

Photoluminescence studies of isoelectronic
beryllium-pairs and carbon-oxygen spin triplet centers
in silicon

March 2012

Toyofumi Ishikawa

主 論 文 要 旨

報告番号	㊦ 乙 第	号	氏 名	石川 豊史
主論文題目： Photoluminescence studies of isoelectronic beryllium-pairs and carbon-oxygen spin triplet centers in silicon (シリコン中のベリリウム対および炭素-酸素スピン三重項等電子中心のフォトルミネッセンスによる研究)				
(内容の要旨) シリコンは間接遷移型半導体であることから、電子-ホール対の再結合における発光効率が $10^4 - 10^5$ と低く、高効率な発光源としての活用が困難である。そこでエルビウムなどの希土類不純物をシリコンに添加し内殻遷移を利用することや、ナノ粒子化による量子効果を利用した発光効率の向上などが摸索されてきたが、本研究では、シリコン中において、価電子数がシリコン結晶と等しい等電子中心からの発光に着目する。ここで等電子中心からの発光エネルギー線幅が鋭い場合には、欠陥内に存在する原子核スピンによる分裂が観測できることが期待される。また、等電子発光中心の量子効率低温において 100% に到達するため、発光により放出される光子状態が欠陥の励起子状態や原子核スピンとエンタングルしている状態を量子情報処理に活用できる可能性がある。そこで本論文では、シリコン格子中で 2 個のベリリウム原子が対となるベリリウム対欠陥と、炭素と酸素が対となる炭素-酸素欠陥に着目し、それらに束縛された励起子発光特性を低温 ($T < 20\text{K}$) フォトルミネッセンス (PL) 測定により調べることから、これら等電子中心の微細構造とそこからの発光機構を明らかにする。 本論文の第一章は導入で、半導体発光素子の量子情報処理応用を中心とした背景を述べる。第二章では PL の原理と構築した PL 実験系の構成、第三章では半導体中の等電子発光中心の概要を記述する。第四章ではベリリウム対の PL 測定と解析を述べる。ここでは束縛励起子の発光波長ピークが外部からの磁場印加による分裂することが示され、その分裂数が $\langle 100 \rangle$ 方向の磁場印加で最も少なくなることから、ベリリウム対の 2 個の原子が $\langle 111 \rangle$ 方向に揃っていることを示す。また磁場による分裂状態の詳細なる解析によりベリリウム対がアクセプタ的等電子中心であることを示す。第五章では炭素 - 酸素対欠陥の PL 測定と解析を述べる。ここでは 790 meV に位置するゼロフォノン発光ピーク (C-line) より 2.64 meV 低いエネルギーに新しい発光 (C_T -line) が存在することを見出す。さらに C_T -line に関する局在振動モード、 C_T -line と C-line との発光強度比に関する温度依存性、母体シリコン結晶同位体組成比に起因する発光ピーク位置の変化、外部磁場印加中でのゼーマン分裂などの観測と解析を統括することから、 C_T -line が炭素 - 酸素欠陥に束縛された励起子のスピン三重項状態に基づく発光ピークであることを明らかにする。第六章ではまとめと展望を述べる。 半導体中の不純物欠陥を量子情報処理に利用する場合には、その不純物欠陥のエネルギー準位・磁気特性・発光特性を正確に把握し、そのうえで不純物欠陥の量子状態の操作と放出される光子状態の活用方法を見出す必要がある。本研究で得られた知見は、シリコン中の等電子発光中心を量子情報処理に応用するという新しい方向性に重要な指針を与えるものと期待される。				

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School School of Fundamental Science and Technology	Student Identification Number 80945023	SURNAME, First name ISHIKAWA, Toyofumi
Title Photoluminescence studies of isoelectronic beryllium-pairs and carbon-oxygen spin triplet centers in silicon		
Abstract <p> Silicon (Si) is well known as one of the indirect gap semiconductors, typically possessing disadvantages for photon emitters. The most critical reason of the disadvantages is that radiative efficiency of recombination between electrons and holes in Si is quite low ($10^{-4} - 10^{-5}$). In the indirect semiconductors such as Si, energy generated by the recombination is frequently absorbed by phonons or utilized for non-radiative processes. To improve the radiative efficiency, photon emission induced by inner-shell transitions of erbium in Si and Si nanoparticles is being researched enthusiastically toward silicon-based photon emitters. Here, we focus on isoelectronic centers (IECs) in Si which have much higher radiative efficiency than that of donors and acceptors. The IECs are impurities that have the same number of valence electrons as host Si atoms, forbidding the non-radiative Auger process which is the most dominant decay process in recombination of excitons bound to impurities. If optical transitions of the IECs have sufficiently narrow linewidths, we can spectrally identify nuclear-spin states of the luminescence centers. Furthermore, since radiative efficiency of the IECs approach $\sim 100\%$ at low temperature, photons emitted from the IECs are enabled to be entangled with the bound exciton states or the nuclear spin states, and such entangled states are expected to be applied for quantum information processing (QIP). In this thesis, two isoelectronic centers in Si (an interstitial-substitutional beryllium pair (Be pair) and an interstitial-carbon interstitial-oxygen complex (C_i-O_i)) are studied using photoluminescence (PL) spectroscopy. This thesis presents fine structures and luminescence mechanism of these IECs. </p> <p> Chapter 1 shows introduction of this thesis. In this chapter, background of QIP and importance of photon-emission devices in application for QIP are explained mainly. Chapter 2 presents principles of PL, especially, decay processes of excitons and mechanism of Fourier transform spectrometer used for taking PL spectra. In chapter 3, properties of IECs are reviewed. Chapter 4 presents PL results obtained from Be pairs in Si. In these results, the number of Zeeman split peaks is the smallest for magnetic field applied along a $\langle 100 \rangle$ direction, providing a direct evidence that the Be pairs orient themselves in a $\langle 111 \rangle$ direction. In addition, the g values of the hole and electron in the bound exciton are determined by fitting to the Zeeman peaks, supporting the shallow acceptor character of this isoelectronic center. Chapter 5 reports that a new luminescence peak labeled as C_T-line emerges at the energy 2.64 meV below the well-known luminescence from the ZPL of a C_i-O_i singlet state situating at 790 meV (C-line). Through the PL measurements of C_i-O_i, we will see that C_T-line is associated with an isotropic spin triplet state due to quench of orbital angular momentum of the hole composing the bound exciton. </p> <p> To apply spin states of impurities in solid for QIP, it is essential to comprehend the properties of the defects in question, for example, energy levels, luminescence mechanism and magnetic-field dependence. Based on information of these properties, we can manipulate the quantum states and handle the emitted photons for optical readout and creation of entanglement. Therefore, we believe that the results in this thesis are useful information toward photonics-based QIP utilizing the IECs in Si. </p>		