

称号及び氏名 博士（工学） 福島 匡泰

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 31 日

論文名 Electrical Property of Controlled-Polarization Type
Ferroelectric-Gate Thin Film Transistors
(分極機能型強誘電体ゲート薄膜トランジスタの電気特性)

論文審査委員 主査 藤村 紀文

副査 石田 武和

副査 河村 裕一

論文要旨

次世代不揮発性メモリの候補の一つとして電界効果トランジスタ(FET)のゲート絶縁膜を強誘電体に置き換えた強誘電体ゲート FET が研究されている。強誘電体ゲート FET(FeFET)は強誘電体の自発分極(P_{SFE})によって、チャネルのキャリア濃度を制御するため、書き込み時間が 100 ns 以下と速く、書き換え回数が 10^{14} 回以上と多く、また非破壊読み出しであり、かつ 1 つのトランジスタが 1 つのメモリセルを構成するので大容量化も期待できる等の利点を有したメモリデバイスである。

FeFET は Si 基板上に強誘電体を積層させた Metal-Ferroelectric-Semiconductor (MFS) 構造から研究が開始されたが、強誘電体層と Si チャネル界面における元素の拡散や Si 上に形成する酸化物の問題によって良好なトランジスタ特性やメモリ特性を得ることが困難であった。現在では、良好な強誘電体/半導体積層界面を得る方法のひとつとして、Si ではなく酸化物半導体を用いた MFS

構造の強誘電体ゲート薄膜トランジスタ(FeTFT)が提案されている。しかし、一般的に、Si と比較して大きなバンドギャップを有する酸化物半導体では反転層を形成することが困難であるため、それをチャンネルに用いた TFT は蓄積・空乏モードで動作する。空乏層形成時には、n 形半導体のシートキャリア濃度を 10^{12} cm^{-2} 程度と仮定すると、イオン化したドナーによる電荷密度は $0.1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 程度と算出される。一方、典型的な P_{SFE} は $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以上であり空乏層の電荷密度よりもはるかに大きい。したがって、 P_{SFE} が空乏層を形成する方向に反転する場合には電荷密度の不整合が生じるために、スイッチング電圧の増加や強誘電体の単分極化が困難といった問題が生じることが予想される。そこで、本研究では自発分極を有する酸化物半導体（極性半導体）をチャンネルに用いることによって電荷不整合を低減した新規な FeTFT（分極機能型 FeTFT）を提案する。分極機能とは、空乏層形成時に極性酸化物半導体の自発分極(P_{SPS})と P_{SFE} の方向が並行に整列するようにデバイス構造を設計することで、 P_{SPS} と P_{SFE} の分極間相互作用によって電荷の不整合を低減し、スイッチング電圧の低減や P_{SFE} の単分極化などデバイス特性が向上するような機能のことである。また、このような P_{SPS} と P_{SFE} のような異種物質間の分極相互作用をデバイスに応用した例はなく、新たな P_{SFE} の制御法としても興味深い。さらに、FeTFT の場合、常誘電体を用いた TFT とは異なりチャンネル領域のキャリア濃度の変調を解析するための物理的現象が明らかになっておらず、その理論が構築されていないことも問題である。

以上の背景を踏まえて、本論文では極性酸化物半導体として ZnO を、強誘電体として YMnO_3 を用いて分極機能型 FeTFT を作製した。ZnO と YMnO_3 の P_{SPS} と P_{SFE} はそれぞれ $3\sim 5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ と $5.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ と同程度であるので、強誘電体/半導体界面に生じる電荷不整合の低減に適した物質系である。作製した TFT の電気特性から分極機能型 FeTFT のチャンネルのキャリア濃度や P_{SPS} の存在が P_{SFE} の反転に及ぼす影響について議論し、分極機能型 FeTFT の設計指針に関する知見を得た。さらに、チャンネルのキャリア濃度の変調状態は、TFT の伝導特性からは解析することが出来なかったが、誘電特性評価の手法を用いて P_{SFE} の分極方向を解析することで初めて明らかにすることができた。

本論文は全6章から構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第1章では本研究の背景、目的および内容について概略を示し、本論文の構成について述べた。

第2章では ZnO と YMnO₃ のヘテロ構造を作製し、X線や電子線回折、原子間力顕微鏡によってその結晶性や表面構造を評価し、それらの結果を基に製膜条件の最適化を行った。ZnO と YMnO₃ のヘテロ構造としては、ボトムゲート型の ZnO/YMnO₃ とトップゲート型の YMnO₃/ZnO の2種類がある。それぞれの構造に対して製膜条件の最適化を行った結果、どちらの構造においても ZnO および YMnO₃ がエピタキシャル成長したヘテロ構造を得ることができた。YMnO₃ をゲート絶縁膜、ZnO をチャンネルとした TFT が動作するには、チャンネル界面で電荷の蓄積・空乏が生じ、蓄積電荷がゲート絶縁膜をバリアとして伝導する必要がある。そのために、接合界面のバンド構造を放射光を用いた X線光電子分光測定結果から求めた。その結果、ZnO/YMnO₃ 構造においては ZnO の伝導帯よりも 0.44 eV 高いエネルギー準位に、YMnO₃/ZnO 構造においては 0.34 eV 低いエネルギー準位に YMnO₃ の Mn の d 軌道があることがわかった。このように、ボトムゲート型でのみ YMnO₃ が ZnO 内を伝導する電子のバリアとして働くことが明らかになったので、次章以降では、ボトムゲート型 ZnO/YMnO₃ を用いて分極機能型 FeTFT の作製と評価を行った。

第3章では Au/Ti/ZnO/YMnO₃/Pt/Sapphire 構造の TFT を作製し、ドレイン電流-ドレイン電圧 (I_D - V_D)測定およびドレイン電流-ゲート電圧 (I_D - V_G)測定からその特性を評価した。その結果、作製した TFT は、蓄積・空乏状態を形成し On-Off 動作するノーマリオンの TFT であることが明らかになった。しかし、不揮発性動作の指標となるメモリウインドウを有する I_D - V_G 特性を示す試料を得ることは出来なかった。これは ZnO のシートキャリア濃度が $1.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ と非常に低いため、 P_{SFE} の反転で空乏層を形成する前に強誘電体の常誘電体成分によって空乏層が形成し、 P_{SFE} が反転できなかったことが原因であると考えられる。そこで、ZnO にドナーである Al を 0.001%、0.1%、2% の濃度で添加し、チャンネルのキャリア濃度の効果を検討した。YMnO₃ の飽和分極量 ($5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) で制御できるチャンネル領域のシートキャリア濃度は $3.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ である。チャンネルが ZnO:Al 0.1% (シートキャリア濃度: $3.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) の TFT では、チャンネルのキャリア濃度がゲート強誘電体の誘

起出来る最大分極量よりも大きく、チャンネルのキャリア濃度を変調することが出来なかった。一方、チャンネルに ZnO:Al 0.001%($4.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$)と ZnO:Al 2%($1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)を用いた TFT では、 $\pm 2\text{V}$ の低電圧で TFT 動作し、良好なメモリ特性が得られた。これは P_{SPS} を利用することとチャンネルへのキャリアドーピングによって電荷のミスマッチが低減し、 P_{SFE} の反転が容易になったためであると考えられる。これらの結果から、 P_{SFE} の反転には、チャンネル領域のキャリア濃度が、ゲート領域に静電的に誘起される電荷密度よりも高く、強誘電体の飽和分極によって生じる電荷密度よりも低いことが必要であること、 P_{SPS} によって電荷不整合が低減し、低電圧でメモリ動作する TFT が得られることが明らかになった。

第 4 章では、 P_{SFE} によって形成された蓄積層や空乏層が、ソース、ゲート電極領域およびチャンネルの誘電特性を変化させる事を利用して、分極機能型 FeTFT のチャンネル領域の蓄積・空乏状態を解析した。正のゲート電圧を印加した状態で測定した容量-電圧(C-V)特性における蓄積容量から、チャンネルが低抵抗になり、ソース電極とドレイン電極が電氣的に接続されていることが確認できた。負のゲート電圧印加時には、その蓄積側での静電容量は、蓄積容量から大幅に減少しており空乏層の形成が示唆された。より詳細に評価するために ZnO、蓄積層(空乏層)、 YMnO_3 層が直列接続した等価回路を用いて cole-cole plots の解析を行った。その結果、ゲート電圧が+3V の時には蓄積領域の面積はソース電極とドレイン電極およびチャンネル領域の面積の合計よりも大きくなり、チャンネルが蓄積状態を形成していることがわかった。また、-3V の時には 1.1 nm の空乏層が形成しており、 P_{SFE} が反転していることが明らかになった。以上の結果から、C-V および cole-cole plots を用いたソース・ゲート電極間の誘電特性を解析することによって、チャンネルの蓄積・空乏状態を評価できることが明らかになった。

第 5 章では分極機能型 FeTFT のチャンネル下の P_{SFE} の方向の変化と TFT 特性の関係について議論するため、チャンネルのコンダクタンスの変化をインピーダンス測定から解析した。解析に用いた等価回路は TFT のチャンネル領域の抵抗成分と静電容量成分を考慮して作成した RC 集中定数回路である。解析の結果、1V 以上のゲート電圧印加時にはチャンネル下の P_{SFE} はほぼ全て上向きで

あり、 $-1V$ 近傍ではソース電極近傍のみ下向きとなり、さらに $-2V$ 以下ではチャンネル全体の P_{SFE} が下向きになることがわかった。この結果は I_D-V_G 特性におけるオン・オフ動作とも良い相関を示している。このように、チャンネル下の P_{SFE} の方向をインピーダンス解析から決定できることを見出した。さらに、 $YMnO_3$ の抗電圧幅 ($1.5V$) の 2 倍程度の電圧挿引でチャンネルの全領域の P_{SFE} を反転できていることから、 P_{SPS} と P_{SFE} の分極間の相互作用によって、スイッチング電界の低減が実現できることを示した。

第 6 章では、本研究で得られた研究成果を総括した。

学位論文審査結果の要旨

本論文では、蓄積・空乏モードで動作する薄膜トランジスタ(TFT)のゲート絶縁膜を強誘電体で置き換え不揮発性を付加した強誘電体ゲート TFT(FeTFT)の大きな問題点である、オフ時のチャンネル/強誘電体界面における電荷不整合を抑制するために極性半導体の自発分極 (P_{SPS})を利用する分極機能型 FeTFT を提案した。極性酸化物半導体として ZnO を、強誘電体として $YMnO_3$ を用いた分極機能型 FeTFT を作製し、その伝導特性や誘電特性の評価を行った。それらの結果から分極機能型 FeTFT のチャンネルのキャリア濃度や P_{SPS} の存在が強誘電体の自発分極(P_{SFE})の反転に及ぼす影響および、FeTFT の設計指針について議論し、以下の成果を得ている。

- (1) ボトムゲート型 $ZnO/YMnO_3$ とトップゲート型 $YMnO_3/ZnO$ を作製し、そのバンド構造を X 線光電子分光測定結果から求め、本材料系においてはボトムゲート型が有利であることを示した。また、作製したボトムゲート型分極機能型 FeTFT が $-1V\sim 2V$ の低電圧でオン・オフ動作することを明らかにした。
- (2) TFT の伝導特性からは解析することが困難であったチャンネル領域の蓄積・空乏状態を

ソース・ゲート電極間の容量-電圧特性から、また、チャンネル領域の P_{SFE} の反転状態はインピーダンス測定によるチャンネルのコンダクタンス変化の解析によって評価できることを明らかにした。

- (3) 以上の解析から、自発分極を有する極性半導体をチャンネルに用いた分極機能型 FeTFT は-1V~2V の低電圧で、チャンネル領域の P_{SFE} を完全に反転させることが出来ており、この FeTFT が P_{SPS} と P_{SFE} の分極間の相互作用によって、低電圧動作が可能であることを示した。

これらは、FeTFT の問題点の解決に向けたブレークスルーを示しているだけでなく、チャンネル界面における強誘電体の分極反転に関する知見を得るための手法を提案しており、FeTFT の動作を解析する上で非常に有益であると考えられる。以上の成果は、近年不揮発性トランジスタへの期待が高まる中、FeTFT の設計指針を提供するのみならず、本分野の学術的および産業的な発展に大きく貢献することである。また、申請者が自立して研究活動を行うために必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。