

未来を拓く先端技術

世界最短波長210 nmの 遠紫外発光ダイオード

たにやす よしたか かすう まこと まきもと としき

谷保 芳孝 / 嘉数 誠 / 牧本 俊樹

NTT物性科学基礎研究所

NTT物性科学基礎研究所は、すべての半導体の中でもっとも短い波長で発光することが理論的に予測されている窒化アルミニウム (AlN) を用いた発光ダイオード (LED) の動作に世界で初めて成功し、半導体発光素子で世界最短波長210 nmの遠紫外発光を観測しました。AlN遠紫外発光ダイオード実現に結びつけたさまざまな半導体技術を紹介しします。

窒化アルミニウムの特徴

窒化アルミニウム (AlN) は、図1に示すように、青色発光ダイオードや高密度DVD用半導体レーザに用いられている窒化ガリウム (GaN) と同じ結晶構造を持つ直接遷移型^{*1}半導体です。そして、AlNは半導体中で最大のバンドギャップ^{*2} 6eV (エレクトロンボルト) を持つことから、AlNで発

光素子を作製できるようになれば、すべての半導体の中で、もっとも短い波長210 nmで発光することが理論上予測されています^{(1)~(3)}。ダイヤモンドや窒化ホウ素 (BN) などはAlNに近い大きなバンドギャップを持ちますが、発光素子には不向きな間接遷移型^{*1}半導体です。

図2に示すように、波長400 nm以下の光は紫外光と呼ばれます。紫外光の中でも、波長300~400 nmの紫外

光は近紫外光と呼ばれ、波長200~300 nmの紫外光は遠紫外光と呼ばれます。なお、波長200 nm以下の紫外光は真空紫外光と呼ばれ、大気で吸収されるため、真空中といった特殊な環境下でないと利用できません。

遠紫外の光源としては、これまで、水銀ランプやガスレーザなどのガス光源しかありませんでした。水銀ランプは水銀の有害性があり、ガスレーザはガスの交換が必要、大型、低効率といった実用上の問題があります。これらのガス光源を半導体素子化できれば、環境の観点から無害であるばかりでなく、高信頼化、小型化、高効率化が期待できます。さらには、長寿命、持ち運びが可能など半導体素子の特徴が発揮されると、既存のガス光源の置き換えだけでなく、新規産業の創出が期

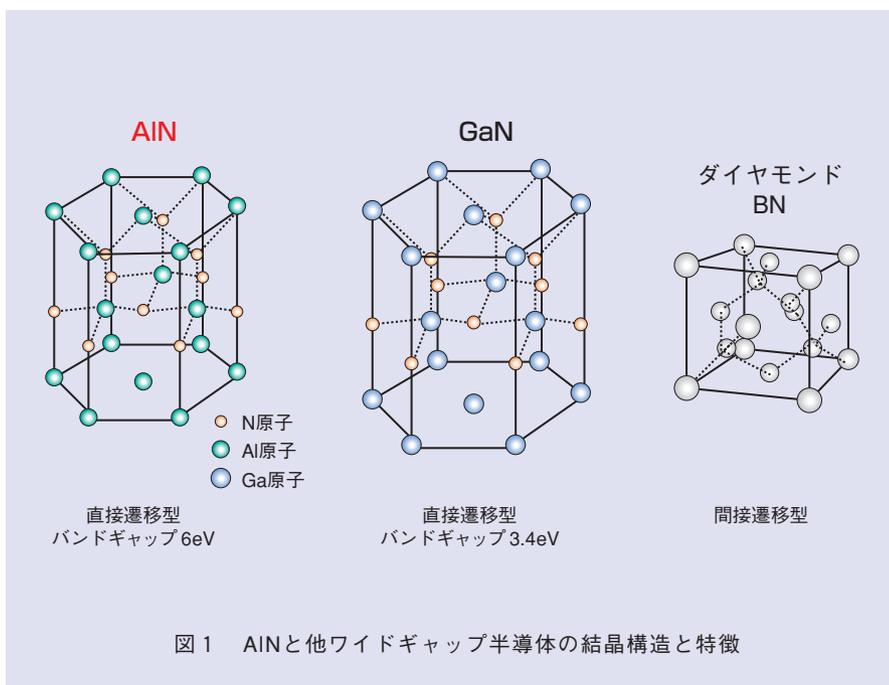


図1 AINと他ワイドギャップ半導体の結晶構造と特徴

*1 直接遷移型、間接遷移型：半導体は、その物理特性から決まるエネルギー構造により、直接遷移型と間接遷移型に分けられます。直接遷移型は、電子と正孔が効率良く結合するため、発光効率は非常に高く、発光素子に適しています。逆に、間接遷移型は、電子と正孔が結合しにくいいため、発光効率は極めて低く、発光素子には向いていません。

*2 バンドギャップ：半導体中に供給された電子と正孔が結合する時に発生するエネルギーで、いずれの半導体も、固有の値を持っています。バンドギャップのエネルギーと発生する光の波長は、反比例の関係にあります。

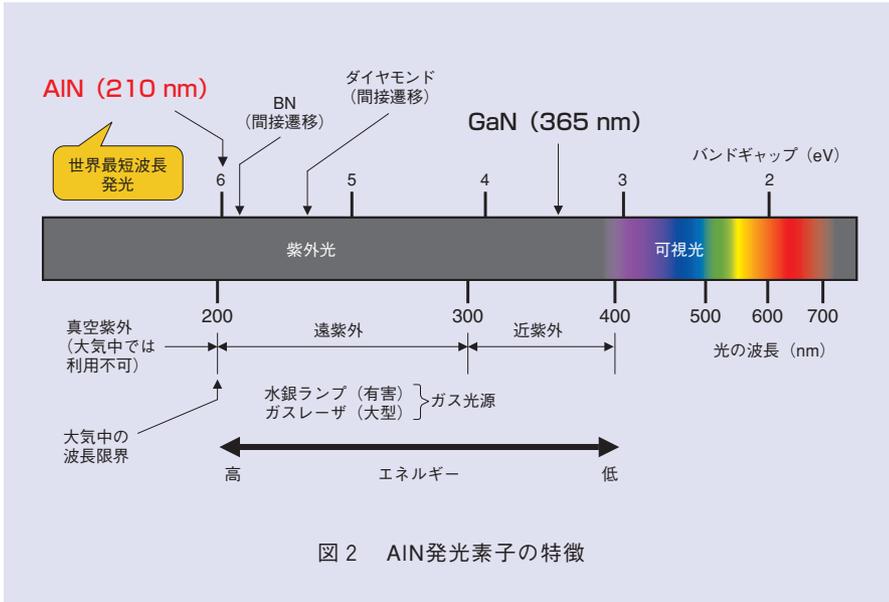


図2 AlN発光素子の特徴

表 AlNの物理特性と予想される素子特性

物理特性			半導体素子特性			
	AlN	比率(市販のGaNとの比較)	素子特性	能力比	用途	分野
発光エネルギー	6.0 eV	1.8倍	物質分解エネルギー(エネルギー比)	1.8倍	ダイオキシンPCBの分解	環境保全装置
発光波長	210 nm	1.8分の1倍	微細加工の最小寸法(波長比)	1.8倍	数10 nmの微細加工	ナノテクノロジー
			高密度化(波長の自乗比)	3倍	DVDなどの記憶装置の大容量化	高度情報技術

待されます。

現在、GaNにより、波長365 nmの発光素子が実用化されています。AlNの発光波長は210 nmとさらに短く、遠紫外域でもっとも短い領域です。

表に示すように、光の波長が短いほど、発光エネルギーが大きくなり、紫外光の有効作用である分解能力も高く

なります。AlNの発光エネルギーはGaNの1.8倍もあり、物質分解エネルギーは1.8倍大きく、AlN発光素子は、近年、社会問題化しているダイオキシン、PCB（ポリ塩化ビフェニル）などの高安定な有害物質分解など環境保全装置への応用が見込まれます。

一方、レンズにより光を集光する際、

スポット径は波長の逆数に比例するため、波長が短くなるほど、より微小な領域に集光できるようになります。AlNの発光波長はGaNの1.8分の1倍短く、スポット径は1.8分の1倍小さくなり、高出力化したAlN半導体レーザーができれば、数10 nmの微細構造加工が可能になります。またスポット面積は、波長の自乗の逆数に比例するため、AlN半導体レーザーができれば、AlNはGaNよりDVDなどの光記憶装置の記憶密度を3倍も大容量化することが可能になります。

しかし、これまで、AlNでは、半導体発光素子の作製に必要な不可欠なn型、p型ドーピング^{*3}ができなかったため、AlNの発光素子は実現していませんでした。

高純度AlN結晶の作製

NTT物性科学基礎研究所は、AlNでドーピングできなかった原因は、高純度のAlN結晶が得られなかったため、つまり、結晶欠陥や不純物が多く混入するといった結晶成長上の問題にあることをつきとめました。

理想的には、図1に示したように、AlNの結晶中ではアルミニウム（Al）原子と窒素（N）原子が交互に規則正しく並んでいます。しかし、結晶成

*3 n型、p型ドーピング：半導体に、微量の不純物を添加（ドーピング）することで、その電気的性質を変えることができます。マイナスの電荷を持った電子が多くなるようにドーピングする場合をn型ドーピングと呼び、プラスの電荷を持った正孔が多くなるようにドーピングする場合をp型ドーピングと呼びます。

長に問題があると、本来あるべき原子が抜けて穴になった結晶欠陥や、酸素原子など不純物原子が混入しやすくなります。結晶欠陥や不純物があると、n型、p型ドーピングを試みても、それらがいったん生成した電子や正孔を捕らえてしまうため、n型、p型にはなりません。

図3に示すように、AlNにおいて、結晶欠陥や不純物が混入しやすい問題は、他の半導体に比べて、構成原子であるAlとNの結合力が強すぎるために生じます。結合力が強いので、AlとNは、AlN結晶成長中に、結晶成長表面に到達する前に、副次的な反応を起こしやすくなります。さらに、成長温度は1000℃程度と低かったため、結晶成長表面に到達したAlとNは、結晶表面を十分に移動できず、結晶成長表面で規則正しく取り込まれにくくなります。

そこで、NTT物性科学基礎研究所は、高純度AlNを作製するため、AlとN原料ガスの供給流速の増加により副次的反応を抑制する技術の開発、1200℃という高温での結晶成長に耐える装置の改良を行いました。この結果、AlN中の結晶欠陥と不純物密度をそれぞれ従来の10分の1以下に低減させ、世界最高品質の結晶成長技術を確立することに成功しました。

n型、p型ドーピング技術

高純度結晶成長技術をベースにして、AlNのn型、p型ドーピング技術を開発しました。

n型AlNの作製は、図4に示すよう

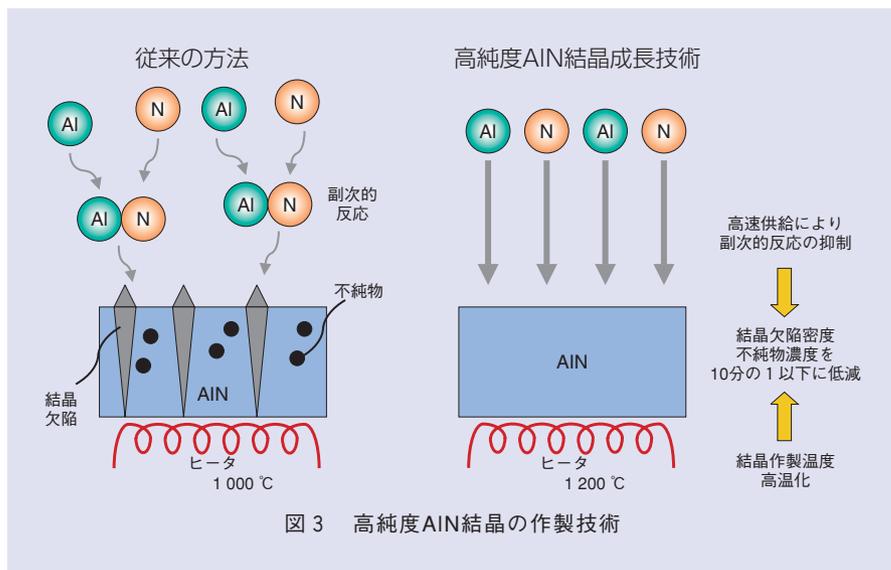


図3 高純度AlN結晶の作製技術

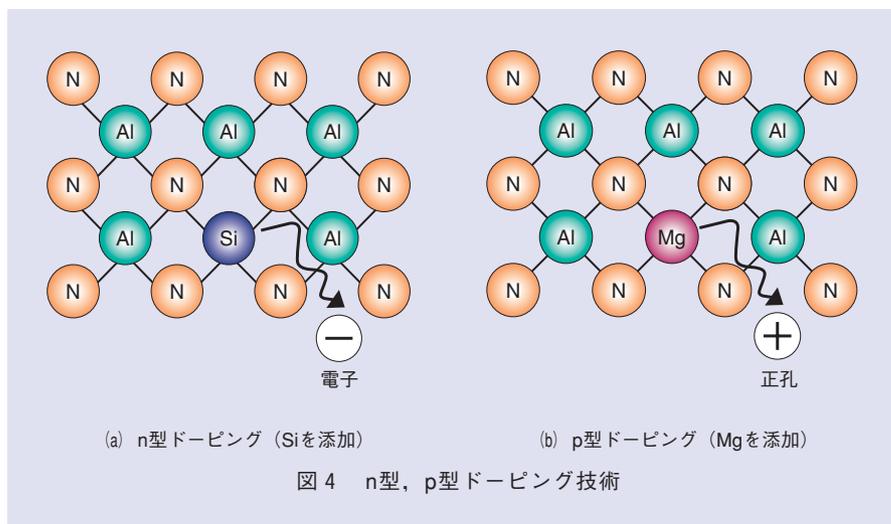


図4 n型、p型ドーピング技術

に、AlNに微量のシリコン (Si) をドーピングすることにより成功しました。Ⅲ族元素のAlを、Ⅳ族元素のSiで置換することにより、Siから電子が放出されるため、AlNはn型になります。また従来の欠陥の多い場合と比較して、電子の移動度は数百倍も高くなり、AlNの品質が向上したことを確認

しました。

一方、p型AlNの作製は、AlNに微量のマグネシウム (Mg) をドーピングすることにより成功しました。Ⅲ族元素のAlをⅡ族元素のMgで置換することにより、Mgから正孔が放出されるため、AlNはp型になります。

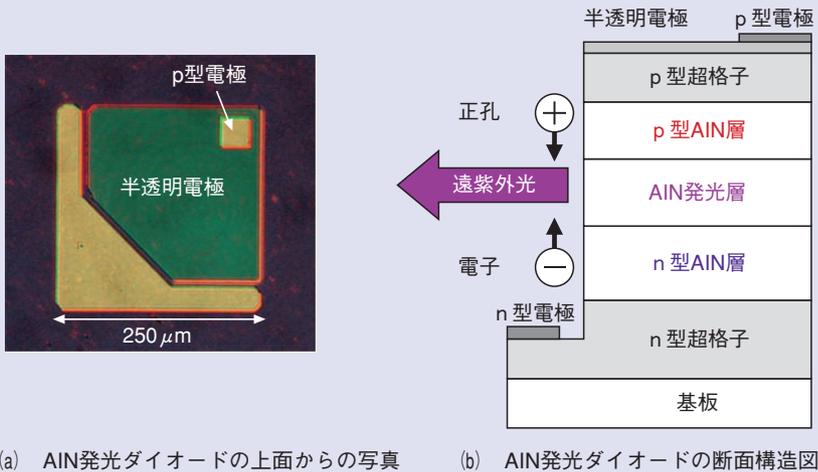


図5 AlN遠紫外発光ダイオード

“Aluminum Nitride Deep-ultraviolet Light-emitting Diodes,” NTT Technical Review, Vol. 4, No. 12, pp.54-58, Dec. 2006.

- (3) “波長210 nmの紫外LED「絶縁体」のAlNで実現,” 日経エレクトロニクス6月19日号, p.30, 2006.

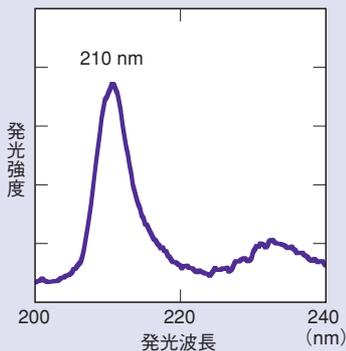


図6 世界最短波長210 nmの遠紫外発光

に供給し、そこで電子と正孔を結合させて光に変換する原理で動作します。

発光ダイオードに電圧を印加したところ、図6に示すように、波長210 nmの遠紫外光を観測することに成功しました。これは、理論的に予測されているように、これまでの半導体の中でもっとも短い波長です。

今後の展開

理論上で最短波長発光可能と予測されていたAlNで発光ダイオードを実現し、半導体発光素子の遠紫外光応用の可能性を示しました。今後、AlN遠紫外発光ダイオードの高効率化と実用化に取り組んでいきます。

参考文献

- (1) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto: “An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres,” Nature, Vol.441, p.325, 2006.
 (2) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto:



(左から) 嘉数 誠/ 谷保 芳孝/
牧本 俊樹

材料には固有の物性があります。また新しい材料には驚くべき物性が潜んでいるかもしれません。これらを最大限に引き出し、従来にないデバイスを創出するため、ものづくりの原点ともいえる結晶成長技術を駆使しています。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
 機能物質科学研究部
 薄膜材料研究グループ
 TEL 046-240-3497
 FAX 046-240-4729
 E-mail taniyasu@nttbl.jp

AlN遠発光ダイオードの作製

開発したドーピング技術を用いて、図5に示すような、高純度AlN発光層をn型AlNとp型AlNの間に挟みこんだ発光ダイオードを試作しました^{(1),(2)}。

発光ダイオードは、n型AlNから電子を、p型AlNから正孔をAlN発光層