

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246011

研究課題名(和文) 微小錐台におけるエバネッセント光の結合効果による自然放出光の指向性制御

研究課題名(英文) Controlling the directionality of spontaneous emissions via the evanescent wave coupling effect in a fine truncated-cone structure

研究代表者

王 学論 (WANG, Xuelun)

独立行政法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・研究グループ長

研究者番号：80356609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,300,000円

研究成果の概要(和文)：高い空間指向性を持つ発光ダイオード(LED)は様々な応用分野において強く求められている。このような光源の実現に向けて様々な研究開発がなされてきたが、温度や注入電流などのデバイス動作条件の変化に対して指向性が安定的に得られる技術が未だに確立されていない。本研究では、微小リッジ・錐台構造におけるエバネッセント光の結合効果を利用した指向性制御技術を提案し、InGaAs/GaAsリッジ型LEDを用いて電流注入の条件においてその実験的実証に世界で初めて成功した。また、得られた指向性は動作温度、注入電流の変化に対して極めて安定であることも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Spontaneous light sources with a well-defined spatial directionality are strongly desired in various applications. Despite the extensive studies devoted to controlling the radiation process of spontaneous emissions, there still lacks a reliable method which can provide a high directionality suitable for widespread applications, especially in terms of the stability of the directionality against variations in device operating conditions. In this work, we proposed a novel approach of controlling the directionality of spontaneous emissions which employs the evanescent wave coupling effect in a subwavelength-sized ridge or truncated cone structure. Strong directionalities characterized by a half-intensity angle of 43 degree are demonstrated for the first time by using an InGaAs/GaAs light-emitting diode with fine ridges formed on its light-extraction surface. The directionality is found to be almost independent of operating conditions over a wide range of operating condition variations.

研究分野：化合物半導体結晶成長、光デバイス

キーワード：指向性 発光ダイオード エバネッセント光 結合 リッジ構造 錐台構造

### 1. 研究開始当初の背景

高い空間指向性を持つ発光ダイオード(LED)は様々な応用分野、例えばプロジェクタの光源、プリンターのヘッドアレイ、光通信の光源などにおいて強く求められている。指向性を実現する従来技術として、微小共振器およびフォトニック結晶構造が上げられる。しかし、これらの技術は光の共振現象を利用しているため、強い指向性を得るためにはデバイスの発光波長を微小共振器・フォトニック結晶の共振波長と正確に一致させなければならない。このため、LEDのような広い発光スペクトルを持つ自然放光源の場合、一部の発光に対してしか共振効果が得られず、指向性の改善はかなり限定的なものになってしまう。また、同様な理由により、デバイスの動作温度や注入電流の変化によって発光波長が共振波長からずれると、指向性は著しく弱くなる。これらの理由により、微小共振器やフォトニック結晶を利用した高指向性LEDはほとんど実用化されていないのが現状であり、デバイス動作条件の変化による影響を受けにくい高指向性LEDの開発が望まれる。

### 2. 研究の目的

我々は2009年に微小半導体リッジ構造におけるエバネッセント光の結合現象を発見した<sup>1)</sup>。すなわち、図1に示すように一つの平坦面と二つの傾斜面を持つリッジ構造において、リッジの中心に位置する点光源(図中の赤い光源)から発生した光が全反射臨界角に相当する角度で傾斜面に入射すると、全反射に伴い左右二つの傾斜面においてエバネッセント光が生成される。両側のエバネッセント光がリッジ頂上で互いに結合し、高い効率で空気伝播光に変換される。この場合、半導体内部の光は様々な方向に不規則的に放射しているが、傾斜面で生成されたエバネッセント光の伝播方向は常に傾斜面方向に向いている。したがって、エバネッセント光の結合によって変換された空気伝播光は平坦面の垂直方向に強く指向することが容易に想像できる。このような指向性の存在は実際に電磁波分布の理論シミュレーションによって確認されている。また、点光源の位置(図1の青と緑色の光源)をリッジの中心から横方向にずらすと、変換された伝播光はリッジ平坦面の垂直方向に対して角度を持って放射されるようになることも判明した<sup>2)</sup>。

上記のようなエバネッセント光の結合効果の基本性質から、図2に示すように、発光領域を何らかの方法で錐台構造(またはリッジ構造)の中心付近に局在させることができれば、平坦面の垂直方向に強く指向する革新的LEDが実現できるのではないかという発想を得て本研究提案に至った。より具体的に、本研究の目的は、微細加工技術を用いて上部平坦面の寸法より小さい発光領域を構造の中心に有する微小円錐台(またはリッジ)構

造を作製し、電流注入の条件において指向性の実証を行うことである。エバネッセント光の結合効果は共振現象ではないので、従来技術に比べて本技術による指向性はデバイス動作条件の変化による影響をほとんど受けることなく安定的に得られると期待できる。

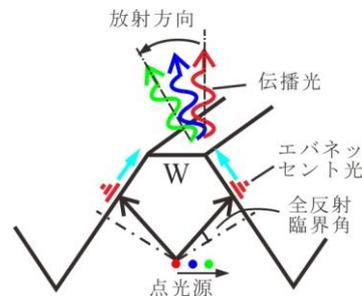


図1 微小リッジ構造におけるエバネッセント光の結合効果を示す模式図

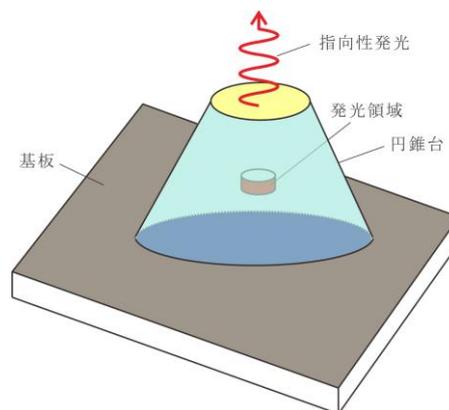


図2 本研究で提案したエバネッセント光の結合効果を利用した高指向性LEDの模式図

### 3. 研究の方法

実用的なデバイスを実現するための第1歩として、本研究では微細加工技術および埋め込み再成長法により提案デバイスの作製を試みた。まず、有機金属エピタキシー(MOCVD)または分子線エピタキシー(MBE)法により、平坦基板上に量子井戸(または量子ドット)試料を成長した。次に、フォトリソグラフィおよびウェット(またはドライ)エッチング技術により上記量子井戸を寸法100~200nm程度のストライプまたは円に加工した。ここで形成したストライプ状または円形の量子井戸(量子ドット)領域はLEDの発光領域となる。次に、上記試料を再度MOCVD装置に導入し微小リッジ・円錐台の形成に必要な厚さまで再成長を行った。また、電流注入デバイス作製のため、初回成長および再成長層はそれぞれn型およびp型にドーピングした。次に、フォトリソグラフィおよびウェット(またはドライ)エッチング技術を用いて再成長試料の表面上に微小リッジまたは円錐台を形成させた。ここで、前工程で形成したストライプ状または円形の量子井戸発光領域が微小リッジまたは円錐台の上部平坦面

の中心にくるように位置合わせを行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) InGaAs/GaAs 量子井戸発光領域微小リッジ LED の作製

図 3(a)に作製したデバイスの模式図を示す。作製プロセスとして、まず、「3. 研究の方法」で述べた方法を用いて、ストライプ状の InGaAs/GaAs 量子井戸が埋め込まれた GaAs 試料表面上にメッシュ状の p 型オーミック (Ti/Pt/Au) をリフトオフ法により形成した。電極の幅は約  $5\mu\text{m}$  で、電極間の距離は約  $45\mu\text{m}$  とした。次に、オーミック電極の間に露出している平坦 GaAs 表面上に、周期  $2.3\mu\text{m}$  のリッジ構造をフォトリソグラフィおよびウェットエッチングに形成した。図 3(b)に作製したデバイスの走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。この図から、横幅約  $100\text{nm}$  の InGaAs/GaAs 量子井戸発光領域がほぼ GaAs リッジ (上部平坦面幅  $\sim 520\text{nm}$ ) の中心に位置しているのが分かる。最後に、試料を  $1\text{mm}$  角の LED チップに劈開し、光学測定用のセラミックス基板にボンディングした。

図 4 に試料温度  $80\text{K}$ 、直流注入電流  $200\text{mA}$  の条件において測定したリッジの軸方向 (赤い線) および直交方向 (青い線) の放射パターンを示す。放射パターンの測定は、チップ表面から約  $10\text{cm}$  の所に配置した光ファイバーを回転させることによって行った。この図から、リッジの直交方向において、発光の空間分布は基板面の法線方向に強く指向しているのが分かる。また、指向性の強さを示す指向角 (発光強度が法線方向の半分になる角度幅) が約  $43^\circ$  で、平坦表面のランバーシアン (Lambertian) 分布 (指向角:  $120^\circ$ ) の  $1/3$

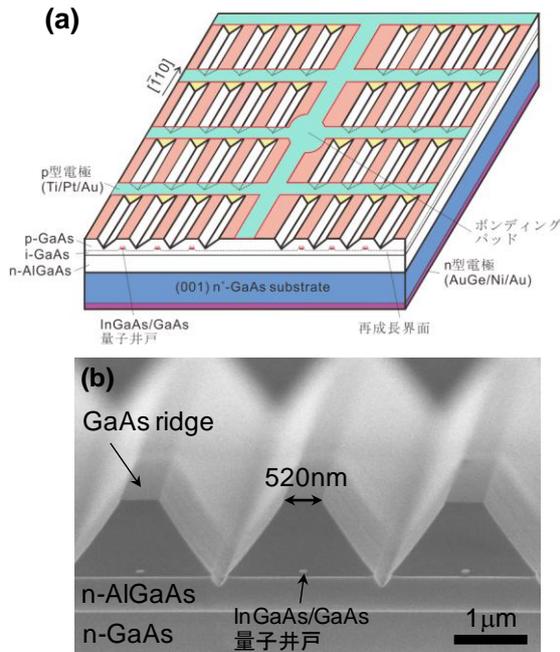


図 3 (a) 本研究で作製した LED の模式図  
(b) リッジ構造の SEM 写真

程度しかない。この結果により、本研究で提案した指向性制御の原理は世界で初めて電流注入デバイスにおいて実証された。

発光パターンの動作条件に対する安定性を調べるために、発光パターンの温度依存性を測定した。図 5(a)に、 $80\text{K}$  から  $180\text{K}$  の温度範囲において、 $20\text{K}$  ずつ測定温度を上昇させて測定した発光スペクトルを示す。この図から、温度の上昇に伴い量子井戸の発光波長が約  $21\text{nm}$  長波長側へシフトしているのが分かる。しかし、図 5(b)の発光パターンの温度依存性から、この温度範囲において発光パターンの変化が全く見られなかった。また、ここでデータを省略しているが、注入電流の変化 ( $40\text{mA}$  から  $200\text{mA}$  まで) に対しても同様な安定性が確認された。これらの結果はエバネッセント光の結合効果による指向性はデバイス動作条件の変動に対して極めて安定であることをはっきりと示している。

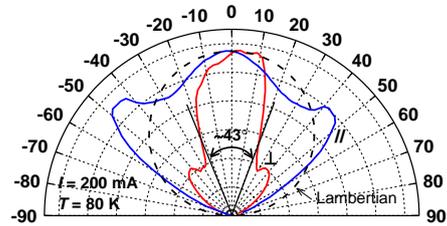


図 4 リッジの直交方向 ( $\perp$ ) および軸方向 ( $\parallel$ ) において測定した発光パターン

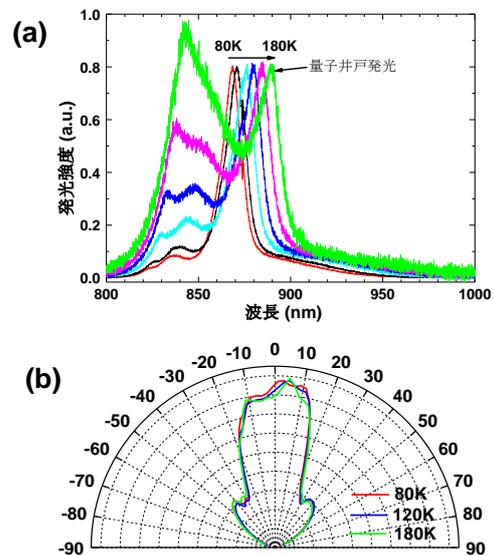


図 5 発光スペクトル(a)および発光パターン(b)の温度依存性

デバイスの発光効率について、Si フォトダイオードで評価したところ、加工していない平坦表面デバイス (量子井戸層が連続) の  $0.5\%$  程度しかないことが分かった。リッジ構造の光取出し効率が少なくとも平坦表面試料の  $10$  倍以上あることが選択成長 GaAs/AlGaAs リッジ構造のフォトルミネセンス評価によって示されている<sup>2)</sup>。したがって、図 3 のデバイスの低い発光効率が低いという

ことはデバイスの内部量子効率が低いことを意味する。これは主に再成長界面に形成された非発光再結合センターによるものであり、微小領域への選択成長技術を用いて発光領域を微小リッジ（または円錐台）に直接埋め込むことによって解決できると考えている。

## (2) InAs 量子ドット発光層試料の作製

(1)で説明した再成長界面における非発光再結合の影響を抑える一つの方法として、発光領域に InAs 高密度量子ドットを用いることが考えられる。この場合、発光領域に注入されたキャリアが横方向において量子ドット（サイズ $\sim 10\text{nm}$ ）内に閉じ込められるので、再成長界面の非発光センターにトラップされる確率が抑えられる。

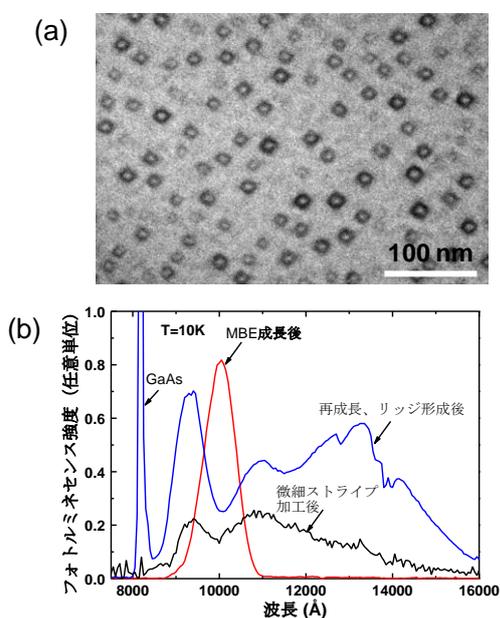


図 6 (a) MBE 成長 InAs 量子ドットの TEM 写真 (b) 量子ドット試料の加工前後のフォトルミネセンススペクトルの比較

本研究では、図 3 の InGaAs/GaAs 量子井戸の代わりに InAs 歪量子ドットを発光層に用いた試料を作製した。試料は分子線エピタキシー法 (MBE) によって成長したもので、層構造は図 3 の試料とほぼ同じである。図 6(a) の透過電子顕微鏡 (TEM) 写真から分かるように、密度  $7 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$  程度の高密度量子ドットが均一性よく形成されているのが分かる。しかし、図 6(b) のフォトルミネセンス測定結果が示すように、MBE 成長後の平坦試料は波長  $1 \mu\text{m}$  付近の単一の発光ピークを示したが、微細加工、特にリッジ構造形成後、発光スペクトルが大きく崩れ、 $1.33 \mu\text{m}$  付近の非常にブロードなピークが支配的になっていることが判明した。これは、幅  $100\text{--}200\text{nm}$  程度の細いストライプに加工した後に、量子ドット周辺の歪の状況が大きく変化したためだと考えている。 $1.33 \mu\text{m}$  が本研究で使用する評価

装置の測定可能波長範囲 ( $< 1.1 \mu\text{m}$ ) を超えたため、デバイスとしての評価ができなかった。以上の結果から、発光層に歪量子ドットを用いる場合、加工後の歪状態を制御する必要があることが分かった。

## 3) AlGaInP 赤色円錐台構造の作製

以上述べてきたように、本研究ではストライプ状の InGaAs/GaAs 量子井戸を発光領域とした GaAs リッジタイプ LED を用いて、本研究で提案した指向性制御原理の実証に成功した。しかし、実際の応用において微小円錐台を用いて全ての面内方向において指向性を発現させることが必要である。本研究では、赤色 LED の材料である AlGaInP 微小円錐台構造の作製を行った。エッチング方法として、等方性エッチングが可能な ICP (誘導結合プラズマ) ドライエッチング法を用いた。マスクはプラズマ CVD 法で成膜した  $\text{SiO}_2$  膜を用いた。エッチングは  $\text{Cl}_2$  をエッチングガスに用いて室温において行った。図 7(a) に GaAs 基板上に成長した  $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})\text{In}_{0.5}\text{P}$  試料をエッチングした SEM 写真を示す。同図から、傾斜面が非常に滑らかな円錐台が形成されているのが分かる。円錐台の上部平坦面の横幅が約  $540\text{nm}$  で、エバネッセント光の結合効果の発現 (発光波長  $650\text{nm}$  において) にとって最適に近い形状である。

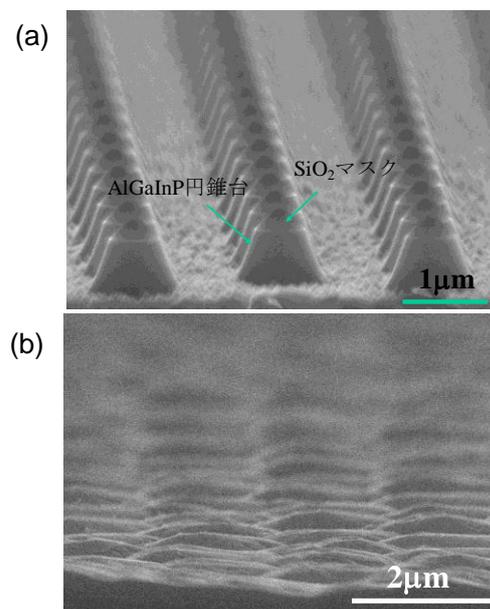


図 7 (a) ICP ドライエッチング法で作製した AlGaInP 円錐台の SEM 写真 (b) AlGaInP 再成長後の試料表面の SEM 写真

しかし、この材料系の場合、微小領域化 (直径  $100\text{--}200\text{nm}$  の円形) された  $(\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  層を MOCVD 再成長法によって埋め込んだところ、図 7(b) に示すように試料表面が大きく荒れることが判明した。微小円錐台の形成に平坦な表面モフォロジーが必要不可欠であり、本

研究期間内において円錐台デバイスの実現に至らなかった。今後、再成長前の試料表面処理プロセスや再成長条件の最適化などを行うことにより、良好な表面モフォロジーを持つ再成長表面の実現を目指す。

<引用文献>

- ① X.-L. Wang, S. Furue, M. Ogura, V. Voliotis, M. Ravaro, A. Enderlin, and R. Grousson, Applied Physics Letters 94 巻, 2009, 091102.
- ② X.-L. Wang, G.-D. Hao, and T. Takahashi, Enhancement of the evanescent wave coupling effect in a sub-wavelength-sized GaAs/AlGaAs ridge structure by low-refractive-index surface layers, Optics Express 22 巻, 2014, A1559.

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 1 件)

- ① 王学論、Hao Guo-dong、戸田直也、微小リッジ・錐台構造におけるエバネッセント光の結合効果によるLEDの高効率化と指向性制御、電気学会研究会資料、査読無、OQD-14 巻、2014、17-21。

[学会発表] (計 5 件)

- ① 王学論、Hao Guo-dong、戸田直也、微小リッジ・錐台構造におけるエバネッセント光の結合効果によるLEDの高効率化と指向性制御、電気学会 光・量子デバイス研究会、2014年6月30日、東京工業大学。
- ② 王学論、戸田直也、Hao Guo-dong、微小リッジ構造による自然放出光の指向性制御：PLによる観察、第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月18日、青山学院大学。
- ③ 王学論、戸田直也、Hao Guo-dong、Controlling the directionality of spontaneous emission via a small ridge structure, the 41th International Symposium on Compound Semiconductor, 2014年5月14日、Montpellier, France.
- ④ 王学論、Controlling the directionality of spontaneous emission via a novel evanescent-to-propagating light transformation effect in a small ridge/truncated-cone structure, 2014 Collaborative Conference on Crystal Growth, 2014年11月6日、Phuket, Thailand.
- ⑤ 王学論、A novel evanescent-to-propagating light transformation effect in sub-wavelength-sized ridge structures and its application to light-emitting diodes, 2012

Collaborative Conference on Crystal Growth, 2012年12月12日、Orlando, USA.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：発光ダイオード  
発明者：王学論  
権利者：産業技術総合研究所  
種類：特許  
番号：2013-049079  
出願年月日：平成25年3月12日  
国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

王学論 (WANG Xuelin)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・研究グループ長  
研究者番号：80356609

(2) 研究分担者

天野建 (AMANO Takeru)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員  
研究者番号：10392581

今村裕志 (IMAMURA Hiroshi)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・スピントロニクス研究センター・研究チーム長  
研究者番号：30323091