

歪補償構造を有する Si 基板上 III-V 族希薄混晶半導体発光素子に関する研究

論文要旨

Si 基板上への擬似格子整合系 III-V 族希薄混晶半導体を基礎とした発光素子の形成により、Si 系モノリシック型光電子集積回路の実現が期待される。しかしながら、格子定数差に起因した歪の蓄積および発光層材料の高品質化が現状の問題点として挙げられる。本研究では、これらの問題に対して、歪補償層の検討および活性層材料として有望な GaAsN 系希薄窒化物混晶の高品質化を目的とした。

初めに、基板として用いる GaP/Si 構造における GaP 層に蓄積する圧縮歪に対する歪補償を、BGaP および GaPN 層の導入により検討した。結晶成長または素子作製時の熱工程における熱膨張を考慮して、B および N 組成をそれぞれ 3%とした場合に BGaP および GaPN 層の厚さを 200nm 以上と設計することで、歪補償が可能であることを示した。BGaP を分子線エピタキシー法により成長した結果、B 原料の供給の困難さに加えて成長表面での結合の歪による取り込み効率の低下により、歪補償に要求される B 組成 2.1%以上は得られなかった。そのため、GaP/Si 構造における歪補償可能な材料として、N 組成が安定して 3%以上得ることができる GaPN が適当であることがわかった。

次に、活性層材料とする自己形成 InGaAsN/GaP 量子ドット構造の成長条件の最適化を行った。原料供給量および窒素プラズマ電力を変化させて成長し、InGaAsN 島の密度として最大で $4.9 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ を実現した。本技術を基に、Si 上発光素子を見据えて、GaP/Si 構造上へ多積層化を行った結果、不純物添加 Si 基板と比較して InGaAsN QD の発光強度は極めて低かった。そこで、熱処理による発光強度の増大を検討した。熱処理後には、発光強度は最大で 2.5 倍程度増加したが、画期的な改善方策とはならず、結晶成長時点において高品質化が必要であることが明確となった。

希薄窒化物混晶の高品質化に対して、母材表面の窒化と数原子層の母材で埋め込む過程を繰り返す新たな結晶成長法を提案し、GaAsN 単一量子井戸(SQW)構造の作製に適用した。GaAs(001)表面において (1×4)表面超構造を示す窒化条件を用いたとき、GaAsN SQW の発光特性が最も優れていた。窒化後の GaAs 中間層の薄層化により、N 組成の空間的な揺らぎに起因した局在状態の形成を抑制可能であることを示した。更に、窒化層が単原子層であることから、相分離を抑制しながら一般的な GaAs の成長温度において成長可能であることが明らかとなった。以上の効果により、N 組成が 3.3%程度まで発光強度の低下のない高品質な GaAsN/GaAs SQW を実現した。

Study on III-V dilute semiconductor alloy on Si substrate for light emitting devices with strain compensated structure

ABSTRACT

Pseudomorphic formation of optical devices based on III-V dilute semiconductor alloys on Si substrate is one of the key techniques for realization of monolithic optoelectronic integrated circuit. However, strain accumulation related to lattice mismatch and low quality active materials in the layer structure are essential problems. This doctoral thesis presents study on strain compensation layer and growth of high quality GaAsN based dilute nitride alloys as the active material for optical devices on Si substrate.

First, BGaP and GaPN strain compensation layer were investigated for applicable to GaP/Si heterostructure. BGaP and GaPN layer over 200 nm thickness can compensate the compressive strain of GaP layer on Si substrate in cases of B and N composition of 3%, considering different thermal expansion coefficient between GaP based alloy and Si substrate. Growth of BGaP layer was demonstrated by molecular-beam epitaxy equipped with electron beam gun as a B source. The desired B composition of over 2.1 % couldn't be achieved, because of supply difficulty of B species due to low vapor pressure and high immiscibility. These results suggest that GaPN is suitable alloy as the strain compensation layer for GaP/Si heterostructure, realistically.

Next, an optimization of growth conditions for self-assembled InGaAsN/GaP quantum dot (QD) structure was investigated to apply for the active material. The maximum density of InGaAsN islands was achieved $4.9 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ with small height distribution. Luminescence intensity from InGaAsN/GaP QD active region grown on GaP/Si heterostructure was very low compared to doped Si substrate. It is clarified that the preparation of high quality crystals at as-grown is necessary, because thermal annealing is not breakthrough technique for the improvement of luminescence intensity.

The new method for growth of dilute nitride alloys included surface nitridation and few monolayer regrowth was proposed and application for GaAsN/GaAs single quantum well (SQW) structure. In case of GaAs(001) surface, good luminescence properties were obtained with (1×4) surface reconstruction after nitridation. Thinning the GaAs spacer layer after nitridation was suppressed the formation of localization states related to distribution of N composition. Additionally, high temperature growth could be achieved without phase separation. For these effects, high quality GaAsN/GaAs SQW without degradation of luminescence intensity up to 3.3% of N composition was realized.