

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2012

課題番号：23686003

研究課題名(和文) 近接場顕微分光法による窒化物半導体発光素子の効率ドロープ機構の解明

研究課題名(英文) Elucidation of efficiency droop mechanism in nitride semiconductor based light emitting devices by scanning near field optical microscopy

研究代表者

金田 昭男 (KANETA AKIO)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80372572

研究成果の概要(和文)：効率ドロープの主要因を解明するために、近接場光学顕微鏡を用いた PL 測定と時間分解(TR)PL 測定を行った。青色発光 InGaN では、キャリア密度が増加すると、キャリアが局在中心からオーバーフローするが、非輻射中心周囲にポテンシャル障壁が形成されているため、非輻射再結合するキャリアが増えないことが分かった。一方、緑色発光 InGaN では、キャリア密度が増加すると、キャリアが強発光領域から貫通転位に起因した非輻射中心が多数分布する In 組成の高い弱発光領域へ拡散するようになり、非輻射再結合するキャリアの割合が増えることが判明した。これらの結果より、貫通転位密度とキャリア寿命の増加が緑色発光 InGaN における効率ドロープの主要なメカニズムであることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：To clarify main factor of efficiency droop phenomena, we performed PL and time-resolved PL measurement using a scanning near field optical microscope. For the blue sample, although carriers overflow from localization centers under the high carrier density, the capture to nonradiative recombination centers (NRCs) hardly takes place because the potential barriers are formed around the NRCs. On the other hand, for the green sample, the increase of carrier density enhances the diffusion from the strong PL domains to the weak ones corresponding to high In composition area, where a large number of NRCs are distributed in association with threading dislocations. Such carrier recombination dynamics was found to be a major mechanism of the efficiency droop in the green sample due to the increase of both carrier lifetime and number of threading dislocations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2012年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
総計	18,200,000	5,460,000	23,660,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：走査プローブ顕微鏡・半導体物性・マルチモード近接場分光・過渡レンズ法・効率ドロープ

1. 研究開始当初の背景

近年、InGaN 量子井戸を活性層とする発光デバイスの開発は進み、外部量子効率 84.3%の青色発光ダイオード(LED)(444 nm)や、発光効率 249 lm/W と蛍光灯を遥かに上回る白色 LED が試作されるに至っている。また、LED は低消費電力、長寿命であるため、省エネ

ギー、環境負荷の低減に大きな役割を果たすと期待され、一部の照明機器では置き換えが始まっている。LED の普及をさらに推進するためには、高効率化に加え高出力化も重要となっている。

InGaN LED は、グリーンギャップという緑色やさらに長い波長領域において外部量子効

率が著しく低下する問題と効率ドループと呼ばれる注入電流を増やすにつれ光出力が飽和傾向を示す問題を抱えている。中でも効率ドループは、照明などの高出力を必要とする応用で問題となっている。発光の外部量子効率①は①光取り出し効率、②電流注入効率、③内部量子効率の積で表せる。①は注入キャリア量に対して不変のため、効率ドループに関わるのは、②と③である。これまでに、②に関連した、InGaN 活性層からの電子のリークや、InGaN 活性層におけるホール欠如を指摘する報告がある一方で、③に関連した、オージェ再結合や、局在中心からのキャリアのリークを指摘する報告もあり、主要因に関する統一的な見解は得られていない。

この問題は、LED 構造においてエレクトロルミネセンス(EL)法を用いて評価を行っている点にある。EL 法では、さまざまな要因が複合的に関与する、マクロスコピックな評価法のため、III 族窒化物半導体特有のナノ構造に起因した諸物性をすべて平均化してしまう、発光観測による評価のため非輻射再結合過程を直接観測していない、などの点から、効率ドループの物理要因を特定することは容易ではない。従って、活性層に注入されたキャリアの輻射および非輻射再結合過程、輻射および非輻射中心と結晶構造の相関など、それぞれの項目に着目し、詳細に解明することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、PL の内部量子効率に主眼を置き、近接場光学顕微鏡(SNOM)を用いた分光測定を InGaN QW に対して行い、ナノスケールにおけるキャリアの輻射および非輻射再結合過程を解明することとする。

本研究の特徴は、輻射中心と非輻射中心の空間分布の可視化できるマルチモード SNOM-PL と光熱変換分光法の一つである過渡レンズ測定を InGaN QW に対して行うことである。これまでの研究で行われてきた発光過程の観測だけではなく、非輻射中心の起源とその活性化過程、励起キャリア密度が変化したことによるキャリアの輻射および非輻射中心への捕獲過程の変化、キャリアの非輻射再結合による熱生成機構、局所領域におけるキャリア分布と発光効率との関係などをナノスケールで可視化し、InGaN 発光デバイスの高効率化と高出力化を妨げる要因を特定することとするのである。

3. 研究の方法

(1) c 面 InGaN QW における効率ドループ機構の解明

マルチモード SNOM-PL 測定と SNOM-TRPL 測定を励起キャリア密度を変化させて行い、PL 強度増加の飽和現象と PL 強度や PL ピーク波長の分布の変化との対応や再結合寿命の変化を観測し、効率ドループにかかわるキ

ャリアの再結合機構を明らかにする。試料表面に位置の基準となる金属マーカを作製することで、装置間や、測定ごとの位置ずれを防ぐ工夫をする。

(2) 半極性面 InGaN QW における貫通転位と発光機構の解明

長波長領域にて高効率発光が期待されている半極性面上 InGaN QW に対し、マルチモード SNOM-PL マッピングと AFM による表面観察により、PL 強度や PL ピーク波長分布と表面モフォロジと関係を明らかにする。

(3) 過渡レンズ測定による非輻射再結合過程の評価

InGaN QW に対して、共焦点顕微鏡発光測定による発光強度分布と過渡レンズ測定から得られるキャリア分布の励起キャリア密度による変化を同一領域で観測し、発光強度の飽和現象にオージェ再結合が関与しているかどうかを明らかにする。

4. 研究成果

(1) c 面 InGaN QW における効率ドループ機構の解明

測定試料は、サファイア(0001)基板上に横方向選択成長した GaN テンプレート上の InGaN/GaN SQW 構造である。InGaN QW 層厚は3 nm、GaN キャップ層厚は5 nm である。室温における発光が青色(470 nm) および緑色(520 nm)の2種類である。

図1に、マクロ積分 PL 強度の励起キャリア密度依存性を示す。青色発光 InGaN では、励起キャリア密度の増加に対して線形に積分 PL 強度が増加した。一方、緑色発光 InGaN では、積分 PL 強度の飽和現象が確認された。測定したキャリア密度の範囲は、LED の駆動条件下での活性層のキャリア密度に対応している。このことから、青色 LED では内部量子効率が効率ドループ現象に寄与しないこと、一方、緑色 LED では内部量子効率が強く関与することが示唆される。そこで、この現象を解明するために、SNOM-PL 測定と SNOM-TRPL 測定を行った。

測定は、同一のプロープにより光励起と集光を行うイルミネーション・コレクション(I-C)モードとした。励起光源には、10 mW 以下の励起には、波長 400 nm の InGaN レーザダイオード(LD)を、100 mW のときには、ピコ秒パルスチタンサファイアレーザの2倍高調波 400 nm を用いた。励起キャリア密度は、1 mW 励起で $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、100 mW 励起で $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度であると見積もっている。

図2に、青色 InGaN SQW の SNOM-PL 強度マッピングの結果を示す。図2(a)が弱励起、(b)が強励起、(c)がそれらの比である。直径が数百 nm 程度の島状の強発光領域が分布しており、励起パワーの増加とともに強発光領域が拡大していることが分かる。また、図中の白実線で囲んだ領域のように、弱励起におい

でもともと強発光領域は、励起強度が増えても PL 強度はサブリニアにしか増加しない。一方、もともと弱発光領域(白点線)は、スーパーリニアに PL 強度が増加することが判明した。巨視的に見た時には、これら相反する PL 強度の励起パワー依存性によって、図 1 に示したように線形な関係となり、効率ドロープは PL では観察されない。

図 2 で示した、強発光領域と弱発光領域の特性の違いを理解するために、SNOM-PL マッピングから、各測定点での PL ピークエネルギーを求めた。図 3 に結果を示す。ここで、強発光領域、あるいは弱発光領域は、図 2(c) に示した PL 強度比がそれぞれ 26 以下、あるいは 90 以上の領域で定義し、各領域に分類される測定点での PL ピークエネルギーの平均をシンボル(それぞれ ■あるいは ▲)で、分布をエラーバーで示した。また、測定全域の平均(◆)の分布もあわせて示した。強発光領域では、弱励起時には低エネルギー側で発光するが、励起パワーの増加に従い顕著なブルーシフトを見せる。一方、弱発光領域の平均 PL ピークエネルギーは、測定全域のそれよりも弱励起時には高エネルギー側に位置し、励起パワーにはあまり依存しない。これは、強発光領域が In 組成の大きな局在領域であり、弱発光領域が非局在領域であることを示している。

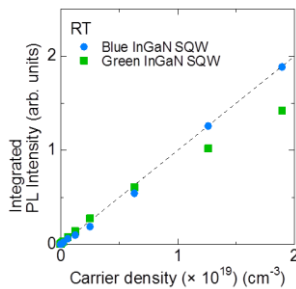


図 1 青色および緑色発光 InGaN QW の積分発光強度の励起キャリア密度依存性

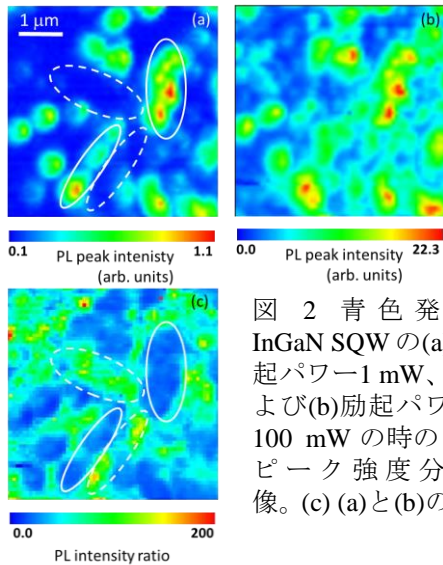


図 2 青色発光 InGaN SQW の(a)励起パワー1 mW、および(b)励起パワー100 mW の時の PL ピーク強度分布像。(c) (a)と(b)の比

以上の実験結果から、次のようにキャリア再結合メカニズムを説明することができる。光励起キャリアが増えると、局在中心が占有されていくため PL ピークはブルーシフトする(図 3)。また、キャリアは局在中心からあふれ、非局在領域(つまり弱発光領域)に拡散するために、キャリアの流入先である弱発光領域の PL 強度はスーパーリニアな励起密度依存性を示すことになる(図 2)。ここで注意しなければならないことは、青色発光 InGaN では、非輻射中心となる貫通転位の周囲にポテンシャル障壁が存在し、キャリアの捕獲を妨げている。そのため、非局在化したキャリアが比較的自由に動けるようになっても、非輻射再結合が増加するわけではない。青色発光 InGaN QW に関しては、励起密度に応じてさまざまなキャリアダイナミクスが起こってはいるが、内部量子効率自体は励起密度依存性を示さないようになる(図 1)。

一方、緑色発光 InGaN SQW についても同様の SNOM-PL マッピングを行ったところ、ほぼすべての測定点で、励起パワーの増加に従って PL 強度が飽和した。ただし、飽和の程度は強発光領域でより顕著であり、SNOM による発光強度マッピング像のコントラスト

一方、緑色発光 InGaN SQW についても同様の SNOM-PL マッピングを行ったところ、ほぼすべての測定点で、励起パワーの増加に従って PL 強度が飽和した。ただし、飽和の程度は強発光領域でより顕著であり、SNOM による PL 強度マッピング像のコントラストと

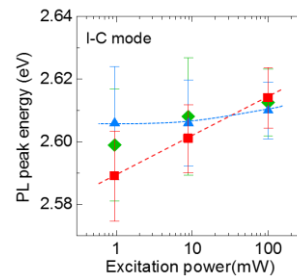


図 3 青色発光 InGaN SQW の強発光領域(■)、弱発光領域(▲)および全領域(◆)の平均発光ピークエネルギーの励起パワー密度依存性

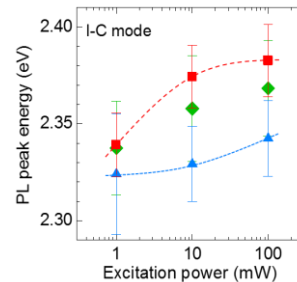


図 4 緑色発光 InGaN SQW の強発光領域(■)、弱発光領域(▲)、および全領域(◆)の平均発光ピークエネルギーの励起パワー密度依存性

しては、図2と全く同様、強発光領域で強度比が小さくなる傾向となった。ところが、PLピークエネルギーについては、図4にプロットしたように、青色発光 InGaN(図3)とは全く異なる特性となった。図4でのシンボルとエラーバーの意味は図3と同一であるが、強発光領域と弱発光領域は、1 mW と 100 mW 励起での PL 強度比がそれぞれ 6 以下あるいは 32 以上となる領域で再定義した。

図4の特徴の一つは、青色発光 InGaN とは異なり、強発光領域が高エネルギー側、弱発光領域が低エネルギー側に存在していることである。緑色発光 InGaN では、青色発光 InGaN に比べて In 組成が高くなっているため、InGaN QW と下地の GaN との格子不整合が増大し、In 組成の大きい低エネルギー発光領域に新たに欠陥が導入されて非輻射再結合中心として働いている。貫通転位密度は 10 倍程度となっていることがわかっている。そのため、転位周りにはポテンシャル障壁はあるものの、貫通転位によるキャリアの捕獲機会が多くなっており、それが、In 組成が大きい低エネルギー発光領域での弱発光の要因となっていると考えられる。もう一つの特徴は、強発光領域での PL ピークエネルギーの顕著なブルーシフトである。青色発光 InGaN と同様に、強発光領域は局在領域であることを示しており、しかも、10 から 100 mW にかけてのブルーシフトが小さいことは、局在系の状態数が小さいことを示唆している。

以上の結果を踏まえ、緑色発光 QW でのキャリアダイナミクスを考える。弱励起時には、局在領域から強い発光が見られるが、小さな状態数のために励起密度の増大に伴って顕著なブルーシフトを示し、10 mW を超えたあたりから、より In 組成の多い弱発光領域へキャリアが拡散する(図4)。その領域では、非輻射再結合中心である貫通転位が多いため、強発光領域、弱発光領域とも PL 強度の飽和を示し(SNOM-PL 強度マッピング)、それが巨視的にも、図1のように PL 強度の飽和となって現れる。このメカニズムからわかるように、内部量子効率そのもののドループが起こっており、その改善が LED などの特性改善に向けて重要である。

ここまで述べてきた、強発光領域から弱発光領域へのキャリア拡散の存在を裏付けるために、緑色発光 InGaN において、SNOM-TRPL 測定を室温で行った。その結果、弱励起時(1 mW 相当)には再結合寿命は 65 ns と巨視的な測定と同程度であったが、励起強度を増加すると(10 mW 相当)、160 ps 程度の速い過程が、SNOM においてのみ、PL スペクトルの高エネルギー側で観察された。図4と合わせて考えると、10 mW 程度の励起により、局在準位が飽和してより In 組成の大きい領域への拡散が顕在化するため、その過程が高速の寿命

として観察されたとと言える。青色発光 InGaN では、キャリア拡散が生じて非輻射再結合するキャリアは増えない。一方、緑色発光 QW では、拡散の結果、非輻射再結合するキャリアが増えることが重要な点である。すなわち、青色 LED の効率ドループには、内部量子効率の寄与は小さく、むしろキャリア注入効率の寄与が大きい。後者は、主にデバイスの構造が決める効率であり、効率ドループの抑制には、その検討が必要となる。一方、緑色発光 LED での効率ドループには、内部量子効率のドループが強く関与しており、素子の品質の改善が重要である。

(2) 半極性面 InGaN QW における貫通転位と発光機構の解明

試料構造は、{20-21}基板上に有機金属気相成長法により作製された 3 nm 厚みの InGaN 単一量子井戸(SQW)であり、10 nm の GaN 層によりキャップされている。SNOM-PL 測定の場合は、励起光源として InGaN LD (波長 405 nm)、励起強度はプローブへの導入直前で 5 mW 程度、プローブ径は 150 nm とした。また、測定モードには、I-C モードを用いた。測定はすべて室温で行った。

図5に SNOM-PL マッピングによって得られた PL 強度分布および PL ピーク波長分布、それらの相関、測定点 A から D の SNOM-PL スペクトルを示す。発光強度は島状(数百 nm 程度)になっていた。同程度の発光波長をもつ(0001)面上 InGaN の場合、約 200 倍の PL 強度分布と約 20nm の PL ピーク波長分布が存在するが、{20-21}InGaN の場合、PL 強度分布が 4.5(=0.9/0.2)倍、PL ピーク波長分布は 5 nm と非常に小さく、発光の均一性が高いことを示している。PL ピーク波長は[-12-10]に沿って分布していた。これについては後述する。PL 強度と PL ピーク波長の相関を見ると、長波長発光するほど発光強度が低下しており、In の増加に伴う欠陥の増加を示唆している。この傾向は、緑色発光する(0001)面上の

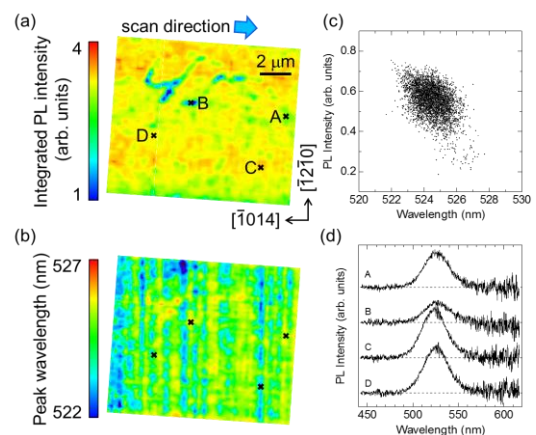


図5 緑色発光{20-21} InGaN SQW の(a)PL強度分布、(b)PLピーク波長分布、(c)PL強度とピーク波長の相関、および(d)(a)の中の点A、B、C、Dで観測したPLスペクトル

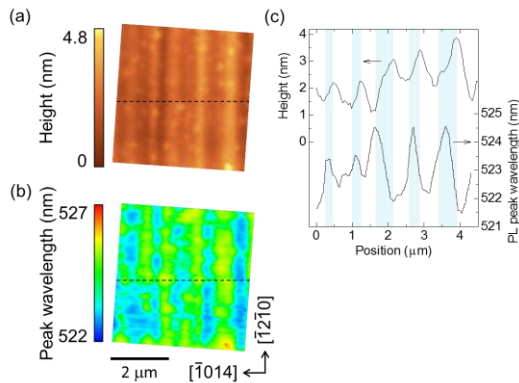


図6 緑色発光{20-21} InGaN SQW の(a)表面像、(b)PL ピーク波長分布、(c) (a)および(b)中の黒点線における断面プロファイル

InGaN と同様である。ただし、(0001)面の場合は、らせん転位起因の貫通転位の増加が長波長発光を弱める原因であることを示す実験結果が得られていたが{20-21}の場合、欠陥の種類が線欠陥なのか、それとも点欠陥なのかを同定するには至っていない。発光スペクトルは、図5の右下図に示したように、発光波長にかかわらずシングルピークであり、その半値幅は30-35 nmであった。巨視的に測定したPLでの半値幅(35-40 nm)と同程度であった。図6に、PL ピーク波長分布と AFM 像を比較した結果を示す。AFM 像には、貫通転位は観測されていない。(0001)面の場合は、らせん転位が増加するが、{20-21}面では、らせん転位の増加は顕著ではないことを示している。表面構造のうねりは稜線が[1210]に沿った特徴的な形状をしており、結晶学的な異方性に起因したものと考えられる。このうねりは、角度にして 0.5° 以下であり、ある特定の指数面が出ているわけではない。図6(c)中の青い網掛けの領域で示したように、c 面側に傾いた面が長波長発光領域に対応していることが確認された。面方位の微妙な違いがInの取り込みの違いとなって発光波長に現れていると考えている。

(3) 過渡レンズ測定による非輻射再結合過程の評価

測定試料は(0001)サファイア基板上青色発光 InGaN SQW と緑色発光 InGaN SQW である。InGaN 活性層幅と GaN キャップ層はそれぞれ3nmと5nmである。PL ピーク波長はそれぞれ470 nmと520nmである。共焦点顕微発光マッピング測定と過渡レンズ測定の励起キャリア密度依存性を同一領域で行った。励起光強度の増加に伴って PL 強度が飽和する領域において、過渡レンズ測定によって得られるキャリア密度の励起強度依存性を観測した。その結果、PL 強度が飽和する領域は、キャリア密度も飽和傾向を示していた。このことは、生成されたキャリアが励起点の周囲へ拡散してしまうことによって、PL 強度が飽和していると解釈でき、オージェ再結合の関

与を否定する結果である。従って、過渡レンズ測定によっても、発光領域から非発光領域へのキャリアの流出が効率ドロップ現象の主要因であることを支持する結果を得た。

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5件) 全て査読有

- (1) A. Kaneta, Y. S. Kim, M. Funato, Y. Kawakami, Y. Enya, T. Kyono, M. Ueno and T. Nakamura, “Nanoscopic photoluminescence properties of a green-emitting InGaN single quantum well on a {20-21} GaN substrate probed by scanning near-field optical microscopy”, *Appl. Phys. Exp.*, 5, pp.102104/1-3 (2012). DOI:10.1143/APEX.5.102104.
- (2) A. Kaneta, R. Fujimoto, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Funato and Y. Kawakami, “Instrumentation for dual-probe scanning near-field optical microscopy”, *Rev. Sci. Instrum.*, 83, pp.083709/1-11 (2012). DOI:10.1063/1.4737883
- (3) J. Danhof, H. M. Solowan, U. T. Schwarz, A. Kaneta, Y. Kawakami, D. Schiavon, T. Meyer and M. Peter, “Lateral charge carrier diffusion in InGaN quantum wells”, *Phys. Stat. Solidi B*, 249, pp.480-484 (2012). DOI:10.1002/pssb.201100476.
- (4) Y. S. Kim, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, T. Kyono, M. Ueno and T. Nakamura, “Optical gain spectroscopy of a semipolar {20-21}-oriented green InGaN laser diode”, *Appl. Phys. Exp.*, 4, pp.052103/1-3 (2011). DOI: 10.1143/APEX.4.052103.
- (5) J. Danhof, U. T. Schwarz, A. Kaneta and Y. Kawakami, “Time-of-flight measurements of charge carrier diffusion in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ quantum wells”, *Phys. Rev. B*, 84, pp.035324/1-5 (2011). DOI:10.1103/PhysRevB.84.035324.

[学会発表] (計18件)

- (1) A. Kaneta, Y. S. Kim, M. Funato, Y. Kawakami, Y. Enya, T. Kyono, M. Ueno and T. Nakamura, “Nanoscopic PL properties in green emitting InGaN single quantum well on {20-21} GaN substrate probed by scanning near field optical microscopy”, *Intern. Workshop on Nitride Semiconductors*, Sapporo, Japan (16 October 2012).
- (2) A. Kaneta, M. Funato and Y. Kawakami, “Recombination Dynamics in InGaN Single Quantum Wells by Scanning Near-field Optical Microscopy”, *The 2nd Sweden-Japan Workshop on Nanophotonics and Related Technologies*, Kista, Sweden (19 June 2012).

- (3) Y. S. Kim, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, T. Miyoshi and S. Nagahama, "Optical Gain Properties of (0001) Oriented InGaN-Based Green Laser Diodes with Low Threshold Current Density", 16th Intern. Conf. on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XVI), Paradise Hotel Busan, Busan, Korea (22 May 2012).
- (4) Y. Kawakami, A. Kaneta and M. Funato, "Recombination Dynamics in Nitride Semiconductors by Scanning Near-field Optical Microscopy", 5th GCOE Intern. Symp. on Photonics and Electronics Science and Engineering, Katsura-Campus, Kyoto University, Kyoto, Japan (8 March 2012) (Invited).
- (5) A. Kaneta, M. Funato and Y. Kawakami, "Local carrier dynamics in InGaN quantum wells studied by scanning near-field optical microscopy", 2011 Optics+Photonics, San Diego Convention Center, San Diego Marriott Marquis and Marina, California, USA (25 August 2011) (Invited).
- (6) J. Danhof, U. T. Schwarz, A. Kaneta and Y. Kawakami, "Lateral charge carrier diffusion in InGaN quantum wells", 9th Intern. Conf. on Nitride Semiconductors, Glasgow, UK (12 July 2011).
- (7) A. Kaneta, A. Hashiya, M. Funato and Y. Kawakami, "Impact of internal quantum efficiency on the droop phenomena studied by scanning near-field optical microscopy in InGaN single quantum wells", 9th Intern. Conf. on Nitride Semiconductors, Glasgow, UK (11 July 2011).
- (8) 井上航平, 金田昭男, 船戸 充, 川上養一, 岡本晃一, "InGaN/GaN SQW における非輻射再結合のキャリアダイナミクス", 第 60 回応用物理学会関係連合講演会, 神奈川県工科大学 (2013 年 3 月 30 日).
- (9) 川上養一, 金田昭男, 船戸 充, "ナノ光励起による窒化物半導体の発光機構解明と制御へのアプローチ", 第 60 回応用物理学会関係連合講演会, 神奈川県工科大学 (2013 年 3 月 27 日) (Invited).
- (10) 金田昭男, 船戸 充, 川上養一, "緑色発光 InGaN 量子井戸の近接場光学分光", 第 5 回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム, 日本科学未来館 (2013 年 1 月 11 日).
- (11) Y. S. Kim, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, T. Miyoshi, S. Nagahama, "Effects of internal fields and potential inhomogeneity on the lasing properties of InGaN-based green laser diodes fabricated on (0001) polar substrates", 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 大阪市立大学 (2012 年 11 月 30 日).
- (12) Y. Kim, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, T. Kyono, M. Ueno, and T. Nakamura, "Optical gain spectra in semipolar {20-21} oriented green InGaN LDs in comparison with (0001) LDs", 30th Electronic Materials Symposium, Laforet Biwako, Shiga, Japan (29 June 2011).
- (13) 金田昭男, 金潤碩, 船戸 充, 川上養一, 塩谷陽平, 京野孝史, 上野昌紀, 中村孝夫, "緑色発光{20-21}GaN 基板上 InGaN 量子井戸の近接場顕微発光測定", 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学・松山大学 (2012 年 9 月 12 日).
- (14) 金 潤碩, 金田昭男, 船戸 充, 川上養一, "Contribution of low inhomogeneous broadening to the optical gain of a (0001) oriented InGaN-based green laser diode", 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学・松山大学 (2012 年 9 月 12 日).
- (15) 川上養一, 船戸 充, 金田昭男, "近接場分光による局在・輻射・非輻射再結合ダイナミクスの評価", 第 59 回応用物理学会関係連合講演会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 早稲田中・高等学校 興風館 (2012 年 3 月 15 日) (Invited).
- (16) Y. Kim, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, T. Kyono, M. Ueno and T. Nakamura, "Optical gain spectra in semipolar {20-21} oriented green InGaN LDs in comparison with (0001) LDs", 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 京都大学 (2011 年 11 月 18 日).
- (17) 金田昭男, 橋谷 亨, 船戸 充, 川上養一, "近接場顕微分光測定による InGaN 量子井戸中のキャリア拡散が効率ドロープ現象へ与える影響", 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形大学 (2011 年 9 月 1 日).
- (18) Y. Kim, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, T. Kyono, M. Ueno, and T. Nakamura, "Optical gain spectra in semipolar {20-21} oriented green InGaN LDs in comparison with (0001) LDs", 30th Electronic Materials Symposium, Laforet Biwako, Shiga, Japan (29 June 2011).
- [その他]
ホームページ等
<http://www.optmater.kuee.kyoto-u.ac.jp/>
6. 研究組織
- (1)研究代表者
金田 昭男 (KANETA AKIO)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 80372572