

論文内容の要旨

<博士論文題目> 「バイオナノプロセスを用いたIV族系半導体
ナノクリスタルの作製と精密制御技術の研究」

<氏名> 中間 勇二

<論文内容の要旨>

近年、急速に進む高度情報化社会の中でフォトニックネットワークの高機能/大容量化や新しい量子情報通信の研究が精力的に進められている。その実現に有望な新機能デバイスとしてIV族半導体ナノクリスタル(NC)による Si フォトニック発光デバイスや半導体量子ビットに注目が集まっている。しかし、それらの量子効果を活用するには、少なくとも 10nm 以下のサイズと間隔を制御された半導体 NC とその超格子配列の形成技術の開発が急務である。本研究では、Si 基板上に 10 nm 以下のオーダでIV族系半導体ナノクリスタル(NC)のサイズ、位置を精密制御した 2次元超格子構造を作製し、ナノ構造の電子閉じ込めや超格子構造のサブバンド形成による高効率のIV族系発光デバイスの可能性追究を目的とした。

【 β -FeSi₂ ナノクリスタルのサイズ、位置の精密制御と発光特性評価】

β -FeSi₂ NC は、Si 基板表面に配列・吸着された直径 7 nm のフェリチン鉄酸化物コアをアモルファスシリコン(a-Si)薄膜に埋め込んだ後に新しい固相成長(埋め込みSPE)法によって作製され、サイズ 6.3 ± 0.3 nm、間隔 5 ± 1 nm のサイズ、位置の精密制御に成功した。また 7K でフォトルミネセンス(PL)測定を行った結果、0.91 eV の PL 発光が確認され、 β -FeSi₂ NC からの励起子発光であることが明らかにされた。

【Si ナノクリスタルのサイズ、位置の精密制御と発光特性評価】

Si NC の作製には、本研究で開発した新しい a-Si 極薄膜ナノマスクを用いて、1keV 以下の Si イオン注入を行い、レーザアニールによって成長され、精密位置制御された。この a-Si 極薄膜ナノマスクは、熱酸化 SiO₂ 基板に配列・吸着された鉄酸化物コアに a-Si 極薄膜を蒸着した後、塩酸によりコアを除去することにより、約 7 nmφ の微小孔配列を形成されたものである。Si NC とその配列は、サイズ 3.0 ± 0.3 nm、間隔 5 ± 1 nm の精密制御に成功した。PL 測定の結果、0.6keV の超低加速イオン注入では初めてピーク波長 600 nm、半値幅 100 nm 以下の PL 発光が観測された。

【Ge_{1-x}C_x ナノクリスタルのサイズ、位置の精密制御と発光特性評価】

GeCNC では、C ソースにアークプラズマガンを用いた分子線エピタキシー結晶成長に上記の a-Si 極薄膜ナノマスクを適用することによって、S-K モード成長では成長不可能であった 10 nm 以下のサイズの Ge_{1-x}C_x NC を Si 基板上に精密配列して成長させることに初めて成功した。Ge_{1-x}C_x NC のサイズは 7.3 ± 3 nm、間隔は 6 ± 2 nm、置換位置 C 組成 x は最大 3.2%であった。x = 1.5%の Ge_{1-x}C_x NC 上に Si 薄膜キャップ層を形成し、7K で PL 測定を行った結果、波長 1.3 μ m の PL 発光が観測された。

以上

(論文審査結果の要旨)

近年、急速に進む高度情報化社会の中でフォトニックネットワークの高機能/大容量化や新しい量子情報通信の研究が精力的に進められている。その実現に有望な新機能デバイスとしてIV族半導体ナノクリスタル(NC)による Si フォトニック発光デバイスや半導体量子ビットに注目が集まっている。しかし、それらの量子効果を活用するには、少なくとも 10nm 以下のサイズと間隔を制御された半導体 NC とその超格子配列の形成技術の開発が急務である。

本博士論文は、著者が Si ベースの発光デバイスや量子情報デバイスを目的に、Si-NC、 β -FeSi₂-NC、GeC-NC の作製と二次元超格子化を目指して、フェリチンを用いたバイオナノプロセスと半導体 LSI 微細加工技術のイオン注入や分子線エピタキシ(MBE)と融合させたナノテクノロジーにより新しい「Si 極薄膜ナノマスク」を開発し、サイズと間隔を 10nm 以下に精密制御する各半導体 NC の作製と二次元配列に成功し、以下に示す光ナノサイエンスの独創的な知見を得た結果を纏めたものである。

【 β -FeSi₂ ナノクリスタルのサイズ、位置の精密制御と発光特性評価】

β -FeSi₂ NC は、Si 基板表面に配列・吸着された直径 7 nm のフェリチン鉄酸化物コアをアモルファスシリコン(a-Si)薄膜に埋め込んだ後に固相成長によって作製され、サイズ 6.3 ± 0.3 nm、間隔 5 ± 1 nm のサイズ、位置の精密制御に成功した。また 7K でフォトルミネセンス(PL)測定を行った結果、0.91 eV の PL 発光を確認し、 β -FeSi₂ NC からの励起子発光であることを明らかにした。

【Si ナノクリスタルのサイズ、位置の精密制御と発光特性評価】

Si NC の 10nm 以下の精密制御のために、本研究において新しい a-Si 極薄膜ナノマスク技術を開発した。この a-Si 極薄膜ナノマスクは、バイオナノプロセスを適用し、熱酸化 SiO₂ 基板に配列・吸着された鉄酸化物コアに a-Si 極薄膜を蒸着した後、塩酸によりコアを除去することにより、約 7 nm ϕ の微小孔配列を形成したものである。この精密制御 Si NC は、新しい a-Si 極薄膜ナノマスクを介して Si イオン注入を行い、レーザーアニールすることによって初めて成長に成功した。サイズ 3.0 ± 0.3 nm、間隔 5 ± 1 nm の精密制御に成功した。PL 測定の結果、1 keV 以下の超低加速イオン注入による Si NC では初めてピーク波長 600 nm、半値幅 100 nm 以下の PL 発光が観測された。

【Ge_{1-x}C_x ナノクリスタルのサイズ、位置の精密制御と発光特性評価】

GeC NC では、C ソースにアークプラズマガンを用いた MBE 結晶成長に上記の a-Si 極薄膜ナノマスクを適用することにより、S-K モード成長では成長不可能であった 10 nm 以下のサイズの Ge_{1-x}C_x NC を Si 基板上に成長させることに初めて成功した。Ge_{1-x}C_x NC のサイズは 7.3 ± 3 nm、間隔は 6 ± 2 nm、置換位置 C 組成 x はこれまでの最高の 3.2%であった。さらに、x = 1.5%の Ge_{1-x}C_x NC 上に Si 薄膜キャップ層を形成し、7K で PL 測定を行った結果、波長 1.3 μ m の PL 発光が観測された。

以上のように、本論文は、新しいIV族系半導体 NC の作製とそのサイズ・位置の精密制御技術の研究開発に関するもので、最終目的のデバイス化までは至らなかったが、本研究で得られたIV族半導体 NC および先端融合ナノテクノロジーに関する優れた技術成果と新しい知見は学術上極めて独創的かつ有意義であるばかりでなく、工学的にも高い価値を有しており、近い将来の高度な光機能デバイスへの適用が期待される。

よって、本学位論文審査および最終試験の結果、審査員一同は、中間 勇二 君の本論文が博士(工学)の学位論文として高い価値を有するものであると評価し、合格と認めた。

以上