



TOHOKU
UNIVERSITY

平成28年11月24日

報道機関 各位

東北大学多元物質科学研究所
双葉電子工業株式会社

非極性面窒化アルミニウムインジウム薄膜ナノ構造を用いた

新しい深紫外線～緑色偏光光源

－青色LEDを越えて。小型固体深紫外線光源の可能性を拓く－

【概要】

東北大学多元物質科学研究所秩父重英教授・小島一信准教授は双葉電子工業(株)の協力を得て、熱力学的に混ざりにくい窒化アルミニウムインジウム (AlInN) 混晶^{*1} を非極性面^{*2} にエピタキシャル成長^{*3} させた薄膜ナノ構造を蛍光表示管 (VFD)^{*4} に搭載することにより、波長 210nm に迫る深紫外線 (DUV) から緑色までの小型偏光光源を実現しました。

現在、地球上で安全な水を飲めない人口は 11 億人、清潔な公衆衛生が保たれていない人口は 26 億人です。この方々に安全な環境を提供して世界に貢献できる方法の一つに、波長 260-280nm の高効率 DUV 固体光源を低コストで開発する事が挙げられます。この用途に適する医療・消毒・殺菌用光源として、また、超高密度光記録や見通し外通信用の光源として、さらに大型ガスレーザーや各種大型励起光源の固体化による小型化を目指して、波長 300nm 台から 200nm を切る紫外線 (UV) ～DUV 光を呈する発光ダイオード (LED) やレーザーダイオードの開発が望まれています。秩父教授らは、本質的には混ざりにくく結晶成長が困難な AlInN 混晶を、2014 年ノーベル物理学賞の受賞対象となった c 面青色 LED とは異なる結晶面である、非極性 m 面にエピタキシャル成長させ、そのナノ構造を VFD に実装することによって、面内で直線偏光^{*5} された DUV 光や青色、緑色の光を呈する小型光源を実現しました。本研究で開発された光源の高効率化、低コスト化、高信頼性化が実現できれば世界に大きく貢献するものとして期待されます。

本研究の一部は、旭硝子財団、文科省の附置研究所間アライアンス及び科研費挑戦的萌芽研究と新学術領域研究「特異構造の結晶科学」、経産省 NEDO プロジェクトの助成を受けています。また、m 面 GaN 基板は三菱化学(株)の開発品を活用させていただいています。成果はドイツ WILEY-VCH の科学誌「Advanced Materials」誌にて、11 月 24 日にオンライン公開されました。

問い合わせ先

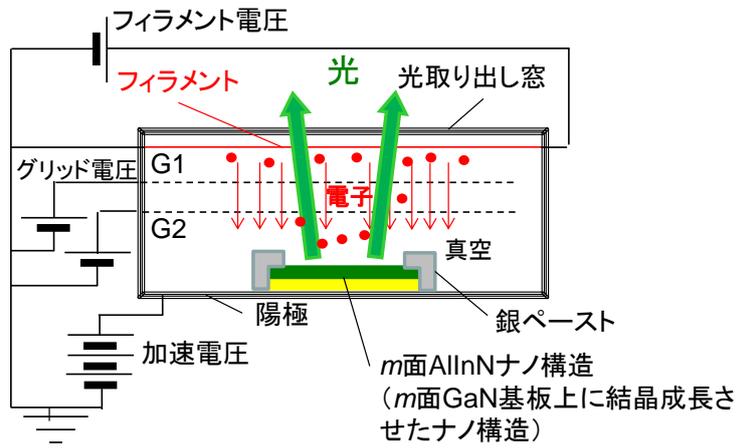
東北大学多元物質科学研究所

担当：教授 秩父重英

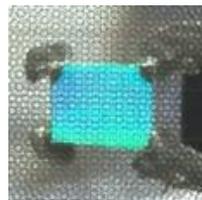
准教授 小島一信

電話：022-217-5363、5360

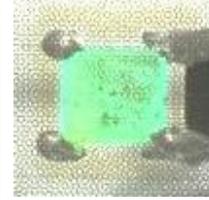
E-mail：chichibu@m.tohoku.ac.jp



東北大で結晶成長させたc面 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ (窒化インジウムガリウム)エピタキシャル薄膜を実装したVFD



InNモル分率
23%のm面
AlInNを実装



InNモル分率
30%のm面
AlInNを実装

【参考画像】m面AlInN混晶を実装した蛍光表示管(VFD)のポンチ絵(上)と写真(下)。DUV光は目に見えないので、可視光を呈するAlInNを搭載したVFDの写真を載せている。

【詳細な説明】

1. 背景

Ⅲ族窒化物半導体 (Al, Ga, In)Nは、図1に示すように光通信波長 (1.55 マイクロメートル) から 200 ナノメートル (nm) 台の深紫外線 (DUV) 波長までの「光」を発する事が可能な禁制帯幅(バンドギャップエネルギー: E_g)^{*6}を持つ魅力的な半導体材料です。特に、窒化インジウムガリウム (InGaN)^{*7} という混晶の量子井戸^{*8}を用いた高輝度青色・緑色発光ダイオード(LED)や、青色LEDで黄色蛍光体を励起する高効率白色LED、そしてBlu-rayディスク用紫色レーザダイオードなどがこの20年をかけて次々と製品化され世界に拡散して行きました。「高輝度省エネルギー白色光源を実現に導いた高効率青色発光ダイオードの発明」のインパクトに対して、2014年にノーベル物理学賞が、3名の日本生まれの研究者に授与されたことは記憶に新しい。ノーベル物理学賞の授賞理由の一つとして、未だ送電線の届かない地域に住む15億人に、白色LEDと太陽電池と蓄電池の組み合わせで夜間の照明を普及させることができることが挙げられています。

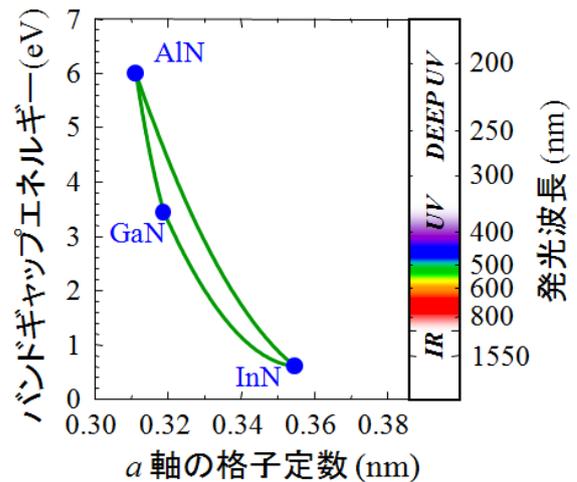


図1 (Al, In, Ga)Nの格子定数とバンドギャップエネルギーの関係。

現在、地球上には安全な水を飲めない人が11億人、清潔な公衆衛生が保たれていない人

はもっと多く 26 億人います。この方々に安全な環境を提供して世界に貢献できる方法の一つに、青色 LED よりも高い光子エネルギーで光る、波長 260–280nm の高効率 DUV 固体光源を低コストで開発する事が挙げられます。しかしながらこれは、青色 LED よりも困難な技術の開発を意味します。この用途に適する医療・消毒・殺菌用光源として、また、超高密度光記録や見通し外通信用の光源として、さらに大型ガスレーザーや各種大型励起光源の固体化による小型化を目指して、波長 300nm 台から 200nm 程度の紫外線 (UV) ~ DUV 光を呈する半導体制の LED やレーザダイオードの開発が望まれています。

秩父教授らは、本質的には混ざりにくく結晶成長が困難な AlInN 混晶を、2014 年ノーベル物理学賞の受賞対象となった *c* 面 (図 2 参照) 青色 LED とは異なる結晶面である「非極性 *m* 面」にエピタキシャル成長させ、そのナノ構造を蛍光表示管 (VFD) に実装することによって、面内で直線偏光された DUV 光や、青色、緑色の光を呈する小型光源を実現しました。

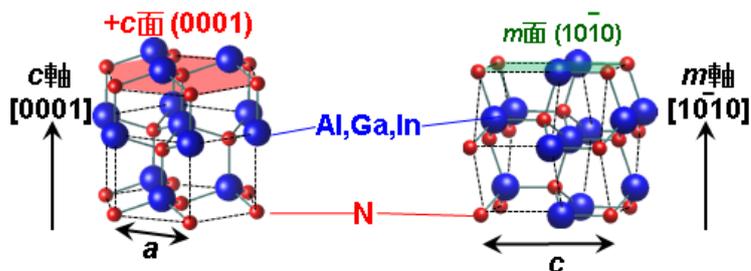


図 2 極性面 (*c* 面) と非極性面 (*m* 面)

2. 研究手法と成果

DUV 光を呈する小型固体素子開発の主流は、窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) 量子井戸を活性層とする LED の開発であり、これまでに日米をはじめ数多くの企業等が性能向上を報告してきました。その理由は、図 1 から分かるように、AlGaIn 混晶の E_g が DUV から UV に渡っており、AlN モル分率を 50%程度にすれば波長約 280nm に届くこと、AlGaIn の結晶成長が、AlInN と比較すると遥かに楽であることです。ここで、AlGaIn の結晶成長には、青色 LED を製造する際に用いられている、有機金属気相エピタキシャル成長 (MOVPE) 法が用いられています。しかしながら、青色 LED のような高効率化や低コスト化が困難で、民生品としての実用化を阻んでいます。

一方で、図 1 から、AlN と InN を混ぜた AlInN 混晶も DUV や UV 光源用材料として期待して良いと読み取れます。しかしながら、AlN と InN の MOVPE 結晶成長に適する温度が 1600°C 以上と 400°C 以下で全く異なっており、熱力学的に混ざりにくい「非混和系」です。また、格子定数の違いも AlN と GaN の場合より大きく、高品質な結晶の成長が極めて困難です。しかしながら、この混晶の高品質結晶を成長できるようになった場合、これまで AlGaIn と InGaIn で実現してきたデバイスもすべて AlInN だけで実現できる可能性があり、究極の窒化物半導体混晶と言えます。秩父教授らは、AlInN を MOVPE 成長させる際の装置形状や成長条件を最適化する事により、結晶学的に見て十分な品質をもつ、InN モル分率 0~32%程度までの $Al_{1-x}In_xN$ の結晶成長を行う事に成功しました。

しかしながら、高 AlN モル分率 AlGaIn 混晶の場合と同様に p 型結晶を得るのが困難であると予想されるため、p 型層を用いないで発光させることができる VFD に AlInN を搭載する事を考え、双葉電子工業㈱の協力を得て実装しました。VFD は電子線励起型の発光素子であり、高精細な車載インパネや小型表示機として実用化され、生活に溶け込んでいるデバイスですから、低コスト化も可能です。

ここで、単なる UV や可視光源としてだけでなく、偏光板が 1 枚少なくすむ液晶バックライト等にも使用可能な偏光光源として用いることができるように、非極性 *m* 面 (図 2 参照) に AlInN をエピタキシャル成長させ、その薄膜ナノ構造を VFD に搭載して波長 215nm 程度の DUV 光から緑色までの小型偏光光源を実現しました。

3. 今後の展望

本研究で開発した光源の高効率化、低コスト化、高信頼性化が実現できれば、偏光特性を持った DUV～UV の光（工業的には UV-A、UV-B、UV-C）や可視光線を発する小型発光素子が発現され、世界に大きく貢献するものとして期待されます。

【用語解説】

*1 窒化アルミニウムインジウム(AlInN)

窒化アルミニウム (AlN) と窒化インジウム (InN) の中間的性質をもつ、いわゆる混晶と呼ばれる中間化合物。ヘテロ接合電界効果トランジスタや発光素子の「機能補助層」としての利用が提案されているが、いまだ世の中に出てはいない。

*2 非極性面 窒化物半導体

c 面以外の面方位であり、特に m 面は a 面は完全に極性が無くなる。極性とは、結晶の表裏のようなものであり、六方晶の GaN や AlInN は c 軸方向に反転させると元と違った結晶軸方向になってしまう（反転対称性が無いという）。

*3 エピタキシャル成長

ある基板の持つ格子の情報（格子のサイズや形態）を引き継ぎながら、その上に単結晶の薄膜を成長させること。ノーベル物理学賞の青色 LED は、GaN 基板が無かった頃からサファイヤ基板に疑似エピタキシャル成長させていた。今般の m 面 AlInN は、m 面 GaN 基板にエピタキシャル成長させている。

*4 蛍光表示管(VFD)

電子線励起型の発光素子。高精細な車載インパネや小型表示機として実用化され、生活に溶け込んでいるデバイスである。低コスト化が可能。

*5 偏光された光

光は電磁波である。光線が進行する方向に対し電界と磁界は直交して振動している。直線偏光とは、電場成分の振動が、面内のある軸に完全に平行な場合を指す。本研究の場合は、光の電界成分は m 面 AlInN 結晶の c 軸に平行である。

*6 禁制帯幅

半導体中で自由に動ける電子と正孔のペアが持つエネルギーであり、半導体固有の値を持ちます。発せられる光の波長は、この禁制帯幅の逆数に比例します。

*7 窒化インジウムガリウム(GaN)

窒化ガリウム(GaN)と窒化インジウム(InN)を混ぜた青色発光ダイオードの発光層として用いられる半導体。青色レーザとしても実用化されている。GaN は他の半導体と比べ、熱伝導率が高いことや飽和電子速度が速いことなどから発光デバイスだけでなく、電子デバイスとしての応用も期待されている。

*8 量子井戸

厚さ 2-3 ナノメートル程度に薄くした半導体層。通常は障壁層と呼ばれる、エネルギーギャップの広い半導体層に挟まれています。