事後評価報告書

- 開発実施企業　：　株式会社ノベルクリスタルテクノロジー
- 代表研究者　　：　国立大学法人信州大学　学術研究院（工学系）教授　太子　敏則
- 開発課題名　　：　垂直ブリッジマン法による6インチ酸化ガリウム基板

1．開発の目的

OA 機器や家電のみならず、昨今では自動車や発電など大電力を扱う分野において、制御や電力の変換を担うパワー半導体は、その耐圧の高さや高速動作の特徴を生かし、省エネのキーデバイスとして着目されている。

パワー半導体の課題である、耐圧の低さや発熱による電力損失を防ぐため、有望な素材として SiC（炭化ケイ素）、GaN（窒化ガリウム）、Ga_2O_3（酸化ガリウム）などの新材料研究が進んでいる。なかでも、β-Ga_2O_3（ベータ型酸化ガリウム）は、SiC や GaN のバンドギャップ 3.3～3.4eV よりも大きな 4.7～4.8eV のバンドギャップエネルギーを持っているため、電子移動度は劣るものの、絶縁破壊に対する抵抗が高く、高耐圧・低損失化など、優れたデバイス特性が期待されている。

本開発は、パワー半導体材料として β-Ga_2O_3 の実用化を進めるために、垂直ブリッジマン法（VB 法）を採用した6インチ直径の β-Ga_2O_3 単結晶を成長させる装置を開発することで、高品質かつ低コストな酸化ガリウム基板の事業化を目指すものである。

2．開発の概要

垂直ブリッジマン法（VB 法）は、結晶の原料を格納したるつぼを炉の中に入れ、原料を溶融した後に、炉内の温度勾配を利用して端部から徐々に凝固・単結晶化させる育成方法である。

従来の育成方法である EFG（Edge-defined Film-fed Growth）法では板状の結晶が得られるのに対して、VB 法では円筒形のるつぼと同じ形状の結晶が得られるため、結晶から円形の基板を加工する工程での不要部分が大幅に少なく、低コスト化が期待される。また、VB 法では、るつぼ内での温度勾配が小さい環境で育成できるため、結晶の高品質化が期待される。

そこで、本開発では、VB 法による6インチ径の β-Ga_2O_3 結晶育成を実現し、結晶の品質を向上させるとともに、実用化の大きな障壁であるコストの削減に向け、結晶の長尺化に取り組んだ。

同社は既に 4 インチの β-Ga_2O_3 結晶を EFG 法で製造しているが、今回の6インチへの大口径化では、信州大学の知見に基づき、育成装置内の炉内温度勾配および酸素分圧、るつぼの降下速度など、結晶の育成速度と品質に関係するパラメータを最適化することで、VB 法による6インチの結晶を育成することができた。

結晶の品質については、産業技術総合研究所において、X 線トポグラフィ法を用いて結晶欠陥を評価した。その結果、従来法である EFG 法で製造した基板に見られた直線状欠陥が、

VB 法で作製した基板にはほぼ発生していないことが確認でき、高品質な結晶が得られていることが確認できた。

一方で、単結晶の大口径化・長尺化による低コスト化、という点での2つの課題が残った。

ひとつは、基板としての口径拡大における問題である。単結晶内に生じたクラックにより完全な円形結晶になっておらず、円形を前提したスライサーなどの既成装置では基板化加工ができない。クラックの原因は、るつぼから結晶に加わる応力や結晶自体がもつ熱応力によるものと考えられるが、その抑制には、結晶の冷却方法など更なる検討が必要である。

もうひとつは、結晶の長尺化である。本開発で得られた6インチ定径の円柱部分は28mmで、目標の70mmには到達できなかった。原因は、安定した加熱が長時間にわたって維持できなかったことである。加熱に使うヒーターの高熱による破断などが間接的な原因分析に留まっているが、加熱方式の見直しなど根本的な原因の解決が必要である。

3. 総合所見

本開発では、β-Ga_2O_3の6インチ単結晶成長装置を開発し、結晶の高品質化と低コスト化に取り組んだ。6インチ単結晶を得たことは大きな成果であるものの、クラックの発生や長尺化未達の問題は解決できず、低コストに基板を生産する技術の確立にまでには至らなかった。

クラック抑制は、これまで積み上げてきた結晶育成のデータを活かしながら、結晶の冷却方式など更なる検討が必要だろう。また結晶の長尺化では、高熱で破断しやすい抵抗加熱方式を見直し、VB 法開発以前から採用している EFG 法で培った高周波加熱方式を検討するなどの改善を期待したい。

クリーンエネルギーの活用や脱炭素社会の実現という経済性と社会性の両立が求められる現在、電力を効率的に制御・変換するパワー半導体は、その役割は重要さを増すとともに、更なる進化が求められる。本開発の結果、現時点で事業化の可能性については厳しいと言わざるを得ないが、事業化に必要な大口径結晶が得られたことは評価すべきであり、今後の開発努力を経て事業化の可能性に強く期待したい。

以上