

単一光源によるマイクロメカニカル共鳴器の励起および振動検出

李 中 梁*・王 向 朝*・劉 英 明*・佐々木修己**

* 中国科学院・上海光学精密机械研究所 〒201800 中国上海市嘉定区清河路 390 号

** 新潟大学工学部 〒950-2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050 番地

Exciting and Detecting Vibration of Silicon Microresonator Sensors with a Single Laser Diode

Zhongliang Li*, Xiangzhao WANG*, Yingming LIU* and Osami SASAKI**

* Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, No. 390, Qinghe Road, Jiading, Shanghai, China 201800

** Faculty of Engineering, Niigata University, 8050 Ikarashi 2-no-cho, Niigata 950-2181

A novel method using one laser diode is presented in which optically exciting and detecting vibration of silicon microresonator sensors are executed simultaneously. Based on the sinusoidal phase-modulating interferometry, a vibration waveform of a microcantilever sample is measured with high accuracy. Measurement error of the vibration amplitude caused from the simultaneous execution of the excitation and the detection is theoretically analyzed. In experiments the resonance frequency, vibration waveform and frequency-response curve of the microcantilever sample are obtained. The experimental results are consistent with theoretical calculation results, and measurement repeatability of the vibration amplitude in resonance is less than 2 nm.

Key words: optical testing, micromechanical resonator, single laser diode, excitation and detection

1. はじめに

MEMS (microelectromechanical systems) 技術を用いた種々の検出原理に基づくセンサーの開発が進んでいる。それらの中で、共鳴センサーは測定される物理量と共鳴器との相互作用の結果、物理量の変化につれて共鳴器の固有振動周波数が変化する現象を検出している。この検出原理により圧力・加速度・角速度・温度・流量・磁気などの物理量を高精度に検出することができ、多くの分野で利用されている^{1,2)}。マイクロメカニカル共鳴センサーでは、光学的方法によって共鳴器の励起を行い、光学的な方法によって励起振動の検出を行う方式が用いられており、マイクロモジュール化された共鳴センサーとすることができる。

光学的な方法による共鳴センサーでは、共鳴器の励起および振動検出を容易に行うために2つの光源を用いる場合³⁻⁶⁾が多いが、光学系が複雑となるためセンサーの小型

化あるいは多センサーヘッドへの発展が困難となる。この問題を解決するために、単一光源を用いるいくつかの方法が提案されている。しかし、これらの方法にはそれぞれ以下のように欠点がある。ファブリー・ペロー干渉法を用いた自励マイクロ共鳴器では励起をするための変調用の光源が不要となる利点があるが、ファブリー・ペローエタロンの加工精度に対する要求が高くなり、共鳴の状態を維持しにくくなる欠点がある⁷⁾。単一光源を用い、光の強度検出によって共鳴状態を測定する方法では、干渉検出と比べて測定精度が低くなる欠点がある⁸⁾。時間幅の短いレーザーパルスでマイクロ共鳴器を励起し、レーザーパルスの出力の低い部分で励起振動を検出する方法⁹⁾では、寸法の大きい共鳴器が必要となる¹⁰⁾。半導体レーザーの出力を正弦波状に光強度変調することによって共鳴器を励起し、同時に励起振動振幅を干渉信号から測定する方法として、干渉信号に含まれる周波数成分の振幅比率を用いる方法¹¹⁾が提

**E-mail: osami@eng.niigata-u.ac.jp

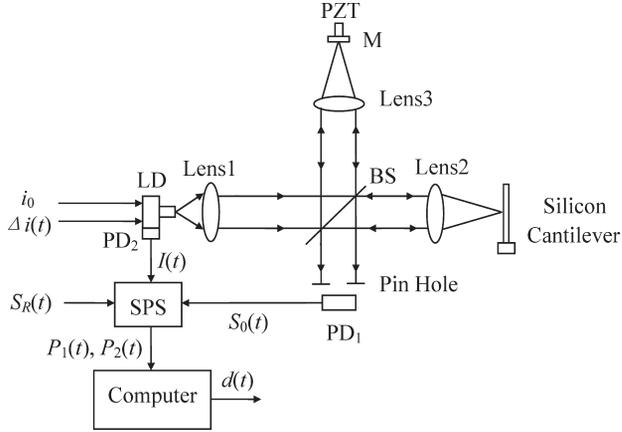


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

案されたが、この方法では共鳴器の振動波形を得ることができない。また、光強度変調が励起振動の振幅測定に及ぼす影響が明らかにされていない。

そこで、本論文では、正弦波位相変調干渉法による変位測定方法¹²⁾に基づき共鳴器の励起振動波形を検出する方法を提案する。本方法では励起振動を行うための光強度変調によって振動振幅測定値に誤差が生じるが、この測定誤差は非常に小さいため振動振幅測定にほとんど影響を与えないことを理論的に明らかにする。振動波形の検出によって励起振動振幅を高精度で求めることができ、共鳴周波数を正確に決定できる。励起振動波形の検出によって、振動波形の位相の検出、振動波形の周波数成分の分析なども行え、励起振動の詳細な状態を正確に検出できる利点を今後活用できる。

2. 測定原理

1個の光源で測定対象の励起および励起振動を検出することのできる実験装置をFig. 1に示す。共鳴器であるシリコンのマイクロカンチレバーに光を照射すると、カンチレバーはエネルギーを吸収し、内部に温度フィールドが形成されるため、カンチレバーに励起振動 $d(t)$ が生じる。レーザーダイオード (LD) からの光はレンズ1を通り平行光になり、ビームスプリッター (BS) によって2つに分けられる。その一方の光はレンズ2でマイクロカンチレバーの表面に集光され、その反射光が物体光になる。他方の光はレンズ3でミラー M の表面に集光され、その反射光が参照光になる。参照光と物体光が干渉し、干渉信号が受光素子 PD₁ により検出され、信号 $S_0(t)$ が得られる。LD の発振光強度は LD 中の受光素子 PD₂ により検出され、光強度信号 $I(t)$ が得られる。信号 $S_R(t)$ は圧電素子 (PZT) への印加電圧 $V(t)$ に同期した信号である。これ

らの信号 $S_0(t)$, $I(t)$ および $S_R(t)$ は信号処理系 SPS に入力されて、その出力信号 $P_1(t)$, $P_2(t)$ からコンピュータの位相測定プログラムによってマイクロカンチレバーの励起振動 $d(t)$ が得られる。以上の測定法の原理を以下に詳しく説明する。

LD の注入電流が直流電流 i_0 と変調電流 $\Delta i(t)$ からなるとき、LD の発振波長と光強度信号はそれぞれ

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \beta_1 \Delta i(t) \quad (1)$$

$$I(t) = \beta_2 \{i_0 + \Delta i(t)\} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 λ_0 , β_1 , β_2 はそれぞれ LD の中心波長、波長変調効率および光強度変調効率である。変調電流 $\Delta i(t)$ は角周波数 ω_c 、振幅 a の正弦波であり、

$$\Delta i(t) = a \cos(\omega_c t) \quad (3)$$

で与えられる。圧電素子に電圧 $V(t) = V_p \cos(\omega t)$ を印加し、ミラー M を $r(t) = r_m \cos(\omega t + \phi)$ で正弦波振動させる。ただし、 $\omega > 2\omega_c$ であり、 ϕ は印加電圧 $V(t)$ に対する正弦波振動 $r(t)$ の位相遅れである。マイクロカンチレバーの励起振動を $d(t)$ とする。このとき受光素子 PD₁ により検出される干渉信号は

$$S_0(t) = C_B I(t) + C_M I(t) \cos\{z_1 \cos(\omega_c t) + z_2 \cos(\omega t + \phi) + \alpha(t)\} \quad (4)$$

と表現される。ここで、

$$z_1 = 2\pi\beta_1 a D_0 / \lambda_0^2 \quad (5)$$

$$z_2 = 4\pi r_m / \lambda_0 \quad (6)$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_d(t) = 2\pi D_0 / \lambda_0 + 4\pi d(t) / \lambda_0 \quad (7)$$

D_0 は、カンチレバーおよび圧電素子 PZT が静止しているときの参照光と物体光の光路差である。 C_B と C_M は参照光と物体光との光強度比率による定数であり、参照光と物体光における光強度信号の伝搬遅れは無視できる。

式(4)を光強度信号 $I(t)$ で割り、

$$S(t) = C_B + C_M \cos\{z_1 \cos(\omega_c t) + z_2 \cos(\omega t + \phi) + \alpha(t)\} \quad (8)$$

が得られる。

式(5)からわかるように z_1 は D_0 に比例するので、 z_1 を無視できるように D_0 を小さな値にする。このとき、式(8)は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} S(t) &\approx C_B + C_M \cos\{z_2 \cos(\omega t + \phi) + \alpha(t)\} \\ &= C_B + C_M \cos \alpha(t) \{J_0(z_2) - 2J_2(z_2) \cos(2\omega t + 2\phi) + \dots\} \\ &\quad - C_M \sin \alpha(t) \{2J_1(z_2) \cos(\omega t + \phi) \\ &\quad - 2J_3(z_2) \cos(3\omega t + 3\phi) + \dots\} \end{aligned} \quad (9)$$

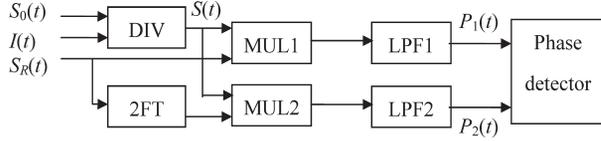


Fig. 2 Schematic diagram of signal processing system.

ここで、 $J_n(z_2)$ は n 次ベッセル関数である。

Fig. 2 に干渉信号を処理する信号処理系を示す。最初に PD₁ により検出された干渉信号 $S_0(t)$ と PD₂ により検出された光源の光強度信号 $I(t)$ が割算器 (DIV) に入力され、信号 $S(t)$ が得られる。まず、信号 $S(t)$ と圧電素子の印加信号 $V(t)$ に同期した信号 $S_R(t) = R \cos(\omega t + \phi)$ が掛算器 1 (MUL1) に入力され、その出力がローパスフィルター 1 (LPF1) に入力され、次式の信号 $P_1(t)$ が得られる。

$$P_1(t) = -K_1 C_M R J_1(z_2) \sin \alpha(t) \quad (10)$$

ここで、 K_1 は掛算器 1 とローパスフィルター 1 による増幅率である。次に、信号 $S_R(t)$ が 2 通倍周波数回路 (2FT) に入力され、信号 $R \cos(2\omega t + 2\phi)$ が得られ、この信号と $S(t)$ が掛算器 2 (MUL2) に入力され、その出力がローパスフィルター 2 (LPF2) に入力され、次式の信号 $P_2(t)$ が得られる。

$$P_2(t) = -K_2 C_M R J_2(z_2) \cos \alpha(t) \quad (11)$$

ここで、 K_2 は掛算器 2 とローパスフィルター 2 による増幅率である。次式のような係数を表現すると、

$$\begin{aligned} K_{S1} &= -K_1 C_M R J_1(z_2) \\ K_{S2} &= -K_2 C_M R J_2(z_2) \end{aligned} \quad (12)$$

式 (10) と式 (11) から、

$$\alpha(t) = \tan^{-1} \left\{ \frac{P_1(t)/K_{S1}}{P_2(t)/K_{S2}} \right\} \quad (13)$$

が得られる。式 (7) から、マイクロカンチレバーの励起振動は次式で与えられる。

$$d(t) = (\lambda_0/4\pi) \tan^{-1} \left\{ \frac{P_1(t)/K_{S1}}{P_2(t)/K_{S2}} \right\} \quad (14)$$

式 (13) で $\alpha(t)$ を求めるときに、周波数依存性を有しない一定値である K_{S1} と K_{S2} の正確な値が必要となる。そこで、以下の方法で K_{S1} と K_{S2} を求める。LD の注入電流に直流電流 i_0 だけを印加し、 $z_1 = 0$ 、 $d(t) = 0$ とする。また、圧電素子の印加信号を $V(t) = V_p \cos(\omega t) + V_D \cos(\omega_D t)$ とする。ただし、 $\omega > 10\omega_D$ である。このとき、ミラー M の振動は $r(t) = r_M \cos(\omega t + \phi)$ と $r_D(t) = r_D \cos(\omega_D t + \phi_D)$ の和となり、式 (8) は

$$S_D(t) = C_B + C_M \cos\{z_2 \cos(\omega t + \phi) + \alpha_D(t)\} \quad (15)$$

になる。ここで、

$$\alpha_D(t) = 2\pi D_0/\lambda_0 + 4\pi r_D(t)/\lambda_0 \quad (16)$$

干渉信号を信号処理系に入力すると、ローパスフィルター 1 と 2 の出力信号はそれぞれ

$$\begin{aligned} P_{1D}(t) &= K_{S1} \sin \alpha_D(t) \\ P_{2D}(t) &= K_{S2} \cos \alpha_D(t) \end{aligned} \quad (17)$$

になる。 r_D を $\lambda_0/4$ より大きくすれば、 $\sin \alpha_D(t)$ と $\cos \alpha_D(t)$ の数値が ± 1 に達するので、このときの信号 $P_{1D}(t)$ と $P_{2D}(t)$ の振幅はそれぞれ $|K_{S1}|$ と $|K_{S2}|$ の値となる。 K_{S1} と K_{S2} の符号は式 (12) から定まり、 K_{S1} と K_{S2} の数値が得られる。

3. 測定誤差の解析

前章では、 $z_1 \approx 0$ と仮定した理想的な干渉信号の式 (9) を用いているが、 z_1 を無視しない場合には、 z_1 の存在によって励起振動振幅測定に誤差が生じる。この測定誤差を解析する。カンチレバーの励起振動を $d(t) = A \cos(\omega_c t + \theta)$ と表現する。ここで、 θ はカンチレバーの励起初期位相であり、LD の変調電流 $\Delta i(t)$ に対する時間遅れを示している。このとき、式 (8) は次式ようになる。

$$S(t) = C_B + C_M \cos\{z_1 \cos(\omega_c t) + z_2 \cos(\omega t + \phi) + z_3 \cos(\omega_c t + \theta) + \alpha_0\} \quad (18)$$

$$\text{ただし、} \quad z_3 = 4\pi A/\lambda_0 \quad (19)$$

式 (18) から

$$S(t) = C_B + C_M \cos\{z_2 \cos(\omega t + \phi) + z \cos(\omega_c t + \gamma) + \alpha_0\} \quad (20)$$

が得られる。

$$\text{ただし、} \quad \tan \gamma = z_3 \sin \theta / (z_1 + z_3 \cos \theta) \quad (21)$$

$$z = \sqrt{z_1^2 + z_3^2 + 2z_1 z_3 \cos \theta} \quad (22)$$

z_1 の値が存在する式 (18) の干渉信号から、本測定法によって求められるマイクロカンチレバーの励起振動の測定値を A_z とすると、

$$z = 4\pi A_z/\lambda_0 \quad (23)$$

である。一方、式 (9) の理想的な干渉信号では $z_1 \approx 0$ であるので $z \approx z_3 = 4\pi A/\lambda_0$ となり、測定誤差なしに励起振動 A が求められる。励起振動の測定値 A_z に含まれる測定誤差 ΔA は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_z - A = \lambda_0/(4\pi) (z - z_3) = \lambda_0/(4\pi) \\ & \quad (\sqrt{z_1^2 + z_3^2 + 2z_1 z_3 \cos \theta} - z_3) \end{aligned} \quad (24)$$

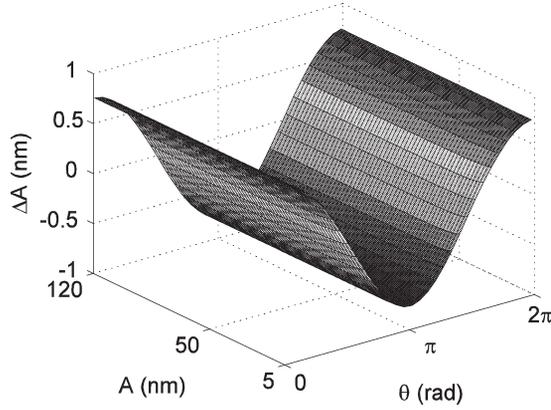


Fig. 3 ΔA versus A and θ .

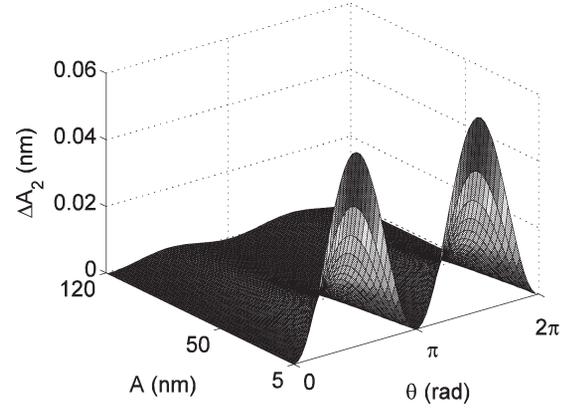


Fig. 4 ΔA_2 versus A and θ .

$z_1/z_3 \ll 1$ の条件で、式 (22) を展開し、 z_1 の 3 次以上の微小量を無視すると、

$$z \approx z_3 + z_1 \cos \theta + (1/2) \{ (z_1^2/z_3) \sin^2 \theta \} \quad (25)$$

が得られる。式 (24) の測定誤差 ΔA を z_1 の次数で分解すると、次式のようになる。

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \dots \quad (26)$$

ここで、

$$\Delta A_1 = \lambda_0 z_1 \cos \theta / (4\pi) = \{ a\beta_1 D_0 / (2\lambda_0) \} \cos \theta \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \Delta A_2 &= \{ \lambda_0 / (8\pi) \} \{ (z_1^2/z_3) \sin^2 \theta \} \\ &= \{ a\beta_1 D_0 / (2\lambda_0) \}^2 \{ \sin^2 \theta / (2A) \} \end{aligned} \quad (28)$$

上式からわかるように、測定誤差 ΔA は LD の中心波長 λ_0 、変調電流振幅 a 、波長変調効率 β_1 、光路差 D_0 、マイクロカンチレバーの励起振幅 A および位相遅れ θ に依存する。ただし、誤差成分 ΔA_1 はマイクロカンチレバーの励起振幅 A に関係しない。

まず、測定誤差 ΔA は誤差成分 ΔA_1 だけで十分正確に表現できることを明らかにする。このために、次章の本実験で用いられる値として、LD の中心波長 $\lambda_0 = 785$ nm、波長変調率 $\beta_1 = 0.006$ nm/mA、変調電流振幅 $a = 2$ mA、光路差 $D_0 = 100$ μ m とし、式 (27) と式 (28) に含まれる共通の項である $a\beta_1 D_0 / (2\lambda_0)$ を一定値 0.764 nm とする。式 (24) を用いて、マイクロカンチレバーの励起振幅 A および位相遅れ θ に従って変化する測定誤差 ΔA を計算した。その結果を Fig. 3 に示す。一方、式 (28) を用いて、同様に測定誤差 ΔA_2 を計算した。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 からわかるように、 ΔA_2 の値は位相遅れ θ に従って周期的に変化し、 $\theta = \pi/2, 3\pi/2$ のときに最大となり、 $\theta = 0, \pi$ のときにはゼロまで減少する。励起振幅 A が

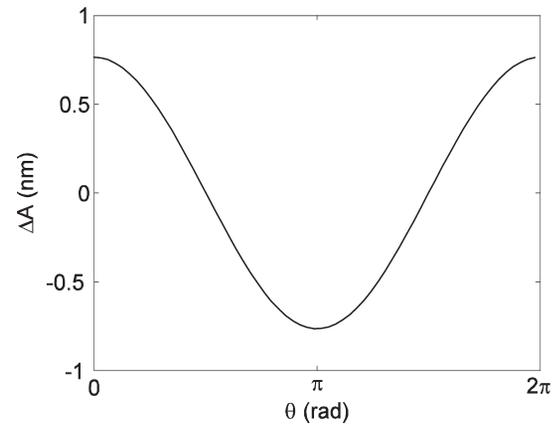


Fig. 5 ΔA versus θ when $A = 10$ nm.

5 nm より大きい場合は、 ΔA_2 は 0.06 nm 以下に減少する。さらに A が増えれば、 ΔA_2 の値は急激にゼロまで減少する。マイクロカンチレバーの励起振幅 A は通常 5 nm より大きいので、 ΔA_1 がゼロとなる $\theta = \pi/2, 3\pi/2$ 付近を除けば、 ΔA_2 の値は ΔA の値に比べて無視できることが Fig. 3 と Fig. 4 からわかる。したがって、0.06 nm 程度以下の測定誤差が生じる領域を無視すれば、 $\Delta A \approx \Delta A_1$ が成り立ち、測定誤差 ΔA は式 (27) で表現することができ、 ΔA は励起振幅 A に依存しない。

位相遅れ θ の影響を詳しく検討するために、励起振幅 $A = 10$ nm とし θ に従って変化する測定誤差 ΔA を、式 (24) を用いて計算した Fig. 3 から取り出し Fig. 5 に示す。誤差 ΔA は θ に従って周期的に変化し、 $\theta = 0, \pi$ のとき、 ΔA の絶対値は最大値 0.76 nm となり、 $\theta = \pi/2, 3\pi/2$ のときには ΔA はほぼゼロまで減少する。励起振幅 A は通常数十 nm 以上であるので、光路差 $D_0 = 100$ μ m で生じる励起振幅の最大測定誤差 0.76 nm は十分に小さい測定誤差であることがわかる。

測定誤差 ΔA はパラメーター a, β_1, D_0 の増加関数で

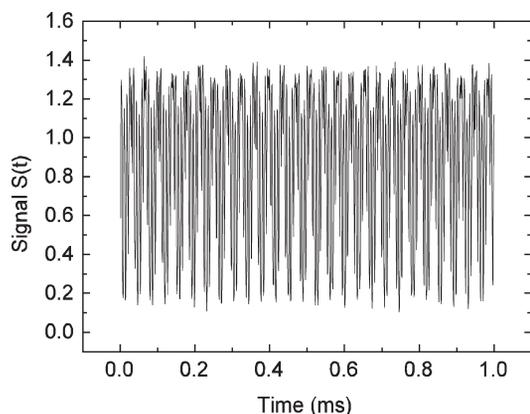


Fig. 6 Signal $S(t)$.

あるので、 a 、 β_1 、 D_0 の値を小さくすれば誤差 ΔA は減少する。また LD の中心波長 λ_0 が長くなれば誤差 ΔA は減少するが、励起振幅 A の測定感度が同時に減少する。LD に関係しないパラメータである光路差 D_0 をできる限り小さくするように光学系を配置することが重要となる。

4. 実験

Fig. 1 の実験装置を構成した。測定対象は Si/SiO₂/Al のマイクロカンチレバーサンプルであり、その大きさはおよそ長さ 1000 μm 、幅 300 μm 、厚さ 10 μm であった。LD の中心波長、出力パワー、波長変調効率および光強度の変調率は、それぞれ $\lambda_0=785 \text{ nm}$ 、9 mW、 $\beta_1=0.006 \text{ nm/mA}$ および $\beta_2=0.55 \text{ mW/mA}$ であった。測定誤差 ΔA を減らすために、参照光と物体光の光路差 D_0 が 100 μm より小さくなるようにミラー M とカンチレバーサンプルの位置を調整した。LD に変調振幅 $a=2 \text{ mA}$ の正弦波変調信号を印加した。このとき、前章の測定誤差の解析結果から、測定誤差 $|\Delta A| \leq 0.76 \text{ nm}$ となる。

圧電素子に $\omega/2\pi=150 \text{ kHz}$ の正弦波電圧信号を印加し、ミラー M を周波数 150 kHz で正弦波振動させた。掛算器の増幅率 K_m は $5 \times 10^{-5} \text{ (mV)}^{-1}$ であった。ローパスフィルターの遮断周波数は周波数 150 kHz の 1/4 倍程度の値とし 40 kHz であり、増幅率 K_L は 10 であった。検出可能な励起振動周波数の最大値は、励起振動が 100 nm 程度であれば遮断周波数 40 kHz の 3分の1 程度である。LD の注入電流に直流電流 i_0 だけを印加し、また圧電素子の印加電圧信号を変化させて、ミラー M に振動振幅が $\lambda_0/4$ より大きい周波数 2 kHz の振動を周波数 150 kHz の振動の上に重ねて与えた。このときに得られたローパスフィルターの出力信号 $P_{1D}(t)$ 、 $P_{2D}(t)$ の振幅の大きさを測定し、式 (12) から K_{S1} と K_{S2} の値を得た。

LD の正弦波変調信号の周波数、すなわちカンチレバー

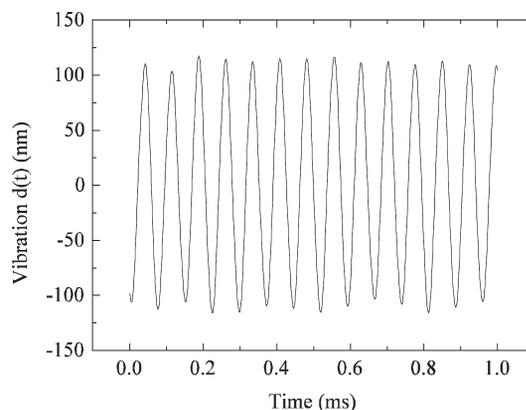


Fig. 7 Vibration waveform of the microcantilever in resonance.

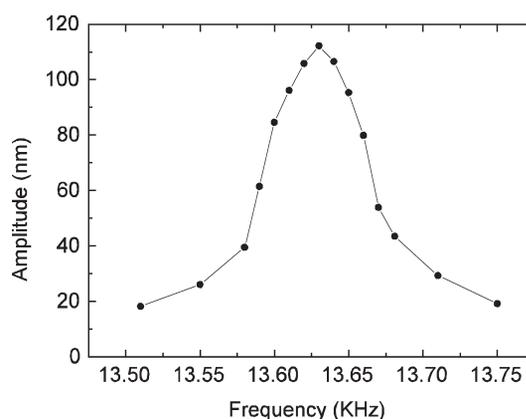


Fig. 8 Frequency-response curve of the microcantilever.

サンプルの励起周波数 $\omega_c/2\pi$ を 13.5 kHz から徐々に増加させた。このサンプルの励起振幅が最大となったときを、カンチレバーサンプルが共鳴の状態であるとした。このときの LD の正弦波変調信号の周波数がサンプルの共鳴周波数である。共鳴時に検出した信号 $S(t)$ を Fig. 6 に示す。共鳴時のカンチレバーサンプルの振動波形を Fig. 7 に示す。共鳴時の励起振動振幅は 112.2 nm であった。数分後に再度測定したカンチレバーサンプルの共鳴時の励起振動振幅は 110.4 nm であり、励起振動振幅の繰り返し誤差は 2 nm 以下であった。カンチレバーサンプルの周波数の応答曲線を Fig. 8 に示す。黒丸印が測定値である。サンプルの共鳴周波数、応答曲線の半値幅 (FWHM)、品質係数 Q はそれぞれ 13.630 kHz、0.08 kHz および 171 であった。論理計算によるこのカンチレバーサンプルの共鳴周波数は 13.659 kHz であり、実験の結果とほぼ一致した。

5. おわりに

正弦波位相変調半導体レーザー干渉計を用いて、シリコンマイクロメカニカル共鳴センサーの励起および励起振動

検出を単一光源で同時に行う方法を提案し、正弦波位相変調干渉法によってカンチレバーサンプルの励起振動波形を高精度に測定した。励起および励起振動検出を同時に行うことによって生じる振動振幅の測定誤差は干渉計の光路差 D_0 に比例するが、 $D_0=100\ \mu\text{m}$ とすれば $0.8\ \text{nm}$ 以下と非常に小さく、同時測定による悪影響が生じないことを理論的に明らかにした。実験では、カンチレバーサンプルの周波数の応答曲線を測定した結果、共鳴時の励起振動振幅の繰り返し測定誤差は $2\ \text{nm}$ 以下であり、共鳴周波数の決定が高精度で行えることがわかった。励起振動振幅の測定誤差と共鳴周波数の決定誤差の関係を解析すること、および励起振動波形から得られる振動位相の利用は今後の課題である。

本方法では、半導体レーザー干渉計の光学系を用いて共鳴センサーの励起および励起振動検出を同時に行うため、光学系構成は簡単となり、共鳴センサーを励起しやすい特徴がある。この特徴から、本方法はシリコンマイクロメカニカル共鳴センサーのマイクロモジュール化に適している。また、励起振動波形を高精度に測定できるため、共鳴センサーの特性解析に有用な測定方法である。

本研究は国家自然科学基金 (No. 60578051) と上海市科学技术委员会基础研究重点项目 (No. 07JC14056) による。

文 献

- 1) R. M. Langdon: "Resonator sensors: A review," *J. Phys. E*, **18** (1985) 103-115.
- 2) R. M. A. Fatah: "Mechanisms of optical activation of micromechanical resonators," *Sens. Actuators A*, **33** (1992) 229-236.
- 3) B. Ilic, Y. Yang, K. Aubin, R. Reichenbach, S. Krylov and H. G. Craighead: "Enumeration of DNA molecules bound to a nanoelectromechanical oscillator," *Nano Lett.*, **5** (2005) 925-929.
- 4) N. V. Lavrik and P. G. Datskos: "Femtogram mass detection using photothermally actuated nanomechanical resonators," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 2697-2699.
- 5) G. Jinshan, W. Jiazhen and T. Shibai: "The research of optically excited and interrogated silicon resonators," *Chin. J. Lasers A*, **25** (1998) 253-256.
- 6) J. Lai, T. Perrazo, Z. Shi and A. Majumdar: "Optimization and performance of high-resolution micro-optomechanical thermal sensors," *Sens. Actuators A*, **58** (1997) 113-119.
- 7) J. D. Zook, D. W. Burns, W. R. Herb, H. Guckel, J.-W. Kang and Y. Ahn: "Optically excited self-resonant microbeams," *Sens. Actuators A*, **52** (1996) 92-98.
- 8) L. Yueming, L. Junhua and Z. Shaojun: "A laboratory study of photothermal excited silicon microresonators with coated film," *Acta Optica Sinica*, **23** (2003) 529-533.
- 9) L. M. Zhang, D. Uttamchandani and B. Culshaw: "Excitation of silicon microresonators using short optical pulses," *Sens. Actuators A*, **21** (1990) 391-393.
- 10) D. R. Vincent and J. N. Ross: "An all-optical single-fibre micromachined silicon resonant sensor: Towards a commercial device," *Sens. Actuators A*, **25-27** (1991) 209-212.
- 11) L. Yingming and W. Xiangzhao: "A single optical source system for exciting and detecting the vibration of silicon microresonator sensors," *Chin. J. Lasers A*, **33** (2006) 1661-1664.
- 12) T. Suzuki, O. Sasaki, S. Takayama and T. Maruyama: "Real-time displacement measurement using synchronous detection in a sinusoidal phase modulating interferometer," *Opt. Eng.*, **32** (1993) 1033-1037.