



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Electrical spin injection from ferromagnet into an InAs quantum well [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	石倉, 丈継
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11753号
Issue Date	2015-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58797
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Tomotsugu_Ishikura_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 石倉 丈継

学 位 論 文 題 名

Electrical spin injection from ferromagnet into an InAs quantum well

（強磁性体から InAs 量子井戸への電氣的スピン注入に関する研究）

現在まで、コンピュータの情報処理能力の発展は、半導体集積回路の微細化により進展してきた。現状、集積回路内における回路線幅はムーアの法則に従い 20 nm 世代が実用化され、近年 10 nm 台に移行しつつある。今後もムーアの法則に追従し、微細化を進めていくことが必要である一方、10 nm 以下の見通しは製造プロセス、素子性能設計の両側面から容易ではなく、解決策が議論されている。製造プロセスに関してはより短波長の光源の実用化が困難である。素子設計に関しては MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) などに代表される素子における微細化に伴うリーク電流などがあげられる。前者に対しては、ダブルパターニング露光、後者へは集積回路、素子の立体化などの従来の延長線上の技術で対処されているが、今後の更なる継続的な発展のためには素子の動作原理の変更が必要である。

従来のシリコン MOSFET の限界を超えたデバイスは新規材料、機能の観点で多くの分野から研究されてきた。その中で、従来の電荷制御ではなく、電子や原子核の持つスピンを制御することで電子デバイスに付加価値を与える分野、スピントロニクスが注目されている。スピントロニクスの現在までの貢献は、巨大磁気抵抗効果を利用したデバイスが HDD(Hard Disk Drive) の磁気ヘッドへ応用され記憶容量の急激な増大に貢献し、近年では STT-MRAM(Spin Transfer Torque Magnetic Random Access Memory) など不揮発性メモリが実用化されつつある。しかしながら、FET などのスイッチング素子においてはいくつか提案はされているが、どれも研究段階にあるのが現状である。その中で、Datta, Das によって提案されたスピントランジスタは、従来のシリコン MOSFET におけるスイッチング特性の物理限界を超える可能性があるため実現が期待されている。このスピントランジスタは、ソースとドレインに強磁性体、チャネル材料は高い電気伝導特性をもつ狭ギャップ半導体が用いられる。ソースから注入されたスピンは半導体中のスピン軌道相互作用により位相が変調され、ドレイン電極によりそのスピンの位相を磁気抵抗として検出する。この時、スピンの位相をゲート電界により変調することができるため、トランジスタのようなスイッチング動作が可能となる。このスピントランジスタの実現のためには、半導体中でのスピン軌道相互作用のゲート電界制御と強磁性体電極によるスピンの注入、検出技術の確立が重要である。現在まで、狭ギャップ半導体中のスピン軌道相互作用の制御は数多く報告され、その技術が確立されつつある。それに対して、半導体へのスピン注入、検出に関しては、スピントランジスタだけではなく、それ以外の半導体スピン機能デバイスへの応用においても大きな課題となっている。強磁性体電極から半導体へのスピン注入は初期に Spin-LED (Light Emitting diode) を用いた検出方法が主流であった。それに続いて近年、スピントランジスタと構成が近い面内スピンバルブを用いたスピンの検出が報告されてきた。しかしながら、スピンバルブを利用したスピン注入の報告は、バルクのシリコン、ゲルマニウム、GaAs に対するものでほとんど限られている。それらの材料系では電気伝導特性が低いことだけではなくスピン軌道相互作用が非常に微弱であるため、スピントランジスタへの応用は困難である。それに対して HEMT

(High Electron Mobility Transistor) 構造などの高い電気伝導特性を持つ系や, InGaAs, InAs, InSb などのスピン軌道相互作用が強い系における面内スピンバルブを利用したスピン注入, 検出の報告はほとんどなく高効率でのスピン注入法は現在まで確立されていない. 以上の背景より, 本研究の目的は, (1) 狭ギャップ半導体チャネル FET のゲート絶縁膜として広く用いられている InAlAs 層に対する耐熱性に優れたゲート材料の確立, および, (2) InAs 量子井戸への高効率スピン注入・検出法の確立を通じ, スピントランジスタ実現に向けての基盤技術を創出することである.

本論文は第 1 章から第 6 章までで構成されている. 第 1 章では本研究の背景, 目的について述べ, 本論文の構成を示した. 第 2 章ではスピントロニクスとその半導体応用への理論背景について述べ, スピントランジスタ実現への課題をまとめた. 特に, 強磁性体から半導体へのスピン注入における課題である伝導度ミスマッチについてまとめ, 強磁性体と半導体のスピン抵抗の整合について解説した. 第 3 章では素子の設計, プロセス方法および評価方法について述べた. 第 4 章ではスピントランジスタ作製上必要な, 耐熱性に優れたゲート電極材料の開発について述べた. 狭ギャップ半導体チャネル FET のゲート絶縁膜として広く用いられている InAlAs バリアに対し, Pd 電極を用いることで, 従来用いられていた Ti/Au, Ti/Pt/Au 電極などに比べ, 界面反応が抑えられ, 良好な熱耐性を示すことを見出した. 第 5 章では強磁性体から半導体へのスピン注入の実験結果についてまとめた. 初めにスピン注入素子の作製方法ならびに評価手法を確立するために, NiFe/MgO/n-Si と Fe/n-Si ヘテロ構造を有するスピン注入素子を作製し, Si に対するスピン注入を試みた. その結果, 前者の試料では半導体に注入されたスピンがチャネル中を伝導することにより生じる非局所スピンバルブ信号が得られたのに対し, Fe/n-Si における試料では, 強磁性電極直下にスピンが蓄積したことを示す微弱な信号が三端子 Hanle 測定と呼ばれる手法で得られたものの, スピンのチャネル中の伝導は得られなかった. これは, 強磁性体と半導体のスピン抵抗のミスマッチに起因するものであり, このことより, スピン注入における MgO トンネル障壁層の有用性を明らかにした. 以上の知見をもとに, InAs 量子井戸構造へのスピン注入を試み, 試作した NiFe/MgO/InAs 量子井戸構造に対し, 明瞭な非局所スピンバルブ信号を観測するとともに, 注入された電子スピンの, 量子井戸におけるスピン拡散長や緩和時間を明らかにした. 得られたスピン信号の強度から見積もられた InAs 量子井戸中のスピン偏極率は 9 % に達し, これは, 先行研究の NiFe/InAs 量子井戸構造に比べ 4 倍程度高く, 高効率スピン注入実現への指針を得た. 最後に, InAs 量子井戸へのスピン注入により生じる核スピン偏極の可能性について議論した. 以上これらの結論は第 6 章にまとめた.