



丸文研究奨励賞 受賞者

今西 正幸  
大阪大学 大学院工学研究科 准教授

結晶成長モード制御により  
複数の微小結晶を合一化した  
大口徑・高品質Ga<sub>N</sub>結晶成長

Ga-Na融液の濡れ性の結晶面方位依存性を活用した選択的結晶成長技術の開発

研究の背景

GaN系窒化物半導体は、ワイドバンドギャップに由来する優れた光・電子特性を活かし、LEDやBlu-ray用レーザーダイオードに利用されている。近年はSiやSiC基板上へのヘテロエピタキシャル成長に基づく横型トランジスタが高周波・小電力変換分野で実用化され、電力の低損失化に寄与している。次段階として、我々は高電力変換用パワーデバイスである縦型GaNトランジスタの実用化を目指している。実用化のためには、6インチ以上・低欠陥・低歪みのGaN基板が求められるが、市販基板は依然として2インチ~4インチが主流であり、結晶欠陥である転位の密度が $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$ と高く、素子のリーク電流の増大や歩留まりの低下が見られている。現在主流のハイドライド気相成長(HVPE)法はサ

ファイア等の異種基板上にGaN結晶を高速で成長させる手法であり(図1)、熱膨張係数差に起因する湾曲・クラックの発生のため、高品質化と大口徑化の両立が困難であった。一方、我々はNaフラックス法という液相成長法を利用してGaN結晶の高品質化に取り組んでいた。液相成長法特有の転位減少効果が見られるものの、種結晶として上述のHVPE製のGaN/サファイアや湾曲したGaN結晶を用いていたため、低歪化及び大口徑化が困難であった。

研究の成果

我々は、図2(a)のようにサファイア上に配置した複数の微小種結晶(ポイントシード)から成長させ、合体により大口徑化するマルチポイントシード(MPS)法を提案した[1]。サファイアとの接触面積を極小化すること

で、冷却時にGaNが自然剥離し、クラックのない低歪みの結晶を得られるのが特徴である。本手法により4インチ口径の結晶化に成功した[図2(b)]。低品質の種結晶の面積が制限されることから、転位密度も $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 台まで減少していたことに加え、曲率半径が100 mを超える低歪みのGaN結晶が得られていた。さらに合体部での転位発生を懸念して結晶方位を最適化した結果、a軸方位での合体が転位抑制に有効であることを示した[2]。

一方で、MPS法で得られる結晶の表面は、c面だけでなく様々な傾斜面で構成され凹凸が大きく、格子定数が不均一となることが問題であった。放射光施設SPring-8での精密測定の結果、傾斜面である{10-11}面に酸素不純物が高い濃度で取り込まれ、格子定数の拡大と黒色化を招くことを明らかにした[3]。酸素の主因は坩堝材 $\text{Al}_2\text{O}_3$ からの溶出であり、耐食性と実用性を兼ね備える代替材が乏しいため、単純な材料置換では解決が難しい。一方、c面では酸素取り込みが抑制され、格子定数は理論値に近い。したがって、格子定数の拡大抑制と均一化のため、結晶表面の平坦化(c面化)を目指すことにした。c面は融液中窒素濃度が高い条件で出現しやすいとされるが、圧

図1 現在主流のHVPE法によるGaN基板作製(結晶成長)手法の模式図

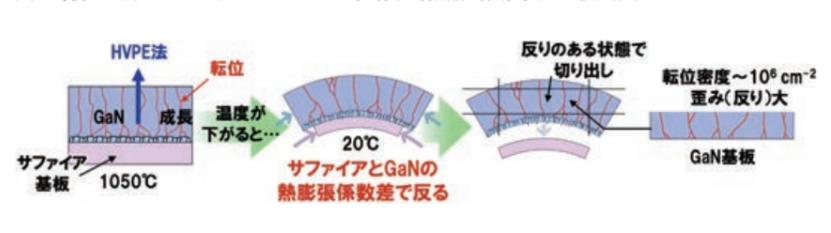


図2 (a) Naフラックス法及びMPS法の模式図と(b) MPS法で得られたGaN結晶像

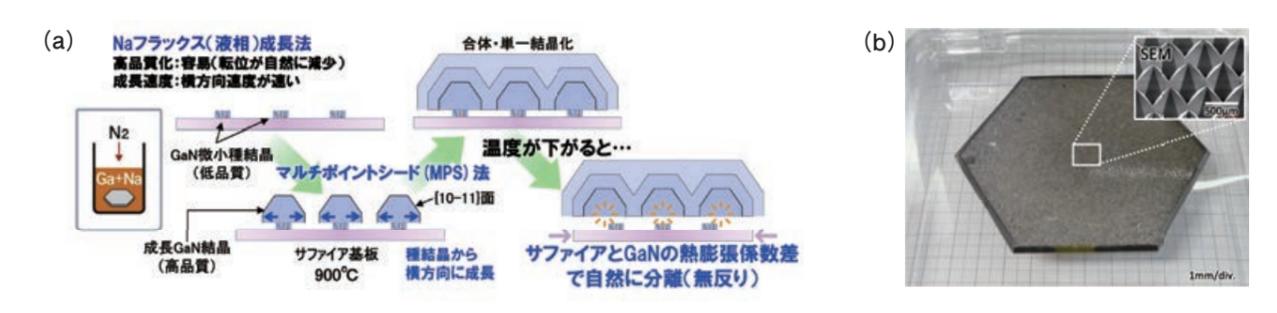
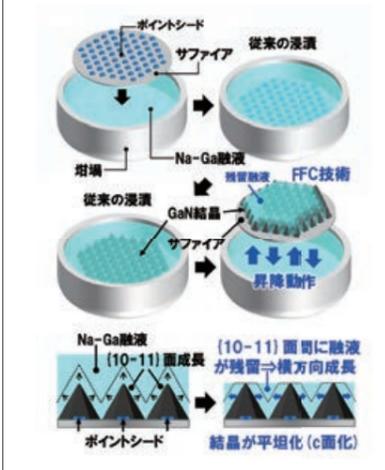
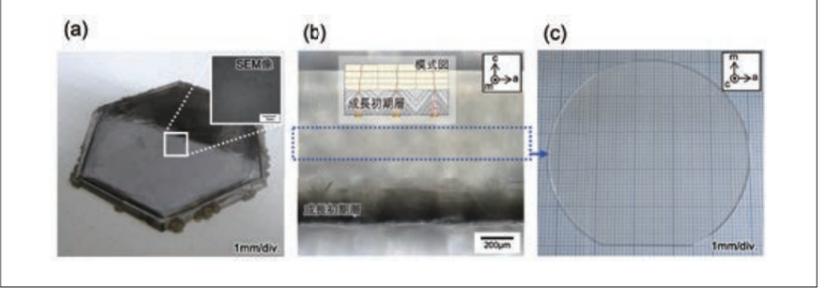


図3 FFC技術による結晶表面平坦化(c面化)の模式図



力や温度など通常のパラメータ最適化では{10-11}面の顕在化を抑えられず、根本的な方針転換が必要であった。別のアプローチとして融液攪拌を試行する中で、結晶が一時的に融液から露出した場合に限り、表面がc面化する現象を偶然発見した。これは、攪拌により融液中の窒素濃度が増大した効果ではなく、結晶が融液から露出した際に、Ga-Na融液層(薄液)が結晶表面の凹部にのみ形成され、凹部を埋めるような成長が生じたためであると考えた。この知見を基に図3に示すような、成長中に意図的に結晶を融液から引き上げ、残留薄液を活用して結晶成長を行うFlux-Film-Coated (FFC) 技術を新規に開発した[4]。融液は、濡れ性の低いc面には保持されず、濡れの高い{10-11}面で構成された凹部に選択的に保持されるため、横方向成長のみが生じ、表面平坦化が促進される。一方で融液量が少なく、結晶成長時のGa原料消費により枯渇が早くなるという制約を持つが、周期的に坩堝へ再浸漬してGa原料を補給する昇降サイクルを確立することで、安定的な成長継続を可能にした。表面がc面化した後は、残留融液が形成されないため、再び融液中での成長を行っている。FFC技術により、図4(a)に示すように表面がc面のみで構成された平坦GaN結晶を得ることに成功した。結晶の成長初期層には{10-11}面が存在するため、酸素取り込みに起因する黒色化が見られる[図4(b)]。一方で、FFCによる平坦化以降は酸素混入が抑制されており、当該領域から切り出したGaN結晶

図4 FFC技術により得られた(a) Ga<sub>N</sub>結晶像及び表面SEM像、(b) 断面像と(c) 初期層除去後の結晶像



は高い透明性を示している[図4(c)]。SPring-8にて格子定数を測定したところ、拡大やばらつきは見られず、均一性が高いことを確認した。本技術の豊田合成社への移管も進めており、6インチを超える直径161 mmのGaNの作製に成功した(図5)[5]。近年では、バルクGaN結晶の作製を目指し、FFC技術で得られたGaN結晶を種結晶とし、成長速度の速いHVPE法による厚膜成長にも取り組んでいる[6]。デバイスの動作検証もパナソニック社と共同で進めており、FFC技術で得られた基板上に縦型GaNトランジスタを試作し、オン動作で3 Aの大電流駆動、オフ動作で600 V級の耐圧を確認した[5]。

将来の展望

現在では、GaN基板の更なる大型化を目指し、口径10インチのポイントシード基板を開発し、8インチ口径のGaN結晶作製に取り組んでいる。現状転位密度が $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 程度に留まっており、更なる低転位密度化技術の開発に取り組んでいる。GaN基板量産に向け、Naフラックス法で作製したGaN結晶を種結晶とし、上述のHVPE法に加え、OVPE法やアモノサーマル法等様々なバルクGaN結晶成長技術との組み合わせも試みている。本研究のGaN結晶成長技術は、大口徑化・高品質GaN基板量産技術の確立に繋がり、縦型GaNパワーデバイスの低コスト・高信頼化と社会実装を後押しする技術基盤となるものと期待される。

謝辞

本研究は、大阪大学・森勇介教授および森研究室のメンバー、沢井瑛昌氏、ならびに共同研究者の先生方・企業の皆様のご支援ご協力の下行われました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

References (参考文献)

[1] M. Imade, M. Imanishi, Y. Todoroki, H. Imabayashi, D. Matsuo, K. Murakami, H. Takazawa, A. Kitamoto, M. Maruyama, M. Yoshimura, Appl. Phys. Express 7, 035503 (2014).  
 [2] M. Imanishi, K. Murakami, H. Imabayashi, H. Takazawa, Y. Todoroki, D. Matsuo, M. Maruyama, M. Imade, M. Yoshimura, Y. Mori, Appl. Phys. Express 5, 095501 (2012).  
 [3] M. Imanishi, T. Yoshida, T. Kitamura, K. Murakami, M. Imade, M. Yoshimura, M. Shibata, Y. Tsusaka, J. Matsui, Y. Mori, Cryst. Growth Des. 17, 3806 (2017).  
 [4] M. Imanishi, K. Murakami, T. Yamada, K. Kakinouchi, K. Nakamura, T. Kitamura, K. Okumura, M. Yoshimura, Y. Mori, Appl. Phys. Express 12, 045508 (2019).  
 [5] M. Imanishi, S. Usami, K. Murakami, K. Okumura, K. Nakamura, K. Kakinouchi, Y. Otoki, T. Yamashita, N. Tsurumi, S. Tamura, H. Ohno, Y. Okayama, T. Fujimori, S. Nagai, M. Moriyama, Y. Mori, Phys. Status Solidi RRL 18, 2400106 (2024).  
 [6] T. Yoshida, M. Imanishi, T. Kitamura, K. Otaka, M. Imade, M. Shibata, Y. Mori, Phys. Status Solidi B 254, 1600671 (2017).