

「III族窒化物4元混晶を用いた深紫外・高輝度LEDの研究」

—250-350nm帯・深紫外発光デバイスの実現に大きく前進—

理化学研究所 研究員 平山 秀樹

1. 研究の背景

波長250nm-350nm帯の深紫外域・高輝度発光ダイオード(LED)、半導体レーザー(LD)は、半導体白色光源(長寿命蛍光灯)、高密度光ディスク(深紫外DVD)、殺菌や近眼治療等の医療、紫外硬化樹脂等の化学工業、ダイオキシンのNOx等の公害物質の高速分解処理、各種計測器、空気清浄機、無公害車等、産業・一般を含む様々な分野での幅広い応用が期待されている。これまで深紫外光源としては、ガス・固体レーザー等が主に用いられ、各種産業に利用されているが、大型で高価であるため一般応用にまで至っていないのが現状である。今後、小型・高効率・長寿命・低コストの深紫外LD・LEDが実現・普及すれば、上記のような幅広い応用に向けて大きく前進すると考えられる。本研究では、波長250-350nmの紫外・高輝度LED・LDを実現することを目的として研究を行っている。深紫外発光素子を構成する半導体材料としては、いくつか提案されているが、電流注入の実現、量子井戸構造を用いた高効率発光、素子寿命、LDの実現等を考慮すると、III族窒化物半導体が現在のところ最も有力であると考えられる(図1)。波長350nm以下の窒化物紫外発光デバイスは、これまで、(1)高輝度紫外発光の困難、(2)ワイドバンドギャップ半導体のp型化の困難、ならびに(3)低転位密度半導体基板の欠如の理由から、実現が遅れてきた。本研究では、深紫外材料にIII族窒化物を選び、上記の困難を克服するため、その成長技術を開拓し、波長300nm帯の深紫外LEDを実現した。

2. 研究の成果

青・紫色の波長では、これまでの窒化物研究開発で高効率発光が得られ、LED・LDとして実用化している。一方、波長350nm以下の深紫外発光するワイドバンドギャップAlGaIn(窒化アルミニウムガリウム)結晶は、転位のある基板・バッファ上では発光が弱く、デバイス応用が難しかった。

本研究では、波長300-350nmの深紫外領域で、青(430nm)と同等の室温高輝度発光が得られる材料の結晶成長に初めて成功し、それを用いて深紫外LEDを実現した。

ワイドバンドギャップAlGaInに数%のIn(インジウム)を添加すると、In組成変調領域へのキャリアの閉じ込め効果によって、紫外発光効率の大幅な改善が期待される。しかし、

AlGaInとInGaInの成長温度の違いから、AlGaIn結晶にInを導入することが難しく、これまでInAlGaInの高品質混晶が得られなかった。本研究では、混晶へのAl組成導入によるIn組成の誘発的な導入効果を発見し、それを用いて、高品質4元混晶の製膜を初めて可能にした。その結果、Inの組成変調効果(図2)と結晶品質の改善により、深紫外発光が大幅に増強されることを明らかにした。InAlGaIn 4元混晶を用いた量子井戸構造を作製し、波長280-400nmの広い紫外波長領域で高輝度発光を得た。図3に各種

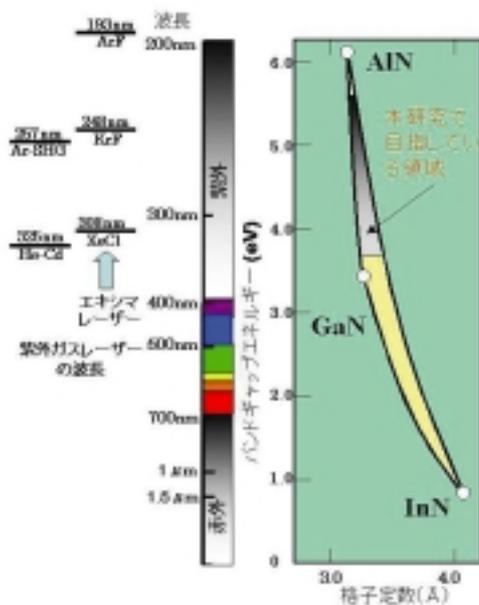


図1 ウルツ鉱結晶III族窒化物の発光波長帯と紫外ガスレーザーの波長 (AlGaIn系材料を用いれば深紫外波長域の発光素子実現が可能)

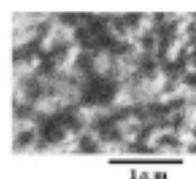


図2 深紫外発光InAlGaIn混晶において観測されたIn組成変調(カソードルミネッセンス像)

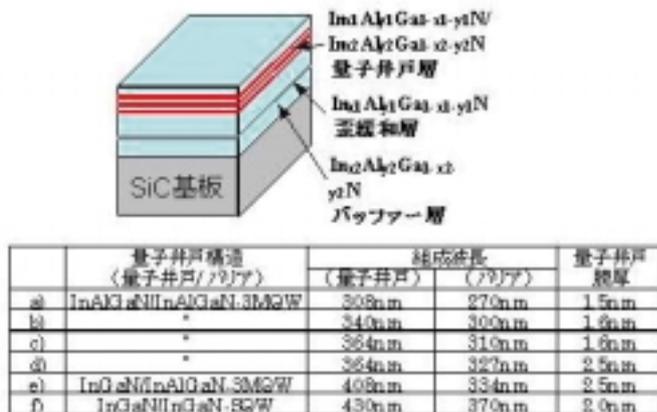
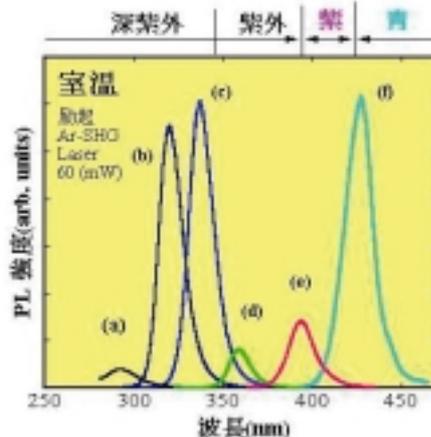


図3 InAlGaIn 4元混晶を用いて作製した量子井戸のフォトルミネッセンスの強度比較 (InGaIn量子井戸からの青色発光と同等の発光強度が深紫外において得られた)



組成の窒化物4元混晶を用いて形成した量子井戸の発光スペクトルを示す。深紫外の発光効率は、すでに実用化している青色発光素子と比較し、室温において遜色無い事を明らかにした。これらの結果から、InAlGa_N4元混晶は、深紫外波長の高輝度LED・LDの実現に向けて大変魅力的な材料であることが示された。本研究では、さらに、ワイドバンドギャップAlGa_N混晶のp型化、AlGa_Nバッファの貫通転位密度の低減等、窒化物紫外発光素子の実現において必要な技術開拓も同時に行なった。これらの技術を用い、深紫外LEDを試作した。InAlGa_N4元混晶を活性層に持つLEDを作製し、波長308nm-355nmの深紫外波長域において高輝度発光を得た。試作した深紫外LEDの構造および発光スペクトルの例を図4に示す。紫外光の取り出し効率を増加させるため、紫外波長に対して透明なサファイア基板上にLEDを作製し、基板の裏面から紫外光出力を得ている。4.5eV以上のワイドバンドギャップAlGa_Nのp型化にも成功し、短波長LEDの作製を可能にした。室温において動作させたところ、紫外短波長においてシングルピーク発光が得られ、サブmWの出力が得られた。今のところ十分な出力は得られていないが、今後、結晶製膜条件やLED構造の改善により、数10mWの出力が得られる実用可能な素子の実現が可能であると考えられる。

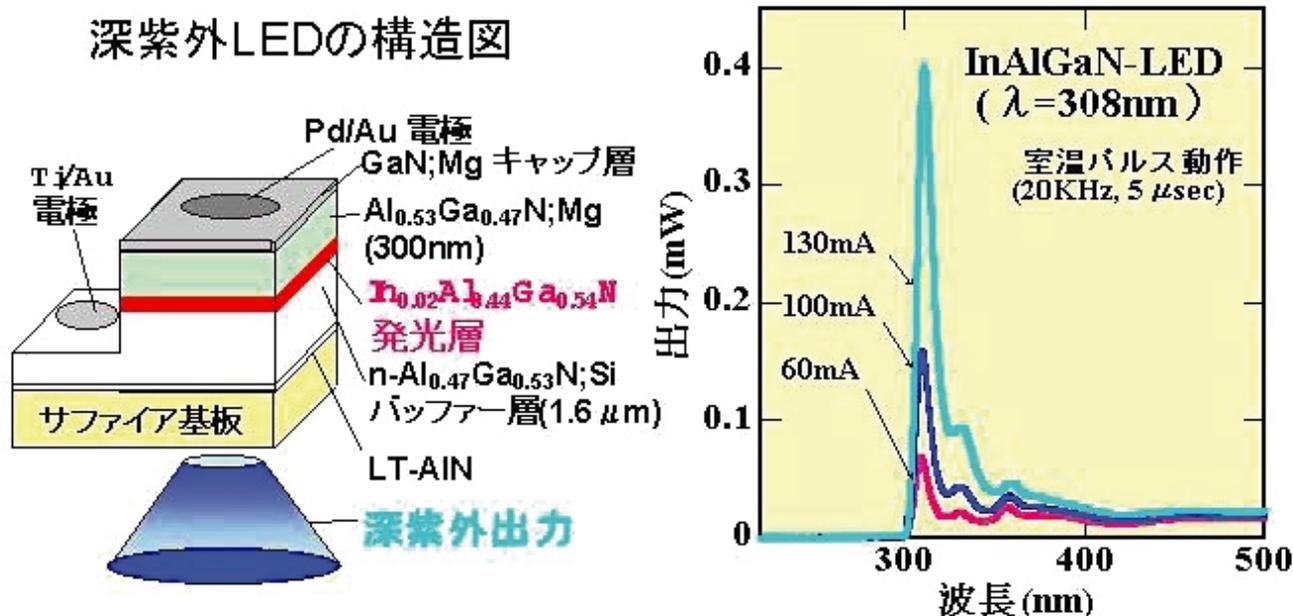


図4 InAlGa_N4元混晶を活性層に用いた深紫外LED(波長308nm)の構造と発光スペクトル

3. 今後の展望

III族窒化物を用いた深紫外発光デバイスは、産業・一般を含むさまざまな分野での幅広い応用が期待されており、近年、その重要性ゆえ、開発競争が激化してきている。最近、280nm付近の短波長LEDや、350nm帯LEDからの10mW出力も報告されており、進展が目覚ましい。本研究でも、現在、250-300nmの高輝度LEDの研究にとりかかっている。本研究で開発したInAlGa_N4元混晶は、深紫外・ハイパワーLEDのみでなく、同波長帯の深紫外LDを実現する材料としても最も有力であり、今後の開発の発展性をおおいに秘めた材料である。今後、ワイドバンドギャップ領域における、高輝度発光4元混晶、p型化と基板開発の研究の前進とともに、深紫外LEDのさらなる短波長化、高出力・高効率化や、深紫外LDへの展開が期待される。

参考文献

1. H. Hirayama, T. Yamabi, A. Kinoshita, Y. Enomoto, A. Hirata, T. Araki, Y. Nanishi and Y. Aoyagi, "Marked enhancement of 320-360 nm UV emission in quaternary In_xAl_yGa_{1-x-y}N with In-segregation effect", Appl. Phys. Lett. vol.80, no.2, pp.207-209, 2002.
2. H. Hirayama, Y. Enomoto, A. Kinoshita, A. Hirata and Y. Aoyagi, "Room-Temperature Intense 320nm-Band UV Emission from Quaternary InAlGa_N-Based Multi-Quantum Wells", Appl. Phys. Lett. vol.80, no.9, pp.1589-1591, 2002.
3. H. Hirayama, Y. Enomoto, A. Kinoshita, A. Hirata and Y. Aoyagi, "Efficient 230-280nm Emission from high-Al-Content AlGa_N-Based Multi-Quantum Wells", Appl. Phys. Lett. vol.80, no.1, pp.37-39, 2002.
4. 平山秀樹、青柳克信、「窒化物を用いた300nm帯紫外発光素子の開発」、応用物理、第71巻、第2号、pp.204-208、2002.
5. 平山秀樹、「レーザー材料としてみた半導体(In)AlGa_N窒化物混晶の結晶成長と300nm帯紫外光輝度LEDへの応用」、レーザー研究、第30巻第6号、pp.308-314、2002.
6. 平山秀樹、「窒化物半導体からの紫外高輝度発光と300nm帯発光素子への応用」、オプトロニクス(OPTRONICS)、pp.7-12、特集「注目の光材料と素子への応用」、Vol.10、No. 226、2000.