

コランダム構造酸化物半導体の成長と MOSFET 試作

伊藤 義人 金子 健太郎† 藤田 静雄‡

京都大学工学研究科 〒615-8520 京都府京都市西京区京都大学桂

E-mail: † ken-kaneko@kuee.kyoto-u.ac.jp, ‡ fujitasz@kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし サファイア基板を用いたコランダム構造の酸化物半導体について、適切なバッファ層を導入しミスト CVD 法による成長条件を明らかにした。中でも、 α - In_2O_3 層はサファイア基板上の α - Ga_2O_3 をバッファ層として、パワーデバイス応用につながりうる結晶性および電気的特性を示した。 α - In_2O_3 を用いた MOSFET は明確なピンチオフ特性を示し、ドレイン電流のオンオフ比 10^6 、および電界効果移動度および有効移動度それぞれ 60 および 217 cm^2/Vs の値を示した。このように、ミスト CVD を用いて絶縁層-半導体構造を形成することは、低コストのデバイス応用に対して有効であるといえる。

キーワード 酸化ガリウム, 酸化インジウム, α 型, バッファ層, ミスト CVD, ワイドバンドギャップ半導体

Growth and preliminary MOSFETs of corundum-structured oxide semiconductors

Yoshito ITO Kentaro KANEKO† and Shizuo FUJITA‡

Graduate School of Engineering, Kyoto University Kyoto-daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8520 Japan

E-mail: † ken-kaneko@kuee.kyoto-u.ac.jp, ‡ fujitasz@kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract Growth of corundum-structured oxide semiconductors has been demonstrated using appropriate buffer layers on sapphire by mist CVD. Emphasis was given for α - In_2O_3 allowing reasonable crystalline and electrical properties for power device applications with the use of an α - Ga_2O_3 buffer layer on sapphire. An α - In_2O_3 MOSFET showed the clear pinch-off characteristics with the field effect mobility and effective mobility of 60 and 217 cm^2/Vs , respectively, together with the on-off ratio of drain current of 10^6 . The use of mist CVD for the insulator-semiconductor structure was advantageous for low-cost devices.

Keywords Gallium Oxide, Indium Oxide, α -Type Structure, Buffer Layer, Mist CVD, Wide Band Gap Semiconductors

1. はじめに

酸化物半導体のデバイス応用がさまざまな分野で注目されている。酸化ガリウム(Ga_2O_3)は一つの代表であり、約 5 eV のバンドギャップを活かした深紫外光デバイス、高耐圧のパワーデバイス等への応用が期待されている。 Ga_2O_3 は 5 つの異なる結晶形を持ち、その中で熱的に最も安定なものが単斜晶系の β 型である。 β - Ga_2O_3 の大きな特徴は、熔融法によりバルク基板が得られることで、基板表面処理を用いた深紫外光検出器[1]、ホモエピタキシーやイオン注入によるショットキバリアバイオード(SBD)[2]、FET[3]などが報告されている。他方、コランダム構造を持つ α 型の Ga_2O_3 も存在し、図 1 のように、同じコランダム構造を持つ α - Al_2O_3 、 α - In_2O_3 と合わせた混晶系によるバンドギャップ制御、ヘテロ構造デバイスへの展開が期待される。

酸化物は、酸化反応という容易な反応で形成され、酸素が不純物にならないこともあり、その成長にかか

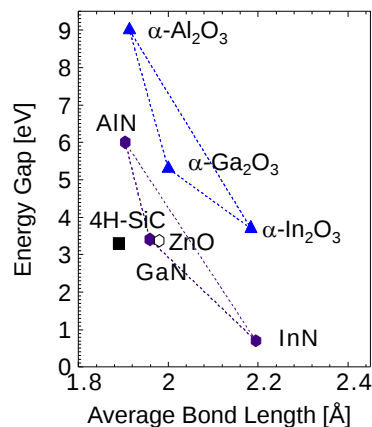


図 1 各種半導体のボンド長とバンドギャップの関係。

るエネルギーを抑えられる可能性がある。われわれは、安全で安価な原料を用いるミスト CVD 法[4-6]を用い、

安価なサファイア ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 基板上に $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が成長可能なことを見出し[4]、以来バンドギャップエンジニアリングと物性制御、デバイス応用の研究を行ってきた。今回は、ワイドギャップを活かしたパワーデバイス応用を念頭に、電気特性の制御と MOSFET の試作結果について報告する。

2. 結晶成長

酸化物半導体の気相成長には、MOCVD が良く用いられるが、原料として有機金属を用いる限り、成長装置や排ガス装置に関して高い気密性や複雑なシステムが必要で、原料・装置維持・運転のコストも高い。しかし有機金属を原料とするのは金属元素を反応部に輸送するためであり、これを有機金属に頼らず金属元素を輸送しうる他の方法を用いることで安全で安価な技術につながる。また酸化物の成長であるから、水やアルコールを原料系に用いることが可能である。このような考え方が、ミスト CVD 法の基本である。装置の一例を図 2 に示す。原料には対象とする材料の金属元素のアセチルアセトナト塩を用いた。

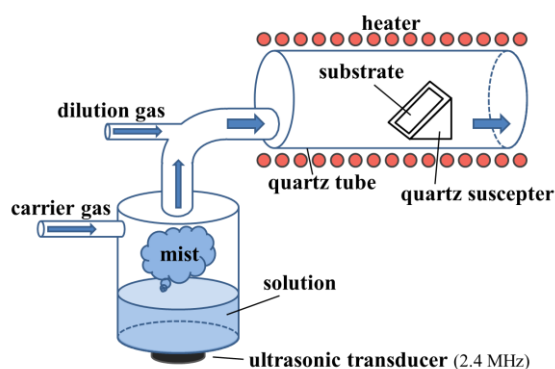


図 2 ミスト CVD 装置の構成例。

3. コランダム構造の制御

3.1. $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$

サファイア基板上にミスト CVD 法を用いて 600°C で成長した Ga_2O_3 薄膜の X 線回折測定結果の一例を図 3 に示す。コランダム構造に起因する (0006) 面からの回折ピークのみが見られ、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が成長していることがわかる。ロックンングカーブ半値幅は 47 arcsec と小さく、c 軸方向の結晶性の乱れが少ないことを示唆する。しかしながら、回折ピークの裾が広く、これはサファイア基板との格子不整合度が a 軸方向で約 4.6% と大きいことから、界面近傍での結晶性の乱れに起因するものと考えている。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は Ga_2O_3 の最も安定な相で

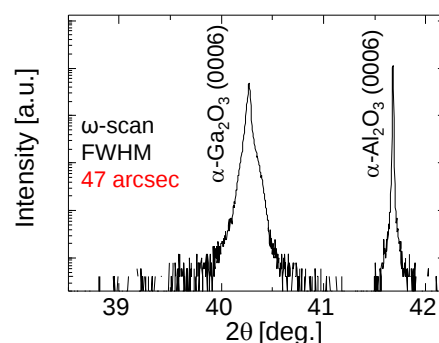


図 3 サファイア基板上 Ga_2O_3 薄膜の X 線回折測定結果。

はないが、サファイア基板のコランダム構造に引き込まれて成長した結果と言える。

3.2. $\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$

In_2O_3 は立方晶のビックスバイト構造が最安定相である。サファイア基板との格子不整合度が約 14.7% と大きいため、サファイア基板上に直接成長させるとビックスバイト構造になってしまう。そこでこの格子定数差を緩和させるためのバッファ層が必要である。われわれは $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ バッファ層を用いて $\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$ の成長を実証し、またその X 線 (0006) 回折ロックンングカーブ半値幅は 182 arcsec と小さかった[7]。しかしながら、その後 SIMS 測定を行ったところ、図 4 のように Fe が $\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$ 層内に拡散し、電気的特性への悪影響が懸念された。そこで、バッファ層として $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を用いることにした。 $\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$ と $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ との格子不整合度は 10.1% である。

図 5 に各種温度で In_2O_3 を成長した場合に関して、試料の X 線回折測定結果を示す。主要なピークは $\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$ (0006) 回折に起因するものであった。しかしながら、成長温度が 550°C 以上において立方晶である δ

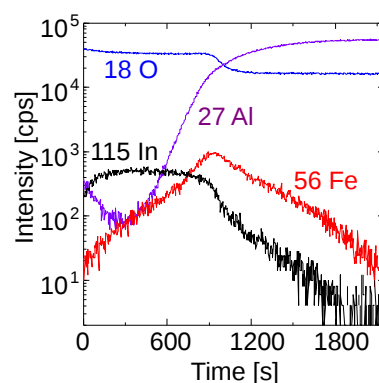


図 4 サファイア基板上に $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ をバッファ層として成長した $\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$ 薄膜構造の SIMS 測定結果。

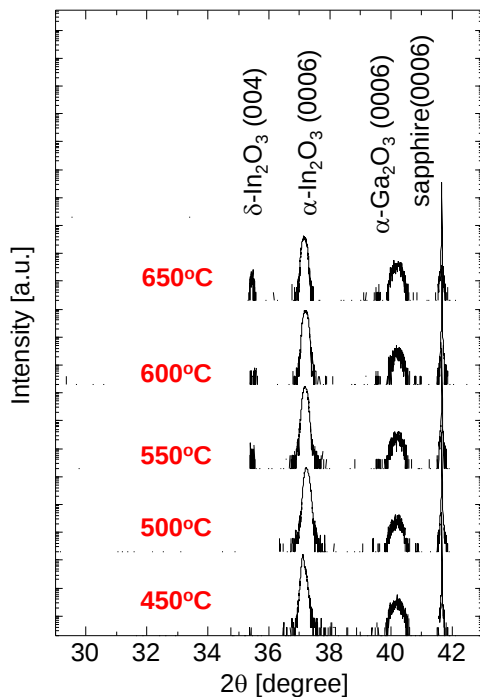


図5 サファイア基板上に α -Ga₂O₃をバッファ層として成長した In₂O₃ 薄膜構造の X 線回折測定結果。

型結晶に起因するピークがわずかに見られるようになるため、成長温度は 500°C が最適と考えられる。

3.3. α -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ および α -(In_xGa_{1-x})₂O₃ 混晶

複数の原料を混合することによって混晶の成長が可能である。図 6 は得られた (Al_xGa_{1-x})₂O₃ 混晶の組成と X 線(0006)回折ロックンクカーブ半値幅の関係を示す。Al 組成として 82%までの混晶の成長が可能で、全組成にわたりロックンクカーブ半値幅は 200 arcsec 以下であった。他方、(In_xGa_{1-x})₂O₃ 混晶については、In の中間的な組成領域において相分離が見られた。これは InGa₂O₃ と類似の現象であることは興味深い。そのた

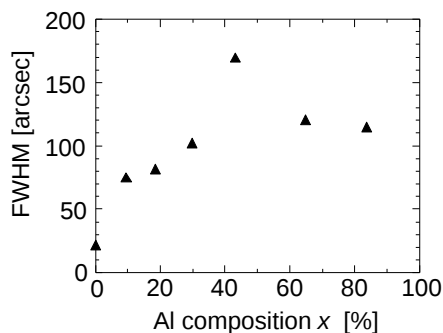


図6 サファイア基板上に α -Ga₂O₃をバッファ層として成長した (Al_xGa_{1-x})₂O₃ 薄膜の Al 組成と X 線(0006)回折ロックンクカーブ半値幅の関係。

め、現状では全組成にわたる混晶の成長には至っておらず、今後成長条件をさらに最適化して行くことが必要である。

4. 電気特性制御と試作 MOSFET の特性

α -Ga₂O₃ はアンドープで高抵抗を示し、Sn 等のドーピングによって n 型伝導を実現できる[8,9]。しかしながら、キャリア密度の 10¹⁸ cm⁻³ 台以下の制御が困難で、移動度が 2.8 cm²/Vs 程度[9]と低いことが問題であった。その後各種条件の最適化によって移動度を 20 cm²/Vs 程度にまで高めることができ、キャリア密度の制御性も上がってきた[10]。しかしながら、ピンチオフが可能な MOSFET の構造設計が困難で、現状ではドレイン電流の変調が見られたものの、 g_m は 1.5×10⁻⁵ S 程度と極めて小さい。また、ピンチオフも見られない。しかしわずかとはいえドレイン電流の変調が見られたことは、今後 MOSFET の進展につながることを予期させる結果と言えよう。

他方、 α -In₂O₃ はアンドープで n 型を示し、移動度も 100 cm²/Vs 以上の値をとる[7]。ただしキャリア密度は 10¹⁸ cm⁻³ 台と大きい。酸素雰囲気中で熱アニールをおこなったところ、移動度の最大値として 130 cm²/Vs が得られたが、キャリア密度は 10¹⁸ cm⁻³ 台であった。しかし、ピンチオフ可能なデバイス構造が設計可能であったため、MOSFET の試作を行った。図 7 にデバイス構造を示す。絶縁膜としてはミスト CVD 法で成長した非晶質 Al₂O₃ 薄膜[11]を用いた。 α -In₂O₃ 半導体層、Al₂O₃ 絶縁層ともにミスト CVD 法で成長可能なことは、デバイスの低コスト化に有用である。

図 8 に作製した α -In₂O₃ MOSFET のドレイン特性を示す。ゲート電圧 -50 V から +5 V の範囲でドレイン電流の変調が見られ、ピンチオフも明確である。ドレイン電流のオンオフ比は >10⁶、ゲートリーク電流は <100

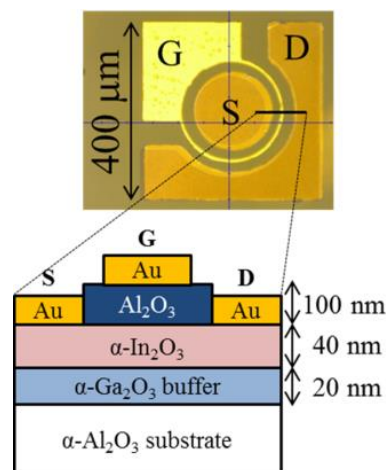


図7 試作した α -In₂O₃ MOSFET の構造。

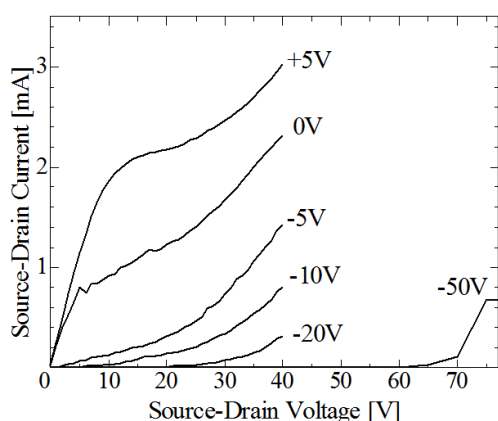


図 8 試作した α - In_2O_3 MOSFET のドレイン特性。

pA であった。MOS 構造の容量-電圧特性から α - In_2O_3 のドナー密度を求めると、 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とキャリア密度の測定値より 1 桁小さい値を示した。これは、 α - In_2O_3 層の不均一性や MOSFET 作製プロセスの影響ではないかと考えられ、その原因を明らかにしてゆく必要がある。電界効果移動度および有効移動度はそれぞれ 60 および $217 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であった。以上の結果から、 α - In_2O_3 を用いた MOSFET の動作実証ができたと考えられるが、まだドレイン電流の立ち上がりが小さく、ソースおよびドレイン電極のショットキ性が高いことが示唆される。今回、キャリア密度が 10^{18} cm^{-3} 台であるとしてオーミック電極形成のためのプロセスを省略してきたが、得られたドナー密度の値から見て電極プロセスは今後の重要な検討課題であると言える。

5. まとめ

サファイア基板を用いたコランダム構造の酸化物半導体の結晶成長と電気特性について述べた。とくに、 α - In_2O_3 について、パワーデバイス応用につながりうる結晶性および電気的特性が得られることがわかった。また、 α - In_2O_3 を用いた MOSFET の動作を実証した。ミスト CVD を用いた酸化物半導体の成長は、今後低コストのデバイス応用に対して有効であるといえる。

文 献

- [1] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, N. Suzuki, H. Hino, and S. Fujita, "Flame detection by a β - Ga_2O_3 -based sensor," Jpn. J. Appl. Phys. vol.48, no.1, 011605(1-7), Jan. 2009.
- [2] K. Sasaki, M. Higashiwaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, " Ga_2O_3 Schottky barrier diodes fabricated by using single-crystal β - Ga_2O_3 (010) substrates," IEEE Electron Devices Lett., vol.34, no.4, pp.493-495, Apr. 2013.
- [3] M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Kamimura, M. H. Wong, D. Krishnamurthy, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, "Depletion-mode Ga_2O_3 metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on β - Ga_2O_3 (010) substrates and temperature dependence of their device," Appl. Phys. Lett. vol. 103, no.12, 123511(1-3), Sep. 2013.
- [4] D. Shinohara and S. Fujita, "Hetero-epitaxy of corundum-structured α - Ga_2O_3 thin films on α - Al_2O_3 substrates by ultrasonic mist chemical vapor deposition," Jpn. J. Appl. Phys. vol.47, no.9, pp.7311-7313, Sept. 2008.
- [5] K. Kaneko, T. Nomura, I. Takeya, and S. Fujita, "Fabrication of highly crystalline corundum-structured α -($\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x$) $_2\text{O}_3$ alloy thin films on sapphire substrates," Appl. Phys. Express, vol.2, no.7, 075501(1-3), June 2009.
- [6] 西中浩之, 藤田静雄, "気相法による酸化亜鉛半導体のステップフローエピタキシャル成長," 材料, vol.59, no.9, pp.675-680, Sept. 2010.
- [7] N. Suzuki, K. Kaneko, and S. Fujita, "Growth of corundum-structured In_2O_3 thin films on sapphire substrates with Fe_2O_3 buffer layers," J. Cryst. Growth, vol.364, Iss.2, pp.30-33, Feb. 2013.
- [8] T. Kawaharamura, G. T. Dang, and M. Furuta, "Successful growth of conductive highly crystalline Sn-doped α - Ga_2O_3 thin films by fine-channel mist chemical vapor deposition," Jpn. J. Appl. Phys. vol.51, no.4, 040207(1-3), Apr. 2012.
- [9] K. Akaiwa and S. Fujita, "Electrical conductive corundum-structured α - Ga_2O_3 thin films on sapphire with tin-doping grown by spray-assisted mist chemical vapor deposition," Jpn. J. Appl. Phys., vol.51, no.7, 070203(1-4), July 2012.
- [10] K. Akaiwa, K. Kaneko, and S. Fujita, "Electrical properties of Sn-doped corundum-structured Ga_2O_3 thin films on sapphire substrates," to be presented at 42nd Int. Symp. Compound Semiconductors (ISCS), Santa Barbara, USA, June 2015.
- [11] T. Uchida, T. Kawaharamura, M. Furuta, and S. Fujita, "Ultrasonic-assisted mist deposition for green materials and devices," no. P-3-1, presented at 45th Int. Conf. Solid State Devices and Materials (SSDM), Fukuoka, Japan, Sept. 2013.