

博士論文（要約）

電子線描画技術を用いた半導体ナノ構造の形成と  
その評価に関する研究

石 田 悟 己

Satomi Ishida

## 論文の要約

論文題目 電子線描画技術を用いた半導体ナノ構造の形成と  
その評価に関する研究

氏名 石田 悟 己

光通信ネットワークは、長距離大規模通信から短距離小規模通信へとその適用範囲が急速に広がり、情報通信社会の発展に大きく貢献している。さらにより短距離区間での情報通信では、従来、電子信号を扱う金属配線が主流であった集積回路チップ間さらに集積回路内部の通信にまで展開され用いられようとしている。このような集積回路内での光通信ネットワークの構築には、シリコンフォトニクスを中心とした光通信に適した光源・受光器・増幅器・フィルタ・導波路・結合器などの構成デバイスが必要となり、それぞれが研究対象として、盛んに研究・開発がなされている。これらのデバイスとして有力視されているのが、量子ナノ構造と称される量子ドット構造・フォトニック結晶構造・MEMS 構造などの半導体ナノ構造である。これら半導体ナノ構造は、デバイス構造の単純な縮小化だけでなく、そのサイズに起因する量子効果や量子電気力学効果および歪み効果などにより、光電子物性や光電子相互作用を用い制御した新しいデバイスの実現が期待されている。しかし、その半導体ナノ構造の形成にはナノメートルオーダーの構造制御が必要あり、これには、これまで半導体集積回路の発展に貢献してきた電子線描画技術が、非常に重要な役割を果たし、必要不可欠なものである。

本論文では、量子ナノ構造の形成に不可欠な電子線描画技術を中心とした基盤技術を確認し、有機金属気相結晶成長 (MOCVD) 技術・様々な加工プロセス技術を用い、位置または領域を制御された量子ドット構造の作製・評価を行うこと、間接遷移型半導体である Ge の直接遷移発光の増強、もしくは直接遷移型半導体への転移の可能性を検討するために Ge 薄膜へ伸長歪を導入しその評価を行い、直接遷移発光デバイスへの可能性を検討することを目的とする。

第 1 章では、量子ナノ構造形成において、ナノ加工要素技術について述べたのちに、本研究の目的と論文の構成を示す。

第 2 章では、この電子線描画装置の特徴・性能について述べ、第 3 章では、ナノ加工要素技術に不可欠な基盤技術である「露光量 (DOSE) 設定」「近接効果補正技術」「位置合わせ描画技術」「2 層レジスト描画技術」について述べ、実際に半導体材料を用いた具体的なナノ構造形成応用例を示した。

近接効果補正技術では、パターン密集度に起因する近接効果を提言させる対策として有効な DOSE 変調を用い、フォトニック構造パターンを代表とする高密度パターンの形成が可能とした。位置合わせ技術では、凹凸タイプや異種金属タイプの位置合わせ用ユーザー定義マークを用いた位置合わせ描画を可能とした。2 層レジスト技術では、

ナノ加工に不可欠なドライエッチングによるレジスト変質問題を解決し、プロセス後の清浄なデバイス表面を保持することを可能とした。これにより、単一光子光源レーザー構造の狭い上部電流注入開口領域に光取り出し用のアパチャーを形成すること、パターンに沿って成長された横成長低歪 Ge 結晶に導波路構造を形成することが可能とした。

さらに、このような電子線描画技術と MOCVD 結晶選択成長技術を用い、位置または領域を制御された量子ナノ構造の作製を行った。

第4章では、GaAs 結晶構造特有の結晶面を利用した2次元V溝構造(2DVG)を提案し、構造中に GaAs 量子ドット構造を作製した。MOCVD 結晶選択成長により作製された GaAs 量子ドット構造のフォトルミネッセンス測定とカソードルミネッセンス測定の空間分解及び電子線描画パターンによる量子ドット構造位置情報より、確認された発光波長から、770 ~ 790 nm に見られる発光ピークは GaAs 量子ドットからの発光であることを同定した。

第5章では、孤立した SiO<sub>2</sub> パターン開口部 GaAs 表面に自己形成量子ドット構造の成長を促す手法を用い、MOCVD 結晶選択成長により量子ドット形成領域の制御を行った。SiO<sub>2</sub> パターン開口部に自己形成量子ドットを作製することができ、開口半径の変化によりその密度が変化することに注目し、パターンが存在する環境下での自己形成量子ドット成長モデルの検討を行った。自己形成量子ドット形成を阻害する SiO<sub>2</sub> パターンの存在により、量子ドット形成に寄与する原料供給として基板垂直方向の気相拡散供給(LLD)に、横方向からの気相拡散供給(LVD)と SiO<sub>2</sub> パターン表面からの拡散供給(MMR)が加わることで、SiO<sub>2</sub> パターン開口部での原料供給量が増幅され、その原料供給に寄与する領域が開口半径に比例することを示した。

第6章では、Ge の直接遷移発光の増強、もしくは直接遷移型半導体への転移が期待される伸張歪をかける2軸性伸張歪増強中空マイクロ構造を提案し作製した。さらにこの2軸性伸張歪のかかった Ge 薄膜の光学評価を行った。

2軸性伸張歪増強中空マイクロ構造は、SOI 基板上に直接 CVD 法で成長された Ge の成膜温度と室温の温度差による初期歪を増強することで、Ge により大きな伸張歪をかける構造である。本構造のアーム幅とパッド長を変化させることで中空構造中心部の2軸性伸張歪を制御することが可能であることをシミュレーションで示し、電子線描画技術とドライエッチング等のプロセス技術を用い作製した。作製した試料の伸張歪の推定には顕微ラマン測定、Ge のΓ点のバンド構造の評価には顕微フォトルミネッセンス測定を用いた。室温では、初期歪 0.21 %の約4倍の 0.80 %の2軸性伸張歪を得ることができた。この伸張歪による Ge バンド構造の変化によるΓ点の導電帯と価電子帯間バンドギャップに起因する直接遷移発光波長の低エネルギー側へのシフトを確認した。さらに重い正孔バンドと軽い正孔バンドに起因する直接遷移発光と考えられる2つの分離したピークを確認した。「(一部除外部分) また、直接遷移による発光強度を増強させるために、n ドープされた SOI 上の Ge 薄膜に本構造を適用し Ge のΓ点のキャリア電子を増加させ、2軸伸張歪量および直接遷移発光強度の n ドープ依存性を確認した。n ドープにより発光強度は大きく増加し、ドープ量 10<sup>16</sup> 個/cm<sup>2</sup> レベルに比べドープ量 10<sup>19</sup> 個/cm<sup>2</sup> レベルでは、約6倍程度であることを確認した。」これら2軸性伸張歪によるΓ点のバンドギャップが狭くなることは、異なる構造でも発生した伸張歪量が同じなら同じ波長シフトを示すことから、この特性は Ge 本来の特性と考えられ、Ge の直接遷移発光強度増強の可能性の1つを示すと考えられる。

第7章では、低温（試料温度 100 K）環境下におけるより大きな初期歪を利用し、2軸性伸張歪 1.05 %を得られた。室温同様に、 $\Gamma$ 点における2つの分離した直接遷移発光と考えられるピークとその発光波長の伸張歪量増加に伴う低エネルギーシフトを確認した。「（一部除外部分）しかし、その発光強度は伸張歪量により増加傾向を示すが、室温のような大きな増強は見られなかった。これより発光に寄与する $\Gamma$ 点へのキャリア供給が $L$ 点からの熱拡散に大きく依存していることが推察される。」

第8章では、これら各章の主要な研究成果を総括して述べている。本論文は、結晶成長から半導体ナノデバイス加工まで電子線描画技術を中心としたプロセス技術を用いた研究に貢献しつつ、新しい2次元 V 溝構造を提案し量子ドット構造の作製とその光学評価を行い量子ドットからの発光を同定した。自己形成量子ドットについては、パターンが存在する環境下での量子ドット形成モデルについて論じた。さらに Ge 薄膜の直接遷移型半導体への転位を生じさせると期待される伸長歪を導入するために2軸性伸張歪増強中空マイクロ構造を提案し作製し、室温で 0.80 %、低温（試料温度 100 K）で 1.05 %を得た。共に伸張歪量に対して $\Gamma$ 点における2つの分離した直接遷移発光と考えられるピークとその発光波長の伸張歪量増加に伴う低エネルギーシフトを確認した。「（一部除外部分）また室温での Ge への n ドープにより直接遷移発光強度が増加し、ドープ量  $10^{16}$  個/cm<sup>2</sup> レベルに比べドープ量  $10^{19}$  個/cm<sup>2</sup> レベルで約 6 倍程度であることを確認した。」

これら2軸性伸張歪により $\Gamma$ 点のバンドギャップが狭くなることは、異なる構造でも発生した伸張歪量が同じなら同じ波長シフトを示すことから、この特性は Ge 本来の特性と考えられ、Ge の直接遷移型発光デバイスの可能性の1つを示した。

一部除外部分については、5年以内に出版予定。