

## 学位論文題名

## Local Electron Excitation in Semiconductor with Interferometer of Evanescent Fields

(エバネッセント波の干渉場を用いた半導体局所電子励起に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

近年、様々なスピンドバイス (GMR ヘッド MRAM ハードディスク用、SP-FET) が開発され、磁性体表面電子スピンの測定精度と分解能の向上に対する需要は今後益々高まると予想される。電子スピン分解能を付与した走査型トンネル顕微鏡 (STM) は原子スケールでのスピン観察装置であるとともに、スピン注入、スピンマニピレーションへの応用が可能な汎用的なスピンドバイス開発ツールとなる可能性を秘めている。STM のスピン検出機能はスピン偏極した探針を用いることによって実現する。スピン偏極探針材料には強磁性体探針と光励起半導体探針がよく用いられるが、半導体探針には磁性体試料への影響が少ないという利点がある。さらに半導体探針に左右円偏光照射すれば、比較的容易にスピン状態を反転できる。本研究室では GaAs 半導体探針を用いたスピン偏極 STM の研究をすすめている。

本研究では、針状 GaAs の先端部分の評価する方法としてエバネッセント波に注目した。エバネッセント波は通常の伝搬光と異なり、界面近傍(波長程度)の物質とのみ強くカップリングする。この特性を用いた局所的な光物性を高感度測定する方法としての応用例(エバネッセント蛍光分光、反射型近接場光学顕微鏡、表面プラズモン共鳴による増強エバネッセント波を用いた薄膜の屈折率測定や膜厚測定他)も多い。このため GaAs 先端部分のみ効率的な励起へも応用可能だと考えた。エバネッセント波はレーザー光を誘電体界面に全反射条件で入射によって生成する。エバネッセント波をスピン状態の評価へ応用するためには、円偏光したエバネッセント波による針状 GaAs のスピン偏極電子励起を行う必要がある。針のスピン状態は励起電子の再結合発光の偏光解析によって分析できる。しかし単純に円偏光を全反射条件で誘電体界面に入射しても円偏光したエバネッセント波の生成は不可能であることは、マックスウェル方程式とその境界条件から導出できる。したがってエバネッセント波を円偏光励起、電子スピン評価制御といった場面で積極的に用いられることはなかった。しかし2つの S 偏光で生成したエバネッセント波を誘電体界面で干渉させれば、エバネッセント波の左-右円偏光干渉場の生成が可能になる。

本研究では、この強度均一かつ左右円偏光が波長周期で連続的に変化する干渉縞表面を針状 GaAs で走査し、エバネッセント結合による励起電子の再結合発光の偏光度測定によって2次元画像化による偏光状態分析を試みた。また強度干渉したエバネッセント波を生成し、針の強度に対するカップリング強度に依存した2次元画像化を試みた。エバネッセント偏光干渉場はスピン偏極走査型トンネル顕微鏡評価用標準試料にとどまらず、あらゆる電子スピン評価と制御デバイスへ応用の可能である。第一章では研究の背景を述べた。スピンドバイスの動向について述べた、エバネッセント波の応用例と、本研究の位置付けをあきらかにした。

第二章ではエバネッセント波による円偏光場の生成方法を述べた。入射角と屈折率からエバネッセント波のしみこみ深さを導出した。TE/TM 波を入射したときの透過率を導出した。

第三章ではスピン偏極電子励起について述べた。励起と発光における回転対称性についてのべた。

第四章ではエバネッセント波の干渉系の製作について述べた。設計のコンセプトについて述べた。干渉場の安定性をマイケルソン干渉系の経時変化によって測定した。壁開法とエッチング法による針状砒化ガリウムのサンプルの作製について述べた。偏光検出系と偏光解析について述べた。ハンドメイドの装置をもちいて、エバネッセント波の検出可能であることを確かめた。しみこみ深さを測定した。

第五章ではGaAs針のスピンの偏極電子励起について述べた。直線偏光エバネッセント波による砒化ガリウムの蛍光の偏光度測定した。壁開法で作製した針からの蛍光の偏光度測定の結果は、直線偏光の向きにかかわらず強い直線偏光をしめした。エバネッセント波で強度干渉場を生成し、針状砒化ガリウムからの蛍光を測定した。エバネッセント波で偏光の干渉場を生成し、針状砒化ガリウムからの蛍光を測定した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 笠 幸 一  
副 査 教 授 山 本 眞 史  
副 査 教 授 岡 田 亜 紀 良  
副 査 助 教 授 末 岡 和 久

学 位 論 文 題 名

## Local Electron Excitation in Semiconductor with Interferometer of Evanescent Fields

(エバネッセント波の干渉場を用いた半導体局所電子励起に関する研究)

近年、電子のスピン状態を利用した3端子素子やセンサなどの開発を目指したスピントロニクスに関する研究が盛んに行われている。また、表面に局在するエバネッセント光を利用した様々な物性計測手法に関する研究も進められている。しかし、これらの2つの研究を融合した分野は未開拓であり、局所的なスピン状態制御という観点からも今後の展開が期待されている。

本論文は、エバネッセント光学と半導体スピントロニクスの融合を可能にするために、円偏向エバネッセント光の発生方法の提案と、探針状半導体先端部の局所的スピン励起・スピン依存フォトルミネッセンスを利用して円偏向エバネッセント光の発生を実験的に検証したものである。熱ドリフトの少ないゼロデュアガラス基板上に組み立てた干渉計を用い、2つの直線偏向したエバネッセント光をプリズム表面で干渉させ、円偏向と直線偏向が繰り返される位相干渉パターンを生成した。プリズム上に生成した位相干渉パターンを有するエバネッセント場中に先端を先鋭化したGaAs探針を近接させ、エバネッセント場で励起される電子の発光再結合時の発光の円偏向度測定から、励起された電子のスピン偏極度、スピンを励起したエバネッセント波の円偏向度を見積もり、それにより円偏向エバネッセント波の生成の検証した。

本論文では、まず、本研究の背景となっているエバネッセント光を用いた局所物性測定方法について述べ、円偏向したエバネッセント波の発生が、エバネッセント光を利用した計測方法とスピントロニクスとの融合を可能にする理由を明らかにした。特に円偏向エバネッセント光による半導体の局所的なスピン励起が、スピントロニクスやスピン偏極走査型トンネル顕微鏡測定技術をどの様にして変革する可能性があるかについて論述した。次に、円偏向エバネッセント光による半導体のスピン励起についてその原理をまとめた。本論文では、二つのエバネッセント波をプリズム上で干渉させることによる円偏向エバネッセント場を生成する方法につい

て提案し、探針上GaAsを用いて、この円偏向エバネッセント干渉場の偏向状態を知る方法について議論している。さらに、実際に干渉計を構成した実験系を利用し、エバネッセント場によるGaAs探針先端部電子励起の確認実験を行った後、ゼロデュアガラス上に構成した干渉計を用い、円偏向エバネッセント場の生成を試みた。干渉計上のプリズム端面に探針を近接させ、探針からの発光の円偏向度を測定し、測定される円偏向度の探針位置依存性の測定を行った。また、探針走査位置の校正を行うために、強度変調の干渉パターンを作製し探針からの発光強度の探針位置依存性の測定を行った。干渉計の安定性および探針走査位置の校正などを考慮すると、測定された円偏向度の探針位置依存性は、プリズム端面上に円偏向と直線偏向を繰り返す円偏向干渉パターンができたことを示唆している。本論文では最後に、これらの実験結果について総括し、本論文で実験的に検証をおこなった円偏向エバネッセント光を応用することにより展開されるスピン計測・制御に関する研究領域について論述を行った。

これを要するに、著者は、円偏向エバネッセント光の発生と、これによる半導体ナノ構造の局所スピン励起に関する新しい知見を得たものであり、量子光学、スピントロニクス、ナノテクノロジーの分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。