

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04589

研究課題名（和文）ボトムアップによる指向性マイクロLEDの実現

研究課題名（英文）Realization of directional micro-LED by bottom-up technique

研究代表者

熊谷 直人（Kumagai, Naoto）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：40732152

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：スマートグラス実現に向けて、AR/VRヘッドマウントディスプレイのキーデバイスである指向性マイクロLEDの基礎構造となる微小発光構造をボトムアップアプローチである選択成長により作製した。電子線露光による微細開口部に底面径300nmのGaN微小六角錐台を成長し、さらにその斜面に2層のInGaN量子井戸層を成長した。透過型電子顕微鏡による断面観察により量子井戸形成を確認し、カソードルミネッセンス発光により微小構造の斜面全周から均一に波長420nmの発光が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

指向性マイクロLEDの実現には、指向性を発現する1ミクロンオーダーの構造の中により小さな微小発光構造を設ける必要がある。本研究はその微小発光構造をダメージが導入されるドライプロセスではなく、選択成長というボトムアップアプローチにより作製した点に意義がある。また作製した微小発光構造は底面径300nmの六角錐台形状であり、その斜面に発光を担う量子井戸層を2層積層し、その六角錐台の斜面全周から均一な発光が得られた事は指向性マイクロLED実現に向けた基礎技術確立の一端として重要である。

研究成果の概要（英文）：Towards the realization of smart glass, we have fabricated micro-light-emitting structures that is the base structure of directional micro-LED, which is a key device for AR/VR head-mounted displays. The structure was grown by MOCVD selective growth, which is a bottom-up approach. GaN micro truncated hexagonal pyramids with a base diameter of 300 nm were grown in the micro-apertures patterned by electron beam lithography, and two InGaN quantum well (QW) layers were grown on the facets of truncated hexagonal pyramids. Formation of QWs was confirmed by cross-sectional observation of transmission electron microscope, and emission with a wavelength of 420 nm was observed uniformly from the entire circumference of the slope facets of the microstructure by cathodoluminescence.

研究分野：結晶工学

キーワード：窒化物半導体 マイクロLED 選択成長 有機金属気相成長法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体によるマイクロ LED は液晶 (LCD) や有機 EL (OLED) に続く次世代ディスプレイへの応用が期待されている。マイクロ LED は面内サイズがおよそ $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 程度以下で、従来の液晶や有機 EL よりも高輝度、高精細化、省エネルギー化が可能であることから、スマートフォンやスマートウォッチ、ウェアラブル型の仮想現実 (VR) 及び拡張現実 (AR) デバイスや、車載用ヘッドアップディスプレイ (HUD) への応用が見込まれている。AR/VR への応用には 2000 ppi 以上の高解像度が必要であり、画素周期 $12 \mu\text{m}$ 、LED サイズは $5 \mu\text{m}$ にもなる。車載 HUD、AR ディスプレイには LCD や OLED の 10 倍以上高い輝度が必要とされる。従来のマイクロ LED 作製には、ウェハ上に活性層として InGaN 量子井戸を c 軸方向に成長し、平坦膜の p-i-n 構造として成長したものをプラズマによるドライプロセスを用いて、トップダウンで「賽の目切り」のように細かくする手法が取られてきた。この場合、微小化そのものは可能なものの、こうして作られた従来のマイクロ LED には大きな 2 つの課題が明らかになっている。ドライプロセスによる微小化の際、側壁にプラズマ照射のダメージが導入されることで、微小化するほどに体積に対する表面積の割合が大きくなり、ダメージを受けた表面の影響がより大きくなることから、微小化に伴い発光効率が低下する。例えば、 $10 \mu\text{m}$ サイズのマイクロ LED の電流密度 $1 \text{A}/\text{cm}^2$ における発光効率は大面積 LED の $1/10$ 以下にもなる。加えて、微小化が進むことにより、上面よりも側壁端面からの発光が支配的になり、垂直方向の光の取出し効率が低下し、素子間のクロストークも生じるので、元来 LED の特徴である高効率発光が活かせず、空間的に素子を微小化した程の解像度が得られなくなることである。マイクロ LED の実用化にはこれら 2 つの課題を解決する必要がある。そのために、発光効率を低下させずに LED 構造を微小化すること、微小化しつつもクロストークを抑制して、垂直方向へ光を効率よく取出す必要がある。

2. 研究の目的

本研究では指向性マイクロ LED の実現に向けて、従来のドライプロセス (プラズマによるエッチング) を用いずに選択成長というボトムアップアプローチにより微小発光構造を作製することである。図 1 にシミュレーションから得られた指向性マイクロ LED 構造の模式図を示す。図 1 の点線枠中の斜面に発光層を持つ底径 $200 \sim 300 \text{nm}$ 程度の微小六角錐または六角錐台構造を有機金属気相成長法 (MOCVD) により作製し、さらにその斜面 {10-11} に量子井戸を作製し、発光特性を評価する。

3. 研究の方法

サファイヤ基板上的 GaN テンプレートにプラズマ CVD により、 SiO_2 を 100nm 成膜し、電子線露光で直径 200nm のパターンを $2 \mu\text{m}$ ピッチ六方最密で描画し、その描画領域は $5 \times 5 \text{mm}^2$ とした。現像後にリアクティブイオンエッチング (RIE) により開口部を形成した。RIE では GaN へのダメージを抑制するため、 SiO_2 膜を最後までエッチングせず、残膜はバッファードフッ酸 (BHF) によるウェットエッチングを行い、 SiO_2 を除去した。このパターン形成テンプレートを用いて、MOCVD により選択成長を行い、基礎となる GaN 微小六角錐 (台) 構造の形成、そして InGaN 量子井戸の成長を行った。作製した微小構造の形状やサイズは走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。その微小構造を室温でマクロフォトルミネッセンス発光評価し、発光が確認されたものについて、断面透過型電子顕微鏡 (TEM) により量子井戸構造形成の確認やカソードルミネッセンス (CL) により単一の微小発光構造の発光特性を評価した。

4. 研究成果

図 2 に作製した微小構造の典型的な SEM 上面視像を示す。(a) は描画域の中央付近、(b) はエッジ付近である。中央付近では微小構造は六角錐台形状だが、エッジ部分では六角錐形状となってい

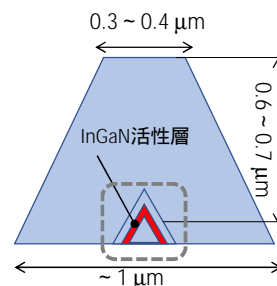


図 1 シミュレーション結果から得た指向性を持つマイクロ LED 構造。点線枠部が埋め込み前の微小発光構造。

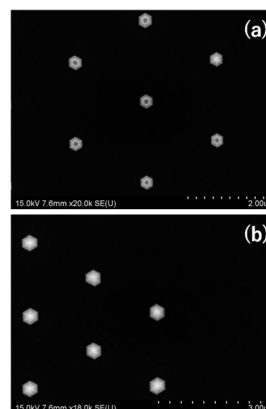


図 2 (a)描画領域中心部 (b) 同エッジ部の SEM 上面視像

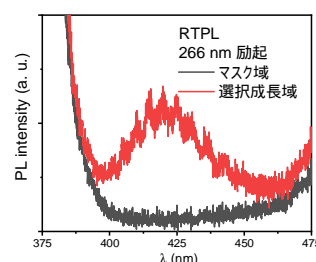


図 3 (a)選択成長域及び (b)マスク域のフォトルミネッセンススペクトル

る。局所的には均一な形状であるが、中央部とエッジ部での違いは原料の表面拡散で供給される量の違いと考えられる。エッジ部の方が中央部より実効的な成長レートが速くなるため、基板に対して垂直な頂部のc面方向よりより斜面優位で成長するため、六角錐台の頂部が閉じて六角錐になると考えられる。今回は選択成長領域が $5 \times 5 \text{mm}^2$ と広いため、面内分布が生じたと考えられ、均一性を改善するには選択成長領域をより小さく必要があると示唆される。図3に作製した微小構造の室温におけるフォトルミネッセンススペクトルを示す。

(a)選択成長領域では420nmの発光が確認され、一方マスク域から発光が確認されなかったことから、微小発光構造に発光層の形成が確認された。期待された通り、微小発光構造の斜面に量子井戸構造が形成されたか否かについて確認するために構造の断面TEM観察を行った結果を図4に示す。斜面上に2層のInGaN量子井戸構造(厚さ $\sim 2 \text{nm}$)が形成されている事が確認できた。一方で頂部の構造は乱れており、頂部での量子井戸構造は確認されなかった。

図5に断面TEM観察を行った付近の別の微小構造とは別の六角錐台構造のSEM像とCL像を示す。(a)は上面視のSEM像であり、(b)はGaNからの発光である350~380nmの発光の積算強度を示し、(c)はInGaN量子井戸からの発光である380~500nmの積算強度を示している。(b)からは微小構造を形成するGaNから均一に発光していることがわかる。(c)からは構造の頂部からの発光はなく、その斜面上に形成された量子井戸から発光している事が確認できた。頂部からの発光が殆ど無いのは図4の断面TEM像で示した通り、非常に荒れた構造になっているため、多くの欠陥が導入されていると考えられる。図6に六角錐台構造のCLスペクトルのライン分布を示す。挿入図に示すように(a)はライン1(横方向)、(b)はライン2(縦方向)である。スペクトルからも六角錐台構造から対称的に発光する事が確認され、その波長は420nmであり、フォトルミネッセンスで確認された発光波長と同じであった。構造からの対称的な発光及び、均一な発光波長が確認されたことは構造の斜面全周に均一な量子井戸構造が形成されたことを示している。本研究における量子井戸の成長条件はまだ試行的なものであり、今後は発光効率の評価を行うとともに、量子井戸の結晶品質をより向上させるため成長条件の最適化を行う必要がある。また、六角錐(台)微小発光構造を指向性発現のためにより大きな六角錐台構造に埋め込むための成長条件探索を行う。

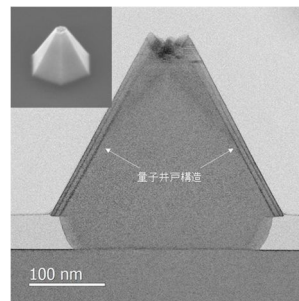


図4 六角錐台微小構造の断面TEM像。挿入図はSEM俯瞰像。

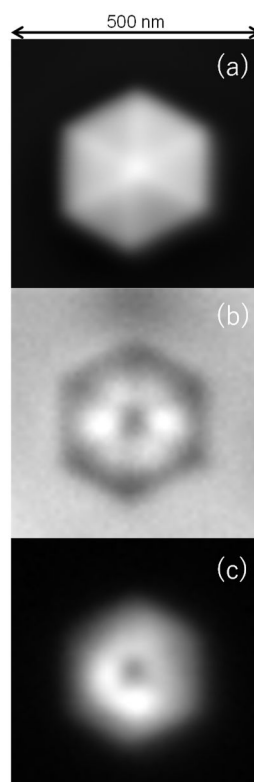


図5 (a)CL評価を行った微小発光構造のSEM上面視像。(b)発光波長350~380nmの積算強度像。(c)発光波長380~500nmの積算強度像。

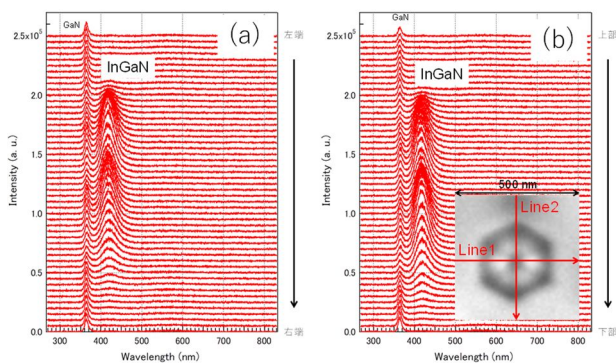


図6 CLスペクトルのライン分布 (a)挿入図 Line 1(横方向)に沿った分布。(b)Line 2(縦方向)に沿った分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	王 学論 (Wang Xue-lun) (80356609)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・ラボチーム長 (82626)	
研究分担者	山田 寿一 (Yamada Toshikazu) (20358261)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・ラボ研究主幹 (82626)	
研究分担者	Z h a n g K e x i o n g (Zhang Kexiong) (80774463)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・産総研特別研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関