

機関番号：33924

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21710128

研究課題名（和文） バイオナノ粒子を応用した膜応力制御 MEMS 型空間光変調器の開発

研究課題名（英文） Tension-controlled MEMS spatial light modulator
by using bionano particles

研究代表者

熊谷 慎也 (Kumagai Shinya)

豊田工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70333888

研究成果の概要（和文）：

バイオ分子を用いて作った Ni ナノ粒子を利用する金属誘起横方向結晶成長法によって、アモルファス Si 薄膜の結晶化過程における結晶成長核の発生を制御した。結晶粒径は $1\ \mu\text{m}$ から $20\ \mu\text{m}$ へと拡大し、そして、結晶化に伴って発生する Si 薄膜中の引張応力を増大させることに成功した。この結晶化 Si 薄膜を用いて MEMS 型空間光変調器を試作した。引張応力が増大した Si 薄膜を用いることで、空間光変調器の共振周波数が高周波数側にシフトし、回転動作範囲の拡大を実現した。

研究成果の概要（英文）：

Generations of crystallization nuclei in amorphous Si thin film are controlled by metal-induced lateral crystallization (MILC) using Ni nanoparticles (NPs) that are synthesized within cage-shaped protein, ferritin. Grain size in the crystallized Si film is increased from less than $1\ \mu\text{m}$ (without MILC) to $20\ \mu\text{m}$ (with MILC). Crystallization-induced stress (tensile stress) is also increased by the MILC using Ni NPs. The tensile stress increases larger with increase in the grain size. Spatial light modulators are fabricated with the crystallized Si film. The resonance frequency is increased and device operation range is extended.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロナノデバイス

キーワード：マイクロ・ナノデバイス，マイクロマシン，ナノバイオ

1. 研究開始当初の背景

MEMS では Si 薄膜が構造材料として広く利用されている。デバイス動作特性は Si 薄膜の残留応力状態に大きく左右される。例えば、静電駆動アクチュエーターでは静電引力と可動部を支持する梁構造の弾性力とのつり

合いが重要である。梁構造の弾性力が弱ければ、静電力を加えた際に MEMS の可動部が電極に引き寄せられて接触する、pull-in 現象が容易に発生することになる [Cheng et al., J. Micromech. Microeng. **14** (2004) 57]。この pull-in 不安定性を抑制するためには、

支持部に引張応力を加えること有効であり、結晶化誘起応力が利用されてきた[M. Sasaki et al., IEEE Photo. Technol. Lett., **18** (2006) 1573]。アモルファス Si 薄膜をアニールすると、膜中の水素原子が脱離して薄膜の体積が収縮し、結晶化が進む。この結晶化に伴う体積収縮によって発生する応力が結晶化誘起応力である[H. Miura et al., Trans. J. Soc. Mech. Eng. A, **58** (1992) 1960]。大きな結晶化誘起応力を得るためには、体積収縮の量をおおきくすること、すなわち、結晶粒径を大きくすることが有効である。従来のアニール手法では、結晶核がランダムに発生するため、成長した結晶粒が周囲の結晶粒とすぐに衝突し、得られる結晶化誘起応力は限られていた。より大きな応力を発生させることができれば、MEMS デバイスの動作特性を一層向上させることができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、Si 薄膜中の結晶成長核の発生を制御して結晶粒径を拡大することで[H.Kirimura et al., Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 262106]、応力増大の実現を目指す。そして、応力を増加させた Si 薄膜を用いて、MEMS デバイスとして空間光変調器を試作し、動作特性が向上することを示す。

3. 研究の方法

かご状タンパク質分子フェリチンを用いてつくられた Ni ナノ粒子を利用する金属誘起横方向結晶成長 (Metal-Induced Lateral Crystallization: MILC) を図 1 に示す。3 μm の熱酸化膜を持つ Si 基板上にアモルファス Si を LPCVD 法で堆積させた (膜厚: 600nm)。Ni ナノ粒子を内包するフェリチン (Ni フェリチン) の溶液を Si 基板上に滴下して 10 分間静置し、余剰の溶液を遠心除去した。その後サンプルを管状炉に設置し、酸素雰囲気中 (0.5sccm) 500 $^{\circ}\text{C}$ で 10 分間保持しタンパク除去を行った後、管状炉温度をさらに上昇させてアルゴン雰囲気中 (0.5sccm) で結晶化アニール (MILC) を行った。タンパク除去後のアニールの過程で、Ni は Si 薄膜と反応し、シリサイドを形成する。NiSi₂ シリサイドは、シリサイド反応物の中で Si の結晶格子との整合性が最もよい。格子不整合は 0.4% 以下である。そして、NiSi₂ の生成温度は 400 $^{\circ}\text{C}$ 以下と、アモルファス Si 薄膜から多結晶 Si 薄膜を得る温度 (600 $^{\circ}\text{C}$ 以上) と比較して低い。従って、生成した NiSi₂ が結晶成長核として機能し、結晶化が優先的に進む。結晶化状態を評価するため、電子線後方散乱回折法 (Electron BackScatter Diffrction, EBSD) を用いて、結晶粒径等の評価を行った。

結晶化した Si 薄膜の内部応力を、MEMS 応力モニターを製作し、測定する (図 2. L.

Lin et al., J. Microelectromech. Syst. **6** (1997), 313,)。機械的なリンク構造を介して、テストビーム部分の圧縮/引張応力による伸長/収縮変位が、指示部の回転変位に変換される仕組みになっている。

Ni フェリチンを用いて結晶化した Si 薄膜を用いて、MEMS 型空間光変調器を試作する (図 3)。基板とミラー部に電圧を印加し、静電引力によって、ミラー部を回転駆動させる構造になっている。ミラー部の変位を光でこの法によって計測した。

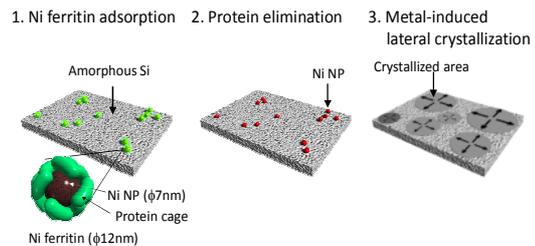


図 1: Ni コア内包フェリチンを用いた金属誘起横方向結晶

図 2: MEMS 応力モニター。応力検出テストビームにおける残留応力による伸縮変位を機械的リンク構造を通じて回転変位に変換する。その変位をもとに、フックの法則から、応力値を算出する。

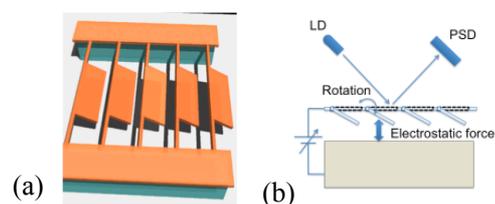
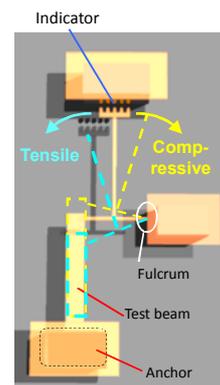


図 3: (a) MEMS 型空間光変調器の模式図。(b) 動作原理および、測定手法

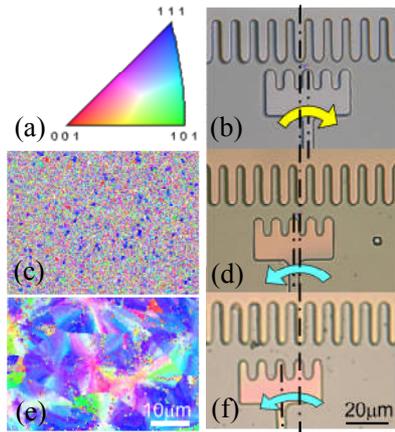


図4: EBSDによる結晶化状態分析結果とMEMS応力モニタの変位。(a) EBSD分析における結晶方位マップ。(b) As-deposited Si 薄膜。(c), (d) アニール(Ni ナノ粒子なし) 処理後。(e), (f) アニール(Ni ナノ粒子なし) 処理後。

4. 研究成果

結晶化状態と MEMS 応力モニタの表示部の対応を図4に示す。堆積直後、すなわち、MILC 処理を行っていない Si 薄膜では応力モニタが右に $3.3\mu\text{m}$ 振れ、圧縮応力状態になっている[図4(b)]。Si 薄膜のヤング率を 130GPa とすると、応力値は 67MPa と試算される。Ni フェリチンを吸着させずに結晶化アニールを行ったサンプルでは、EBSD 観察結果では、 $1\mu\text{m}$ 以下の微結晶状態になっていることが分かる[図4(c)]。応力モニタは左に $4.4\mu\text{m}$ 振れ、残留応力は圧縮応力から引張応力へと変化する[図4(d)]。その値は 90MPa である。次に Ni フェリチンを吸着し、結晶化を行ったサンプルでは、結晶粒が $20\text{--}30\mu\text{m}$ に成長した[図4(e)]。応力モニタは左に $10.0\mu\text{m}$ 振れ、 207MPa の引張応力状態になっている[図4(f)]。従って、結晶粒径が大きいほど、発生する引張応力の値が大きくなっていることが分かる。さらに、結晶化アニール温度の条件検討を行い、 680°C のアニールで、引張応力値は 330MPa まで大きくなることが分かった。

次に、結晶化した Si 薄膜を用いて試作した MEMS 型空間光変調器の評価を行った。試作したデバイスを図5に示す。このような静電駆動型デバイスでは、静電引力がミラー部を支えるトーションバーの弾性力を上回った際に、ミラー部が駆動電極に引き寄せられて接触する pull-in 現象が発生する。pull-in が発生するとミラーの回転を制御することはできなくなる。トーション型静電駆動デバイスでは構造上許容される回転角度の 44% を超えて回転する際に pull-in が起こることが報告されている [Cheng et al., J.

Micromech. Microeng. **14** (2004) 57]。試作した空間光変調器の周波数特性を図6に示す。参照デバイス(MILCをしていないデバイス)では共振が 86.2Hz と 218.9Hz に見られる。MILCを行ったデバイスでは、共振のピークが 105.3Hz と 233.9Hz の高周波数側にシフトした。Si 薄膜の結晶化によって、トーションバー内の引張応力が增大したためと考えられる。ミラー部-基板間に加える電圧を徐々に増加させ、pull-in が発生するまでの電圧を測定した(図7)。図中の破線が最大回転許容角を示している。試作したデバイス構造の 44%相当角は 4.36° である。参照用デバイスでは 36.1V 印加時に 4.23° まで回転したところで pull-in が発生した。MILC を行ったサンプルでは、 4.36° を超えて 41.5V 印加時に 4.41° まで回転したところで pull-in が発生した。MILC 処理を行い、引張応力を増大させることで、トーションバーの弾性率が増大し、pull-in が抑制され、回転範囲が拡大したといえる。

Si 薄膜の中で結晶化する領域を制御することができれば、MEMS デバイスの特定の構造の中から結晶粒界を除き、引張応力をさらに増大させることができる。デバイスの動作特性の更なる向上が期待できる。半導体微細加工におけるリフトオフ法を利用し、Ni フェリチンをパターニングし、MILC を行った。パターニング領域から放射状に結晶化領域を拡大させることに成功した(図8)。SEM 像では均一に見える結晶化領域であるが、EBSD 像では微細な構造があることが明らかになった。パターニング領域内で、Ni フェリチンの吸着に分布があったものと考えられる。Ni ナノ粒子の吸着の分布をおさえ、小さなパターニング領域に密に Ni ナノ粒子を吸着することで、結晶化状態を向上させることができると考えられる。微細な領域へのパターン配置には Ni フェリチンと Si 基板との静電相互作用を利用した手法が有効である (Kumagai et al., Appl. Phys. Lett., **88** (2006) 152103)。

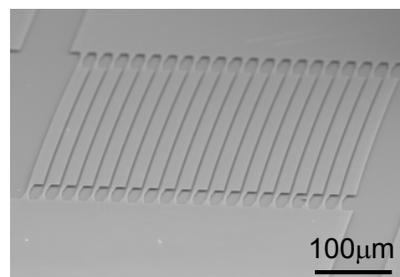


図5: 試作した MEMS 型空間光変調器。

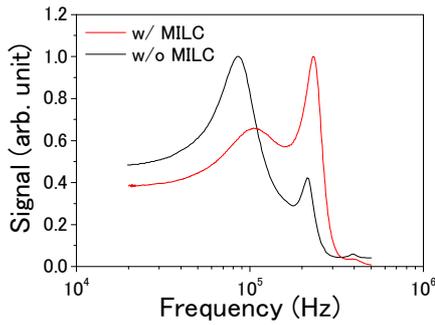


図 6: 周波数応答特性。

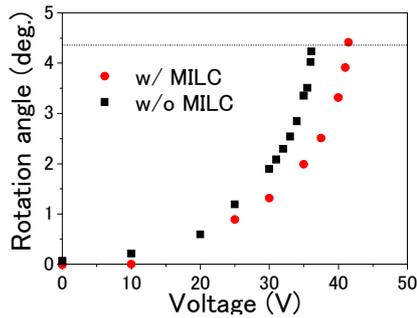


図 7: 印加電圧に対するミラー回転角度。

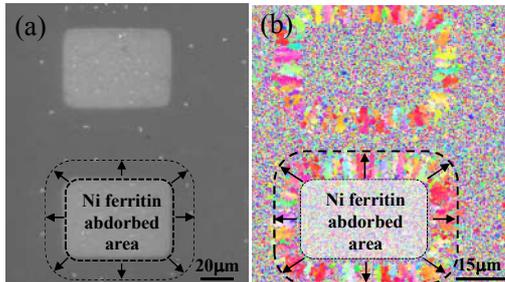


図 8: Ni フェリチン分子のパターン配置を利用した結晶化領域の制御。(a) SEM 像。(b) EBSD 像。

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)

[学会発表] (計 6 件)

① S. Kumagai, S. Miyachi, I. Yamashita, Y. Uraoka, and M. Sasaki, “BIONANO CRYSTALLIZED POLY-SI FILM FOR INCREASING TENSILE STRESS IN MEMS/NEMS DEVICE STRUCTURES”, Proc. Transducers 2011, p.1733, Jun. 7, 2011, Beijing, China.

② S. Kumagai, S. Miyachi, I. Yamashita, Y. Uraoka, and M. Sasaki, “Increasing tensile stress in poly-Si film structure by metal-induced lateral crystallization using ferritin supramolecules with Ni nanoparticles”, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, #226, 46, Dec. 15, 2010, Honolulu, Hawaii, USA

③ 熊谷慎也, 宮地修輔, 山下一郎, 浦岡行治, 佐々木実, “MEMS 用 Si 薄膜材料の内部応力増強に向けた Ni フェリチンを用いた金属誘起横方向結晶成長”, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 講演論文集 (8) p. 235, 2010 年 9 月 8 日, 名古屋工業大学

④ Shinya Kumagai, “Larger Grain Size of Poly Si Confirmed by MEMS Strain Gauge”, Proc. The Seventeenth International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices, p. 57, July 6, 2010, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan 【招待講演】

⑤ 宮地修輔, 熊谷慎也, 山下一郎, 浦岡行治, 佐々木実, “Ni フェリチンを用いた金属誘起横方向結晶成長による Si 薄膜内応力の増強”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 講演予稿集 03-035, 2010 年 3 月 20 日, 東海大学 湘南キャンパス

⑥ Shinya Kumagai, “Metal-Induced Lateral Crystallization using Ni Nanoparticles for Increasing Tensile Stress in Si Thin Film”, Proc. The Second International Symposium of Experiment-Integrated Computational Chemistry on Multiscale Fluidics (ECCMF2) 2010, p. 22, Feb. 23, 2010, Sendai, Japan 【招待講演】

[その他]

ホームページ等

<http://www.toyota.ti.ac.jp/mems/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊谷 慎也 (KUMAGAI SHINYA)

豊田工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70333888