リチウムタンタレートを用いた小型バイモルフ振動子の 共振周波数調整*

明石照久** 天津満雄*** 長崎 正*** 角田莞爾+

Adjustment of the Resonant Frequencies of a Micro Bimorph-Type Resonator Made of Lithium Tantalate Piezoelectric Material

Teruhisa AKASHI, Mitsuo OHTSU, Tadashi NAGASAKI and Kanji KAKUTA

A micro bimorph-type resonator, 10 mm in length, 1.014 mm in thickness and 0.97 mm in width, made of 130-degrees-rotated Y-cut lithium tantalate with a large piezoelectric effect and a large Q-factor was developed for use in an angular rate sensor. For a sensor with high sensitivity, the resonant frequency of the driving-mode vibration must correspond to that of the detecting-mode vibration. Therefore, we experimentally adjusted the two resonant frequencies by YAG-laser trimming. This experiment showed that the difference between the two resonant frequencies was 1580 Hz before the adjustment by the YAG-laser trimming but decreased to 5 Hz, at the rate of approximately 18 Hz per microgram of trimmed tantalate, after it. Moreover, it was found that the resonator after the adjustment can vibrate, at the same resonant frequency, without mechanical coupling not only in the driving-mode but also in the detecting-mode. It is thus concluded that such desirable vibration characteristics make the resonator suitable for the sensing element of an angular rate sensor.

Key words: bimorph-type resonator, lithium tantalate, resonant frequency, YAG-laser trimming, angular rate sensor

1. 緒 言

リチウムタンタレート¹⁾ (LiTaO₃; LT) は、昨今の携帯電話の普及により、SAW (Surface Acoustic Wave) フィルタとして大きく需要を伸ばしている単結晶の圧電材料である。特に、リチウムタンタレートの 130° 回転 Y 板は、面内でたわむ振動モードとそれに垂直な振動モードに対して大きな電気機械結合係数を持つ。さらに、その機械的 Q 値は大きく、温度係数も小さいという特長を持つ^{2) 3)}。

このような特長を生かし、振動式ジャイロセンサの振動子としてリチウムタンタレート製の小型音叉が適用されている^{3) 4)}。振動式ジャイロセンサとは、印加角速度によって発生するコリオリ力から、振動子に加わる角速度を検出するセンサのことである。この振動式ジャイロセンサでは、振動子のお互いに直交する二つの振動モードが角速度を検出するために利用される。二つの振動モードのうち、一つは角速度が印加されない定常状態において振動子が振動する駆動モードであり、もう一つはコリオリ力が発生する軸方向に振動子が振動する検出モードである。近年、振動式ジャイロセンサの研究開発は盛んに行われ、特に単結晶シリコンを用いたバルクまたはサーフェスマイクロ

マシニングによる小型の振動式ジャイロセンサが数多く試作され、角速度の検出感度評価が行われている^{5) 6) 7)}。

通常、振動子は駆動モードにおいて振動軸に沿って振動することが理想とされる。しかし、実際の振動方向は、振動子の非対称性⁸⁾ やメカニカルカップリング⁹⁾ の影響によって、理想の振動方向に対して角度 θ 傾いて振動することがある¹⁰⁾。この振動角度 θ が大きい場合、コリオリ力のオフセット量が大きくなるため、印加角速度を正確に検出することが困難となる。そのため、駆動モードにおいて振動角度 θ はできるだけ小さいことが望まれる。

一方、駆動モードの共振周波数すなわち振動軸方向の共振周波数と、検出モードの共振周波数すなわちコリオリ力が発生する軸方向の共振周波数とを一致させることで、振動式ジャイロセンサの角速度検出感度は最大となる⁹⁾。そのため、振動軸方向とコリオリ力が発生する軸方向との共振周波数が一致している振動子が望まれる。

つまり、振動式ジャイロセンサの高感度化のために、振動子は、振動角度 θ が小さいことと振動軸方向とコリオリ力が発生する軸方向との共振周波数が一致していることとの二項目を満足する必要がある。

我々はリチウムタンタレートを用いた振動式ジャイロセンサを開発するために、130° 回転 Y 板のリチウムタンタレートを用いたバイモルフ構造の両持ち振動子を新たに試作した。前報¹⁰⁾ では、振動角度 θ が小さくさらに共振周波数差が小さい振動式ジャイロセンサの振動子として適切な振動特性を備える振動はりの形状を明らかにした。本報では、その振動はりの駆動モードの共振周波数と検出モードの共振周波数とを一致させるために、YAG レーザを用いた共振周波数調整について報告する。

* 原稿受付 平成 13 年 3 月 26 日

** 正 会 員 (株) 日立製作所 機械研究所 (土浦市神立町 502)

*** (株) 日立メディアエレクトロニクス (横浜市戸塚区吉田町 501)

+ (株) 日立製作所 デジタルメディアシステム事業部 (東京都港区西新橋 2-15-12)

Table 1 Specifications of LT wafers

Diameter	2 inch (50 ± 0.5 mm)
Thickness	500 ± 25 μ m
Orientation	130 deg. Y ± 0.2 deg.
Process	Czochralski method
O.F. direction	X-axis ± 0.2 deg.
Finish (Front side)	Polished ($R_y: 1-3$ μ m)
Finish (Back side)	Polished ($R_y: 1-3$ μ m)
Flatness	< 30 μ m

1. Assembling

Bonding resonator and suspension

2. Laser cutting

Separation of electrodes

3. Laser trimming

Adjustment of resonant frequencies

Fig.1 Fabrication process of the LT resonator

2. 実験方法

2.1 加工プロセス

図1にバイモルフ構造で両持ち支持の振動はりを適用したLT振動子の加工プロセスを示す。振動はりは、両面にAu/Pt/Ti薄膜を成膜した2枚のリチウムタンタレートウエハを分極方向が互いに逆向きになるように接着し、ダイシングで切り出すことにより形成される。図2に振動はりの形状を示す。振動はりは、長さが10 mm、幅が0.97 mm、厚さが1.014 mmである。振動はりの表面中央部には電圧印加用の電極パターンが2か所、サスペンションと接続用の電極パッドが4か所形成され、裏面にはパターンが形成されていない。このような振動はりとそれを支持するサスペンションおよび固定枠とを組み立て、振動はりの電極とアームとの電気的接続を同時に行った(1.)。ここで、サスペンションは自由境界における1次共振モードの節の位置で振動はりを支持するだけでなく電気配線の役割を担う。次に、YAGレーザ装置を用い、サスペンションの一部を切断して振動はりの電気的分離を行った(2.)。最後に、同じYAGレーザ装置を用いて振動はりの裏面側の中央部をレーザトリミングし、振動はりの共振周波数調整を行った(3.)。なお、各薄膜の膜厚は、Tiが0.1 μ m、Ptが0.2 μ m、Auが0.5 μ mであり、リチウムタンタレートウエハには表1の仕様のウエハを用いた。

Table 2 Conditions of the YAG-laser trimming

Frequency	1 kHz
Stage speed	0.5 mm/s
Scan length of one step	0.06 mm
Total scan length	0.54 mm

Fig.2 Schematic view of the LT resonator

Fig.3 Schematic view of the YAG-laser trimming system

2.2 レーザトリミング方法

振動軸(Z軸とする。図2参照。)方向とコリオリ力が発生する軸(Y軸とする。図2参照。)方向との共振周波数を一致させるために、YAGレーザ装置(Nd:YAG LASER SL116E Q-switch-type, NEC製)を用いて振動はりのレーザトリミングを行った。図3にYAGレーザ装置のシステム概略図を示す。このシステムは、レーザ出力およびパルス周波数を決定する出力コントローラ、YAGレーザ本体、被加工対象物である振動はりを載せるX-Y駆動ステージおよびステージを駆動させるステージコントローラ、CAD図面をNCデータに変換しステージコントローラにデータ転送するためのパソコン、振動はりを観察するためのCCDカメラおよびモニタから構成される。レーザ光の周波数は0~99 kHzまで調整することができる。また、X軸方向およびY軸方向の位置決め精度は ± 0.01 mm以下であり、移動速度は0.01~1 mm/secの範囲で可変である。なお、レーザトリミングには表2に示す条件を適用した。ここでのステップ送り長とは、レーザを出力した状態でステージを移動させる距離およびレーザを出力しない状態でステージを移動させる距離のことを言う。すなわち、レーザをパルス走査することによってレーザトリミングを行い、そのときのパルス幅が0.06 mmであることを表す。

図4に示す振動はりの裏面側にレーザトリミングを行った。具体的には、振動はりの幅方向と平行に、振動はりの端から0.215 mmの位置を起点として長さ0.54 mmの位置までレーザ

Fig.4 Position of the groove by the YAG-laser trimming

Fig.5 Schematic view of the electrical connection

リミングを行った。この場合のレーザトリミングによる溝は、自由境界における1次共振モードの節で挟まれた範囲に形成される。このように、レーザトリミング溝を中心線に対して対称に形成し、共振周波数の調整を行った。

なお、レーザトリミング前後における振動はりの質量の測定には、電子天秤(AT20, METTLER TOLEDO 製、分解能: 2 μ g)を用いた。

2.3 振動特性評価方法

リチウムタンタレートは圧電材料であるので、共振点付近における振動はりの電気的等価回路は、LCRの直列共振回路にCを並列接続させた回路として表される¹¹⁾。ただし、Lはインダクタンス、Cは容量、Rは電気抵抗とする。そのため、振動はりの共振周波数を電気的に測定することが可能である。そこで、インピーダンスアナライザ(4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer, Yokogawa Hewlett Packard 製、周波数分解能: 1 Hz)を用いて、振動はりの共振周波数を電気的に測定した。

さらに、振動はりの機械的な振動特性を2チャンネルのレーザドップラ振動計(以下LDVと呼ぶ、Laser Vibrometer LV-1610, 小野測器製)とFFTアナライザ(CF-5200 Multi-Purpose FFT Analyzer, 小野測器製、周波数分解能: 0.25 Hz)とによって評価した¹⁰⁾。この評価において、振動はりをZ軸方向に振動させる場合には、図5の結線(a)を用いて1.0 V_{p-p}の交流電圧を振動はりに印加した。一方、振動はりをY軸方向に振動させる場合には、図5の結線(b)を用いて1.0 V_{p-p}の交流電圧を振動はりに印加した。

3. 実験結果および考察

3.1 振動はりの共振周波数調整精度

レーザ出力と1回のレーザトリミングによる除去量すなわちレーザトリミング量との関係を調べた。その結果を図6に示す。このときの各レーザトリミング量は、振動はりにレーザトリミングによる溝を10か所以上形成した後に除去量を測定し、それを平均して求めた値である。この結果、レーザ出力とレーザトリミング量との関係は比例関係にあることが分かった。レーザ出力が大きいかほどレーザトリミング量が大きいか。ただし、レー

Fig.6 Trimmed weight as a function of laser power

Fig.7 Resonant frequency as a function of trimmed weight

ザ出力が3.8 Wを超えると振動はりにクラックが発生した。そのためレーザ出力の上限値を3.8 Wとした。

図7はYAGレーザの出力が3.8 WのときのY軸およびZ軸方向の共振周波数の変化を測定した結果である。横軸はレーザトリミング量を表し、縦軸は振動はりの共振周波数を表す。ただし、このときのレーザトリミング量は、図6で得られた結果を基に算出した値である。この結果、レーザトリミング量を増加させるに従い、Z軸方向の共振周波数はニアに減少するが、Y軸方向の共振周波数はほとんど変化しないことが分かった。この場合のレーザトリミング量とY軸方向およびZ軸方向の共振周波数との関係は次式で表すことができる。

$$f_y = -29.00 \times 10^{-4} w + 56.21 \quad (1)$$

$$f_z = -29.49 \times 10^{-3} w + 57.59 \quad (2)$$

ただし、Y軸方向の共振周波数を f_y (kHz)、Z軸方向の共振周波数を f_z (kHz)、レーザトリミング量を w (μ g)とする。

式(2)より、レーザ出力が3.8 Wの場合、レーザトリミング量に対するZ軸方向の共振周波数変化率は29.5 Hz/ μ gであった。また、この場合のレーザトリミング量と共振周波数差との関係から、共振周波数差の変化率は26.6 Hz/ μ gであった。さらに、レーザ出力が0.5 W、1.0 Wの場合における共振周波数差の変化率を測定した結果、それぞれ10.8 Hz/ μ g、14.6 Hz/ μ gであった。これらの測定結果より、共振周波数差の変化率 R_f (Hz/ μ g)はレーザ出力 P (W)の関数として次式で表すことができると考える。

$$R_f = 4.617P + 9.176 \quad (3)$$

式(3)より、レーザ出力が小さいほど微小な周波数調整が可能

Fig.8 Impedance characteristics of the LT resonator by impedance/gain-phase analyzer

Fig.9 Change of the resonant frequency by the YAG-laser trimming

であることが分かる。

3.2 共振周波数調整前の電氣的振動特性

レーザトリミングによって共振周波数を調整する前に、インピーダンスアナライザにて振動はりのY軸方向の共振周波数とZ軸方向の共振周波数とを測定した。図8は、図5の結線(a)と結線(b)による振動はりのインピーダンス特性である。横軸は周波数、縦軸は、振動はりの各印加電極から見たインピーダンスおよびそのインピーダンスと印加交流信号との位相を表す。横軸の周波数は55 kHzから59 kHzまでを示し、縦軸のインピーダンスはlogスケールで50 kΩから10 MΩまでを示し、位相は-180°から180°までを示す。なお、インピーダンスが極小を示す周波数はそれぞれの軸方向における共振周波数をおおよそ表し、極大を示す周波数は反共振周波数をおおよそ表す⁸⁾¹¹⁾。これより、Z軸方向の共振周波数は、57.590 kHz (インピーダンス：57.37 kΩ)であり、Y軸方向の共振周波数は、56.010 kHz (インピーダンス：170.5 kΩ)であった。この結果、レーザトリミングによって共振周波数を調整する前の振動はりの共振周波数差は、1580 Hzであることが分かった。

3.3 共振周波数調整後の電氣的振動特性

この振動はりにレーザトリミングを行った結果を図9に示す。図9は、レーザトリミング量に対するY軸方向の共振周波数、Z軸方向の共振周波数さらにそれらの共振周波数差を測定した結果である。共振周波数の粗調整には、レーザ出力を3.8 W、トリミング繰返し回数を1~4回とした条件を適用した。また、微調整には、レーザ出力を1.0 Wとした条件を適用した。図7と同様に、レーザトリミング量を増加させるに従い、Z軸方向の共振周波数は次第に低下するが、Y軸方向の共振周波数はほとんど変化しないことが明らかとなった。レーザトリミングを続けることによって、Y軸方向とZ軸方向との共振周波数差は次第に低下し、最後にこれらの共振周波数差を5 Hzにすること

Fig.10 Impedance characteristics of the LT resonator after the YAG-laser trimming by impedance/gain-phase analyzer

Fig.11 Vibration characteristics of the Z-axis

Fig.12 Vibration characteristics of the Y-axis

ができた。このときのインピーダンスアナライザによる測定結果を図10に示す。横軸および縦軸の表記は図8の場合と同様である。図10より、Z軸方向の共振周波数は55.885 kHz (インピーダンス：58.00 kΩ)であり、Y軸方向の共振周波数は55.890 kHz (インピーダンス：121.2 kΩ)であることが分かった。これらの値から、Y軸方向の共振周波数とZ軸方向の共振周波数とがおよそ一致していることが確認できる。また、共振周波数差が5 Hzのときのレーザトリミング量はおよそ88 μgであった。この場合の共振周波数差の変化率はおよそ18.0 Hz/μgであった。

3.4 共振周波数調整後の機械的振動特性

共振周波数調整後の振動はりの機械的な振動特性をLDVによって評価した。図11は振動はりをZ軸方向に振動させたときのCh1での振幅と位相との周波数特性であり、図12はCh2での振幅と位相との周波数特性である。ここでの振幅と位相とは、FFTアナライザからの交流信号(単位：V)に対する振動はりの振幅に対応したLDVからの出力信号(単位：V)の比(単位：dB)とそれらの信号の位相とをそれぞれ表している。いずれの周波数特性においても、共振周波数を示すピークは一つしか

Fig.13 Vibrating locus of the LT resonator by the connection (a)

Fig.14 Vibrating locus of the LT resonator by the connection (b)

現れておらず、それらの周波数はほぼ等しいことが分かる。図 11、図 12 より、Y 軸方向の共振周波数は 55.895 kHz であり、Z 軸方向の共振周波数は 55.904 kHz であることが分かった。これらの共振周波数差は 9 Hz である。この結果は、インピーダンスアナライザによる測定結果とほぼ等しく、それぞれの軸方向における共振周波数はほぼ一致していると言える。

さらに、周波数が 55.904 kHz における振動はりの振動軌跡を測定した。その結果を図 13 および図 14 に示す。図 13 は結線(a)での測定結果であり、図 14 は結線(b)での測定結果である。すなわち、図 13 は共振周波数 55.904 kHz にて Z 軸方向に振動はりを振動させたときの測定結果であり、図 14 は同じ周波数にて Y 軸方向に振動はりを振動させたときの測定結果である。このときの振動角度 θ は 6.96° であった。これらの測定結果には、Y 軸方向の共振周波数と Z 軸方向の共振周波数とがほぼ一致しているにもかかわらず、メカニカルカップリングの影響が現れていない。さらに、周波数が 55.895 kHz の場合においても同様の結果を得ることができた。このような現象が生じた理由の一つとして、振動はりの互いに直交する二つの振動モードの共振周波数が一致すれば振動モード軸を任意に設定可能である⁸⁾ことが挙げられる。つまり、振動はりの駆動モードの共振周波数と検出モードの共振周波数とがほぼ一致しているので、Z 軸方向に振動はりを振動させる結線(a)では振動はりを Z 軸方向に振動させることができ、Y 軸方向に振動はりを振動させる結線(b)では、振動はりを Y 軸方向に振動させることができたと考えられる。

以上のように、本実験で示したレーザトリミングによって振動はりの各共振周波数を一致させれば、メカニカルカップリングの影響が無く振動はりを Y 軸方向または Z 軸方向に共振振動

させることが可能である。

4. 結 論

振動式のジャイロセンサの振動子として、電気機械結合係数が高い 130° 回転 Y 板のリチウムタンタレートを用いた小型のバイモルフ構造の両持ち振動はり(長さ 10 mm, 厚さ 1.014 mm, 幅 0.97 mm)を試作した。角速度の検出感度を最大とするために、駆動モードと検出モードとの共振周波数を一致させるすなわち振動軸方向とコリオリ力が発生する軸方向との共振周波数を一致させることを目的として、レーザトリミングによる共振周波数調整を試みた。さらに、インピーダンスアナライザおよびレーザドップラ振動計を用いて振動はりの振動特性を評価し、次の結論を得た。

- (1) 本報で示した箇所のレーザトリミング量を増加させるに従い、振動軸方向の共振周波数はリニアに減少するがコリオリ力が発生する軸方向の共振周波数はほとんど変化しない。
- (2) 適切な量のレーザトリミングを行うことにより、振動軸方向の共振周波数とコリオリ力が発生する軸方向の共振周波数とをほぼ一致させることが可能である。
- (3) 振動はりの共振周波数をレーザトリミングによって調整すれば、メカニカルカップリングの影響が無い状態で、振動はりを振動軸方向およびコリオリ力が発生する軸方向のいずれの方向にも共振振動させることが可能である。

参 考 文 献

- 1) R.T. Smith and F.S. Welsh: Temperature Dependence of the Elastic, Piezoelectric, and Dielectric Constants of Lithium Tantalate and Lithium Niobate, J. Appl. Phys., **42**, 6 (1971) 2219.
- 2) 尾上守夫, 品田敏雄, 伊東国太, 宮崎茂行: 零温度係数タンタル酸リチウム屈曲振動子, 信学技報, US73-16, (1973) 1.
- 3) 若月 昇, 小野正明, 山田澄夫, 高橋芳孝, 山内 基, 菊池一二: LiTaO₃ 単結晶音波振動子を用いた圧電ジャイロ, 信学技報, EMD94-66 (1995) 27.
- 4) 小野正明, 若月 昇, 高橋芳孝: LiTaO₃ 単結晶を用いた音波形圧電ジャイロ, 電子情報通信学会論文誌, **J79-C-II**, 11 (1996) 610.
- 5) K. Maenaka and T. Shiozawa: Silicon Rate Sensor Using Anisotropic Etching Technology, Tech. Digest Transducers'93, (1993) 642.
- 6) M. Yamashita, K. Minami and M. Esashi: A Silicon Micromachined Resonant Angular Rate Sensor Using Electrostatic Excitation and Capacitive Detection, Tech. Digest of the 14th Sensor Symp., (1996) 39.
- 7) 持田洋一, 杉本正一, 森屋和文, 長谷川友保, 厚地健一, 田中克彦, 大和田邦樹: 振動型マイクロジャイロの基礎特性, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'95 講演論文集, **A**, 95-17 (1995) 406.
- 8) 阿部 洋, 吉田哲男, 中村良良: 圧電セラミック円柱形振動ジャイロの振動モード解析, 電子情報通信学会論文誌, **J78-C-I**, 11 (1995) 567.
- 9) K. Maenaka, T. Fujita, Y. Konishi and M. Maeda: Analysis of a Highly Sensitive Silicon Gyroscope with Cantilever Beam as Vibrating Mass, Sensors and Actuators, **A**, 54 (1996) 568.
- 10) 明石照久, 大津満雄, 長崎 正, 角田莞爾: リチウムタンタレート圧電材料を用いた小型バイモルフ振動子の振動特性, 精密工学会誌, **67**, 5 (2001) 775.
- 11) 塩崎 忠: 新・圧電材料の製造と応用, シーエムシー, (1987) 45.