

ナノメートルオーダの機械振動子の作製

Fabrication of nanometric oscillators

佐谷大輔*・福島公威*・年吉洋*
橋口原**・藤田博之*・川勝英樹*

Daisuke SAYA, Kimitake FUKUSHIMA, Hiroshi TOSHIYOSHI,
Gen HASHIGUCHI, Hiroyuki FUJITA and Hideki KAWAKATSU

1. はじめに

現在、非接触モード原子間力顕微鏡 (AFM) では先端に鋭利な探針のある長さ数百 μm ほどのカンチレバーが用いられ、探針と観察試料表面の間に作用する力勾配をカンチレバーの共振周波数変化から検出している^{1), 2)}。AFMの感度向上のためにはバネ定数を低く共振周波数を高くすることが大切である。そのためカンチレバーの微小化が望まれる^{3), 4)}。我々は大きさが100 nmから3 μm で振動のための質量-バネから構成されるナノ振動子を作製して、AFMとしての微小力検出や質量検出への応用を目指している^{5), 6), 7), 8), 9)}。ここでは各種振動子の作製方法を述べる。

2. 作 製

ナノ振動子の作製にはSOI (silicon-on-insulator) ウエハを用いる。SOIは上部Si層 (膜厚1~3 μm) / 中間酸化層SiO₂ (膜厚1~3 μm) / 基盤Si (膜厚500 μm) の3層からなる。そして半導体製造技術によりSiとSiO₂の選択的エッチングによりナノ振動子を形成する。作製方法には大きく分けて次の4つを考案した。(1) SiO₂細ネックのナノ振動子、(2) 斜め蒸着によるPoly-Si薄膜を振動の板バネとするナノ振動子、(3) 平行バネ振動子、(4) 振動の質量-バネが一体化された単結晶SiでできたSi基盤に平行な単結晶Siカンチレバーアレーである。

2.1 SiO₂細ネックのナノ振動子

Figure 1に水酸化カリウム (KOH) 水溶液によるSiの異方性エッチングによる振動の質量となるSi三角錐の作製

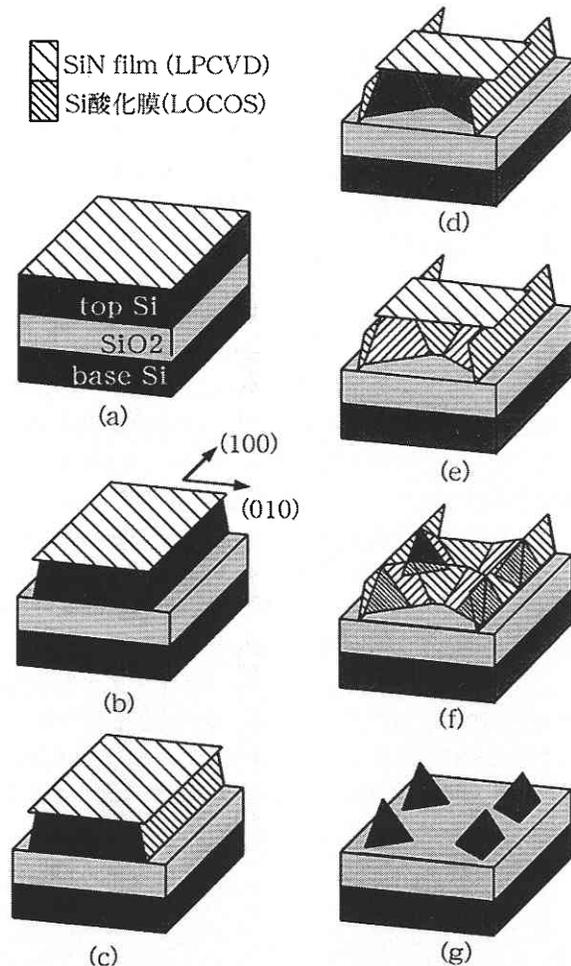


Fig. 1 三角錐の作製行程

(a) Deposition of SiN on SOI. (b) Patterning of SiN film and etching of top Si by RIE or KOH anisotropic etching. (c) Local oxidation of Si (LOCOS). (d) Patterning of SiN film and anisotropic etching of Si by KOH. (e) LOCOS. (f) Anisotropic etching of Si by KOH. (g) Removal of LOCOS SiO₂ film

*東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター

**香川大学工学部

方法を示す。上部 Si 層を最初に反応性イオンエッチング (RIE) により (100) 方向に平行な面, または KOH 異方性エッチングにより (100) 面を形成し, 次に 2 回の Si 局部酸化 (LOCOS) と 2 回の KOH 異方性エッチングにより 2 つの {111} 面を形成し, Si 三角錐の 3 つの面を形成する。節 2.2 の斜め蒸着 Poly-Si を板バネとするナノ振動子でもこの方法で作製した Si 三角錐を用いる。Si 三角錐の大きさは SOI ウエハの上層 Si の膜厚で決まる。そのために, リソグラフィ技術の精度に大きく依存しないで, Si 三角錐 SOI ウエハの上層 Si の膜厚の違いにより大きさのみが異なり形状は同じものとなる^{9), 10), 11)}。そのため最終的に形成されるナノ振動子も高い再現性をもった作製が可能となる。SiO₂ 細ネックのナノ振動子の作製行程を Figure 2 に示す。まず Figure 1 に示した方法で SOI の上部 Si 層を Si 三角錐に形成する (Figure 2 (b))。そして CHF₃ ガスによる RIE により Si 三角錐をマスクとして中間酸化層 SiO₂ を基盤に垂直にエッチングする。すると Figure 2 (c) の様に Si 三角錐 - SiO₂ のコラムが形成される。そして緩衝フッ酸 (BHF) によりコラムの SiO₂ を横方向にエッチングする (Figure 2 (d))。SiO₂ は徐々に細くなりバネとして十分な細さになったところでエッチングをやめ, Si 三角錐を質量, 細くなった SiO₂ をバネとするナノ振動子の形状

が得られる。BHF による SiO₂ のエッチング速度は 1.2 nm/s と見積もられるので, BHF エッチング前の Si 三角錐 - SiO₂ のコラムの SiO₂ の部分の幅をはかることで必要なエッチング時間を計算される。Figure 3 に作製した SiO₂ 細ネックのナノ振動子の SEM 像を示す。計算によると Figure 3 (a), (b), (c) に示したナノ振動子の共振周波数, バネ定数はそれぞれ (a) 5 MHz, 0.1 N/m, (b) 10 MHz, 0.1 N/m, (c) 300 MHz, 1 N/m である。

2.2 斜め蒸着 Poly-Si を板バネとするナノ振動子

作製行程を Figure 4 に示す。Figure 1 に示したのと同様に SOI を用いて Si 三角錐を形成し, Si 三角錐 - SiO₂ のコラムを形成する。そしてスパッタにより poly-Si を斜め蒸着する。この際 Si 三角錐の (100) に平行な面に垂直に当たるようにする。そして Si 三角錐 - SiO₂ のコラムの SiO₂ を BHF により完全に除去する。すると Si 三角錐を探針付きの質量, スパッタ蒸着膜が板バネとなるナノ振動子が形成される。Figure 5 に斜め蒸着 Poly-Si を板バネとするナノ振動子の SEM 像を示す。Figure 5 (a), (b), (c), (d) に示された振動子の特性は, 計算ではバネ定数, 共振周波数は (a) 30 N/m, 40 MHz, (b) 3 N/m, 18 MHz, (c)

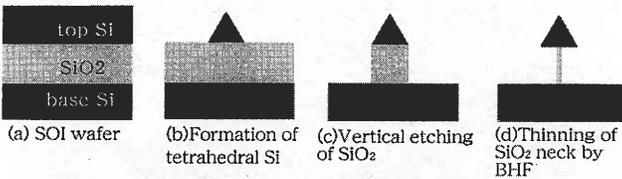


Fig. 2 SiO₂ 細ネックのナノ振動子の作製行程

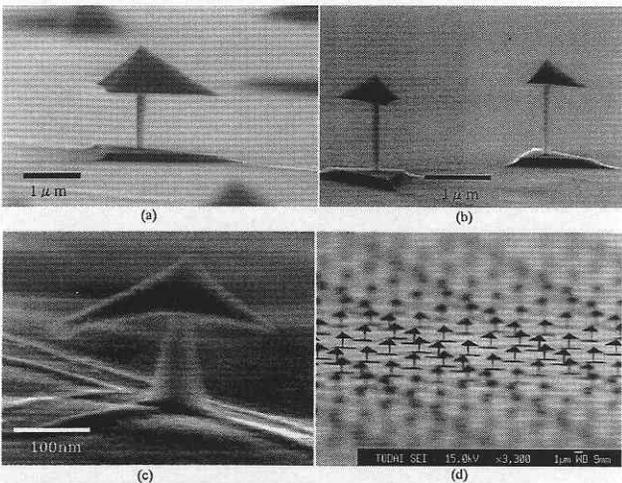


Fig. 3 SiO₂ 細ネックのナノ振動子の SEM 像

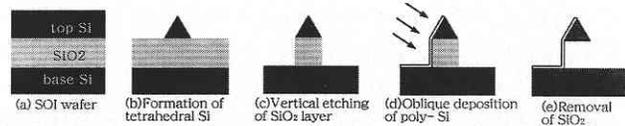


Fig. 4 斜め蒸着による Poly-Si の板バネナノ振動子の作製行程

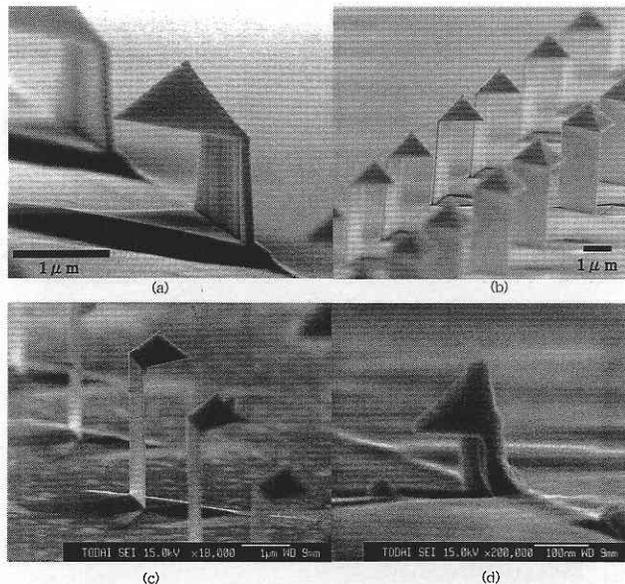


Fig. 5 斜め蒸着による Poly-Si の板バネナノ振動子の SEM 像

研究速報
 0.1 N/m, 3 MHz, (d) 50 N/m, 3 GHzである。バネの厚さはスパッタの蒸着量で容易に制御可能であり、より高い再現性、均一性を持った作製が可能である。

2.3 平行バネ振動子

作製行程を Figure 6 に示す。SOIを用いて、Siの異方性エッチングにより4つの面が{111}面からなるSi細線を形成する。そして同様にCH₃F₃ガスでのRIEでSi-SiO₂のコラムを形成する。そしてスパッタによる斜め蒸着によりコラムの相対する2つの{111}面にPoly-Si薄膜を形成し、コラムのSiO₂をBHFで完全に除去する。これでPoly-Siの板バネで支えられた平行バネ振動子が形成される。Figure 7に平行バネ振動子のSEM像を示す。この平行バネ振動子により、より正確な並進変位が得られる。Si細線を空中に支持する方法としても有効である。

2.4 単結晶Siカンチレバーアレー

このカンチレバーの作製行程を Figure 8 に示す。作製方法は節2.1のSi三角錐の作製行程とほぼ同様で3回のKOHの異方性エッチングと2回のLOCOSによりカンチレバーの面を形成していくものである。最初のKOH異方性エッチングでは、カンチレバーのバネ部分の厚さを制御するためのエッチングとSi三角錐探針の(100)面を形成する。2回目と3回目のKOH異方性エッチングでは、Si三角錐5この手法により1 μmから3 μm程度の長さのカンチレバーを結晶の異方性を利用することでリソグラフィ技術の精度に依存しない方法で作製することに成功した。この場合も節2.1で述べたように探針となるSi三角錐の高さはSOI

の上部Si層の膜厚で決まる。Figure 9に単結晶SiカンチレバーのSEM像を示す。バネの厚さは60 nmで、計算ではバネ定数10 N/m、共振周波数10 MHzである。この方法では1 μmから3 μm程度の長さのカンチレバーが3 μm

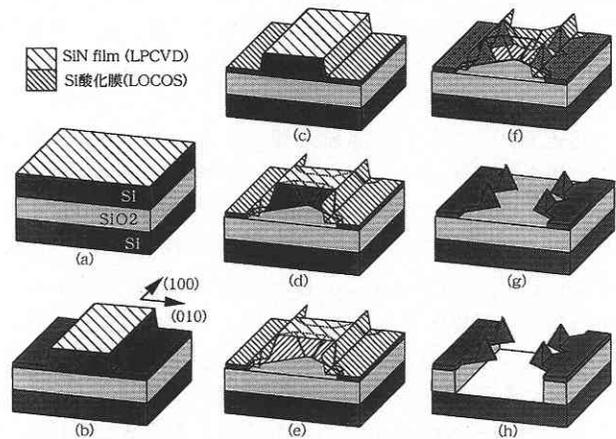


Fig. 8 単結晶Siカンチレバーの作製行程
 (a) Deposition of SiN on SOI. (b) First anisotropic etching by KOH. (c) Local oxidation of Si (LOCOS). (d) Second anisotropic etching by KOH. (e) LOCOS. (f) Third anisotropic etching by KOH. (g) Removal of LOCOS SiO₂ film. (h) Etching of SiO₂ layer

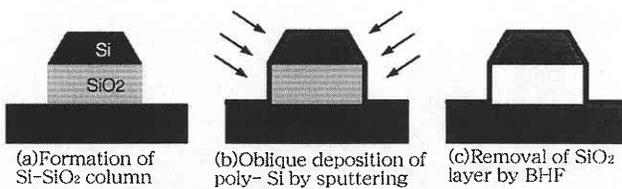


Fig. 6 平行バネ振動子の作製行程

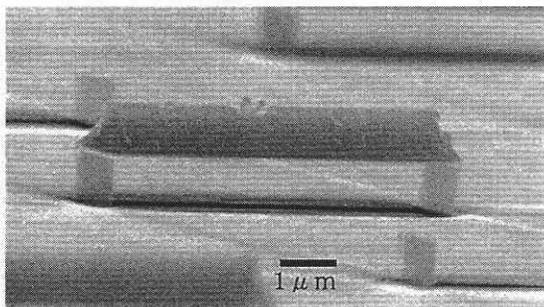


Fig. 7 平行バネ振動子のSEM像

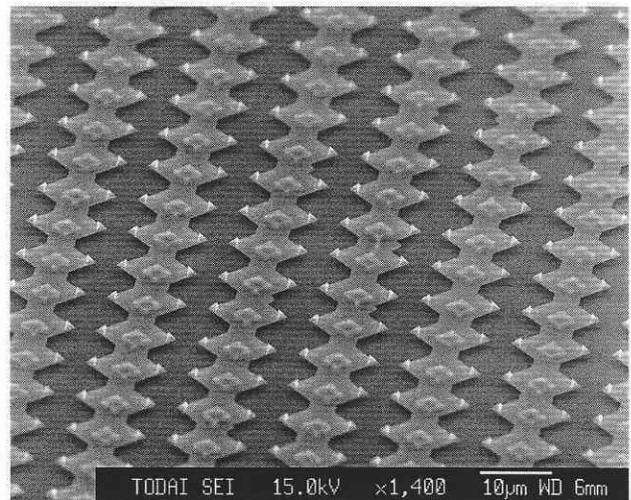
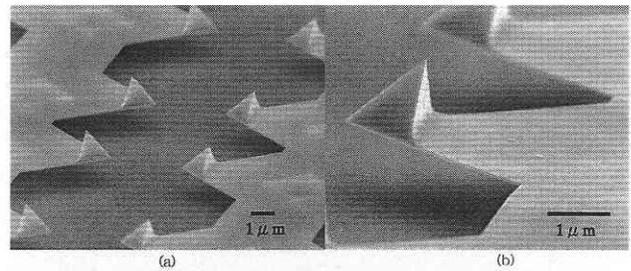
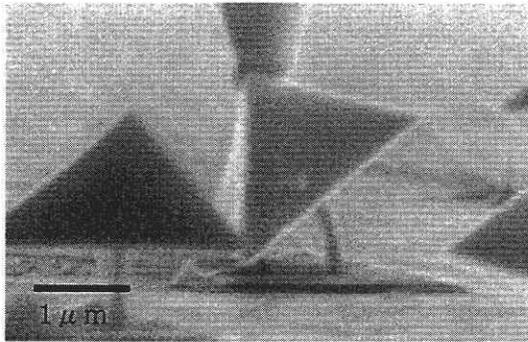


Fig. 9 単結晶SiのマルチプローブカンチレバーアレーのSEM像

Fig. 10 SiO₂ 細ネックナノ振動子の変形

から 10 μm の間隔でアレー状に形成可能であり、1 mm² 四方に 1 万から 10 万個のカンチレバーが Figure 9 (c) の様にアレー状に形成される。マルチプローブカンチレバーアレーとして用い、微小領域の走査を一括して行うための AFM^{(13), (14), (15), (16), (17)} の実現を目指している。

3. ナノ振動子の静的機械特性

作製したナノ振動子の静的の特性を測定するために SEM-AFM⁽¹²⁾ を用いて市販の AFM 用カンチレバーや STM 探針によってナノ振動子を押す実験を行った。Figure 10 のような真直なネックの場合は、ネックが均等に变形している。大きく变形させると塑性变形、または破断した。破断は SiO₂ ネックと基盤の Si の界面で起こることが多かった。これは SOI の上層 Si と SiO₂ の界面が Si の酸化により作られたものであるのに対し、SiO₂ と下層 Si の界面が張り合わせにより作られており強度上劣るためである。頸部は 1 GPa 程度の強度を有し、AFM 探針として用いた場合の微小力検出のための十分な強度を有することが確認できた。

また節 2.3 で述べた、単結晶 Si カンチレバーを STM 探針で押す実験を行った。Figure 11 (a) のように变形しその後 STM 探針を離したところ、Figure 11 (b) の様に元に戻り弾性変形をしているのが確認された。さらに強く押したところ SiO₂ 層で支えられた部分で割れた。

4. 結 論

4 つのタイプのナノ振動子、(1) SiO₂ 細ネックナノ振動子、(2) Poly-Si 板バネ、(3) 平行バネ振動子、(4) Si 単結晶カンチレバーを高い再現性均一性を持って作製した。それらは AFM 探針としての十分な強度を持つことを確認した。今後光学的手法により各振動子の固有振動数、Q 値を測定し、力の検出分解能の概算を行う。

(2000 年 7 月 7 日受理)

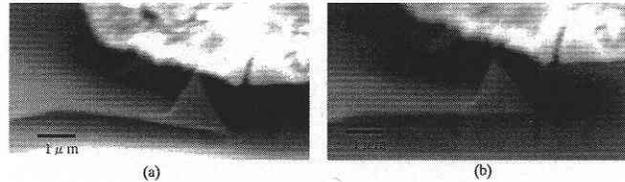


Fig. 11 単結晶 Si のカンチレバーの変形

参 考 文 献

- 1) G. Binnig, C. Gerber and C. F. Quate: Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 930.
- 2) T. R. Albrecht, P. Gutter, D. Horne and D. Rugar: J. Appl. Phys. 69 (1991) 668.
- 3) S. Hosaka, K. Etoh, A. Kikukawa, H. Koyanagi and K. Itoh: Microelectronic Engineering, 46 (1999) 109.
- 4) Mario B. Viani, Tilman E. Schaeffer, Ami Chand, Matthias Rief, Hermann E. Gaub, and Paul K. Hansma: J. Appl. Phys. 86 (1999) 2258.
- 5) H. Kawakatsu, D. Saya, M. de Labachellerie, H.-J. Hug and H.-J. Güntherodt: Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 3954.
- 6) H. Kawakatsu, H. Toshiyoshi, H. Fujita and D. Saya: Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 3962.
- 7) H. Kawakatsu, D. Saya, K. Fukushima, H. Toshiyoshi and H. Fujita: J. Vac. Sci. & Technol. B, 18 (2000), 607
- 8) H. Kawakatsu, D. Saya, K. Fukushima, H. Toshiyoshi and H. Fujita: Applied Surface Science, 157 (2000), 320
- 9) D. Saya, K. Fukushima, H. Toshiyoshi, G. Hashiguchi, H. Fujita and H. Kawakatsu: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.39, No. 6 B, 2000.
- 10) G. Hashiguchi and H. Mimura: Jpn. J. Appl. Phys. 34 (1995) 1493.
- 11) G. Hashiguchi and H. Mimura: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L 1649.
- 12) K. Fukushima, D. Saya and H. Kawakatsu: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 39, No. 6 B, 2000.
- 13) M. Lutwyche, C. Andreoli, G. Binnig, J. Brugger, U. Drechsler, W. Haerberle, H. Rohrer, H. Rothuizen, P. Vettiger, G. Yaralioglu and C. F. Quate: Sens. & Actuat. 73 (1999) 89.
- 14) P. Vettiger, J. Brugger, M. Despont, U. Drechsler, U. Dürig, W. Haerberle, M. Lutwyche, H. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer and G. Binnig: Micro. Eng. 46 (1999) 11.
- 15) E. M. Chow, H. T. Soh, H. C. Lee, J. D. Adams, S. C. Minne, G. Yaralioglu, A. Atalar, C. F. Quate and T. W. Kenny: Sens. & Actuat. B 83 (2000) 118.
- 16) P.-F. Indermühle, G. Schürmann, G.-A. Racine and N. F. de Rooij: Sens. & Actuat. A 60 (1997) 186.
- 17) M. Despont, J. Brugger, U. Drechsler, U. Dürig, W. Haerberle, M. Lutwyche, H. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G. Binnig, H. Rohrer and P. Vettiger: Sens. & Actuat. A 80 (2000) 100.