



| | |
|------------|---|
| Title | 光弾性効果による光線の変調とその応用研究 第7報 : 光変調水晶発振器の経時周波数安定度 |
| Author(s) | 山形, 積治 |
| Citation | 北海道教育大学紀要. 第二部. A, 数学・物理学・化学・工学編, 34(1) : 13-24 |
| Issue Date | 1983-09 |
| URL | http://s-ir.sap.hokkyodai.ac.jp/dspace/handle/123456789/6096 |
| Rights | |

光弾性効果による光線の変調とその応用研究

第7報 光変調水晶発振器の経時周波数安定度

山 形 積 治

北海道教育大学旭川分校物理学教室

Study on the Applications on the Light Modulation by the Dynamic Photo-Elastic Effect

Report No. 7 Aging Characteristics of the Light Modulation Quartz Crystal Oscillator

Sekiji YAMAGATA

Physics Laboratory, Asahikawa College, Hokkaido University of Education,
Asahikawa 070

Abstract

A basic study of a quartz crystal oscillator system in which a quartz crystal plate is used as light modulator is reported. Because in this oscillator system, the light beam is modulated by the dynamic stress of the oscillating quartz crystal plate and this modulated light beam is applied for a feedback loop of the oscillator system, a plano-convex AT-Cut quartz crystal plate was used for a three-port network device.

Experimental results on the ageing characteristics of this quartz crystal oscillator are described in detail. An ageing ratio of About 5×10^{-9} a week has been realized in the present oscillator.

1. 緒 言

本研究の最終的目標はAT-Cut水晶振動子を光変調器として用い、安定度の高い経年変化の少ない水晶発振器を作ることであった¹⁻³⁾。その目的のために、動的な光弾性の検討⁴⁾、振動水晶による光変調の特性^{4,5)}、AT-Cut水晶振動子の応力-光学係数の検討⁶⁾、Plano-Convex AT-Cut水晶振動子の厚味すべり振動応力分布測定(レーザー光による)⁷⁾、及び、振動のQの測定を行った⁸⁾。又、測定値の裏づけを行うために有限要素法によるPlano-Convex AT-Cut水晶振動子の振動解析を行った⁹⁾、本報告がこれら一連の研究の最終のものとなる。

現在の一般的な水晶発振回路においては、水晶振動子は2端子回路網として用いられている^{10,11)}。近年、水晶振動子の改良や発振回路の研究が飛躍的に進み、水晶振動子を2端子回路として用いた水晶発振器の高安定化はほぼ上限に達したように思える^{12,13)}。従って、更に高安定化をおし進めるためには発振方式を根本的に考え直す必要がある。

著者らは水晶振動子を光変調素子として用いる新しい発振回路方式を考案した。この発振回路においては、電気系-機械系-光学系を cascade とした発振回路方式を取り、水晶振動子は4端子回路網として活用されている^{1,2,3)}。

一般に回体素子を電気回路に持込む場合、トランスジューサーとして用いる時には、電気系-機械系のエネルギー結合係数 κ_{ij} を可能な限り大きくし、エネルギーの変換が効率よく行なわれるように設計する。発振素子として用いる場合は、水晶板（固体素子）の機械的自由振動を電気系の回路定数が制約しないように設計する必要がある。即ち結合係数 κ_{ij} を可能な限り小さくする配慮をしなければならない¹⁴⁾。ところが2端子回路網の発振素子においては、 κ_{ij} を小さくすると、構成回路の他の要素で発振が生ずる場合があるので κ_{ij} を小さくする点において本質的な無理がある。一方、帰還回路に光学系を用い、4端子回路として発振素子を用いれば、水晶振動子から電極を十分に離してエネルギー結合係数 κ_{ij} を極めて小さくしたとしても、水晶板の機械的自由振動で決定される周波数で発振器は発振する。又、蒸着電極を用いる必要もないので、発振中の電極の経年変化によるトラブルも防止できる。Fig.1に水晶振動子で構成されている2端子回路と4端子回路の比較を示す。4端子回路網として用いた場合、入出力の間にアイソレータが挿入されていることになる^{15,16)}。

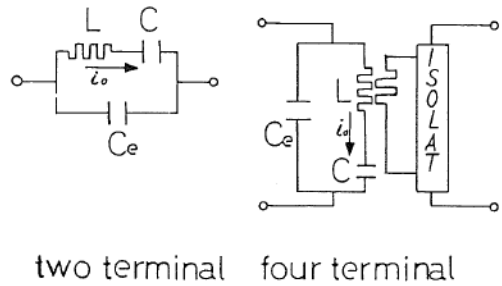


Fig. 1 Comparison between a two-terminal network and a three-port network for the quartz crystal plate.

2. 発振回路の構成

電界 E_k によって励振されている水晶振動子中を光線が通過すれば、水晶振動子の共振による応力によって、光弾性効果が生じ、通常光と異常光との間に位相差 $d\delta$ が生ずる、光学バイアスが $1/4 \lambda$

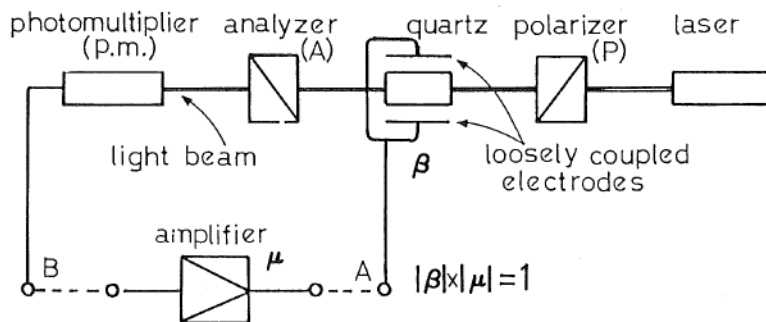


Fig. 2 Diagram of the quartz crystal oscillator by the light modulation.

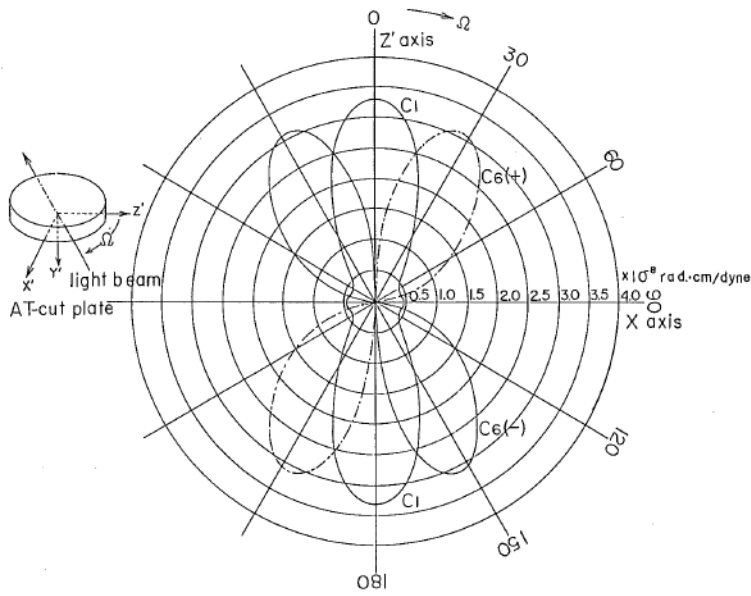


Fig. 3 The calculated stress-optic coefficients, C_1 and C_6 , of the AT-Cut quartz crystal plate are the coefficients for the stress T'_1 and T'_6 , respectively, in an angle from the Z' -axis.

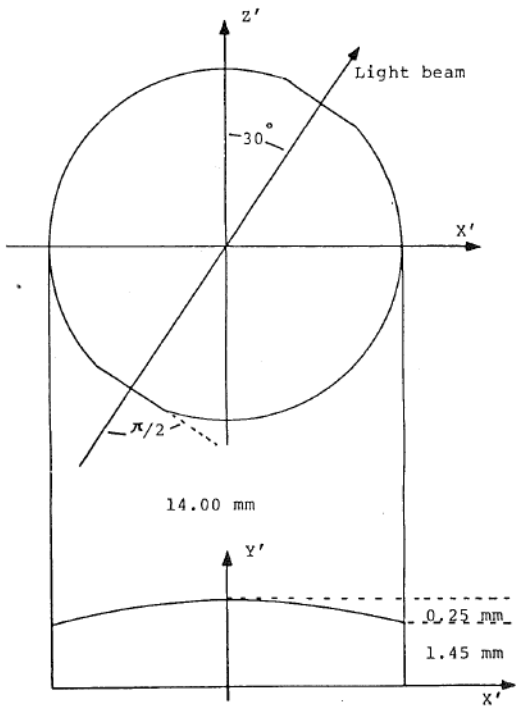


Fig. 4 Plano-convex AT-Cut quartz crystal plate using light modulator.

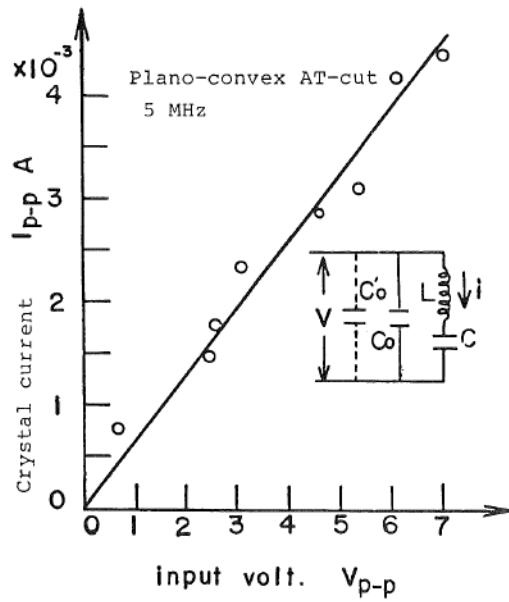


Fig. 5 Relation between the input voltage and the crystal current.

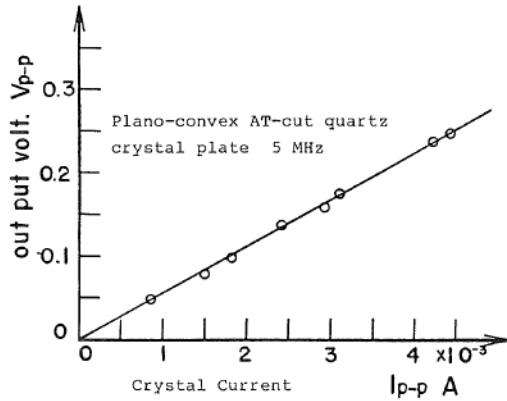


Fig. 6 Relation between the crystal current and the output voltage of the photo-multiplier.

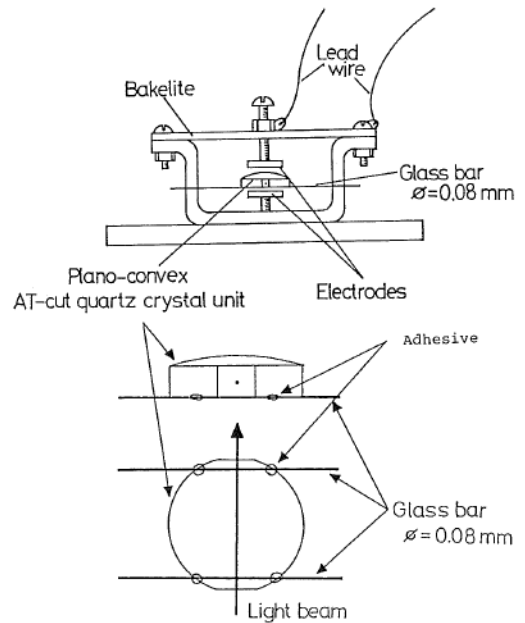


Fig. 7 Glass bar mounted crystal unit for the light modulated quartz crystal oscillator.

であれば、 $d\delta$ は水晶振動子の振動周波数と同一の周波数で変動する。従って Fig. 2 に示すように端子 A と端子 B を増幅器を通して接続すると発振回路が形成される⁹⁾。

回路が発振状態にある場合、増幅器の増幅度 μ と光変調器の増幅度 β の積は 1 になっているはずであるから、 μ を測定すれば β を知ることができる。

試作発振器においては発振素子として、エネルギー閉じ込め型になっている、Plano-Convex AT-Cut の厚みすべり振動の応力 T_0 によって光変調を行ない光変調水晶発振器を構成した。この場合、先の報告によって、光線を主面 ($x'-z$) に平行に入射させ、Fig. 3 で示す応力-光学係数が最大になる方向、即ち、 z^1 軸から約 30° 傾いた方向に設定すると最大能率で光変調がかかることが知られている⁹⁾。発振素子としてはこれまでの解析等で振動の特性がよく知られている⁹⁾、Fig. 4 に示す形状の Plano-Convex AT-Cut 水晶振動子を用いた。この振動子を用いて、電極間電圧と共振時の結晶電流の関係を示したものが Fig. 5 で、共振電流と変調出力電圧の関係を示したものが Fig. 6 である。測定の条件は Fig. 7 に示すように水晶振動子を支持し、電極間離を 3mm とした。支持の方法は 0.08mm のガラスバーを 2 本平行に張りその上に水晶振動子をガラスバーと Fig. 4 の z' 軸が約 30° をなすように乗せ、四隅を接着した。この支持方法では水晶の振動の Q を極めて高くすることができ、水晶振動子の新しい支持方式として有望である^{17,20)}。利点については後述する。

3. 光変調水晶発振器の安定条件

光変調水晶発振器の周波数の安定化を論ずる場合、次の四点について検討を行う必要がある。

- (1)光源単色光の波数及び輝度の変動
- (2)装置全体の機械的な変動

(3)水晶自体の電氣的・機械的な特性

(4)水晶振動子及び回路の温度特性

発振周波数の変動には上記の要因が重複して作用するので個々の解析は困難であるが、(1)についてはレーザー光を用いているので振幅・波長の変動は白色ノイズと考えられ長期間で積分すれば変動はゼロとなり、長期周波数安定には影響を与えないことになる。(2)の要因について、これを雑音と考えれば(1)の場合と同様、積分値はゼロとなり長期周波安定には影響しないと考えられるが、装置全体が温度、機械的ゆりみのために経時的に変化すれば発振周波数のシフトにつながる。(3)の要因については水晶自体の結晶構造に起因し、格子欠陥や支持方法の問題になり、長期的な周波数安定に重大な影響を与える。(4)については安定は恒温槽を作り対策を構ずることができる。

3. 1 光変調にかかわる安定化の検討

光変調の基本式は、光源の輝度及び波長を I_0 、 λ とし、入射直線偏光の方位角を ϕ 、水晶結晶面への入射角を $(\pi - \theta)$ 、光路長を h 、常光線の屈折率を n_0 、電界を $E'_k \cos \omega_k t$ として、直交ニコールの場合の検光子からの出力光輝度は

$$I = I_0 \sin^2 2\phi \cdot \sin^2 \left\{ \frac{\pi h}{\lambda \sin \theta} (n_{ij} - n_{rs}) - \frac{\pi h n_0^3}{2\lambda \sin \theta} (\pi_{ab} - \pi_{cb}) \epsilon_{kb} E'_k \cos \omega_k t \right\} \quad (1)$$

となる⁵⁾。但し上式で ω_k は振動子の共振角周波数である。(1)式で { } 内の第1項は h を変えたり、外部の位相板を用いて自由に選ぶことが可能であるために、 $\pi/4$ とすることができる。従って上式は

$$I = I_0 \sin^2 2\phi \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{4} - \frac{\pi h n_0^3}{2\lambda \sin \theta} (\pi_{ab} - \pi_{cb}) \epsilon_{kb} E'_k \cos \omega_k t \right\} \quad (2)$$

ここで、応力 T'_o と電界 E'_k は、 $T'_o = \epsilon_{kb} E'_k$ と、 ϵ_{kb} 電歪係数によって結びつけられる。一連の本研究においては $(\pi_{ab} - \pi_{cb}) n_0^3 \pi / \lambda$ を応力-光学係数と定義し、AT-Cut の場合、主面 ($x' - z'$) に平行に光線を入射させた場合、Fig. 3 のようになる。ここで π_{ij} は圧光学係数である。

さて、(2)式を

$$\sin^2 x = \left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots \right)^2 = x^2 - \frac{2x^4}{3!} + \frac{26x^6}{3!5!} - \frac{96x^8}{3!7!} \quad (3)$$

を用いて変形すれば

$$I = I_0 \sin^2 2\phi \left[\left\{ \frac{\pi}{4} - \frac{\pi h n_0^3}{2\lambda \sin \theta} (\pi_{ab} - \pi_{cb}) \epsilon_{kb} E'_k \cos \omega_k t \right\}^2 - \frac{2}{3!} \left\{ \frac{\pi}{4} - \frac{\pi h n_0^3}{2\lambda \sin \theta} (\pi_{ab} - \pi_{cb}) \epsilon_{kb} E'_k \cos \omega_k t \right\}^4 + \frac{26}{3!5!} \left\{ \frac{\pi}{4} - \dots \right\}^6 \right] \quad (4)$$

となる。光変調の出力として輝度変化の成分は $\frac{\pi}{4}$ に比較して微少なので { }² の部分を取るだけで十分である。ちなみに振動を示す部分 $d\delta$ のオーダーは 10^{-2} 程度である。

故に(4)式は

$$I = I_0 \sin^2 2\phi \left[\frac{\pi^2}{16} - \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{h \cdot n_0^3}{\lambda \sin \theta} (\pi_{ab} - \pi_{cb}) \epsilon_{kb} E'_k \cos \omega_k t \right] \quad (17)$$

$$+\left\{\frac{\pi h n_0^3}{2\lambda \sin \theta}(\pi_{ab}-\pi_{cb})\varepsilon_{kb} E_k' \cos \omega_k t\right\}^2 \quad (5)$$

となる。()内の第1項目は直流成分を示し、第2項目は交流成分を示す。又、第3項目は高調波成分を示し、第2項に比較して無視することができる。受光器(フオトマル)や同調増幅器を通して取り出されるのは第2項の成分である。一方、光源の輝度は振幅の2乗であるから、 $I_0 = A^2$ とおき、フオトマルの感度を L 、同調増幅器の増幅度を μ とおけば、Fig. 2のA端の交流電流は

$$|i| = A^2 L \cdot \mu \sin 2\phi \cdot \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{h n_0^3}{\lambda \sin \theta} (\pi_{ab} - \pi_{cb}) \varepsilon_{kb} E_k \quad (6)$$

$$\text{但し、} E_k = E_k' \cos \omega_k t$$

となる。(6)式の両辺の対数を取り

$$\begin{aligned} \log |i| = & 2 \log A + \log L + \log \mu + 2 \log \sin 2\phi + 3 \log \frac{\pi}{8} + \log h + 3 \log n_0 \\ & + \log(\pi_{ab} - \pi_{cb}) + \log \varepsilon_{kb} + \log E_k - \log \lambda - \log \sin \theta \end{aligned} \quad (7)$$

となり、各々を変数とみて、偏微分を行い、その絶対値の和をとれば

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial i}{i} \right| = & 2 \left| \frac{\partial A}{A} \right| + \left| \frac{\partial L}{L} \right| + \left| \frac{\partial \mu}{\mu} \right| + 4 |\cot 2\phi \cdot \partial \phi| + \left| \frac{\partial h}{h} \right| + 3 \left| \frac{\partial n_0}{n_0} \right| + \left| \frac{\partial(\pi_{ab} - \pi_{cb})}{\pi_{ab} - \pi_{cb}} \right| \\ & + \left| \frac{\partial \varepsilon_{kb}}{\varepsilon_{kb}} \right| + \left| \frac{\partial E_k}{E_k} \right| + \left| \frac{\partial \lambda}{\lambda} \right| + |\cot \theta \cdot \partial \theta| \end{aligned} \quad (8)$$

となる。但し π の項は定数なので除いた。光変調を行う場合、偏光子の方位角は $\phi = 45^\circ$ にとると上式右辺第4項目はゼロになる。又、 h 、 n_0 、 $\pi_{ab} - \pi_{cb}$ 、 ε_{kb} は各々水晶の定数なのでこれらの項の変動分もゼロとみると結局(8)式は

$$\left| \frac{\partial i}{i} \right| = 2 \left| \frac{\partial A}{A} \right| + \left| \frac{\partial L}{L} \right| + \left| \frac{\partial \mu}{\mu} \right| + \left| \frac{\partial E_k}{E_k} \right| + \left| \frac{\partial \lambda}{\lambda} \right| + |\cot \theta \cdot \partial \theta| \quad (9)$$

となり、安定した出力が得られるためには、次のTable 1のような安定対策が必要である。この表においては光学的、機械的、電気的なカテゴリーに分けて整理し、原因と乱れの内容、対策を示しておく、これらの諸条件が整えられて、光変調にかかわる安定が保障されるが、水晶振動子自体については別に検討を加える。

3. 2 水晶振動子の高安定性

高安定な水晶振動子の必要条件について E. A. Gerber らは次のようにまとめている¹⁸⁾。

- (1)水晶振動子のQが高いこと
- (2)水晶振動子の動作範囲にわたって、周波数温度特性が良好なこと。
- (3)経時変化が小さい振動子であること
- (4)水晶の励振電流による周波数変動の特性が良好であること
- (5)高インピーダンスの振動子であること (電気的-機械的エネルギー結合係数が小さくとれる振動子)

Table1. 光変調の安定対策

| 種別 | 式 | 原因 | 乱れの内容 | 対策 |
|------------|------------------------------------|--|-------------------|---|
| optical | $2 \frac{\partial A}{A}$ | 光源の輝度が相対的に変動による | 変調出力の振幅 | 輝度動の小さい光源 |
| | $\frac{\partial \lambda}{\lambda}$ | 単色光の spectrum の幅の変化による (レーザー光では封入ガスのドプラ効果による) | 同上 | $\partial \lambda$ の小さい光源 |
| mechanical | $\cot \theta \partial \theta$ | 装置全体の機械的振動によって入射角が変動する | 同上の他、常光線と異常光線間の位相 | (イ)耐震性の装置 (ロ) θ を 90° にとる (結晶面に直角に入射) |
| electrical | $\frac{\partial L}{L}$ | フォトマルの電源の変動によるものと装置の機械的振動により受光面の位置づれ | 同上 | (イ)安定化電源の使用 (ロ)耐震性の装置 |
| | $\frac{\partial \mu}{\mu}$ | 同調増幅器の増幅度の変動による | 同上 | 安定な増幅器の使用 |
| | $\frac{\partial E_k}{E_k}$ | 振動子の電界の変動による | 発振周波数及び 同上 | 回路的な補償 |

(6)雰囲気・マウント等の外的要因による影響の少ない設計・構造になっていること

これらの必要条件を満しているのは振動エネルギー閉じ込め型になっている、Plano-Convex AT-Cut である。

水晶振動子が本来もっている良好な振動特性を出来る限り活して用いるためには(6)の設計、支持のことが重要であり、そこで考案されたのが前述した Fig. 7 の支持方法である。AT-cut 水晶振動子は主面に電界をかけ厚みすべり振動で用いるので電気的-機械的エネルギー結合係数は K'_{26} で示され、 K'_{26} を可能な限り小さくすると(1)の条件の Q が高くなる。

電極間隔と K'_{26} の関係を示したものが Fig. 8 であって、電極間隔 3mm で 5th overtone で用いると $K'_{26} \approx 1.7 \times 10^{-3}$ となる。同図からも知られる通り電極間隔を大きくしても K'_{26} は一定値となる、従って電極間隔は 3mm として用いる。蒸着電極の場合には $K'_{26} = 10^{-1}$ 程度である。電極を水晶から隔してあるために、蒸着電極の水晶表面からの経時的な脱着等のトラブルがなく(3)の条件も満すことができる。

4. 発振実験

4. 1 周波数温度特性

発振の実験を行うために Fig. 9 の写真で示す発振回路を組立てた。光源には He-Ne ガスレーザー (1mW, $\lambda = 6328\text{\AA}$) を用い、光電子増倍管には東芝 PM50 を用いている。増幅回路には AM/FM IF Amp. 用の IC (μ PC27C) を用いた。5 MHz で 60 dB までの利得が得られるようにしてある。Fig. 7 に示した水晶振動子はレーザー光を導くことができる窓を有する恒温槽に入れた。恒温槽は数枚の銅板を重ねて作り熱容量を大きくし、半田ゴテ用のヒーターをつけ断熱材で囲んだ。Fig. 9 の

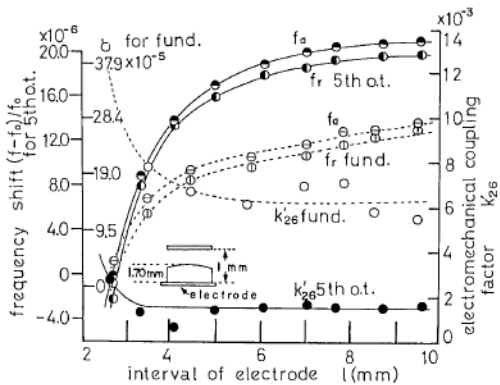


Fig. 8 The relation between the interval of the excitation electrode and the electromechanical energy coupling factor at the thickness shear oscillation frequencies.

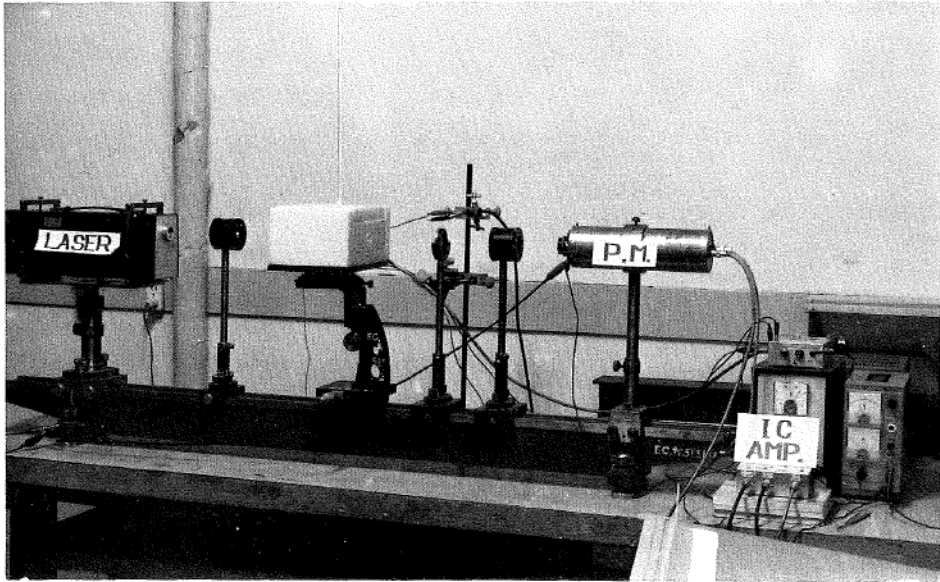


Fig. 9 Photograph of light modulation quartz crystal oscillator.

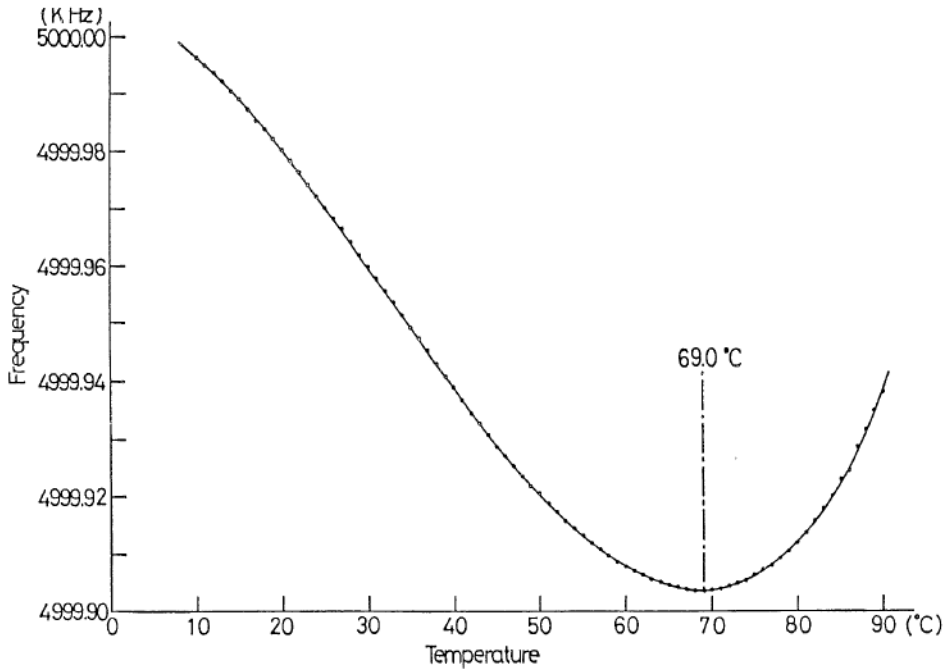


Fig.10 Frequency-temperature characteristic of light modulation quartz crystal oscillator when the temperature of the resonator is changed.

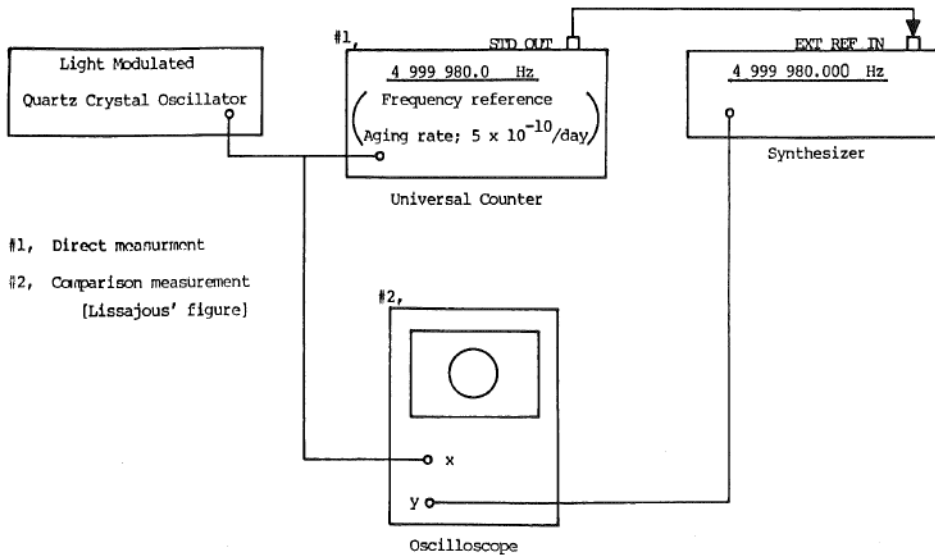


Fig.11 Measurement system of the frequency.

写真の中央部が恒温槽である。まず第一の実験として発振周波数温度特性をみた。恒温槽、水晶振動子共に 10°C まで冷却し、ヒーターにスライダックスを接続し 15 時間かけて、 90°C まで槽内温度を上昇させ、 1°C 上昇する毎に発振周波数をプロットしたものが Fig. 10 であり、AT-Cut 振動子の場合、周波数温度特性は三次関数になることが知られているが、この振動子の場合、 69.0°C のところに一方の極値があることが知られた¹⁷⁾。この温度での周波数は 4999903.57 Hz であった。従って、恒温槽は 69.0°C で一定に保温されるように設計することとした。周波数の測定は Fig.11 に示すようにリサージュ図形で検定した。

4. 2 短期周波数安定特性

水晶発振器の短期周波数安定を検定する方法として、(a)周波数再現性、(b)周波数立ち上り安定性、(c)エージングレート等が定義されていて、これらの値によって、発振器は評価される¹⁹⁾、実験方法としては、恒温槽内の温度を 69.0°C に設定し (温度制御はサーミスタ、サイリスターを主な部品とする電流制御方式で行う)、1 週間発振を継続させ後半の 3 日間、30 分毎に 1 日に 5 時間連続して発振周波数と槽内温度を測定し、3 日目に発振を止める (恒温槽、フトマル、Amp、レーザーの電源はそのままにし、レーザー光を黒い紙でさえぎる)。その後、24 時間経過の後にレーザー光を通し再発振させる、発振を OFF にした時と ON にした時の周波数の差を“周波数再現性”といい、差の少ないもの程よい発振器とされる。発振を ON にしてから 24 時間間の周波数の変化を“立ち上り周波数特性”といい、それ以後の 24 時間毎についての周波数の変化を“エージングレート”といい、いづれもその差が小さい程、安定な発振器とされている。測定結果は Fig.12 に示す。

(a)周波数再現性 $\Delta f = 0.082\text{ Hz}$, $\Delta f/f = 1.64 \times 10^{-8}$

(b)立ち上り周波数安定性 $\Delta f = 0.035\text{ Hz}$, $\Delta f/f = 7.00 \times 10^{-9} / \text{day}$

(c)エージングレート

24 時間~48 時間 $\Delta f = 0.080\text{ Hz}$, $\Delta f/f = 1.60 \times 10^{-8} / \text{day}$, でその後、72 時間、96 時間では $10^{-9} / \text{day}$ のオーダーが得られ、安定化して行き、光変調水晶発振器は短期の安定度も十分確保できる

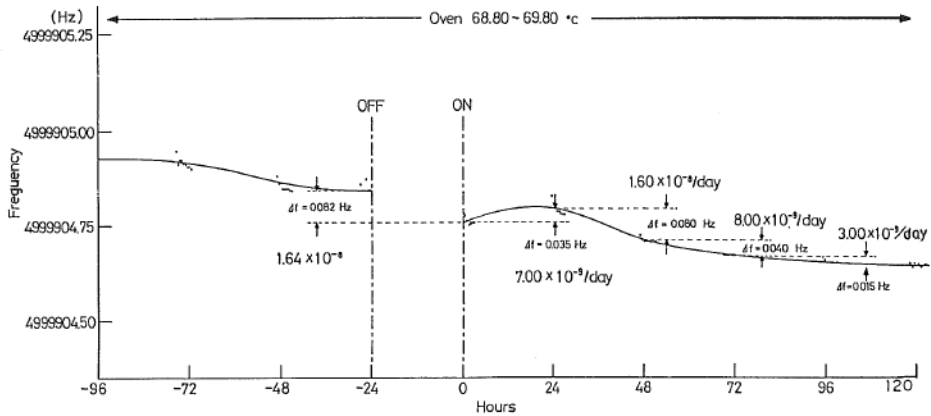


Fig.12 Aging characteristics and OFF-ON characteristic of the quartz crystal oscillator.

ものである¹⁷⁾.

4. 3 長期周波数安定性

本光変調水晶発振器は最初から長期の安定性をめざして研究を進めて来た。連続発振中の8日間についての周波数特性(フォトマル, レーザー, Amp. etcの電源投入後発振周波数が安定するまでに24時間程度要したがそのデータは除いてある)を示したのが Fig.13 であり, 室温の変化によって恒温槽内の温度も 69.0°C を中心に ± 1 °C の範囲で変化し, 長期間に渡った安定度が得られなかったが, 周波数の変動は恒温槽内の温度と連動していることが知られるので, 恒温槽の温度変化を現在の 1/10 におさえることが出来れば, 長期安定度で 10⁻⁹ のオーダーが得られることの確信を得た²⁰⁾. そこで, 恒温槽の断熱性をよくし, 室温変化の少い小部屋(恒温状態に保たれている)に発振器を移し, 槽内の温度変化を 69.0+0.2°C の範囲で, 発振周波数の安定性を検定したものが Fig.14 であり, 136時間(約6日間)に渡り Δf/f=4.8×10⁻⁹ に保った. 最近各社から発売され2端子回路方式の水晶発振器では Δf/f=± 5 × 10⁻¹⁰ /day, ± 2 × 10⁻⁸ /Mon, ± 1 × 10⁻⁷ /year (HP社, 周波数シンセサイザ 3335 Aの超高安定基準用) 程度であるので以下で論述するような改善を加えると, 光変調方式の水晶発振器ではより高安定な発振周波数が得られるものと思われる.

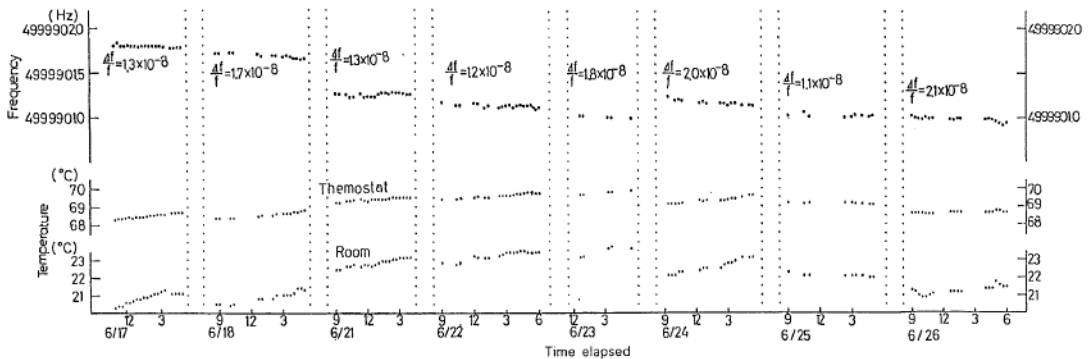


Fig.13 Frequency-temperature characteristics and aging characteristics.

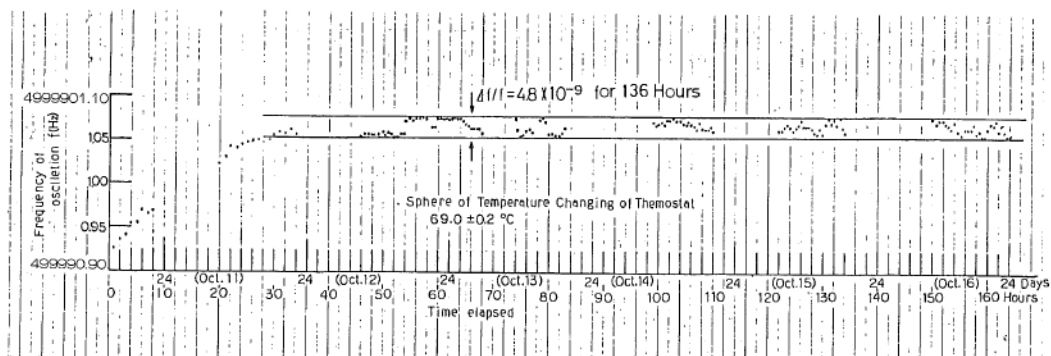


Fig.14 Aging characteristics of the quartz crystal oscillator. A 4.8×10^{-9} aging ratio is realized for 136 hours.

5. ま と め

Fig.13 のデータを検討してみて、恒温槽内の温度とは無関係に測定周波数の変動がみられる。この原因にはおそらく、(1) Fig. 8 の写真で示されている通り、装置が大きいために、床を伝達して来る振動を受けたり、各部分の熱的变化によるものと、(2)水晶振動子が気圧 Fig. 7 に示すような状態でガラス封入等をせずに恒温槽に入れてあるために空気中のゴミの脱着、湿度等の微妙な変化等が悪影響を与えるもの考えられる。従って、更に高安定を期するためには、光源、受光装置を全く半導体のものにとりかえ、小型化し、水晶は Fig. 15 に示すように真空封入を行い、電極は封入ガラスチューブの外側に蒸着するようにすれば、 10^{-10} /year オーダーの発振器が実現できるものと考えられる。今後、これらの諸点が研究課題の中心となろう。

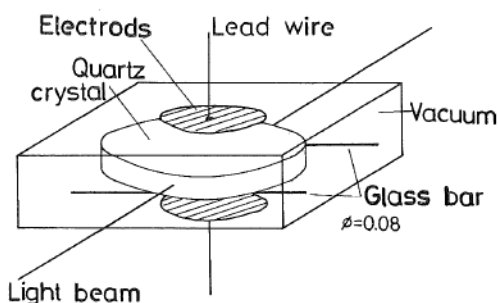


Fig.15 A new idea of mounted for the AT-Cut quartz crystal plate. A couple of electrodes is spattered on the outside of holder tube.

謝 辞

本研究の装置の大部分は北大工学部電気回路講座から借用して行った。同講座の深井一郎教授を始め、御協力下さいましたスタッフの方々に感謝します。

昼夜をたがわずデータの収録に協力した昭和 36 年度本学卒業生磯野康昭君、昭和 37 年度卒業生宮川尚久君に感謝します。

文 献

- 1) 山形, 川瀬, 安田: “光変調水晶発振器とその水晶素子の解析” 信学会誌, 54-A (1971), 6, pp. 371-373
- 2) 山形, 安田: “光の変調を用いた水晶発振器” 特許公開公報, 昭 49-1937, 特許証 759782 号
- 3) S. YAMAGATA et al: “Analysis of Vibration in AT-Cut Quartz Crystal Plates Using a Light Modulated Oscillator,” IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, SU-25 (1078), 4, pp. 192-198
- 4) 山形積治: “光弾性効果による光線の変調とその応用研究第 1 報” 北教大紀要, 2-A, 27 (1977), 2, pp. 5-20
- 5) 山形積治: “同上第 2 報” 同上 2-A, 28 (1978), 1, pp. 29-42
- 6) 山形積治: “同上第 3 報” 同上 2-A, 29 (1979), 1, pp. 15-30
- 7) 山形積治: “同上第 4 報” 同上 2-A, 29 (1980), 2, pp. 19-33
- 8) 山形積治: “同上第 5 報” 同上 2-A, 30 (1980), 1, pp. 59-72
- 9) 山形積治: “同上第 6 報” 同上 2-A, 30 (1981), 2, pp. 127-161
- 10) W. G. CADY: “The Piezoelectric Resonator,” Proc. IRE, 10 (1922, 4), pp. 83-114
- 11) Pierce: “Piezoelectric Crystal Resonator and Crystal Oscillators Applied to the Precision Calibration of Wavemeters,” Proc. AAAS, 56 (1923), pp. 81-106
- 12) 小林茂夫: “標準用水晶発振器の長期周波数安定度について”, 電気学会高安定周波数発生回路調査専門委員会, 資料 No. 11-2 (1977, May)
- 13) S. YAMASHITA et al: “A 4.19 MHz Beveled Miniature Rectangular AT-Cut Quartz Resonator”, 32 Annual Frequency Control Symposium (1978 March), pp. 267-276
- 14) W. P. MASON: “Crystal Physics of Interaction Processes”, Academic Press, New York (1966), p. 136.
- 15) 山形, 安田: “光変調水晶発振器の経時周波数特性”, 第 17 回精密周波数同期回路調査専門委員会(1980 Oct.), 資料 17-2
- 16) 山形, 他: “光変調水晶発振器の経時・温度特性”, 昭 56 電気四学会道支部大会予稿, p. 194
- 17) 山形, 他: “光変調水晶発振器の高安定特性”, 昭 57 電子通信学会電波部門全国大会予稿分冊 2, p. 3
- 18) E. A. GERBER et al: “State of the Art-Quartz Crystal Units and Oscillators”, Proc. IEEE, 54 (1966), 2, pp. 103-106
- 19) 岡野, 他: “高安定水晶振動子の諸問題”, 信学会電子回路部品・材料研究会資料 CPM 70-10 (1970, 6), pp. 1-15
- 20) 山形, 宮川: “高安定な光変調水晶発振器の特性”, 昭 57 電気四学会道支部予稿, p. 156