

論文の内容の要旨

論文題目 歪 Si/Ge 系量子構造の形成と光学デバイスへの応用

氏名 河口 研一

Si を基盤とした光学デバイスは、現在の高度に発達した Si 電子デバイス技術との融合により、光・電子集積回路を実現する上で必要不可欠なデバイスである。これを実現するために期待されているのが、Si と同じ IV 族半導体である Ge との混晶を用いた Si/SiGe 量子構造である。

しかし、Si/Ge 系半導体の発光材料としての研究は、光励起による発光（フォトルミネッセンス: PL）特性評価が主であり、電流注入発光特性に関する研究は非常に少なかった。そこで本研究では、井戸幅を系統的に変化させた Si/SiGe タイプ II 量子井戸構造を有する Si p-i-n ダイオード構造の電流注入発光（エレクトロルミネッセンス: EL）特性の評価を、PL 特性と比較をしながら行った。

結晶成長は、ガスソース分子線エピタキシー法により行い、原料ガスは Si_2H_6 、 GeH_4 、 B_2H_6 を用いた。試料構造は、 n^+ -Si(001)基板上に、Si パッファー層を 30 nm、その後、3 周期の $\text{Si}_{0.4}\text{Ge}_{0.6}/\text{Si}$ 量子井戸を作製し、さらに、ドーピング用チャンバーに真空搬送して、 p^+ -Si 層を 30 nm 成長した。量子井戸の膜厚は $L_z=0.77$ nm \sim 2.2 nm のものを作製し、Si スペーサー層は 38 nm とした。 n^+ 、 p^+ -Si 層の不純物濃度は、それぞれ 1×10^{18} cm $^{-3}$ 、 5×10^{18} cm $^{-3}$ である。

図 1 に 30 K における PL, EL スペクトルを示す。PL スペクトルには、Si 基板の TO フォノンレプリカが見られるのに対して、EL スペクトルにおいては、量子構造からの発光のみが観測される。これは、電流注入発光の場合、電子が n 側、ホールが p 側から注入されることによ

て、発光再結合が量子井戸においてのみ起こることによるものと考えられる。また、井戸層厚の増加に伴い、 $L_z=1.2$ nm までは量子準位の低下によるレッドシフトが見られるが、 $L_z=1.2$ nm

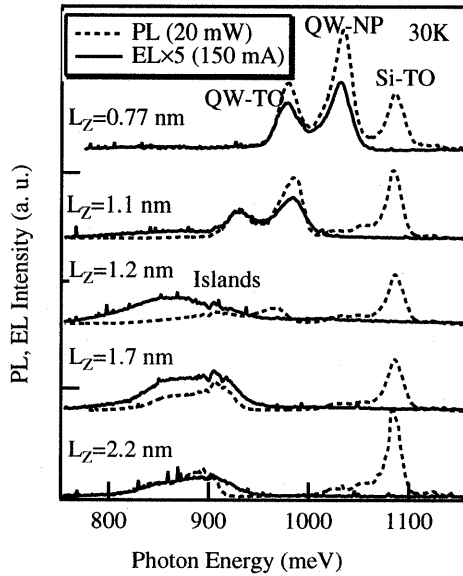


図1 p-i-n 構造の EL, PL スペクトル

EL 積分強度は、いずれの試料も、温度を上昇するに従って、一度増大し、その後減少するという傾向を示した (図 2)。この現象は、PL においても観測されたが、ドーピングを行っていない試料の PL では見られず、p-i-n 構造特有の現象である。これは、低温においては、励起がなくても SiGe 量子井戸に p⁺-Si 層から供給された多くのホールが蓄積されているために、電子とホールの再結合エネルギーが別のホールの励起に使われるオージェ過程によって、発光再結合が抑えられるためと考えられる。井戸幅を厚くすると、キャリアの活性化エネルギーが大きくなるため、オージェ過程の影響がより高温まで効いてくるが、同時に、発光結合に寄与するホールも高温まで量子井戸に存在するので、井戸幅が厚いほど高温まで発光する。特に、 $L_z=2.2$ nm の試料においては、室温 300 K においても量子構造からの発光が確認され、SiGe 量子ドットを用いることにより室温発光する Si p-i-n ダイオード実現の可能性が示された。

一方、量子効果や歪みによるポテンシャルの変調を積極的に使った、より良好な光学特性を有する Si/Ge 系量子構造の探索も必要である。そこで本研究では、より良好な結晶性を有する Si/Ge 系多層量子構造実現のひとつの手法として、Si/SiGe 多重量子井戸構造を緩和 SiGe 仮想基板上に形成することで、Si 基板上に直接成膜する際に臨界膜厚の制限により生じる周期数の制限を克服することを試み、その構造、光学特性を評価した。尚、歪み補償条件は、量子井戸 1 周期分の弾性歪みエネルギーが仮想基板に及ぼす応力を 0 にするような条件とした。試料構造は、Si(001)基板上にグレーディッドバッファー法を用いて、約 1 μm の $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ 緩和層を 725 °C

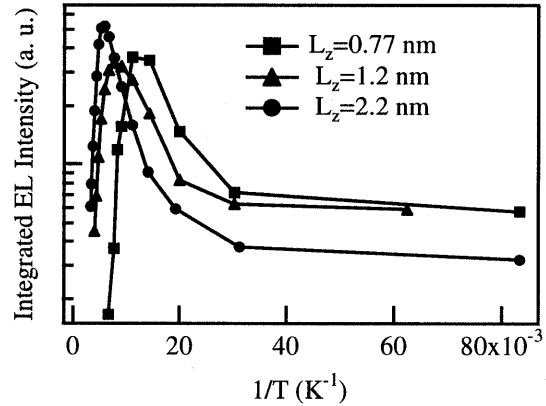


図2 EL 積分強度の温度依存性

付近を境に、2次元量子井戸層からの発光に特有の NP, TO 発光から 3次元島特有のブロードなピークへの移行も観測された。

で成長した後、40 周期の Si (17 nm)

/Si_{0.68}Ge_{0.32} (8 nm)量子井戸を 600 °C で成長し、さらに 50 nm の Si_{1-y}Ge_y キャップ層を 550 °C で成長した。残留応力の効果を調べるため、仮想基板の Ge 組成は、歪み応力を補償する条件 (y=0.09) の近傍のもの (y=0.07~0.12) も

作製した。この量子井戸構造は、Si 基板上における臨界膜厚を大きく超えている

にもかかわらず、X 線回折スペクトルにおいて量子井戸の周期性に起因する高次のサテライトピークが見られ、良好な結晶性、均一な井戸層厚を有する試料が実現されていることがわかる (図 3)。これは、歪み補償構造の有用性を示すものである。

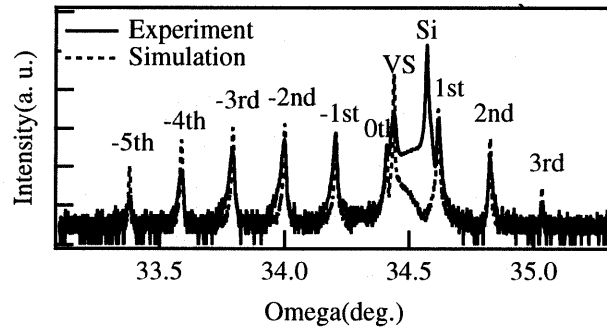


図 3 歪み補償量子井戸の X 線回折スペクトル

図 4 に PL スペクトルの温度依存性を示す。仮想基板からの発光は 90 K 付近で減衰したのに対して、量子井戸からの発光は、励起子の非局在化によるブルーシフトを伴いながら 200 K 程度まで発光した。また、仮想基板の Ge 組成が歪み補償条件からずれた場合、量子井戸からの発光は、Ge の組成の増加とともにブルーシフトしたが、このシフトは、最も低い準位間の遷移、すなわち、Si 層の $\Delta(2)$ バンドと SiGe 層の重いホールのバンド間遷移の歪みと変形ポテンシャルから予想されるシフト方向とは逆でそのシフト量もはるかに大きく、Si 層の $\Delta(2)$ バンドに溜まった電子が SiGe 層の $\Delta(4)$ バンドに散乱され、SiGe 層の $\Delta(4)$ バンドの電子も発光再結合に寄与していることを示唆している。

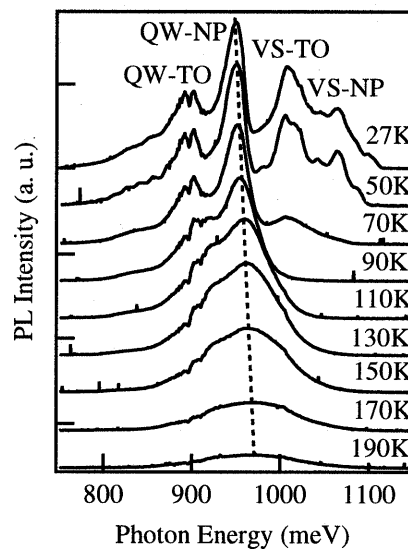


図 4 PL スペクトルの温度依存性

歪み補償量子井戸において、励起強度を増加するに伴い、量子井戸からの発光は、顕著なブルーシフトを示した。これは量子井戸がタイプ II であることによるバンド曲がり効果が存在していると考えられるため、Si 層の $\Delta(2)$ バンドに存在する電子は、SiGe 層のホールとのクーロン力によって SiGe 層の価電子帯を曲げていると考えられる。このように、歪み補償 Si/SiGe 量子井戸構造が良好な光学特性を示したことから、厚い活性層を必要とする太陽電池や発光、受光素子に

応用可能であると考えられる。

また、発光の取出効率や指向性を向上することが可能な微小共振器構造を Si/Ge 系で実現するために、歪み補償法を用いて高反射率の分布ブラッグ反射鏡(DBR)の作製を試みた。試料は、

Si(001)基板上にグレーデッドバッファ法により、約 $2 \mu\text{m}$ の $\text{Si}_{0.89}\text{Ge}_{0.11}$ 緩和層を 680°C で成長し、 800°C のアニールを施した後、1層の膜厚が $1/4$ 波長の $\text{Si}_{0.73}\text{Ge}_{0.27}$ /Si DBR を 660°C で成長した。 $\text{Si}_{0.73}\text{Ge}_{0.27}$ と Si の屈折率差は約 0.13 である。ラマンスペクトルにおいて、

DBR 部の Si 層、 $\text{Si}_{0.73}\text{Ge}_{0.27}$ 層の Si-Si モードのラマンシフトは、バルク に比べ、それぞれ -4 cm^{-1} 、 6 cm^{-1} 異なり、Si 層が引っ張り歪みを、 $\text{Si}_{0.73}\text{Ge}_{0.27}$ 層が圧縮歪みを受けて、 $7 \mu\text{m}$ 以上にわたって歪み補償構造が実現できていることを示している。

図 5 に 38.5 周期 $\text{Si}_{0.73}\text{Ge}_{0.27}$ /Si DBR の反射スペクトルを示す。 $1.33 \mu\text{m}$ において約 90% の記録的な反射率が得られた。この反射率は、微小共振器発光ダイオードや微小共振器光検出器を作製することが十分可能な値である。そこで、この歪み補償 SiGe/Si

DBR 用いて SiGe 微小共振器構造を作製した。

試料構造は、歪み補償 SiGe/Si DBR 中に、一波

長 $\text{Si}_{0.73}\text{Ge}_{0.27}$ 層を共振器層として挿入した。発光層には、膜厚がそれぞれ 1.2 、 0.6 nm の Si と Ge の量子井戸を組み合わせたものを用いた。

図 6 に PL スペクトルの励起強度依存性を示す。励起強度の増加に伴い、 1300 nm 付近の発光が際立ってくる。これは、微小共振器により量子井戸の発光に変調がかかったためであると考えられ、本研究で初めて SiGe 微小共振器により変調された発光を観測した。上部ミラーの反射率、バンド幅を大きくするために、上部ミラーをより屈折率差の大きな Si/CaF₂ 多層膜で形成した構造も作製した。図 7 に PL スペクトルを示す。

共振器構造にしていない量子井戸の発光スペクトルと比較すると、顕著な発光ピーク半値幅の減少が見られた。さらに、PL 強度の角度依存性を測定した結果、共振器構造になっていない量子井戸の発光と比較して、指向性の向上が確認された。

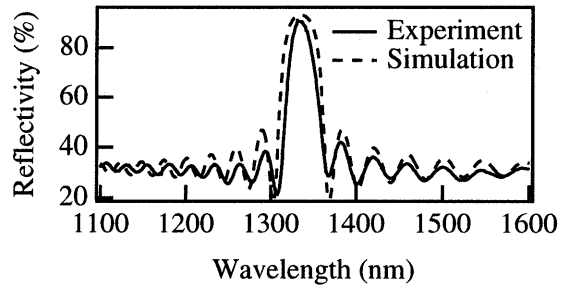


図 5 38.5 周期 DBR の反射スペクトル

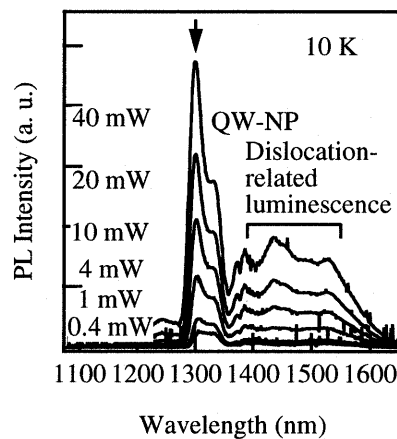


図 6 SiGe 微小共振器の PL スペクトル

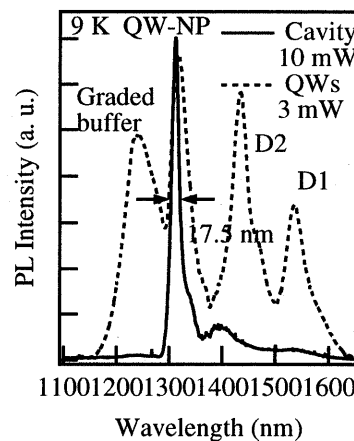


図 7 Si/CaF₂ DBR を有する SiGe 微小共振器の PL スペクトル