

SiGe 基板単結晶の低欠陥化と歪みを制御した機能性ヘテロ構造の創製

Growth of SiGe bulk single crystals with low defect density and creation of functional heterostructures

中嶋 一雄 (Nakajima Kazuo)
東北大学・金属材料研究所・教授



研究の概要

均一組成を有しかつ低欠陥の SiGe バルク単結晶の新成長技術を開発する。更に、この結晶を基板とし、歪みを精密に制御してバンド構造を人工的に操作し、新たな機能性デバイスの基盤となるヘテロ構造を創製し、高性能デバイスを実現できる基本物性を得る。

研究分野／科研費の分科・細目／キーワード

工学／電気電子工学・電子電気材料工学／SiGe、全率固溶型状態図、歪み、ヘテロ構造

1. 研究開始当初の背景・動機

(1) 近年デバイス用材料の研究範囲が広がったが、良質な基板が無いために、目的とするデバイス特性を実現できないケースが極めて多い。この問題の確実な解決方法として、全率固溶型状態図を有する多元系結晶において、均一組成のバルク単結晶を成長できる技術を開発し、基板とすることに着眼した。

(2) 我々は、独自に開発した成長界面の位置と温度の「その場観察」技術と、溶質元素補給技術を融合することにより、組成均一性に優れたバルク結晶の成長技術を開発したが、微小な方位揺らぎの抑制など低欠陥化が課題として残されていた。

2. 研究の目的

(1) これまでに開発した高均一組成の SiGe バルク結晶の成長技術をベースとして、均一組成を有し、かつ低欠陥の SiGe バルク単結晶を実現できる新成長技術を開発する。
(2) 独自に作製する SiGe バルク基板上に SiGe 薄膜をエピタキシャル成長することにより、歪み量を精密に制御してバンド構造を人工的に操作し、新たな機能性デバイスの基盤となるヘテロ構造を創製し、高性能デバイスを実現できる基本物性を得る。

3. 研究の方法

(1) 高品質 SiGe バルク単結晶成長技術の開発

- ・優先成長面の簡便な探索手法の開発
- ・優先成長面を有する種結晶利用による単結晶化
- ・フローティング成長法の利用
- ・他の多元系材料への適用性検討

(2) 歪みを制御した機能性ヘテロ構造創製

- ・成長モード状態図の理論計算
- ・MBE 法による SiGe バルク基板上歪み制御ヘテロ構造の成長と評価
- ・MOVPE 法による InGaAs バルク基板上への InGaAsN 薄膜結晶の成長と評価

4. 研究の主な成果

(1) 高品質 SiGe バルク単結晶成長技術の開発

(1-1) 優先成長面を有する種結晶利用による単結晶化

多元系半導体バルク結晶の融液成長においては、組成的過冷却や、組成不均一に由来する結晶内での格子歪みなど、多元系固有の現象が多結晶化を引き起こすため、単結晶化が極めて困難であった。この課題に対して、種結晶面を優先成長面に設定すれば、種結晶と異なる面方位を有する結晶核が発生しても、その成長を抑制できる可能性があることを着想し、SiGe バルク結晶の成長に適用し、その有効性を実証した。

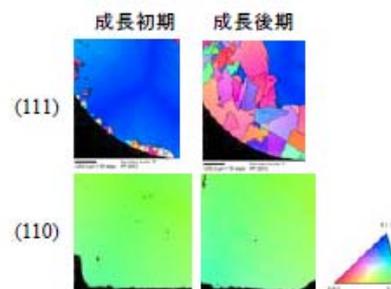


図1 優先成長面を有する Ge(110)種結晶と非優先成長面である Ge(111)種結晶上に SiGe を成長した場合の方位分布の比較

[4. 研究の主な成果 (続き)]

また、チャンク状の多数の結晶を種結晶として一方向成長を行うという、優先成長面の簡便な探索手法を考案した。

(1-2) 他の多元系半導体への適用

SiGe バルク単結晶の成長技術は、全率固溶型状態図を有する多元系結晶における普遍的な物理に基づき考案した。実際に InGaAs バルク単結晶の成長に適用し、他の材料系への拡張性を実証した。

(1-3) フローティングゾーン成長による高品質化

均一組成の SiGe 予備結晶を原料として、フローティングゾーン成長を行い、実効偏析係数を 1 とする適切な成長条件下での成長により、原料組成と同じ組成の均一組成結晶が作製でき、また、非発光再結合中心の少ない良質な SiGe バルク結晶を成長できることを示した。

(2) 歪みを制御した機能性ヘテロ構造の創製

(2-1) 成長モード状態図の理論計算

SiGe バルク基板上への薄膜成長にあたり、表面・界面・歪みエネルギーを考慮した自由エネルギー計算により、成長モード状態図を初めて作成し、ヘテロ構造設計へと利用した。

(2-2) SiGe バルク基板上高移動度歪み Si 薄膜結晶

Si_{0.9}Ge_{0.1} バルク基板上の歪み Si 中の二次元電子ガスの室温での移動度は、 $1.9 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と大きな値を示し、バルク基板利用による構造完全性の優れた歪み Si 薄膜結晶実現による移動度の増加を実証した。

(2-3) SiGe バルク基板上共鳴トンネルダイオード

Si_{0.1}Ge_{0.9} バルク基板上に二重障壁共鳴トンネルダイオード構造を成長し、メサ型ダイオードを作製し、特性評価を行った。その結果、SiGe 系で p 型の 2 次元状態の共鳴トンネルとして、これまでの報告で最も高いピークバレー比が得られた。

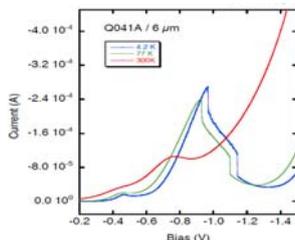


図 2 SiGe バルク基板上共鳴トンネルダイオードの電流電圧特性

(2-4) SiGe バルク基板上量子井戸構造

Si_{0.92}Ge_{0.08} バルク基板上に、歪み Si 薄膜と歪み Ge 薄膜が隣接する量子構造を成長し、位からの発光のない明瞭なバンド端発光が得られ、電子物性だけでなく、光物性の

発現に対しても SiGe バルク基板は有用であることを示した。

(2-5) InGaAs バルク基板上の高品質 InGaAsN 薄膜結晶の成長

InGaAs バルク基板を利用して、GaAs 基板では得ることが困難な光通信用長波長帯にバンドギャップを有する InGaAsN 薄膜結晶の実現に成功した。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

全率固溶型状態図を有する多元系バルク結晶の成長において、組成が均一で高品質な単結晶を成長する技術を開発した。更に、バルク基板を利用し、歪みが精密に制御され、構造完全性の優れた良質なヘテロ構造が創製可能であること、高性能デバイスの基盤となるような、従来にない優れた物性の発現可能であることを示した。これらの成果は、バルク結晶成長の専門家と、薄膜結晶成長の専門家が緊密な連携のもとで研究を行った結果、初めて得られたものであり、材料科学の新しい研究手法として、世界的にインパクトの大きな研究成果である。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- (1) **N. Usami**, Y. Nose, K. Fujiwara, and **K. Nakajima**, "Suppression of structural imperfection in strained Si by utilizing SiGe bulk substrate", Appl. Phys. Lett. **88**, 221912(3pages) (2006).
- (2) **N. Usami**, M. Kitamura, K. Obara, Y. Nose, G. Sasaki, K. Fujiwara, **T. Shishido**, and **K. Nakajima**, "Floating zone growth of Si-rich SiGe bulk crystal using pre-synthesized SiGe feed rod with uniform composition", J. Cryst. Growth **284**, 57-64 (2005).
- (3) Y. Azuma, **N. Usami**, K. Fujiwara, **T. Ujihirara**, and **K. Nakajima**, "A simple approach to determine preferential growth orientation using multiple seed crystals with random orientations and its utilization for seed optimization to restrain polycrystalline of SiGe bulk crystal", J. Crystal Growth, **276**, 393-400 (2005).
- (4) Y. Azuma, Y. Nishijima, **K. Nakajima**, **N. Usami**, K. Fujiwara, and **T. Ujihirara**, "Successful growth of an In_xGa_{1-x}As (x>0.18) single bulk crystal directly on a GaAs seed crystal with preferential orientation", Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L907-L909 (2004).

ホームページ

<http://www.xtalphys.imr.tohoku.ac.jp>