



国立研究開発法人物質・材料研究機構
ナノアーキテククス材料研究センター (MANA)
半導体材料分野
超薄膜エレクトロニクスグループ
研究員 女屋 崇



超薄膜エレクトロニクスグループについて

先端半導体技術は、昨今急速に発展している高度デジタル社会を支えるだけでなく、カーボンニュートラルの早期実現や国家安全保障にも直結する重要な基盤技術として大きな注目を集めています。一方、これまで半導体デバイスの高性能化を牽引してきた微細化技術は物理的限界を迎えつつあり、その構成要素である薄膜が果たす役割の重要度が急激に高まっています。そこで我々は、先端半導体プロセスの薄膜形成手法として必要不可欠な原子層堆積(ALD)法の特徴を活かして、ナノメートルスケールでも機能を発揮する機能性薄膜材料の探索に取り組んでいます。

ALD 法を用いた薄膜材料探索

図1に示すように、ALD法は有機金属原料と反応性ガスを交互に供給して薄膜を形成する手法で、(i)~(iv)の計4ステップを1サイクルとして構成されています。ALD法の特徴は、ステップ(i)で有機金属原料が基板表面に飽和化学吸着することを利用した成膜手法であるということです。従って、1サイクルで成膜される膜厚は有機金属原料の飽和吸着量により決定されるため、その成膜速度は一般に1サイクルで1原子層以下で一定となります。また、先端半導体デバイスに要求される複雑な3次元構造の表面であっても、有機金属原料の供給を制御して基板表面に飽和化学吸着させることで、平面上と同様に均質な薄膜を成膜できます。我々はこれら特徴を利用して、一層ごとに異なる材料を積層したり、ALDサイクル数を変えて各層の膜厚を調整することで、原子層オーダーで超格子薄膜を設計・作製しています。

ALD 法における酸化剤の重要性和オゾンへの期待

ALD膜の膜質は、酸化プロセスに大きく依存します。図1に示したALD法による Al_2O_3 膜の成膜を例にとると、ステップ(iii)の酸化プロセスでは、理想的には酸化剤である H_2O の供給により基板表面に吸着した $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ 原料が酸化されて $-\text{OH}$ 基が生成され、配位子は CH_4 として脱離します。しかし、この有機金属原料の酸化が不十分であると、配位子に含まれるCやHが不純物として膜中に取り込まれてしまい、膜の純度や密度の低下に繋がってしまいます。有機金属原料の種類によっては、酸化剤との反応性に選択性があることや、低温では酸化反応が起こりにくいことがあるため、高品質薄膜を形成するためには、酸化剤を適切に選択する必要があります。

そこで我々は、一般的な酸化剤である H_2O と比べて酸化力の高い O_2 プラズマやオゾンに着目して、酸化剤の違いがALD膜の膜質に与える影響を調査しています[1]。例えば、次世代不揮発性メモリへ向けた新規候補材料である HfO_2 系強誘電体薄膜[2]に関する研究では、ALD酸化剤として O_2 プラズマを用いることで、 H_2O を用いた場合と比べて膜中不純物濃度が大幅に低減され、その結果、 HfO_2 系強誘電体薄膜の低温形成(300°C)に成功しています[3,4]。このように、酸化剤を適切に選ぶことでプロセス温度の低温化を実現できるため、低耐熱性基板を用いたフレキシブルデバイスへの応用も期待できます。一方、 O_2 プラズマは、その反応性の高さから基板へのダメージや意図しない界面層が形成されること[5]、イオンやラジカルは分子構造を有する酸化剤よりも失活しやすいという欠点があります。そこで我々は、供給濃度や圧力等を比較的容易に調整可能なオゾンに注目しています。オゾン特有の利点を活かして、高い寿命を維持しつつ反応性や酸化力を制御可能な供給手法が確立されれば、先端半導体技術のブレイクスルーとなり得るのではないかと期待して研究を進めています。

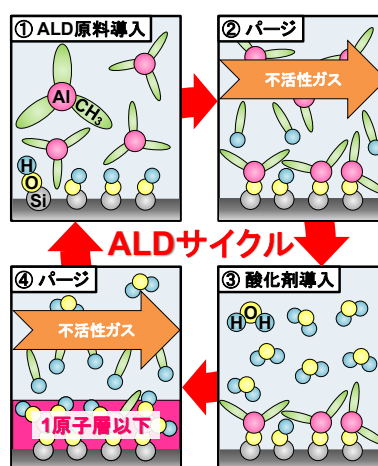


図1 ALD原料として $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ 、酸化剤として H_2O を用いたALD法による Al_2O_3 膜の成膜例。

参考文献

- 1) T. S. Bösccke et al., *Appl. Phys. Lett.* 99, 102903 (2011).
- 2) J.-H. Kim, T. Onaya et al., *ACS Appl. Electron. Mater.* 5, 4726 (2023).
- 3) T. Onaya et al., *Microelectron. Eng.* 215, 111013 (2019).
- 4) T. Onaya et al., *APL Mater.* 9, 031111 (2021).
- 5) T. Onaya et al., *Solid-State Electron.* 210, 108801 (2023).

連絡先：女屋 崇 (オナヤ タカシ)

住所：〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1

Tel : 029-860-4770

E-Mail : ONAYA.Takashi@nims.go.jp

超薄膜エレクトロニクスグループ HP :

<https://www.nims.go.jp/mana/jp/research/semiconductor-materials/thin-film-electronics.html>