

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：37501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560011

研究課題名(和文)光子性の強い励起子ポラリトンが関与する励起子-励起子散乱発光寿命の解明

研究課題名(英文) Photoluminescence decay time of the exciton-exciton scattering in a semiconductor thin film

研究代表者

市田 秀樹 (Ichida, Hideki)

日本文理大学・工学部・特任准教授

研究者番号：50379129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、半導体結晶中での励起子と光子の結合状態である励起子-ポラリトン状態に着目し、下枝ポラリトンの光子性の強い部分(Photon-like Polariton)を經由した発光バンド(励起子-励起子散乱発光)の発光減衰時間の意味を考えるものである。励起子-励起子散乱発光が観測されるZnO薄膜において、その時間分解発光スペクトルの解析から、励起子-励起子散乱発光の発光減衰時間は、励起子-励起子散乱が生じた後に残されるPhoton-like Polaritonの光子性の強さが影響を及ぼし、それは、試料膜厚に大きく依存するという新たな知見を得ることが出来た。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the mechanism of the photoluminescence-decay time of the exciton-exciton scattering so-called P emission in semiconductor thin films from the viewpoint of the photon-like polariton state which is created by the exciton-exciton scattering process, and located the lower energy region of the bottle neck in the exciton-polariton picture. From the analysis of the time-resolved photoluminescence spectra observed in the ZnO thin files under the high-density excitation conditions, we have obtained the results that the decay time of the PL band of the exciton-exciton scattering becomes faster with decreasing film thickness. From the analysis of the experimental results, we find that the decay time of the photoluminescence of the exciton-exciton scattering is governed by the conversion time from the exciton state to the polariton state.

研究分野：光物性

キーワード：励起子ポラリトン 励起子-励起子散乱 時間分解発光スペクトル

1. 研究開始当初の背景

励起子-光子相互作用は、励起子-ポラリトンの形成や近年ではマイクロキャビティ内での強結合系としてのキャビティポラリトンなど、非常に興味深い物性を示し、盛んに研究がなされている。本研究において着目する、励起子-励起子散乱発光は、励起子-ポラリトンの下部の特に光子性の強い部分を経由する発光過程であり、かつ、誘導放出を生じることから非常に興味深い性質を示す。これまでに励起子が安定に存在するワイドギャップ半導体 (GaN や ZnO など) においては、誘導放出の観点から光デバイスに向けた研究が行われている[1]。この励起子-励起子散乱発光(一般に P 発光と呼ばれる)の発光過程の模式図を図 1 に示す。この発光過程では、基底状態($n = 1$: n は主量子数)にある励起子同士が散乱することによって、一方は $n \geq 2$ の高励起子状態へと散乱され、もう一方は、励起子-ポラリトン状態における下枝ポラリトンの光子性の強い部分(Photon-like Polariton)上に散乱され、それが試料表面に伝搬して光に変換される。P 発光の発光減衰時間について考えてみると、発光に関与するのは、Photon-like Polariton Branch 上に位置するポラリトン状態となることから、その性質は、Photon-like Polariton の特徴を反映すると考えられる。一般に発光寿命(τ_d)は、群速度(v_g)の逆数に比例することが知られている: $\tau_d^{-1} \approx \alpha \cdot v_g$; α は比例定数[2]。これは、P 発光寿命は、比例定数 A によって Photon-like Polariton の群速度と結びつけられることを意味している。次に ZnO における Photon-like Polariton の群速度の計算結果を図 2 に示す。P 発光が観測されるエネルギー領域で群速度が大きく変化していることが分かる。このことは、P 発光減衰時間が発光波長によって大きく変化する事を意味している。P 発光減衰時間の詳細を測定し、Photon-like Polariton の群速度との関係を示す α の値の意味を実験的に明らかに出来れば、励起子-励起子散乱発光に関するこれまでにない新しい知見を得ることが期

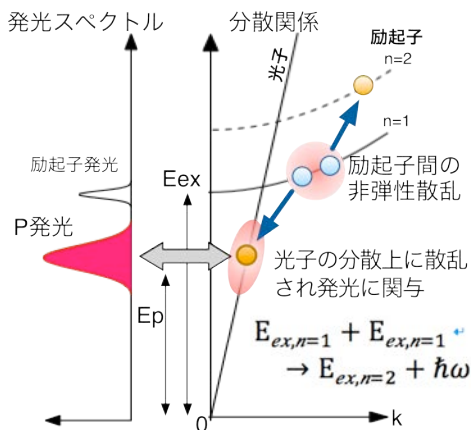


図 1. 励起子-励起子散乱発光の(P 発光)の模式図。

待され、励起子-励起子散乱発光を用いた光デバイスへの開発において大きく寄与する研究と位置づけられると考えている。

2. 研究の目的

本研究では、半導体結晶中における励起子-ポラリトン状態における下枝ポラリトンの光子性の強い部分(Photon-like Polariton)を経由した発光バンド(励起子-励起子散乱発光など)の減衰時間の意味を考えるものである。Photon-like Polariton を経由した発光バンドの発光寿命は、その光子性の強さから非常に早い減衰時間を示すと考えられる。そこで、サブピコ秒の時間分解能を有する光カーゲート分光法を用いて、励起子-励起子散乱発光の時間分解発光スペクトルを測定し、発光に関与するポラリトンの光子性の特徴が発光減衰時間にあたえる影響を以下の 2 点から解明することを目指す。

- (1) 励起子-励起子散乱発光の時間分解発光スペクトルから発光減衰時間の発光波長依存性を測定し、Photon-like Polariton の群速度との関係を明らかにする。
- (2) 励起子-励起子散乱発光の減衰時間が Photon-like Polariton の群速度に依存するのであれば、測定試料の膜厚に依存することが考えられるので、時間分解発光スペクトルの試料膜厚依存性を測定することで、その関係性を明らかにする。

3. 研究の方法

測定対象資料としては、ワイドギャップ半導体の 1 つで有る ZnO 薄膜である。ZnO は、励起子の束縛エネルギーが、約 60 meV であり、室温でも励起子が安定に存在することが知られている。また、高密度励起状態においては、励起子分子や励起子-励起子散乱、さらには、モット転移(ここでは、半導体-金属転移)後の電子-正孔プラズマ状態が形成されるなど、さまざまな物性を示すことが知られている[2]。

本研究で用いた ZnO 薄膜は、(0001)面のサファイア基板上にパルスレーザーアブレーション法(基板温度 650°C)によって作製されており、試料の膜厚は、90 nm から 2800 nm である。また、薄膜の特性に関しては、X 線構造解析、および原子間力顕微鏡 (AFM) によって確認した。

光カーゲート法は、高強度の光パルス(ポンプ光)を非線形媒質に照射することで、物質の複屈折を誘起し(光カー効果)、この性質を光シャッターに用いることで、時間分解シグナルを得るのが光カーゲート法である。光カーゲート法の光学配置図を図 2(a)に示す。測定シグナル光(本実験では、試料からの発光スペクトル)を、クロスニコル配置された偏光子・検光子ペアの間を通過させる。また、偏光子・検光子ペアの間には非線形媒質(光カー媒質)を配置する。ポンプ光が非照射時には、光カー媒質の屈折率は等方性であるた

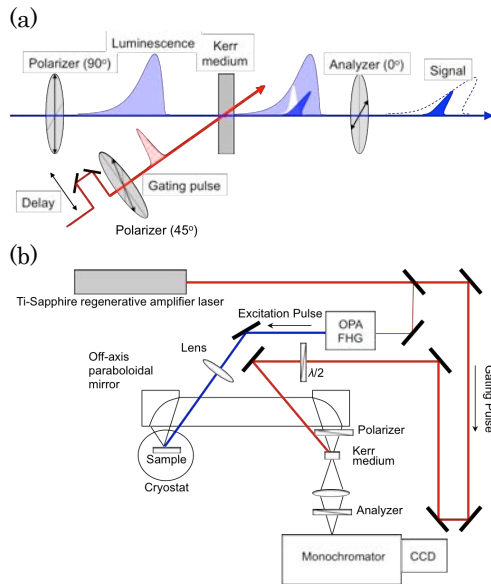


図 2. (a)光カーゲート法の概念図. (b)実験配置の模式図.

め測定シグナル光波、検光子を通過できない。一方、光カー媒質にポンプ光を照射させると、光カー効果によって、光カー媒質に複屈折性が誘起され、その屈折率が異方性となることで、測定シグナル光が検光子を通過するという仕組みである。ポンプ光によって誘起された光カー媒質の異方性は時間と共に消滅し、等方性に戻るため、光シャッターが閉じられる。光カーゲート法における時間分解能は、光カー媒質の非線形効果の緩和時間によって決定される。本研究では、カー媒質に、イットリア安定化ジルコニア(YSZ)結晶を用いた。

図 2(b)に本研究で用いた実験配置図を示す。再生増幅チタンサファイアレーザー(繰り返し 1 kHz, 出力 0.8 mJ, パルス幅 150 fs, 中心波長 800 nm,)から出た光パルスをビームスプリッターで 2 つに分けた。その 1 つを光カーゲートシステムにおけるゲート光とした。この場合の光カーゲートシステムの時間分解能、 ~ 0.6 ps である。もう 1 つの光パルスは、光パラメトリック増幅器によって発生した赤外パルスの第 4 次高調波発生によって得た紫外光パルス(波長 345 nm, 出力 ~ 200 uJ)を試料の励起光に用いた。試料からの発光は、光カーゲート法によって各時間において切り出され、それを焦点距離 320 mm の分光器をもちいて分光し、電子冷却型 CCD を用いてスペクトルを取得した。また、測定時の試料の温度は、液体 He クライオスタットを用いて、10 K に調整した。

4. 研究成果

図 1 に、光カーゲート分光法によって計測された ZnO 薄膜の時間積分発光スペクトル(上段(a),(b))と時間分解発光スペクトル(下段(c),(d))を示す。なお、ZnO 薄膜の膜厚は、1000 nm ((a)と(c))と 90 nm ((b)と(d))である。

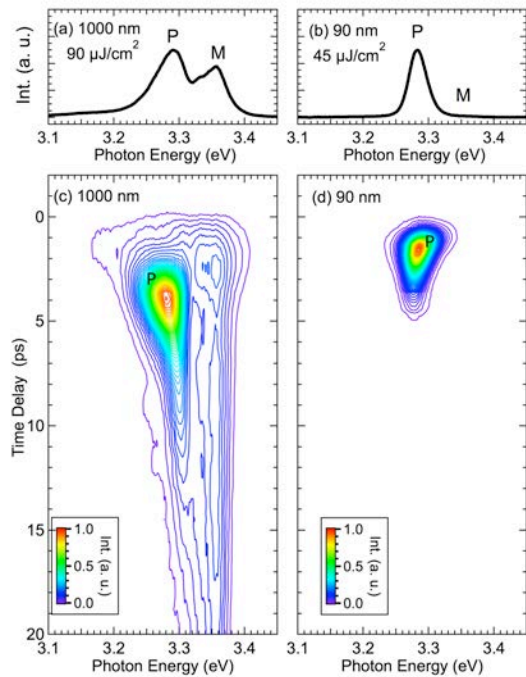


図 3. ZnO 薄膜の試料温度 10 K における時間積分発光スペクトル(上段(a),(b))と時間分解発光スペクトル(下段(c),(d)). 試料膜厚は、(a)と(c)が 1000 nm であり、(b)と(d)が 90 nm である。

まず、時間積分発光スペクトルについて、各膜厚において、2 つの発光バンド (P と M) が観測されている。特に、P 発光に関しては、各膜厚におい、主発光バンドとして観測されている。この P 発光バンドであるが、その励起強度依存性を観測すると、ZnO における励起子エネルギー(3.377 eV)より約 60 mV 低エネルギー側から、励起強度に対して、しきい値特性を有して出現する。また、その発光強度は、励起強度に対して 2 乗の割合で増大する。これらの特徴から、本研究において観測されている P 発光は、2 つの $n=1$ の励起子同士が散乱して、1 つの励起子を励起子連続状態に散乱し、もう 1 つの励起子を Photon-like Polariton 上に散乱する場合において観測される P_{∞} 発光であることがわかる。一方、M 発光に関してはその発光エネルギー位置、および、その発光強度が、励起強度に対して P 発光と同じく 2 乗の依存性を示すことから、2 つの励起子が結合することによる励起子分子発光である。本報告においては、Photon-like Polariton を経由して起こる P 発光バンドのダイナミクスについてのみ着目する。ZnO 薄膜における P 発光バンドの時間分解発光スペクトルのイメージプロットに着目すると、以下の 3 つの事がイメージプロットより分かる。

- (1) P 発光強度が最大となる時刻が、膜厚を薄くするにつれて、早くなる。
- (2) P 発光バンドのピークエネルギーは、遅延時間に対して変化する。
- (3) P 発光バンドの減衰時間に関して、膜厚を薄くすることによって顕著に短くなる。

まず、P 発光バンドの立ち上がりについてであるが、これまでの研究から、P 発光の立ち

上がりは、励起子-励起子散乱過程に関与する励起子濃度に依存することが分かっている[3]. このことから、本研究から得られた結果について考えると、膜厚を薄くするにつれて励起子の空間的な閉じ込めがおこり、励起子-励起子散乱発光に関与する有効励起子濃度が高くなったためではないかと考えられる.あるいは、後述するが、励起子-励起子散乱後の、1つの励起子が Photon-like Polariton に変換されるまでの時間が関与している可能性も有る. このような考察に関しては、今後の詳細な研究の展開が必要である.

次に P 発光バンドのピークエネルギーに着目すると、一般に、P 発光エネルギーは以下の式から得られる[4].

$$\hbar\omega_p = E_{n=1} - (E_{n \geq 2} - E_{n=1}) - 3\sigma k_B T_{eff} \quad (1)$$

ここで、 E_n は n 準位にある励起子のエネルギー、 T_{eff} は励起子系の有効温度、 σ は 1 以下の定数である. つまり、図 3 に示すように、ピークエネルギーが変化するという事は、 T_{eff} が変化していることに対応する. つまり、P 発光バンドのピークエネルギーが時間変化からは、励起直後の非平衡状態を反映した励起子の熱分布状態に従った変化であると考えることが出来る.

最後に、P 発光バンドの減衰時間に関して、膜厚を薄くすることによって顕著に短くなっていることについて考察する. このような現象は、本研究によってはじめて観測された結果であり、非常に興味深い現象である. そこで、この現象をさらに明確にするために、P 発光バンドの各発光エネルギーでの発光強度の時間減衰プロファイルを図 4 に示す. 図

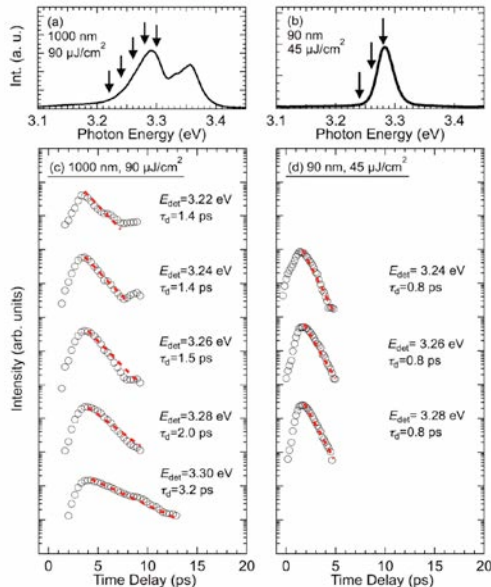


図 4. ZnO 薄膜における時間積分発光スペクトル (上段(a), (b)) と P 発光バンドの各エネルギーにおける時間減衰プロファイル (下段(c), (d)). 測定温度は 10 K であり、試料膜厚は、(a)と(c)が 1000 nm であり、(b)と(d)が 90 nm である. なお、(b)と(d)における赤色の破線は、減衰プロファイルのフィッティング結果である.

4(c)を見て分かるように、膜厚が 1000 nm の試料においては、発光エネルギーが低エネルギー側に行くほど、P 発光強度の減衰時間が早くなっていることが分かる. 一方、膜厚が薄い 90 nm の結果 (図 4(d)) では、P 発光強度の減衰時間は、それほどエネルギー依存を示さないことがわかる. そこで、各発光エネルギーでの発光減衰時間を求めるために、発光強度の時間減衰プロファイルに対して、単一指関数を用いて、フィッティングを行い (図 4(c)(d)の赤破線) 減衰時間を求めた. 図中の τ_d がフィッティングで求めた各発光エネルギーでの発光強度の減衰時間である. 膜厚が 1000 nm の試料においては、発光エネルギーが低エネルギー側に行くに連れて早くなり、その値は、3.2 ps から 1.4 ps となる. 一方、膜厚が 90 nm の試料においては、発光強度の減衰時間は 0.8 ps と、発光エネルギーに対して、依存性を示していないことがわかる. ここで、光によって励起子が生成されてから、励起子-励起子散乱が起こり、Photon-like Polariton を経て光子として放出されるまでの過程について考える. 励起子共鳴エネルギー以上の励起光によって生成された励起子は、LO フォノン散乱により、ボトルネック近傍までエネルギー緩和し、励起子-励起子散乱が生じる[5]. 励起子-励起子散乱が生じた後、1つの励起子が Photon-like Polariton に散乱された後、ポラリトンとなる. その後、試料中を伝搬し、試料表面に達し、光子として放出される. つまり、励起子-励起子散乱発光の減衰時間は、励起子が Photon-like Polariton に転換されるまでの時間とポラリトンとして試料へ表面までへの伝搬時間の和として捉えることが出来る.

ここで、ポラリトンの結晶中での伝搬時間について考える. 一般に、バルク結晶中のポラリトンが試料表面で光子に変換されるまでの速度 (v_{bulk}) は、次式で表される[6-8].

$$v_{bulk} = \frac{v_g}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} = \frac{v_g}{L_{eff}} \quad (2)$$

ここで、 v_g はポラリトンの群速度、 $R_1(R_2)$ は試料表面(裏面)でのポラリトンの反射率、 L は試料の厚さとなり、 $L_{eff} = 2L / \ln(R_1 R_2)^{-1}$ となる. 図 5(a)に、P 発光が観測されるエネルギー領域での励起子-ポラリトンの分散関係から求めた群速度 (v_g) を示す. 図では、縦軸にエネルギーをとり、横軸を群速度の逆数としてプロットしている. この群速度をもとに、式

(2) よりポラリトンが試料表面で光子に変換されるまでの速度を求めると、膜厚が 1000 nm の場合で ~ 0.02 ps となり、図 4 の実験で観測されている発光減衰時間よりも 2 桁程度早い値となる. このことは、励起子-励起子散乱で直後に生成された Photon-like Polariton がその群速度で媒質内を伝搬し、媒質表面で発光する. つまり、式 (2) で表されるようなバルク結晶で用いられる様なモデルには対応していないことを示唆している. そこで、励

起子が Photon-like Polariton に転換されるまでの時間 (τ_{conv}) について考察する.

励起子が Photon-like Polariton に転換されるまでの時間 (τ_{conv}) は,

$$\tau_{conv}^{-1}(\omega) = A(\omega) \frac{V_{coh}}{V_0} \gamma_{rad} \quad (3)$$

と表すことが出来る[9]. ここで, V_{coh} は, 励起子の媒質中でのコヒーレンス体積であり, V_0 は媒質の単位体積, γ_{rad} は, 物質と光の相互作用を取り入れた励起子の輻射再結合速度であり, 次式より求めることが出来る.

$$\text{Im } k(\omega - i\gamma_{rad}/2) = -\frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1(\omega - i\gamma_{rad}/2)R_2(\omega - i\gamma_{rad}/2)} \quad (4)$$

また, 式(3)の $A(\omega)$ は, ポラリトンの光子性を表すパラメーターであり,

$$A(\omega) = \frac{\gamma_{rad} L_{eff}}{c/n_{bg}} \left(= \frac{v_g(\omega)}{c/n_{bg}} \text{ in bulk limit} \right) \quad (5)$$

と表すことが出来る. ここで, c は光速, n_{bg} は媒質の背景誘電率である. 式 (5) より, ポラリトンの光子性 $A(\omega)$ は, 群速度 $v_g(\omega)$ に依存することが分かる. この $A(\omega)$ の逆数をプロットした結果を図 5 (b) に示す. 図中の赤線と青線は, それぞれ膜厚 1000 nm と 90 nm における $A(\omega)^{-1}$ の計算結果である. 膜厚が 1000 nm の結果においては, $A(\omega)^{-1}$ の値は, 励起子共鳴エネルギーに近づくほどその値は大きくなる. また, エネルギーに対するその計算曲線の形状も図 5(a)で示した群速度の計算曲線の形状とよく似ている. 一方, 膜厚が 90 nm の結果においては, $A(\omega)^{-1}$ の値はエネルギー

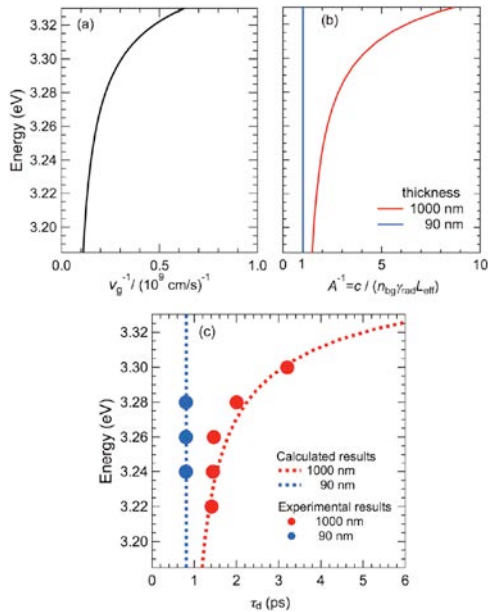


図 5. (a)ZnO における群速度の分散関係. (b) 式(5)から得られるポラリトンの光子性の $A(\omega)$ の逆数の計算結果. (c)図 4 から得られた P 発光バンドの発光減衰時間 (赤丸: 膜厚 1000 nm, 青丸: 膜厚 90 nm). 破線は, 式(6)に基づいた, 発光減衰時間のフィッティング結果を示す.

ギーによらず, ほぼ一定の値となっており, その値もほぼ 1 に近い値になっている. これは, ポラリトンの性質が, 光子の性質で支配されていることを示唆している. この結果は, 膜厚が薄くなると, ポラリトンの性質が光子の性質を強く反映することとを示しており, その原因としては, ポラリトンのコヒーレンス長が薄膜の膜厚に近づくことによって, 光との相互作用が強くなったためであると考えている. そこで, 実験結果と計算結果を比較するために, 図 5(c)に, 図 4 で得られた P 発光バンドの発光減衰時間 τ_d の結果をプロットした. 図中の赤丸と青丸は, それぞれ, 膜厚が 1000 nm と 90 nm の結果である. また, 計算結果に関しては, 式(3)より得られる, 式(6)を用いてフィッティングを行った.

$$\tau_d(E) = \Gamma \cdot A(E)^{-1} \quad (6)$$

ここで, Γ はフィッティングパラメータであり, 励起子のコヒーレント体積と輻射寿命を含む. フィッティング結果より, 計算結果は, 実験結果とよく一致していることがわかる. このことは, 励起子-励起子散乱の発光減衰時間は, 励起子-励起子散乱直後の励起子が Photon-like polarito へと変換されるまでの時間 (τ_{conv}) を用いて説明出来ることを示唆している. また, 膜厚が薄くなることで, 励起子と光の相互作用が増大し, Photon-like polarito の光子性が増大することで, τ_{conv} の値が早くなることを示している.

以上, 本研究の成果をまとめると,

- (1) 励起子-励起子散乱発光の時間分解発光スペクトルから発光減衰時間の発光波長依存性を測定した結果, 発光減衰時間に明確な発光エネルギー依存性があることが分かった. その振る舞いは, 群速度との関係性があるが, それは, ポラリトンの光子性の強さに依存するものであることが分かった,
- (2) 測定試料の膜厚に依存性について測定をおこなった. その結果, 発光減衰時間は, 膜厚が薄くなると, 顕著に短く琴が鳴ることが分かった. これは, 励起子と光の相互作用が, 膜厚が薄くなることによって強くなり, 励起子からポラリトン状態への変換時間が早くなっていることが原因であると考えられる.

<引用文献>

- [1] For a review, see C. Klingshirn, A. Waag, A. Hoffmann, J. Geurts, Zinc Oxide: From Fundamental Properties Towards Novel Applications (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2010).
- [2] C. Klingshirn and H. Haug, Phys. Rep. 70, 315 (1981).
- [3] H. Ichida, Y. Kanematsu, T. Shimomura, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, Phys. Rev. B 72, 045210 (2005).
- [4] C. Klingshirn, Phys. Status Solidi B 71, 547 (1975).

- [5] H. Ichida, Y. Kanematsu, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, Phys. Rev. B 76, 085417 (2007).
- [6] D. Shuh, R. Williams, Y. Segawa, J. Kusano, Y. Aoyagi, S. Namba, Phys. Rev. B 44, 5827 (1991).
- [7] M. Bamba, H. Ishihara, Phys. Rev. B 80 125319 (2009).
- [8] V. Agranovich, D. Basko, and O. Dubovsky, J. Chem. Phys. 106, 3896 (1997).
- [9] M. Bamba, S. Wakaiki, H. Ichida, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, Y. Kanematsu. Phys Rev B in Press.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① S. Wakaiki, H. Tokumaru, H. Ichida, K. Mizoguchi, D. Kim, Y. Kanematsu, M. Nakayama, "Photoluminescence dynamics originating from exciton-exciton and exciton-electron scattering in a GaN thin film," Physica Status Solidi c, Vol. 9, Pages 2497-2500 (2012), 査読有, DOI: 10.1002/pssc.201200316
- ② H. Ichida, S. Wakaiki, T. Kawase, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, Y. Kanematsu, "Slow propagation of photon-like polaritons generated by exciton-exciton scattering in ZnO thin films," EPJ Web of Conferences, Vol. 41, 04014 (2013), 査読有, DOI: 10.1051/epjconf/20134104014
- ③ S. Wakaiki, H. Ichida, T. Kawase, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, Y. Kanematsu, "Thickness dependence of photoluminescence-decay profiles of exciton-exciton scattering in ZnO thin films," Eur. Phys. J. B, Vol. 86, 387 (2013), 査読有, DOI: 10.1140/epjb/e2013-30631-5
- ④ S. Wakaiki, H. Ichida, M. Bamba, T. Kawase, M. Kawakami, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, Y. Kanematsu, "Emission-energy dependence of ultrafast P-emission decay in ZnO from bulk to nanofilm," Journal of Luminescence Vol. 152, Pages 250-253 (2014), 査読有, DOI: 10.1016/j.jlumin.2013.12.024

[学会発表] (計9件)

- ① M. Bamba, S. Wakaiki, H. Ichida, M. Kawakami, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, Y. Kanematsu, "P-emission decay in ZnO from bulk to nanofilm," The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems: ICSC-7, 2014.4.23, Hakone, (Japan) .
- ② S. Wakaiki, H. Ichida, M. Bamba, T. Kawase, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, and Y. Kanematsu, "Peculiar thickness-dependent behavior of the ultrafast P-emission dynamics for ZnO thin films," 18th

International Conference on Dynamical Processes in Exited States of Solids: DPC2012, 2013.8.8, Fuzhou (China).

- ③ H. Ichida, S. Wakaiki, T. Kawase, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, and Y. Kanematsu, "Slow propagation of photon-like polaritons generated by exciton-exciton scattering in ZnO thin films," XVIIIth International Conference on Ultrafast Phenomena: UP2012, 2012.7.9, Lausanne (Switzerland) .
- ④ S. Wakaiki, H. Ichida, T. Kawase, K. Mizoguchi, D. Kim, M. Nakayama, and Y. Kanematsu, "Thickness dependence of photoluminescence-decay profiles of exciton-exciton scattering in ZnO thin films," 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials: EXCON2012, 2012.7.3, Groningen (Netherlands) .
- ⑤ S. Wakaiki, H. Tokumaru, H. Ichida, K. Mizoguchi, D. Kim, Y. Kanematsu, M. Nakayama, "Photoluminescence dynamics originating from exciton-exciton and exciton-electron scattering in a GaN thin film," The International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications: ICOOPMA2012, 2012.6.4, Nara (Japan) .
- ⑥ 馬場基彰, 若生周治, 市田秀樹, 溝口幸司, 金大貴, 中山正昭, 兼松泰男, "共鳴準位より低いエネルギーに散乱された励起子は速やかにポラリトンになるのか?" 日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月21日, 早稲田大学(東京都).
- ⑦ 若生周治, 市田秀樹, 馬場基彰, 川瀬稔貴, 川上将輝, 溝口幸司, 金大貴, 中山正昭, 兼松泰男, "ZnO 薄膜における励起子間散乱から発光に至るまでのダイナミクス," 日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月21日, 早稲田大学(東京都).
- ⑧ 若生周治, 市田秀樹, 馬場基彰, 川瀬稔貴, 川上将輝, 溝口幸司, 金大貴, 中山正昭, 兼松泰男, "ZnO 薄膜における励起子・励起子散乱発光ダイナミクスの膜厚依存性," 日本物理学会 第69回年次大会, 2013年3月27日, 東海大学(平塚市).
- ⑨ 若生周治, 市田秀樹, 川瀬稔貴, 川上将輝, 溝口幸司, 金大貴, 中山正昭, 兼松泰男, "ZnO 薄膜における励起子-励起子散乱発光の時間分解発光特性," 日本物理学会 第68回年次大会, 2012年3月28日, 広島大(東広島市).

6. 研究組織

(1)研究代表者

市田 秀樹 (ICHIDA, Hideki)

日本文理大学 工学部・特任准教授

研究者番号: 50379129