

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2007～2009
課題番号：19760233
研究課題名（和文） 表面再構成制御成長法による Si 上 InSb 量子井戸作成とその超高速 FET への応用
研究課題名（英文） Fabrication of InSb quantum well on Si using surface reconstruction Assisted growth method and its application for ultra-fast FET
研究代表者 森 雅之（MORI MASAYUKI）
研究者番号：90303213

研究成果の概要（和文）：超高速・超低消費電力デバイスへの応用が期待されている InSb を用いた FET 実現のため、表面再構成制御成長法という Si 上の In 及び Sb 誘起表面再構成構造を利用して薄膜の面内回転を誘発させることで格子不整合を緩和するという新しい成長方法を用いて、InSb 及び AlInSb 薄膜を作製し、その特性評価を行った。Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 再構成を用いることで、100%回転した InSb 及び AlInSb 薄膜の成長に成功した。しかし、得られた AlInSb 薄膜は正孔濃度が高く低抵抗だったため、試作した FET はトランジスタ動作しなかった。

研究成果の概要（英文）：InSb has attracted much interest for application of ultra-fast and low power devices. To realize the InSb-based FET, we grew the InSb and AlInSb films using new growth method called “Surface Reconstruction assisted growth”, and evaluated them. The fully rotated InSb and AlInSb films were successfully grown using Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In surface reconstruction. However, due to its high hall concentration and low resistivity, trial FET didn't work as a transistor.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	630,000	3,830,000

研究分野：

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路、ヘテロエピタキシャル成長、表面再構成制御成長法、InSb、

1. 研究開始当初の背景

2005年のIEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)において、InSbを使用したロジックLSI向けトランジスタが発表された。非常に高い電子移動度と高い電子

飽和速度を持った InSb をチャネル層に用いた超低電圧駆動 FET である。現在主流のひずみ SiGe をしのぐ究極の高速化を狙ったものであり、“ポスト Si 時代への指針である”とデバイス関係の雑誌にも掲載された。微細化

プロセス技術によるデバイスの高速度のさらに先の技術である。これにより InSb への感心はますます高まりつつある。今回インテルによって報告された InSb を用いたトランジスタ(QW-FET)は半絶縁性 GaAs 基板上に作製されたものであるが、ポスト Si-MOS を考えれば、従来の Si-LSI 技術の利用や素子作製コスト削減の観点からも、Si 基板上での InSb を用いたデバイス作製技術の確立は極めて重要である。高速デバイス以外にも、磁電変換素子、赤外線検出器、熱電変換素子など InSb の応用範囲は広く、現在様々な研究期間で InSb を用いたデバイス開発・研究が行われているが、いずれも GaAs を基板として利用しており、基板に Si を用いた例はない。これは Si と InSb との間の大きな格子不整合(約 19.3%)のため、ヘテロエピタキシャル成長が極めて困難なためである。

我々はこれまでに、Si 基板上の In や Sb 吸着による表面再構成構造と InSb のヘテロエピタキシャル成長の関係に注目し、堆積の極初期段階の表面再構成がその後の InSb のヘテロエピタキシャル成長に大きな影響を持つことを明らかにしてきた。特にある条件の下で In と Sb を Si(111)基板上に 1ML 程度吸着させた場合、その上に成長させた InSb 薄膜は Si 基板に対して 30° 回転することを発見した。図1のように面内で30° 回転すると、格子不整合が約 3.3%に軽減されるため、InSb/Si 界面における転位の発生が大幅に抑制され、結晶性、電気的特性の向上が期待される。これはエピタキシャル成長が困難とされる InSb/Si 系において、高品質の薄膜を得るための重要な発見である。本申請は、この技術を用いて高品質な InSb 量子井戸構造を Si 基板上に形成して、それを高速トランジスタに応用しようというものである。薄膜材料の表面再構成構造を利用したヘテロエピタキシャル成長は他には例を見ない我々独自のものであり、この技術を用いれば世界に先駆けて Si 基板上へ InSb を用いた高速トラン

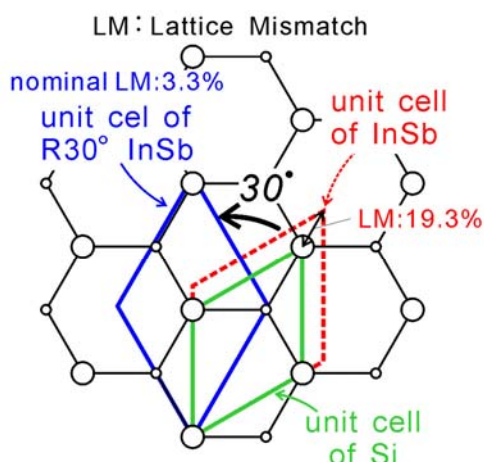


図1 格子不整合緩和の概略図

ジスタを開発できると考えている。

2. 研究の目的

(1) Si(111)-2x2-In 及び $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面相を用いた InSb 薄膜のヘテロエピタキシャル成長

InSb 量子井戸を用いた超高速FETを形成するためには、InSb 層を AlInSb 層で挟む必要がある。これを Si(111)基板上で実現するため、InSb 単分子層を用いて成長させるためのバッファ層に用いる。しかし、我々がこれまでに発見した Si(111)-4x1-In 上へ 1 ML-Sb を吸着させることで形成される InSb 単分子層は、基板表面全体を覆っておらず、その上に成長した膜全体が 30° 回転するわけではない。このため、結晶性の良い膜と悪い膜が混在し電気的特性の低下を導く。また、InSb をチャンネルに使用した FET 構造を作製する際、InSb/AlInSb 界面の平坦性や InSb 層の結晶性がデバイス特性に大きく影響を及ぼすため、In 誘起表面再構成の中で In の量が多く、1 ML-Sb を吸着させることで基板表面全体が InSb 単分子層で覆われると期待される、Si(111)-2x2-In 及び $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面相を用いて InSb 薄膜を成長させ、膜全体が 30° 回転した InSb 薄膜の作製を目指し、その平坦性、結晶性、面内配向性、電気的特性などを従来の作製方法の膜と比較しながら、Si 基板上での高品質の InSb 薄膜の成長技術を確立する。

(2) Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面相を用いた AlInSb 薄膜のヘテロエピタキシャル成長

InSb はバンドギャップが小さいため、AlInSb 層で InSb 層をサンドイッチして、量子井戸構造を作製することで、電流のリークを抑える必要がある。Si と AlInSb との間には最小でも 13.7%(Al 組成 100%の場合)という大きな格子不整合が存在するため、表面再構成制御成長法を用いて、AlInSb 薄膜を Si 基板に対して 30° 回転させ、高品質な AlInSb 薄膜を成長させることを目的とする。30° 回転した AlInSb 薄膜を表面再構成制御成長法を用いて成長できれば、格子不整合が-2.2%から 3.3%まで、Al 組成に応じて変化することになる。

3. 研究の方法

本研究では、既設の 2 台の超高真空チャンバーを使用した。1 台目は LEED(低速電子線回折)・AUGER(オージェ電子分光)システムを装備した超高真空チャンバー(アルバックファイ社製: 富山大学工学部内)であり、主に V 字加工した Si 基板上の InSb 薄膜の成長に使用した。もう 1 台は RHEED(反射型高速電子線回折)、STM(走査型トンネル顕微鏡)、AES、XPS(X 線光電子分光)分析装置を備えた超高真空チャンバー(材料表面分析装置

(Omicron 社製)：富山大学地域共同研究センター内)であり、主に、表面再構成制御成長法を用いた InSb 及び AlInSb 薄膜の作製に使用した。いずれの装置も到達真空度は 2×10^{-9} Torr 以下であり、蒸着の開始・終了は各蒸着源に取り付けたシャッターによって制御する。基板温度は赤外線パイロメータでモニターした。作製した試料は、LEED 或いは RHEED を用いた表面電子回折像観察、XRD を用いた結晶性の評価、SEM・STEM を用いた試料表面及び断面の観察、電気的特性評価により評価した。

4. 研究成果

(1) Si (111)- 2×2 -In 及び $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面相を用いた InSb 薄膜のヘテロエピタキシャル成長

Si (111)-InSb (2×2) 表面再構成構造、つまり、InSb 単分子層は、Si (111)- 7×7 清浄表面上に In を吸着して In 誘起表面再構成構造を作製した後、 180°C で 1 ML の Sb 原子を吸着させることにより形成される。今回の研究で使用した初期の In 誘起表面再構成構造は、 450°C で 0.33 ML の In 原子を吸着させることで形成される $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In 表面相、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In 表面相を形成後に基板温度を室温まで下げてトータル 0.75 ML の In を吸着させることで形成される 2×2 -In 表面相、また、 2×2 -In 表面相よりもさらに In の量を増やし 1.2 ML 吸着させることで形成される $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面相を用いて成長させた InSb 薄膜の結晶性等を比較した。

InSb 薄膜の成長条件を表 1 に示す。InSb 薄膜は 2 段階成長法を用いて成長する。1 層目の 200°C は、InSb 単分子層上の In 原子が、比較的低温で脱離し、Si (111)- 2×1 -Sb 表面相に変化してしまうのを防ぐためである。2 層目の 350°C は、1 層目の InSb 薄膜の分解を防ぐためである。1 層目の膜厚は 300 \AA 、トータルの膜厚はおよそ $1.1 \mu\text{m}$ であった。

表 1 InSb 薄膜の成長条件

	基板温度 [$^\circ\text{C}$]	蒸着時間 [min]
1 層目	200	5
2 層目	350	175

図 2 に作製した試料の XRD パターンを示す。いずれの試料も InSb に関しては (111)、(222)、(333) ピークのみが現れており、膜がエピタキシャル成長していることが分かる。面内の配向性を評価するため、各試料の (111) 反射ピークのファイスキャン測定を行った。その結果を図 3 に示す。図中の●は Si 基板のピーク位置を示している。

図 3(a) では、その In 被覆量から面内の 44% 程度しか InSb 単分子層が Si 基板表面を覆つ

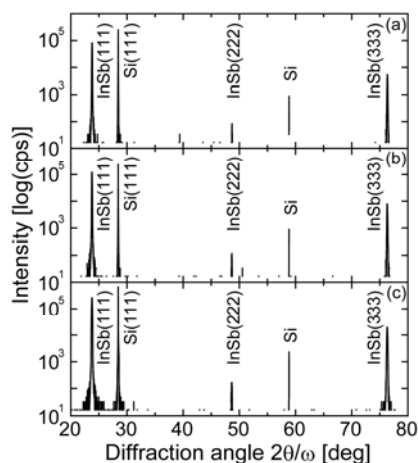


図 2 XRD パターン ($2\theta/\omega$)
(a) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In
(b) 2×2 -In
(c) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In

ていない試料である。この試料では、回転していない (Si と同じピークポジション) 半値幅の広いピークが観察されている。しかし、初期の In 被覆量が増加するにつれてこれらのピーク強度は小さくなり、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面相を用いた図 3(c) の試料では完全に回転したピークのみとなった。この結果より、今後初期の In 誘起表面再構成には $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面相を用いることにする。

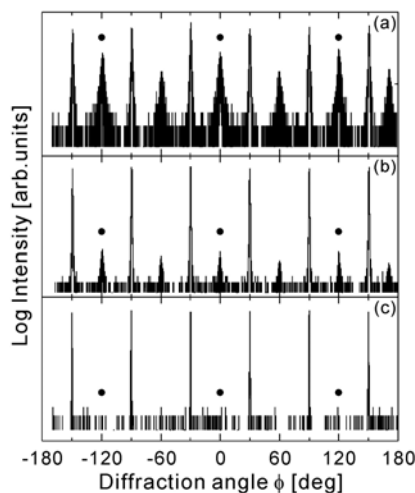


図 3 InSb 薄膜の XRD パターン (ϕ)
(a) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In
(b) 2×2 -In
(c) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In

作製した試料において、面内回転による結晶性の向上を確認するため、走査型透過電子顕微鏡 (STEM) 像の観察を行った。比較のために、Si 基板上に InSb 単分子層なしで 2 段階成長した試料も観察した。図 4 に STEM 像を示す。左の直接成長した試料では、転位が非常に多く観察されるものの、InSb 単分子層を介して成長した右の試料では、転位密度が

大幅に減少していることが分かる。この結果より、InSb 単分子層の有効性が確認できた。

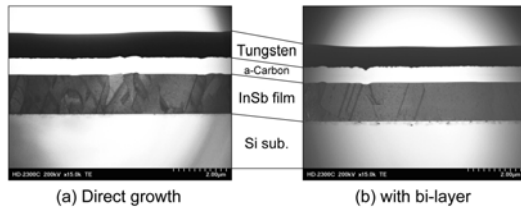


図4 STEM像(左)直接成長、(右)単分子層有

(2) Si(111)- $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In 表面相を用いた AlInSb 薄膜のヘテロエピタキシャル成長

(1)の研究成果から、 $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In 表面相を用いることで、100%回転した膜が得られることが分かった。よって、FET 実現のため、InSb 単分子層を用いた AlInSb 薄膜の成長を試みる。表2に AlInSb 薄膜の成長条件を示す。作製した試料の Al 組成は約 20%で、膜厚は約 1.1 μm あった。

表2 AlInSb 薄膜の成長条件

	基板温度 [°C]	蒸着時間 [min]
1層目	200	5
2層目	425	175

図5に AlInSb 薄膜の XRD パターンを示す。2 θ/ω スキャンパターンにおいて、AlInSb に

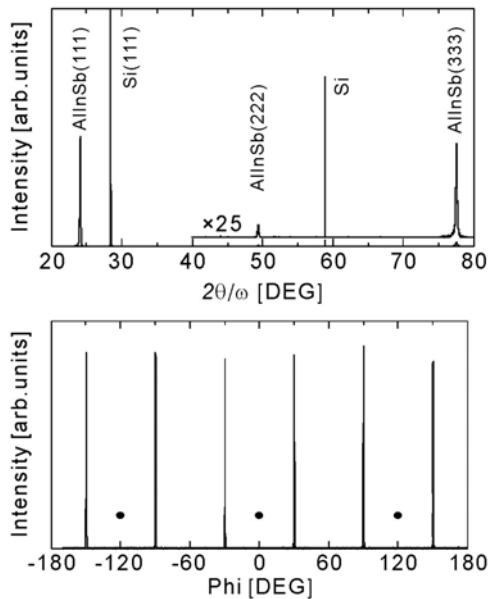


図5 AlInSb 薄膜の XRD パターン
(上) 2 θ/ω スキャン
(下) ϕ スキャン

関するピークは(111)、(222)、(333)ピークのみであり、AlInSb 薄膜が InSb 単分子層を介して Si(111) 基板上にヘテロエピタキシャル成長していることが分かる。また、 ϕ スキャンパターンを見ると、●で示した Si のピ

ーク位置から左右に 30° ずれた位置に 6本のピークが現れている。このことから、表面再構成制御成長法が AlInSb 薄膜の成長にも有効であることが分かった。

作製した AlInSb 薄膜をバリア層として用いた量子井戸構造を用いて、QW-FET を試作した。InSb チャネル層の厚さは 200 Å、Al 組成は 15%、ゲート長は 2 μm である。

作製した QW-FET の光学顕微鏡写真を図6に示す。作製したデバイスは、ソースドレイン間のリーク電流が大きく、ゲート電圧で制御できなかった。

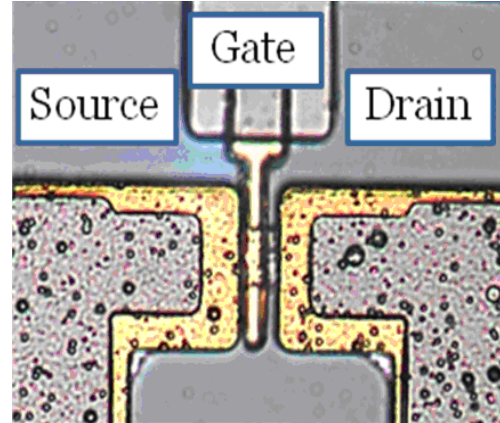


図6 試作した QW-FET の光学顕微鏡写真

この原因を調査するため、作製した AlInSb 薄膜のバリア層の Hall 測定を行った。その結果、作製した AlInSb 薄膜は p 型であり、キャリア(正孔)濃度が室温で 18 乗もあることが分かった。この原因は現時点では不明であるが、積層界面における欠陥若しくは不純物の混入によるものであると考えられる。今後、成長条件等を見直す等の検討が必要と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① T. Iwasugi, M. Mori, H. Igarashi, K. Murata, M. Saito, K. Maezawa, Heteroepitaxial growth of InSb films on the patterned Si(001) substrate, Physics Procedia, 査読有, 3 (2010) pp. 1329-1333
- ② M. Mori, S. Khamseh, T. Iwasugi, K. Nakatani, K. Murata, M. Saito, K. Maezawa, InSb films grown on the V-grooved Si(001) substrate with InSb bi-layer, Physics Procedia, 査読有, 3 (2010) pp. 1335-1339
- ③ M. Mori, H. Igarashi, T. Iwasugi, K. Murata, K. Maezawa, M. Saito, Heteroepitaxial growth of InSb films

- on V-grooved Si(001) substrate, e-Journal of Surface Science and Nano Technology, 査読有, 7 (2009) pp. 669-672
- ④ M. Saito, M. Mori, K. Ueda, K. Maezawa, Heteroepitaxial growth of rotate AlInSb layer mediated by InSb bi-layer on Si(111) substrate, Phys. Stat. Sol. (c), 査読有, 6, No.6 (2009) pp. 1497-1500
- ⑤ M. Mori, M. Saito, K. Nagashima, K. Ueda, T. Yoshida, C. Tatsuyama, K. Maezawa, High quality InSb films grown on Si(111) substrate via InSb bi-layer, e-Journal of Surface Science and Nano Technology, 査読有 Vol.7 (2009) 145-148
- ⑥ M. Mori, M. Saito, K. Nagashima, K. Ueda, T. Yoshida, K. Maezawa, High-temperature growth of heteroepitaxial InSb films on Si(111) substrate via the InSb bi-layer, J. Cryst. Growth, 査読有, 311 (2009) pp. 1692-1695.
- ⑦ M. Saito, M. Mori, K. Maezawa, Effect of In and Sb monolayers to form rotated InSb films on Si(111) substrate, Appl. Surf. Sci., 査読有, 254 (2008) pp. 6052-6054.
- ⑧ K. Murata, N. B. Ahmad, M. Mori, T. Tambo, K. Maezawa, Crystal orientations of InSb films on a Si(111) substrate by inserting AlSb buffer layer, Phys. Stat. Sol. (c), 査読有, 5, No. 9 (2008) pp. 2778-2780
- ⑨ M. Mori, M. Saito, K. Nagashima, K. Ueda, Y. Yamashita, C. Tatsuyama, T. Tambo, K. Maezawa, Heteroepitaxial InSb films grown via Si(111)- $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In surface reconstruction, Phys. Stat. Sol. (c) 査読有, 5, No.9 (2008) pp. 2772-2774.
- [学会発表] (計24件)
- ① 辻成介、中谷公彦、上田広司、森雅之、前澤宏一、表面再構成制御成長法を用いて作製したSi上AlInSb層の特性評価、平成21年度応用物理学会 北陸・信越支部学術講演会(11月21-22日、富山県立大学)
- ② M. Mori, S. Khamseh, T. Iwasugi, K. Nakatani, K. Maezawa, Surface reconstruction assisted growth of InSb films on V-grooved Si(001) substrate International Symposium on Quantum Nanophotonics (ISQNN2009), Tokyo, Japan, Nov. 18-20 (2009)
- ③ S. Khamseh, K. Nakatani, T. Iwasugi, K. Nakayama, A. Kadota, M. Mori, K. Maezawa, Growth of InSb films on a Si(001) substrate with V-shaped grooves via the InSb bi-layer, 2009年(平成21年)秋季第70回応用物理学会学術講演会(9月8-11日、富山大学)
- ④ M. Mori, S. Khamseh, T. Iwasugi, K. Nakatani, K. Murata, M. Saito, K. Maezawa, InSb films grown the V-grooved Si(001) substrate with InSb bi-layer, 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems (NGSS-14), Sendai, Japan, Jul. 13-17 (2009)
- ⑤ T. Iwasugi, M. Mori, H. Igarashi, K. Murata, M. Saito, K. Maezawa, Heteroepitaxial growth of InSb films on the patterned Si(001) substrate, 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems (NGSS-14), Sendai, Japan, Jul. 13-17 (2009)
- ⑥ 岩杉達矢、森雅之、齊藤光史、五十嵐弘樹、村田和範、前澤宏一、V字型(111)面パターンを形成したSi(100)基板上へのInSb薄膜のヘテロエピタキシャル成長、春季第56回応用物理学関係連合講演会(3月30日~4月2日、筑波大学)
- ⑦ 上田広司、齊藤光史、中谷公彦、森雅之、前澤宏一、InSb単分子層を介したSi(111)基板上のAlInSb薄膜のヘテロエピタキシャル成長、平成20年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会(11月21日~11月22日、金沢工業大学)
- ⑧ 岩杉達矢、森雅之、齊藤光史、五十嵐弘樹、N. B. Ahmad、村田和範、前澤宏一、V字型の(111)面パターンを形成したSi(100)基板上へのInSb薄膜のヘテロエピタキシャル成長、平成20年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会(11月21日~11月22日、金沢工業大学)
- ⑨ M. Mori, M. Saito, H. Igarashi, T. Iwasugi, N. B. Ahmad, K. Maezawa, Heteroepitaxial growth of InSb films on V-grooved Si(001) substrate 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-5), Tokyo, Japan, Nov. 9-13 (2008)
- ⑩ M. Mori, M. Saito, K. Nagashima, K. Ueda, T. Yoshida, C. Tatsuyama, K. Maezawa, High quality InSb films grown on Si(111) substrate via InSb bi-layer, 8th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS-8), Sendai, Japan, Oct. 19-23 (2008)
- ⑪ M. Saito, M. Mori, C. Tatsuyama,

- K. Maezawa, Improvement of rotated InSb films by additional In adsorption onto initial InSb bi-layer, 8th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS-8), Sendai, Japan, Oct. 19-23 (2008)
- ⑫ M. Saito, M. Mori, K. Ueda, K. Nakatani, K. Maezawa, Heteroepitaxial growth of rotated AlInSb layer mediated by InSb bi-layer on Si(111) substrate, 35th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2008), Rust, Germany, Sep. 21-24 (2008)
- ⑬ 中谷公彦、齊藤光史、上田広司、森雅之、前澤宏一、InSb単分子層を介したSi(111)基板上のAlInSb薄膜のヘテロエピタキシャル成長、2008年(平成20年)秋季第69回応用物理学会学術講演会(9月2-5日、中部大学)
- ⑭ 五十嵐弘樹、森雅之、齊藤光史、岩杉達矢、ノルマルティビソティアハマト、前澤宏一、(111)面パターンを形成したSi(100)基板上へのInSb薄膜のヘテロエピタキシャル成長、2008年(平成20年)秋季第69回応用物理学会学術講演会(9月2-5日、中部大学)
- ⑮ M. Mori, M. Saito, K. Nagashima, K. Ueda, T. Yoshida, Y. Shinmura, K. Maezawa, Heteroepitaxial growth of InSb films on a Si(111) substrate via InSb bi-layer, 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2008), Vancouver, Canada, Aug. 3-8 (2008)
- ⑯ 齊藤光史、森雅之、上田広司、吉田達雄、新村康成、前澤宏一、InSb単分子層を介したSi(111)基板上のAlInSb薄膜の成長、春季第55回応用物理学関係連合講演会(3月27日~3月30日、日本大学船橋キャンパス)
- ⑰ 長島恭兵、上田広司、齊藤光史、森雅之、丹保豊和、前澤宏一、Si(111)- $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In表面再構成を介したInSb薄膜のヘテロエピタキシャル成長とその結晶性及び配向性の評価、平成19年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会(11月30日~12月1日、富山大学工学部)
- ⑱ 新村康成、水谷文也、吉田達雄、上田広司、齊藤光史、森雅之、前澤宏一、InSb単分子層/Si(111)上へのAlSb層の成長、平成19年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会(11月30日~12月1日、富山大学工学部)
- ⑲ M. Mori, M. Saito, K. Nagashima, K. Ueda, Y. Yamashita, C. Tatsuyama, T. Tambo, K. Maezawa, Heteroepitaxial InSb films grown via Si(111)- $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In surface reconstruction, 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2007), Kyoto, Japan, Sep. 15-18 (2007).
- ⑳ K. Murata, N. B. Ahmad, M. Mori, T. Tambo, K. Maezawa, Heteroepitaxial growth of InSb films on a Si(111) substrate by inserting AlSb buffer layer, 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2007), Kyoto, Japan, Sep. 15-18 (2007).
- 21 M. Saito, M. Mori, K. Maezawa, Effect of In and Sb monolayers to form rotated InSb films on Si(111) substrate, 5th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-5), Tokyo, Japan. Nov. 12-15 (2007)
- 22 K. Murata, N. B. Ahmad, M. Mori, T. Tambo, K. Maezawa, Domain structure of InSb films grown on Si(111) substrate, 5th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-5), Tokyo, Japan. Nov. 12-15 (2007)
- 23 長島恭兵、齊藤光史、森雅之、丹保豊和、前澤宏一、Si(111)- $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In表面再構成を介したInSb薄膜のヘテロエピタキシャル成長、2007年(平成19年)秋季第68回応用物理学会学術講演会(9月4-8日、北海道工業大学)
- 24 M. Mori, M. Saito, K. Nagashima, K. Ueda, T. Tambo, C. Tatsuyama, K. Maezawa, Heteroepitaxial growth of InSb films on a Si(111) substrate with $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In surface reconstruction, 2nd International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2007), Nagano, Japan, Jun. 19-22 (2007)

[その他]

ホームページ等

<http://www3.u-toyama.ac.jp/nano/>

<http://www3.u-toyama.ac.jp/morimasa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 雅之 (MORI MASAYUKI)

富山大学・大学院理工学研究部・助教

研究者番号：90303213