

氏名(本籍地)	櫻井 蓉子(群馬県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第6812号
学位授与年月日	平成26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	

Spectroscopic Study of Correlated Electron-Hole Systems in Silicon Nanostructures  
(シリコンナノ構造中電子-正孔相関係の分光学的研究)

主査	筑波大学教授 博士(学術) 都倉 康弘
副査	筑波大学教授 理学博士 大塚 洋一
副査	筑波大学准教授 博士(理学) 池沢 道男
副査	筑波大学准教授 博士(理学) 野村 晋太郎
副査	筑波大学准教授 博士(理学) 神田 晶申

## 論 文 の 要 旨

最近の Si ナノファブリケーションの著しい発展によって、Si ナノレイヤーや Si ナノワイヤーといった低次元系における電子正孔系の研究が進展している。低温かつ強光励起密度下では、バルク半導体中において自由励起子ガス(FE)や電子正孔プラズマ(EHP)は電子正孔液滴(EHD)と呼ばれる液体相へ凝縮することが知られている。低次元系にキャリアを閉じ込めることで、相関エネルギーが増大し、EHD への転移を促す。一方、量子閉じ込めによって、バルク Si のバンドの縮退が解け、EHD への転移温度を抑制する可能性がある。このように、キャリアの閉じ込めが EHD への相転移を促進させるのか否かは非自明であった。低次元系におけるキャリアの凝縮は多体物理の根本的な問題であるが、低次元系におけるキャリアの相図に対する実験的解析は十分にはなされていなかった。そこで、本研究では Si ナノ構造、即ち Si ナノレイヤーと Si ナノワイヤーのフォトルミネッセンス(PL)測定により低次元系での電子正孔状態の研究を行った。

Si ナノレイヤー試料は silicon-on-insulator(SOI)を(100)面に対し熱酸化することで形成した。Si ナノレイヤーの厚みは 2.7 から 25.2nm まで変化させた。Si ナノワイヤー試料はリソグラフィ加工と反応性イオンエッチングの後、Si フィン構造を熱酸化することで作製した。熱酸化後のナノワイヤーの高さは約 50nm、幅は 20nm から 390nm であった。熱酸化後、希釈水素雰囲気下でアニーリングした。

発光測定は顕微分光測定系を用いて波長 325nm の励起光を試料表面に集光し、試料からの発光を InGaAs マルチチャンネルディテクタで検出した。また、発光の寿命を、波長 325 nm、繰り返し周波数 200 kHz のパルスレーザーを用いてシングルフォトンカウンティング法によって測定した。

Si ナノレイヤーからの発光の積分強度は、膜厚が薄くなるほど増大した。Si ナノレイヤーからの発光スペクトルでは低エネルギー側のブロードなバンドと、高エネルギー側のピークの2つが観測された。低エネルギー側のブロードなバンドは二次元状態密度を用いて電子と正孔の占有数の畳み込み積分によってモ

デル化した。高エネルギー側はバルク励起子と同じ関数を用いた。両者に対してガウス関数の畳み込み積分によって井戸幅の揺らぎによるスペクトル広がりを取り入れた。このフィッティングから、キャリア密度、キャリア温度、バンド端エネルギーを求めた。ブロードな PL バンドの幅は、Si ナノレイヤーの膜厚が薄くなるほど増大し、界面ラフネスの影響は井戸幅依存性から議論された。

スペクトルフィッティングから得られたキャリア密度、フェルミエネルギー、化学ポテンシャルは、キャリア温度の二乗の関数で良くフィットされた。Si ナノレイヤーの膜厚が薄くなるほど、これらの温度依存性は小さくなることを見いだされた。このことは、三次元の状態密度から擬二次元の状態密度への遷移で説明された。さらに、スペクトルフィッティングから得られたキャリア密度とキャリア温度のプロットから、EHD と EHP の相境界が決定された。EHD と EHP の間の、観測された最大の転移温度は、膜厚が薄いほど高くなり、膜厚 6.1 nm の試料では、バルクでの転移温度を越えることを初めて見いだした。

発光寿命は Si ナノレイヤーの膜厚が薄くなるほど短くなった。さらに、温度に大きく依存することがわかった。これらは、音響フォノンと拡散の観点から議論され説明された。

Si ナノワイヤー試料からの発光スペクトルには、バルク励起子よりも長波長側にブロードなバンドが見られた。Si ナノワイヤーの軸方向に走査すると均一な発光スペクトルが得られた。また、ワイヤー幅の減少とともにブロードなバンドのピークエネルギーが高エネルギー側へシフトした。これらはナノ構造を反映した発光が観測されたことを示している。さらに Si ナノワイヤーからの発光強度は、アニール温度が 400°C の試料が最も大きいことを見いだされた。発光強度はおおよそ界面の欠陥密度の逆数に比例すると考えられ、400°C において水素処理された試料が最も界面準位が少ないことを示している。この結果は電気測定から得られる界面準位密度の結果と整合した。以上により、光学的手法による評価は、Si ナノワイヤーのみならず、他の Si デバイスに対しても広く有用であることが示された。

本研究では Si ナノ構造中電子正孔系からの PL を調べた。PL の解析から擬二次元系ではバルクよりも高いキャリア温度において EHD が存在することを初めて明らかにした。得られた成果はシリコンナノ構造中電子-正孔系における相関効果の理解を深めることに貢献した。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

本論文は高品質シリコンナノレイヤー、ナノワイヤー中の電子-正孔相関系の分光学的研究についてまとめたものである。従来、電子-正孔相関効果の研究に耐えるような高品質試料を得ることが困難であったため、シリコンナノレイヤー、ナノワイヤー中の電子-正孔相関系の実験的研究は限定されたものであった。本研究では、シリコンナノレイヤーの膜厚、ナノワイヤーのワイヤー幅等の構造パラメータを変えた試料を用いて、電子-正孔系のキャリア温度、キャリア密度、バンド端エネルギー等を分光学的に詳細に調べ、その結果、EHD と EHP の相境界を決定し、その観測された最大の転移温度は、膜厚が薄いほど高くなり、薄い試料では、バルクでの転移温度を越えることを初めて見いだしたものである。この結果は EHD 状態の安定性が閉じ込めにより増すことを分光学的に初めて示したもので高く評価できる。本研究により得られた成果は当該研究分野に大きく寄与するものであり、博士論文として相応しい内容のものであると判断する。

〔最終試験結果〕

平成 26 年 2 月 19 日、数理物質科学研究科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。

〔結論〕

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(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。