

平成21年6月12日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560353

研究課題名（和文） 光制御のための半導体ナノ構造作製

研究課題名（英文） Study of nanostructure fabrication technology for light-wave control

研究代表者

上山 智 (KAMIYAMA SATOSHI)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：10340291

研究成果の概要：

周期300nmの三角格子配置を有するモスアイ構造の作製方法を検討し、テーパー角度制御のためのエッチングマスク材構成を最適化することができた。また、理論計算によって予測された光透過率の角度依存性、光取出し効率の周期依存性は、実験値と定性的に一致することが確認できた。さらに、周期が500nm-600nmの範囲においては、モスアイ構造において反射される光が周期によって決定されるブラッグの回折条件を満たす反射角に変化することを見出し、SiC基板上青色LEDにこれを適用すると240%の光出力向上を得ることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	630,000	3,930,000

研究分野：半導体光デバイス

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：LED、半導体、光取出し効率、電子線露光、モスアイ構造

1. 研究開始当初の背景

LEDなどの半導体発光素子では、光取出し効率向上のため、チップ表面に凹凸加工などの光散乱面の導入が進められている。しかしながら光散乱を用いた場合には、約半分の散乱光は素子内部に帰還することや、全反射光を完全に抑制することができないなどの課

題を残しており、十分に高い光取出し効率は、依然達成されていない。

このような現状を打開するため、フォトニック結晶やモスアイ構造などの光の波動性を利用した新しい技術の開発が行われている。しかしながら、光が波動性を維持できるスケールは光学波長の数倍程度であり、この

ような微細スケールの量産技術が存在しないため、研究も十分ではなく実用化には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、半導体発光素子における光取り出し効率向上のため、光学波長と同程度の周期性を持つ微細構造に関する研究を実施する。これは従来から使用されてきた光の散乱を利用した光取り出し効率改善の手法とは原理的に異なったもので、光の波動性を利用した原理に基づく。本研究ではサブミクロンスケールの微細パターンニング技術の確立、半導体表面の光反射を抑制できるモスアイ構造の形成技術の確立、そして光学設計によるモスアイ構造パラメータの最適設計を実施し、その知見を利用して LED の光取り出し効率 60% (従来比で約 4 倍) を実証することを目的とする。特にサブミクロンスケールのパターンニング技術としては、高いスループットを有し、量産に対応できる技術の開発を行う。

3. 研究の方法

光学波長オーダーのパターンニング技術は未だ確立されていないため、半導体光素子への適用が進んでいない。この課題を打開するための微細構造のパターンニング技術として、2 光束干渉露光法、ナノインプリンティング法、および電子線投影露光法の 3 つについて検討を行った。実際の LED 基板は反りが存在すること、結晶成長時に基板上に数百個のパーティクルが堆積することなど、微細パターンニング時の障害が存在しており、上記 3 つのパターン形成法のうちどれが最も実用的かを判断する必要がある。また、このような微細パターンを高い歩留まりで再現性よく、さらに短時間で形成できるかどうかも重要な基準となる。

引き続き凹凸加工を形成するためのドライエッチングの条件やエッチングマスク材料の検討を行い、光反射抑制に優れた微細構造を自在に作製するための技術を確立する。さらにシミュレーションによるモスアイ構造パラメータの最適設計を行い、実際の LED 表面に最適なモスアイ構造を形成することで、性能実証を行う。

4. 研究成果

(1) パターン形成方法の検討

244nm の紫外高出力レーザを用いた 2 光束干渉露光は、非接触のために基板の反りや堆積したパーティクルの影響を受けず、最も微細な周期 (150nm) に対応できたが、そのパターン形成再現性が低いため、量産技術には適していないと判断した。

ナノインプリンティングにおいては、基板

と金型を接触させてパターンを転写する手法であるために、基板表面の平坦性が低い場合にパターンエラーが多発することや、スループットの低さ、さらにエッチングに適したマスク材への転写が難しいことなどで、これも実用的ではないと考えられる。

最終的には電子線投影露光法によるパターン形成が最も実用的な手法と判断した。これはステンシルマスクに形成したパターンを大口径の電子ビームで高速にスキャンすることで基板上へのパターン形成を行う方法で、高いスループットを実現できる。例えば 2 インチ基板全面のパターン形成に要する時間は 3 分程度であり、十分量産に対応できるスピードが得られることがわかった。また、基板とステンシルマスクとの間に 160 ミクロンほどのギャップを設けることが可能のため、基板の反りやパーティクルの影響を受けることなく、パターン形成が可能である。ただしステンシルマスク作製が困難なため、周期は 300nm までしか小さくできない。しかし後述のようにシミュレーション結果から LED チップからの光取り出し効率向上のためには 300-600nm 周期が最適であることがわかったため、この手法にフォーカスして研究を進めた。

(2) モスアイ構造の作製技術確立

電子線投影露光法による電子線レジストへのパターン形成後、ドライエッチング時に適切な選択比を確保できるハードマスクを探索した。また、多層ハードマスクを用いることで、円錐型のアスペクト比、すなわちテーパー角度を自在に制御できる技術を確立できた。中でも、誘電体とメタルの 2 層の組み合わせが最も適したエッチングマスクであることがわかった。図 1 に SiC 基板上に作製したモスアイ構造の電子顕微鏡写真を示す。このようにきれいに配置された円錐形状を再現性よく作製できるようになった。

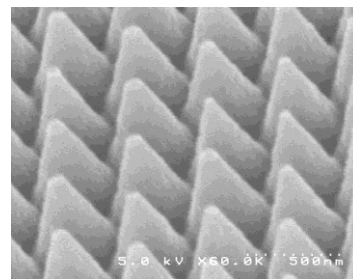


図 1 SiC 上の作製した周期 300nm のモスアイ構造

SiC 基板のみならず、このような構造がサファイア、AlInP、GaN など絶縁体を含む如何な

る LED 関連基板上にもモスアイ構造を作製可能となった。電子線露光では、絶縁膜上に照射するとチャージアップによるパターンの崩壊が懸念されたが、低加速電子線を用いることや、スピンコーティング可能な導電性膜を導入することにより、問題なくパターンの形成ができることが確認できた。

(3) シミュレーションによる構造最適化

単一波長の光についてマクスウェル方程式より光取り出し効率を計算できるシミュレータを用いて、最適なモスアイ構造周期を理論的に導出した。アスペクト比（高さ÷周期）は1に固定している。その結果を図2に示す。紫色が正方格子配置、緑色が三角格子配置を示している。無反射構造として知られているモスアイ構造では、周期は一般に光学波長以下に設定される。この構造ではフレネル反射抑制の効果があるからである。一方、LED においては高い屈折率を持つ結晶内部で発光し、その光が屈折率の低い結晶外部に放出されるため、フレネル反射の他に、臨界的全反射が存在する。正方格子、三角格子ともに2つのピークが存在するのはそのためである。シミュレーションでは光のモスアイ面での1回透過を計算したものであるが、実際の素子においては一旦モスアイ面で反射された光が裏面の電極で跳ね返され、再びモスアイ面に入射する光が存在し、実は全反射が最も光取り出し効率に影響を与えている。したがって、これを抑制するためには光学波長よりも少し大きい周期が適切であると推定される。周期が適度に大きいと、隣接する円錐を透過した光同士の位相が、光学波長の整数倍（ブラッグ条件）を満たすときに強い透過を示す。このために図2、比較的周期の大きいところで光取り出し効率向上が見られている。

一方、周期が大きい領域では、光取り出し効率は比較的一定値に収束しているように見られるが、これは計算モデルが実際のLED光と異なるためと考えられる。即ち、実際にLEDではスペクトル幅が20-30nm程度あるために、

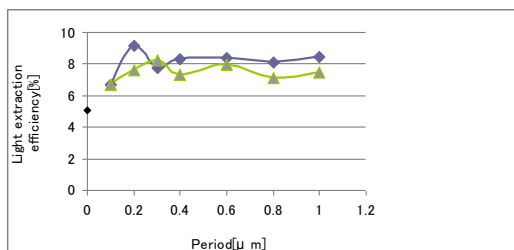


図2 光取り出し効率相対的のモスアイ構造周期依存性

可干渉距離は1-3ミクロン程度である。周期が大きくなりほど、ブラッグ条件を満たしても透過できる干渉光の強度は弱まっていくことを示している。即ち、従来からLEDに用いられてきた数μm周期の凹凸構造では、このような干渉効果が得られず、サブミクロン周期のモスアイ構造が光取り出し効率向上に対して重要な技術であると考えられる。

以上の理論的検討により、モスアイ構造の周期の最適値は、300nm付近にあると推定される。この設計値を採用し、次節のLEDへの適用を行った。

(4) 青色LEDへの適用

モスアイ構造のLEDでの性能向上効果を実証するため、SiC基板上に作製した青色LEDにモスアイ構造の適用を行った。アノード電極、カソード電極ともにエピ層側に配置し、光取り出し面をSiC基板の裏面とした、フリップチップ構造であり、SiC基板裏面全面にモスアイ構造を形成した構成を用いている。ここでは三角格子配置で周期300nm、アスペクト比2のモスアイ構造を用いている。

図3にモスアイ構造作製前後のLEDにおける光出力向上比ヒストグラムを示す。測定は室温でDC電流駆動により行い、オンウエハによるプローブ測定を行っている。光出力は基板裏面側に配置したフォトディテクタにより検出した。同一の素子において、モスアイ構造を作製する前後の光出力を比較することにより、光出力向上比を算出した。図3より、光出力はモスアイ構造適用により、2倍を超える明確な改善が見られた。このモスアイ適用による光出力向上率は、図2に示したシミュレーション結果を上回っているが、これは裏面電極による多重反射によるモスアイ面への複数回入射のためである。一旦モスアイ面で反射した光は光の干渉効果によって反射角度が変化し、裏面にて反射した光は1回目とは異なる入射角度で再びモスアイ面に入射するため、ある確立で透過させることができる。このため、再入射を考慮していないシミュレーション結果よりも高い光出

図3 モスアイ構造作製前後の光出力向上比のヒストグラム

力向上比が観測されたものと考えられる。

なお、この実験では裏面反射電極として、反射率が40%程度のNi/Auを用いているが、より反射率の高い電極に変更すれば、モスアイ構造の効果をさらに高められることを示唆している。また、モスアイ面での回折条件を満たす角度を増やすことが可能な、大きめの周期についても有望である。ただし、この場合には光のコヒーレント長を考慮した最適値を見出すことが必要と思われる。いずれにしてもモスアイ構造の光取出し面は、従来の光散乱面と比較して、非常に有望であることが示された。

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2件)

①落合渉、河合良介、鈴木敦志、岩谷素顕、天野浩、上山智、赤崎勇、Optimization of electrode configuration in large GaInN light-emitting diodes, Physica Status Solidi (C) Vol.6, Issue 6, pp.1416-1419, 2009.

②河合良介、森俊晶、落合渉、鈴木敦志、岩谷素顕、天野浩、上山智、赤崎勇、High-reflectivity Ag-based ohmic contacts for blue light-emitting diodes, Physica Status Solidi (C) Vol.6, Issue S2, pp. S830-S832, 2009.

[学会発表] (計7件)

①上山智、瀬古知世、馬淵翔、岩谷素顕、天野浩、赤崎勇、寺前文晴、近藤俊行、「モスアイ構造の作製と半導体発光素子への応用」、第161委員会、第162委員会合同研究会、2009.3.14、鳥羽

②瀬古知世、馬淵翔、寺前文晴、鈴木敦志、金子由基夫、河合良介、上山智、岩谷素顕、天野浩、赤崎勇、「Fabrication technique for moth-eye structure using low-energy electron-beam projection lithography for high-performance blue-light-emitting diode on SiC substrate」、SPIE Photonics West 2009, 2009.1.24-2009.1.29, San Jose, USA

③河合良介、森俊晶、落合渉、鈴木敦志、岩谷素顕、天野浩、上山智、赤崎勇、「High-reflectivity Ag-based ohmic contacts for blue light-emitting diodes」、International Workshop on Nitride Semiconductors 2008, 2008.10.6-2008.10.10, Monteux, Switzerland

④落合渉、河合良介、鈴木敦志、岩谷素顕、天野浩、上山智、赤崎勇、「Optimization of electrode configuration in large GaInN

light-emitting diodes」, 2008.9.25-2008.9.28, Rust Germany.

⑤三好晃平、上山智、岩谷素顕、天野浩、赤崎勇、「NおよびAlをドープした6H-SiCの光学特性評価」第69回応用物理学会学術講演会、2008.9.2-2008.9.5、中部大学

⑥柴田陽子、村田諭是、生田美奈、杉浦正明、林啓二、岩谷素顕、上山智、天野浩、赤崎勇、新田州後、木下博之、「窒素およびホウ素をドープした6H-SiCのアニール効果」第68回応用物理学会学術講演会、2007.9.4-2007.9.8、北海道工大

⑦村田諭是、柴田陽子、生田美奈、杉浦正明、岩谷素顕、上山智、天野浩、赤崎勇、「窒素およびホウ素をドープした6H-SiCにおけるDAP発光の温度特性評価」、第68回応用物理学会学術講演会、2007.9.4-2007.9.8、北海道工大

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称：発光素子、発光素子用サファイア基板、および発光素子用サファイア基板の製造方法

発明者：上山智、岩谷素顕、天野浩、赤崎勇、鈴木敦志、金子由基夫

権利者：エルシード(株)

種類：特許

番号：特願2008-242943

出願年月日：平成20年9月1日

国内外の別：国内

名称：発光素子及びその製造方法

発明者：上山智、岩谷素顕、天野浩、赤崎勇、鈴木敦志、寺前文晴、北野司、近藤俊行

権利者：名城大学

種類：特許

番号：特願2008-283595

出願年月日：平成20年11月4日

国内外の別：国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

特になし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上山 智 (KAMIYAMA SATOSHI)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：10340291

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者

天野 浩 (AMANO HIROSHI)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：60202694

岩谷 素顕 (IWAYA MOTOAKI)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：40367735