

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560353

研究課題名（和文）ギガヘルツ動作を可能にする酸化亜鉛トランジスタの開発

研究課題名（英文）Development of ZnO-based transistors operated in gigahertz frequency range

研究代表者

佐々 誠彦（SASA SHIGEHICO）

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：50278561

研究成果の概要（和文）：ギガヘルツ帯で動作する酸化亜鉛系トランジスタを開発した。単結晶 ZnO/ZnMgO ヘテロ構造を利用した MIS-FET を試作し、高周波特性を測定し、電流利得の遮断周波数を測定し、1.7 GHz とギガヘルツ動作が可能なることを立証した。また、静特性と高周波特性の関係を明らかにし、スパッタ成膜による酸化亜鉛系トランジスタでも同等の高速動作が可能なることを示した。

研究成果の概要（英文）：We developed high-performance ZnO-based FETs operated in gigahertz frequency range. First, a hetero-MIS transistor was employed to exhibit high-frequency performance. A very high cutoff frequency of as high as 1.7 GHz was obtained. Sputter-deposited ZnO thin-film transistors were proved to exhibit comparable high-frequency performance by measuring their static performance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：酸化亜鉛，マイクロ波

## 1. 研究開始当初の背景

酸化亜鉛を含む酸化物半導体はバンドギャップを紫外領域にもつため、可視光を透過する透明半導体である。また、同程度のバンドギャップを持つワイドギャップ半導体として実用化が進む SiC や GaN の成膜温度が 1000°C を超える高温であるのに対して、500°C 程度あるいはさらに低温での成膜が可能であるという特長を有している。スパッタ法などではプラスチック上にも成膜が可能で、このような膜をチャネル層とした薄膜ト

ランジスタは透明・フレキシブルという特長を有し、ディスプレイ用の薄膜トランジスタに留まらず、広い分野への応用が期待される。研究代表者らは、このような状況で、高性能な酸化亜鉛系トランジスタの開発に取り組み、高い伝達コンダクタンスが実現可能なことを示すことに成功するとともに、高電界下での輸送特性など、従来知られていなかった材料物性についても明らかにしてきており、酸化亜鉛系トランジスタの高速性能に関する知見が応用上重要になってきている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、トランジスタとして高い伝達コンダクタンスを有する酸化亜鉛系トランジスタの高周波特性を評価するとともに、ギガヘルツ領域で動作可能なトランジスタを開発することによって、透明・フレキシブルかつ高性能なトランジスタとして広い応用分野に使用できる薄膜トランジスタを開発することにある。

## 3. 研究の方法

(1) 酸化亜鉛の高周波特性を評価するため、最も品質の高い材料を利用してトランジスタの作製を行うため、分子線結晶成長法により成膜した、高品質な単結晶 ZnO/ZnMgO ヘテロ構造を作製した。フォトリソグラフィなどにより、素子の形状を規定し、HfO<sub>2</sub>をゲート絶縁膜に使ったヘテロ MIS-FET を作製した。ゲート長 1 μm の素子を試作し、トランジスタ静特性を評価するとともに、高周波特性を評価した。

トランジスタの試作に使用したのは、単結晶 ZnO/ZnMgO ヘテロ構造で、*a* 面サファイア基板上に低温成長バッファ層を介して 200 nm の ZnMgO 層を成長し、その上に 15 nm の ZnO チャンネル層および 1.5 nm の ZnMgO キャップ層を設けた構造である (図 1)。

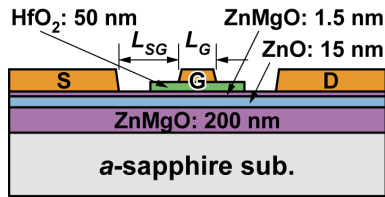


図 1. 高周波特性を評価するために試作したヘテロ MIS 構造トランジスタの断面構造

チャンネル層には高濃度の二次元電子ガス層が形成され、高い移動度 (165 cm<sup>2</sup>/Vs) と濃度 (8.5 x 10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>) を示した。

(2) 高周波特性を評価するために、短ゲート長の素子 ( $L_g = 1$  and 2 μm) を作製した。

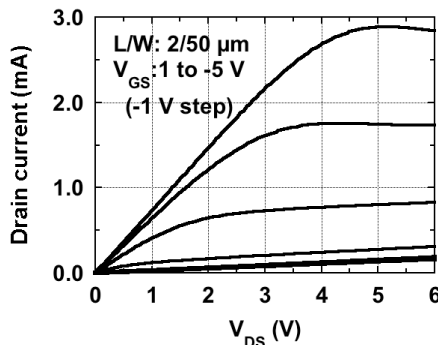


図 2. 試作した素子の出力特性

デバイス形状は CH<sub>4</sub> と CF<sub>4</sub> の混合ガスによるプラズマエッチングにより行い、オーミック電極を In(40 nm) / Au(200 nm) の蒸着および 400°C, 1 min. の合金化によって形成した。ゲート絶縁膜には HfO<sub>2</sub> を使い、ゲート電極は Ti/Au により形成した (図 1)。

試作したゲート長 2 μm のトランジスタの静特性を評価したところ、伝達コンダクタンスは 23 mS/mm と良好な値を得た。

(3) これらの素子を用いて、高周波特性を評価した。電流利得および最大発振周波数の周波数特性を評価した結果が図 3 である。

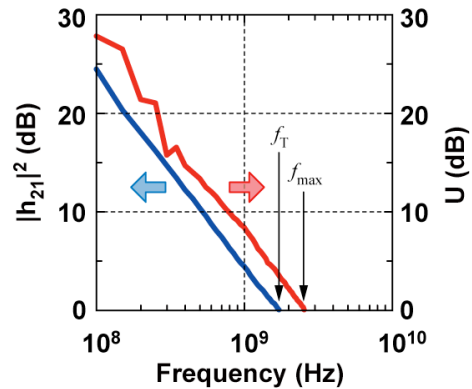


図 3.  $L_g = 1$  μm の素子の高周波特性

電流利得の遮断周波数  $f_T$  が 1.7 GHz, さらに、最大発振周波数  $f_{max}$  が 2.4 GHz と、ともに 1 GHz を超える高い値が確認され、単結晶 ZnO 系 FET の高速性、すなわち、ギガヘルツ動作の可能性を実証する結果が得られた。

遮断周波数はゲート長および電子の飽和速度から次式によって算出することができる。

$$f_T = \frac{v_s}{2\pi L_g} = \frac{g_m}{2\pi C_g}$$

他機関から報告されている結果も検討した結果、酸化亜鉛系トランジスタで報告されている高周波素子は、飽和速度が 10<sup>6</sup> cm/s 程度であることが判明した。また、得られた遮断周波数は、静特性の評価から得られる伝達コンダクタンス  $g_m$  と絶縁膜や層構造から計算されるゲート容量  $C_g$  から算出したものともほぼ一致することが分かった。したがって、同程度のゲート長の素子で、高い伝達コンダクタンスをもつ素子を実現できれば、優れた高周波特性が実現できるものと期待することができる。

また、厚膜の酸化亜鉛では一桁程度高い電子速度が観測されていることや、理論的にはさらに高い飽和速度が予測されていること

から、素子構造の最適化でさらなる高速化が実現できるものと考えられる。

(4) そこで、高い伝達コンダクタンスの実現が、高周波特性に重要であることから、分子線結晶成長法より一般的に使用される成膜法であるスパッタ法を用いて成膜した ZnO チャンネル層を利用した素子で高い伝達コンダクタンスの実現を目指した。

マグネトロンスパッタ法および対向ターゲット式スパッタ法を用いて、ガラス基板上に、高性能な酸化亜鉛系薄膜トランジスタの作製を検討した。

チャンネル層の抵抗値を低減するために、In を数原子%添加した ZnO: In をチャンネル層とし、その厚さを検討した。

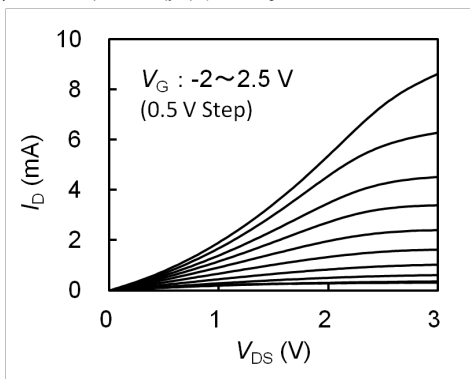


図 4. 対向ターゲット式スパッタ法によりチャンネル層を成膜した ZnO: In 薄膜トランジスタの特性

チャンネル層の厚さが 40 nm の場合に、図 4 に示すように、ゲート長が 1  $\mu\text{m}$  の素子において、単結晶ヘテロ構造を利用して作られたトランジスタを大きく上回る、94 mS/mm という高い伝達コンダクタンスが得られた。

この結果は、酸化亜鉛系薄膜トランジスタの高い高速性能を示すものである。

#### 4. 研究成果

(1) 単結晶 ZnO/ZnMgO ヘテロ接合を利用した MISFET を作製し、その高周波特性を評価した結果、電流利得の遮断周波数および最大発振周波数がともに 1 GHz を上回る素子が実現でき、酸化亜鉛系トランジスタの高速性を立証することができた。

(2) 高速性を決める要因について検討を行い、酸化亜鉛系トランジスタの遮断周波数は、他機関からの報告も含め、飽和速度  $1 \times 10^6$  cm/s 程度で説明できることを明らかにした。また、この結果は、伝達コンダクタンスとデバイス構造から算出されるゲート容量を使って求められる遮断周波数の値とも一致することから、静特性で高い伝達コンダクタンスを有する素子が高周波特性にも優れることを示

すことが示された。

その結果をもとに、分子線結晶成長法ではなく、より一般的に使用される成膜法であるスパッタ法を用いて、高性能な薄膜トランジスタの作製を検討した結果、対向ターゲット法により作製した ZnO: In チャンネル層 40 nm のトランジスタにおいて、単結晶ヘテロ構造を使ったトランジスタを上回る高い伝達コンダクタンスを実現できることが示され、同時に、酸化亜鉛系トランジスタのギガヘルツ領域に達する高速性能が示され、当初の目的が達成されたものと結論される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① R. Morita, T. Maemoto, and S. Sasa, Effects of post annealing on IZO thin-film transistor characteristics, 2012 Int. Mtg. for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), 2012, pp.118-119, 査読無.  
DOI: 10.1109/IMFEDK.2012.6218610
- ② 佐々誠彦, 矢野満明, 前元利彦, 小池一步, 尾形健一, 高性能酸化亜鉛系 FET と酸化物デバイス応用の広がり, 電子情報通信学会誌 Vol.95-4, 2012, pp.289-293, 査読有.  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009437460>
- ③ 尾形, 土橋, 小池, 佐々, 井上, 矢野, 水溶液プロセスによる酸化亜鉛ナノロッドの製作とバイオセンサへの応用, 材料 Vol. 60, 2011, pp. 976-982, 査読有.  
DOI: 10.2472/jsms.60.976
- ④ 小池, 天野, 青木, 藤本, 佐々, 矢野, 権田, 石神, 久米, 単結晶酸化亜鉛薄膜に対する 8 MeV プロトンの照射効果, 材料 Vol. 60, 2011, pp. 988-993, 査読有.  
DOI: 10.2472/jsms.60.988
- ⑤ T. Aoki, R. Fujimoto, K. Koike, S. Sasa, M. Yano, S. Nagamachi, and K. Yoshida, Effects of N and P ion-implantation and post-annealing on single-crystalline ZnO films, 30th Electronic Materials Symposium, 2011, pp. 287-288, 査読有.  
DOI, URL なし.
- ⑥ T. Aoki, R. Fujimoto, K. Koike, S. Sasa, M. Yano, S. Gonda, R. Ishigami, and K. Kume, Irradiation effect of 8 MeV protons on single-crystalline zinc oxide, Proc. of Int. Meeting for Future of Electron Devices, 2011, pp. 88-89, 査読無.  
DOI: 10.1109/IMFEDK.2011.5944858
- ⑦ T. Yabe, T. Aoki, T. Higashiyama, K. Koike, S. Sasa, M. Yano, S. Gonda, R. Ishigami, K. Kume, Radiation-proof characteristic of

ZnO/ZnMgO HFETs, Proc. of Int. Meeting for Future of Electron Devices, 2011, pp. 90-91, 査読無.

DOI: 10.1109/IMFEDK.2011.5944859

- ⑧ T. Higaki, T. Tachibana, Y. Kimura, T. Maemoto, S. Sasa, and M. Inoue, Flexible zinc oxide thin-film transistors using oxide buffer layers on polyethylene naphthalate Substrates, Proc. of Int. Meeting for Future of Electron Devices, 2011, pp. 92-93, 査読無.

DOI: 10.1109/IMFEDK.2011.5944860

- ⑨ 矢野満明, 小池一步, 佐々誠彦, 前元利彦, 井上正崇, 酸化亜鉛トランジスターの開発とバイオセンサー応用, 材料, vol. 60, 2011, pp. 447-456, 査読有.

DOI: 10.2472/jsms.60.447

- ⑩ S. Sasa, T. Maitani, Y. Furuya, T. Amano, K. Koike, M. Yano, and M. Inoue, Microwave performance of ZnO/ZnMgO heterostructure field effect transistors, Phys. Status Solidi A 208, 2011, pp. 449-452, 査読有.

DOI 10.1002/pssa.201000509

〔学会発表〕(計4件)

- ① 孫屹, 木村祐太, 前元利彦, 佐々誠彦, フレキシブル酸化亜鉛透明薄膜トランジスタの開発, 電気材料技術懇談会, 大阪, 2012. 7. 12.
- ② R. Morita, T. Maemoto, and S. Sasa, Effects of post annealing on IZO thin-film transistor characteristics, 2012 Int. Mtg. for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), PB-08, Osaka, 2012. 5. 10.
- ③ M. Yano, K. Koike, K. Ogata, T. Nogami, S. Tanabe, S. Sasa, Zinc oxide-based biosensors, 16<sup>th</sup> Semiconducting and Insulating Materials Conference, Stockholm, Sweden, 2011. 6. 22.
- ④ S. Sasa et. al., Microwave Performance of ZnO/ZnMgO HFETs, Int. Symp. on Compound Semiconductors, Takamatsu, 2010. 6. 2.

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.oit.ac.jp/www-ee/server/semicon/01\\_People.shtml](http://www.oit.ac.jp/www-ee/server/semicon/01_People.shtml)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐々 誠彦 (SASA SHIGEHICO)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：50278561

### (2) 研究分担者

前元 利彦 (MAEMOTO TOSHIHIKO)