

機関番号：14301

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18069007

研究課題名（和文）高 In 組成 InGaN および高 Al 組成 AlGaN の輻射・非輻射再結合過程の解明と制御

研究課題名（英文）Assessment and control of radiative/nonradiative recombination processes in In-rich InGaN and in Al-rich AlGaN

研究代表者

川上 養一 (KAWAKAMI YOICHI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30214604

研究成果の概要(和文)：高 In 組成 InGaN については、とくに半極性{11-22}面の利用を提案し、InGaN 量子井戸における高い輻射再結合確立を実証した。さらに、この面を利用した青から赤色の発光ダイオードを試作した。また、評価装置として2本の独立したプローブを用いる近接場光学顕微鏡を開発し、InGaN 量子井戸におけるキャリアダイナミクスを可視化した。高 Al 組成 AlGaN については、高品質な薄膜結晶をサファイア(0001)面上に作製するための結晶成長法を確立した。(0001)面から強い発光を得るための量子構造の設計指針を明らかにし、さらに、それを利用して、電子線励起による AlGaN 量子井戸からの高効率(最大 40%)、高出力(最大 100mW)発光を深紫外域(240nm)で達成した。

研究成果の概要(英文)：For high In-content InGaN, we proposed to use {11-22} semipolar planes and demonstrated high radiative recombination probabilities in semipolar InGaN quantum wells (QWs). Furthermore, LEDs emitting in the blue to red spectral region were fabricated on this semipolar {11-22} plane. In addition, to assess optical properties in InGaN QWs, a scanning near-field optical microscope that uses two independent fiber probes was developed, by which carrier dynamics were visualized. For high Al-content AlGaN, we first established the growth method to obtain high quality films on sapphire (0001) substrates. The guideline to extract intense emission from AlGaN QWs grown on the (0001) plane was clarified. Based on this guideline, high power efficiency (max. 40%) and high emission power (max 100mW) were achieved at ~240nm from an AlGaN QW pumped by an electron beam.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	16,000,000	0	16,000,000
2007年度	13,600,000	0	13,600,000
2008年度	12,800,000	0	12,800,000
2009年度	11,200,000	0	11,200,000
2010年度	10,400,000	0	10,400,000
総計	64,000,000	0	64,000,000

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：InGaN・AlGaN・輻射再結合・非輻射再結合・発光機構解明

1. 研究開始当初の背景

InGaN 系窒化物半導体を用いて、近紫外から緑色領域での発光ダイオード(LED)や近紫外から青色領域でのレーザダイオード(LD)が実用化されていた。これらの発光色は、

InGaN 量子井戸発光層における In 組成で言えば、おおよそ 25%以下に相当しており、より In 組成の高い InGaN の結晶成長は困難な状況であった。一方、AlGaN 系の量子井戸を用いた紫外域デバイスとしては、Al 組成、約 20%

以下の AlGaIn を用いた、300nm 台で発光する LED の試作はなされていたものの、その発光効率も低く、さらに Al 組成を増した短波長領域では、やはり結晶成長が難しく、未踏波長領域であった。

これら物性制御が困難な混晶半導体成長において、有機金属気相成長法 (MOCVD)、分子線エピタキシー法 (MBE) そしてレーザーアブレーション法 (PLD) などの手法によって、擬似格子整合基板の探索、界面制御や低温エピ成長技術などについて色々なアプローチが試みられていた。

一方、結晶の評価に関しては、われわれは、早い時期からワイドギャップ半導体の発光ダイナミクスに着目し、時間分解ルミネッセンス (TRPL) 測定による研究を行ってきた。とくに低 In 組成 InGaIn 量子井戸では、組成揺らぎに起因した励起子局在化の効果が強いことを見出し、この材料系での発光モデルの基礎となった。さらに、局在中心の空間分布を評価するため、マルチモード近接場光学顕微鏡 (SNOM) を初めて開発し、発光中心と非発光中心がクラスター状に集積した領域が存在していること、キャリア・励起子の拡散プロセスがサブミクロン程度の空間階層のポテンシャル揺らぎによって生じていることを見出した。

これまでに得られた知見は、In 混晶組成が 15% 程度の青色発光 InGaIn に関するものであるが、これよりも In 混晶組成が高い InGaIn や高 Al 組成 AlGaIn においては、局在中心の深さや空間スケール及び形成される非発光中心の起源や密度がまったく異なるものと予想されていた。

2. 研究の目的

本研究は、高 In 組成 InGaIn および高 Al 組成 AlGaIn の輻射・非輻射再結合過程を時間・空間分解による分光法によって解明し、発光局在中心の人為的導入やマクロ線欠陥 (貫通転移や積層欠陥など) やナノ点欠陥 (原子空孔やアンチサイトおよびこれらと不純物がカップルした複合点欠陥など) に起因した非発光中心の抑制するための知見を得ることを目標とした。このことによって、われわれのみならず重点領域に参画している多くの結晶成長グループに有用な情報を提供し、最適な成長法や成長条件についてポジティブなフィードバックを加えていくことにより、未踏の波長領域における高効率発光・受光デバイスの実現に寄与することを目的とした。

3. 研究の方法

目的を達成するためには、低次元量子井戸構造 (QW) の結晶成長と、そこでの基礎物性の評価が、いわば車の両輪であると考えて研究を推進した。

光物性評価については、われわれが開発したマルチモード近接場光学顕微鏡技術によって、ナノ空間における発光と非発光のダイナミクスを詳細に評価した。空間分解能として 30nm、時間分解能として 10ps が可能であり、局在発光中心の量子構造や振動子強度、マクロ・ナノ欠陥の起源や密度および非輻射再結合中心の捕獲断面積に関する知見を得ることが可能である。加えて、装置開発も行い、2 本のプローブを用いてキャリアの拡散現象を可視化するデュアルプローブ SNOM (DSNOM) を開発した。

結晶成長については、有機金属気相成長 (MOVPE) 法により、高 In 組成 InGaIn および高 Al 組成 AlGaIn の量子井戸構造を作製した。また、高品質結晶の作製技術と詳細な物性評価の結果をリンクして発光デバイスの設計・試作も随時、行った。

4. 研究成果

(1) 高 In 組成 InGaIn に関して

① 半極性 {11-22} 基板の提案と LED のデモンストレーション: 従来 (0001) 極性面上に発光デバイスが作製されていたが、そこでは、自発分極とピエゾ分極による電界が InGaIn 発光層に導入されており、発光再結合確率を低下させる要因となっていた。分極電界を低減することを目指し、{11-22} 半極性面の利用を提案した。ハイドライド気相成長法で [0001] 方向に成長した厚膜 GaN から {11-22} 面を切り出して基板として用いることにより、高品質な GaN および InGaIn QW の MOVPE 成長が可能となった。時間分解分光によって、発光再結合確率が (0001) 極性面より 2 桁向上することを実証した。さらに、半極性 InGaIn QW を用いた青～赤色 LED の試作を行った。GaN 基板上への半極性 LED の世界初のデモンストレーションであり、その後の研究の展開に大きな影響を与えた。

② 半極性 {11-22} 面上 InGaIn QW の偏光特性: {11-22} 面上では、結晶の異方性に起因して、偏光した発光が得られる。当初は、In 組成にかかわらず <1-100> 方向に強く偏光していると考えられていたが、多くの QW を調べた結果、In 組成が 30% を超えると、偏光方向が 90 度回転し <11-23> 方向となることを見出した。この偏光スイッチは、無極性面では観察されないことから、半極性面に特有のせん断歪が要因であると考えた。偏光特性は、例えば、LD における共振器の方向を決める重要なパラメータである。さらに偏光 LED を液晶のバックライトとして用いれば、発光を有効に用いることができるため、省エネにつながる可能性を持っており、応用の観点からも重要な特性である。

③ 半極性 {11-22} を利用したマルチファセット LED による白色・多色 LED の開発: (0001)

面上に成長した GaN 上に SiO₂ マスクを形成した後、GaN を再成長すると、複数のファセット結晶面に囲まれた三次元構造がマスク開口部に自然形成される。このファセット結晶面は、{11-22} 半極性や無極性面である。この三次元構造上に InGaN QW を成長すると、In 組成や InGaN 膜厚が面方位に依存するため、各結晶面から異なる発光色が得られる。したがって、これらを微細化してひとつの LED チップの中に作りこめば、加色混和により白色を含む多色発光が得られると考え、LED を試作した。試作した LED からは、確かに白色やパステルカラーの発光が得られ、さらに、パルス電流で駆動することにより、発光強度を一定に保ったまま、外部から発光色を調整できることを見出した。

④ SNOM による InGaN QW における貫通転位と発光分布の関係の解明: SNOM と原子間力顕微鏡を組み合わせた測定方法を提案し、(0001) 極性面上の InGaN 系紫外、青色、緑色 QW について、原子間力顕微鏡による貫通転位の観察と、SNOM による発光マッピングを関連付けた。その結果、紫外発光する QW については、貫通転位部分で発光が弱くなり、貫通転位が主要な非輻射再結合中心であることが確認されたが、青色 QW では、両者に必ずしも相関がないことを見いだした。この原因として、青色 QW では、貫通転位周辺に、In 揺らぎによるポテンシャル障壁が形成され、キャリアが転位に捕獲されることを妨げていることを SNOM によるポテンシャル分布測定から明らかにした。これは、高発光効率な青色 LED が実現されている要因である。一方、緑色 QW では、貫通転位密度が増加し、紫外 QW 同様、貫通転位部分で発光が弱くなる傾向が観察された。In 組成の増加に伴う格子不整合転位の導入が起り、しかも(0001) 極性面上では、分極誘起電界により輻射再結合確率が低下するためにキャリアの拡散長が長くなり、転位など非輻射再結合中心に捕獲されやすくなったことが原因であると考えられる。半極性面や無極性面の利用により輻射再結合確率を高めることが高効率な緑色発光を得るために重要であることが示唆された。

⑤ SNOM による、InGaN QW の発光効率低下現象の検討: InGaN 系 LED では、注入電流の増大に伴う発光効率の低下、いわゆる droop 現象が、照明などハイパワー応用において問題となっている。LED では、電流の注入、内部量子効率など複数の要因が関与してトータルの効率を決めているため、droop 現象の本質を解明することが困難であった。そこで、SNOM によって光励起の下で発光を測定することにより、内部量子効率に焦点を絞り、droop 現象の機構解明を目指した。その結果、青色 QW では励起光強度の増大に伴う

発光強度の飽和が見られず、緑色 QW では見られることを見出した。励起光強度を増すと、ポテンシャル極小に局在していたキャリアが非局在化するが、青色 QW では④に述べたように、ポテンシャル障壁が貫通転位へのキャリア拡散を妨げているため、発光強度は励起強度に比例したものと考えられる。一方で、緑色 QW では、オーバーフローしたキャリアが貫通転位に捕らえられるため、発光郷土の飽和が見られたものと考えた。このことは、青色 LED における droop 現象に関しては、QW での発光効率は原因ではなく、むしろ電流の注入効率が要因であること、緑色 LED では、それに加えて、内部量子効率自体の低下が起こっていることが実験的に明らかとなった。

⑥ DSNOM の開発と InGaN QW におけるキャリア拡散の可視化: InGaN QW では、ポテンシャルの揺らぎによる励起子の局在化が、発光機構を決定する要因のひとつである。このような場での発光機構を解明するために、従来は1本のプローブを用いたSNOMを利用してきた。本年度は、2本のプローブを用いるDSNOM法を開発した。一方のプローブで試料を光励起し、もう一方のプローブでその周囲を走査し発光を検出するため、励起プローブの開口外へ拡散したキャリアについて、どの方向に拡散して、どの位置で発光しているのかを同定することができる。これまで空間平均になっていた単一プローブでの測定結果と比較することで、プローブを通して局所的に励起されたキャリアが、周囲のポテンシャル分布の影響を受けて拡散していく過程を観測することができる。

装置開発上の問題点は、2本のプローブと試料の3体間の距離のnmスケールでの制御であった。これを解決するために、二つの変調信号を各々、試料-プローブ間、プローブ-プローブ間の距離のシア・フォース検出に用いるデュアルバンド変調方式を開発した。これにより、それらの距離を独立に、かつリアルタイムに制御することに成功した。しかも、本装置では、従来のシングルプローブSNOM測定とDSNOM測定のいずれもが可能であり、両者の比較により、詳細なキャリアダイナミクスを明らかにできることが大きな特長である。

DSNOM 観察の結果、発光の強度分布が励起点の周りに同心円状に広がるのではなく、ある特定の方向に広がっていることが観察された。広がりの範囲は、約 500 nm 程度であり、光励起されたキャリアが、その程度の距離を異方的に拡散していることを示している。スペクトル解析によってポテンシャル分布を調べたところ、そのような強発光領域は、高いポテンシャルによって囲まれていることがわかった。キャリアの拡散が、ポテン

シャルバリアによって妨げられていることを示唆している。ポテンシャル揺らぎは、キャリアの局在を引き起こすことは既に知られていたが、加えて、キャリアの拡散方向や距離を決定する要因であることがDSNOM測定により明らかとなった。開発したDSNOM技術は、局所領域のポテンシャルプロファイルと、キャリアの拡散および再結合過程の関係を詳細に調べることができるため、窒化物半導体だけではなく、フォトニクス材料、とくに量子ドットなどの不均一系材料でも有用な評価手法になると考えている。

(2) 高 Al 組成 AlGa_N に関して

① サファイア(0001)基板上への高品質な AlN 薄膜の成長条件の確立: MOVPE 成長の原料を供給するシーケンスを検討した。III 族および V 族原料を交互供給したとき、そのシーケンスが界面形成に与える影響に注目し、最適化をした結果、原子レベルで平坦であり、かつ貫通転位密度が低い AlN 薄膜を得ることに成功した。

② AlGa_N/AlN QW の作製と偏光特性の評価: 上記 AlN 上に AlGa_N/AlN QW を作製した。また、その光物性として、偏光特性を評価した。従来、高 Al 組成 AlGa_N の発光は、バンド構造上、(0001)面からは取り出しにくいことが指摘されていた。これに対して、さまざまな井戸幅、Al 組成の QW における偏光特性を調べた結果、偏光特性が QW の歪と量子閉じ込めによって支配され、それらを適当に制御することにより(0001)表面から強い発光が得られる構造条件を明らかにした。

③ AlGa_N/AlN QW でのキャリアダイナミクス: 新たに導入した波長可変端パルスレーザ励起により時間分解分光測定を実施した。励起子多体効果や電子正孔プラズマによる輻射再結合寿命を定量し、それらが内部量子効率に与える影響を明らかにした。

④ AlGa_N/AlN QW の電子線励起による高効率発光: 高 Al 組成 AlGa_N では p 型伝導型制御が本質的に容易ではない。そこで、電子線励起による発光特性を調べた。用いた AlGa_N/AlN QW は(0001)面からの発光が得られるよう設計された 1nm の AlGa_N QW であり、発光波長は室温で~240nm であった。電子線の照射条件はモンテカルロシミュレーションにより決定した。その結果、8kV、45μA で電子線を入射したときに 100mW の光出力を、8kV、5μA で入射したときに 40% の電力効率を記録した。報告されている 200nm 台で発光する LED と比較しても、桁違いに高い効率であり、ここで提案する方式の有効性を示している。今後は、小型デバイス化に向けた検討も行う予定である。

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 34 件) 抜粋。全て査読有

① R. Ishii, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami and A. A. Yamaguchi, All deformation potentials in GaN determined by reflectance spectroscopy under uniaxial stress: definite breakdown of the quasicubic approximation, Phys. Rev. B, 81, 155202/1-11 (2010).

② M. Funato, D. Inoue, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Strain states in semipolar III-nitride semiconductor quantum wells, J. Appl. Phys. 107, 123501/1-5 (2010).

③ K. Kojima, M. Funato, Y. Kawakami and S. Noda, Valence band effective mass of non-c-plane nitride heterostructures, J. Appl. Phys. 107, 123105/1-7 (2010).

④ T. Oto, R. G. Banal, K. Kataoka, M. Funato and Y. Kawakami, 100 mW deep ultraviolet emission from aluminum nitride based quantum wells pumped by an electron beam, Nature Photonics, 4, 767-771 (2010).

⑤ R. G. Banal, M. Funato and Y. Kawakami, Characteristics of high Al-content AlGa_N/AlN quantum wells fabricated by modified migration enhanced epitaxy, Phys. Stat. Solidi (C), 7, 2111-2114 (2010).

⑥ A. Kaneta, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Funato and Y. Kawakami, Visualization of the local carrier dynamics in an InGa_N quantum well using dual-probe scanning near-field optical microscopy, Appl. Phys. Exp. 3, 102102/1-3 (2010).

⑦ R. Bardoux, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, A. Kikuchi and K. Kishino, Positive binding energy of a biexciton confined in a localization center formed in a single In_xGa_{1-x}N/GaN quantum disk, Phys. Rev. B, 79, 155307/1-6 (2009).

⑧ R. G. Banal, M. Funato and Y. Kawakami, Growth characteristics of AlN on sapphire substrates by modified migration-enhanced epitaxy, J. Cryst. Growth, 311, 2834-2836 (2009).

⑨ K. Kojima, H. Kamon, M. Funato and Y. Kawakami, Optical anisotropy control of non-c-plane InGa_N quantum wells, Jpn. J. Appl. Phys. 48, 080201/1-3 (2009).

⑩ M. Funato and Y. Kawakami, Excitonic

properties of polar, semipolar, and nonpolar InGaN/GaN strained quantum wells with potential fluctuations, *J. Appl. Phys.* 103, 093501/1-7 (2008).

⑪ A. Kaneta, M. Funato and Y. Kawakami, Nanoscopic recombination processes InGaN/GaN quantum wells emitting violet, blue, and green spectra, *Phys. Rev. B*, 78, 125317/1-7 (2008).

⑫ M. Ueda, M. Funato, K. Kojima, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Polarization switching phenomena in semipolar In_xGa_{1-x}N/GaN quantum well active layers, *Phys. Rev. B*, 78, 233303/1-4 (2008).

⑬ M. Funato, T. Kondou, K. Hayashi, S. Nishiura, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Monolithic polychromatic light-emitting diodes based on InGaN microfacet quantum wells toward tailor-made solid-state lighting, *Appl. Phys. Exp.* 1, 011106/1-3 (2008).

⑭ R. G. Banal, M. Funato and Y. Kawakami, Initial nucleation of AlN grown directly on sapphire substrates by metal-organic vapor phase epitaxy, *Appl. Phys. Lett.* 92, 241905/1-3 (2008).

⑮ M. Funato, K. Hayashi, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Emission color tunable light-emitting diodes composed of InGaN multifacet quantum wells, *Appl. Phys. Lett.* 93, 021126/1-3 (2008).

⑯ K. Kojima, U. T. Schwarz, M. Funato, Y. Kawakami, S. Nagahama and T. Mukai, Optical gain spectra for near UV to aquamarine (Al₁In) GaN laser diodes, *Opt. Exp.* 15, 7730-7736 (2007).

⑰ Y. Kawakami, K. Nishizuka, D. Yamada, A. Kaneta, M. Funato, Y. Narukawa and T. Mukai, Efficient green emission from (11-22) InGaN/GaN quantum wells on GaN microfacets probed by scanning near field optical microscopy, *Appl. Phys. Lett.* 90, 261912/1-3 (2007).

⑱ M. Funato, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa, T. Kosugi, M. Takahashi, and T. Mukai, Blue, green, and amber InGaN/GaN light-emitting diodes on semipolar (11-22) GaN bulk substrates, *Jpn. J. Appl. Phys.* 45, L659-L662 (2006).

⑲ M. Ueda, K. Kojima, M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Epitaxial growth and

optical properties of semipolar (11-22) GaN and InGaN/GaN quantum wells on GaN bulk substrates, *Appl. Phys. Lett.* 89, 211907/1-3 (2006).

⑳ M. Funato, T. Kotani, T. Kondou, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Tailored emission color synthesis using microfacet quantum wells consisting of nitride semiconductors without phosphors, *Appl. Phys. Lett.* 88, 261920/1-3 (2006).

㉑ A. Kaneta, M. Funato, Y. Narukawa, T. Mukai and Y. Kawakami, Direct correlation between nonradiative recombination centers and threading dislocations in InGaN quantum wells by near-field photoluminescence spectroscopy, *Phys. Stat. Solidi (C)*, 3, 1897-1901 (2006).

㉒ K. Kojima, M. Funato, Y. Kawakami, S. Nagahama, T. Mukai, H. Braun, and U. T. Schwarz, Gain suppression phenomena observed in In_xGa_{1-x}N quantum well laser diodes emitting at 470 nm, *Appl. Phys. Lett.* 89, 241127/1-3 (2006).

[学会発表] (計 93 件)

① A. Kaneta, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Funato and Y. Kawakami, Visualization of the local carrier dynamics in InGaN SQW using dual probe scanning near field optical microscope, *Intern. Workshop on Nitride Semicond.*, 2010. 9. 21, Tampa, Florida, USA (Invited).

② R. Ishii, A. Kaneta, M. Funato and Y. Kawakami, Impact of breakdown of the quasi-cubic approximation in GaN on the optical polarization properties of nonpolar and semipolar GaN/AlGaIn quantum wells, *The 37th Intern. Symp. on Compound Semicond.*, 2010. 6. 1, Takamatsu, Japan (Invited).

③ Y. Kawakami, A. Hashiya, A. Kaneta and M. Funato, Mapping of efficiency droop in InGaN quantum wells studied by scanning near-field optical microscopy, *The 8th Intern. Symp. on Semicond. Light Emitting Devices*, 2010. 5. 17, Beijing, China (Invited).

④ Y. Kawakami, M. Ueda, A. Kaneta and M. Funato, Semipolar (11-22)-oriented InGaN/GaN LEDs and their optical properties, *The 2nd Intern. Conf. on White LEDs and Solid State Lighting*, 2009. 12. 16, Taipei, Taiwan (Invited).

⑤ M. Funato and Y. Kawakami, Semipolar (11-22)-oriented InGaN/GaN quantum wells,

Asia Communications and Photonics Conf. and Exhibition, 2009. 11. 3, Shanghai, China (Invited).

⑥ M. Funato and Y. Kawakami, Polarization anisotropy in semipolar/polar nitride semiconductor quantum wells, 8th Intern. Conf. on Nitride Semicond., 2009. 10. 23, Jeju, Korea (Invited).

⑦ Y. Kawakami, Recombination dynamics in semi-polar {11-22} InGaN/GaN quantum wells, 6th Intern. Workshop on Bulk Nitride Semicond., 2009. 8. 25, Galindia Mazurski Eden, Poland (Invited).

⑧ Y. Kawakami, A. Kaneta, M. Ueda and M. Funato, Characterization and control of recombination process in nitride semiconductors, E-MRS Spring meeting 2009, 2009. 6. 11, Strasbourg, France (Invited).

⑨ M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Multi-color light-emitting diodes based on GaN micro-structures, SPIE Photonics West, 2009. 1. 29, San Jose, California, USA (Invited).

⑩ M. Funato and Y. Kawakami, Monolithic polychromatic InGaN light-emitting diodes based on micro-facet structures, Intern. Meeting on Information Display 2008, 2008. 10. 16, Ilsan, Korea (Invited).

⑪ M. Ueda, M. Funato, Y. Narukawa, T. Mukai and Y. Kawakami, Polarization anisotropy in semipolar InGaN/GaN quantum well active layers, Intern. Workshop on Nitride Semicond., 2008. 10. 9, Montreux, Switzerland (Invited).

⑫ Y. Kawakami, A. Kaneta, M. Funato, Y. Narukawa and T. Mukai, Characterization and Control of recombination dynamics in low-dimensional InGaN-based semiconductors, The 3rd Intern. Conf. Smart Materials Structures Systems, 2008. 6. 9, Acireale, Sicily, Italy (Invited).

⑬ Y. Kawakami, A. Kaneta, K. Nishizuka, M. Ueda, K. Kojima, M. Funato, Y. Narukawa and T. Mukai, Local Spectroscopic Investigations on Semipolar InGaN-Based Nanostructures and Their Application to LEDs, 7th Intern. Conf. on Nitride Semicond., 2007. 9. 19, Las Vegas, USA (Invited).

[図書] (計4件)

① 船戸 充, 川上養一, 窒化物基板および格

子整合基板の成長とデバイス特性, シーエムシー出版, 104-118 (2009).

② M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai (分担執筆), "Semipolar InGaN/GaN quantum wells for highly functional light emitters", Nitrides with Nonpolar Surfaces: Growth, Properties, and Devices edited by T. Paskova, WILEY-VCH, 385-411 (2008).

③ Y. Kawakami, A. Kaneta and M. Funato (分担執筆), "Assessment and Modification of Recombination Dynamics in In_xGa_{1-x}N-Based Quantum Wells", Advances in Light Emitting Materials, Materials Science Forum 590, Trans Tech Publications, 249-274 (2008).

④ 川上養一, 発光と受光の物理と応用 2,3章(分担執筆), 培風館, 22-35 (2007).

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: 紫外線照射装置
発明者: 川上養一, 船戸 充, 大音隆男, R. G. Banal, 外3名
権利者: 京都大学, ウシオ電機(株)
種類: 特許出願
番号: 2010-128252
出願年月日: 2010. 6. 3
国内外の別: 国内

名称: 紫外線照射装置
発明者: 岡本晃一, 船戸 充, 川上養一, 外2名
権利者: 京都大学, ウシオ電機(株), 外5名
種類: 特許出願
番号: PCT/JP2010/063102
出願年月日: 2010. 8. 3
国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ

<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

川上養一 (KAWAKAMI YOICHI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30214604

(2)研究分担者

船戸 充 (FUNATO MITSURU)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70240827