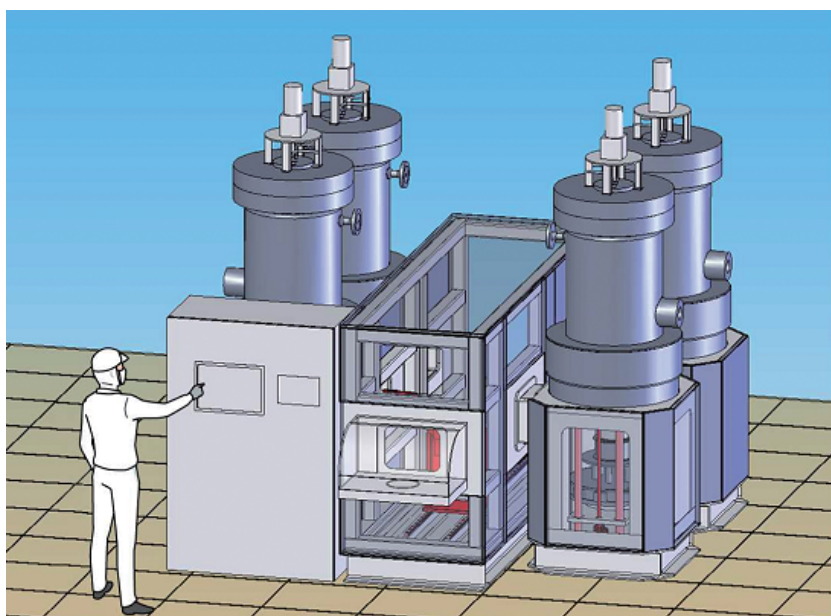


高温高圧技術が拓げる 次世代半導体の世界

量産化が難しい窒化ガリウム (GaN) の 製造技術に IHI 機械システムが挑んだ

光デバイス、パワーデバイスの性能向上と普及に欠かせない次世代半導体「窒化ガリウム (GaN)」。株式会社 IHI 機械システム (IMS) と株式会社 IHI では GaN の量産化に向けた高温高圧炉の開発を行っている。GaN 半導体とは何か？その製造の鍵となる炉はどのようなものなのか？



次世代半導体製造試験装置

半導体の活躍

半導体といえば LSI, DRAM, CPU といったデバイス (素子) の名前を新聞でよく見かける。これらは主に情報処理、信号処理に用いられ、お手元の携帯電話や PC はもちろん、白物家電から自動車、さらに巨大なプラントの制御システムなど、あらゆる機器の中であって黙々と仕事をしている。まさに「産業のコメ」である。

これとは別にエネルギーの処理に用いられる半導体

もあり、パワーデバイスと呼ばれる。ハイブリッド機器やインバータのなかではこれが主役である。さらに光によってエネルギーの授受を行うデバイスが光デバイスで、身近なところでは CD/DVD/BD プレーヤーやレーザーポインタに使われる半導体レーザー、あるいは省エネルギーな照明として急速に普及しつつある LED (発光ダイオード) は電気エネルギーを光に変えるもの、一方、おなじみの太陽電池は逆に光を電気エネルギーに変えるものである。

こうして列挙していくと、パワーデバイスや光デバ

イスが今後ますます重要となり、性能の向上、潤沢な供給、低価格化が望まれていることは明らかだろう。そこで注目を集めているのがワイドギャップ半導体と呼ばれる次世代半導体で、その一つが GaN である。

GaN の特徴

GaN はその名のとおり、ガリウムという金属と窒素が結合したもので、半導体としての性質を持たせるには綺麗に結晶化させる必要がある。GaN の適用先として特に期待されているのが発光デバイスであり、ここではそのなかでも LED の基板に用いた場合の特徴を見てみよう。

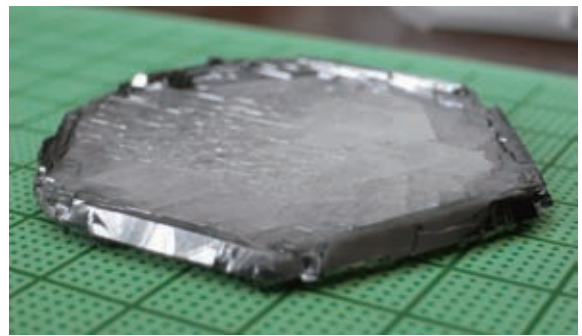
従来の基板は主にサファイアが用いられている。これと比較すると GaN 基板には次のような性質がある。

- (1) 基板の上に作った LED 発光層の欠陥が少ない
→信頼性、寿命の向上
 - (2) 熱伝導率が高い（サファイアの 5 倍）
→大電流（発熱大）での使用が可能、発熱による効率低下が小さい
 - (3) 導電性が高い（サファイアはほとんど絶縁性）
→面内で均一に発光する、素子構造が簡単にできる
 - (4) 基板が透明
→光の利用効率が高い
 - (5) 加工が容易
→チップ化（ウエハーからの切り出し）が容易
- このように物質としてはいいことづくめの GaN であるが、なかなかサファイアに取って代わることができないのは、作ることが難しいからである。

半導体の作り方

半導体を作るといって、虹色に光る丸い薄板の上をロボットが目にも止まらぬ速さで動いている映像を思い浮かべるかもしれない。これは半導体のウエハーの上に種々の加工を施して LSI なり太陽電池なりに仕立てている、全体から見ればすでに終わりの方の工程である。ではその基板はどのように作るのか。

最初に述べた情報処理等に用いられる半導体の多くはシリコン (Si) でできている。シリコンの基板の作り方はすでに確立されており、以下の工程から成る。



GaN 基板
(大阪大学 森教授提供)

- (1) 高純度のシリコンをるつぽで溶かす。
- (2) シリコンだまりに棒をおろして先端を液面に接触させ、回しながらゆっくり引き上げる。シリコンが固まりながら棒に付いてくる。
- (3) 太いシリコンの棒（インゴット）ができる。この棒はそれ自体がシリコンの大きな一つの結晶（バルク結晶）になっている。現在では最大で直径 30 cm、長さ 1.8 m にも及び、例えば食塩の粒が一つの結晶であることを考えると驚くべき大きさである。
- (4) インゴットを薄く鋭利な刃物でスライスすればシリコンの丸い基板（ウエハー）が大量に得られる。このような作り方をバルク製造法という。安く大量にインゴットを製造する方法が普及したため、シリコン半導体は産業のコメとなることができた。

一方、GaN にはこれまで大きなバルク結晶を速く製造する方法がなく、気体の中で徐々に成長させて作る（気相法という）しかなかった。これでは非常に高価になるのは当然で、GaN を用いた高性能なデバイスの普及を妨げていた。

そこでようやく登場したのが Na フラックス法というバルク結晶の製造方法である。

Na フラックス法

Na フラックス法ではシリコンの場合と同様に溶けた（液体の）ガリウムと窒素を反応させてバルク結晶を得る。このとき、窒素は相当な圧力下または高温下でなければガリウムに十分に溶け込まないために、ナトリウム (Na) を添加剤として加えて、窒素を溶けやすくする。

しかしこのプロセスはシリコンインゴットのプロセスのように高温に溶かしただけではうまくいかない。

- (1) 窒素がガリウムに十分に溶け込む温度（約 1 000℃）にする。しかも温度のムラがるつぼの中の至る所で 5℃以内でなければならない。
 - (2) 窒素をガリウムに溶け込ませるために高い圧力（約 100 気圧）を掛ける。
 - (3) 窒素とガリウムを十分に混合させ、成長しつつある結晶の表面に新鮮な溶液が行き渡るように、るつぼの中の溶液（溶けたガリウム）をゆっくりと動かし続ける必要がある。ただし溶液の動きはおだやかで、かつ場所によるムラがないようにしなくてはならない。
 - (4) わずかな不純物が入っても結晶は不良品になってしまう。
 - (5) GaN 結晶は成長が遅いため、バルク結晶を得るまでに数日間にわたってこの状態を安定に維持する。
- このような過酷でしかもデリケートな装置を開発するのに IHI・IMS の高温高圧技術が活きるようになった。

揺動法とプロペラ法・回転法

不純物の混入を避けつつ温度や圧力を均一に保つには、るつぼは完全に閉じた状態が望ましい。そのうえで溶液の流れを作るために炉全体を外からゆっくりと動かしてやる方法が揺動法である。しかしこの方法では溶液の動きを制御することが困難で、結晶の成長速度に応じた溶液流れのスピードアップや品質向上のための流れの均一化に限界があった。

これに対して、るつぼの中にプロペラを入れて溶液を直接攪拌して流れを作ったり、内部の容器だけを回転させたりするのがプロペラ法・回転法である。作る

うとする結晶の性質に応じてプロペラの形状、位置をあらかじめ何種類か用意し、また運転中に回転速度を変えることで、溶液の流れを自在にコントロールし、品質の高い結晶を迅速に成長させることができることが期待される。

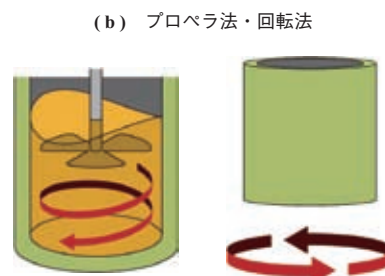
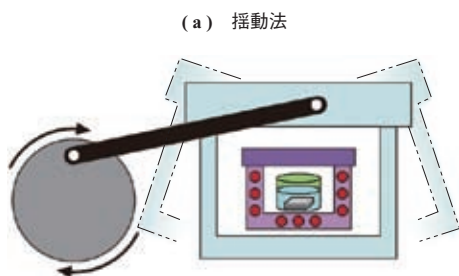
だが、そんなにうまくいくのだろうか？

IHI・IMS の高温高圧技術と新しい工夫

先に「1 000℃、100 気圧の過酷な装置」と述べたが、実はこれらの値は IHI・IMS の炉技術にとっては「手頃」な条件なのである。製鉄所の主役である高炉では 2 000℃に近い状態で何年も運転を続けているし、100 気圧を利用したセラミックスの焼結（焼き固め）炉も手がけている。しかし 1 000℃、100 気圧の中にプロペラを入れて攪拌するというのは初めての挑戦であった。

まず問題となったのはプロペラの軸の隙間を通して断熱材内部の熱が外へ逃げてしまうことである。従来の高圧用のプロペラ装置だけでは熱は断熱材外までそのまま逃げてきてしまう。そこで軸の周りにベローズ（蛇腹）のカバーを付けて高圧ガスの流れを止め、熱の逃げを減らすようにした。

次はプロペラの軸を支える軸受である。この装置は 3 重の容器構造となっており、3 か所に軸受が必要となる。わずかな不純物も許されないのでグリースなどを使うわけにはいかない。1 000℃近い高温に耐える必要もある。そこで軸受は特殊な複合材料によるすべり軸受（軸と軸受が直接すりあう）とした。さらに外から周囲の不純物を含んだガスが混入することを防ぎつつ、窒素ガスを導入する必要があるため、軸と軸受の隙間を適切に設計してシール性とガス導入の容易さを両立させた。軸の振れ回りについても注意を払った。



揺動法とプロペラ法・回転法

これらの高温高压技術が実際に機能しているかを確認するため、試作機を製作し、大阪大学 森勇介教授の指導の下、何日にも及ぶ連続運転を行って性能を評価し、必要に応じて改良を施した。例えば高温の連続運転によって容器に熱変形が生じて軸の継ぎ手のずれが生じたため、ずれを逃がして安定して回転できる構造を工夫した。

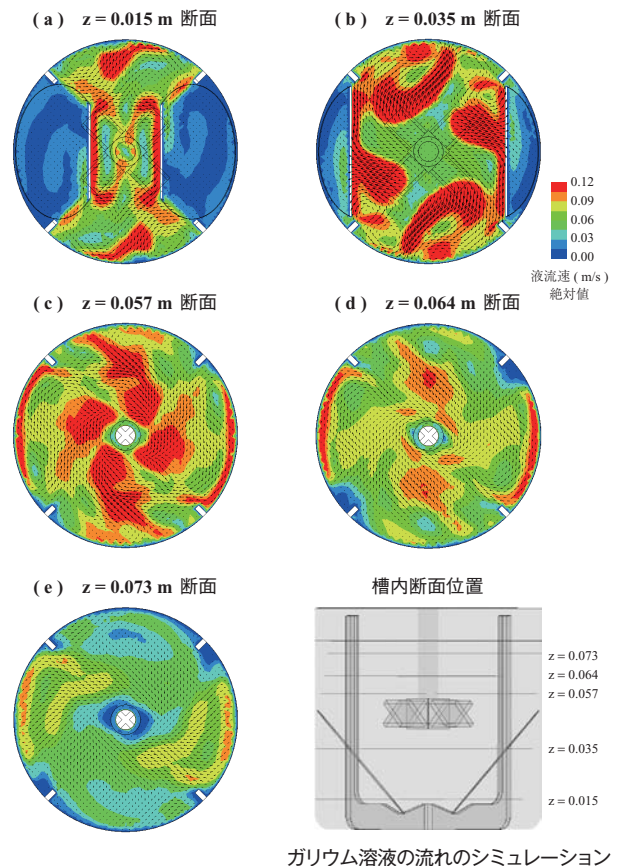
溶液流れのシミュレーション

るつぼの中の溶液の流れはプロペラによってどのように作られるのだろうか。結晶成長に適した流れにするにはプロペラの形状、配置、回転数をどのように設定すればよいのだろうか。るつぼの中にセンサーを入れて測ることは不可能であり、例えば水の模型を作って観察するにも限界がある。

そこで IHI で長年にわたって開発、活用されてきた流れのシミュレーション技術が活躍することになった。るつぼ、プロペラ、結晶を成長させるための基板を「計算メッシュ」で表現し、プロペラを回転させてガリウム溶液の流れを計算した。メッシュやプロペラの回転数は自在に変更できるので、どのような条件のときにどのような流れが作られるかを多数予測した。その結果から最適なプロペラ形状や配置を決めることができた。

装置の完成とさらなる試験

IHI・IMS は、これらの技術を盛り込んだプロペラ法・回転法を採用した Na フラックス法 GaN 基板製造装置を開発した。この方式の基板製造方法は基本的な可能性はすでに確かめられているが、実際に高品質の結晶を高速に製造するためには、最初の基板の置き方や攪拌方法や速度の調整方法などをさまざまに工夫して確立していかなくてはならない。なぜなら、ずっと一定にしておく方法がベストとは限らないからである。この設定、運転方法を専門家は「レシピ」と呼んでいる。IHI・IMS が開発した装置は研究用の試験機である。種々のレシピにも容易に対応できることから、この装置は広く使っていただけると信じている。



GaN 半導体が描く社会インフラ

最初に述べたとおり、GaN 半導体は今後の大いなる活躍が期待されている。気相法に代わって Na フラックス法が工業的に確立されれば、より安価な基板が大量に供給されることで LED 照明が明るく、安く、長持ちするようになるなど、一般市民にとっても実感できる変化が起こっていくだろう。

基板を作る装置は地味な裏方であるが、そこにはここで紹介したような、多くの経験と実績によって獲得した高い技術が隠されている。

問い合わせ先

株式会社 IHI 機械システム

経営企画部

電話 (03) 5781 - 5384

URL : www.ihico.jp/ims/