

「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 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16年度には、(1)Geナノドット超格子の作成と光物性評価、(2)鉄シリサイドのナノドットの積層構造の作成と光物性評価、(3)個々のGeナノドットの電子状態の測定、(4)Geナノドット間の伝導特性の評価、(5)断面透過電子顕微鏡(TEM)によるナノドット結晶構造の観察と、(6)超高分解能の走査型TEM(STEM)の開発を行った。

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) Geナノドット超格子の作成

超高真空多元物質成長装置を用いて、Si薄膜をスペーサー層とするGeナノドット超格子を種々の成長条件で作成した。0.8 eV (波長: $\sim 1.5 \mu\text{m}$) 付近にピークを持つPLスペクトルを得た。このピークがSi基板の欠陥に起因するものではなく、Geナノドットに起因するものであることも確認

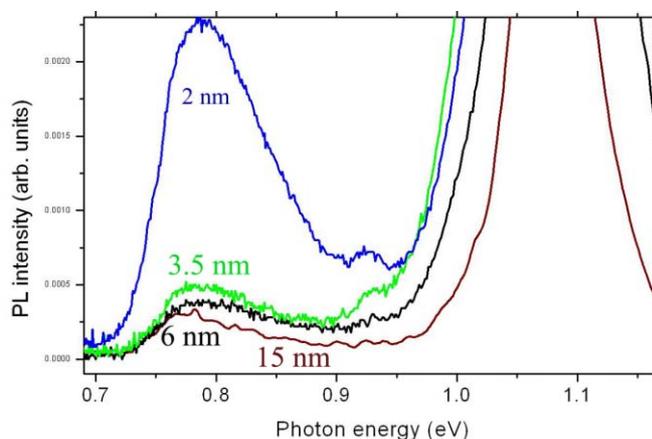


図1 Geナノドット超格子から得られたPL強度

した。Siスペーサー層の厚さが15nmから2nmと薄くなるにつれて、PLピーク強度が増大している。これは、厚さの減少に伴って電子が有効に閉込められ、Geナノドット中に閉じ込められているホールとの再結合確率が増大したためと考えられる。しかし、Geナノドット超格子によるPL強度はまだ十分なものではない。これは、結晶欠陥などが非発光性準位を形成しているためと考えられ、成長時に原子状水素照射などを行い、非発光性準位を終端するなどの対策が今後の研究課題である。

(2) 鉄シリサイドのナノドットと積層構造の作成

平成15年度には、極薄Si酸化膜上に形成したSiナノドットに鉄を蒸着し、鉄シリサイドのナノドットを形成した。しかし、鉄の蒸着過程においてドット形状が崩れるなどの問題があった。そこで、平成16年度には、鉄とSiを化学量論に従う比率で同時蒸着して、超高密度の β -FeSi₂ナノドットを作成した。図2に同時蒸着法により作成した β -FeSi₂ナノドットのSTM像(a)と、この試料からえられた反射高速電子回折図形(b)を示す。これらの結果から、大きさが約6nmで面密度が 10^{12}cm^{-2} 以上の β -FeSi₂ナノドットが形成されていることが分かる。また、この上にSiを成長し、基板と同じ結晶方位を持つSi薄膜が成長することを確認した。さらに、このSi薄膜をスペーサー層とした3層の β -FeSi₂ナノドットの積層構造を作成し、PL測定を行った。0.9eV付近にピークを持つPLスペクトルを得たが、 β -FeSi₂ナノドットによる発光と断定するための確認実験が必要である。

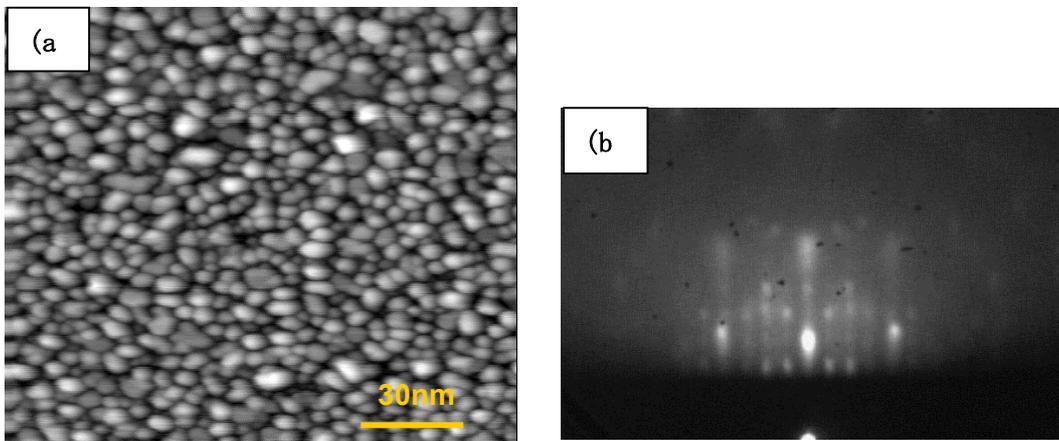


図2 (a) β -FeSi₂ナノドットのSTM像、(b) 試料表面からのRHEED図形

2.2 Geナノドットの電子状態の評価

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(CL)装置を完成し、Geナノドットの光物性評価を開始したが、光検出器の感度不足により、まだスペクトルを得るまでに至っていない。また、走査トンネルスペクトロスコーピー(STS)により、個々のGeナノドットのバンドギャップを測定し電子状態を調べた。図3にバンドギャップのGeナノドットの寸法依存性を示す。黒丸は実験値、青線は理論値

である。量子閉じ込め効果により寸法が小さくなるに従って、バンドギャップが大きくなっていることが分る。個々のGeナノドットの量子閉じ込め効果を世界で初めて確認できた。さらに、Geナノドットに電子が一つ捕獲されることに起因する室温におけるクーロンブロード現象によって、トンネル電流が量的に変化することを見いだした。今後は、これらの現象を調べるとともに、STSとSTM-CLを用いて個々のナノドットの電子状態とそれに対応した光物性の評価を行う。

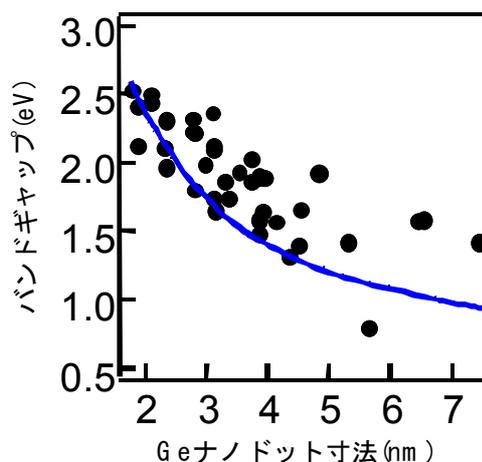


図3 Geナノドットのバンドギャップの寸法依存性

2.3 ナノドット間のキャリア伝導特性と電子状態の評価

マイクロ4端子プローブ法によるGeナノドット間の伝導度を、Geの蒸着量や基板の温度を変化して測定し、Geナノドットは電氣的に孤立した状態で存在することを明らかにした。また、Geナノドットの価電子帯の最大エネルギーを光電子分光法により測定し、量子閉じ込め効果によりホール準位が、ナノドットの寸法に依存して変化することを見いだした(図4)。この結果は、STS測定の結果と一致した。

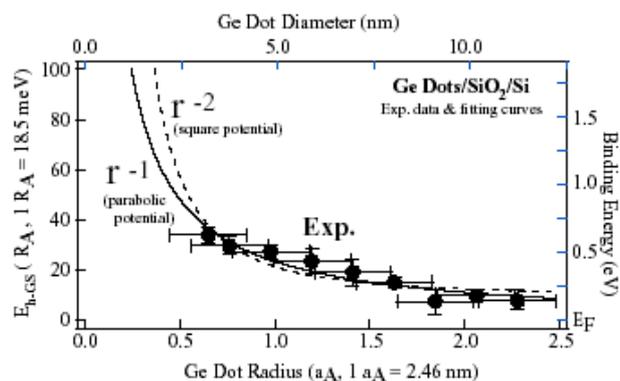


図4 Geナノドットのホール準位の寸法依存性

2.4 ナノドットの結晶構造の計測と超高分解能STEMの開発

高分解能TEMにより、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、歪みや基板Siとの界面構造を明らかにした。図5に β -FeSi₂ナノドットとSi(111)基板界面の断面TEM像を示す。四角で囲った部分の詳しい観察により、本界面は急峻で不整合転位はなく、格子不整合による歪みが保持されていることが分かった。

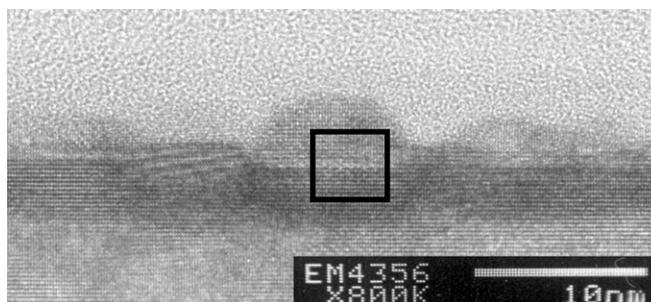


図5 β -FeSi₂ナノドットとSi(111)基板界面の断面TEM像

また、超高真空透過電子顕微鏡により、Si表面の酸化過程やGeナノドットの形成過程

の原子レベルその場観察に、世界で始めて成功した。

さらに、収差補正機構により走査型透過電子顕微鏡 (STEM) の電子ビーム径として、世界最高水準の1.3Åを達成した。図6にSi結晶格子のSTEM像を示す。Si結晶の原子構造にある特徴的なダンベル形状が分離されて観察されており、像分解能として1.3Åが達成されていることが確認できた。

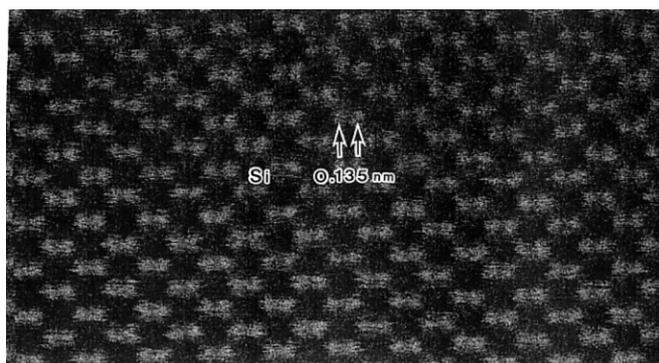


図6 Si結晶格子のSTEM像

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

(1) 特許出願

H16年度特許出願件数：1件（CREST研究期間累積件数：2件）