

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360016

研究課題名（和文）形状基板によるエバネッセント光の空気伝播光変換技術の研究

研究課題名（英文） Investigation on Evanescent-to-Propagating Light Transformation Technique in a Patterned Substrate

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・ナノシステム研究部門・主任研究員

研究者番号：80356609

研究成果の概要（和文）：

光学的手法を用いて微細リッジ構造において発現するエバネッセント光の空気伝播光変換現象を調べた。その結果、リッジ表面に SiO₂ 膜を堆積させると、半導体・SiO₂ 膜および SiO₂ 膜・空気との二つの界面においてエバネッセント光の結合効果が発現し、光の取出し効率が約 1.5 倍増大されることが判明した。さらに、発光領域をリッジの中心に局在させると、光が指向性を持って放射される現象も明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The evanescent-to-propagating light transformation phenomenon in a fine ridge structure was investigated by optical techniques. It is found that light-extraction efficiency can be further enhanced by about 1.5 times by depositing a thin SiO₂ film on the ridge surface, due to occurrence of the evanescent wave coupling effect at both the semiconductor-SiO₂ and SiO₂-air interfaces. It is also shown that high spatial directionality could be achieved by localizing the light-emitting area around the ridge center.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2010 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	12,200,000	3,660,000	15,860,000

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：光物性、エバネッセント光、リッジ構造、指向性

1. 研究開始当初の背景

半導体内部で発生した自然放出光は、半導体と空気との界面における光の全反射現象の存在によって半導体内部に閉じ込められやすく、高い効率で外部へ取り出すことは非常に難しい。従来、光の取出し効率を向上させるためには、全反射された光の進行方向を

試料表面に設けたランダムな微小凹凸などによって変化させ、全反射の臨界角より小さい角度で表面に再入射する確率を高める手法が一般的に用いられていた。この場合、取出し面と反射ミラーとの間での光の多重反射を一般的に伴うので、かなりの部分の光は反射ミラーや半導体層によって吸収され熱

に変換されてしまう。したがって、自然放光の高効率取出し技術の研究は基礎物理および発光ダイオード(LED)を初めとする光デバイスの高効率化の両方にとって重要な課題である。

2. 研究の目的

光が半導体・空気界面で全反射する際に、光のエネルギーが一瞬空気側にしみ出し、界面に沿ってのみ伝播し、界面の垂直方向において急激に減衰するエバネッセント光が発生することがよく知られている。エバネッセント光は通常界面に沿って少し移動したらすぐに半導体内部に戻り、空気に取り出すことができない。

我々は二つの傾斜面と一つの上部平坦面によって構成される微細なリッジ構造において、全反射に伴い二つの傾斜面で発生したエバネッセント光がリッジの上部平坦面(幅~波長程度)で互いに干渉し、高い効率で空気伝播光に変換される現象を見出した。本研究の目的は、光学的手法を用いてこの現象の基本的性質を明らかにするとともに、応用上重要な基板形状や材料系(GaN)において同現象を発現させることである。

3. 研究の方法

本研究では、フォトルミネセンス(PL)、時間分解フォトルミネセンス、角度分解フォトルミネセンスなどの光学的評価方法を用いて、有機金属気相成長法(MOCVD)によってV字型溝 GaAs 基板上に成長した GaAs/AlGaAs リッジ構造(図1)の発光特性を評価した。実験において、リッジの上部平坦面に形成された量子井戸のみを励起するように、励起レーザーの波長を調整した。また、実験研究と並行して、有限差分時間領域法(FDTD)による発光パターンの理論シミュレーションを行った。

さらに、GaN系材料への展開に向けて、フォトリソグラフィのリフロープロセスと誘導結合プラズマエッチング法を用いて GaN/InGaN リッジ構造の作製技術の開発を行った。

4. 研究成果

(1) 低屈折率膜による2重結合現象

図1に実験に用いた試料の模式図を示す。まず、MOCVD法を用いてV字型の溝を持つ GaAs 基板上に GaAs/AlGaAs の単一量子井戸構造を成長した。V字型溝の周期は $4\mu\text{m}$ で、リッジ構造の上部平坦面の横幅(W)は約 $0.5\mu\text{m}$ である。次に、上記試料表面上にプラズマCVD法によって厚さ約 150nm の SiO_2 膜を堆積させた。

この試料の発光特性を PL 法で評価したところ、平坦面量子井戸の発光強度は、 SiO_2 膜

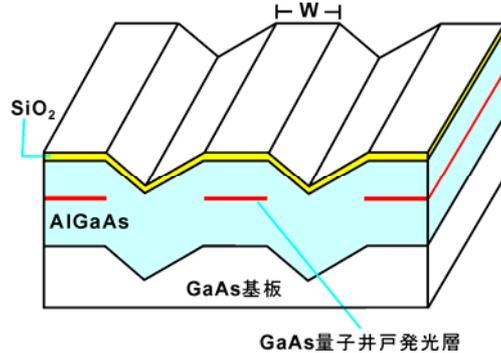


図1 実験に用いた GaAs/AlGaAs リッジ構造の模式図

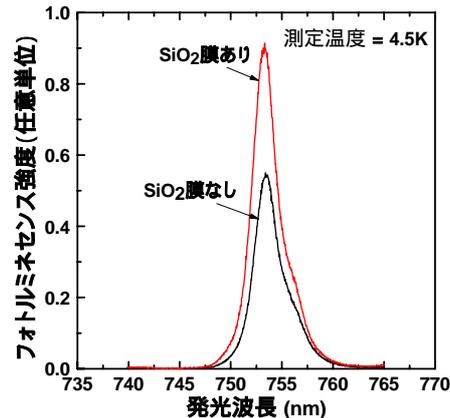


図2 SiO_2 膜のある試料とない試料の PL 発光スペクトルの比較

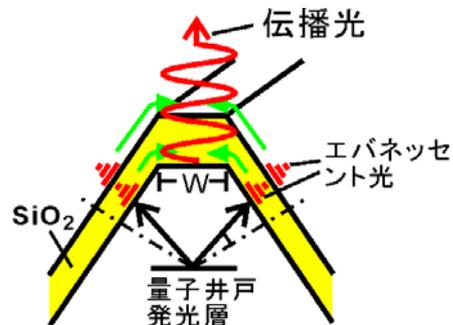
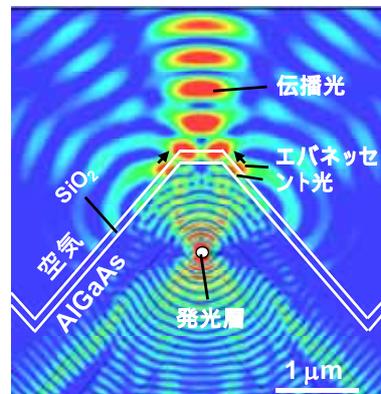


図3 SiO_2 膜が堆積されている試料における(a)電磁波強度の FDTD シミュレーション結果および(b)エバネッセント光の二重干渉現象を示す模式図

のない試料に比べて1.5-1.7倍程度強くなっており、光の取出し効率がSiO₂膜の堆積によってさらに増大されたことが分かった。

SiO₂膜による取出し効率増大のメカニズムについて、電磁波強度の理論シミュレーションにより調べた。図3にリッジの頂上付近における電磁波強度分布のFDTDシミュレーション結果を示す。この図から、SiO₂膜が存在する場合、半導体・SiO₂膜およびSiO₂膜・空気という二つの界面においてエバネッセント光が発生していることが分かる。これにより、エバネッセント光の干渉効果が増強され、空气中に放出される光の量が増えるものと考えている。

この現象はSiO₂膜に限定したのではなく、半導体層より屈折率の小さい全ての材料、例えば、LEDにおいて透明電極として使われているITOやZnOを用いることも可能である。

(2) 光源位置による指向性制御

これまでの研究では、点光源をリッジ構造の中心に配置した場合のみを想定していたが、実際のデバイスにおいてはキャリアが通常リッジ平坦面に均一に存在する。本研究では、エバネッセント光の結合効果の光源位置依存性について、発光パターンの温度依存性測定およびFDTDシミュレーションにより調べた。

図4に平坦面横幅0.6μmのGaAs/AlGaAsリッジに対して行ったFDTDシミュレーションの結果を示す。同図から、点光源をリッジの中心に配置した場合、伝播光はリッジに直交する面内においてリッジ平坦面の垂直方向に強い指向性を持って放射されているのが分かる。これに対して、点光源の位置がリッジの中心からずれてくると、伝播光はリッジ平坦面の法線方向に対して角度を持って放射されるようになる。

図4のような空間分布は実際に発光パターンの温度依存性測定により観測されている。図5に示すように、15Kにおいて試料の垂直方向に指向する非常にシャープな単一の発光ローブが観測されている。この試料の内部における励起光の強度分布をFDTD法で調べたところ、二つの傾斜面によって屈折されたレーザー光と直進する光が互いに干渉した結果、量子井戸の位置において励起光が偶然にリッジの中心に強く局在されている分布になっていることが判明した。低温においてキャリアは基本的に原子層揺らぎに起因する局在効果により励起された場所に局在される。これによって、15Kにおいてキャリアがほとんどリッジの中心に集中している状況が実現されており、図4(a)のような空間指向性が得られていると考えている。温度が高くなるに従って、キャリアが熱励起により量子井戸全体に均一に分布するようになる。そ

の場合、発光パターンは全ての位置にある点光源からの発光の重なりとなるため、広くなる。この結果は、キャリアを何らかの方法によってリッジの中心付近に局在させることができれば、リッジに直交する面内において高い空間指向性が実現できることを意味する。

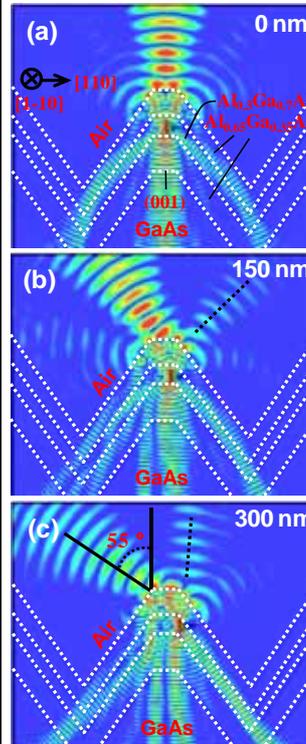


図4 エバネッセント光の光源位置依存性を示すFDTDシミュレーション結果、図中の数値は点光源とリッジ中心との距離を示す。

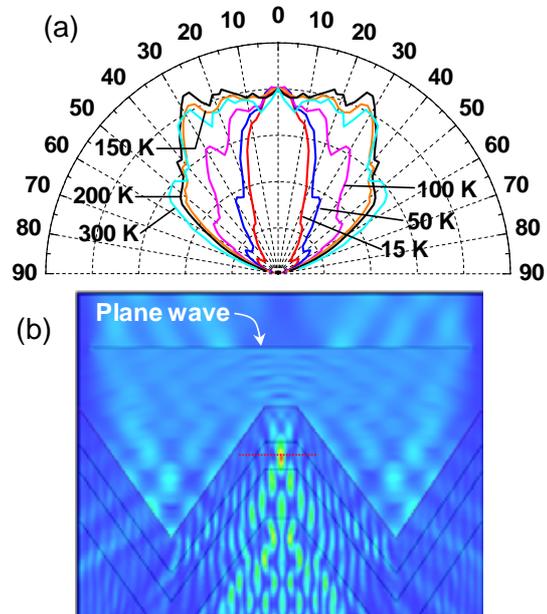


図5 (a) リッジに直交する面内において測定したPL発光パターンの温度依存性、(b) 試料内部の励起光の強度分布を示すFDTDシミュレーション結果

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3件)

Xue-Lun Wang, Tokio Takahashi, Light Source Position Dependence of Evanescent Wave Coupling Effect in Narrow GaAs/AlGaAs Ridge Structure, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有、Vol.51, 2012, pp.040205-1 -3.

DOI: 10.1143/JJAP.51.040205

王 学論、革新的な LED 光取出し高効率化技術、OplusE、査読無、33 巻、2011、170-172。

DOI: 無し

王 学論、半導体発光ダイオードの光取出し効率 20 倍、Ceramics Japan、査読無、44 巻、2009、487。

DOI: 無し

[学会発表](計7件)

王 学論、高橋言緒、リッジ構造におけるエバネッセント光の結合効果の光源位置依存性、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 17 日、早稲田大学。

王 学論、微小表面リッジ構造による LED の光取出し技術(招待講演)、第 7 回表面技術会議、2012 年 2 月 15 日、東京ビッグサイト。

Xue-Lun Wang, A Novel Light Extraction Technique Based on Coupling of Evanescent Waves in a Fine Ridge Structure (招待講演)、International Conference on Nanoscience & Technology, ChinaNANO2011, 2011/9/9, Beijing China.

X.-L. Wang, A. Enderlin, M. Ravaro, Near-80% Light-Extraction Efficiency Realized in a GaAs/AlGaAs Ridge Structure by Evanescent Wave Coupling, the 37th International Symposium on Compound Semiconductors, 2010/06/04, Takamatsu, Japan.

王 学論、郝 国棟、リッジ構造におけるエバネッセント光の結合現象 3 次元放射パターン測定、第 58 回応用物理学関係連合講演会、2011 年 3 月 24 日、神奈川工科大学。

王 学論、A. Enderlin, M. Ravaro, 凹凸基板におけるエバネッセント光の結合による半導体発光の超高効率取り出し、第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 20 日、東海大学。

X.-L. Wang, S. Furue, M. Ogura, V. Voliotis, M. Ravaro, A. Enderlin, R. Grousseau, A Novel Light-Extraction Technique for Light-Emitting Diodes

Based on Coupling of Evanescent Waves, the 2nd International Conference on White LEDs and Solid State Lighting, 2009/12/16, Taipei, Taiwan.

[図書](計1件)

王 学論、LED 照明の高効率化プロセス・材料技術と応用展開、第 2 章、第 1 節、2010 年、pp.15-23、サイエンス&テクノロジー株式会社。

[産業財産権]

出願状況(計2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: 特願 2012-056750

出願年月日: 2012 年 3 月 14 日

国内外の別: 国内

名称: Semiconductor Light Emitting Diode

発明者: 王 学論

権利者: 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: US Patent Application No. 13/146.179

出願年月日: 2011 年 7 月 25 日

国内外の別: 外国(米国)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 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・ナノシステム研究部門・主任研究員

研究者番号: 80356609

(2) 研究分担者

清水 三聡 (SHIMIZU MITSUAKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進パワーエレクトロニクス研究センター・研究チーム長

研究者番号: 10357212

小倉 睦郎 (OGURA MUTSUO)

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノシステム研究部門・主任研究員

研究者番号: 90356717

(3) 連携研究者

該当なし。