



# イオン注入応用技術について

## Applications of Ion Implantation

安 東 靖 典  
Andoh Yasunori

### 概要

イオン注入技術が産業界で使用され始めてほぼ70年になる。その技術はほとんどが半導体への応用ではあるが、近年のナノサイズの集積回路の世界では、技術の対応が難しくなっている。本稿では、他の分野であるパワー半導体とフラットパネルディスプレイにおける最近の動向とイオン注入技術への期待について記す。

### Synopsis

It has been almost 70 years since ion implantation technology was used in the industrial world. Most of the technology is applied to semiconductors, but in the world of nano-sized integrated circuits in recent years, it is difficult to deal with the technology. This paper describes recent trends in other fields of power semiconductors and flat panel displays and expectations for ion implantation technology.

## ■ 1. はじめに

半導体への不純物イオンの注入技術の研究は、1950年頃に始まった。最初の点接触型のトランジスタ動作が確認されたのが1947年末であったことから、随分早い時期に新たな技術が検討され始めたことになる。

イオン注入技術の本格的な研究開発は1960年代前半となるが、1970年代に入って生産技術として確立し、製品への適用が始まった。その後、中電流イオン注入装置や大電流イオン注入装置など、目的に応じた量産用イオン注入装置の開発も進み、1980年代に入って一気に適用製品の市場が拡大した。当社のイオン注入装置は1973年に開発を着手しており、市場の立ち上がり初期から技術を蓄積してきた。

また、当社のFPD (Flat Panel Display) 用のイオン注入装置は、1970年代後半の(財)日本原子力研究所(現、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構)の核融合実験施設の電源ビジネスをとおして大型イオン源へ関わったことに始まる。1980年代後半のイオン注入技術の応用分野探索と基板の大型化を目指すFPD分野の方向が一致し、当社は、FPD分野の黎明期から市場と密接な関係を保ちつつ、装置技術開発並びに事業

を展開してきた。

始まりは異なるものの、両事業はイオン注入装置開発の早期着手という点で、アグレッシブで、粘り強い取組みが現在の技術の蓄積につながっている。

本稿では、イオン注入技術の応用と今後の展開について紹介する。なお、装置技術については本誌掲載の「イオン注入装置の変遷と今後について」を参照されたい。

## ■ 2. イオン注入技術について

イオン注入技術では、数百eVから数MeV(熱エネルギーは0.1eV程度)の広い範囲の大きなエネルギーを持つイオンを扱う。そのような高いエネルギーで固体表面に衝突したイオンは、固体内の構成原子と衝突を繰り返しつつエネルギーを少しずつ失い、やがて固体内に留まる。そのため、固体を高温加熱し、添加したい不純物元素を表面から内部へ拡散させる熱拡散技術では難しい元素でもイオン化することで添加が可能であり、質量分離により特定のイオン種だけを、さらに、特定の同位体を添加することも可能である。また、イオン注入技術を使用すれば、固溶度以上の添加

も可能である。

固体内での注入イオンの分布は、固体内部にピークを持つ正規分布様となり、分布のピーク位置と標準偏差はイオン種とイオンエネルギー、および、固体を構成する元素と密度により決まる。また、注入中のイオンの個数は、固体に流れる電流計測によって同時計測することが可能であるため、注入量は高い制御性をもつ。つまり、イオン注入技術は、必要な場所に必要な数の不純物添加が可能で、素子の構造設計が容易となる技術である。

一方、イオンを注入することにより、固体内では衝突過程で原子は弾き飛ばされ、欠陥が発生する。そのため、多くの場合、元の材料性能の低下、特性の不安定化など、特性不具合が生じるため、熱処理等による欠陥修復が必要となる。この修復の成功率合いによってイオン注入技術の適用可否が決定される。

半導体の場合、少量の不純物添加で特性変化が十分図れるため、イオン注入技術は製品にうまく適応した。他方で、1980年代に盛んに検討された表面処理分野では、耐食性<sup>(1,2,3)</sup>や耐摩耗性<sup>(4,5)</sup>の性能向上などで技術上の有効性が確認されたが、必要な添加量が多く、注入時の加熱が著しいこと、また、対象の面積が広く、あるいは複雑な形状への対応を必要とされたことなどにより、商業的には見合わなかった。そのため、現在ではこれらの分野では、イオン注入技術ではなく、プラズマを直接使う技術が主流となっている。

### 3. 半導体について

#### 3. 1 ワイドバンドギャップ半導体とパワー半導体

ワイドバンドギャップ半導体、あるいはウルトラワイドバンドギャップ半導体と称される材料について、表1に示す。

表1 各種のワイドバンドギャップ半導体と主な特性値<sup>(9,10,11)</sup>

	バンドギャップ E <sub>g</sub> [eV]	電子移動度 μ <sub>e</sub> [cm <sup>2</sup> /Vs]	破壊電界強度 E <sub>c</sub> [x10 <sup>6</sup> V/cm]
Si	1.1	1350	0.3
4H-SiC	3.3	720/650* 1000	2-2.5
GaN	3.4	900-1200	3.3
β-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.5-4.8	200-300	7以上
AlN	6.2	1100	11.7
ダイヤモンド	5.47	1900	5.6 10

※) 結晶軸方向による

高耐電圧材料の重要な要素の一つとしてイオン化係数 $\alpha$ がある<sup>(6)</sup>。電圧印加による電界で加速されたキャリア（電子、正孔）が固体内原子と衝突し、キャリアが著しく増殖した場合、素子の破壊に繋がる。 $\alpha$ に関してBaraffにより導出された次式<sup>(7)</sup>のパ

ラメータ（Vi：構成原子の電離エネルギー）は、バンドギャップ（E<sub>g</sub>）の2/3<sup>(8)</sup>によく一致することが知られている。

$$\alpha = \frac{C}{\lambda} \exp\left\{-\frac{3h\nu_{opt}V_i}{(eE\lambda)^2}\right\}$$

このことから、バンドギャップの大きな半導体材料では、小さなイオン化係数が期待できることが分かる。したがって、高耐電圧材料として期待できることになる。表1は、この傾向を確認することができる。

また、バンドギャップの大きな材料では、価電子帯から伝導帯への熱的な遷移確率が低下するため、高温条件下での耐性も高くなる。これらの材料で構成された半導体は、高耐電圧、高耐熱性の特性を持つため、パワー半導体と呼ばれている。

#### 3. 2 SiCとGaNとイオン注入

表1の材料のうち、SiC（炭化ケイ素）およびGaN（窒化ガリウム）は、当初の見込みより市場の立ち上がりが遅れたが、現在では製品化が始まり、市場の拡大がみられる。

先行するこれらの材料については、電気自動車、電車、電力系統、5G基地局、パーソナルコンピュータ、など様々なところで使用され始めており、2030年には21年比で共に約10倍<sup>(12)</sup>の需要拡大が予測されている。特にGaNは高周波特性の点でも優れた性能を持つことから、電力用以外に5G基地局用やセンサー用にも期待されている（図1）。

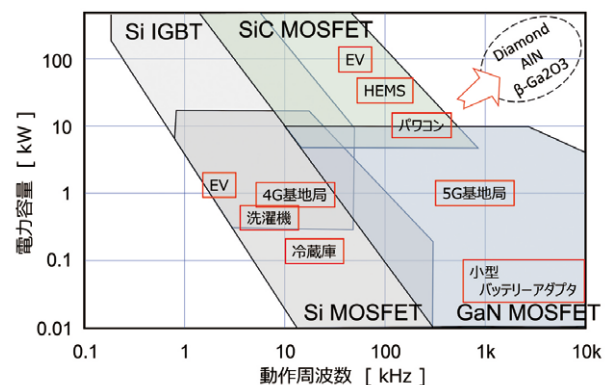


図1 ワイドバンドギャップ半導体の適用範囲と新材料<sup>(13)</sup>

いずれの材料でも素子の構造設計の点で、必要な場所に必要な元素を精度よく添加できるイオン注入技術は必須である。

SiCの場合、Al（アルミニウム）あるいはN（窒素）を添加することで、それぞれp型/n型半導体となることが、学会などで報告され、周知されている。

イオン注入による不純物元素の添加後、1000℃を

超える熱処理がおこなわれる。SiC中のAlの拡散係数は、同じⅢ族元素のB（ホウ素）と比べて2桁程度小さいため、高温処理でも分布の変化がほぼなく、素子の構造設計にはAlの添加が適している。

イオン注入されたAlは、高温熱処理によりSiC結晶内の必要な位置に置換するものの、残留欠陥が多く、素子特性を著しく低下させることが知られている。これを500℃程度に加熱しながらのイオン注入（高温注入）と高温熱処理を組み合わせることで、残留欠陥を大幅に低下できることが分かり、実用的なプロセスの完成に至っている。

従来のSi（シリコン）半導体プロセスでは、注入時の温度上昇で注入領域の多結晶化が進むと、その後の熱処理による結晶性回復が阻害されることや微細加工技術への影響等から、ウェーハ保持部の冷却性能向上が積極的に開発されてきた。これに対して、パワー半導体の場合には高温注入が重要な技術となるため、従来のイオン注入装置技術に、Alなどの金属イオンの高温注入という新たな要素を付加したイオン注入装置の市場ニーズが期待できる。

もう一方のGaNは、光デバイスで脚光を浴びた材料で、2014年のノーベル賞受賞に繋がった材料である。光デバイスでは、結晶成長の過程でMg（マグネシウム）/Siをそれぞれ添加することでp型/n型制御が行われるが、Mgイオン注入の場合には、p型制御は困難な状態であることが続いている。

これは、GaNへのMgイオン注入でも1200℃以上の高温熱処理を行い、注入欠陥が修復されることが確認<sup>(14)</sup>されているものの、熱処理時に結晶を構成するNが脱離し、注入Mgでのp型化ではなく、N欠損でのn型化が型を支配するためである。また、注入されたMgが凝集することも確認されている。Nの脱離防止に封止層の検討も行われているが、封止層自体の熱分解で期待される改善は得られていない。

その中で、2019年に名古屋大学から、1万気圧のN<sub>2</sub>雰囲気中で高温熱処理を行うことで、Mg注入層のp型化成功の画期的な発表<sup>(15)</sup>があった。続く2020年には、1000℃に加熱しながらMgイオンを注入<sup>(16,30)</sup>、さらに、MgとNの連続イオン注入<sup>(17,31)</sup>と、それぞれ高圧高温熱処理との組み合わせが有効であることが報告されている。

このように、GaNへのMgイオン注入の活性化の点で、大きな成果が出始めたが、プロセス技術および装置技術への要求は厳しく、一層の技術革新が必要な状況である。

### 3. 3 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（酸化ガリウム）とAlNとイオン注入 先行する2つの材料に続いて、さらに優れた材料

としてGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（酸化ガリウム）が注目されている。この材料には、5つの結晶構造が知られているが、β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と称される材料が最も安定<sup>(18)</sup>であることから、デバイス開発の主対象となっている。既に、ベンチャー企業からウェーハの出荷が始まっており、さらに、ショットキーダイオードの開発に成功した事例が発表されている。

2018年には、『世界で初めてイオン注入を用いたトランジスタ作製と動作確認』<sup>(19,20)</sup>が発表された。図2は、その際のβ-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用いたトランジスタ構造で、パワー半導体用の縦構造を持ち、①電極とのコンタクト抵抗を下げるための高濃度注入のコンタクト層：n<sup>++</sup>型（高濃度に不純物添加されたn型）、②チャネル領域：n型、③ブロッキング領域：p型、の3領域へのイオン注入が行われている。p型/n型には、それぞれN/Siが注入されている。

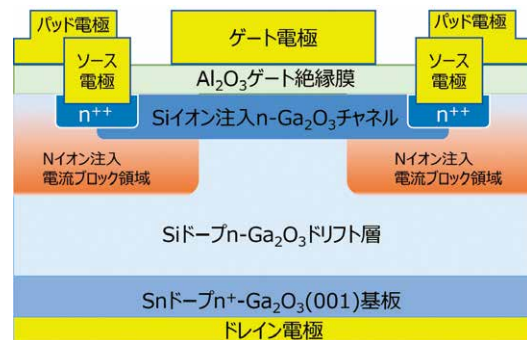


図2 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とイオン注入を用いたトランジスタ構造<sup>(19)</sup>  
(画像提供: 情報通信研究機構 (NICT))

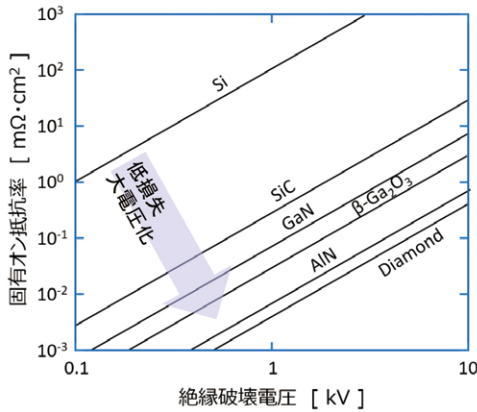
前述のとおり、酸化物半導体のp型制御は根本的な難しさがあり、β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の場合もNイオン注入によるp型化は十分な成果が得られていない。本事例では、ブロック領域が高いエネルギー障壁の形成<sup>(9)</sup>に繋がっている旨、記載されている。

さらに、2022年には、同様の縦型構造にイオン注入を用いて、高いしきい値電圧で高移動度の素子が発表されている<sup>(32)</sup>。

p型層形成に課題<sup>(9)</sup>をもつものの、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はSiCやGaNを大きく上回る耐電圧特性と低い導通損失の可能性を持つ<sup>(9)</sup>ことから、市場から期待される材料であり、2030年予測ではGaN以上の市場規模に急速に拡大するとされている<sup>(12)</sup>。これらの課題解決には、p型形成のための不純物探索や後処理プロセス以外に、後記の傾斜材料のように多元系材料へのイオン注入改質の視点も必要ではないかと考える。

さらに、ウルトラワイドバンドギャップ半導体として、AlN（窒化アルミニウム）、ダイヤモンドが続くものと考えられている。図3に、表1の材料について





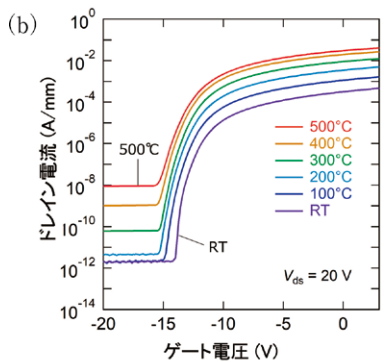
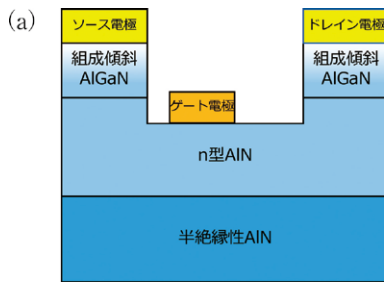
(引用元: <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/22/220422a.html>)

図3 各種のワイドバンドギャップ半導体の絶縁破壊電圧vs固有オン抵抗率<sup>(11)</sup>

の絶縁破壊電圧と素子のオン抵抗率の関係を示す。

AlNについては、既に良質な絶縁性セラミックス材料として広く使用されているが、広いバンドギャップを持ち、大きな絶縁破壊電界からパワーデバイス用としても注目されるようになってきた。GaNと同様にSi添加でn型、Mg添加でp型が得られるものとされているが、各元素がつくる不純物準位の活性化エネルギーが大きく、室温で適当な導電性能を得ることが難しいとされていた。

しかし、AlNトランジスタについても、2022年4月にエピタキシャル成長とエッチングで作製された図4 (a) の構造<sup>(11)</sup>の素子で、図4 (b) の500℃の高温環境で良好なトランジスタ動作が確認できたことが報告され、パワーデバイス用途の可能性が示された。



(引用元: <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/04/22/220422a.html>)

図4 (a) AlN-FETの構造 (b) スイッチング特性<sup>(11)</sup>

報告では、半導体層と電極の間に厚み方向に組成を変化させたAlGaNを用いてオーミック接触を実現している。イオン注入による低抵抗化の実現とデバイスの動作確認は今後の大きな期待である。

## 4. ディスプレイへの適用

### 4.1 有機ELテレビと酸化物半導体

LCD (Liquid Crystal Display: 液晶ディスプレイ) テレビに続いて市場に出てきたのがOLED (Organic Light-Emitting Diode: 有機EL) テレビである。LCDが各画素の液晶分子をシャッターのように開閉し、表示する色以外の背面光を遮光させて画像を作成するのに対して、OLEDは各画素有機発光素子で作り、画素を光らせて画像を作成する方式である。LCDは電圧駆動のためa-Si:H TFT (水素化非晶質シリコン Thin-Film Transistor、移動度 $\mu$ は $1\text{cm}^2/\text{Vs}$ 未満) が使用されたが、電流駆動のOLEDでは、移動度が大きく、大きな電流を制御することができるOxideTFT (酸化物半導体TFT、 $\mu$ は約 $10\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) が使用されている。中小型パネルでは、既にLTPS TFT (Low Temperature Poly-Silicon: 低温ポリシリコン TFT、 $\mu$ は $70\text{cm}^2/\text{Vs}$ 超) が採用されていたが、製造装置技術とプロセスコストの点で基板の大型化が困難であったためである。

OLEDで使用される酸化物半導体の代表的な材料としてIGZO (構成元素Indium、Gallium、Zinc、Oxygenの頭文字) がある。IGZOは金属層 (電極) とのオーミック接触が容易に得られるため、従来の半導体のように半導体層と金属層との間にコンタクト層を入れる工程が不要となり、非常に簡便なプロセスで広い基板上有機ELを発光させるに足るTFTアレイを作製することが可能である。

また、IGZOの優れた特徴は、TFTのオフ電流が非常に小さいことで、LTPS TFTのオフ電流が一般的に $10^{-12}\text{A}/\mu\text{m}$ 程度であるのに対して、IGZOでは $10^{-22}\text{A}/\mu\text{m}$ と極めて小さい値が報告されている<sup>(22)</sup>。

図5にOLEDを駆動するための、基本的な回路を示す。

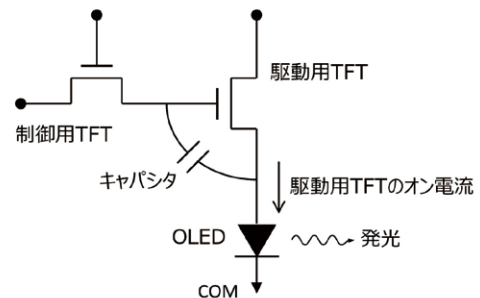


図5 OLEDの駆動回路

OLEDの駆動用TFTにIGZO TFTを用いることで、このTFTがオフ状態なら通電電流が限りなく「ゼロ」となり、画素は光らないため極めて黒に近い色を実現することができる。

なお、このオフ状態なら通電電流が限りなく「ゼロ」となる特性は、電荷を溜めて情報を記録する半導体メモリの蓄積電荷のリークを抑えることに繋がり、情報保持のための書き込みの繰り返しを大幅に低減できる可能性をもつことから、半導体分野でも開発が進められている。どちらの場合も大幅な消費電力低減が期待される。

ところで、IGZO膜の膜抵抗は膜中酸素量で大きく変化することが知られており、基板上での比抵抗の均一な成膜が極めて困難で、TFT特性のバラツキ発生に繋がる。この問題の解決方法として、当社関係会社である日新イオン機器株式会社から、ガラス基板上のIGZO膜にイオン注入することで、膜抵抗の均一性を±91%から±6.6%に大きく改善<sup>(23)</sup>できることが示された。これは、例えば約2,500万個のサブピクセルから成る4Kテレビの場合、同数のTFTが配置されているが、これらのTFT特性の均一化に繋がるプロセスをイオン注入技術は提供することができることを示している。

また、プラズマ処理での低抵抗領域の作成は半導体層の表面に対しておこなうため、環境の影響を受けやすく不安定であるのに対し、イオン注入技術は低抵抗領域を内部に作成できるため、環境からの影響を回避して熱安定性の高い低抵抗層を可能にする<sup>(24)</sup>優れた技術である。

さらに、Siプロセスでは周知であるセルフアライン (Self-Align : 自己整合) 技術であるが、IGZO TFTでも重要な技術と認識されるようになってきた。図6に示すトップゲート型TFTのように、ゲート (G) 電極をマスクに、上からイオン注入することにより、G電極端とその両側のソース (S) / ドレイン (D) の端部の位置を精度よく作成することができ、基板面内の全てのTFTのS-G間およびD-G間容量を一様化させることが可能となる。

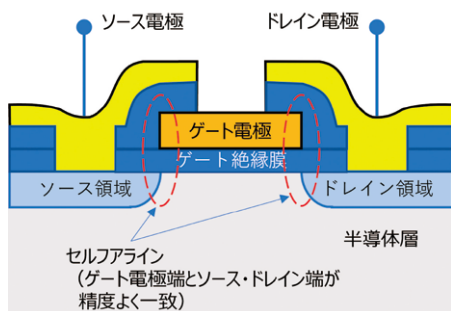


図6 トップゲート型TFTとセルフアライン構造の概念図

OxideTFTの登場で、簡便なプロセスでOLEDテレビに使用できるTFTを作れるなど、大きな利益を提供されたが、これにイオン注入技術を適用することで、著しい数のTFTの均質化とそれに伴う特性向上を提供できると確信している。

さらには、イオン注入によるTFTの立ち上がり電圧の均一化が可能になれば、IGZO TFTプロセスの負担軽減と特性の均一性向上が可能になるのではないかと、検討を進めている。

#### 4. 2 μLEDの高精細化

パネルの高品質化が進む中で、GaNを用いたLED (Light-Emitting Diode : 発光ダイオード) を面内に配置した、ミニあるいはマイクロ (μ) と呼ばれるLEDアレイの開発が盛んに行われている。LCDのバックライトがこれまで一括光源であったものに対して、ミニLEDは、分割した領域ごとに光源を配置し輝度制御を行うローカル・ディミング (Local-Dimming : 部分駆動) の光源に採用され始めており、コントラスト向上に大いに活躍している。

2022年のCES (デジタル見本市) では、1.3型で2,560×2,560画素から成る小型パネルを2枚使用したVRグラスが披露された<sup>(25)</sup>。この場合、画素ピッチは9μm、サブピクセルのピッチは3μmと推定できる。画質や臨場感の向上のために、さらなる高精細化が進められた場合には、画素はさら微細化することを求められる。

GaN基板上に作製されたLEDを通常のプラズマエッチングによる小型化を行った場合、文献26によれば、LEDに流れる電流密度が20A/cm<sup>2</sup>の場合、40μmサイズのLEDに比べ、6μmでは半分以下にまで発光効率が低下することが示されている。

これはエッチング時に画素の側面に欠陥を生じることで、発光のための電流に比べてリーク電流が、LEDの小型化によって相対的に大きくなったためと考えられている。

GaNダイオードの素子間にイオン注入を用いた素子分離についての報告<sup>(27,28,29)</sup>によれば、イオン注入による欠陥生成で素子間の領域を不働態化させることによって素子分離が可能となり、発光効率も低下せず、また、素子間の電氣的なクロストークもないことが報告されている (図7)。

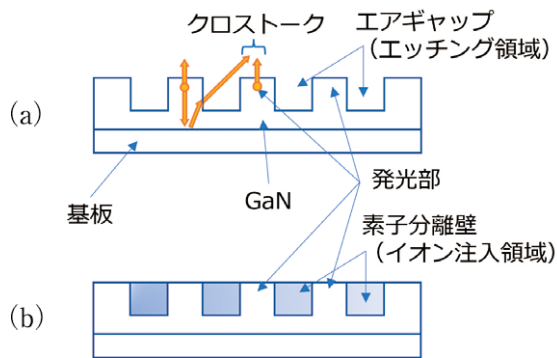


図7 LEDの素子分離構造：  
a) エッチング加工による凹凸構造  
b) イオン注入による平坦構造

エッチングとイオン注入による素子分離については、凹凸構造の有無による光学的な差異が検討されている<sup>(21)</sup>。それによれば、エッチングによる凹凸構造の側面からの射出による光学的なクロストークが起こる可能性がある一方で、平面的な構造を維持するイオン注入の場合には、再射出を抑えうることがシミュレーションで報告されている。

$\mu$ LEDはパネル性能としてたいへん優れているが、小さなLED素子を大量に短時間で並べる移載技術が大きな課題となっている。まずは、イオン注入技術による素子分離を小さなパネルから適用し、研究開発をすすめて、ディスプレイ分野の新たな市場のひとつとなることを期待している。

## 5. まとめ

パワー半導体とディスプレイの分野におけるイオン注入技術の最近の動向と今後の期待について紹介した。

いずれの場合も、イオン注入技術でなければ困難な構造設計への応用であり、イオン注入技術が必須技術であると確信できることと、また、それらが市場での成長が大いに期待できる分野であることがわかり、今後のイオン注入装置市場の新たな成長に大いに期待できるものと考えている。

## 参考文献

- (1) 斎藤一男, Boshoku Gijutsu, 35, 667-668(1986)
- (2) 高橋勝緒, 金属表面技術 Vol.34, No.5 (1983) 198-205
- (3) 岩木正哉, 防食技術, 32, 174-180(1983)
- (4) 伊藤由彦, 伊藤明生, 東博純, 日置辰視: 表面技術, Vol.43, No.12 (1992)1190-1193
- (5) 岩木正哉, 実務表面技術 Vol.334, No.10 (1987) 402-414
- (6) 松田順一, 令和2年度 集積回路設計技術・次世代集積回路工学特論 公開講座『ワイドバンドギャップ半導体 パワーデバイスの基本特性』資料(2020)
- (7) G.A. Baraff, Phys. Rev. 128, 2507 (1962)
- (8) 犬石嘉雄, 電気学会雑誌 9, 779-786 (1974)
- (9) 東脇正高, 応用物理 第90巻 第5号 (2021) 283-289
- (10) 鎌田弘之, 他, 『窒化アルミニウム単結晶』フジクラ技報2008 vol.2 第114号 p42-47
- (11) NTT ニュースリリース 2022.4.22 『世界初、窒化アルミニウムトランジスタを実現～カーボンニュートラルに貢献する次世代パワーデバイスの本命登場』
- (12) 富士経済プレスリリース 第22054号 『パワー半導体の世界市場を調査』2022.5.23
- (13) サンケン電気H/Pから引用に加筆: <https://www.semicon.sanken-ele.co.jp/guide/GaNSiC.html>
- (14) 米村卓巳, 他, Spring-8利用研究成果集 (課題番号: 20112A1405)
- (15) 名古屋大学 プレスリリース 令和元年(2019)5月22日 『イオン注入によるp型GaNの作製に世界で初めて成功 縦型および横型GaN on GaNデバイス試作ライン稼働スタート』
- (16) 高橋 他, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋 (2018), 19p-CE-17
- (17) Hideki Sakurai, et al., 2021 Appl. Phys. Express 14 111001
- (18) 東脇正高, NanotechJapan Bulletin Vol.8, No.2, 2015 企画特集「 $10^{-9}$ INNOVATIONの最先端」<第32回>
- (19) 国立研究開発法人情報通信研究機構「世界初、イオン注入ドーピングを用いた縦型酸化ガリウム( $Ga_2O_3$ )トランジスタ開発に成功」(2018年12月12日)  
<https://www.nict.go.jp/press/2018/12/12-1.html>  
対象の図: 図1 作製した縦型 $Ga_2O_3$ トランジスタ構造の(a)断面模式図

- (20) M.H. Wong, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai and M. Higashiwaki, IEEE Electron Device Letters, 40[3] 431-434 (2019)
- (21) Asim M. Noor Elahi and Jian Xu, AIP Advances 10, 105028 (2020)
- (22) Kiyoshi Kato et al., Jpn.J.Appl.Phys.51 (2012) 021201
- (23) 日新電機技報『1.2 酸化物半導体へのイオン注入技術の開発』Vol.67, No.1(2022.5)
- (24) 安田圭祐、宇井利昌、立道潤一 第68回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 19p-Z33-5
- (25) 日経XTECH 2022.02.10『パナソニックのVRガラス「MeganeX」、画質は「高輝度・鮮明」』  
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01537/00311/>
- (26) Jun Zhu, et al., Phys. Status Solidi A 2019, 1900380
- (27) Yu-Hsuan Hsu, Yi-Hsin Lin, Ray-Hua Horng and Ming-Hsien Wu, Abstract P-06-03 (1-2) in Int' l Display Manufacturing Conference (Taiwan) '22
- (28) Jun Hee Choi, et al., Proc. of SPIE Vol. 12022 1202202 4pp (2022)
- (29) 葛西 駿, 山梨大学大学院 医工農学総合教育部 博士課程学位論文『ワイドバンドギャップ半導体デバイスの高性能化および新規プロセス開発』(2019)
- (30) Takahashi, Masahiro; Tanaka, Atsushi; Ando, Yuto et al., Jpn. J. applied physics, Vo.59, No.5, 056502, 07.05.2020
- (31) Akira Uedono, et al., Scientific Reports 11, Article number:20660(2021)
- (32) 株式会社ノベルクリスタルテクノロジー ニュースリリース 2022.09.20「世界初 酸化ガリウム反転型DI-MOSトランジスタを試作—酸化ガリウムパワートランジスタの開発が大きく前進—」

---

執筆者紹介

---



安東 靖典 Andoh Yasunori  
特別フェロー(工学博士)