

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21740226

研究課題名（和文）シリコンナノ構造における多体電子ダイナミクス制御

研究課題名（英文）Control of high-density carrier dynamics in silicon nanostructures

研究代表者

太野垣 健（TAYAGAKI TAKESHI）

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：80422327

研究成果の概要（和文）：

オージェ再結合は、半導体ナノ構造における高密度光励起状態で顕著に現れ、レーザーや太陽電池などの光電子デバイス設計に重要な役割を果たすと考えられる。本研究では、様々な構造のシリコンナノ物質や電場印加を行ったナノ構造半導体において、高密度光励起状態における発光ダイナミクスの測定を行った。オージェ再結合効率がナノ構造体の形状に強く依存すること、ポテンシャル形状制御によってオージェ再結合を制御できることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

Auger recombination appears under high-density photocarrier conditions in semiconductor nanostructures. It plays an important role for optical applications of semiconductor nanostructures to optoelectronic devices such as laser and solar cells. We studied photoluminescence dynamics under high-density photoexcitation in silicon-based nanostructures with various structural parameters and under an electric field. We found that the Auger recombination rates depend strongly on the shape of nanostructures and that the control of Auger recombination is available by manipulating the wave functions of photocarriers in designed confinement potential.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：光物性

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：光物性、半導体物性、ナノ材料

1. 研究開始当初の背景

(1) 現代シリコンエレクトロニクスでは界面制御が重要であることはよく知られている。シリコンデバイスへの光機能付加、いわゆるシリコンナノフォトンクスの進歩に伴い、光励起キャリアへの界面効果や高密度光励起

効果の理解と制御が重要になってきている。特に、従来は克服が非常に困難であると考えられていたシリコンからの発光機能について、フォトンクス結晶やナノ構造試料においては、高効率の発光が室温で起こることが報告され、議論が活性化している。これらの議

論により、発光増大におけるシリコンナノ構造の界面効果と、発光を妨げる過程である高密度キャリアの非輻射過程（オージェ過程）が重要な役割を果たしており、これらを制御することが強い発光や光ゲインを得るために解決すべき課題であると考えられている。

(2) 半導体ナノ構造は、光励起キャリアを空間的に閉じ込め、高密度状態を容易に生成できることから、光物性の中心的テーマである高密度励起現象の研究対象として研究されてきた。また、ナノ構造では界面对体積比が非常に大きいため界面効果が顕著であり、界面状態の理解と制御が応用的にも基礎的にも物理学の重要な課題となっている。しかし、これまで高密度光励起効果と界面状態の両者に着目した研究はほとんどなかった。

2. 研究の目的

半導体ナノ構造のようなナノスケールの量子閉じ込め構造においては、量子効果によって電子波動関数が障壁層にしみ出すようになる。この量子効果によるしみ出しによってキャリアが障壁層をトンネルすることはよく知られている。しかし、電子波動関数のしみ出し成分がキャリア間相互作用や高密度キャリアダイナミクスに果たす役割についてはよくわかっていない。

本研究では、電場印加による閉じ込めポテンシャル形状の制御によってキャリアの波動関数を制御すること、オージェ過程の特性を電場印加によって制御すること、を行う。これにより、電場印加による波動関数しみ出し成分の制御とオージェ過程の相関を解明することを目的とする。

これによって、シリコンナノ構造における高強度発光を阻害している最大の要因であるオージェ過程のメカニズム解明と制御方法の探索を行う。

3. 研究の方法

光励起キャリアの波動関数のしみ出し成分を制御することによって、高密度励起キャリアのオージェ過程を制御する方法の探索を行う。そのために、電場印加による閉じ込めポテンシャル形状の制御によってキャリアの波動関数を制御し、ポテンシャル井戸層から障壁層へのしみ出し成分を制御する方法を探索する。しみ出し成分をもつ光励起キャリアについて、高密度励起キャリアの発光ダイナミクス測定によりオージェ過程の印加電場依存性を明らかにし、波動関数のしみ出し成分とオージェ過程の相関やオージェ

過程のメカニズムの解明を行う。

これらにより、ナノ構造制御による多体電子ダイナミクスの解明を進め、シリコンレーザーや高効率太陽電池などの光電子デバイスに向けて、オージェ過程の制御を利用した光機能の探索を行う。

4. 研究成果

(1) 近赤外顕微発光分光により、シリコンゲルマニウム量子井戸構造の高密度光励起効果について解明を進めた。励起子ボア半径よりも小さな井戸幅を持つ量子井戸においては、量子閉じ込め効果により発光エネルギーのブルーシフトが観測される（図1）。

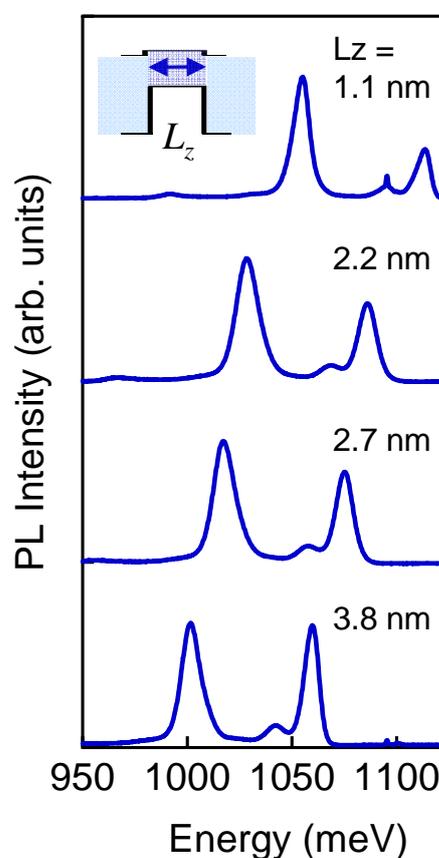


図 1: 井戸幅の異なる単一量子井戸からの発光スペクトル。

高密度光励起状態においては、キャリア密度や発光強度の飽和をもたらすオージェ再結合過程が現れるが、井戸幅の異なる単一量子井戸の比較から、井戸幅の小さな量子井戸ではオージェ再結合が抑制されることを見出した。これは、量子井戸においてはバリア層にしみ出す効果が顕著になるなど、電子波動関数の形状が半導体ナノ構造によって制御されるためであると考えられる（図2）。

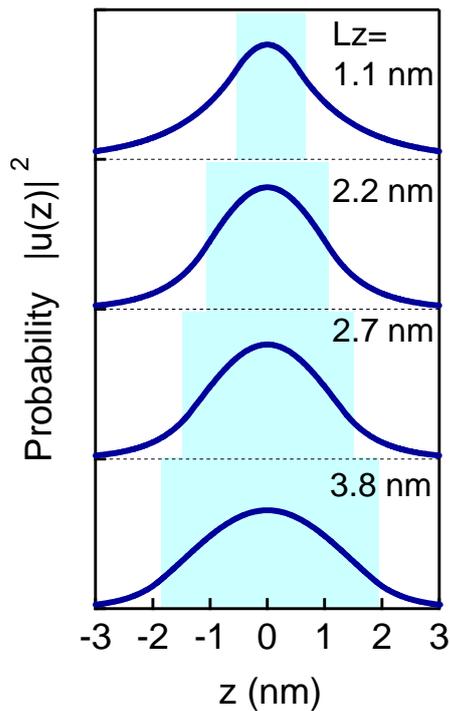


図 2: 井戸幅の異なる単一量子井戸におけるホール波動関数。

さらに、量子井戸の結合によるキャリア波動関数形状の制御と高密度キャリアダイナミクスの相関について調べ、ナノ構造の制御による波動関数の形状制御によってオージェ再結合を抑制できる可能性を見出した。

さらに、電場印加によってポテンシャル形状やキャリア波動関数形状を系統的に制御するために、低温における半導体ナノ物質試料へ電場印加の検討を行った。

試料表面に電場印加を行った結合量子井戸において、発光強度の印加電場強度依存性、励起光強度依存性を調べた (図 3)。強励起条件においてはオージェ再結合が顕著に現れることがわかった。弱励起条件においては発光強度が電場印加によって増減する奇妙な振る舞いを示すことを見出した。高電場印加条件において、いったん減少しかけた発光強度がさらに強い電場印加により増大する振る舞いに関して、インパクトイオン化によるキャリア増大の可能性を検討した。

また、シリコン中のゲルマニウム量子ドットについて、高密度励起発光ダイナミクスについて研究した。作製条件の異なる量子ドットにおいて、発光エネルギーや励起光強度、試料温度に対する、発光ダイナミクスの振る舞いを詳細に調べた。高密度光励起状態にお

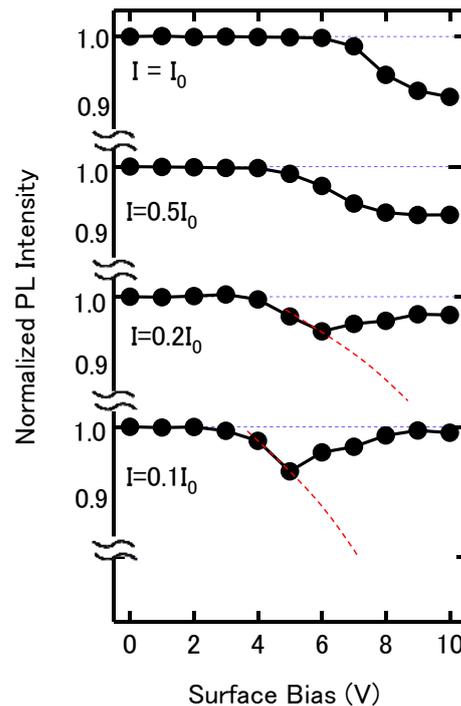


図 3: 異なる励起光強度における発光強度の印加電場依存性。

いて、発光スペクトル形状、発光ダイナミクスに大きな変化が見られ、そのような発光特性の変化がオージェ再結合の出現によって理解できることがわかった。

これらの結果は、高強度発光の実現を抑制しているオージェ再結合を人工ナノ構造によって制御できることを示唆している。今後のシリコンナノ構造とキャリア間相互作用の系統的な研究によって、レーザー発振に向けた強い発光など新しい光機能がナノ構造制御によって得られる可能性を示している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1) T. Tayagaki, S. Fukatsu, and Y. Kanemitsu, "Auger recombination in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ quantum wells under high-density photoexcitation", *physica status solidi. C* 8, 1049-1054 (2011). (査読有)

- 2) T. Tayagaki, S. Fukatsu, and Y. Kanemitsu, "Control of Auger recombination rate in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ heterostructures", J. Phys. Soc. Jpn. 79, 013701/1-013701/4 (2010). (査読有)

[学会発表] (計3件)

- 1) T. Tayagaki, S. Fukatsu, and Y. Kanemitsu, "Well-width dependence of Auger recombination rate in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ single quantum wells under high-density photoexcitation", European Materials Research Society Spring Meeting (2010), 2010年6月9日, Strasbourg, France.
- 2) 太野垣健, 深津晋, 金光義彦, SiGe/Si 量子井戸における高密度キャリア発光の電場効果, 日本物理学会秋季大会, 2009年9月25日, 熊本大学.
- 3) 太野垣健, 深津晋, 金光義彦, SiGe/Si 量子井戸における高密度キャリア発光の電場依存性, 応用物理学会, 2009年9月10日, 富山大学.

[その他]

ホームページ:

<http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~opt-nano/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太野垣 健 (TAYAGAKI TAKESHI)
京都大学・化学研究所・准教授
研究者番号: 80422327