

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18069010

研究課題名（和文） 赤色～赤外域 AlGaInN 系光デバイス基盤技術の開拓

研究課題名（英文） Development basic technology for red to infrared optical devices using AlInGaN system

研究代表者

岸野 克巳 (KISHINO KATSUMI)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90134824

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：AlGaInN、窒化物半導体、ナノコラム、結晶成長、InN、分子線エピタキシー、光源技術、

1. 研究計画の概要

インジウム - 窒素 (InN) 半導体のバンドギャップ波長が赤外波長域 ($1.9 \mu\text{m}$) にあることが判明して以来、窒化物半導体デバイス研究は新しい局面に入り、紫外から赤外全域に動作波長を拡大しつつ、新材料による革新的な光デバイス創成への期待が高まっている。

本研究では InN 系半導体 (InN, InGaN, AlInN など) からなる新しい光デバイスを構想し、極限ナノ・ヘテロ制御技術を駆使して、従来の窒化物の限界点を打破し、緑色～赤外域 ($0.5 \sim 2 \mu\text{m}$) AlGaInN 系半導体光デバイスの基盤技術を開拓して、InN ナノエレクトロニクス発展に資する。

研究目標として、

- (1) InN の高品質化
- (2) InN/In (Ga, Al)N ヘテロ制御の克服
- (3) InGaN、InAlN 内の In 組成揺らぎ低減
- (4) 貫通転位の低減
- (5) p 型 In (Ga)N の実現、
- (6) ピエゾ効果による発光効率低下の改善

を掲げ、これらの基盤技術の確立によって、高輝度赤色ナノコラム LED、赤外レーザ/LED、量子準位間遷移・超高速光スイッチなど実現への道を拓く。分子線エピタキシー (MBE) を利用して「半歩先の極限の成長技術」を追求し、新技術のナノコラム効果の適用、Si 基板上への光デバイス作製を視野に入れながら研究を進める。

2. 研究の進捗状況

- (1) 自己形成 GaN ナノコラムの高品質化
rf プラズマ窒素源分子線エピタキシー

(rf-MBE) で成長した c 面サファイア基板上の自己形成 GaN ナノコラムの高品質化を進めた。断面 TEM 観測によるとナノコラム内に貫通転位がなく、室温フォトルミネッセンス (PL) 発光強度は高品質 HVPE 成長 GaN 基板の 4 倍と強いことが分った。

(2) InGaN 量子ディスク光学特性

自己形成 GaN ナノコラム内に内在化させた InGaN 単一量子ディスクの発光機構を調べた。局在中心に対応する数個のスパイク状発光ピークがみられ量子ドット的な局在準位が示唆された。また励起キャリア密度を 4 桁の範囲で変化させても発光波長シフトがなく、ナノコラムはピエゾ分極低減に寄与することが分かった。橙色 (596nm) 発光 InGaN 量子ディスクの内部量子効率を求めると 28.7% が得られ、この波長域の文献値を超える高い値が観測された。低温時分解 PL をみると発光再結合は 1ns で通常の InGaN 量子薄膜に比べ 2 桁程度速く、高効率化に適した特性が見られた。

(3) ナノコラム LED の高性能化

Si 基板上 InGaN/GaN ナノコラム LED の波長域拡大を進め、紫外域 (354nm) から赤色域 (642nm) の範囲で室温 CW 動作を得た。ナノコラム p 型クラッド層の横方向成長は Be ドーピングで促進され、ナノコラム LED 結晶最表面の平坦化効果が見られた。多色発光 LED の顕微 PL 測定では、橙色発光 (579nm) スポットで半値幅の狭く (98meV)、発光におけるナノコラムの優れた個性が示唆された。実際に直径 $1.2 \mu\text{m}$ の微小電極ナノコラム LED を作ると、発光波長 507nm で、半値幅 13nm の非常

に狭い単峰性の発光スペクトルが得られた。

(4) 規則配列ナノコラム

rf-MBE法によるGaNナノコラムの選択成長法を世界で初めて開拓し、ナノコラム規則配列化に成功した。コラム径は10nm刻みで、コラム周期は400nm~4 μ mの範囲で高精度に制御できた。規則配列系(コラム径217nm、周期400nm)では、径のバラツキは2%まで抑制され、PL半値幅も130meV(波長500nm)と狭く、ナノコラム内の貫通転位の伝搬はみられない。さらに、InGaInからの発光色は、コラム径とコラム周期の変化によって制御できることを新たに見出し、その制御メカニズムを明らかにした。その結果、三原色LEDの基板上の一体集積化への道筋を示した。

(5) InGaIn、InAlN赤外域ナノコラム

高In組成InGaIn及びInAlNは近赤外光デバイス応用が期待されるが、高品質結晶の成長技術は開発されていない。そこでナノコラムによる低貫通転位結晶の成長を進めた。

(111)面Si基板上のInNや高In組成InGaIn、InAlNナノコラムの成長条件を確立した。平均直径~130nm、密度~ $2 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ の独立した高In組成(組成比0.71-0.98)のInAlNナノコラムでは、室温PLピーク波長域0.95~1.94 μ mの全光通信波長域での近赤外発光を観測した。InGaInナノコラムのPLピーク波長は同一組成の膜状InGaInに比べて長波長であり、ナノコラムは残留キャリアの少ない高品質結晶であることが示唆された。

(6) 新たなナノ結晶

新発想のGaInナノウォールの成長を進めるとともに、Ptマスクを用いたInNの選択成長にも成功し、ナノ結晶光デバイスの基礎技術の開発を進めた。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

(理由)

ナノコラム技術の適用によって、高品質化高In組成InGaInおよびAlInNの成長技術を確立した。また、rf-MBE法を用いたGaInナノ結晶のTiマスク選択成長技術を開発して、コラム径とコラム周期によるInGaIn発光色制御法を確立した。さらに高In組成InGaInナノコラムデバイスへ向けた基礎技術としてMoマスクを用いた低転位InNの成長技術を開発した。

4. 今後の研究の推進方策

- (1) 赤色発光規則配列 GaIn ナノコラム結晶の発光効率の高効率化
- (2) 電流注入規則配列ナノコラムLEDの作製
- (3) 規則配列 GaIn ナノコラムにおける2次元DFB効果を用いた長波長発振技術の開発

(4) Mo マスク選択成長技術を用いた超低転位密度 In(Ga)N 結晶の成長条件確立

(5) 光励起誘導放出

(6) p n 接合電流注入デバイスの試作

上記の課題を中心に研究を集約して進め、赤色~赤外域 AlGaInN 系光デバイス実現の道筋を示す。

5. 代表的な研究成果

(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 18 件)

① K. Kishino, H. Sekiguchi and A. Kikuchi, "Improved Ti-mask selective-area growth (SAG) by rf-plasma-assisted molecular beam epitaxy demonstrating extremely uniform GaIn nanocolumn arrays", Journal of Crystal Growth, **311**, 7 (2009) 2063-2068. 査読有

② H. Sekiguchi, K. Kishino and A. Kikuchi, "Ti-mask selective-area growth of GaIn by RF-plasma-assisted molecular-beam epitaxy for fabricating regularly arranged InGaIn/GaIn nanocolumns", Applied Physics Express **1**, No.12 (2008) 124002. 査読有

③ J. Kamimura, T. Kouno, S. Ishizawa, A. Kikuchi and K. Kishino, "Growth of high-In-content InAlN nanocolumns on Si (111) by RF-plasma-assisted molecular-beam epitaxy," Journal of Crystal Growth, **300** (1), (2007) 160-163. 査読有

[学会発表] (計 115 件)

① K. Kishino, A. Kikuchi, S. Ishizawa, H. Sekiguchi and T. Hoshino, "Selective area growth of GaIn nanocolumns on Si (111) and GaIn (0001) surfaces with Al and Ti nanopatterns by rf-plasma assisted MBE", 7th International Workshop on Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces' (ESPS-NIS), Marseille, France, Apr. 21-24, 2008.

[図書] (計 3 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

①

名称: 半導体素子およびその製造方法
発明者: 岸野克巳、菊池昭彦、関口寛人
権利者: 上智学院
種類: 工業所有権 (特許)
番号: 特願 2008-224129
出願年月日: 平成 20 年 9 月 1 日
国内外の別: 国内