を行った。

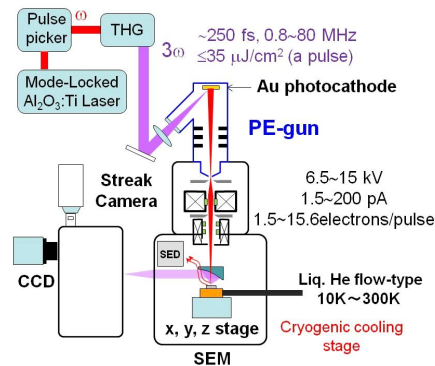


図 2 時間・空間同時分解カソードルミネッセンス (STRCL) 計測装置

研究分担者の役割について：

宗田孝之 (早稲田大: ZnO エピタキシャル薄膜のポンプ・プローブ評価、ZnO・MgZnO の物性評価)、上殿明良 (筑波大: 陽電子消滅法による点欠陥検出)、羽豆耕治 (東北大: 薄膜評価)、古澤健太郎 (東北大: ZnO, MgZnO エピタキシャル薄膜の HWPSE 成長、 $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$  DBR の R-HWPS 製膜。報告者はこれら取りまとめ及び GaN, AlGaIn の MOVPE 成長や薄膜の構造評価、電気・光学的等特性評価、STRCL 評価を行った。

#### 4. 研究成果

(1) ZnO エピタキシャル薄膜および MgZnO/ZnO ヘテロ構造の HWPSE 成長：

研究開始当初は CVT 合成 ZnO 多結晶ターゲットを用いて ZnO および MgZnO 混晶のエピタ

キシャル成長を行った。これら薄膜の表面状態は成長時の  $f(O_2)$  に敏感であり、表面でのストイキオメトリが確保されている条件では原子層ステップが観測されるほど平坦であった。また、MgO モル分率 0.19 までの  $Mg_xZn_{1-x}O$  混晶は、下地の ZnO にコヒーレント成長できることを確認した。一方で、ターゲット由来の Al および Si 不純物が  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程取り込まれており、加えて遷移金属の混入もみられたため、低温では半値全幅の狭い励起子発光ピークが観測されたものの室温におけるバンド端発光の時間分解フォトルミネッセンス (TRPL) 発光寿命は 50ps 程度と短かった。かような不純物の混入を避けるため、Li 以外の不純物が殆ど無い水熱合成法により成長した ZnO 単結晶をスパッタターゲットに用いることを考えた。

図 3 に、500 nm 厚の ZnO ホモエピタキシャル薄膜の表面 AFM 像を示す。テラス幅 0.85  $\mu\text{m}$  の単分子層ステップが観測され、RMS 値 0.11nm という非常に平坦な表面が形成されていることがわかる。ミスカット 0.5° のオフ基板を用いた場合の RMS 値も 0.2 nm 以下であり、上述の成長条件の範囲では、再現性良く原子層レベルで平坦な表面が形成されていることがわかった。

室温の PL スペクトルを図 4 に示す。バン

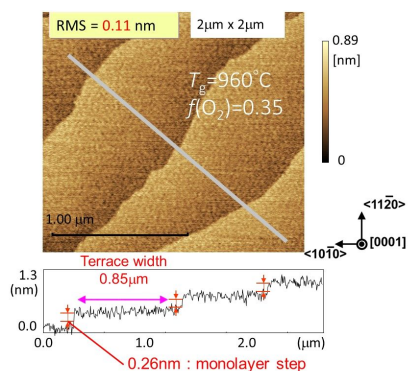


図 3 Zn 極性 ZnO ホモエピタキシャル薄膜の表面 AFM 像  
テラス幅が 1 $\mu\text{m}$  近い分子層ステップが見える。

ド端発光のピークエネルギーは 3.267 eV であった。この値は、0 極性面の無歪 ZnO のバンド端発光ピークエネルギーよりも 20meV ほど低い。Zn 極性面 ZnO では A 励起子と L0 フォノンの相互作用が非常に強いため、室温のバンド端発光ピークエネルギーが A 励起子遷

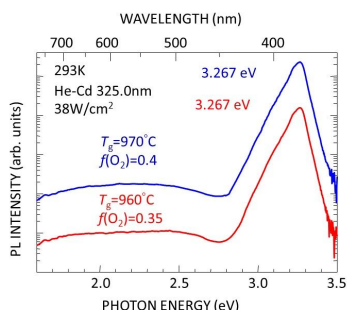


図 4 Zn 極性 ZnO エピ層の室温 PL スペクトル

移エネルギーではなく理想的には L0 フォノン分低エネルギーにシフトすることが知られている。本実験の 3.267eV は、確かにキャリア密度が高い時の 3.3eV 程度に比べて低く、L0 フォノンとの相互作用が確認できるほどの品質になったといえる。この発光ピークの半値全幅 (正確には半値半幅の 2 倍) は 63~65 meV と非常に小さく、2.4eV 付近にピークを持つ発光帯 (グリーンルミネッセンス:GL) バンドの発光強度はバンド端発光強度の 3 桁以上低くなっており、バルク ZnO 基板と同程度の強度であった。従って、GL 発光の起源である格子間 Zn ないしは酸素空孔等の点欠陥密度はバルク結晶と同レベルまで低減できていると推測される。

一方、代表例を図 5 に示す低温 PL スペクトルを見ると、A 自由励起子の基底状態及び第 1 励起状態に起因する発光ピーク群が観測されたものの、3.3608 eV にピークを持つ、中性 Al ドナー束縛励起子の再結合発光と同等されている発光が顕著であった。また、その 2 電子サテライトのピークも 3.323 eV に観測された。SIMS 測定によれば Al 濃度は約  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程度であり、PL 測定の結果と矛盾しない。

次に、発光効率を評価するため PL スペク

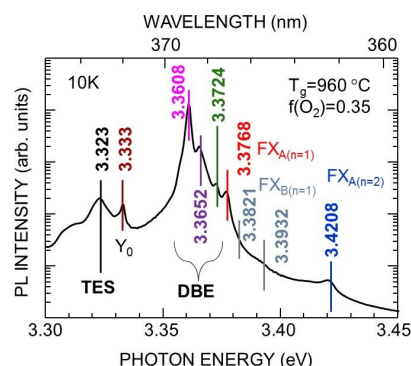


図 5 Zn 極性 ZnO エピ層の低温 PL スペクトル

トルの温度依存性を測定した。10 K における積分強度に対する室温の強度を等価内部量子効率と呼ぶと、バンド端発光のそれは 0.2~0.3% であった。TRPL 測定から求めた PL 発光寿命 ( $\tau_{PL}$ ) の温度依存性データと合わせて輻射再結合寿命と非輻射再結合寿命の解

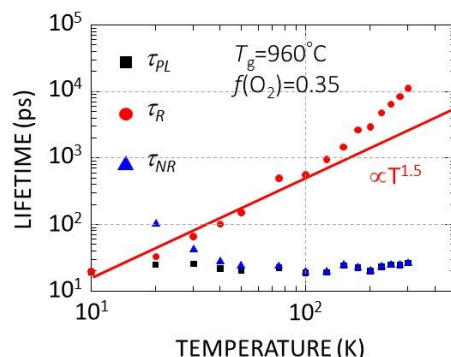


図 6 PL 発光寿命 ( $\tau_{PL}$ )、輻射再結合寿命 ( $\tau_R$ )、非輻射再結合寿命 ( $\tau_{NR}$ ) の温度依存性。

析を行った結果を図6に示す。PL寿命は低温領域から室温領域にかけて20~30 psで大きな変化はなかった。この結果から、30 K以上では非輻射再結合が支配的になっていることがわかる。すなわち、30 Kで既に非輻射再結合中心が活性化されていることが明らかになった。

以上のように、水熱合成 ZnO ターゲットを用いた HWPSE 法により平坦性の良い ZnO エピタキシャル薄膜が再現性よく成長できる。低温 PL スペクトルは AI に束縛された励起子の再結合による発光が支配的であったが、励起子ポラリトンの発光も観測された。

(2) ZnO 活性層を用いたポラリトンレーザ構造の最適設計：

(i) ZnO の価電子帯オーダリングについて、FWM 測定の結果から、 $\Gamma_7$ の対称性を持つ伝導帯への遷移エネルギーが低い方から順に  $\Gamma_9$ - $\Gamma_7$ - $\Gamma_7$ であると結論づけられた。

(ii) c 面および m 面 ZnO 単結晶の反射測定を行って屈折率・消衰係数の分散を明らかにし、励起子ポラリトンの分散を求めて DBR 設計を行った。

(3) MgZnO/ZnO および AlGaIn/GaN 系 DBR の設計と光学特性予測：

第一原理計算により、仮想的にウルツ鉱構造を取らせた MgO の諸特性を予測した。また、その値を用いて MgZnO 混晶の物性値を算出して MgZnO/MgZnO DBR の設計を行った。更に、AlGaIn 系多層構造の MOVPE 成長と評価を通じ、導電性 DBR の検討を行った。

(4) R-HWPS 法による SiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> 誘電体多層膜堆積、DBR 形成、光共振器形成とキャビティポラリトン観測：

R-HWPS 法により形成した 10 ペアの SiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> DBR の、面直方向で計測した透過スペクトルを図7に示す。設計波長である 366nm を中心に、非常に高い反射率(99.90%)と広いストップバンド幅が得られており、干渉波長では反射率がほぼゼロに戻っている(短波長側ではガラス基板の吸収が現れている)。

この 10 ペアの DBR と、同様にガラス基板に形成した 12 ペアの DBR の各々について、図1に記したプロセスのうち ZnO 活性層が無い構造を形成して共振器としての性能評価

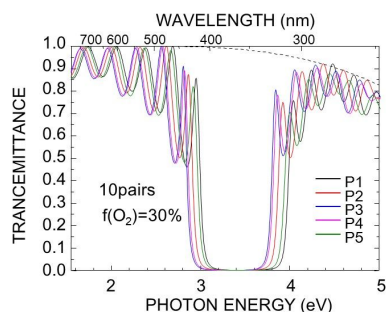


図7 10 ペアの DBR の透過スペクトル

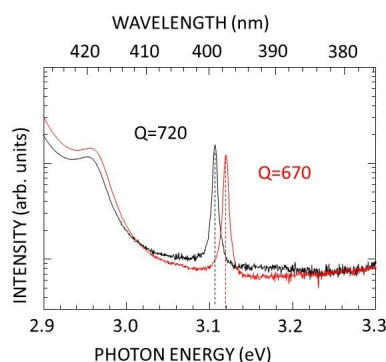


図8 10 ペアと 12 ペアの DBR の貼り合せた構造の透過スペクトル

を行った結果を図8に示す。共振器としての Q 値は 670 および 720 であり、理想的な場合の 1000 以上に比べて小さいが、ポラリトン閉じ込めには十分な値である。

最後に、薄く研磨した ZnO を SiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> DBR で挟んだ構造の室温における PL スペクトルを、厚膜 ZnO 基板のデータと比較して図9に示す。構造体の発光ピークエネルギーは基板のそれとほぼ同じでしかも半値全幅が狭くなっている。また、DBR の特性を反映して干渉による強度振動が観測できている。試料形成時に用いた固定用エポキシ系接着剤が光ってしまうために ZnO らしからぬ発光があるが、共振器と結合した励起子ポラリトンが形成されたと考えている。

以上のように、R-HWPS 法によって、面内均一性の優れた高反射率 DBR が作製でき、機械的張り合わせによっても Q 値として 700 程度の共振器を実現できることがわかった。単結晶 ZnO を活性層とするポラリトンレーザ構造の実現の目処が得られ、今後はより高精度な膜厚制御が必要であることがわかった。

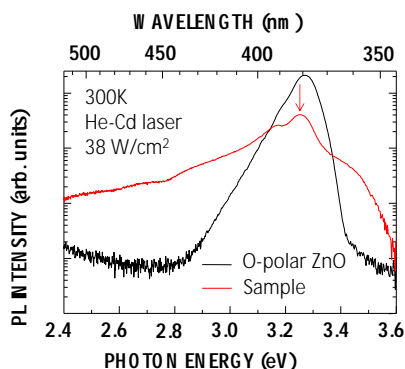


図9 ZnO 活性層を DBR で挟んだ共振器構造の室温 PL スペクトル

(5) MgZnO/ZnO および AlGaIn/GaN 系ワイドバンドギャップ半導体の時間空間同時分解カソードルミネッセンス (STRCL) 計測：

STRCL 装置を用いて、AlN、高 AlN モル分率 AlGaIn、GaN 等の UV 発光材料の局所発光ダイナミクス解析を行った。AlGaIn 超格子構造の評価を行った結果、界面における非輻射再結合中心密度の低減が必要であることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 20 件)

S. F. Chichibu, H. Miyake, Y. Ishikawa, M. Tashiro, T. Ohtomo, K. Furusawa, K. Hazu, K. Hiramatsu, and A. Uedono, "Impacts of Si-doping and resultant cation vacancy formation on the luminescence dynamics for the near-band-edge emission of  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$  films grown on AlN templates by metalorganic vapor phase epitaxy", 査読有, Journal of Applied Physics Vol. 113, No. 21, p.213506 1-6 (2013).

S. -H. Jang and S. F. Chichibu, "Structural, elastic, and polarization parameters and band structures of wurtzite ZnO and MgO", 査読有, Journal of Applied Physics Vol. 112, No. 7, p.073503 1-6 (2012).

A. Takagi, A. Nakamura, A. Yoshikaie, S. Yoshioka, S. Adachi, S. F. Chichibu, and T. Sota, "Signatures of  $\Gamma_1$ - $\Gamma_5$  mixed-mode polaritons in polarized reflectance spectra of ZnO", 査読有, Journal of Physics: Condensed Matter Vol. 24, No. 41, p.415801 1-8 (2012).

K. Hazu, S. F. Chichibu, S. Adachi, and T. Sota, "Valence-band-ordering of a strain-free bulk ZnO single crystal identified by four-wave-mixing spectroscopy technique", 査読有, Journal of Applied Physics, Vol. 111, No. 9, p.093522 1-6 (2012).

T. Onuma, Y. Kagamitani, K. Hazu, T. Ishiguro, T. Fukuda, and S. F. Chichibu, "Femtosecond-laser-driven photoelectron gun for time-resolved cathodoluminescence measurement of GaN", 査読有, Review of Scientific Instruments Vol. 83, No. 4, p.043905 1-7 (2012).

Y. Sawai, H. Hazu, and S. F. Chichibu, "Surface stoichiometry and activity control for atomically smooth low dislocation density ZnO and pseudomorphic MgZnO epitaxy on a Zn-polar ZnO substrate by the helicon-wave-excited-plasma sputtering epitaxy method", 査読有, Journal of Applied Physics Vol. 108, No. 6, p.063541 1-8 (2010).

〔学会発表〕(計 48 件、うち招待講演 9 件)

古澤健太郎, 柿畑研人, 小山雅史, 秩父重英, "反応性ヘリコン波励起プラズマスパッタ法による ZnO 系微小光共振器形成の検討", 2014 年春季応用物理学会, 2014 年 3 月 17 日, 相模原市

古澤健太郎, 中沢駿仁, 石川陽一, 田代公則, 秩父重英, "水熱合成 ZnO ターゲットを用いた ZnO 薄膜のヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシー(2)", 2014 年

春季応用物理学会, 2014 年 3 月 17 日, 相模原市

S. F. Chichibu and A. Uedono, "Influences of point defects on the emission dynamics of wide bandgap nitride and oxide semiconductors", 2013 Japan Society of Applied Physics - Materials Research Society Joint Symposia, 2013 年 9 月 17 日(招待講演), 京都

張成燾, 羽豆耕治, 秩父重英, "水熱合成 ZnO ターゲットを用いた ZnO 薄膜のヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシー", 2012 年春季応用物理学会, 2012 年 3 月 16 日, 東京

秩父重英, 羽豆耕治, 石川陽一, 古澤健太郎, 上殿明良, "フェムト秒パルス電子線発生とワイドギャップ半導体の評価", 2012 年春季応用物理学会シンポジウム, 2012 年 3 月 15 日(依頼講演), 東京

張成燾, 羽豆耕治, 秩父重英, "ウルツ鉱型  $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$  混晶の弾性テンソル要素  $C_{13}$ ,  $C_{33}$  に関する考察", 2011 年秋季応用物理学会, 2011 年 9 月 1 日, 山形

羽豆耕治, 吉海江憲, 吉岡宗一郎, 高木絢子, 鳥井康介, 宗田孝之, 秩父重英, "偏光反射スペクトル解析による ZnO の物性値の同定", 2011 年秋季応用物理学会, 2011 年 9 月 1 日, 山形

〔図書〕

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/chichibu/index-j.html>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

秩父 重英 (CHICHIBU SHIGEFUSA)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号: 80266907

(2)研究分担者

宗田 孝之 (SOTA TAKAYUKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 90171371

上殿 明良 (UEDONO AKIRA)

筑波大学・数理物質科学研究科・教授

研究者番号: 20213374

羽豆 耕治 (HAZU KOUJI)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号: 30367057

古澤 健太郎 (FURUSAWA KENTARO)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号: 40392104