

Title	Study on growth, characterization and application of Eu-doped GaN multi-layer structures for red light-emitting diodes
Author(s)	朱, 婉新
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/69569
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 ＜a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について をご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (朱 婉 新)	
論文題名	Study on growth, characterization and application of Eu-doped GaN multi-layer structures for red light-emitting diodes (Eu添加GaN多層構造の成長と評価及び赤色発光ダイオードへの応用に関する研究)
論文内容の要旨	
<p>Wearable, augmented reality and virtual reality devices started the next generation smart devices market. But displays are lacking solutions for higher resolution, higher brightness, wider color gamut. Therefore, micro-light-emitting diodes (micro-LEDs) displays turn to be the right candidate, since they can offer higher brightness and wider color gamut. But for high resolution, as nowadays blue and green LEDs are made by InGaN and red LEDs are made by AlGaInP, a novel GaN based red LED technology is intense demanded to obtain the full colors micro-LEDs display. Recently, the red rare-earth emitter Eu ion doped GaN (GaN:Eu) red LED has been successfully demonstrated. However, compared to AlGaInP red LED, the output power of GaN:Eu red LED is lower than commercial requirement (~mW). In doctoral dissertation, the main subjects were approaches to increase the output power of GaN:Eu red LED to 1mW. Also, for wide applications of GaN:Eu materials, effects of GaN:Eu on threading dislocation and the Eu ions emission process under high excitation were researched.</p> <p>Chapter 1. Background</p> <p>The background of InGaN LEDs, and approaches to GaN based red LED were discussed in this chapter.</p> <p>Chapter 2. Rare-earth doped semiconductor</p> <p>GaN:Eu material belongs to the rare-earth doped semiconductor family. Therefore, in this chapter, characterizations and emission processes of rare-earth ions doped semiconductors were discussed.</p> <p>Chapter 3. Instruments</p> <p>Fabrication method and setup, as well as characterization setups, were introduced in this chapter.</p> <p>Chapter 4. GaN:Eu/GaN multi-layer structure (MLS)</p> <p>To effectively control Eu doping, a novel Eu source $\text{EuCp}^{\text{pm}}_2$ was introduced. Besides of its advantages, the absence of O in the source reduces the ion dissolution in GaN. As adding intentional oxygen flow was resisted by GaN LED industry, a GaN:Eu/GaN multi-layer structure (MLS) was designed, which can utilized the native oxygen in GaN similarly to GaN:Eu co-doping with oxygen.</p> <p>Chapter 5. Growth and properties of low-temperature grown GaN:Eu (LT-GaN:Eu)</p> <p>Growth condition of GaN:Eu using $\text{EuCp}^{\text{pm}}_2$ was optimized. In LT-GaN:Eu, the Eu local defect environment was tuned, which led to smooth with no precipitation surface, stronger photoluminescence intensity and higher LED output power. However, variations of Eu local structures formations hindered the luminescence.</p> <p>Chapter 6. Low-temperature grown GaN:Eu/GaN multi-layer structure (LT-MLS)</p> <p>To fix the variation of Eu local structures, the LT-MLS was designed. As expected, the LT-MLS showed reduction of Eu local structures variations. Furthermore, the LT-MLS LED showed the highest output power and external quantum efficiency than other reported GaN based red LEDs.</p> <p>Chapter 7. Threading dislocation in low-temperature grown GaN:Eu</p> <p>The GaN:Eu materials showed a promising future for low dislocation GaN template applications. In LT-MLS, strain barriers were formed between GaN:Eu and GaN, which can bend dislocations effectively.</p> <p>Chapter 8. Low-temperature grown GaN:Eu/AlGaIn multi-quantum well structure (LT-GaN:Eu MQW)</p> <p>To research Eu emission characterization under high excitation conditions, a LT-GaN:Eu MQW was successfully designed. Compared to low excitation conditions, orange color lights emitted from higher Eu ^5D state, as a consequence of re-excited $^5\text{D}_0$ state Eu, were observed. And these re-excitation phenomena can be applied for a red to orange color tunable LED.</p> <p>Chapter 9. Conclusions and future works</p> <p>Dissertation conclusions and future forecasts were organized and discussed in this chapter.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (朱 婉 新)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	藤 原 康 文
	副 査	教 授	掛 下 知 行
	副 査	教 授	山 下 弘 巳

論文審査の結果の要旨

ウェアラブルな拡張現実／仮想現実デバイスは、次世代のスマートデバイスとして注目を集めており、より高い解像度、より高い輝度、より広い色域を実現するための要素技術が求められている。マイクロ発光ダイオード（マイクロ LED）ディスプレイはより高い輝度とより広い色域を有することから、その候補の一つとして期待されている。高解像度のマイクロ LED ディスプレイの実現には 3 原色 LED を同一結晶基板上に高密度に集積することが必須であるが、青色・緑色 LED には $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 、赤色 LED には $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}/\text{GaAs}$ が発光層に用いられているため、その集積化は困難である。そのような背景の中、青色・緑色 LED と同じ GaN 系材料からなる赤色 LED の開発が急務となっている。近年、Eu 添加 GaN ($\text{GaN}:\text{Eu}$) を発光層とし、 Eu^{3+} イオンの 4f 殻内遷移を用いた赤色 LED が開発され、その光出力は年々、増大している。本論文は、 $\text{GaN}:\text{Eu}$ 赤色 LED の高輝度化を主目的に、有機金属気相エピタキシャル法による GaN への Eu 変調添加と Eu 発光特性の評価に取り組んでおり、下記の知見を得ている。

(1) GaN 中で Eu 発光中心を効果的に制御するために、新しい有機 Eu 原料 (EuCp^{m}_2) を導入し、Eu 発光特性を調べている。 EuCp^{m}_2 を用いた $\text{GaN}:\text{Eu}$ の成長条件は従来の Eu 原料 ($\text{Eu}(\text{DPM})_3$) を用いたものと大きく異なり、成長温度をこれまでより 50°C 程度低い 960°C 近傍に設定することにより、表面モフォロジーとして析出物のない鏡面を得ている。この低温成長 $\text{GaN}:\text{Eu}$ (LT- $\text{GaN}:\text{Eu}$) において、Eu 発光強度の増大を観測するとともに、それを発光層とした LED を作製し、高輝度化を実証している。また、観測される発光スペクトルに Eu イオン周辺局所構造の揺らぎに起因するブロード化が生じるが、0 共添加により、その揺らぎを抑制できることを明らかにしている。

(2) LT- $\text{GaN}:\text{Eu}/\text{GaN}$ 多層構造において、Eu 発光スペクトルが先鋭化し、Eu イオン周辺局所構造の揺らぎが抑制されることを見出し、この抑制には残留 0 が関係していることを明らかにしている。また、LT- $\text{GaN}:\text{Eu}$ 層厚の減少とともに Eu 発光効率が增大すること、積層層数の増加とともに Eu 発光強度が増大することを見出している。100 周期 LT- $\text{GaN}:\text{Eu}/\text{GaN}$ 多層構造を発光層とした LED を作製し、20 mA 動作において光出力 1.25 mW、2 mA 動作時に外部量子効率 9.2 %の世界最高値を実証している。

(3) LT- $\text{GaN}:\text{Eu}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 多重量子井戸構造をパルス光励起し、そのパルス間隔を縮めることにより、多重励起による Eu^{3+} イオンの高エネルギー準位 $^5\text{D}_1$ 、あるいは $^5\text{D}_2$ から放出されるオレンジ色発光が観測されることを見出している。また、その LT- $\text{GaN}:\text{Eu}/\text{AlGaIn}$ 多重量子井戸構造を発光層とする LED において、印加電圧により発光色の変化を観測しており、赤色からオレンジ色に色調整可能な LED としての応用可能性を提案している。

(4) サファイア基板上に GaN を成長した場合、転位密度 $10^8\sim 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ が一般的である。LT- $\text{GaN}:\text{Eu}/\text{GaN}$ 多層構造をバッファ層として挿入することにより、転位密度が 10^7 cm^{-2} 台に低減することを見出しており、低転位 GaN テンプレート作製に応用可能であることを明らかにしている。また、透過電子顕微鏡観察により、その低減には Eu 近傍の局所歪みが関係することを明らかにしている。

以上のように、本論文は次世代マイクロ LED ディスプレイを可能とする高輝度 $\text{GaN}:\text{Eu}$ 赤色 LED の実現に向けて、GaN への Eu 変調添加が Eu 発光強度の増大に効果的であることを示すに留まらず、それを発光層に用いた LED において光出力として世界最高値を実証しており、材料工学分野に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。