

GaN 結晶成長技術の現状と今後

名古屋大学 加地 徹 Kachi Tetsu

未来材料・システム研究所 特任教授
〒464-8601 名古屋市千種区不老町 ☎052-789-5357

はじめに

GaNは、1986年に天野らによってサファイア基板上に高品質単結晶成長が達成された時から開発の歴史が始まった。その技術が基になって白色LEDが実現され、2014年のノーベル賞受賞につながった。彼らが用いた結晶成長法はMOVPE (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy) あるいはMOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Epitaxy) と呼ばれる方法である。GaNは単結晶基板がなかったため、異種基板上への成長が長い間研究されてきたが、なかなか実現できなかった。それが、装置の不具合による偶然の低温成長AlNバッファ¹⁾により達成されたエピソードは有名である。その後、n型、p型のドーピングおよび活性化技術、InGaN成長技術により白色LEDが開発され、世界中に新たな光源が誕生した。一方、レーザの開発も行われたが、異種基板上では結晶品質に課題があり、GaNの自立基板が開発されて初めて実用化された。このようにGaNの応用は光デバイスが中心になって実用化が進められた。電子デバイスの実用化はそれに比べ遅れたが、AlGaIn/GaNヘテロ接合が高い電子濃度の2次元電子ガスを発生することを利用した高周波デバイスが開発されたことにより、GaNを用いた電子デバイスの開発が活発化した。パワーデバイスは、高周波デバイスの構造を利用した横型構造で開発が進み、現在実用化に至っている。一方、大電力用途に適

した縦型GaNパワーデバイスは、高耐圧に耐える品質のGaN基板がなかったことから、横型よりさらに遅れて開発が始まった。そして近年、GaN基板の品質も数kVの高電圧にも耐えるほどに向上し、縦型GaNパワーデバイスの開発も加速されている。

本稿では、パワーデバイスに使われる結晶成長方法を取り上げる。デバイス構造の成長に使われるMOVPE法、そして基板成長に用いられるHVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy)法、そしてさらなる高品質基板を作製するために研究が進んでいるアモノサーマル法およびNaフラックス法について現状と課題を解説する。

MOVPE 法

MOVPE法は、古くからⅢ-V族化合物半導体のエピタキシャル成長方法として使われてきた結晶成長法である。この方法は次のような特徴を持つ。すなわち1)平坦な成長面が得られる、2)数nm以下の膜厚制御が可能である、3)Ⅲ族原子が異なる多元混晶とのヘテロ成長が可能であることにあ

る。ヘテロ成長では、ヘテロ界面の急峻性に優れ、半導体レーザ、あるいは2次元電子ガスを利用したHEMT (High Electron Mobility Transistor) の作製に用いられている。GaNにおいても、GaN基板上あるいはサファイア、SiC、Siなどの異種材料基板上への成長に用いられている。MOVPE装置の基本的な構造を図1に示す。基板結晶の加

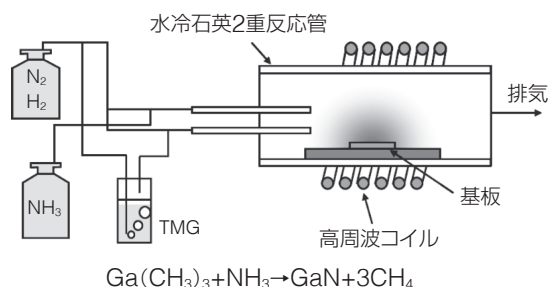


図1 MOVPE装置の概念図

熱は抵抗加熱あるいは高周波加熱で行われるが、反応炉の壁は水冷されるコールドウォール型の反応炉が使われる。GaNの場合、Ga原料として液体のトリメチルガリウム (TMG) が用いられ、キャリアガスである H_2 あるいは N_2 でバブリングして、反応炉に供給される。AlGaNの三元混晶を成長するときにはメチルアルミニウム (TMA) がAl原料として用いられる。N原料はアンモニア (NH_3) が用いられる。

GaNパワーデバイスには横型と縦型の構造が開発されつつあり、横型はすでに実用化が進んでいる。横型GaNパワーデバイスでは、基板として大口径で安価なSi基板が主流となっている。横型はAlGaN/GaNのヘテロ構造が基本構造となるが、異種材料基板への成長ということで、成長には克服すべき多くの課題があった。その原因は、結晶の格子定数の違い、および熱膨張係数の違いであり、それらを克服して室温でそりのない、また結晶欠陥の少ない単結晶を成長する必要があった。我々がSi基板上に成長した成長層の断面TEM像の一例を図2に示す。まず、SiとGaの反応を防ぐためにAlN層を成長し、その上に、格子定数差を緩和し、内部応力を制御するための、組成の異なるAlGaIn層が挿入されている。これらの層を総称して、バッファ層と呼ぶ。最後にGaN層 (あるいはAlGaN/GaN層) が成長される。バッファ層はそれぞれの機能により工夫され、異なる構造のバッファ層が採用されている。さらにパワーデバイスの耐圧を確保するため、高抵抗層 (たとえばCをドーピングした層) も挿入される。これら、最適なバッファ層の考案、デバイス構造の最適化などの工夫により、横型GaNパワーデバイスでは実用化レベルのデバイス作製が可能に

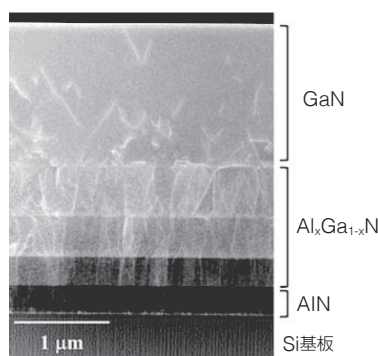


図2 Si基板上GaNの成長層

なっている。

一方、縦型GaNパワーデバイスは実用化が遅れ、まだ開発途上である。その一番の理由は、高品質なGaN基板の開発が遅れていたことにある。しかし、近年GaN基板の品質は後の章で述べるように劇的に向上しており、縦型GaNパワーデバイスの開発は加速している。縦型パワーデバイスではn型とp型の形成が必須である。MOVPE法の成長では光デバイスと同様ドーパントとして、n型にはSi (原料は SiH_4 または SiH_3CH_3) が用いられ、p型にはMg [原料は Cp_2Mg (Bis-cyclopentadienyl magnesium)] が用いられる。しかし、縦型パワーデバイスの成長では、それらのドーピング濃度は光デバイスに比べ、約2桁低い濃度が要求される。

そのため、光デバイス用に開発されたMOVPE装置では対応できず、原料供給系を、低濃度制御が可能な供給系に改良する必要があった²⁾。これらの改良を加えることで、図3に示すように必要な広範囲の濃度のドーピング制御が可能になっている。

しかし、一方でMOVPEの限界も明らかになっ

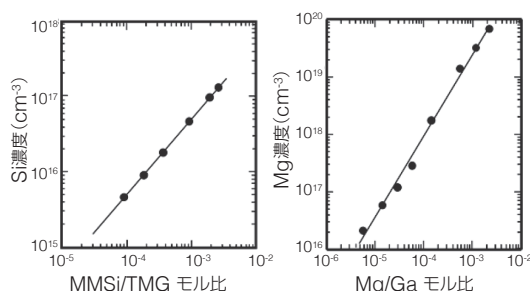


図3 n型(Si)、p型(Mg)ドーパントの濃度制御

てきた。MOVPE法では原料に有機金属化合物を用いるため、成長層にC(炭素)が原料から混入することは避けられず、よく管理された成長装置、成長条件で $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 程度のCが混入する。GaN中のCはNサイトに入り、n型キャリアの補償中心として働く。高耐圧パワーデバイス($\geq 1.2 \text{kV}$)のドリフト層では同じ 10^{15}cm^{-3} 台のn型キャリア濃度を制御する必要があるが、混入したCによりキャリアが補償されてしまうのでMOVPE法の適用が困難になる。また、耐圧を保持するドリフト層厚も $10 \mu\text{m}$ 以上が必要となるため、MOVPE法の成長速度($2 \sim 5 \mu\text{m/h}$)では効率が悪く、量産においては、より成長速度の速い成長法が求められる。これらの課題に対する有望な候補が次に述べるHVPE法である。



HVPE法はGa原料として金属Gaを用い、HClを流してGaClを形成させ基板に導き、 NH_3 と反応させGaNを成長する。HVPE装置の概念図を図4に示す。一般に反応炉は石英管を用いたホットウォール型の反応炉が用いられ、GaClを形成するゾーン1とGaNを成長するゾーン2の温度帯を有している。

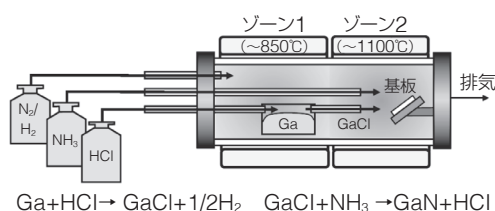
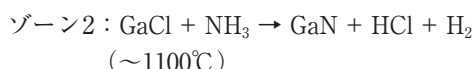
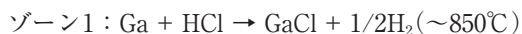


図4 HVPE装置の概念図

反応式で書くと下記の通りである。



また副反応として



があり、 NH_4Cl は反応炉の排気側に大量に堆積する。そのため、長時間の連続運転のためには、排気側が詰まらないような工夫が必要である。

HVPE法の特徴は、成長速度が速い($> 100 \mu\text{m/h}$)こと、常圧で成長するため大型化が容易である点にある。そのためGaN基板の作製に広く使われている。しかし、エピタキシャル成長装置であるため、下地基板が必要で、多くの場合サファイア基板上にGaNをMOVPE法でエピタキシャル成長したテンプレートが使われる。たとえば、VAS法(Void-Assisted Separation)と呼ばれる基板作製法は図5の工程で行われる³⁾。まず、サファイア基板上にMOVPE法でGaNを成長する。その上にTiを堆積して加熱処理を行う。その結果、TiがGaと反応して表面に網目上のTiNが形成される。その上にHVPE法を用いて数mmの厚膜のGaNを成長する。成長後温度を室温に戻す過程でサファイアとGaNの熱膨張係数差により厚膜GaNが自動的に剥離される。剥離した厚膜GaNをスライスし研磨してGaN基板が完成する。現在市販のGaN基板はほとんどがHVPE法を用いて作製されている。しかし、この方法では異種基板上の成長であるため、格子定数のミスマッチによる転位の導入が避けられず、近年改良されているが 10^6cm^{-2} 程度の貫通転位が含まれている。この転位密度は、半導体レーザなどの応用には許容されるが、縦型GaNパワーデバイスへの適用ではさらなる転位密度の低減が求められている。そのため、後に述べるアモノサーマル法、あるいはNaフラックス法との組み合わせが検討されている。

また先に述べたように、HVPE法はパワーデバイス用のエピタキシャル成長装置としても有望視されている。成長速度が高いため、縦型デバイスに必要な厚さ $10 \sim 20 \mu\text{m}$ の成長は短時間で可能である。また、原料にC化合物が含まれないため、基本的にCフリーの成長で不純物としてCを含まない特徴を持つ。また、従来Siの低濃度の制御は