

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	森下 弘樹
主 論 文 題 目： Characterization of phosphorus donors in silicon by low magnetic field electrically detected magnetic resonance (低磁場電気検知磁気共鳴によるシリコン中のリン不純物評価)				
(内容の要旨)				
<p>電子常磁性共鳴(EPR)は半導体中の様々な欠陥や不純物の磁気物性を解明する有効な手段である。欠陥によっては低磁場(例えば<200G)においてエネルギー準位が交差(反交差)し、電子スピンと核スピンが重ね合わせ状態を形成するため、低磁場での EPR 評価が必要となる。しかし、通常の EPR 測定では 3 kG 付近の高い磁場が用いられる。EPR 信号強度が磁場の 2 乗に比例するため、それよりはるかに低い磁場においては信号強度の確保が困難となる。</p> <p>そこで本研究では、信号強度が共鳴周波数に依存せず、感度が EPR よりも$\sim 10^5$倍高い電気検知磁気共鳴(EDMR)法を開発した。そしてシリコン中のリン不純物の低磁場(200G 以下)電子常磁性共鳴を測定し、電子スピンと核スピンの重ね合わせ状態などの詳細を解明した。</p> <p>本論文は 6 章から構成される。第 1 章では本研究の背景と目的を示す。第 2 章では磁気共鳴の基礎と電気検知磁気共鳴の概要を記す。第 3 章では本研究が構築に成功した低磁場 EDMR 装置の構成を述べる。第 4 章では低磁場 EDMR を用いたシリコン中のリン不純物の測定結果と解析を示す。200 G 以下の低磁場では、スピンハミルトニアンにおいて超微細相互作用項が支配的になるため、リン不純物の電子スピンと核スピンのエネルギー状態が混ざり合う。そのため、高磁場 EPR で観測可能な許容遷移数 2 本に対し、低磁場 EDMR 測定で観測された遷移は 5 本に増えた。印加磁場を 0-200G、共鳴励起周波数を 0-1GHz の範囲で連続的に変化させた EDMR マッピングを行い、理論予測と定量的に比較することから観測されたすべての遷移がリン不純物由来であることを示した。さらに理論構築を進めることから、Si/SiO₂ 界面付近に存在する深い準位を介したリン電子のスピン依存再結合が低磁場 EDMR 信号の起源であることを示した。第 5 章ではリン不純物低磁場 EDMR の不均一拡がり幅を安定同位体濃度を制御したシリコン結晶を用いて調べた。印加磁場が大幅に異なるにも関わらず、リン不純物の低磁場 EDMR 線幅と通常の EPR 線幅は同じであり、その拡がりの主要因が背景 ²⁹Si 核スピンとの超微細相互作用であることを明らかにした。これは、リン電子と界面準位間の相互作用が、再結合を促すには十分であるが、線幅を拡げる程には強くないことを示す。第 6 章では、本論文の結論を述べる。</p> <p>本研究では、新たに開発された低磁場 EDMR 装置が、半導体中の不純物や欠陥の低磁場における磁気物性評価に有用であることを示した。また、リン不純物の測定において電子スピンと核スピンの重ね合わせ状態を明確に観測した。低磁場において形成されるこの状態は量子情報処理の量子ビットとして利用できると期待される。</p>				

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Fundamental Science and Technology	Student Identification Number	SURNAME, First name Morishita, Hiroki
Title Characterization of phosphorus donors in silicon by low magnetic field electrically detected magnetic resonance		
Abstract <p>Electron paramagnetic resonance (EPR) is one of standard methods for characterization of impurities and defects in semiconductors. There are defects whose energy levels cross (anti-cross) and/or form superposition states between electron- and nuclear-spins at low-magnetic fields, e. g., <200 G. However, the standard EPR equipments employ high magnetic fields of around 3 kG, because their signal intensity increases in proportional to the square of the magnetic field. Consequently, an EPR equipment operating at such low fields is not available.</p> <p>The present work focuses on development of a low magnetic field electrically detected magnetic resonance (LFEDMR) system whose intensity is independent of the field and sensitivity is about 10^5 times higher than that of the standard EPR. Using this system, EPR of electrons bound to phosphorus donors in silicon has been investigated at low fields (<200 G).</p> <p>This thesis is composed of six chapters. Chapter 1 is introduction providing the background and purpose. Chapter 2 explains fundamentals of magnetic resonance and principles of electrical detection of the resonance. Chapter 3 explains the details of the LFEDMR system developed in this study. Chapter 4 presents LFEDMR of phosphorus in silicon. Because the hyperfine term dominates the phosphorus spin Hamiltonian at fields <200G, electron- and nuclear-spin levels of phosphorus mix. Therefore, the number of experimentally observed resonance peaks increased to five with respect to two that can be observed with the standard EPR. The results of EDMR mapping recorded by continuous tuning of magnetic fields between 0 and 200 G and resonance frequencies between 0 and 1 GHz agree very well with theoretical predictions for phosphorus in silicon. A theoretical model is constructed to confirm the origin of the LFEDMR signal to be the spin-dependent recombination of phosphorus electrons via deep-level defects situating at the Si/SiO₂ interface. Chapter 5 investigates the inhomogeneously broadened linewidth of phosphorus LFEDMR using isotopically controlled silicon. Despite the differences in the externally applied magnetic fields, the widths of phosphorus LFEDMR and EPR are the same and are broadened predominantly by the hyperfine interaction between phosphorus electron spins and background ²⁹Si nuclear spins. The interaction between electron spins of phosphorus and recombination centers is strong enough for the LFEDMR detection but weak enough not to affect the linewidths. Chapter 6 provides conclusions and outlooks.</p> <p>The present thesis study has developed successfully the LFEDMR system and demonstrated its advantage towards a variety of magnetic property characterizations of impurities and defects in semiconductors. The LFEDMR characterization has been employed to reveal the superposition states between phosphorus electron- and nuclear spins. Such states, which emerge only at low magnetic fields, are expected to play important roles as quantum bits in future silicon-based quantum information processing.</p>		