

平成 27 年 3 月 31 日

プログラム名：無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現

PM 名：佐橋政司

プロジェクト名： スピン FET プロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 ( 成 果 )

平成 26 年度

研究開発課題名：

スピン操作用ゲートの開発

研究開発機関名：

独立行政法人産業技術総合研究所

研究開発責任者

Ron Jansen

## 当該年度における計画と成果

### 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

本課題で開発に取り組む絶縁性強磁性体を用いた新型スピン操作ゲートによる電流変調効果は、開発の初期段階では非常に小さい可能性がある。また、同ゲートは半導体チャネル上のソース/ドレイン電極間に作製する必要があり、そのため、動作原理実証のための初期段階では同電極間は比較的長距離（数マイクロメートル程度）離れていることが望ましい。従って、高感度でスピン偏極電流の変化を検知するための素子、すなわち、半導体シリコン(Si)やゲルマニウム(Ge)チャネルを有する非局所スピン検出測定用素子の開発を行う必要がある。本年度はそのために必要な高性能半導体チャネル層の開発を行い、最終的には  $5\mu\text{m}$  以上のソース/ドレイン電極間を有する素子でのスピン検出を目標とする。素子の作製は ImPACT 参画チームである産総研ナノエレクトロニクス研究センター、大阪大学浜屋研究室および東芝と共同で行う。

### 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

#### 2-1 進捗状況

従来の非局所測定用半導体チャネルにはキャリア濃度が非常に高い ( $> 10^{19}\text{cc}^{-1}$ )、いわゆる縮退半導体が多く用いられてきた。これは、金属との接触界面において必然的に発生するショットキー障壁幅を数ナノメートル程度に薄くすることにより、接合抵抗を低減させ、かつ、スピン注入に必要なトンネル輸送を容易にするためである（図1参照）。しかしながら、縮退半導体はゲート電界による電気抵抗率の変調効果が小さく、トランジスタ用チャネルとして用いることは困難である。従って、本研究では非縮退 Si および Ge チャネルを用いつつ、強磁性金属/絶縁体接合界面近傍のみを選択的に高ドーピング層としたチャネル層の開発を行った。特に、次世代 MOSFET チャネル材料候補として盛んに研究されている Ge は、代表的なトンネル障壁層である酸化マグネシウム ( $\text{MgO}$ ) と格子整合することから集中して実験を行った。



図1 強磁性/非縮退半導体接合のエネルギーバンドに及ぼす界面近傍への高キャリアドーピング効果。ドーピングにより空乏層領域が減少し、スピン注入に必要なトンネル伝導が支配的になる。

## 2-2 成果

図2にGeチャンネルの素子構造を示す。高チャンネル層にはデルタドープと呼ばれる手法を用いた。これは、キャリア供給源となる元素（この場合はアンチモン）所定量をGe基板表面に蒸着後、引き続きGeを再成長する。この際、適切な成長温度を選択することにより、Sbを再成長層内に閉じ込めつつ、キャリア供給源として活性化することを狙う。スピン注入源として高スピン偏極電流注入が期待されるFe(001)/MgO(001)を導入するためには、Ge基板は(001)結晶方位を用いる必要がある。Geへのデルタドープはこれまで、浜屋研究室グループが(111)基板で成功しているが、Sbの拡散係数がより大きく、作製困難が予想される(001)基板での報告例は無い。

Au (20 nm)
Fe (5 nm)
MgO (1.5 nm)
Ge:Sb (10 nm)
非縮退n-Ge(001)基板

図2 ゲルマニウムチャンネルを有する素子構造。水色部が高キャリアドープ層

実験は浜屋研究室の助言の下に行った。結果的に適切なGe成長温度とSbドープ量を選択することにより、接合抵抗の大幅に減少に成功した。例として、図3にGe成長温度を250で一定とし、Sbドープ濃度を变化させた素子の電流電圧特性および単位面積当たりの素子抵抗RAを示す。Sb濃度 $0.7 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 以上で整流特性がほぼ消失してオーム性接合が実現している。Siについても類似構造の素子開発を進めている。

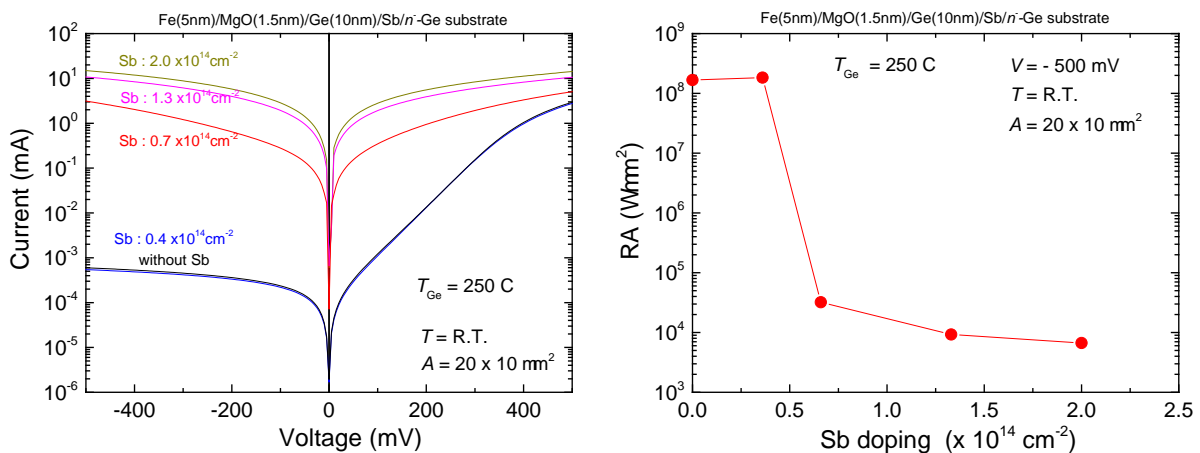


図3 素子の電流電圧特性(左図)および単位面積当たりの素子抵抗(右図)。Ge再成長温度は $250^\circ\text{C}$ で固定、Sb濃度を变化。Sb濃度 $0.7 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 以上でオーム特性が実現している。

## 2-3 新たな課題など

Sb高ドープ層上のMgOの結晶性の劣化が観測された。これは、再成長Ge表面上の過剰Sb原子の存在が原因であることを突き止めた。そこで過剰Sbを除去するプロセスを早急に確立する。その後、開発したチャンネルを用いて非局所素子によるスピン検出実験に移行する。

3 . アウトリーチ活動報告  
特に無し。