

修士論文要旨

ミスト CVD 法による酸化ガリウム系 MESFET の開発と特性

The development and characteristics of α -Ga₂O₃ system MESFETs by Mist CVD

知能機械システム工学コース

川原村研究室 1225032 田頭 侑貴

1. 緒言

電源の制御・供給を行うパワーデバイスは機械の性能・エネルギー損失に大きく影響し、生活のありとあらゆる機械に用いられている。今やこのデバイスにより、数千 V、数千 A の大きな電圧・電流を比較的容易に利用可能である。近年、技術進化に伴って大量の情報を素早くやり取りする必要に迫られているが、求められる電気信号は複雑になり、現状のデバイスでは性能の不足する状況も多々出てきている。従来のパワーデバイス利用箇所の省エネ化や小型化および大容量情報伝達などの背景から、パワーデバイスの益々の性能向上が求められており、次世代パワーデバイス材料としてワイドバンドギャップ材料が注目される。ワイドバンドギャップ材料は大きな絶縁破壊電界強度により高電圧に耐えられ、供給電流量を多く出来る。その結果、高圧下での高速スイッチングを可能とし、スイッチング損失の減少、耐高周波使用を実現する。また、導通時の抵抗を少なくでき、省エネルギーに貢献する。さらに、キャリアが熱的にも励起されにくくなり、高温下での安定な動作も可能となる。

現在、ワイドバンドギャップ材料として盛んに研究・開発が行われてきた GaN や SiC はパワーデバイスに広く用いられている。しかし、本研究のテーマとして扱う α -Ga₂O₃ は、現在注目されている GaN や SiC では為し得ない性能を持つ材料となり得る大きな可能性を秘めている。Si, SiC, GaN のバンドギャップがそれぞれ 1.1, 3.2, 3.3 eV なのに対し、Ga₂O₃ のバンドギャップは 4.7 eV 以上と非常に大きく⁽¹⁾、Ga₂O₃ のウェハ基板の製造方法はほぼ Si と同等であるため、コスト競争力がある。また、Ga₂O₃ などの酸化物は、元から酸化しているために時間が経っても安定で半導体としての機能の経時的な損失が小さいという非常に大きなメリットもある。

そこで本論文では、絶縁体的挙動を示す Ga₂O₃ に Sn をドーピングし n 型にして導電性を持たせた薄膜をミスト CVD 法によって作製し、作製した薄膜を用いて MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor)および SBD(Schottky Barrier Diode)を作製することを目的とした。

(補足) ミスト CVD 法について

ミスト CVD 法は、近年開発され⁽²⁾、2003 年頃より原料流および反応場雰囲気等の積極的な制御を目的として研究が行われてきた⁽³⁾ 新しい薄膜成膜法の一つであり、大気圧下でも大面積に原子レベルで均一に高品質な薄膜を成膜可能である。作製したい薄膜材料を含む溶液に超音波振動子などで瞬間的にエネルギーを与えてミスト化した後、高温に熱した基板にガスを用いてミストを流し込み、熱化学反応などにより薄膜を形成するという成膜手法である。ミスト CVD 法の成膜装置の概略図を図 1 に示す。

現在一般的には真空環境下で成膜が行われており、装置は

大型となる。そのため、半導体工場では、真空状態維持に工場で消費する電力の約 20 %ものエネルギーを消費しているという報告もある⁽⁴⁾。一方でミスト CVD 法は、大気圧下で成膜可能なプロセスである。それに伴い、大掛かりな設備が必要なく、維持費もかからない省エネルギーな成膜法である。

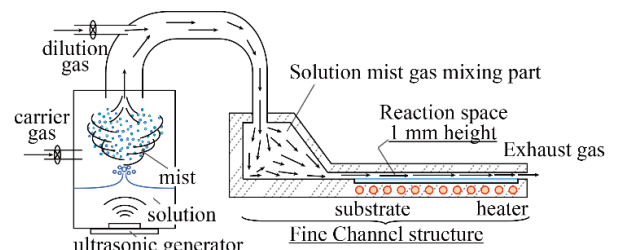


Fig. 1 Fine Channel MistCVD System

2. 研究内容

ミスト CVD 法を用いて様々な条件で作製した Sn ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜は導電性を持たなかった。一方、それらの研究の中で (Al_xGa_(1-x))₂O₃ が導電性を持つことを発見し、(Al_xGa_(1-x))₂O₃ 薄膜を活性層とした MESFET 等のデバイスを作製して特性評価を行った。

本論文では、主に以下の(1)~(6)の項目について論じる。

- (1) 薄膜の X 線回折測定
- (2) 薄膜の表面分析
- (3) デバイス作製にも必要なエッチング条件
- (4) TLM(Transfer Length Method)を用いたデバイスの抵抗率測定
- (5) デバイスの I-V 特性
- (6) デバイスの C-V 特性

また、本稿では、(4)、(5)の結果の一部・考察についてのみ報告し、成膜条件、その他の研究内容に関しては、卒業論文にて詳細を述べることとする。

3. TLM を用いた抵抗率測定・考察

アンドープ薄膜上と Sn を 3% ドープした薄膜上に形成したオーミック接触になると考えられる Ti/Au 電極を 2 つ用いて TLM 測定を行った。この 2 電極は隣接した TLM 構造をしており、共に幅 100 μ m、長さ 200 μ m の長方形をしている。また、互いの距離が 20 μ m、40 μ m、60 μ m、80 μ m、100 μ m である電極に対して -2 V から 2 V まで 0.1 V ずつ電圧を印加した。この時の I-V 特性および、I-V 特性から計算した抵抗値と電極間距離との関係を図 2 に示す。図 2 の赤丸がアンドープ薄膜、青丸が Sn 3% ドープ薄膜のものである。ここで、I-V 特性において、グラフがほぼ直線を描いていることから、電極は良好なオーミック性を示すことが分かった。また、アンドープの薄膜において、図 2 の黒色の破線部分から 2 電極間の距離と計算した抵抗値とが比例関係とならないことと、接触抵抗率を計算する際にアンドープ薄膜の接触抵抗が負の

値を取ることから、アンドープ薄膜に対して2電極間の距離が80 μm と100 μm のときに正しく抵抗値を測定できていないと判断した。これは、デバイス加工の際に SiO_x をエッチングしきれていない部分が存在するからだと考えられた。そこで、アンドープ薄膜に対しては2電極間の距離が20 μm , 40 μm , 60 μm の場合について考え、接触抵抗率を算出した。この時、アンドープ薄膜の接触抵抗率は0.39 Ωcm^2 、抵抗率は24.2 Ωcm であり、Snを3%ドーピングした薄膜上の接触抵抗率は0.088 Ωcm^2 、抵抗率は0.15 Ωcm であった。

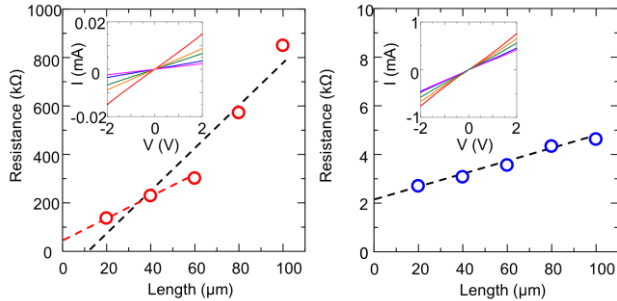


Fig. 2 Resistance vs pad distance dependences

4. 作製したMESFETにおけるI-V特性評価・考察

アンドープ薄膜とSnを3%ドーピングした薄膜を活性層とするMESFETのうち、ともにゲート長25 μm 、ゲート幅100 μm のものを用いて、出力特性及び伝達特性を評価した。まず、ゲートに印加する電圧を+2 Vから-14 Vまで0.5 Vずつ変化させ、それぞれの電圧でドレイン電圧を0 Vから15 Vまで0.1 Vずつ変化させることで得られた出力特性を図3に示す。赤線はアンドープ薄膜、青線はSn 3%ドーピング薄膜を活性層にもつMESFETである。これからソース-ドレイン間のゲート電圧依存性に関して、ゲート電圧による電導度変調が可能であることがわかり、ゲート電極下部の空乏層が拡がりオフ動作を行えていることからMESFETとして良好なものであることが確認できた。このとき、ドレイン電流密度の最大値はアンドープ薄膜において 3.79×10^{-3} mA/mm、Snを3%ドーピングした薄膜では15.9 mA/mmとなった。

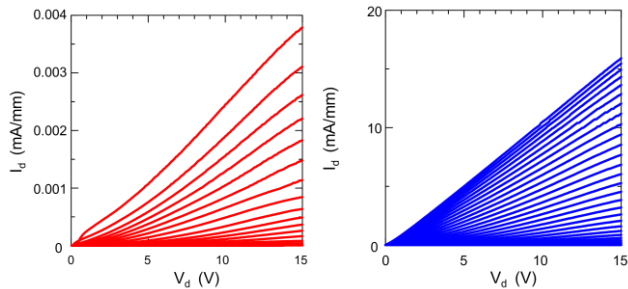


Fig. 3 Output characteristics of MESFET

また、同じMESFETに対して、出力特性評価を行う前後と行った時の3回、ドレイン電流から電界効果移動度を計算した。横軸にゲート電圧、縦軸にドレイン電流と移動度を取りプロットしたグラフを図4に示す。左図に $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ MESFET、右図にSn: $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ MESFETについての結果を示す。移動度は出力特性評価を行ったときを青色、評価直前を橙色、評価直後を緑色の破線で示している。アンドープ薄膜では、印加するゲート電圧を小さくするにつれてドレイン電流、移動度ともに減少し、評価後には電流が流れなくなった。Snを3%ドーピングした薄膜では、出力特性評価前に、印加するゲート電圧を小さくしても移動度は上昇を続け、出力

特性評価を行い始める際に評価前よりも高い移動度をとった。その後アンドープ薄膜と同様にドレイン電流、移動度ともに減少し、評価後には電流が流れなくなった。アンドープ薄膜の場合、移動度の最大値は出力特性評価時に 4.11×10^{-4} $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ 、評価前が 2.10×10^{-3} 、評価後が 1.48×10^{-6} $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ となった。Snを3%ドーピングした薄膜の場合、移動度の最大値は出力特性評価時に 1.19×10^{-1} 、評価前が 1.66×10^{-1} 、評価後が 4.50×10^{-7} $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ となった。出力特性評価の前後で移動度が極端に減少しているのは、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜に結晶欠陥が生じるという報告⁽⁵⁾があることから、MESFETを作製した薄膜内に刃状転移などの結晶欠陥が生じており、ある程度の高電圧を負荷した際にキャリア補償が起こるなどしてキャリア移動が妨げられることによるものだと考えられる。また、オン抵抗を算出すると、 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ MESFETでは5.78 Ωcm^2 、Sn: $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ MESFETでは0.13 Ωcm^2 となった。

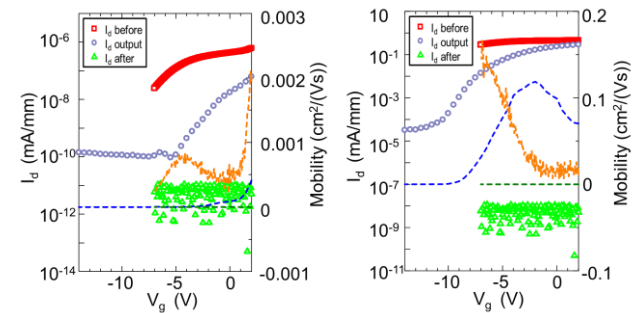


Fig. 4 Transfer characteristics and field effect mobility curves of MESFET

5. 結言

本研究では、Snドーピングによる $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の導電化を試みたが、安定して導電膜を得られる条件を見出すことが出来なかった。一方、この時結晶性を向上させるために利用したバッファ層が導電性をもつことを発見した。そこで、次世代に活躍が期待される $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜を用いた混晶薄膜のデバイス化を見据えて、 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 薄膜、 $(\text{Cr}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 薄膜、 $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 薄膜、 $(\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 薄膜について、3種類のエッチング液を用いてエッチング条件を特定した。また、その薄膜を用いてMESFET, SBD等デバイスを作製し、デバイスの特性評価を行ったところ、MESFETは完全なオフ動作を示し、SBDも特有の動作を示した。デバイスとしての $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 薄膜の様々な特性についての貴重なデータを得られ、 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 薄膜の特性の解明・ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ および $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 薄膜を用いたデバイス作製に向けて重要な結果を示した。

6. 参考文献

- (1) 東脇正高, 佐々木公平, 倉又朗人, 増井建和, 山腰茂伸, “酸化ガリウムパワーデバイスの研究開発”
- (2) G. Blandenet, M. Court, and Y. Lagarde, “Thin layers deposited by the pyrosol process”, Thin Solid Films, Vol.77(1981), pp.81-90.
- (3) 川原村 敏幸, 平尾 孝, 藤田 静雄, 吉田 章男, 織田 容征, 白幡 孝洋, 畑野 良, 森 一晴 “ミストを利用した薄膜成長技術及び加工技術の開発”
- (4) T. Huang, Solid State Technology 51 [10] (2008) 30.
- (5) 赤岩 和明 “コランダム構造酸化ガリウム系半導体の電気特性制御とデバイス応用”