

# 不揮発性 MOS 型光位相シフタに向けた強誘電性 $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ を用いた ウェハボンディングの検討

## Examination of wafer bonding using ferroelectric $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ for nonvolatile MOS optical phase shifter

渡辺耕坪, トープラサートポン カシディット, 関根尚希, 高木信一, 竹中充 (東大工)

°K. Watanabe, K. Toprasertpong, N. Sekine, S. Takagi, and M. Takenaka (The University of Tokyo)

E-mail: watanabe@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

### 【はじめに】

深層学習などの計算を光集積回路上で高速かつ低消費電力で行うコンピューティング技術が注目を集めているが、更なる高速化、低消費電力化のために不揮発性光位相シフタは有望であり、実現する手法の一つとして強誘電体  $\text{BaTiO}_3$  を用いる手法が提案されている[1]。しかし、 $\text{BaTiO}_3$  は強誘電性を発現する厚さが比較的厚い、CMOS プロセスと整合しないなどの問題を抱えている。一方で 2011 年に報告された  $\text{HfO}_2$  系強誘電体は  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{ZnTi})\text{O}_3$  などの従来の強誘電体と比べて薄膜でも大きな強誘電性を発現させ、MOS トランジスタにおけるゲート絶縁膜の材料とすることができる強誘電体として注目を集めている。特に  $\text{HfO}_2$  に Hf と同量の Zr をドーピングした  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$  (HZO) は ALD での堆積が可能であり、プロセス条件の容易性、低温プロセスが可能などの利点を持ち、盛んに研究が進められている[2]。我々は超低消費電力光位相シフタとして III-V/Si ハイブリッド MOS 型光位相シフタ[3], [4]の研究を進めてきた。HZO を MOS 型光位相シフタの絶縁膜として用いることで従来の MOS 型光位相シフタに不揮発性メモリ機能を付与することが期待できる。HZO の強誘電性発現のためには、HZO 上に Capping layer (CL) を形成したうえでアニールを行う必要がある。CL には TiN, TaN などの金属が主に用いられている。しかし、光素子応用においてはアニール後に金属を除去する必要がある、強誘電性の低下や、金属残留などが懸念される。そこで本研究では、CL を  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に変更して強誘電性を発現させ、CL として用いた  $\text{Al}_2\text{O}_3$  表面に対して貼り合わせを行った結果、十分な貼り合わせ強度を得たので報告する。

### 【 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /HZO/Si MOS キャパシタ作製】

高濃度 p 型 Si 基板上に ALD により HZO を 10 nm,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を 1.5 nm 堆積し、真空中で 40 分間、500 °C でアニールした後、電極として Al を蒸着し、MOS キャパシタを作製した。作製した素子に対して  $PV$  ヒステリシス測定を行った結果を Fig 1 に示す。最大印加電圧は 4.0 V, 4.5 V, 5.0 V とした。最大印加電圧 5.0V 時に残留分極 17.8  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  が得られ、CL を  $\text{Al}_2\text{O}_3$  とした場合でも、十分な強誘電性を発現させることに成功した。

【貼り合わせ強度評価】 Si 基板上に HZO を 10 nm,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を 0.5 nm 堆積し、真空中で 40 分間、500 °C でアニールした。AFM を用いて表面粗さを計測した結果表面粗さの RMS は 0.4 nm であり、ウェハボンディングに適した平坦性を有していることが分かった。もう一方の Si 基板上に  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を 0.5 nm 堆積し、真空中で 40 分間、500 °C でアニールし、両ウェハを超音波洗浄ののち貼り合わせ、真空中で 1 時間、300 °C でアニールを行った。作製した貼り合わせ界面に対し、クラックオープニング法によって接合強度評価を行った結果を Fig 2 に示す。表面エネルギーは 1.05  $\text{J}/\text{m}^2$  であって、標準的な CL として TiN を用いて強誘電性を発現させ、アンモニア過水により TiN をウェットエッチングし露出させた HZO 表面に対して  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を貼り合わせた結果と比較すると 2.8 倍の強度を実現できた。これにより、CL として  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を用いることで強誘電性 HZO を有する貼り合わせ MOS キャパシタが作製可能であることが分かった。

### 【謝辞】

本研究の一部は JST CREST 特定課題調査 (JPMJCR1907) および旭硝子財団研究助成の支援により実施した。

### 【参考文献】

- [1] P. Stark et al., 2019 CLEO/Europe-EQEC 24 8803(2019)
- [2] T. S. Böescke et al., IEDM, 547(2011).
- [3] J. H. Han et al., Nat. Photonics, 11, 486 (2017).
- [4] M. Takenaka et al., J. Light. Technol., 37, 1474(2019).

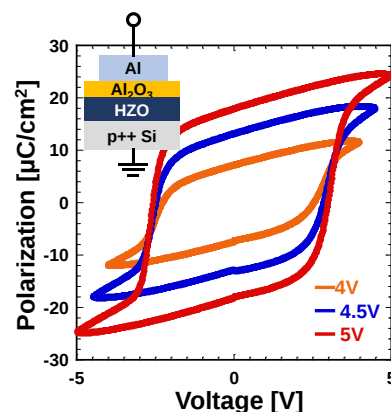


Fig. 1: Polarization-hysteresis loop in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  capping HZO/Si MOS capacitor.

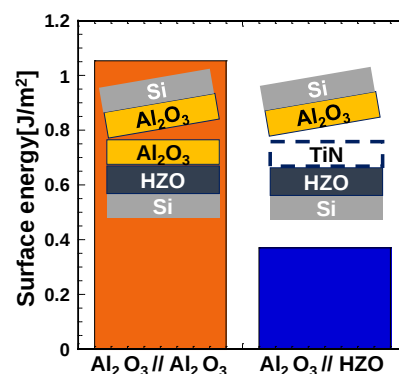


Fig. 2: Comparison of surface energies of bonded  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  pairs and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -HZO (after TiN removal) pairs.