

専攻	システム情報	学籍番号	851304	指導教官氏名	米津宏雄
申請者氏名	河合孝博				中村哲郎
					朴康司

論文要旨

論文題目	格子不整合ヘテロエピタキシーにおける界面形成の制御及び結晶欠陥の低減に関する研究
------	--

(要旨 1,200字以内)

将来の光電子集積融合システム等を実現するためには、格子不整合ヘテロエピタキシーの研究が必要不可欠である。例えば、Si基板上に高品質のGaAsやInP等の化合物半導体が成長できれば、Siデバイスの高集積性と化合物半導体の光学的及び電氣的優位性を兼ね備えた新しい光電子デバイスの実現が期待される。しかし、これらのヘテロエピタキシーにおいては、格子定数等の物性定数の違いに起因してデバイスの特性を低下させる結晶欠陥（転位）が発生する。よって、格子不整合ヘテロエピタキシーにおける成長層の高品質化が重要な課題である。

そこで、本研究では格子不整合ヘテロエピタキシーにおいて、今後デバイスの微細化に伴って原子層レベルで必要とされるヘテロ界面の急峻性について界面形成を乱す原因及びその抑制方法について調べた。また、結晶欠陥（転位）の発生に大きく寄与する成長層の初期成長モードを制御し、貫通転位密度の低減を計った。

ヘテロ界面における急峻性については、GaAs/Ge及びGaAs/InAs/GaAsヘテロ構造を用いて偏析及び相互拡散を調べた。GaAs/Geヘテロ構造ではGaAs初期層成長時に生じるGe原子の表面偏析によって界面の急峻性が乱れた。この表面偏析はGaAs初期層の成長温度の増加に伴って顕著に増加した。また、基板温度400℃の比較的低温の成長においてもGe原子の偏析が観察された。しかし、成長初期にAlAs層を導入することによって、基板温度540℃の比較的高温の成長においてもGe原子の表面偏析が効果的に抑制され、急峻なヘテロ界面が形成されることが明らかになった。また、基板温度600℃の高温の成長では、Geの偏析に伴ってGaAs/AlAs/Geヘテロ構造においてAl原子の成長方向への拡散が見いだされた。

一方、GaAs/InAs/GaAsヘテロ構造では、基板温度400～530℃の範囲においてIn原子の表面偏析が基板温度の増加に伴って顕著に増加した。また、In原子の表面偏析は基板温度400℃の比較的低温の成長においても観察された。更に、ヘテロ界面近傍に転位が発生した場合には、転位密度の増加に伴ってIn原子の表面偏析が促進されることが明らかになった。

また、GaAs/InAs/GaAsヘテロ構造を熱アニール処理した場合には、In原子が成長方向に優先的に相互拡散した。更に、このIn原子の相互拡散はGaAsキャップ層内にAlAs層を導入することによって効果的に抑制されることが明らかになった。

次に、成長層の成長モードを制御するために、歪短周期超格子（SSPS）の成長機構を調べた。GaAs基板上の $(\text{InAs})_m(\text{GaAs})_n$ SSPS成長では、基板温度420℃において格

子不整合率約2.4%以下の範囲において格子緩和後も二次元層状成長を維持することが明らかになった。また、格子緩和に伴ったミスフィット転位の発生は反射高速電子線回折における鏡面反射点強度の減衰によってその場検出できることがわかった。更に、GaAs基板上に成長した $(\text{InAs})_m(\text{GaAs})_n$ SSPS層の臨界膜厚が、同じ組成の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 混晶の値に比べて著しく増加することが明らかになった。一方、InAs基板上に成長した $(\text{InAs})_m(\text{GaAs})_n$ SSPS層は、いずれも格子緩和に伴って三次元島状成長した。

同様の結果が、GaP及びGaAs基板上の $(\text{GaP})_m(\text{GaAs})_n$ SSPS成長においても得られた。これらの結果より、歪短周期超格子の成長機構は各構成分子層の結合力の違いに大きく依存することが推察された。

次に、単層及び多層構造における歪短周期超格子の歪緩和過程を調べた。成長層が格子緩和後も二次元層状成長を維持している場合には、格子不整合歪は主に界面と平行に $\langle 110 \rangle$ 方向に伝搬する 60° 転位によって緩和されることがわかった。しかし、単層構造では、膜厚増加に対してミスフィット転位の発生数が比較的少ないことから、歪緩和が有効に生じていないと思われる。また、ミスフィット転位の発生及び増加に伴って成長層のX線回折における半値全幅が著しく広がることがわかった。

一方、多層構造では上層のヘテロ界面で発生したミスフィット転位が下層のヘテロ界面に伝搬することによって、歪緩和を促進することが明らかになった。

以上の得られた知見をもとに、格子不整合ヘテロエピタキシーにおいて成長初期に多層の歪短周期超格子を導入して、貫通転位密度を低減することを検討した。GaAs基板上の $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 成長においては成長初期に $(\text{InAs})_m(\text{GaAs})_n$ SSPSを導入することによって、格子緩和に伴った三次元島状成長を抑制することができた。また、貫通転位の発生が効果的に抑制されることが明らかになった。

同様に、GaP基板上のGaAs成長においても、成長初期に多層の $(\text{GaP})_m(\text{GaAs})_n$ SSPSを導入することによって、貫通転位の発生が効果的に抑制されることが明らかになった。ここで、歪短周期超格子を導入して得られたエピ層表面のエッチピット密度はいずれもデバイスの実用レベルである $\sim 10^4 \text{cm}^{-2}$ であった。

また、歪短周期超格子を導入したヘテロ構造は熱アニール処理した場合でも、貫通転位の新たな発生は殆どないことから熱的に安定な構造であると考えられる。更に、 $\text{GaAs}/(\text{GaP})_m(\text{GaAs})_n$ SSPSs/GaPヘテロ構造におけるGaAsエピ層の発光特性は、GaAsホモエピタキシーと比べてほぼ同じ特性であった。

本研究で得られた歪短周期超格子による貫通転位密度の低減効果は、他の材料系においても有効であると期待される。