

強磁性を有する強誘電体とSi系希薄磁性半導体の接合を用いた新規な電界効果型素子
Novel Field Effect Transistors using the Interface between Ferromagnetic-Ferroelectrics and Si based Magnetic Semiconductors

藤村 紀文 (FUJIMURA Norifumi)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要：強磁性強誘電体 YbMnO_3 を用いた強誘電体ゲートトランジスタを基軸とし、Si系磁性半導体をチャンネル層に用いた新規な電界効果型トランジスタを開発することを最終目的として研究を開始しました。両者の接合界面の物理、磁性を有する強誘電体の電界効果やその半導体キャリア輸送に及ぼす影響などの基礎物性を把握でき、3つの最終デバイスの形態を提案するに至りました。

研究分野／科研費の分科・細目／キーワード

電子デバイス、強誘電体デバイス、磁気デバイス／電気電子工学／電子・電気材料／マルチフェロイック、強誘電体ゲートFET、Si系磁性半導体、 YMnO_3

1. 研究開始当初の背景・動機

本研究で提案するトランジスタは基本的に強誘電体をゲートとする1T型FETです。この構造は、スケーリング則が成り立ち、既に市場に出ている強誘電体メモリの最大の問題点である高集積化を大幅に改善できる素子として期待されています。すでに、東工大を拠点に経産省のプロジェクトが遂行され、この分野は欧米に追従を許さないほど日本が先頭を走っています。

磁性を有する強誘電体のマルチフェロイック物性によって、Si系磁性半導体のスピンを制御し、ソースドレイン間電流の変調やメモリ効果の付加を可能にする新規なトランジスタの基礎動作確認とそのデバイス化に向けた研究に着手しました。

2. 研究の目的

強磁性強誘電体 YbMnO_3 を用いた強誘電体ゲートトランジスタを基軸とし、Si系磁性半導体をチャンネル層に用いた新規な電界効果型マルチフェロイックトランジスタを開発することが最終目的です。両者の接合界面の物理、磁性を有する強誘電体の電界効果やその半導体キャリア輸送に及ぼす影響等の基礎物性を把握することも重要な目的です。

3. 研究の方法

現有のMBE装置でSi系磁性半導体チャンネルを、PLD装置でゲート絶縁膜を作製し、FET作製プロセスは本学クリーンルームおよび大阪府立産業技術総合研究所にて行いました。X線回折装置、磁気輸送特性評価用クライオスタット、純水製造装置、小型PLD装置などを購入しました。

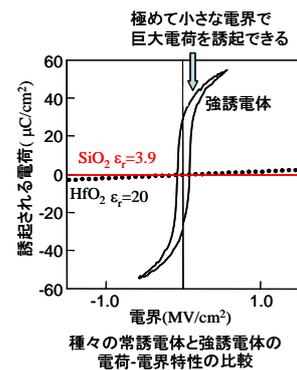
4. 研究の主な成果

当初一番大きな問題と考えていたのは、Si系磁性半導体が、キャリア誘起の強磁性であるため、如何にして絶縁性の強磁性半導体を作製し、チャンネルに用いるかということでした。しかし

ながら、強誘電体の大きな分極によって金属的な半導体が空乏化することが東工大のグループから提案され、大きな問題点が解決しました。その説明図を上を示します。

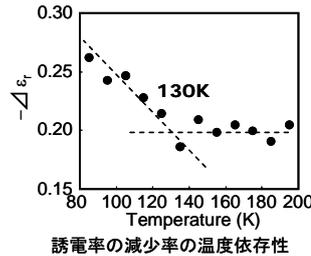
本研究では、Si用K-Cellのトラブル、イオン注入装置の停止という問題によって研究期間内に最終デバイス動作を確認することはできませんでした。しかしながら、4年半で49報の原著論文を公表し、学術的価値、関連分野への波及性に関しては大きな成果が得られたと考えています。それらの基礎データを元にデバイスのプロトタイプとして3つの構造を提案します。

1. YMnO_3 をSi上にエピタキシャル成長させMOS(MFIS)キャパシタを作成しました。強誘電体ゲートトランジスタの問題点であった記憶保持特性を改善し、記憶保持特性に及ぼす分極状態の影響、界面分極や空間電荷の再配列、リーク電流、減分極電界の影響に関して明らかにしました。



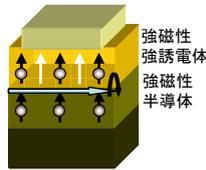
〔4. 研究の主な成果 (続き)〕

2. YMnO_3 系物質のマルチフェロイック物性に関しては大きな進展がありました。ネール点近傍の温度において、 YMnO_3 の分極反転の抗電界および誘電率に異常が見いだされました。反強磁性強誘電体である YMnO_3 は Ginzburg-Landou 方程式を元に導かれたドメイン安定性の議論から、強誘電性ドメイン壁は常に反強磁性ドメイン壁を伴うことが示唆されています。私たちは、実験的に反強磁性ドメインの形成によって強誘電性のドメイン反転が抑制されることを明らかにしました。この結果は Phil. Mag. Lett. に招待論文として掲載されました。誘電率がネール点以下で大きく減少する(右図)、強誘電性の抗電界がネール点以下で大きく増加すること、ラマン分光の結果からフォノン-スピンカップリングが生じていること等の基礎データから分かった



ことです。さらに、 YMnO_3 の反強磁性を利用した「エクステンジバイアス効果」も素子応用にとって有益な物性であることも分かってきました。また、 YMnO_3 のAサイトをYbと置換することによって数少ない強磁性強誘電体薄膜を得ることができました。強磁性強誘電体を用いると「磁性強誘電体のスピンフィルタリング効果」を利用したデバイスの創成が可能になります。さらに、「磁性・強誘電性ドメイン相互作用」と「磁性極性半導体」との多重分極相互作用も含めてこれら3つの効果を用いて3種類のマルチフェロイックFETを世界に先駆けて提案しました。上図にその一つを示します。

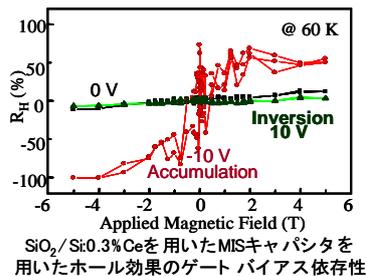
直接交換相互作用型マルチフェロイックFET



オン電流の誘導磁場と強磁性強誘電体の磁場を用いてチャンネルコンダクタンスを制御する。ソース・ドレインとチャンネル界面にスピンフィルタ効果を入れると完全なスピンFETとなるが、【注】スピン軌道相互作用を利用する必要はない。

3. $\text{Si}:\text{Ce}$ 希薄磁性半導体は、基本的にはホール誘起の強磁性です。3倍周期を保って成長させた場合n型でも強磁性が確認されました。さらに、室温まで強磁性を保つ相が存在することも明らかになりました。

$\text{SiO}_2/\text{Si}:\text{Ce}$ MISキャパシタやMFISキャパシタの作製に成功しました。それらを用いて、通常ホール効果と異常ホール効果



果を電界によって制御できることが見いだされました。(左段下)

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

YMnO_3 系マルチフェロイック物性では様々なことが明らかになり、世界的にトップを走っています。他のグループでは巨誘電性すら確認されていません。マルチフェロイックFET実現のためにデバイスのプロトタイプを提案し、その要素技術として分極機能FETの動作と長いメモリ保持に成功しています。

デバイス作製に関しても大気圧プラズマ処理などの新規な手法を導入し、精力的に研究を進めています。世界に先駆けてCMOSプロセスを用いたマルチフェロイックFETやボトムゲート型の薄膜トランジスタの作製には成功しましたが、Si磁性半導体をチャンネルにした場合は、界面の問題が顕在化しています。

次世代の不揮発性論理演算素子としては非常にインパクトの大きな研究成果が得られていると思っています。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

《著書》Topics in Applied Physics 98 Ferroelectric Thin Films- Basic and Device Physics in Ferroelectric Thin Films for Memory Application -, **N. Fujimura** and T. Yoshimura, pp. 199 - 218, Springer, Berlin, (2005) eds. M. Okuyama and Y. Ishibashi

《原著論文》関連する原著論文49報

1) Magnetic Frustration Behavior of Ferroelectric Ferromagnet YbMnO_3 Epitaxial Films, **N. Fujimura**, T. Takahashi T. Yoshimura and A. Ashida, J. Appl. Phys.; 101, (2007) accepted for publication

2) Multiferroic Behaviors of YMnO_3 and YbMnO_3 Epitaxial Films (**INVITED PAPER**) **N. Fujimura**, N. Shigemitsu, T. Takahashi, A. Ashida and T. Yoshimura, Philosophical Magazine Letters; 87, 193-201 (2007)

3) Detailed structural analysis and dielectric properties of silicon nitride film fabricated using pure nitrogen plasma generated near atmospheric pressure, R. Hayakawa, M. Nakae, T. Yoshimura, A. Ashida, **N. Fujimura**, T. Uehara, M. Tagawa and Y. Teraoka, J. Appl. Phys.; 100, 073710 (2006)

4) The Effect of Carrier for Magnetic and Magneto-transport Properties of $\text{Si}:\text{Ce}$ Films, T. Yokota, **N. Fujimura**, T. Wada, S. Hamasaki, and T. Ito, J. Appl. Phys., 93 7679-7681 (2003)

《解説》関連するもの9報

《プロシーディングス》関連するもの29報