

Mechanism of Carrier Recombination in Boron Implanted and Doped Silicon

(シリコンにおける輻射再結合メカニズムに関する研究)

学位論文内容の要旨

シリコンは地球に最も多く含まれる元素の一つで、常温、常圧ではダイヤモンド構造をとる物質で、ダイオードやトランジスタなど半導体マイクロエレクトロニクスの大部分を占めている。しかし、間接遷移形の半導体であるため、ガリウムヒ素などの直接遷移形半導体と比べて発光強度が弱い。しかもバンドギャップが室温で 1.11 eV であり、発光スペクトルは近赤外域に現れる。そのため、検出器などの実験的困難から、室温付近でのシリコンの間接励起子の緩和過程あまり明らかにされていない。ボロンを n 形シリコン基板にイオン打ち込みすることで表面を改質することで発光効率が高くなるシリコン材料を用い、発光スペクトルの温度依存性、励起波長依存性、圧力依存性からシリコンの間接励起子の緩和過程を実験的に明らかにしようとしたものである。また、ボロンをドーブしたシリコンの発光強度における不純物濃度依存性から、このボロン打ち込みシリコン材料が室温で高効率に発光する原因を明らかにしようとしたものである。

ボロン打ち込みシリコン材料ではイオン注入に伴い表面から約 200 nm までボロンが高濃度 ($10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) で分布し、同時に転位ループも存在している。発光スペクトルはピークエネルギーが 1.11 eV の近赤外領域に現れる。30K から 300K の温度範囲で、このボロン打ち込みシリコンから得られる発光を測定した。励起子の分布は状態密度とボルツマン分布の積で表されるので、これを用いて発光スペクトルをフィッティングし、発光の立ち上がりエネルギー、励起子温度、積分強度を求め、それらの温度変化について調べた。

Macfarlane らによってシリコンのフォノンが関与する光吸収スペクトルにおける立ち上がりエネルギーの温度変化が調べられているが、発光の立ち上がりエネルギーについての研究はなされていない。さらに、Macfarlane らにより実験が行われた頃には、間接遷移によるフォノンの吸収、放出などの同定がなされていなかった。本研究では、発光の立ち上がりエネルギーの温度変化を求め、それらが吸収の立ち上がりエネルギーと一致することから、ボロン打ち込みシリコン材料の間接励起子の緩和過程を発光により解明した。また発光スペクトルから得られた励起子温度は格子の温度より高くなっている。言い換えると、励起子-格子系で準熱平衡状態になっていることを示している。シリコンから発光スペクトルは、励起子-格子系で準熱平衡状態にある励起子がフォノンと関与して再結合したものと結論づけられる。

ボロン打ち込みシリコン材料を 4 つの異なる波長の光で励起したとき発光スペクトルの立ち上がりエネルギーや励起子温度は励起波長によらないものの、積分強度の温度変化が励起波長に依存していることが実験的に示された。これは、波長が違えば光の侵入長が異なるため、転位ループが多く存在する主に表面近傍を励起した場合と、転位が少ないもののシリコン基板部分を主に励起した場合との違いを反映している。

本研究ではボロン打ち込みシリコン材料が高効率に発光する原因を明らかにするため、ボロンをドーピングしたシリコンを用いて発光強度の不純物濃度依存性について調べた。また、ボロン打ち込みシリコン材料でも発光強度とボロンの濃度との関係を比較した。ボロンドープシリコンと比べると、発光効率はボロン打ち込みシリコン材料が小さいものの、ボロン打ち込みシリコン材料、ボロンドープシリコンともに、発光強度が濃度に対して増加している。つまり、ボロン打ち込みシリコン材料の表面近傍に高濃度に存在するボロンが発光効率の増大に寄与していることを示している。

以上のようにボロン打ち込みシリコン材料の発光スペクトルから、シリコンの間接励起子の緩和過程が明らかになり、発光効率が悪いとされたシリコンがボロン打ち込みによって比較的高効率に発光する原因を実験的に示した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	中 原 純一郎
副 査	教 授	石 橋 晃
副 査	教 授	小野寺 彰
副 査	助教授	三 品 具 文
副 査	講 師	近 藤 憲 治

学 位 論 文 題 名

Mechanism of Carrier Recombination in Boron Implanted and Doped Silicon

(シリコンにおける輻射再結合メカニズムに関する研究)

2001年に珪素ウェハーに硼素イオン打ち込みをし、熱処理を施し、表面近傍を改質することにより室温で動作するLED材料が開発された。この硼素イオン打ち込み熱処理された珪素の特徴は、表面近傍に非常に高濃度のボロンが存在すること、硼素打ち込みにより生じた転位ループが存在するという2点である。この硼素イオン打ち込み珪素の発光機構や室温での高効率発光の原因には不明な点が多い。また珪素において多くの低温での研究があり、低温では発光機構が明確であるにもかかわらず、室温付近では発光が弱いことや良い検出器が無かったことから、現在まで発光の起源が明らかにされていない。またイオン打ち込みをした珪素において異常な室温付近での発光の増強が報告されている。この様なことから室温付近の発光機構を明らかにするために室温付近の発光を系統的に調べる必要がある。

本研究では室温での超高圧下の発光、発光の温度依存性、イオン打ち込み珪素の表面近傍の発光、異なる硼素濃度の珪素の発光を系統的に調べている。これらにより珪素の室温で観測される発光はほぼ試料によらず、格子振動量子を放出し、電子・正孔対である励起子の再結合による発光する過程であると明らかにした。またこの間接励起子発光が硼素濃度に依存して増加することも明らかにした。表面近傍の発光の温度依存性を調べる目的で硼素イオン打ち込み試料について励起波長を変え発光を測定し表面から励起領域を変え発光を測定した。このことにより今まで未知であった50 K以上室温まで発光強度が増加する原因として、イオン打ち込みの試料の表面近傍の高濃度硼素と表面近傍にイオン打ち込みにより形成された格子欠陥やその集合である格子欠陥ループなどに関係していることを明らかにした。

本論文で解明された珪素の室温発光の機構は発光の本質を明らかにしただけでなく、不純物濃度依存性についても新知見を得たものであり、電子素子開発を効果的に行う基礎として重要であり、その発展に大きい貢献をする。

よって、著者は北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格のあるものと認める。