

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノファクトリーとプロセス観測」
平成14年度採択研究代表者

市川 昌和

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

「超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術」

1. 研究実施の概要

我々は、Si基板表面の第1層が酸化した極薄Si酸化膜を形成し、その表面にSiやGeを真空蒸着すると、大きさが5nm程度で、面密度が 10^{12}cm^{-2} 以上のSiやGeの単結晶ナノドットが成長することを見出した。本研究では、このナノドット形成技術を基礎にして、Si、Geのナノドット超格子、直接遷移型の半導体である鉄シリサイドのナノドット超格子と、ナノドットの人工配列構造を作成する総合技術の研究開発を行っている。また、個々のナノドットやナノドット集積体の光・電子物性を評価する技術の研究開発を行っている。このようなナノ構造体においては、キャリアの局在効果により、光効率の大幅な増大が期待でき、Si光素子とSi電子素子の集積化に貢献できる。平成15年度には、Geナノドットの超格子の作成、鉄シリサイドのナノドットの作成、Geナノドットの操作やナノドットの物性評価技術の開発、などを行った。

2. 研究実施内容

2. 1 ナノドット超格子形成技術の開発

(1) 超高真空多元物質成長装置を導入し、Si薄膜をスペーサー層とするGeナノドット超格子を作成した。

成長時の反射高速電子回折(RHEED)図形の変化を観察することにより、Geナノドットが形成されるタイミングや結晶方位、Siスペーサー層の結晶性や界面の平坦性などが実時間で測定できることが分かった。また、極薄Si酸

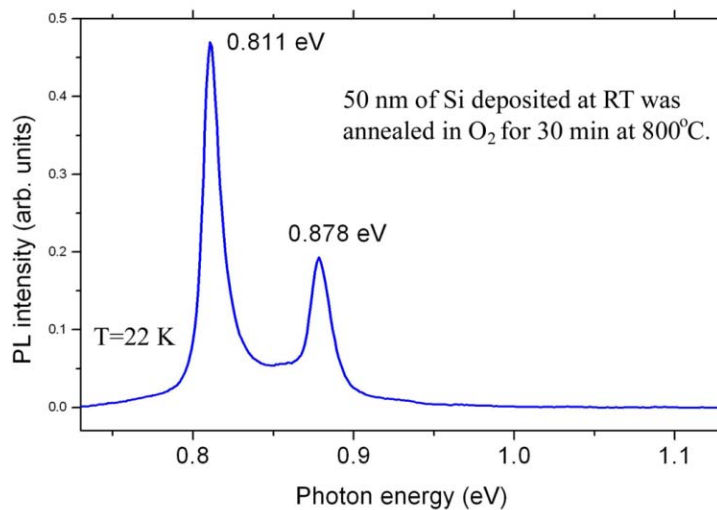


図1 Si_{0.9}/Si極薄膜/Si_{0.9}/Si (001)試料からのPLスペクトル

化膜に50nmの厚さを持つSi極薄膜を成長し、酸素雰囲気中で加熱することにより、強度の強いフォトルミネッセンス(PL)を得た(図1)。現在、このPLの起源を解明中であり、今後の発展が期待できる結果である。しかし、Geナノドット超格子によるPL強度は、図1のものより1桁程度弱く、最適な成長条件の探索などが今後の研究課題である。

(2) SiGe薄膜をスペーサー層とするGeナノドット超格子を作成した。SiGe薄膜の表面を酸化し、極薄SiGe酸化膜を作成し、種々の基板温度でGeを蒸着することにより、大きさが10nm以下で、面密度が 10^{12}cm^{-2} 以上のGeナノドットが形成されることを、平成14年度に見出した。この結果を基にして、SiGe薄膜をスペーサー層とするGeナノドットの超格子を作成した。Si基板とSiGe層の格子定数の違いから発生する歪みにより、界面が平坦ではなく、波状の凹凸が形成されたが、超格子構造が作成できることを確認した。今後は、界面が平坦なSiGeスペーサー層からなる量子井戸と、Geナノドットの超格子を組合わせた構造を作成し、キャリアを効率的に閉じ込めることにより、発光効率の大幅な増大を目指す。

(3) 鉄シリサイドのナノドットの作成を行った。Si基板表面に極薄Si酸化膜を形成し、この表面にSiを蒸着して大きさが4nmで面密度が 10^{12}cm^{-2} 以上のSiナノドットを作成した。その後、この表面に種々の基板温度でFeを蒸着し、鉄シリサイドのナノドットを形成した。鉄シリサイドのナノドットの結晶構造や形状は、基板温度や鉄の蒸着速度に大きく依存したが、適切な基板温度と鉄の蒸着速度を選択することにより、目的とする $\beta\text{-FeSi}_2$ ナノドットを作成することができた。図2に $\beta\text{-FeSi}_2$ ナノドットのSTM像を示す。大きさが8nmで面密度が 10^{12}cm^{-2} 程度の $\beta\text{-FeSi}_2$ ナノドットが形成されていることが分かる。今までに、 $\beta\text{-FeSi}_2$ ナノドットの作成例は他にはない。今後は、さらに適切な成長条件を決定し、高い発光効率を持つ $\beta\text{-FeSi}_2$ ナノドット超格子の作成を目指す。

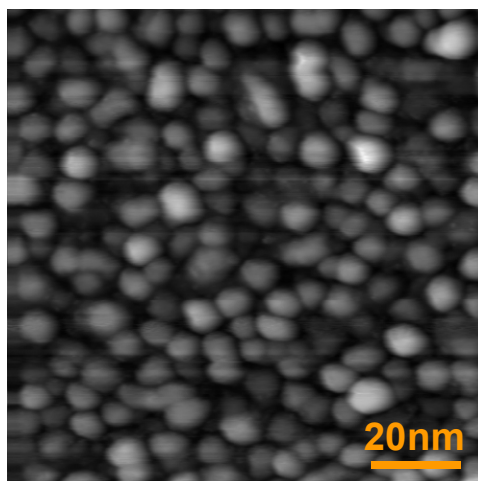


図2 $\beta\text{-FeSi}_2$ ナノドットのSTM像

2. 2 ナノドット人工配列構造形成技術の開発
特定のトンネル電流と電圧を選択することにより、STM探針により極薄SiGe酸化膜上のGeナノドットを容易に操作できることが分かった。図3は、STM探針により、Geナノドットを取り除き、「I」

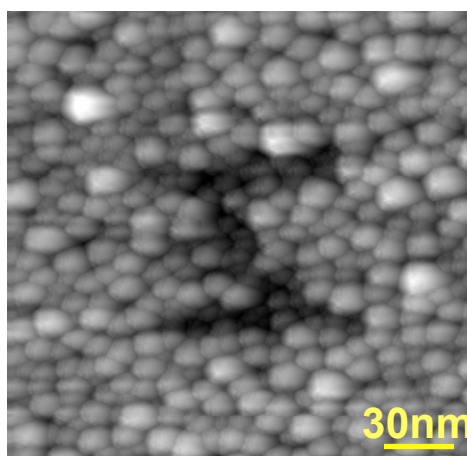


図3 Geナノドットを除去した表面のSTM像

の文字を描いたときのSTM像である。従来のGe/Si系においては、GeとSiの結合力が強いために、このような操作は困難であった。今後は、本操作により、任意の形状を持つナノドットの人工配列構造の作成を行う。

2. 3 ナノドットの光・電子物性評価技術の開発

個々のナノドットの物性を調べる目的で、STMを利用したカソードルミネッセンス装置や、エレクトロルミネッセンス装置の開発を終了した。また、STM探針の効果により、測定に使用する入射光の電場強度が数百倍に増強されることを、他に先駆けて明らかにした。このような効果は、ナノドットの光・電子物性を調べる上で極めて有効である。今後は、これらの装置を利用して、個々のナノドットの光・電子物性の評価を行う。

2. 4 ナノドット間のキャリアー伝導特性評価技術の開発

マイクロ4端子プローブ法による伝導度の測定を行う準備を完了した。また、光電子分光法によるGeナノドットの電子状態の測定を行った。また、Geと金属の化合物であるゲルマサイドのナノドットの作成を開始した。今後は、伝導度や電流・電圧特性の温度依存性や、光電子分光法によりナノドットの電子状態を測定する。

2. 5 ナノドットの結晶構造と電子状態計測技術の開発

透過電子顕微鏡(TEM)により、Geや鉄シリサイドのナノドットの結晶構造の原子レベル観察を行い、ナノドットの結晶構造や基板Siとの界面構造を明らかにした。今後は、走査透過電子顕微鏡(STEM)を用いたナノドットの組成分析や電子状態分析を実施する。また、超高真空TEMを用いて、超高密度のGeナノドットの形成過程を、原子レベルで実空間かつその場観察して、形成過程機構を明らかにする研究を開始する。

3. 研究実施体制

・超格子形成研究グループ

- ① 研究分担グループ長：市川 昌和（東京大学大学院工学系研究科、教授）
- ② 研究項目：ナノドット超格子を形成する技術の開発

・人工配列構造形成研究グループ

- ① 研究分担グループ長：市川 昌和（東京大学大学院工学系研究科、教授）
- ② 研究項目：ナノドットを人工的に配列する技術の開発

・光・電子物性評価研究グループ

- ① 研究分担グループ長：前田 康二（東京大学大学院工学系研究科、教授）
- ② 研究項目：ナノドットの光と電子物性をナノスケールで評価する技術の開発

・伝導特性評価研究グループ

- ① 研究分担グループ長：長谷川 修司（東京大学大学院理学系研究科、助教授）
- ② 研究項目：ナノドット間のキャリアー伝導特性をナノスケールで評価する技術の開発

・結晶構造と電子状態計測研究グループ

- ① 研究分担グループ長：田中 信夫（名古屋大学エコトピア科学研究機構、教授）

② 研究項目：ナノドットの結晶構造と電子状態を計測する技術の開発

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

- Y. Nakamura, Y. Nagatomi, K. Sugie, N. Miyata and M. Ichikawa
“Formation of ultrahigh density Ge nanodots on oxidized Ge/Si(111)
surface”
Journal of Applied Physics, 95, 5014-5018 (2004).

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数：1件（CREST研究期間累積件数：1件）