



応用物理学会秋季学術講演会 注目講演プレスリリース

2022年 9月 14日

Eu 添加 GaN 表面平坦化層導入による微傾斜(0001) InGaN 量子井戸発光の均一性向上
Improved emission homogeneity of InGaN quantum wells on vicinal (0001) substrates by insertion of Eu-doped GaN as surface-smoothing layers

半導体産業を“底上げ”する原子レベルの表面平坦化技術 マイクロLEDの量産技術への応用も期待

阪大院工(1), 阪大電顕センター(2)
大和 玲雄(1), 市川 修平(1),(2), 竹尾 敦志(1), 館林 潤(1), 藤原 康文(1)

【発表概要】

- ・ LEDの製造におけるボトルネックであった、構造的欠陥「マクロステップ構造」を解消する、原子レベルで平坦な結晶表面を作製する表面平坦化技術を開発
- ・ 希土類元素・ユーロピウムを用いた膜厚制御技術による、発光特性の向上を定量化
- ・ 同研究は、巨大な市場規模が予測されるマイクロLEDの製造をはじめとする、半導体デバイス産業全体の歩留まりの向上に貢献する

大阪大学大学院工学研究科の大和玲雄、市川修平（大阪大学超高压電子顕微鏡センター兼任）、竹尾敦志、館林潤、藤原康文らの研究グループは、希土類元素であるユーロピウムを添加したガリウム窒素（GaN:Eu）を用いることで、LEDの製造過程で生じる結晶表面の構造的な欠陥である「マクロステップ構造」の解消と、LEDの発光特性の向上を定量化した。同研究で提案される原子レベルの表面平坦化技術は、マイクロLEDの開発をはじめ、半導体産業を底上げする技術として期待される。

【詳細】

LEDの性能を左右する、結晶表面の「凹凸」

テレビやスマートフォン、さらにはVRデバイスにおける次世代のウェアラブルディスプレイ、そして私たちの暮らしの彩る照明など、現代のバーチャルとリアルの空間すべてに欠かせない光源「LED」。LEDは光る半導体であり、原子レベルの構造を高精度にコントロールする技術によって、その性能が支えられている。

LEDの製造では、サファイアなどの基板の上に窒化ガリウム（GaN）などの単結晶を「結晶成長」させることで、その心臓部であるLED発光層を形成する（エピタキシャル成長）。結晶成長の際、デバイスにとって不利に働く、「貫通転位」とよばれる欠陥を低減させることが重要である。この欠陥を低減させる方法の一つが、微細な傾斜を持つ基板「微傾斜基板」への結晶成長である。しかし従来の方法では、微傾斜基板上に成長した結晶表面には微細な凹凸（マクロステップ）が形成される。これがLEDの発光特性にムラを生じさせ、性能劣化を引き起こすことが長らく課題となってきた。

LEDは、LEDチップ上の微小な結晶が量子効果を利用して電子をやりとりすることで発光する。マクロステップとはこの微小な結晶表面の微細な荒れのことである。ナノレベルの膜厚制御が求められるLEDにこのマクロステップが生じると、放たれる光の波長に影響を与える。結晶表面が凸凹しているということは、発光エネルギー分布が均一ではないということだ。エネルギーの変化は、光の波長に影響を与え、放たれる光の色を変化させる。すなわち高エネルギーであれば短波長となり、光は青色に、低エネルギーであれば長波長となり、光は赤色に傾く。つまり凸凹した不均一な表面を持つLEDの結晶からは、様々なエネルギーの、様々な波長の光が放たれることになり、結果として色が濁り、性能が低下するのである。それに対し、理想的なLEDは、結晶表面すべてのエネルギー、波長が均一であり、純粋な単色を放つことにある。そのためには結晶表面のマクロステップを少なくし、平坦な結晶表面をつくることが求められるということだ。

希土類元素ユーロピウムが起こした奇跡

光デバイスに応用されている「III族窒化物半導体」において、数多くの研究成果を発表してきた大阪大学大学院工学研究科の研究グループは、「ユーロピウム（Eu）」を添加することによってマクロステップ構造を解消し、原子レベルで平坦な結晶表面を作製する表面平坦化技術を開発。発光特性の均一性を向上させることに成功した。

「マクロステップは高低差数十ナノメートルという非常に微細な凹凸なのですが、これによって発光波長にゆらぎが出てしまうのです。産業上の理想としては、どの部分をとっても同じ波長になるような、平坦な半導体表面を製造したいわけです。しかし現状のものはばらつきがあるため、結果として歩留まりにも影響していました。私たちはユーロピウムがマクロステップを解消するこ

と、それがどのようにLEDの発光特性を変化させるかを明らかにしました」と同研究グループの大和玲雄氏は話す。

研究チームは、ユーロピウムを添加したガリウム窒素（GaN:Eu）による40ナノメートルの層を窒化ガリウム結晶の底部に挟み込むことで、マクロステップが解消されることを明らかにした（図）。さらに大和氏は、微傾斜基板上に従来の方法で窒化ガリウムを成長させた場合に生じるマクロステップの凹凸を詳細に測定。測定箇所によって、発光ピークエネルギーが異なることも明らかにしている。

「従来の方法でつくった結晶表面のあらゆる箇所のエネルギーを測定したところ、発光ピークエネルギーの低いところと高いところの差が0.22eVでした。しかしユーロピウムを添加し、マクロステップを解消することで、その差が0.02eVにまでに抑えられることがわかりました（図）。これはつまり、発光のゆらぎが低減されたことを示しています。さらに発光強度も増大していることがわかり、発光特性の向上も定量的に確認しました」（大和）

ユーロピウムは、文字通りLEDの性能を“底上げ”する物質だ。同研究グループは、ユーロピウムの他にも、シリコンやマグネシウムを用いて、同様の実験を行っている。しかし他の元素では、大きな表面平坦性の向上は得られなかったという。「希土類元素のユーロピウムという、原子番号が大きく特殊な元素を添加することで、これまで報告のない特性改善が得られたことが、今回の大きな発見です」と同研究グループの市川修平氏は話す。

半導体産業をも底上げする「ユーロピウム」

同研究グループはこれまでもユーロピウムに注目し、革新的な研究成果を挙げている。たとえば、窒化ガリウムにユーロピウムを添加することで赤色発光するLEDを世界で初めて開発している。さらに、赤のLEDを、青と緑のLEDと同一の基板に積層する技術を開発し、液晶、有機ELに代わる次世代ディスプレイとして期待されている「マイクロLED」へ応用した。この研究開発によってディスプレイの作製コストを従来の工法の10分の1へ抑えられることが期待されており、マイクロLEDのボトルネックであった低価格化の実現にも貢献する可能性がある。マイクロLEDはウェアラブルのVRディスプレイから大画面製品までの幅広い用途と巨大な市場規模が予測されている。

同研究グループの藤原康文氏によれば、ユーロピウムを用いた表面平坦化技術は今後、LEDの製造で使われる窒化ガリウム基板の歩留まりの向上に貢献していくという。高輝度LEDやレーザの製造では、量産された窒化ガリウム基板が利用される。この基板の作製には、「HVPE」と呼ばれるエピタキシャル技術と化合物半導体の加工技術を用いた方法で、サファイアやGaAsといった基板の上に窒化ガリウムの単結晶の膜が形成される。しかし、基板材料とガリウム窒素は熱膨張係数が異なるため、結晶成長時の結晶膜には「反り」が発生する。現状では、この反りを研磨することで平坦化している。しかし、もともと反りがあるものを研磨しているため、表面には微細な面

方位のばらつきが生じる。「現在の産業では、全面で同じ波長を出すことのできる、原子レベルで平坦な窒化ガリウム基板を量産するのは非常に難しい。しかし、私たちの提案する表面平坦化技術を応用すれば、非常に高い精度で、波長のばらつきを抑えた平坦な基板の量産技術を実現できます。それは基板の歩留まりの向上に大きく貢献することになると考えられます」と藤原氏は話す。

「今回の報告は発光デバイスですが、この技術は電子デバイスにも応用できます。原子レベルの表面平坦化技術は今後、非常に高い精度が求められていく半導体産業に不可欠なものになるでしょう」（藤原）

【図】

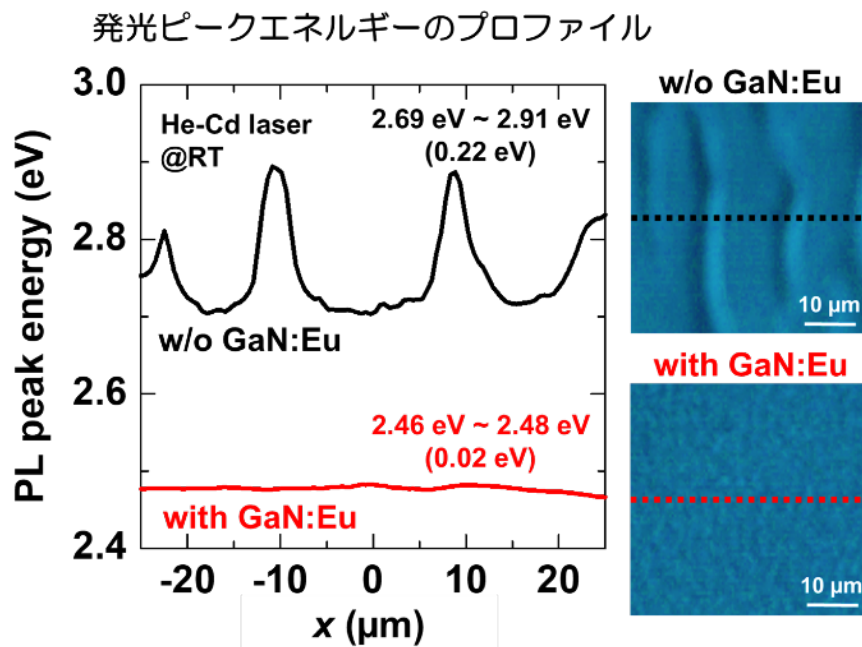


図.従来の方法で結晶成長を行った窒化ガリウムの結晶表面（右上図）。凸凹がマクロステップ構造。ユーロピウムを加えた場合（GaN:Eu）、この凹凸が低減され、マクロステップ構造が解消される（右下図）。

従来の方法で結晶成長を行った窒化ガリウムの結晶表面の発光エネルギー分布（左図）。ユーロピウムを加えた場合（GaN:Eu）と比べてみると、従来の方法は、全体的に発光エネルギー分布の高低差が大きいことが分かる。