

パワーエレクトロニクスデバイスのための 高品質な酸化ガリウム薄膜結晶の成長

GROWTH OF HIGH-QUALITY GALLIUM OXIDE THIN FILMS FOR POWER ELECTRONICS DEVICES

宇野和行¹
Kazuyuki UNO

¹システム工学部准教授

和歌山県は高齢化先進県であると同時に、山間部の狭隘な生活道路が多い地域でもある。人々が健康で安全な暮らしを確保するためには、エアコンなどの空調や小型電気自動車（パーソナルモビリティ）など、電気エネルギーに頼ることとなる。そこで重要となるのは、電気エネルギーを有効に活用できる半導体パワーデバイスの高効率化である。

半導体デバイスはシリコンを中心に発展してきたが、ここ数年で炭化シリコンや窒化ガリウムによる半導体デバイスの社会実装が行われるようになってきた。近年注目を集めている酸化ガリウムは、これらの材料を上回る性質をもつことが分かっているが、作製技術が未発達である。本研究では、酸化ガリウム薄膜の作製技術にあらたな知見を切り拓く結果が得られたので報告する。

キーワード: パワーデバイス, 酸化ガリウム, ミストCVD法

1. はじめに

和歌山県は高齢化先進県である。内閣府の平成30年度の高齢社会白書によると、高齢化率は全国の都道府県で山形県と並ぶ6位に位置する。高齢化社会では福祉に多くの人手を割くことができないため、日々の暮らしを安全に過ごすための技術的手段が重要となる。たとえば空調から始まる健康管理技術、小型電気自動車（パーソナルモビリティ）による移動手段の確保などが挙げられる。特に和歌山県を含む紀伊半島南部地域は山間部の狭隘な生活道路が多く、1-2人乗りの小型電気自動車は日常の移動手段として必要とされるものであろう。そしてこれらの運用を支えるのは電気エネルギーであり、それを制御するのがパワーエレクトロニクスデバイスである。

電気エネルギーは、パワー制御したり電圧変換したりする際に無視できない大きさの損失が発生する。その損失を減らす努力は現在もたゆまず進められており、近年では炭化シリコン(SiC)製のデバイスが都市部の電車の制御に実用化されており、窒化ガリウム(GaN)製のデバイスがノートパソコンやスマートフォンなどのIT機器のACアダプタの小型化に貢献しつつある。しかし、近い将来、電気自動車やさまざまなパーソナルモビリティが普及すれば、単純には国内の合計6000万台（2019年、日

本自動車工業会調べ）ある乗用車の約半分が電気エネルギーで動くことになると予想され、それらが消費する電気エネルギーは膨大なものとなる。パワー制御や電圧変換に伴って発生する損失を1%でも削減することはすでに喫緊の課題になっているといっても良い。そしてそれは、ただちにパワーエレクトロニクス用の半導体デバイスの低損失化、高効率化が喫緊の課題であるということの意味する。

パワーエレクトロニクス用の低損失な半導体デバイス材料に求められる性質は、大きな絶縁破壊電界をもっていることである。これまではコンピュータやスマートフォンなど、小型電気機器用の半導体に使われているものと同じシリコンが用いられてきた。近年では、上述したとおり、絶縁破壊電界がシリコンの数倍大きいSiCやGaNによるデバイスが社会実装されるようになった。さらに大きな絶縁破壊電界をもつのが酸化ガリウム(Ga_2O_3)であり、SiCやGaNの次の世代の担う材料として注目されている。筆者は、高品質な Ga_2O_3 結晶の成長をミストCVD法と呼ばれる、京都大学で開発された新しい手法で行っている¹⁾。本稿では、ミストCVD法による結晶成長メカニズムを探索しつつ²⁾、高品質化を図る方法について、現在得られている知見を紹介する。

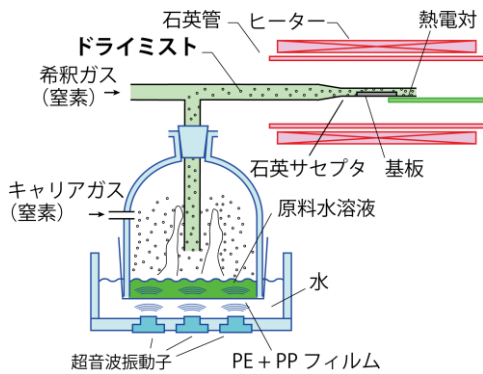


図-1 ミストCVD成長装置

2. 酸化ガリウム薄膜の成長法

結晶成長に用いたミストCVD成長装置の構成を図-1に示す。3つの超音波振動子によって原料水溶液を直径2-3 μm のドライミストにし、キャリアガスと希釈ガスで高温部に流し込むと、高温部に配した基板に薄膜が成長する。

酸化ガリウムを成長するためには、ガリウムイオンを含む水溶液を原料として作製しなければならない。本研究では金属ガリウムを塩酸に溶解させ、その溶液を用いる手法をとった³⁾。35%の塩酸に金属ガリウムを入れて室温で3ヶ月程度放置すると、3.9 mol/Lを超えるほぼ飽和した濃度の水和した塩化ガリウム水溶液が得られた。これを希釈してミストCVD法の原料水溶液とした。

次に基板としても用いたサファイア基板の前処理について述べる。酸化ガリウムの成長では、基板の原子配列情報にならって結晶成長させるため、基板を原子レベルで平坦かつ清浄にしておかなければならない。本研究ではサファイア基板を1050°Cで20時間以上熱処理し、さらにピラニア洗浄することで、ほぼ確実に原子レベルで平坦な表面が得られることを見出した。

3. 高品質酸化ガリウムの成長

サファイア基板に、0.02 mol/Lのガリウムイオン濃度をもつ原料水溶液を用いて Ga_2O_3 薄膜の成長を試みた。しかし、薄膜はほとんど成長しなかった。原因として考えられたのが、水溶液中でGa原子が水和物となっていたためであろうということである。そこでGaを錯体化することを試みた。10種類程度の配位子を試してみた結果、アセチルアセトナート錯体化することが有効であるという指針がつかめたので、その効果を調べることにし

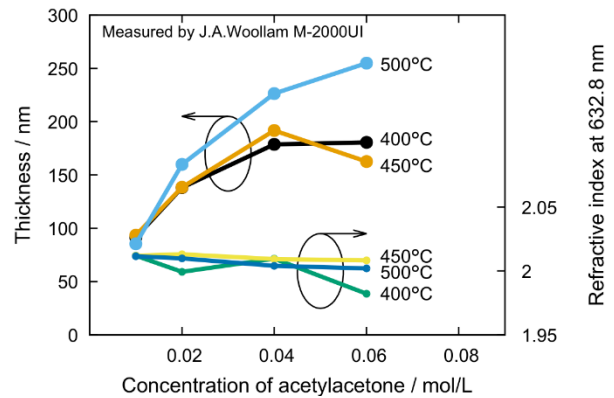


図-2 アセチルアセトナート添加量と1時間あたりの成長膜厚および屈折率依存性

た。

アセチルアセトナートはGa原子1つに対して最大3分子配位するので、0.02 mol/LのGa水溶液に、0.01, 0.02, 0.04, 0.06 mol/Lのアセチルアセトナートを加えて実験を行った。1時間の成長で得られた膜厚と屈折率の関係を、薄膜形成温度400, 450, 500°Cのそれぞれに対してプロットしたものを図-2に示す。アセチルアセトナート添加量がGa濃度の3倍に近づくにつれて膜厚が増加した。これは原料水溶液がアセチルアセトナート錯体化することで薄膜成長が促進されたことを意味する。屈折率は薄膜の品質を示す。薄膜形成温度450°Cまたは500°Cで成長したときに安定した品質で成膜できることが分かった。なお、得られた薄膜の表面平坦性はRMS値で0.6 nmと他の研究結果と比べても高いものであった。以上の結果により、 Ga_2O_3 によるデバイス作製のための高品質な薄膜形成の指針を定めることができた。

4. 結論

ミストCVD法で Ga_2O_3 を作製するためには、水溶液のアセチルアセトナート錯体化が有効であることを見出した。RMS値は基板温度が500°Cのときに0.6 nm程度であり、高品質なものであった。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究C No. 18K04958にて行われた。

参考文献

- 1) D. Shinohara and S. Fujita, Jpn. J. Appl. Phys. 47 (2008) 7311.
- 2) Uno, K., Yamasaki, Y., and Tanaka, I.: Applied Physics Express, Vol.10, p.015502, 2017.
- 3) 和歌山大学：特願2016-213949, 2016.

(2019. 12. 26受付)