

2 波長励起による青色発光半導体の 非発光再結合準位スペクトロスコピー

研究課題番号 12650003

平成12年度～平成13年度科学研究費補助金 基盤研究(C)(2)

研究成果報告書

平成14年 3月

研究代表者 鎌田 憲彦

(埼玉大学工学部 機能材料工学科 助教授)

埼玉大学附属図書館



998005307

埼玉大学

1. 研究成果の概要

Abstract

By observing the intensity change of band-edge photoluminescence (PL) due to the superposition of a below-gap excitation (BGE) light on a conventional above-gap excitation (AGE) light, a quantitative study on nonradiative recombination (NRR) centers in GaN-based blue-emitting semiconductors became possible. Trap parameters of NRR centers were determined self-consistently by considering the AGE- and BGE-density dependence of the PL intensity change (BGE effect). The dependence of BGE energy revealed the energy distribution of NRR centers, while that of AGE energy determined the spatial distribution of them.

We analyzed the PL intensity decrease due to the BGE based on a two-levels model after SRH statistics. By using Nd:YAG laser (1.17 eV) as a BGE source, the reduction of NRR centers in well layers with increasing the number of hetero-interfaces was shown in GaN/AlGaIn multiple quantum well structures grown by MOCVD. In a GaN sample, an extremely slow relaxation process of yellow luminescence up to 28 s was observed after cutting off the BGE light. This is attributed to the recombination of electrons trapped at the upper state of the two-levels model, which enabled us to determine the hole capture rate of the state directly.

In relation to device performance, we studied the effect of temperature on the BGE effect. With increasing temperature, the normalized PL intensity of a donor-acceptor pair luminescence in GaN, initially 0.43 at 15K, showed a steep increase above 80 K and it became unity above 140K. The temperature dependence was considered to be due to the thermal emission of electrons trapped at the upper level of the two-levels model to conduction band. The activation energy of roughly 0.1 eV, obtained by curve fitting, agreed well with our previous energy determination of the upper state. On the other hand, yellow luminescence showed no distinct temperature dependence, which is quite important to understand the detailed mechanism of carrier recombination processes among below-gap states. The method of two-wavelength excited photoluminescence is shown to be powerful for characterizing NRR centers in GaN-based semiconductors, especially when time-resolved and temperature-dependent considerations are included.

1. 研究の背景と目的

半導体レーザの発振しきい値や発光ダイオードの素子効率や発光、非発光再結合過程の競合により定まる。このため材料組成や素子構造を最適化する上で、非発光再結合過程をもたらし禁制帯内の準位（非発光再結合準位）を正確に検出、定量化し、その成因を除去する工夫が不可欠である。しかしながら非発光再結合準位は同一材料組成でも作製条件依存性が強く、さらに非接触で簡便かつ定量性を兼ね備えた測定手法も欠けていた。このため従来の組成や構造設計は現象論的な扱いに留まり、本質的な理解に至るためのキャリア再結合過程の検討は甚だ不十分であった。GaN系青色発光材料では、サファイア基板との格子定数のミスマッチから高密度の転位、結晶欠陥が存在するにもかかわらず、比較的良好な内部量子効率を得られる場合が多い。また組成ゆらぎ、内部応力やピエゾ電界の影響が強く、そのキャリア再結合過程はGaAs系ほど単純ではない。青色発光デバイスのさらなる特性改善には、従来に増して非発光再結合準位を定量的に測定する手法の確立が望まれている。

申請者は2波長励起によるフォトルミネッセンス (PL) の実験・理論両面の改善を進め、非発光再結合準位の定量測定を1995年に初めて実現した。本研究はこれまでの研究成果を基盤として、申請者の開発した非発光再結合準位の定量分光法の測定、解析をGaN系青色発光半導体に適用し、

- ① GaN、InGaN/GaN 量子井戸構造等の禁制帯内に分布する非発光再結合準位を検出し、その空間分布、エネルギー分布等を明示すること
- ②実際のデバイス動作状態での影響を見積もるために、時間応答特性を含めたキャリア再結合過程の励起強度、温度依存性を明らかにすることを目的とした。

2. 2波長励起による非発光再結合準位の定量測定

通常の PL ではエネルギー $h\nu_A > E_g$ のバンド間励起 (Above-Gap Excitation, AGE) 光により伝導帯に電子、価電子帯に正孔を励起し、両者の発光再結合 (バンド間 PL) の強度 I_{AGE} を観測する。2波長励起 PL では AGE 光に加えてさらに $h\nu_B < E_g$ の禁制帯内励起 (Below-Gap Excitation, BGE) 光を試料に重畳照射し、その時の PL 強度 $I_{AGE+BGE}$ を観測して両者の比 $\Delta I = I_{AGE+BGE} / I_{AGE}$ を規格化 PL 強度と定義する。禁制帯内に非発光再結合準位がなければ BGE 光は吸収されずバンド間 PL 強度は変化しない ($\Delta I = 1$)。一方 BGE 光によって電子励起が起こるような非発光再結合準位が存在する場合は、準位の電子分布が変わるために非発光再結合率が変化し、その結果バンド間 PL 強度の変化 (BGE 効果) が観測される。

BGE 光照射による PL 強度の変化の方向 (増加または減少) とその変化量は、準位の Shockley-Read-Hall 統計での非発光再結合パラメータ (濃度 N_T 、エネルギー E_T 、電子・正孔捕獲率 C_n 、 C_p 、電子・正孔放出率 e_n 、 e_p 、及び電子占有関数 f_T) により定まる。従って規格化 PL 強度 ΔI から禁制帯内準位の情報を得ることができるはずである。しかしこれらのパラメータを一義的に矛盾無く決定することは実際上困難で、従来この手法は禁制帯内準位があるかないかの定性的な検出法に留まっていた。

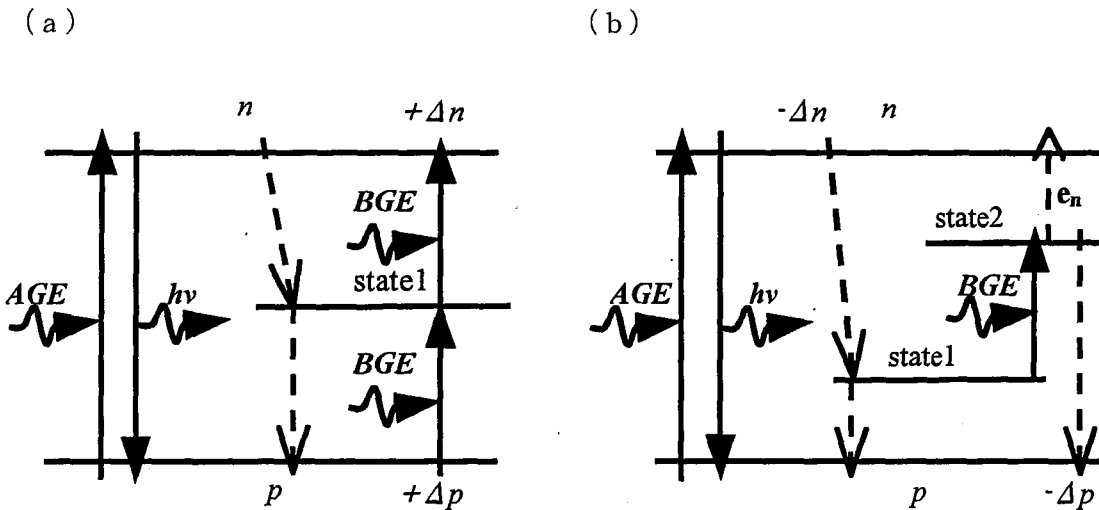
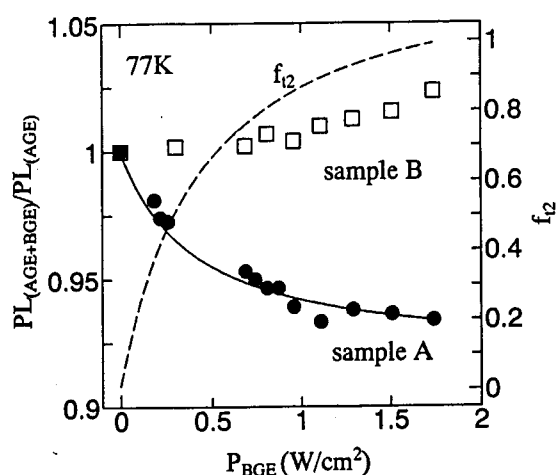


図1 PL 強度増加 ($\Delta I > 1$) の 1 準位モデル (a) と低下 ($\Delta I < 1$) の 2 準位モデル (b)

これに対して申請者は PL 強度変化の AGE 光および BGE 光強度依存性に着目し、内部量子効率、キャリア寿命の測定値を援用して、キャリア再結合のレート方程式におけるこの対応関係を逆にたどることにより、準位の非発光再結合パラメータを一義的に決定し得ることを初めて実証した。以下にこれまでの主要な研究成果を列挙する。

- ① GaAs/AlGaAs 量子井戸の BGE 光照射による PL 強度増大および減少の双方を観測し、禁制帯内準位が成長条件に強く依存すること、それらが各々「1 準位モデル」、「2 準位モデル」で表されることを示した (図 1)。
- ② PL 強度変化の BGE 光強度依存性を調べ、BGE 光強度が一定値を越えると PL 強度変化がそれ以上増さずに飽和する現象を初めて観測した。これが非発光再結合



準位の trap-filling (準位の飽和効果) によることを示し、飽和値を用いて非発光再結合準位パラメータの定量的導出を初めて実現した (図2)。

図2 Se-ドープ GaAs/AlGaAs 量子井戸 (Sample A) の規格化 PL 強度の BGE 強度依存性 (実線は得られたパラメータによる計算曲線)

- ③ AGE 光強度を低下し、この時 PL 強度も比例して低下するため単一光子計数測光する方式で BGE 光照射による PL 強度変化の検出感度を理論予測通り 3 桁改善した。単一光子計数は通常の PL 測定では標準的な測光手法だが、2 波長励起 PL では禁制帯内励起光の迷光成分の光子計数レベルでの除去が不可欠であり、それによって非発光再結合準位の定量分光測定の可能性が拓かれた。
- ④ AGE 光は照射せず BGE 光のみ照射した場合において、無ドープ GaAs/AlGaAs 量子井戸試料からバンド間 PL を観測した。この発光は価電子帯→禁制帯内準位→伝導帯の 2 段階の BGE 過程によるものであり、エピタキシャル成長層では初めての up-conversion PL であることを示した。
- ⑤ AGE 光エネルギーの走査により量子井戸構造内の励起領域を選択し、非発光再結合準位の空間分布 (どの組成の層に分布しているか) を明らかにした。
- ⑥ BGE 光エネルギーの走査により、非発光再結合準位の励起に要するエネルギーの分布が測定可能であることを示した。
- ⑦ GaN 基板、InGaN/GaN 量子井戸構造中の GaN バッファ層においても禁制帯内に非発光再結合準位を検出し、本手法が GaAs 系と同様に有効であることを示した。

3. GaN/AlGaIn 量子井戸の 2 波長励起 PL 測定 (下線は本研究による導入備品)

青色～紫外域発光材料である GaN 系半導体に本手法を適用するため、重水素ランプ、He-Cd レーザーを AGE 光源、ハロゲンまたは Xe ランプの分光出力、Ar レーザー、色素レーザー、可視～近赤外域半導体レーザー、Nd:YAG レーザー等を BGE 光源とした測定系を整備した。また 2 年目は低雑音ロックインアンプによりアナログ測定系を整備し、単一光子計数レベルから He-Cd レーザー励起でのアナログ測光領域までにわたって 2 波長励起での AGE 強度依存性の測定が可能な系を作製した。

まず Si ドープ GaN/Al_{0.56}Ga_{0.44}N (井戸層厚 4.3nm, 5、10 及び 30 周期) 量子井戸構造を MOCVD 法により成長し、それらのバンド端 PL 及び禁制帯内発光 (yellow-luminescence, YL) の 2 波長励起フォトルミネッセンス測定を 77K で行った。BGE 光源として Nd:YAG レーザー (1.17 eV) を用いたところ、非発光再結合準位によるバンド端 PL 強度の低下 (BGE 効果) は 5 周期の量子井戸で最も顕著で、周期が増すほど減少した (図 3 (a))。また YL の BGE 効果も同じ傾向を示した (図 3 (b))。このためヘテロ障壁界面での転位の抑制効果により、量子井戸周期の増大に伴って井戸層内の非発光再結合準位密度が低下していることが示された。この結果から GaN/AlGaIn 等の格子定数の異なる系でのデバイス構造最適化に対する一つの指針が確認されたと考えられる。

なお MBE 成長 GaN/Al_{0.20}Ga_{0.80}N 多重量子井戸試料の一部では BGE 効果の面内不均

一性が強く、また光照射を続けると PL 強度変化が消失した。これらは結晶成長プロセスが最適化されておらず、表面準位の不可逆過程に関連するものと考えられる。

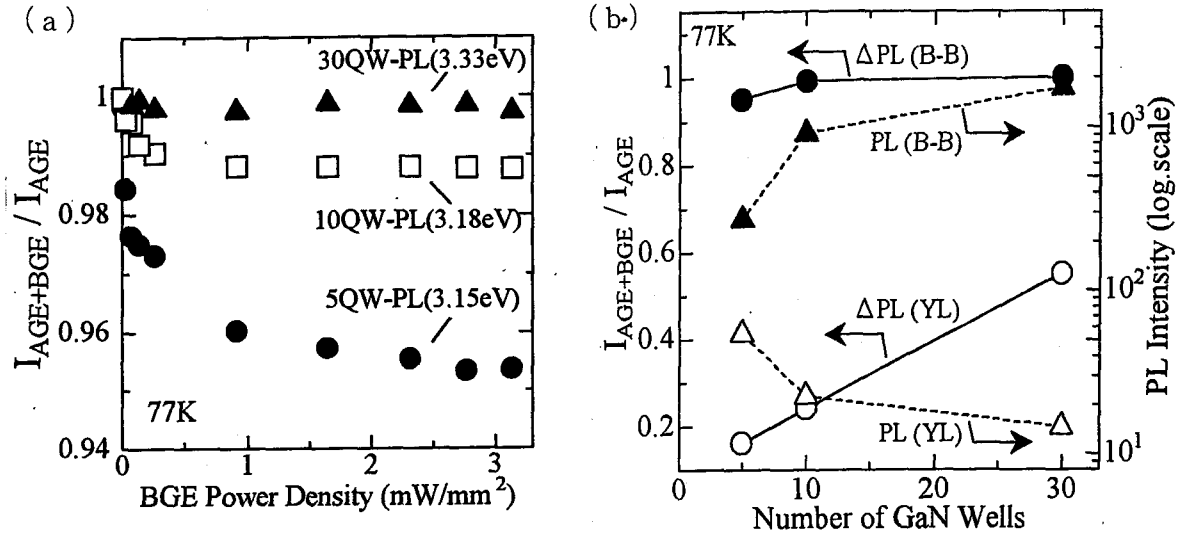


図3 Si ドープ GaN/ $Al_{0.56}Ga_{0.44}N$ 多重量子井戸における規格化バンド端 PL 強度の BGE 強度依存性 (a)、バンド端 PL および YL 強度の BGE 効果の量子井戸周期依存性

4. 時分解 2 波長励起フォトルミネッセンス

77K で無添加 GaN 基板のドナー・アクセプター対 (DAP) 発光及び YL の 2 波長励起 PL を測定中、BGE 光源である Nd:YAG レーザー (1.17 eV) を遮断後に PL 強度が

$$I(t) = (I_{AGE} - I_{AGE+BGE}) (1 - \exp(-t/\tau)) + I_{AGE+BGE}$$

という単一指数関数応答を示すことを見出した (図 4)。この回復時定数 τ の AGE 及び BGE 強度依存性を測定したところ、BGE 強度の増加に伴って τ は増加するがやがて飽和傾向を示し、YL ではその値は最大 28 秒となった (図 5)。この現象は 2 準位モデルの準位 2 (図 1 (b)) に蓄積された電子が、時定数 τ で価電子帯の正孔と再結合する過程であり、正孔捕獲率を直接反映していることがわかる。 τ の飽和値を用いることにより、準位 1 のパラメータ $N_{11} = 5.2 \times 10^{14} cm^{-3}$ 、 $C_{p1} = 3.8 \times 10^{-6} cm^3/s$ 、 $C_{n1} = 9.6 \times 10^{-11} cm^3/s$ に加えて準位 2 のパラメータ $N_{12} = 2.5 \times 10^{16} cm^{-3}$ 、 $C_{p2} = 2.7 \times 10^{-9} cm^3/s$ が定まった。さらに回復時間 τ は BGE エネルギー依存性を持ち、YL ($\sim 2.2eV$) 付近で増大した。こうした 2 波長励起 PL の時分解応答の解析は、複雑な禁制帯内のキャリア再結合過程を解きほぐす手段として極めて有望であり、今後の利用が期待される。

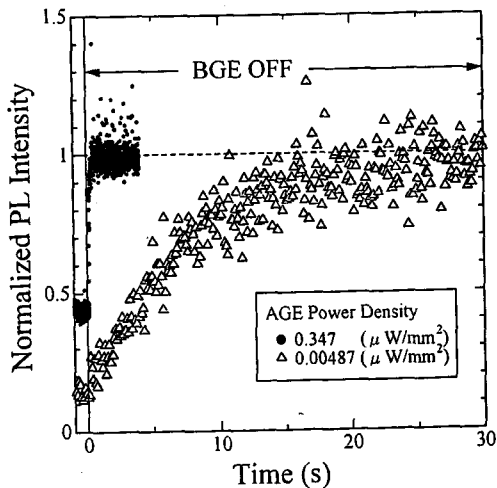


図4 GaN の YL の BGE 遮断後の応答波形

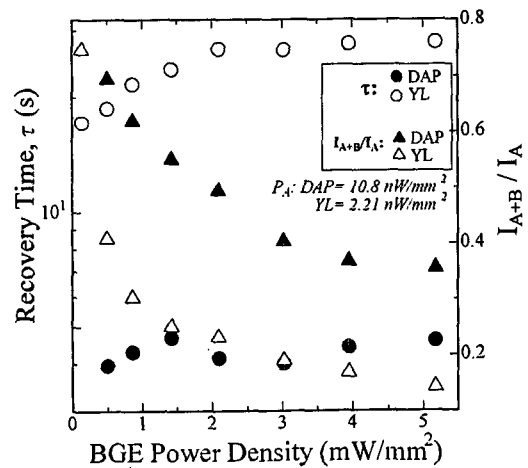


図5 回復時間 τ の BGE 強度依存性

5. 2波長励起フォトルミネッセンスの温度依存性

デバイス動作時の影響を検討するために AGE 強度依存性の測定を進めたが、これに付随して試料の温度上昇の効果を正確に把握する必要があり、並行して2波長励起 PL の温度依存性測定を進めた。無添加 GaN 基板の DAP 及び YL の BGE 効果を 10K ~ 300K 間で測定したところ、DAP 発光では規格化 PL 強度は 10 ~ 70K で低い値 (BGE 効果は大) となり、80K から 110K にかけて温度上昇に伴って急激な増加 (BGE 効果の減少) を示した。140K 以上では規格化 PL 強度は ~ 1 (BGE 効果はなし) であった (図6)。この結果は2準位モデルの準位2から伝導帯への電子の熱励起過程 (図1 (b) の e_n) で解釈され、実験結果の fitting により活性化エネルギー ~ 0.1eV が得られた。この値は先に BGE エネルギー依存性から算出した準位2の伝導帯下端とのエネルギー差に一致し、また DLTS 測定による禁制帯内準位分布とも矛盾がない。

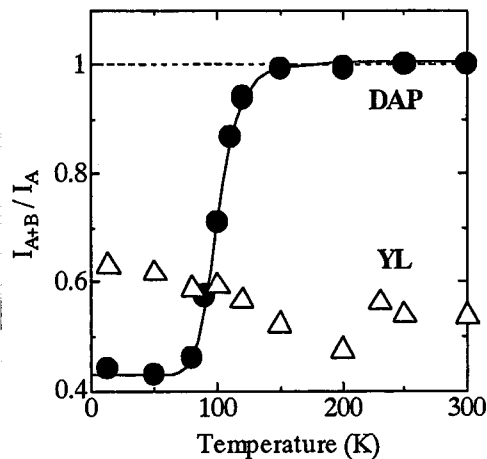


図6 GaN の規格化 PL 強度の温度依存性 (DAP の実線は $E_{act} \sim 0.1\text{eV}$ の計算曲線を示す)

一方 YL は顕著な温度依存性を示さず、こうした熱励起過程は当然ながら各準位によって異なることがわかる。したがって先の時分解応答と同様に、BGE エネルギーによって個々の非発光再結合準位を選択し、それぞれについて温度依存性を検討することにより、禁制帯内準位間のキャリア再結合過程を詳細に理解することが可能と考えられる。

6. 本手法の特長と今後の課題

本手法の特色は、第一に光学的非接触・非破壊測定により、従来不可能であった半導体内の非発光再結合準位パラメータの定量測定を実現した点、第二に分光学的手法 (禁制帯内励起光波長の走査) により非発光再結合準位のエネルギー分布測定、複数準位のパラメータの分離検出 (したがって個々の準位の分類と要因の究明) が可能な点、第三にそれが極微弱なバンド間励起条件により、大規模な波長可変レーザー設備でなく、通常の分光測定用光源でも実現可能な点である。

測定対象の半導体基板やエピタキシャル成長結晶には電極付けを要さず、また測定装置も特別な設備やスペースを必要としないため、本手法はプロセス現場への普及が期待される。結晶成長やその後のデバイス加工工程毎に非発光再結合準位の増減測定がその場で可能となり、継続使用によるプロセスのモニター、さらには問題発生 (発光効率低下) 時の要因解明とその除去が迅速に可能となる。さらなる結晶品質向上、デバイス構造最適化が望まれる GaN 系青色発光半導体への適用の目途が付き、今後の課題としては以下が挙げられる。

- (1) 時分解での2波長励起 PL をより有効に利用した測定、解析手法を開発する。
- (2) 温度依存性を考慮した非発光再結合準位のモデルの精密化を図る。

(3) 同一バルク試料を用いた電気的手法 (DLTS) との相互測定により、電気的測定と光学的測定間での捕獲断面積の相違を検討する。

(4) 意図的な欠陥、不純物の導入によってこれら物質中の禁制帯内準位の成因を解明する。

(5) InGaN/GaN、GaN/AlGaIn 量子井戸試料において In や Al 組成のより高い領域での禁制帯内準位の非発光再結合パラメータを定量的に決定し、結晶品質向上を進める。

(6) プロセス現場で使用可能な測定システムとして、ウェハー試料用に面内分布計測を含めた実用化を進める。

(7) 半導体以外に広範な発光材料 (蛍光体、有機分子等) への適用を進める。

7. 結論

様々な GaN 系青色発光半導体に 2 波長励起 PL の手法を適用し、禁制帯内の非発光再結合準位を検出、評価した。GaN/AlGaIn 量子井戸構造では、多層化により井戸層の結晶性が改善されるという最適化の一つの指針を得ることが出来た。測定手法としては特に、BGE 効果の時分解応答を新たに観測した。BGE 光遮断後の PL の回復時定数から、準位の再結合パラメータをより直接的に決定することが可能となった。また GaN 試料の BGE 効果の温度依存性を調べ、検出準位に関しては室温付近で伝導帯への熱励起過程の影響が大きく、2 準位モデルの精密化が可能であること、バンド端 PL と YL とでは係わる禁制帯内準位の温度依存性が異なることが明らかとなった。これらの成果はキャリア再結合過程を理解する上で重要であり、本手法は GaN 系青色～紫外域発光半導体の結晶性、デバイス構造の最適化に有力であると考えられる。

II. 研究組織

研究代表者：鎌田 憲彦 (埼玉大学工学部 機能材料工学科 助教授)
研究分担者：山田 興治 (埼玉大学工学部 機能材料工学科 教授)
研究分担者：荒川 泰彦 (東京大学先端科学技術研究センター 教授)
研究分担者：染谷 隆夫 (東京大学先端科学技術研究センター 講師)
(研究協力者：星野 勝之)
(研究協力者：ホセ・マリア・サナルデイ・オカンポ)

III. 交付決定額 (配分額)

計 (金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成12年度	1,600	0	1,600
平成13年度	800	0	800
総計	2,400	0	2,400

IV. 本研究による研究発表

(1) 学会誌等

1 - 1) 学術雑誌掲載論文

1) J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, K. Hoshino, M. Hirasawa, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Spectroscopic Discrimination of Non-Radiative Centers in Quantum Wells by Two Wavelength Excited Photoluminescence, *J. Crystal Growth*, 210, pp. 238-241, 2000.

----- 11

2) K. Hoshino, J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Absence of Nonradiative recombination Centers in Modulation-Doped Quantum Wells Revealed by Two-Wavelength Excited Photoluminescence, *Physica E*, 7, pp. 563-566, 2000.

----- 15

3) J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, K. Hoshino, K. Endoh, K. Yamada, M. Nishioka, T. Someya and Y. Arakawa: Spectroscopy of Non-Radiative Recombination Centers in Quantum Wells by Two-Wavelength Excited Photoluminescence, *J. Lumin.*, 87-89, pp. 363-365, 2000.

----- 19

4) J. M. Z. Ocampo, H. Klausning, O. Semchinova, J. Stemmer, M. Hirasawa, N. Kamata, K. Yamada: Study of MBE-grown GaN/AlGaIn quantum well structures by two wavelength excited photoluminescence, *Phys. Stat. Sol. (a)* 183, pp. 189-195, 2001.

----- 22

5) J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, W. Okamoto, K. Yamada, K. Hoshino, T. Someya and Y. Arakawa: Extremely Slow Relaxation Process of a Yellow-Luminescence-Related State in GaN Revealed by Two-Wavelength Excited Photoluminescence, *Phys. Stat. Sol. (b)* 228, pp. 433-436, 2001.

----- 29

6) N. Kamata, J. M. Z. Ocampo, W. Okamoto, K. Hoshino, T. Someya, Y. Arakawa and K. Yamada: Below-Gap Recombination Dynamics in GaN Revealed by Time-Resolved and Two-Wavelength Excited Photoluminescence, to be published in *Materials Science and Engineering B*.

----- 33

7) N. Kamata, J. M. Z. Ocampo, W. Okamoto, F. Takahashi, K. Yamada, K. Hoshino, T. Someya and Y. Arakawa: Temperature Dependence of Photoluminescence Intensity Change due to Below-Gap Excitation in GaN, to be published in *IOP Conf. Series*.

----- 37

1 - 2) 国際会議プロシーディングス

1) N. Kamata, M. Hirasawa, J. M. Z. Ocampo, K. Hoshino, K. Yamada, T. Someya and Y. Arakawa: Suppression of Yellow Luminescence in Multiple Quantum Wells revealed by Below-Gap Excitation Spectroscopy, *Proc. Int. Conf. on Physics of Semiconductors*, E21, p. 306 (Osaka, Japan, 2000).

----- 43

2) J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, M. Hirasawa, K. Hoshino, K. Yamada, T. Someya and Y. Arakawa: Distribution of Below-Gap States in GaN-Based Quantum Wells Revealed by Two-Wavelength Excited Photoluminescence: *Techn. Digest, Int. Workshop on Nitride Semicond. TA1-3*, p. 95 (Nagoya, Japan, 2000).

----- 44

3) J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, M. Hirasawa, K. Hoshino, K. Yamada, T. Someya and Y. Arakawa: Distribution of Below-Gap States in GaN-Based Quantum Wells Revealed by Two-Wavelength Excited Photoluminescence: *Proc. Int. Workshop on Nitride Semiconductors, IPAP Conf. Ser.*, 1, pp. 544-547, 2000.

----- 45

4) J. M. Z. Ocampo, H. Klausning, O. Semchinova, J. Stemmer, M. Hirasawa, N. Kamata, K. Yamada: Study of MBE-grown GaN/AlGa_N quantum well structures by two wavelength excited photoluminescence, Proc. Int. Workshop. on Physics of Light-Matter coupling in Nitrides, StNe-claire/Clermont-Ferrand (France), Oct. 8-12, 2000.

----- 49

5) N. Kamata, M. Hirasawa, J. M. Z. Ocampo, K. Hoshino, K. Yamada, T. Someya and Y. Arakawa: Suppression of Yellow Luminescence in Multiple Quantum Wells revealed by Below-Gap Excitation Spectroscopy, Proc. Int. Conf. on Physics of Semiconductors, Springer Proc. in Physics, 87, pp. 1521-1522, 2001.

----- 50

6) J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, W. Okamoto, K. Yamada, K. Hoshino, T. Someya and Y. Arakawa: Extremely Slow Relaxation Process of a Yellow-Luminescence-Related State in GaN Revealed by Two-Wavelength Excited Photoluminescence, Proc. Int. Conf. on Nitride Semicond., P19- 6, p. 68, 2001.

----- 52

7) N. Kamata, J. M. Z. Ocampo, W. Okamoto, K. Hoshino, T. Someya, Y. Arakawa and K. Yamada: Below-Gap Recombination Dynamics in GaN Revealed by Time-Resolved and Two-Wavelength Excited Photoluminescence, Proc. Int. Conf. on Defects - Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP IX), S10-4, p. 90, 2001.

----- 53

8) N. Kamata, J. M. Z. Ocampo, W. Okamoto, F. Takahashi, K. Yamada, K. Hoshino, T. Someya and Y. Arakawa: Temperature Dependence of Photoluminescence Intensity Change due to Below-Gap Excitation in GaN, Proc., Int. Symp. on Compound Semiconductors, TuP-14, p. 92, 2001.

----- 54

(2) 口頭発表

1) J. M. Zanardi Ocampo, M. Hirasawa, N. Kamata, K. Yamada, Study of MBE-Grown GaN Quantum Well Structures by Two-Wavelength Excited Photoluminescence, 応用物理学会学術講演会 6p-L-14(2000).

2) 岡本 航、サナルディ・ホセ、平澤 学、星野勝之、鎌田憲彦、染谷隆夫、荒川泰彦、「バルク GaN の時分解二波長励起フォトルミネッセンス」、応用物理学会関係連合講演会 29p-L-2(2001).

(3) 出版物

3-1) 解説・報告書

1) 鎌田憲彦：発光デバイス用半導体の非発光再結合準位スペクトロスコピー、平成10-11年度科研費基盤(C)(2)研究成果報告書, 2000.

2) 鎌田憲彦：光学特性と評価の基礎、日本表面科学会第3回薄膜基礎講座テキスト, 199-218, 2000.

3-2) 著訳書

1) A. Yariv 著、多田、神谷監訳(鎌田共訳)：「光エレクトロニクス(基礎編)」丸善、2000.

2) A. Yariv 著、多田、神谷監訳(鎌田共訳)：「光エレクトロニクス(展開編)」丸善、2000.

V. これまでの関連研究発表

(1) 学会誌等

1-1) 学術雑誌掲載論文

1) E. Kanoh, K. Hoshino, N. Kamata, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Saturation of photoluminescence quenching under below-gap excitation in a GaAs/AlGaAs quantum well, *J. Lumin.*, 63, pp. 235-240, 1995.

----- 55

2) N. Kamata, E. Kanoh, K. Hoshino, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Saturation of luminescence quenching due to non-radiative centers in a GaAs/AlGaAs quantum well, *Materials Science Forum*, 196-201, pp. 431-436, 1995.

----- 61

3) N. Kamata, K. Hoshino, T. Uchida, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Up-conversion luminescence via a below-gap states in GaAs/AlGaAs quantum wells, *Superlattices and Microstructures*, 22, pp. 521-528, 1997.

----- 66

4) N. Kamata, K. Hoshino, T. Uchida, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Sensitive detection of below-gap states by two-wavelength excitation spectroscopy in single-photon-counting region, *J. Lumin.*, 72-74, pp. 797-798, 1997.

----- 74

5) K. Hoshino, H. Kimura, T. Uchida, N. Kamata, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Distribution of below-gap states in undoped GaAs/AlGaAs Quantum Wells Revealed by Two-Wavelength Excited Photoluminescence, *J. Lumin.*, 79, pp. 39-46, 1998.

----- 76

6) K. Hoshino, T. Uchida, N. Kamata, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Below-gap spectroscopy of undoped GaAs/AlGaAs Quantum Wells by Two-Wavelength Excited Photoluminescence, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37, pp. 3210-3213, 1998.

----- 84

7) N. Kamata, J. M. Z. Ocampo, K. Hoshino, K. Yamada, M. Nishioka, T. Someya and Y. Arakawa: Below-gap spectroscopy of semiconductor quantum wells by two-wavelength excited photoluminescence (TWEPL), *Recent Research Developments in Quantum Electronics (Transworld Research Network)*, 1, pp. 123-135, 1999.

----- 88

1-2) 国際会議プロシーディングス

1) N. Kamata, E. Kanoh, K. Hoshino, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Saturation of luminescence quenching due to non-radiative centers in a GaAs/AlGaAs quantum well, *Proc. Int. Conf. on Defects in Semiconductors*, PMo-28, 1995.

2) N. Kamata, K. Hoshino, T. Uchida, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Up-conversion luminescence via a below-gap states in GaAs/AlGaAs quantum wells, *Proc. Int. Conf. on Superlattices, Microstructures and Microdevices*, ThP-8, 1996.

3) N. Kamata, K. Hoshino, T. Uchida, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Sensitive detection of below-gap states by two-wavelength excitation spectroscopy in single-photon-counting region, *Proc. Int. Conf. on Luminescence*, o10-2, 1996.

4) K. Hoshino, J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Below-gap state spectroscopy for quantum well structures by improved two-wavelength excited photoluminescence, Proc. Int. Topical Workshop on Contemporary Photonics Technology, Pc-05, pp. 199-200, 1998.

5) K. Hoshino, J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Absence of nonradiative recombination centers in modulation-doped quantum wells revealed by two-wavelength excited photoluminescence, Proc. Int. Conf. on Modulated Semiconductor Structures, Q05, pp. 339-340, 1999.

6) J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, K. Hoshino, K. Endoh, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Spectroscopy of non-radiative recombination centers in quantum wells by two-wavelength excited photoluminescence, Proc. Int. Conf. on Luminescence, A10-5, p. 304, 1999.

7) J. M. Z. Ocampo, N. Kamata, K. Hoshino, M. Hirasawa, K. Yamada, M. Nishioka and Y. Arakawa: Spectroscopic discrimination of non-radiative centers in quantum wells by two wavelength excited photoluminescence, Proc. Int. Conf. on Defects Recognition, Imaging and Physics in Semicond., XII-4, p. 154, 1999.

(2) 出版物

2-1) 解説・報告

1) 鎌田憲彦、星野勝之：2波長励起による非発光再結合準位の定量分光計の開発、Annual Report of the Murata Science Foundation, No. 13 (1999), pp. 118-123.

2-2) 著訳書

1) 中澤叡一郎、鎌田憲彦(共編著)：「光物性・デバイス工学の基礎」、培風館, 1999.

以上