

イオン打ち込み Si のフォトルミネッセンス

田中秀治、中田博保
大阪教育大教養 自然研究専攻

Photoluminescence in ion-implanted Si

H.Tanaka and H.Nakata
Department of Art and Sciences, Osaka Kyoiku University

We observed photoluminescence in ion-implanted Si at 3 to 300K. Excitation intensity dependence of photoluminescence intensity is superlinear that indicates exciton formation by a separate electron-hole pair. Temperature dependence of free exciton intensity suggests exciton dissociation from impurities. Additional free exciton line was observed around 1.05 eV in a heavily phosphor-doped sample

1 はじめに

電子デバイスの材料としてよく知られるシリコン (Si) はダイヤモンド構造をとる安定な半導体である。Si のように伝導帯の底と価電子帯の頂上は K 空間上で一致していない間接遷移型半導体では遷移確率が光学遷移確率とフォノン遷移確率の積で与えられる。つまり遷移確率が光学遷移確率のみに依存する直接遷移型半導体に比べると、間接遷移型半導体は遷移確率が小さくなってしまふ。遷移確率が大きいと発光効率が増すので、発光デバイスには Si より直接遷移型半導体が適している。しかしながら発光デバイスにも、安価で安定な Si を用いることが模索されている。不純物をドーピングすることで発光効率があがり、低温での発光が確認される Si であるが常温でも発光させることができれば、十分に発光デバイスとして利用を期待できる。現在までに Homewood 等[1]によってエレクトロルミネッセンスが常温で観測され Prins 等[2]と石橋等[3]によってフォトルミネッセンスが常温で観測された。本研究では Si に B や P をドーピングした不純物半導体におけるフォトルミネッセンスを観測し、発光の原理と発光に対する不純物濃度の関係を調べた。

2 材料と実験方法

試料としてイオン打ち込みにより Si 基板に B をドーピングした P 型半導体と P をドーピングした N 型半導体を用いた。不純物濃度の違う 2 種類の試料をそれぞれ用意した。ただし N 型半導体の Si 基板には B イオン ($1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) が、P 型半導体の Si 基板には P イオン ($1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) がドーピングしており、どちらも pn 接合をしていることになる。SIMS の結果から表面から $2.05 \mu\text{m}$ の位置がバルクとの界面になっている。光源は Ar レーザー、検出器には Ge pin フォトダイオードを用いてロックインアンプで処理しフォトルミネッセンスを観測した。また冷却にはヘリウム冷凍機を用いた。

3 実験結果と考察

図 1 は 3K における B イオン打ち込みによる P 型 Si のフォトルミネッセンスのスペクトルを示した。不純物濃度がそれぞれ $9.7 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$ と $1.0 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$ のものを比較した。不純物濃度の大小に関係なくピークが 1.10 eV 付近現れた。不純物濃度高い資料では低エネルギー側に広がりが見られた。

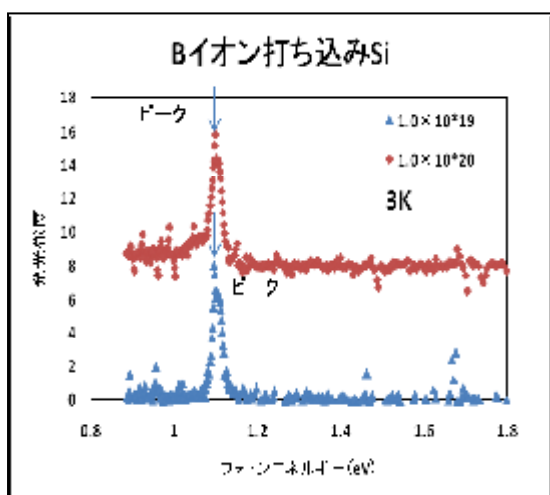


図 1 B イオン打ち込み Si のフォトルミネッセンス

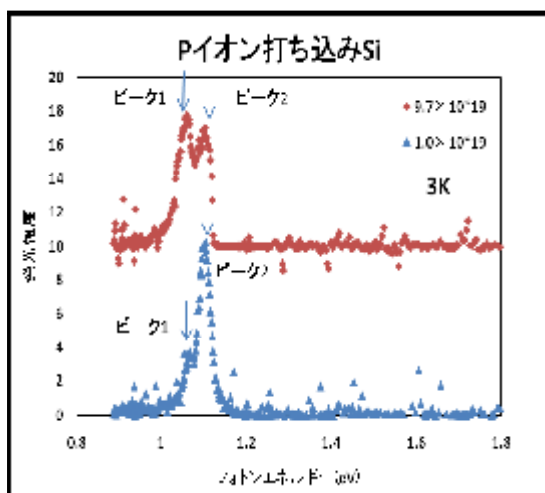


図 2 P イオン打ち込み Si のフォトルミネッセンス

図2は 3K における P イオン打ち込みによる n 型 Si のフォトルミネッセンスのスペクトルを示した。不純物濃度がそれぞれ $9.7 \times 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ と $1.0 \times 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ のものを比較した。不純物濃度が高いとピークが 2 つ観測され、ピーク 1 が 1.06eV 付近、ピーク 2 が 1.10eV 付近に現れた。不純物濃度が低い方ではピークが 1.10eV 付近に観測された。また不純物濃度が高い方の試料と同様に 1.05eV 付近に小さなピークが観測された。発光ピークエネルギーについては表 1 にまとめた。

試料	B イオン打ち込み Si	B イオン打ち込み Si	P イオン打ち込み Si	P イオン打ち込み Si
不純物濃度 (cm^{-3})	1.0×10^{20}	1.0×10^{19}	9.7×10^{19}	1.0×10^{19}
ピーク (eV)	1.10	1.10	1.05 1.10	(1.05) 1.10

表 1 P イオン打ち込み Si、B イオン打ち込み Si における発光ピークエネルギー

これら 4 つの試料は発光ピークがすべて 1.10eV 付近にみられる事からその発光起源は同じと考えた。この発光起源は自由励起子と考えた。レーザーにより価電子帯にある電子が励起され正孔ができ、また伝導帯には励起された伝導電子が現れる。この自由励起子の再結合時に発光が起こる。

Si のバンドギャップは常温で 1.17eV であるが低温では 1.204eV になる。自由励起子の束縛エネルギーの 14meV 分だけ低いエネルギーで、自由励起子はできる。また Si は間接遷移型半導体なので、運動量保存則から発光にはフォノンの影響があると考えます。TO フォノンと LO フォノンの寄与が大きいとして、x 点においてその値は約 50meV である。

$$E_g - E_{\text{exciton}} - E_{\text{photon}} = 1.14\text{eV}$$

実験値はピークの値が 1.10eV 付近であることから、自由励起子が発光の主な原因と言える。

次に不純物濃度 $9.7 \times 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ の P イオン打ち込み Si において、ピーク 1 について調べるために、励起強度をかえてフォトルミネッセンスを測定し、発光強度と励起強度の関係を図 3 に示した。

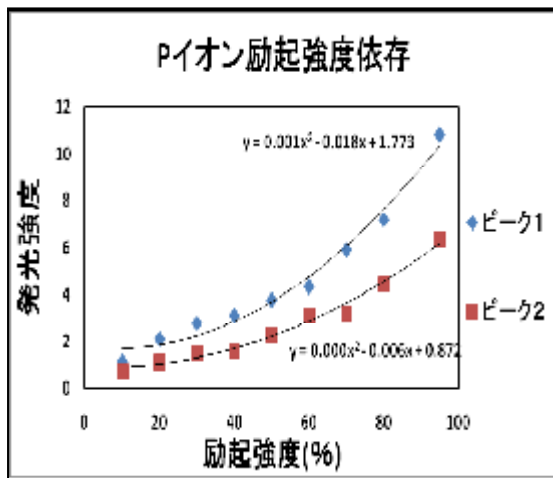


図3 不純物濃度 $9.7 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$ の P イオン打ち込み Si の発光強度の励起依存性。

ここで発光強度が励起強度の二次関数にそれぞれ近似することができたことから、図4で示すような、p-n接合面による発光を考えた。伝導帯のエネルギー準位は表面のほうがバルクよりも安定するが、価電子帯のエネルギー準位は表面よりバルク側が安定しており、図のように電子と正孔が存在するとする。このとき自由励起子はp-n接合面において再結合し発光していると考えた。このとき伝導電子が接合面に来る確率と正孔が接合面に来る確率の積であるとした。

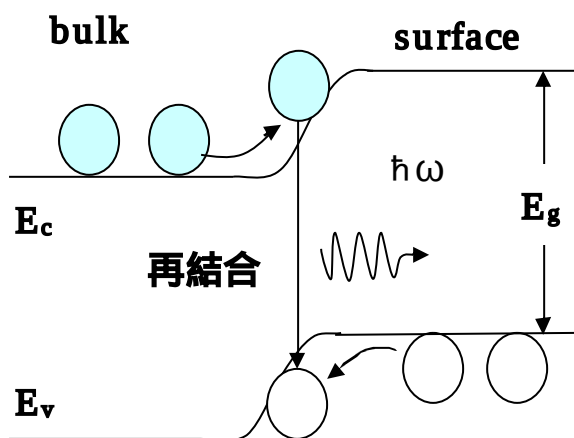


図4 p-n接合面における発光

次に不純物濃度 $9.7 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$ の P イオン打ち込み Si において温度を変化させフォトルミネッセンスを測定し図4に示した。

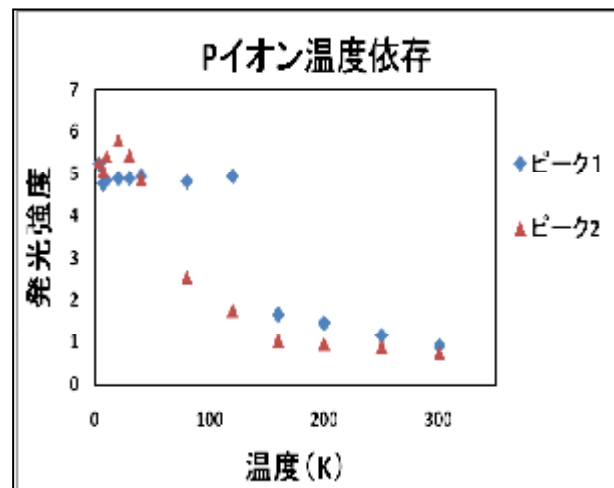


図4 不純物濃度 $9.7 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$ の P イオン打ち込み Si の発光強度の温度依存性。

自由励起子が発光起源と考えたピーク2では3K~10Kにかけて発光強度が増大している。これは低温では自由励起子がドナーによって束縛されていたためと考えた。10Kより高温側では自由励起子が減少した。300Kまで発光が観測できたので、常温でも自由励起子が存在した。ピーク1では120Kまで発光強度が落ちることなく観測されたが180Kでは急激に減少していることがわかる。またピーク2も常温で発光が確認できた。

まとめ
本研究ではイオン打ち込み Si を対象として、発光特性とドーパした不純物濃度の関係を調べるため励起強度依存性と温度依存性の測定を行った。その結果、発光起源が自由励起子であることを確認し、その発光がドーパした不純物と基盤の界面で生じると結論付けた。また~10Kでは自由励起子はド

ナーの影響で発光強度が落ちると思われる。

参考文献

[1] W.L.Ng, M.A.Lourenco, R.M.Gwilliam, S.Ledain, G.Shao, and K.P.Homewood, *Nature* 410, 192 (2001).

[2] A.D.Prins, Y.Ishibashi, S.Sasahara, J.Nakahara, M.A.Lourenco, R.M.Gwilliam, T.Kobayashi, A.Nagata, and K.P.Homewood, *phys.stat.sol.(b)* 241, 3387 (2004)

[3] Y.Ishibashi, S.Sasahara, A.Nagata, T.Sugimoto, A.D.Prins, T.Kobayashi, and J.Nakahara, *Rev.High Press.Sci.Technol.* 14, 93 (2003) (in Japanese)