

氏名(本籍)	ま かね けん じ (神奈川県)			
学位の種類	博 士 (工 学)			
学位記番号	博 甲 第 6396 号			
学位授与年月日	平成 25 年 3 月 25 日			
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Fe ₃ Si/CaF ₂ 多層膜による強磁性共鳴トンネルダイオードの作製と評価			
主査	筑波大学教授	博士(工学)	末 益 崇	
副査	筑波大学教授	工学博士	喜 多 英 治	
副査	筑波大学教授	理学博士	黒 田 眞 司	
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	柳 原 英 人	
副査	産業技術総合研究所	工学博士	秋 永 広 幸	

論 文 の 内 容 の 要 旨

半導体デバイスで電子のスピンを積極的に利用するスピントロニクスの研究が盛んに行われている。このような電子のスピンを利用したデバイスでは、スピン偏極した電子を用いることでデバイス特性の向上が期待できる。このため、スピン偏極率の高い強磁性体の探索や絶縁体層中の電子のコヒーレント・トンネリングを利用して、上向きスピンまたは下向きスピンのどちらか一方を選択的に抽出する研究が活発に行われている。スピンフィルターもそのようなデバイスの1つであり、量子井戸に強磁性体を用いた二重障壁型共鳴トンネルダイオードにおいて、強磁性体の内部磁化によりスピン分裂した量子化準位を介して、共鳴トンネル効果を利用することで、上向きスピンまたは下向きスピンのどちらか一方を選択的に取り出すことを目指している。これまでの研究で、強磁性半導体を量子井戸層とする二重障壁型共鳴トンネルダイオードにおいて、スピンフィルターの働きを実証した例がある。しかし、半導体ヘテロ構造では障壁高さが十分ではないため、共鳴トンネル効果以外のリーク電流成分が含まれるためにスピン偏極率が低下すること、キュリー温度が室温よりも低い場合、動作温度が200K程度の低温に限られていた。本研究では、強磁性金属(Fe₃Si)と絶縁体(CaF₂)のヘテロ構造を利用することで、Si基板上で室温動作するスピンフィルター実現を目標とした。

共鳴トンネルダイオード型のスピンフィルターを実現するには、量子化準位を介した共鳴トンネル効果が生じていることを、電流電圧特性から実証する必要がある。そのためにまず、分子線エピタキシー法による高品質CaF₂/Fe₃Si多層膜エピタキシャル構造のSi(111)基板上への実現に取り組んだ。共鳴トンネルダイオードの障壁層膜厚は3nm程度と非常に薄いため、表面平坦性が重要である。80℃の低温で多層膜を堆積し、その後、280℃でアニールする二段階成長法で、平坦な多層膜構造のエピタキシャル成長を実現した。次に、Tsu-Esakiの式から二重障壁構造における透過率のエネルギー依存性を計算し、透過率が1を示すエネルギーを量子化準位とした。このようにして、CaF₂(5nm)/Fe₃Si(4nm)/CaF₂(5nm)の二重障壁型共鳴トンネルダイオードをエピタキシャル成長し、一辺6μmのメサ構造を形成した。室温で電流電圧特性を評価したところ、Si基板側から電子を注入するバイアス条件下において、ピーク・バレー比が1000に達する明瞭な微分負性抵

抗を得た。また、電流の2階微分特性のピーク電圧から共鳴電圧を読み取り、共鳴電圧の度数分布図を作成したところ、印加電圧が0.5Vと2.5V付近で共鳴が生じていることが分かった。共鳴電圧間隔は2Vであるが、これは、厚さ4nmの Fe_3Si 量子井戸内での共鳴トンネルに関わる量子化準位間のエネルギー間隔の2倍に相当し、2層の絶縁体にほぼ均等に電圧が印加されたと考えると説明できた。しかし、微分負性抵抗は36個中2個のデバイスのみからしか得ることが出来ず、再現性に乏しかった。断面TEM観察により、デバイス領域内にピンホールが発生していることが分かった。これが電流のリークパスになったと考えられる。そこで、この問題を回避すべく、成長領域を極微細な領域に限るLocal Epitaxy法を採用した。これは、Si(111)基板上に厚さ50nmの SiO_2 絶縁膜を堆積し、直径200nmの領域のみ SiO_2 をエッチングで除去し、この内部に二重障壁型共鳴トンネルダイオードを形成する方法である。これにより、薄膜堆積後のエッチングによる膜の剥離を防ぐ効果も期待できる。結晶成長後、直径200nmの共鳴トンネルダイオード約47000個を含むように直径500 μm のAu電極を形成し、電流電圧特性を評価した。その結果、23個中の9個において室温で明瞭な微分負性抵抗を得ることに成功した。1つの金電極下に含まれる共鳴トンネルダイオードのデバイス面積は1440 μm^2 であり、従来の36 μm^2 に比べて約40倍大きい。大きい面積のデバイスにもかかわらず再現性が格段に向上したことは、Local Epitaxy法による高品質結晶成長の効果であるといえる。

次に、量子井戸膜厚を4, 5, 8nmと変えた二重障壁型共鳴トンネルダイオードをLocal Epitaxy法で作製し、共鳴電圧の間隔を調べた。その結果、量子力学から期待されるように、共鳴電圧の間隔が量子井戸膜厚の逆数の2乗に比例することが分かった。以上の実験結果から、本実験で得られた微分負性抵抗は、量子井戸内の量子化準位の共鳴トンネル効果によると結論できる。最後に、電流電圧特性からスピン偏極度を見積もった。共鳴トンネル効果が生じている際には、スピン偏極した電流が流れていると考えることができる。共鳴トンネル効果が生じているとき、バレー電流以外はスピン偏極していると仮定すると、ピーク・バレー比が30の時には、約0.97と見積もることができる。 Fe_3Si のスピン偏極率は0.3であるため、共鳴トンネルダイオードによりスピン偏極率を高めることが出来ると考えられる。

審査の結果の要旨

共鳴トンネルダイオード型のスピンフィルターは、強磁性体のスピン偏極率に左右されず、スピン偏極した電子を取り出すことのできるデバイスの1つとして注目されている。しかし、室温で明瞭に動作するスピンフィルターは実現されていない。この研究では、キュリー温度が室温よりも高い強磁性金属 Fe_3Si と格子定数が近い CaF_2 を用いて、二重障壁型共鳴トンネルダイオードを作製し、電流電圧特性において室温にて明瞭な微分負性抵抗を得た。また、電流の2階微分特性ならびに共鳴電圧の量子井戸膜厚依存性を調べることで、量子化準位を介した共鳴トンネル効果が確かに生じていることを明確にした。以上の結果から、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{CaF}_2$ ヘテロ接合を用いた共鳴トンネルダイオードは、新しいスピンフィルター用材料として、今後の実用化が大いに期待されるといえる。

平成25年2月18日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。