

学位論文題名

Study on growth and scaling properties of InAlAs/
AlGaAs quantum dots

(InAlAs/AlGaAs量子ドットの成長とスケール特性に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、量子コンピューティングや量子メディア変換など量子情報処理への潜在的な応用のために、単一の半導体量子ドットが多くの注目を集めている。単一ドット分光には低密度の量子ドットが好まれる。いくつかの研究は自己組織化 InGaAs と InAs 量子ドットで行われてきたが、これらの量子ドットは $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ の低密度が容易に得られる。これに対し InAlAs 量子ドットの利点は、Si の CCD の感度が最大となる $0.75 \mu\text{m}$ の発光波長を持つことであるが、高密度で単一ドット分光に適さない問題があった。

本研究では、分子線エピタキシー法により AlGaAs の上に成長した自己組織化 InAlAs の量子ドットのサイズと密度に与える成長条件の影響を調べた。最適化することにより密度が $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ で、発光波長が $0.75 \mu\text{m}$ 程度であり、ナノリソグラフィを用いることで単一ドット分光に適合する量子ドットを得られた。基板温度が高くなる、または成長速度が遅くなるに伴って、直径が大きくなり、密度が低くなることが観察された。また、InAs 量子ドットと異なり 2D-3D の遷移時間の温度変化は、In の再蒸発だけでは説明できないことが分かった。

$480 \text{ }^\circ\text{C}$ と $510 \text{ }^\circ\text{C}$ の基板温度で成長した量子ドットのサイズ分布とスケール特性を調べた。サイズ分布が InAlAs の被覆率によらない相似形を示すことがわかり、三元合金量子ドットの体積のスケール関数を初めて見出した。この関数は InAs/GaAs 量子ドットのスケール関数と近く、2次元シミュレーションで臨界クラスターサイズ $i=1$ とした場合のスケール関数とほぼ一致した。また一方で、スケール関数の大きな体積側には $i=0$ の分布に特徴的な尾を引くことも発見された。更に Voronoi セルで近似された原子の捕獲領域のスケール関数を調べた。InAlAs/AlGaAs 量子ドットの捕獲領域の分布は、体積の分布と異なることが明らかになった。

以上のように、InAlAs/AlGaAs 量子ドットの MBE 成長において、成長条件を系統的に調べることにより、InAs/GaAs 量子ドットと類似した部分、および異なる部分を明確に

した。

本論文は全 6 章から構成されている。以下に各章の要約を述べる。

第一章では、序論として、量子ドットの研究背景を述べ、その製造方法と応用をまとめた後、量子コンピューティングへの応用を想定した本論文での動機を述べる。

第二章では、本論文で用いた主要な実験技術である、分子線エピタキシー法、高速反射電子線回折、フォトルミネッセンス測定および原子間力顕微鏡について纏める。

第三章では、AlGaAs 上に MBE のストランスキー・クラスタノフ法で成長した自己集合歪 InAlAs 量子ドットの、平均的形状、およびフォトルミネッセンス特性に及ぼす、成長温度、成長速度、および InAlAs 被覆率の影響を系統的に調べた。成長条件を最適化することにより密度が $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ で、発光波長が $0.75 \mu\text{m}$ 程度の量子ドットを得られた。基板温度が高くなる、または成長速度が遅くなるに伴って、直径が大きくなり、密度が低くなることが観察された。また、InAs 量子ドットと異なり 2 次元成長から 3 次元成長へ遷移する時間の温度変化は、In の再蒸発だけでは説明できないことが分った。

第四章では、第三章で得られた量子ドットのサイズ分布を調べ、特に、ドット体積のスケール関数を調べた。 $480 \text{ }^\circ\text{C}$ と $510 \text{ }^\circ\text{C}$ の基板温度で成長した量子ドットのサイズ分布が InAlAs の被覆率によらない相似形を示すことがわかり、三元合金量子ドットの体積のスケール関数を初めて見出した。この関数は以前に当研究室で得た InAs/GaAs 量子ドットのスケール関数と近く、2 次元シミュレーションで臨界クラスターサイズ $i=1$ とした場合のスケール関数とほぼ一致した。また一方で、スケール関数の大きな体積側には $i=0$ の分布に特徴的な尾を引くことも発見された。

第五章では、最近盛んに研究されている Voronoi セルで近似された原子の捕獲領域のスケール関数を調べた。InAlAs/AlGaAs 量子ドットの捕獲領域のスケール関数は、体積のそれとは異なることが明らかになった。

第六章では本論文の総括を行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 藤 俊 一
副 査 教 授 石 政 勉
副 査 教 授 足 立 智

学位論文題名

Study on growth and scaling properties of InAlAs/ AlGaAs quantum dots

(InAlAs/AlGaAs量子ドットの成長とスケール特性に関する研究)

近年、量子コンピューティングや量子メディア変換など量子情報処理への応用のために、単一の半導体量子ドットが多くの注目を集めている。単一ドット分光には低密度の量子ドットが好まれる。いくつかの研究は自己組織化 InGaAs と InAs 量子ドットで行われてきたが、これらの量子ドットは $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ の低密度が容易に得られる。これに対し InAlAs 量子ドットの利点は、Si の CCD の感度が最大となる $0.75 \mu\text{m}$ の発光波長を持つことであるが、高密度で単一ドット分光に適さない問題があった。

本研究では、分子線エピタキシー (MBE) 法により AlGaAs の上に成長した自己組織化 InAlAs の量子ドットのサイズと密度に与える成長条件の影響を調べた。最適化することにより密度が $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ で、発光波長が $0.75 \mu\text{m}$ 程度であり、ナノリソグラフィを用いることで単一ドット分光に適する量子ドットを得た。基板温度が高くなる、または成長速度が遅くなるに伴って、直径が大きくなり、密度が低くなることが観察された。また、InAs 量子ドットと異なりドット形成が始まる時間の温度変化は、In の再蒸発だけでは説明できないことが分った。

$480 \text{ }^\circ\text{C}$ と $510 \text{ }^\circ\text{C}$ の基板温度で成長した量子ドットのサイズ分布とスケール特性を調べた。サイズ分布が InAlAs の被覆率によらない相似形を示すことがわかり、三元混晶量子ドットの体積のスケール関数を初めて見出した。この関数は InAs/GaAs 量子ドットのスケール関数と近く、2次元シミュレーションで臨界クラスターサイズ $i=1$ とした場合のスケール関数とほぼ一致した。また一方で、スケール関数の大きな体積側には $i=0$ の分布に特徴的な尾を引くことも発見された。更に Voronoi セルで近似された原子の捕獲領域のスケール関数を調べた。InAlAs/AlGaAs 量子ドットの捕獲領域の分布は、体積の分布と異なることが明らかになった。

以上のように、InAlAs/AlGaAs 量子ドットの MBE 成長において、成長条件を系統的に調べることにより、InAs/GaAs 量子ドットと類似した部分、および異なる部分を明確にした。

本論文は全 6 章から構成されている。以下に各章の要約を述べる。

第一章では、序論として、量子ドットの研究背景を述べ、その製造方法と応用をまとめた後、量子コンピューティングへの応用を想定した本論文での動機を述べる。

第二章では、本論文で用いた主要な実験技術である、分子線エピタキシー法、高速反射電子線回折、フォトルミネッセンス測定および原子間力顕微鏡について纏める。

第三章では、AlGaAs 上に MBE のストランスキー・クラスタノフ法で成長した自己集合歪 InAlAs 量子ドットの、平均的形状、およびフォトルミネッセンス特性に及ぼす、成長温度、成長速

度、および InAlAs 被覆率の影響を系統的に調べた。成長条件を最適化することにより密度が $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ で、発光波長が $0.75 \mu\text{m}$ 程度の量子ドットを得られた。基板温度が高くなる、または成長速度が遅くなるに伴って、直径が大きくなり、密度が低くなることが観察された。また、InAs 量子ドットと異なりドット形成が始まる時間の温度変化は、In の再蒸発だけでは説明できないことが分かった。

第四章では、第三章で得られた量子ドットのサイズ分布を調べ、特に、ドット体積のスケール関数を調べた。480 °C と 510 °C の基板温度で成長した量子ドットのサイズ分布が InAlAs の被覆率によらない相似形を示すことがわかり、三元混晶量子ドットの体積のスケール関数を初めて見出した。この関数は以前に当研究室で得た InAs/GaAs 量子ドットのスケール関数と近く、2次元シミュレーションで臨界クラスターサイズ $i=1$ とした場合のスケール関数とほぼ一致した。また一方で、スケール関数の大きな体積側には $i=0$ の分布に特徴的な尾を引くことも発見された。

第五章では、最近盛んに研究されている Voronoi セルで近似された原子の捕獲領域のスケール関数を調べた。InAlAs/AlGaAs 量子ドットの捕獲領域のスケール関数は、体積分布のそれとは異なることが明らかになった。

第六章では本論文の総括を行った。

これを要するに、著者は単一量子ドット分光に適した InAlAs 量子ドットの MBE 成長条件を明らかにし、更に 3 元混晶量子ドットで初めてサイズ分布のスケール関数を見出し 3 元混晶量子ドットの形成機構に関する重要な知見を得た。この知見は半導体工学、応用物理学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。