

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760201

研究課題名（和文） 強誘電体-極性半導体分極相互作用による量子細線の形成

研究課題名（英文） Formation of quantum nano-wire by polarization interaction between ferroelectric and polar semiconductor

研究代表者

吉村 武 (YOSHIMURA TAKESHI)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30405344

研究成果の概要（和文）：

同程度の自発分極を有する極性半導体と強誘電体の界面に対して、走査プローブ顕微鏡を用いて強誘電体層に微小な分極反転領域を形成することにより、物理的な加工を行わずに電気的に量子細線を形成することを目標として研究を行った。作製した試料に対してチャンネル領域上で微小プローブを走査しながら電圧を印加したところ、微小プローブの位置に対応したドレイン電流の変化が確認され本研究で提案する素子の実現可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：

The aim of this study is the formation of quantum nano-wires not physically but electrically. It can be expected that the quantum nano-wire is formed by nano-size ferroelectric domain formed by scanning probe microscopy at an interface between a ferroelectric and a polar semiconductor with almost same spontaneous polarizations. When a micro probe is scanned with applying voltage on the channel region of a fabricated sample, modulation of drain current corresponding to the position of the probe was observed, which indicates the possibility of the realization of the device proposing in this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子・電気材料工学

キーワード：強誘電体薄膜，極性半導体，量子デバイス，走査プローブ顕微鏡，ドメイン，分極

1. 研究開始当初の背景

ナノサイズの細線やドットを利用した量子デバイスは、次世代の高速電子デバイスとして現在盛んに研究が行われている。量子デバイスの作製技術としては、ナノチューブやナノロッド、自己集合組織などを用いたボトムアップ的な手法と、FIB やリソグラフなどを用いたトップダウン的な手法がある。ボトムアップ的な手法は、格子欠陥などが少なく良好な特性を有するナノ構造を作製する面では有利であるが、ナノ構造をアレイ状に配列させることに課題がある。例えばカーボンナノチューブ (CNT) を用いたトランジスタでは、国内外の多くのグループによって研究が行われ良好なデバイス特性が報告されている。しかし、CNT トランジスタを用いて大規模集積回路を作製するにはソース・ドレイン間に同じ特性を有する CNT を同じ本数配置する必要があるが、現時点ではそれを実現する技術的な目処は立っていない。他のナノロッドや量子ドットにおいても同様の課題がある。一方、トップダウン的な手法では電子線リソグラフィなどの手法によりアレイ状のナノ構造の作製はすでに可能であるが、加工の精度や加工時のダメージといった問題があり、実用的な量子デバイスを作製するためには、このようないくつかの技術的な課題を克服する必要がある。

これまで研究代表者は、強誘電体-半導体のヘテロ接合構造を用いた不揮発性メモリの研究に従事してきており、このような应用到に適した強誘電体として YMnO_3 という物質に着目しデバイス構造の作製や評価手法の開発等を行ってきた。このデバイスでは、強誘電体薄膜を電界効果型トランジスタ (FET) のゲート絶縁膜に用いており、強誘電体の自発分極により直接チャネル部分の電荷を制御し不揮発性記録を行うことができる。原理的に高集積化、低消費電力化が可能であることから、不揮発性メモリとして非常に有望である。しかしながら半導体上の強誘電体薄膜は、半導体の表面電位によりその残留分極を減少させる方向の電界 (減分極電界) を印加されている状態となる。この減分極電界が原因となり強誘電体ゲート FET には記憶保持が困難という課題が存在する。それを解決する方法として研究代表者は、半導体が空乏化したときの強誘電体分極の電荷補償を、極性半導体の自発分極によって行う方法を考案した。半導体が空乏化したときの強誘電体分極の電荷補償を極性半導体の自発分極によって行えば減分極電界を低減できると考えた。

極性半導体である ZnO と強誘電体である

YMnO_3 のヘテロ構造を用いて作製した FET において、反時計回りの履歴を持つドレイン電流-ゲート電圧特性が得られており、強誘電体の自発分極が極性半導体中のキャリアを制御し、不揮発性記憶型のメモリ素子として動作していることを確認した。

さらに研究代表者は、半導体に CNT を用いた強誘電体ゲート FET の開発も行ってきた。強誘電体である $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 薄膜上に CNT を配置し、ソース・ドレイン電極を形成することで FET を作製した。強誘電体の自発分極により CNT 中のキャリアを制御することに成功しメモリ動作を確認した。しかしながら前述のように、CNT-FET を用いて大型の集積化回路を作ることは難しく、強誘電体ゲート CNT-FET はセンサなどへの応用は有望であるが、演算素子としての実用化には多くの技術的な課題を克服する必要があることが明らかになった。

これらの研究の過程で、集積化にも対応が可能で簡便な量子構造の作製技術を開発する必要性を感じ、自発分極量が等しい極性半導体と強誘電体を用いてヘテロ接合を作製すれば、半導体層を空乏化した状態と電荷蓄積した状態の二つを安定して保持することができ、さらにナノ構造も実現できると考え本研究を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究では強誘電体と極性半導体の界面を用いて、ナノチューブのような自己集合組織や物理的な加工を使わずにナノ構造を形成し、新規な量子デバイスの創製を目的とする。本研究で提案する基本的な概念図を図 1 に示す。電極間に挟まれた強誘電体-半導体ヘテロ構造に、走査プローブ顕微鏡 (SPM) の導電性プローブで電圧を印加しながら強誘電体薄膜上を走査することによりナノサ

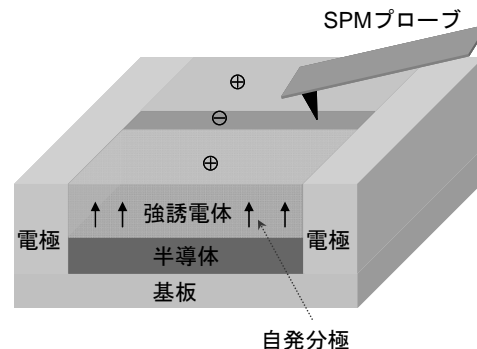


図 1 強誘電体-半導体ヘテロ構造ナノデバイスの概念図

イズのドメイン反転領域を書き込む。強誘電体の自発分極により半導体内にキャリアが誘起され、電気的にナノ構造が形成される。強誘電体分極ドメインは数 nm の大きさでも安定に存在できることが報告されていることから、量子効果が得られるような幅の細線やドットの形成は十分に期待できる。

一方でこのような方法で量子構造を形成するためには、ヘテロ構造に用いる強誘電体と半導体の物質の選択も重要となる。任意に選んだ強誘電体と半導体のヘテロ接合では、強誘電体の自発分極が非常に大きいため、半導体層内には、強誘電体の自発分極の向きに応じて、電子と正孔のそれぞれがキャリアとして誘起されることになる。図 1 に示した構造の場合では、自発分極が上向きのドメイン（プラスドメイン）の下の半導体層内には正孔が誘起され、自発分極が下向きのマイナスドメインの下の半導体層内には電子が誘起される。これではどの領域にもキャリアが存在することになり、量子デバイスとしては機能しない。量子構造を形成するためにはマイナスドメインの部分にのみキャリアが存在する状態を作り出す必要がある。

そこで本研究では、強誘電体と極性半導体のヘテロ接合を用いることを提案する。極性半導体とは、自発分極を有している半導体のことである。強誘電体とは異なり電界の印加によって、自発分極の反転は生じない。極性半導体は珍しい物質ではなく、GaN や ZnO など最近注目を集めているウルツァイト型の結晶構造を有している半導体材料は、強誘電体に匹敵するような大きな自発分極（数 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 程度）を有している。極性半導体の自発分極と強誘電体の自発分極の大きさが等しい時、極性半導体の自発分極の向きと強誘電体の自発分極の向きが平行になった部分には、二つの自発分極の電荷量が釣り合うので半導体層はキャリアが存在しない空乏状態となり、逆向きとなった領域にのみキャリアが誘起されるようになる。つまり図 2 に示すように、極性半導体の自発分極が上向きの場合には、強誘電体の自発分極が下向き（マイナスドメイン）の部分にのみキャリアが閉じ込められ、この領域が量子細線として機能

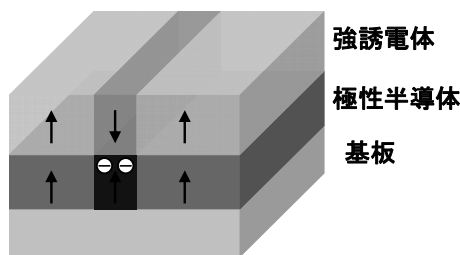


図 2 強誘電体—極性半導体ヘテロ構造における量子細線形成

すると期待できる。このように極性半導体と強誘電体のヘテロ接合を作製し、二つの自発分極を利用して物理的な加工を行わずに電気的に量子構造を形成することが本研究の目標である。

3. 研究の方法

本研究では極性半導体として ZnO を、強誘電体として YMnO_3 を用いてヘテロ構造を作製した。これらの薄膜はレーザアブレーション装置を用いて作製した。薄膜の構造解析は X 線回折装置、反射高速電子線回折等を用いて行った。

ZnO は、知られている半導体材料の中では大きい極性自発分極（約 $5\mu\text{C}/\text{cm}^2$ / $\langle 0001 \rangle$ ）を持つ物質であり、また近年良好な半導体特性が報告されていることから、本研究の目的に適した物質であると考えている。一方、 YMnO_3 は $5.5\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の自発分極量を有している強誘電体である。一般的な強誘電体に比べると自発分極量は小さいが、本研究では自発分極量の等しい極性半導体と強誘電体のヘテロ構造を作製することが目的であるので、それに適した物性を有している。また YMnO_3 は $\langle 0001 \rangle$ 軸方向にのみ自発分極を持つ一軸性の強誘電体であるので、 180° ドメイン構造となり、小さな分極ドメインの形成においても有利である。さらに ZnO と同じ六方晶構造を有しており、c 面同士の格子ミスマッチも 5.2% と比較的良好である。

YSZ(111) 基板上にソース・ドレイン電極を形成した後、 YMnO_3/ZnO ヘテロ構造を作製した試料に対して、チャンネル領域上でプローブを走査しながら電界を印加した際のドレイン電流を測定し、分極によるキャリアの優輝状態の評価を行った。

4. 研究成果

X 線回折より、作製した YMnO_3/ZnO ヘテロ構造において、ZnO 薄膜、 YMnO_3 薄膜ともに c 軸配向したエピタキシャル膜であることを確認した。容量-電圧 (C-V) 特性、分極-電界 (P-E) 特性を測定した結果を図 3 に示す。C-V 特性、P-E 特性において強誘電性に起因するバタフライカーブ、ヒステリシスループが得られ、 YMnO_3 が強誘電性を有することを確認した。図 4 に作製した素子のチャンネル部の原子間力顕微鏡像を示す。ソース、ドレイン電極上に良好な表面平滑性を有する YMnO_3/ZnO ヘテロ構造が得られている。このチャンネル上を

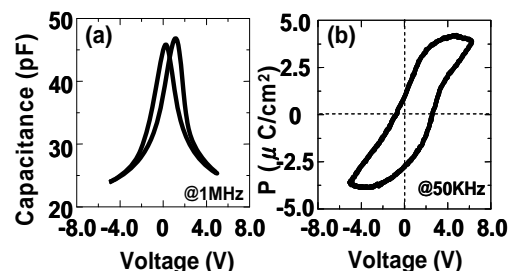


図 3 YMnO_3 (100nm) / ZnO (20nm) 構造における C-V (a)、P-E (b) 特性

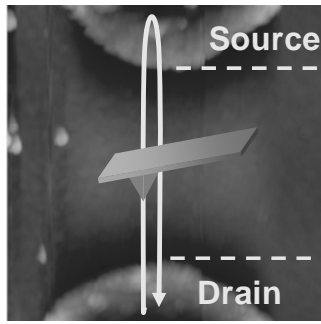


図4 YMnO₃/ZnO チャンネル部の AFM 像

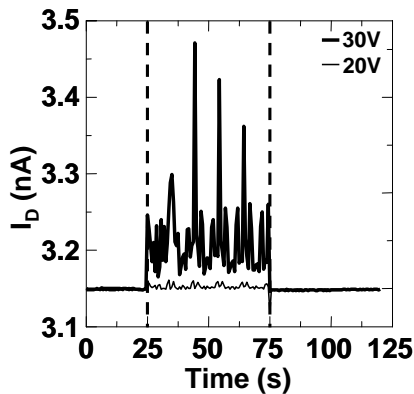


図5 20V,30V 印加時の I_D -t 特性

導電性の SPM プローブを走査しながら、ソース-ドレイン間、ソース-プローブ間に電圧を印加し、ドレイン電流を測定した。印加電圧が 20V と 30V の時の測定結果を図 5 に示す。電圧は $t = 25 \sim 75$ (s) の間印加した。プローブを介したゲート電圧印加に伴うドレイン電流の増大が確認できる。しかし、印加電圧が 20V の時のドレイン電流の変化は小さく、YMnO₃ 薄膜に十分に電界が印加されていないと考えられる。一方、30V の電圧を印加した場合、ドレイン電流は増大している。その起源としてゲートリーク電流や YMnO₃ の分極に起因するキャリア誘起などの可能性が挙げられる。

さらに詳しく解析するためにチャンネル上におけるプローブの位置とドレイン電流との関係を調べた。その結果、図 6 に示すようにドレイン電流値はプローブの位置に対応した周期的な増減をしていることが分かる。ドレイン電極上でのドレイン電流の増大は、プローブを介したゲートリーク電流に起因すると考えられ、チャンネル上でのドレイン電流の増大は電界印加によって生じた YMnO₃ 薄膜の分極により ZnO 中にキャリアが誘起されて生じていると考えられる。この変化がプローブから YMnO₃ 層中を通して流れるリーク電流でないことも確認しており、プローブによる電界の印加によって生じた YMnO₃ 薄膜の分

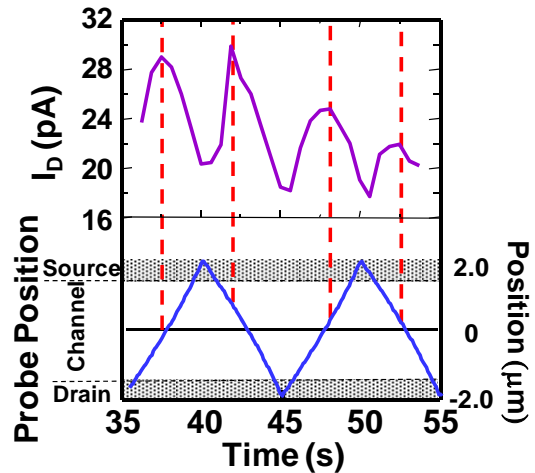


図6 ドレイン電流とプローブ位置との関係

極により ZnO 層中にキャリアが蓄積したことを示唆する結果である。

本研究で実現を目指すものは、電圧を印加しながら導電性プローブを走査するだけで、その電圧を印加された部分が量子細線や量子ドットとして機能するようなメディアとすることができる。物理的な加工やナノチューブなどを用いるこれまでの手法に比べると、任意の形状の量子回路を非常に簡単に描くことができる。また、強誘電体を用いることで、何度でも書き換えることもできる。特に容易に回路の書き換えが可能という特徴は、これまでの量子デバイスにないものであり、新規な量子デバイスの創製につながる可能性がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① T. Yoshimura, H. Sakiyama, T. Oshio, A. Ashida, and N. Fujimura, Direct Piezoelectric Property of Mn-doped ZnO Epitaxial Films, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有、49、(2010)、021501
- ② T. Fukushima, T. Yoshimura, K. Masuko, K. Maeda, A. Ashida, and N. Fujimura, Analysis of carrier modulation in channel of ferroelectric-gate transistors having polar semiconductor, Thin Solid Films, 査読有、518、(2010)、3026-3029

[学会発表] (計 3 件)

- ① 山田 裕明、福島 匡泰、吉村 武、藤村 紀文、YMnO₃/ZnOヘテロ構造デバイスのチャンネル伝導特性、平成 21 年度春季

第57回応用物理学関係連合講演会、2010年3月19日、愛知県春日井市

- ② 坂本真哉、福島匡泰、吉村武、前田和弘、
芦田 淳、藤村紀文、 YMnO_3/ZnO ヘテロ構造における分極間相互作用を用いた新規なデバイスII、平成20年度春季第56回応用物理学関係連合講演会、2009年3月31日、茨城県つくば市
- ③ 坂本真哉、福島匡泰、吉村武、前田和弘、
芦田 淳、藤村紀文、 YMnO_3/ZnO ヘテロ構造における分極間相互作用を用いた新規なナノデバイス、平成20年度秋季第69回応用物理学学会学術講演会、2008年9月31日、愛知県春日井市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 武 (YOSHIMURA TAKESHI)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号：30405344