

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20686022

研究課題名（和文） 気相拡散支配面積選択成長による
窒化物半導体集積多波長光源研究課題名（英文） Monolithic integration of multi-wavelength light emitter
By vapor-diffusion-dominated selective-area growth

研究代表者

杉山 正和 (SUGIYAMA MASAKAZU)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：90323534

研究成果の概要（和文）：

InGaN/GaN 多重量子井戸の選択成長において、幅 100 μm 以上の広幅マスクを用いて製膜種の気相拡散効果を有効活用し、発光波長の面内変調を可能にした。その背後にあるメカニズムを GaN, InN, InGaN バルク膜の選択成長の解析を通して明らかにした。さらに広範囲の発光波長変調を狙い、c 面 GaN 上に成長した 6 角錐表面に出現する非極性面に InGaN/GaN 量子井戸を成長する手法を考案し、それを利用した多色発光 LED の試作に成功した。

研究成果の概要（英文）：

Selective-area growth (SAG) of InGaN/GaN multiple quantum wells (MQWs), taking advantage of the vapor-phase diffusion of layer precursors with the use of wide (more than 100 μm in width) masks, has been investigated in order to achieve in-plane modulation of light-emission wavelength. The mechanism behind such wavelength modulation has been explored through the analysis of the SAG of GaN, InN and InGaN bulk layers. Aiming at a wider range of wavelength modulation, a GaN hexagonal pyramid, with tailored mask width surrounding it, has been adopted and InGaN/GaN MQWs have been grown on the semi-polar surfaces on the pyramids. A multi-wavelength light emitter has been fabricated on the basis of this approach.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2009 年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2010 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	18,800,000	5,640,000	24,440,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：(1)InGaN,(2)MOVPE,(3)選択成長,(4)多重量子井戸,(5)発光ダイオード,(6)波長シフト

1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体による青色発光ダイオード(LED)は、近年の活発な研究開発により 40%以上の外部量子効率を得るに至っている。(Narukawa et al., Phys. Stat. Sol. A204, 2087 (2007)) 同時に、 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ (紫外)や $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$

(水色～赤色)を用いた LED の多色化が精力的に研究されている。本研究の主な対象である可視域での多色化については、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ 活性層の In 組成 x を増加させることにより発光波長を長波化できるが、発光効率の大幅な減少が問題となっていた。半極性の(11-22)面を用いることで、

580 nm 付近の橙色発光が発光効率 1% 以上で得られたことが報告され (Funato et al., Jpn. J. Appl. Phys., **45**, L659 (2006)), 窒化物 LED により可視域全体をカバーすることが現実的になってきた。

SiO₂ などのマスクを形成した基板表面に化合物半導体結晶層を成長することで、製膜種の横方向拡散による結晶層厚さの面内変調を得ることができる。成長速度の制限種である III 族元素を 2 種類以上含む混晶については、同時に III 族組成の変調も得られる。光デバイスの活性層に用いる多重量子井戸を選択成長で形成した場合、選択成長部分において、(1) 結晶層厚の増大、(2) バルクのバンド端シフト、により有効バンドギャップが狭くなり、利得波長帯を長波化できる (図 2)。

この原理を利用し、マスクデザインを工夫して利得波長域が段階的に異なる導波路を面内に集積することで、波長多重通信用の 4 チャンネル集積 DFB レーザアレイや、波長合分波器と集積した 8 チャンネル光アンプなどの集積半導体光デバイスを作製してきた。

このように、申請者らが赤外通信デバイスをターゲットに発展させてきた選択成長による多波長集積技術を、窒化物半導体発光デバイスに応用することで、可視域をカバーする多波長集積光デバイスを作製できると考えられる。

2. 研究の目的

In_{1-x}Ga_xN/GaN 多重量子井戸を量産化に有利な有機金属気相成長 (MOVPE) により面積選択成長し、マスク形状によって制御された有効バンドギャップの変調により可視域の集積多色発光デバイスを実現する。

(目標 1) 窒化物結晶は In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} に比べて成長温度が高く、選択成長において特定の結晶面が出現しやすい。目標 2 の低温成長などにより、制御性がよい気相拡散が支配的な In_{1-x}Ga_xN の選択成長を実現し、設計可能な選択成長プロセスを確立する。

(目標 2) 成長最表面の窒化効率を向上し、In_{1-x}Ga_xN の成長温度を 650°C 程度まで低温化する。これにより、選択成長における特定の結晶面の出現を防ぎ、気相拡散に制御された層厚や組成の変調を可能にする。さらに、低温化により結晶層からの In の蒸発を防ぎ、赤色で発光する高 In 組成の In_{1-x}Ga_xN を成長する。

(目標 3) 集積多色発光デバイスの例としてサブミクロサイズの画素をもつ集積多色 LED を作製し、可視光域におけるマルチバンドギャップ集積の可能性を実証する。

3. 研究の方法

(1) In_{1-x}Ga_xN バルク層および In_{1-x}Ga_xN/GaN 多重量子井戸の面積選択成長とモデリング

[In_{1-x}Ga_xN バルク層の選択成長と定量的評価]

幅を段階的に変化させたマスクを用い、分布の観察が容易な幅 100 μm 以上の成長領域に In_{1-x}Ga_xN バルク層を選択成長する。下地として、サファイア基板に成長した低転位 GaN 層を用いる。選択成長領域における膜厚分布を探針式段差計により測定し、マスクによる成長速度の増大効果を定量する。また、顕微フォトルミネッセンスおよび走査電子顕微鏡を用いたカソードルミネッセンス測定により、選択成長領域内のバンド端シフトから In 組成の分布を測定する。この際、非選択成長の膜について、In 組成とフォトルミネッセンス波長との対応をあらかじめ調査しておく。

[In_{1-x}Ga_xN バルク層選択成長のシミュレーション]

これらの分布データを、気相拡散モデルに基づく選択成長シミュレーションの結果と比較検討し、マスクによる変調効果を支配する唯一の因子である D/k_s (気相拡散係数と表面反応速度定数の比) を In, Ga それぞれの製膜種について求める。項目 (2) で成長シーケンスが改良されるので、 D/k_s を成長条件の関数として整理し、つねに最適な成長条件についてのシミュレーションを可能にする。これにより、任意のマスク形状が In_{1-x}Ga_xN バルク層に対してもたらす成長速度と組成の変調をシミュレーションにより予測可能にする。

[In_{1-x}Ga_xN/GaN 多重量子井戸構造の選択成長とシミュレーション]

バルク層のシミュレーションをもとに、矩形ポテンシャルを仮定し、任意のマスク形状がもたらす In_{1-x}Ga_xN/GaN 多重量子井戸の発光波長シフトをシミュレーションする。発光波長分布の実験結果と比較検討しつつ予測精度を向上する。

In_{1-x}Ga_xN 井戸層の歪みによるバンド端のシフトは、非選択成長の多重量子井戸について逆格子マッピングによる歪み解析とシミュレーションの結果を比較することで実験的に求める。

(2) In_{1-x}Ga_xN バルク層の低温成長、高 In 組成化、出現する結晶面の制御

[流量変調成長] 申請者らの AlN における成功例では、原料同士の気相反応を防ぎ、Al 製膜種の表面拡散と窒化を促進するため、(CH₃)₃Al と NH₃ を交互供給して成長温度の低減と結晶性向上を達成した。

In_{1-x}Ga_xN の成長においては、成長表面からの In の脱離が問題となる。低温成長による In の脱離抑制に加え、成長中に常時一定量の In 原料および NH₃ を供給することでさらに脱離を抑制する。この In_{1-x}Ga_xN 成長シーケンスでは、III 族原料供給時間 t_{III} 、NH₃ 供給時間 t_V 、ガスパージ時間 t_{pIII} 、 t_{pV} 、常時供給する (CH₃)₃In および NH₃ の濃度がパラメータであり、最適化の対象となる。

[有機窒素原料の微量添加]

低温成長を妨げる主要な因子は NH₃ の低反応

性である。低温成長を実現するため、微量の有機 N 原料 ($(C_2H_5)_3N$ や $(C_3H_7)_3N$ など) を NH_3 とともに供給し、低温でも有機 N 原料から発生するラジカル種の気相連鎖反応により NH_3 の分解を促進する。

[高 In 組成 $In_{1-x}Ga_xN$ の実現]

流量変調原料供給と有機 V 族の添加による低温成長により、赤色のバンドギャップを持つ高 In 組成 $In_{1-x}Ga_xN$ の成長を達成する。 $In_{1-x}Ga_xN$ においては高 In 組成の nm サイズドメインが析出し、転位を誘発して発光効率を低下させる問題が指摘されているが、流量変調シーケンスにより製膜種の表面拡散を促進し、ドメインの形成を抑制する。

[結晶面の制御]

流量変調成長における t_{III} と t_V の比により III 族製膜種の表面拡散長を制御することで、特異的な結晶面の出現を抑制し、気相拡散による膜厚・組成の制御を容易にする。 t_V/t_{III} が小さいほど表面拡散長は小さくなり結晶面の出現を抑制できるが、同時に窒化効率や表面モフォロジーの悪化が懸念されるので、最適な t_V/t_{III} を実験により求める。

(3)集積多色発光 LED の作製

[集積多色発光 LED のマスクパターン設計・検証]

項目(1)で完成させたシミュレータを用い、面内で青色から赤色発光が可能な集積多色 LED 用のマスクパターンを作製する。これを用いて LED 用の $In_{1-x}Ga_xN/GaN$ 多重量子井戸を選択成長し、顕微フォトルミネッセンスおよびカソードルミネッセンスで評価する。これにより、マスク設計の妥当性を実証する。次項目の LED 作製には寄生抵抗の低減などデバイス化技術が必要であるが、本項目の多色 LED 発光層形成までは必ず達成できると考えている。また、発光波長域は赤までが目標だが、項目(2)の成果により現在未踏領域の高 In 組成 $In_{1-x}Ga_xN$ が成長できることが前提である。少なくとも、現在論文レベルで報告されている橙までの発光は達成したい。このため、半極性 GaN 基板の利用も場合によっては検討する。

[集積多色発光 LED の製作]

上記で作製した選択成長による多重量子井戸をもとに、集積多色発光 LED を製作し、顕微分光測定装置により各素子からの電流注入による発光特性(発光スペクトル、I-L 特性など)を測定する。これにより、本研究の成果をデバイスとして実証する。

4. 研究成果

GaAs および InP で培った MOVPE 選択成長の技術を窒化物半導体の成長に適用し、GaN および InN の選択成長に成功した。選択成長領域の幅を広くとることで、製膜種の気相拡散と表

面取り込みの競争過程で決定される放物線型の成長速度分布を取得することに成功し、数値シミュレーションの結果と照合することで、GaN および InN の製膜種に関する実効的な気相拡散長 (D/k_s) および表面取り込み速度係数 (k_s) を抽出することに成功した。

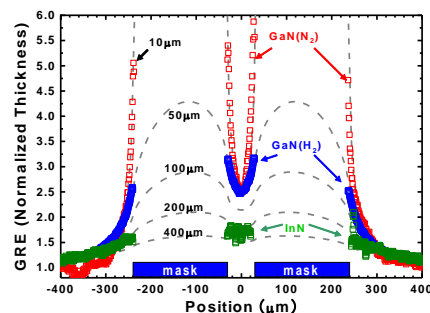


図1 GaN および InN の選択成長領域における成長速度分布

しかし、選択 MOVPE が可能となる成長条件は GaN と InN とでは大幅に異なっており、InGaAsP の場合のように In と Ga の取り込み様式の違いを相互比較することは困難であった。すなわち、通常 InGaN を成長する条件では InN の単独成長は困難であった。

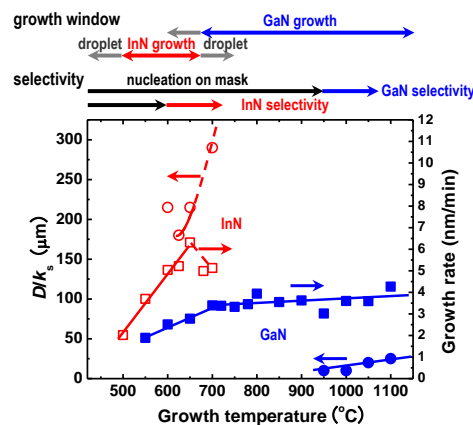


図2 GaN および InN の選択成長における実効的な気相拡散長 (D/k_s) の成長温度依存性。GaN および InN の選択成長が可能な温度域をグラフ上に矢印で示す。

一方、GaN と InGaN の混晶である InGaN を選択成長したところ、図3(a)に示すように GaN の場合と同様な成長速度分布を得た。しかし、カソードルミネッセンスにより成長領域における In 組成分布を分析したところ、図3(b)に示すように成長領域中で In 組成は一定値を取るという結果を得た。

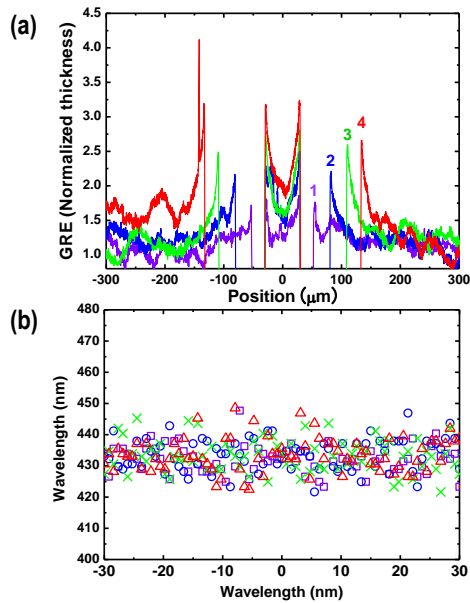


図3 InGa_N 選択成長における(a)成長毒度分布と(b)発光波長分布. 後者は In 組成のばらつきに対応する.

さらに, In_xGa_{1-x}N/GaN 多重量子井戸を成長したところ, 期待通り 400~500 nm の範囲でマスク幅やマスク端からの距離に依存した発光波長シフトを得ることに成功した.

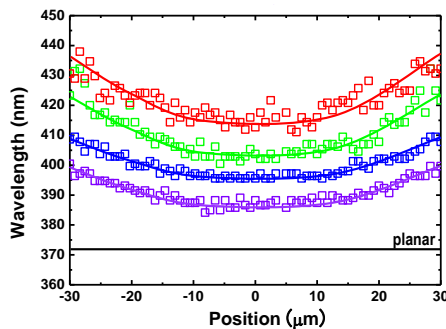


図4 InGa_N/GaN 多重量子井戸の選択成長における発光波長の分布. 図中の系列1~4は, 異なるマスク幅 (30~120 μm) に対応する.

これらの結果から, MQW の成長条件においては In の表面取り込みは Ga の取り込みに従属して起こり, 発光波長シフトは井戸厚の変化に起因することが明らかになった. この点をさらに明らかにするため, それぞれのマスク幅に囲まれた成長領域の中央での InGa_N 井戸幅を図3(a)のデータから推測し, 発光波長を井戸幅の関数としてプロットした(図5). ここからは, 発光波長の変調が InGa_N 井戸幅の変化に伴ってもたらされることが明らかである. また, InGa_N 井戸中の量子準位を井戸幅に基づいて計算し, 発光波長を求めた結果も図5に示す. ほぼ理論通りに発光波長の変調が起きていることがわかる.

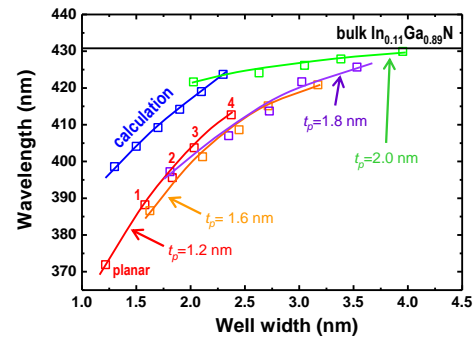


図5 選択成長で作製した InGa_N 了以井戸からの発光波長と, 選択成長の解析に基づいて推測した InGa_N 井戸厚さの関係.

以上の解析により明らかになった, InGa_N 選択成長における In 取り込み機構をより詳細に解析し, 高 In 組成の InGa_N 量子井戸を用いた選択成長により, 可視光領域をカバーする大きな発光波長シフトを実現することを目指した. InGa_N 井戸における In 組成が, 選択成長領域近傍の気相に存在する In 前駆体の濃度分布には依存せず, GaN の成長速度のみに依存するというメカニズムを検証・拡張するため, リアクタへの In 原料(trimethyl-indium; TMIn)の供給量を大きく変化した際の, すなわち, 気相の In 前駆体濃度の絶対値を大幅に増加させた際の In 取り込み量の変化を観察した. その結果, InGa_N 井戸中の In 組成は, Ga 原料(trimethyl-gallium; TMGa)に対する TMIn の分圧比を増やすことにより増加でき, InGa_N 井戸からの発光波長の長波長化を達成できた. しかし, このような状況であっても, 選択成長領域内部における有意な In 組成変調効果は観察されず, InGa_N/GaN 多重量子井戸成長における発光波長の空間変調効果は, 依然として成長速度に依存した井戸幅の変化によるものであることが明らかになった. このように, InGaAsP 系でみられた組成変調による発光波長の空間変調は, InGa_N/GaN 系では用いることが困難であるという見通しを得た. 一方, 上記の現象に対する成長温度の変化は十分に検証できておらず, 今後成長温度の低温化により成長領域内の In 組成変調を達成できる可能性が残っている.

このように, c 面サファイア基板上的 GaN テンプレートをを用いつつ, 広範囲での発光波長変調を実現するためには, 厚い InGa_N 量子井戸からの赤色発光が必須であり, これは大きな In 組成を必要とするとともに, InGa_N 井戸における量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)の効果を低減することを必要とする. c 面サファイア基板上的 GaN テンプレートをを用いつつ, QCSE 効果を低減するため, 選択成長した GaN 六角錐の斜面({11-22}面)上に InGa_N/GaN 多重量子井戸を成長する戦略をとった(図6).

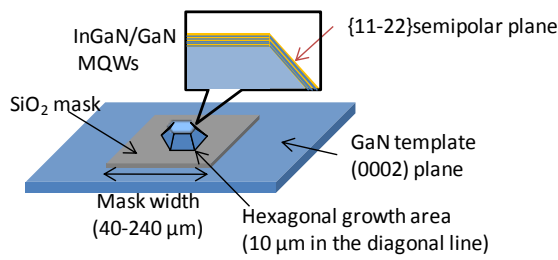


図6 c 面 GaN テンプレート上に形成する GaN 六角錐と、その上の InGaN/GaN 多重量子井戸

GaN 六角錐の成長には成長条件の精緻な制御が必要であり、c 面上の成長に比べて低温かつ低 V/III 比のもとでの成長条件を確立する必要があった。また、六角錐の成長は反応器内壁の状態により敏感に依存するため、反応容器のクリーニングを頻繁に行うなど成長環境の厳密な制御が再現性ある実験のために必須であることが判明した。さらに、後に InGaN 井戸の厚さを面内で制御するために選択成長マスクの幅を変調しているのだが、これにより GaN 六角錐の成長が異なるため、成長の速い幅広マスクに囲まれた六角錐まで綺麗に結晶成長するべく Ga 原料の分圧を低下させて全体的に GaN の成長速度を落とす必要があった。このような成長条件の調整により、図7に示すように、規則的な{11-22}面で囲まれた GaN 六角錐を形成することに成功した。

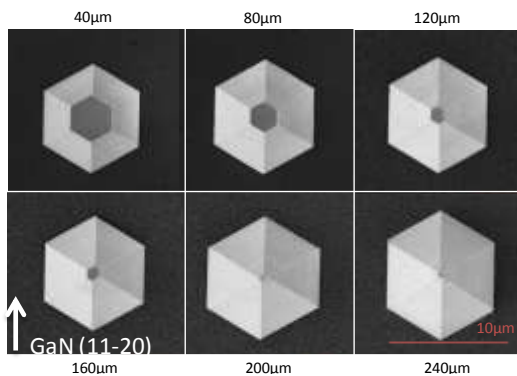


図7 c 面 GaN テンプレート上に形成した GaN 六角錐。周囲を囲むマスク幅を変化させることで、製膜種の気相拡散効果を活用した成長速度の変調を行っている。

GaN 六角錐の<0001>方向への成長速度が六角錐を囲むマスクの幅に依存する様子を観察した結果、すでに取得している六角錐成長条件における製膜種の横方向気相拡散長 (D/k_x) を用いて予測される成長領域の気相製膜種濃度と<0001>方向への成長速度は比例することがわかった。これは、六角錐のように特異的な形状を持つ構造であっても、各面における成長速度のマスクパターン依存性は、従来提唱してきた製膜種の気相拡散モデルで説明できることを示す結果である。

つぎに、GaN 六角錐の斜面 ({11-22}面) に InGaN/GaN 多重量子井戸を成長した。量子井戸からの発光をカソードルミネッセンスで観察したところ、六角錐を囲むマスク幅の増大にともなって発光波長が長波長側にシフトするという、従来 c 面に成長した InGaN/GaN 多重量子井戸と同様の傾向を示した。これは、GaN 同様に InGaN 井戸の成長速度も六角錐を囲むマスク幅に依存するため、マスク幅が広いほど量子閉じ込め効果が低減して有効バンドギャップが長波長化するというメカニズムが働いていることを示すものである。これにより、400~500 nm の領域で InGaN 井戸からの発光波長をマスク幅により連続的に制御することに成功した。さらに六角錐の表面にリフトオフ法により電極を形成し、電流注入による発光にも成功した。この際の実験発光波長は、カソードルミネッセンスによるものとよく一致しており、GaN 六角錐を用いた多色発光 LED の基礎原理検証に成功したといえる。

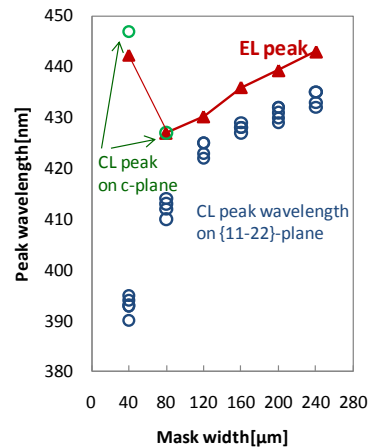


図8 c 面 GaN テンプレート上に形成した GaN 六角錐の表面に成長した InGaN/GaN 多重量子井戸から、カソードルミネッセンスおよび電流注入時の発光波長。GaN 六角錐を囲むマスクの幅の関数としてプロットした。



図9 GaN 六角錐の表面に成長した InGaN/GaN 多重量子井戸への電流注入時の発光。

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 7 件)

[1] Yuki Tomita, Tomonari Shioda, Masakazu Sugiyama, Yukihiro Shimogaki, Yoshiaki Nakano: "Role of vapor-phase diffusion in selective-area MOVPE of InGaN/GaN MQWs", J. Crystal Growth, 311, (2009) pp. 2813-2816.

[2] Tomonari Shioda, Yuki Tomita, Masakazu Sugiyama, Yukihiro Shimogaki, Yoshiaki Nakano: (Invited Paper) "Selective Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy of Nitride Semiconductors for Multicolor Emission", J. Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 15, No. 4, pp. 1053-1065 (2009).

[3] Tomonari Shioda, Masakazu Sugiyama, Yukihiro Shimogaki, Yoshiaki Nakano: "Selective area metal-organic vapor-phase epitaxy of InN, GaN and InGaN covering whole composition range", J. Crystal Growth, 311, (2009) pp. 2809-2812.

[4] Masakazu Sugiyama, Tomonari Shioda, Yuki Tomita, Takahisa Yamamoto, Yuichi Ikhara and Yoshiaki Nakano: "Optical and Structural Characterization of InGaN/GaN Multiple Quantum Wells by Epitaxial Lateral Overgrowth," Material Transactions, Vol.50 No.5 (2009), pp. 1085-1090.

[5] Tomonari Shioda, Masakazu Sugiyama, Yukihiro Shimogaki, Yoshiaki Nakano: "Selectivity enhancement by hydrogen addition in selective area metal-organic vapor phase epitaxy of GaN and InGaN", Physica Status Solidi (A), vol. 207, no. 6, pp. 1375-1378, June (2010).

[6] Tomonari Shioda, Masakazu Sugiyama, Yukihiro Shimogaki, and Yoshiaki Nakano: "Monolithically integrated InGaN-based multicolor light-emitting diodes fabricated by wide-stripe selective area metal organic vapor phase epitaxy," Applied Physics Express, vol. 3, no. 9, pp. 092104-1-3, September, (2010).

[7] Tatsuki Fujiwara, Yoshiaki Nakano, and Masakazu Sugiyama: "Continuous wavelength modulation of semi-polar plane InGaN/GaN MQWs based on vapor-phase-diffusion-based selective-area

pyramidal growth," Physica Status Solidi A, vol. 208, no. 5, pp. 1203-1205, May (2011).

[学会発表] (計 17 件)

[1] Yuki Tomita, Tomonari Shioda, Masakazu Sugiyama, Yukihiro Shimogaki, Yoshiaki Nakano: "Role of vapor-phase diffusion in selective-area MOVPE of InGaN/GaN MQWs", International Symposium on Growth of Nitride (ISGN-2), July 6-9, Shuzenji, Japan, 2008.

[2] Tomonari Shioda, Masakazu Sugiyama, Yukihiro Shimogaki, Yoshiaki Nakano: "Selective area metal-organic vapor-phase epitaxy of InN, GaN and InGaN covering whole composition range", International Symposium on Growth of Nitride (ISGN-2), July 6-9, Shuzenji, Japan, 2008.

[3] Masakazu Sugiyama, Satoshi Yasukochi, Tomonari Shioda, Yukihiro Shimogaki, and Yoshiaki Nakano: "Examination of intermediate species in GaN MOVPE by selective-area growth, Abstract Book, 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8)", TP41, pp. 630-631, Jeju, Korea, October 20 (2009).

[4] Tomonari Shioda, Masakazu Sugiyama, Yukihiro Shimogaki, and Yoshiaki Nakano: "Monolithically integrated multi-color light emitting diode fabrication by wide-stripe selective area metal-organic vapor phase epitaxy," Abstract Book, 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), ThP97, pp. 1273-1274, Jeju, Korea, October 22 (2009).

[5] Tatsuki Fujiwara, Yoshiaki Nakano, Masakazu Sugiyama, Continuous wavelength modulation of semi-polar plane InGaN/GaN MQWs based on vapor-phase-diffusion-based selective-area pyramidal growth, International Symposium on Growth of Nitride (ISGN-3), July 5, Montpellier, France, 2010.

[6] Tatsuki Fujiwara, Yoshiaki Nakano, Masakazu Sugiyama, "Continuous wavelength modulation from semi-polar InGaN/GaN MQWs with vapor-phase-diffusion-based selective-area pyramidal growth," International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2010), Sep 19-24, Tampa, Florida, U.S.A., 2010, AP1.22.

[7] 塩田倫也, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭: "MOVPE 選択成長 InGaN の気相拡散モデルによる解析 (Vapor phase diffusion model analysis on

InGaN grown by selective area metal-organic vapor phase epitaxy)”, 第 69 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No. 1, p. 330, 4p-CG-17 (2008).

[8] 富田祐貴, 塩田倫也, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭: “選択 MOVPE における InGaN 量子井戸発光波長シフトの起源 (Origin of shift in luminescence wavelength from InGaN quantum wells in selective-area MOVPE)”, 第 69 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No. 1, p. 330, 4p-CG-18 (2008).

[9] 富田祐貴, 塩田倫也, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭: “選択成長 InGaN 量子井戸における気相拡散の効果”, 化学工学会 第 40 回秋季大会, T306, 2008 年 9 月

[10] 塩田倫也, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭: “MOVPE 選択成長における InN 成長速度分布の解析”, 化学工学会 第 40 回秋季大会, T307, 2008 年 9 月

[11] 安河内諭, 塩田倫也, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭: “マルチスケールの成長速度分布を用いた GaN MOVPE 反応メカニズムの考察 (Discussion on the reaction mechanism of GaN MOVPE using)”, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 1, p. 397, 31a-ZJ-18 (2009).

[12] 塩田倫也, 富田祐貴, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭: “InGaN の MOVPE 選択成長における水素添加の効果 (Effects of hydrogen addition in selective area metal-organic vapor phase epitaxy of InGaN)”, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 1, p. 403, 31p-ZJ-3 (2009).

[13] 富田祐貴, 塩田倫也, 霜垣幸浩, 中野義昭, 杉山正和: “選択 MOVPE における InGaN 量子井戸発光波長シフトに対する井戸厚の効果 (Well thickness effect in luminescence wavelength from InGaN quantum wells in selective-area MOVPE)”, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 1, p. 403, 31p-ZJ-4 (2009).

[14] 杉山正和, 富田祐貴, 塩田倫也, 霜垣幸浩, 中野義昭, 広幅マスク選択 MOVPE による InGaN 量子井戸発光波長シフトのメカニズムと長波長化, 第 1 回窒化物半導体結晶成長講演会, FRI_05, (2009. 5. 15, 東京農工大学)

[15] 杉山正和, 安河内諭, 塩田倫也, 霜垣幸浩, 中野義昭, マルチスケール製膜速度分布を用いた GaN MOVPE 反応機構の解析, 第 1 回窒化物半導体結晶成長講演会, FRI_05, (2009. 5. 15, 東京農工大学)

[16] 杉山正和, 塩田倫也, 富田祐貴, 霜垣幸浩, 中野義昭: InGaN/GaN 選択 MOVPE による可視光発光波長シフトのメカニズム, 化学工学会第 41 回秋季大会研究発表講演要旨集 (広島大学), A104, 9 月 16 日 (2009).

[17] 杉山正和, 安河内諭, 塩田倫也, 霜垣幸浩, 中野義昭: マルチスケール解析による GaN MOVPE 反応メカニズムの検討, 化学工学会第 41 回秋季大会研究発表講演要旨集 (広島大学), A121, 9 月 16 日 (2009).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

〔その他〕

日経産業新聞 2010 年 12 月 7 日 p. 10 「多色 LED 1 基板に 東大 3 色同時に道」

日本経済新聞 Web サイト「ケミカルブティック」
<http://snow.nikkeivi.co.jp/chemical-boutique/html1110124/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山正和 (SUGIYAMA, MASAKAZU)

東京大学大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 90323534

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし