

弾性表面波発振器とその高安定化に関する研究*

吉川 昭吉郎**

Research on Surface Acoustic Wave Oscillators and their Stabilization

Shokichiro YOSHIKAWA

Wide application has been predicted for SAW oscillators because of their simple fabrication capability and direct oscillation in the UHF band. However, an oscillator stable over a wide temperature range has been difficult to manufacture because of the lack of substrates with low-temperature coefficient over a wide temperature range. To overcome this difficulty, several temperature compensation methods have been investigated, including the usage of composite materials, parallel and series connected delay lines, and ovening. This paper introduces a novel compensation technique that does not require external electrical components and complex SAW transducer modification. It is shown that a significant improvement in temperature stability can be achieved by connecting multiple SAW resonators with a simply structured IDT, providing these resonators have different temperature characteristics. Since these resonators may be fabricated on a single substrate, the oscillator can be massproduced using photolithography.

Many implementations are possible, such as using an arbitrary number of resonators, or combining second and higher order temperature coefficient substrates. This paper illustrates the principle by considering the advantages of using two resonators with second-order temperature coefficients. By using resonators on 35° and 46° rotated Y-cut quartz substrates, a temperature stable oscillator has been obtained which has less than 2×10^{-6} frequency variation over a 60°C temperature range.

Key words : IDT/SAW oscillator/SAW resonator/Temperature coefficients/Temperature compensated oscillator

1. ま え が き

弾性表面波発振器 (SAW Oscillator) は数 100 MHz ~ 数 GHz の帯域で、小形・高安定な発振器として重要な地位を占めるものである¹⁾²⁾³⁾。この帯域における他種の発振器と比較すると、

- (1) 水晶に対して、通倍段なしに GHz 帯の直接発振が可能である。
- (2) 半導体を用いたマイクロ波発振器に対して、空洞共振器を用いず同等以上の安定度が得られる。
- (3) クライストロン、進行波管などに対して安定な半導体素子であるトランジスタを用いた全固体化ができる。
- (4) すべて IC 技術の延長で構成が可能で、信頼性高く、

原稿受付：昭和 61 年 5 月 23 日

* 本研究の成果の一部 (3 節) は、日本音響学会、第 20 回佐藤論文賞 (昭和 55 年) を受賞したものである。

** 長岡技術科学大学電気系

小形・軽量化が本質的に達成できる。

など、さまざまな特長がある。

弾性表面波発振器には、弾性表面波共振器を利用して通常の水晶体発振器と同様な発振回路を構成する共振器形 (Fig. 1) と、遅延線フィルタ形 (Fig. 2) の 2 種類がある。

両回路にはそれぞれ特長があるが、たとえば遅延線フィルタ形では遅延線にフィルタ特性があるため、高次の空間高調波を選択的に利用し易く、高周波化の目的に都合がよいこと、可変周波数発振器としてさまざまな構成がとりうること、などの利点がある。これに対して共振器形は周波数安定度が高く、また複合素子構造によって温度係数の少ない発振回路が構成可能であることなど別の利点がある。

弾性表面波発振器の性能を向上し、適用域を広めるためには

高安定化 (発振周波数のより高い安定化を図る)

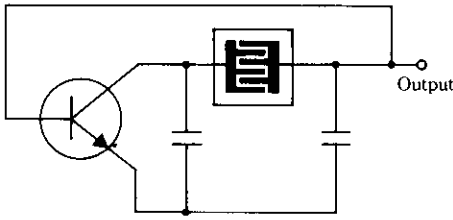


Fig. 1 Resonator type SAW oscillator.

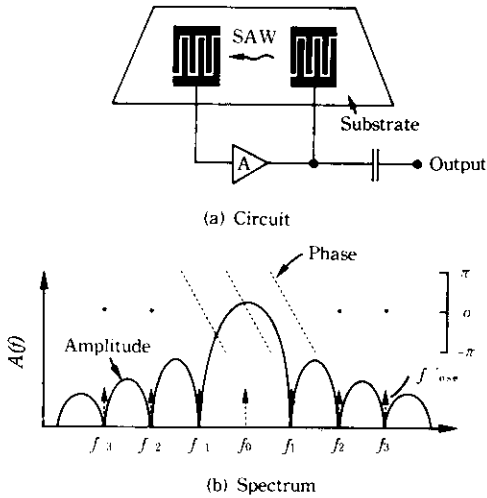


Fig. 2 Delay line filter type SAW oscillator.

周波数帯域の拡大（数 GHz 帯～数 10 GHz 以上への高周波数化）

周波数の正確な設定（所定の発振周波数を得るための周波数トリミング法の確立）

可変周波発振回路の検討（電圧制御可変発振器の制御範囲の拡大と制御特性の向上）

などいくつかの検討項目がある。ここでは、第一の高安定化の研究とその成果について報告することとする。

2. 弾性表面波発振器の高安定化技術

弾性表面波発振器の安定度は、周波数ゆらぎ（短期安定度）、温度特性（中期安定度）及び周波数エージング（長期安定度）の3つで評価される。

(1) 短期安定度は、主として周波数変調雑音に現われる⁴⁾。弾性表面波発振器はさきにも述べたように、通倍段なしに直接発振が高い周波数迄できるので、通倍回路による短期安定度の劣化がないのが一つの特長である。筆者の実験から、1.1 GHz と 2 GHz 遅延線フィルタ形発振

器の短期安定度特性の例を示す。Fig. 3 は周波数領域の特性、Fig. 4 は時間領域の特性である。

(2) 中期安定度は発振器として重要な項目である。特に弾性表面波発振器においては、弾性表面波伝搬速度が広い温度範囲にわたって一定であるような基板がみつからないため、問題となっていた。

現在利用しうる基板のうちで唯一の温度係数零をもつ水晶 ST 板も、二次の特性であるため、係数零の点は二次曲線の変曲点一点でしかなく、恒温槽を併用しなければ、零温度特性を実現し得なかった。これに対して、LiNbO₃ 基板の上に SiO₂ 膜を組み合わせて温度係数を補正する試み⁵⁾等が提案されている。

筆者は二次の温度係数をもつ弾性表面波共振器を複数

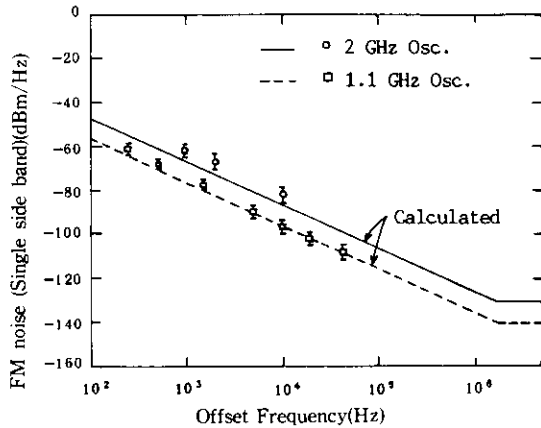


Fig. 3 Short term stability of GHz SAW oscillator (Frequency domain).

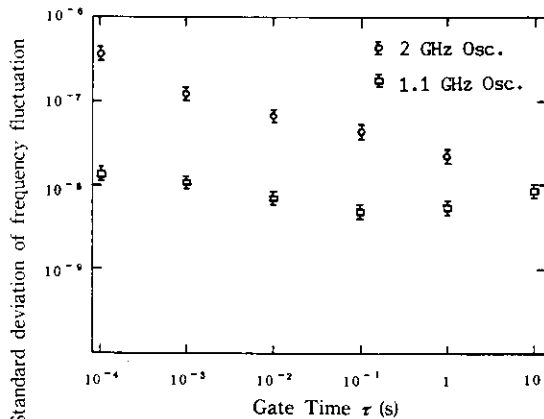


Fig. 4 Short term stability of GHz SAW oscillator (Time domain).

個組み合わせで、端子のアドミタンスの温度依存性を広い温度範囲にわたって零とすることにより、発振周波数の温度係数を零とする回路につき検討を行ない、良好な成果を得た。

これについては項をあらためて詳述する。

(3) 長期安定度に関係する因子としては、基板の研磨ひずみ、電極のひずみと劣化がある。前者では、研磨工程で注意しないと表面にひずみ、クラック等ができ、これがエージングに影響を及ぼすことが考えられる。Fig. 5は研磨によって発生するクラックの模式図を、Fig. 6は実際に水晶基板の表面下に形成されたクラックの一例(顕微鏡写真)を示すものである。

このようなクラックができた基板にインターディジタル電極を設けたときの写真を Fig. 7に示す。クラックが著しい場合は電極の作成ができなくなるが、それ程著しくない場合でも、このような基板は、 Q の低下、周波数エージングの増大等で好ましくない。

このようなクラックは、メカノケミカル研磨等の方法で防止できることが分かっている⁶⁾⁷⁾。

研磨に注意し、熱処理によって電極ひずみの除去を行ない、真空封止を行なったものでは、周波数エージング -2×10^{-7} /月以下という値が得られている⁸⁾⁹⁾。測定の結果の一例を Fig. 8に示す。

3. 複数の弾性表面波素子を使った温度補償発振器¹⁰⁾——中期安定度の向上

二次の温度係数を持ち、互いに頂点温度を異にする弾性表面波共振器を複数個組み合わせることによって、広い

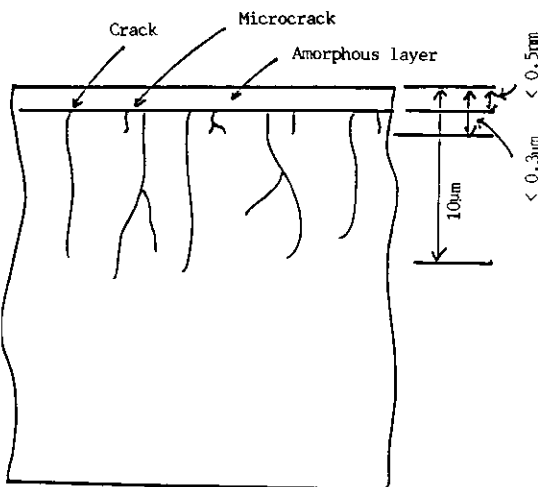


Fig. 5 Amorphous layer and microcracks generated by unsuitable polishing.

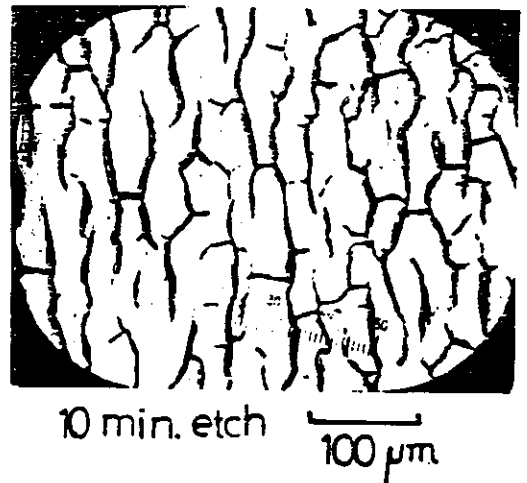


Fig. 6 Microcracks on surface of the Quartz substrate.

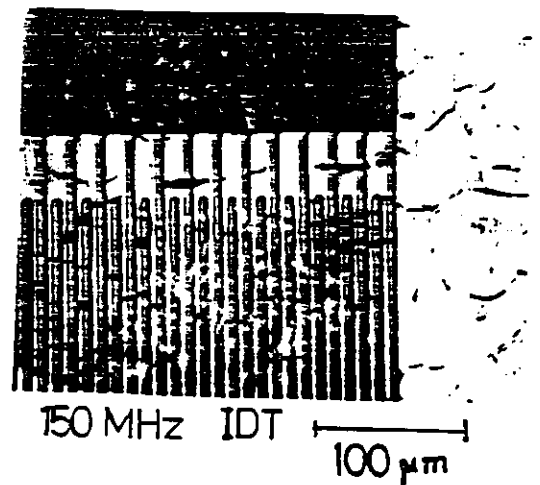


Fig. 7 IDT fabricated on the cracked substrate.

温度範囲にわたって一定周波数の発振条件を満足させる回路構成を考える。

複数の振動子を用いて温度補償発振器を構成する試みは、バルク振動子を用いた発振器においては先に試みられ、10 MHz以下の周波数帯域でその有効性が確認されているが⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、弾性表面波発振器については未だ検討されていない。その理由として

(1) インターディジタル・トランスデューサ(以下 IDT と略称する)形の弾性表面波発振器⁽¹³⁾では、サイドローブ等の副共振が主共振に隣接して現われるため、複数個用いるときの干渉が問題となる可能性のある

こと、また、この共振器を設計に便利な直列共振回路で近似しうかどうか分からないこと。

- (2) キャビティ形の弾性表面共振器では、サイドローブの問題は楽になるが、インピーダンスが高いため、

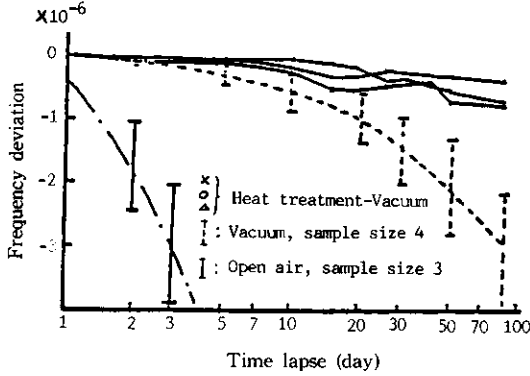


Fig. 8 Ageing characteristics of SAW oscillator.

広い温度範囲にわたって、一定の発振周波数条件を満たすことが困難であること。

- (3) 同じ二次の係数を持ち、頂点温度の異なる弾性表面波共振器を実現とする手段が確立されていなかったこと。
- (4) 動作周波数が 100 MHz～数 GHz と高いため、回路構成上の条件がバルク波素子を用いたものと異なること。
- (5) 複数個の弾性表面波共振器を、その頂点温度で同一の共振周波数となるように制御する回路技術がなかったこと。
- などがあげられる。

そこで、本報告では、これらの問題の解決を図りながら、広い温度範囲にわたって平坦な発振周波数温度特性をもつ弾性表面波発振器を実現するための検討を行うこととした。

3.1 温度補償の原理

Fig. 9 に示す様に、直列共振回路で表示される 2 個の共振器を並列接続し、能動素子と結合することによって、発振器を構成するものとする。ここに、各共振器の共振周波数は、曲率 α の二次曲線状の温度特性をもち、かつ互いにその頂点温度が異なるものとし、更に頂点温度における 2 つの共振器の共振周波数、等価回路定数が等しいものと仮定する。

上記の様な仮定のもとでは、共振器 1 単独のインピーダンス X_1 は、制止容量 C_T を無視できる共振周波数の

近傍において、

$$X_1 = 4\pi L(f - f_{r1})j \quad (1)$$

(f_{r1} : 任意の温度における共振器 1 の共振周波数) となる。頂点温度における共振周波数を f_1 とすると、

$$(f_{r1} - f_1)/f_1 = \alpha(T - T_1)^2 \quad (2)$$

(T_1 : 共振器 1 の頂点温度)

と記述できることから、 X_1 は、

$$X_1 = 4\pi L\{f - f_1 - f_1\alpha(T - T_1)^2\}j \quad (3)$$

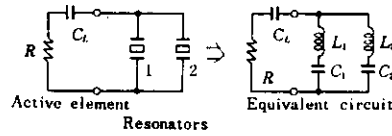


Fig. 9 Configuration of multiple resonator oscillator.

となる。同様に共振器 2 のインピーダンス X_2 も、頂点温度を T_2 とすると、以下のように表示できる。

$$X_2 = 4\pi L\{f - f_1 - f_1\alpha(T - T_2)^2\}j \quad (4)$$

Fig. 9 の発振器の発振条件は、並列接続した回路のインピーダンスが互いに打ち消し合うこと、すなわち、

$$jX + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = 0 \quad (5)$$

である。この式は相対温度を導入すると、

$$\begin{aligned} \{f - f_1 + b(1-t)^2\}\{f - f_1 + b(1+t)^2\} \\ - X\{f - f_1 + b(1+t)^2\}/2\pi L = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、

$$-f_1\alpha(T - T_1)^2 = b(1-t)^2, b = \alpha f_1 |T_1 - T_2|,$$

$$f_1\alpha(T - T_2)^2 = b(1+t)^2$$

$$t = 2(T - (T_1 + T_2))/[2|T_1 - T_2|]$$

と記述できる。周波数 f について式(6)を解くと 2 つの根が得られるが、そのうち、発振条件を満たすのは、並列回路の抵抗成分が小となる条件より求められ、

$$f = f_1 - b(1+t)^2 + \sqrt{4b^2t^2 - X^2/(4\pi L)^2} \quad (7)$$

となる。いま、 $df/dt = 0$ 、相対温度 t に関し発振周波数 f が極値をもつ点を求めると、

$$t = 0, \pm \sqrt{1 - X^2/(16\pi bL)^2} \quad (8)$$

となる。すなわち、 f は温度 T に関し $X < 16\pi bL$ の範囲では双峰性の特性をもち、更に $X = 16\pi bL$ では、 d^2f/dt^2 となり、最大平坦特性をもつ。これより発振周波数の温度補償が可能となる事が理解できる。この平坦特性の詳細は付録 1 で説明を加えることとし、ここでは省略する。

なお、2 個の振動子において、各パラメータが若干ずつずれる場合、上記のような平坦特性に及ぼす影響は以

下になる。すなわち、温度補償の基本原理は2つの共振器のアドミタンスの温度変化が、互いに加え合えると打ち消し合うようになっていることによる。アドミタンスの温度変化特性は、ほぼ二次関数の逆関数に従って変化することを考慮すると、等価回路定数や二次の曲率 α が2つの共振器において若干異なる場合、共振周波数を若干ずらせることによって、アドミタンスの温度傾斜が所望の値、すなわち2個を互いに逆傾斜となるように設定できる。したがって、このようなパラメータが若干ずつずれる場合にも、上の説明同様の平坦特性の実現は可能である。これらの事は、両共振器の共振周波数のずれも特性に影響を及ぼす可能性のあることを示している。

3.2 弾性表面共振器を用いた温度補償発振器

3.2.1 弾性表面共振器の特性

ここでは共振器として Fig. 10 のような ITD 共振器を取りあげ検討を加える。波動論的回析によると、Fig.

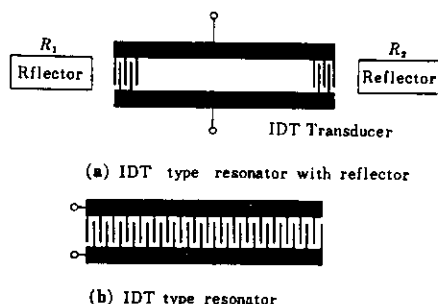


Fig.10 Configuration of ITD resonators.

10 (a) のような2個の反射器 R_1 , R_2 をもつ ITD 共振器の入力アドミタンスは、水晶基板を用いる場合、次式で与えられる¹²⁾。

$$Y = j\omega C_T + \frac{2jG_0q}{NL} \cdot \frac{(1+p)(1-r')}{pe^{-1} + e - r'(e^{-1} + pe)} \times \left(\frac{\sin \varphi}{\varphi} - 1 \right) \quad (9)$$

ただし、

N : 電極対数、

$C_T = NC_S$: 制止容量、

C_S : 単位容量、

$G_0 = 2.87\omega_0 C_S N^2 (\Delta v/v_f)$,

Δv : メタライズしたときの音速低下量、

v_f : 音速、

$$\omega_0 = 2\pi v_f/L,$$

L : 周波長、

$$e = \exp(j - \beta_m NL/2),$$

$$\beta_m = \sqrt{(\delta + \kappa_{11})^2 - \kappa_{12}^2},$$

$$p = \{\beta_m - (\delta + \gamma_{11})\kappa_{12}^{-1}\},$$

$$\varphi = \beta_m \cdot NL/2,$$

$$q = (\delta + \kappa_{11} + \kappa_{12})^{-1},$$

$$\gamma' = \gamma \exp(-2jkl)$$

l : 反射格子の位置、

γ : 反射格子における反射係数、

また、 κ_{11}, κ_{12} は、電極の材料、寸法、基板の材質によって決まる量で、水晶基板で Al 電極を用いる場合以下のように表される。

$$\frac{L\kappa_{11}}{2\pi} = 4.33 \times 10^{-4} + 4.23 \times 10^{-2} \left(\frac{h}{L} \right) + 7.9 \left(\frac{h}{L} \right)^2$$

$$\frac{L\kappa_{12}}{N} = 0.125 \times 10^{-2} + 0.242 \left(\frac{h}{L} \right)$$

h : 電極膜厚

なお、反射格子のない Fig. 10 (b) のような構造の場合、式(9)は、以下の式で表示される。

$$Y = G_a + j(\omega C_T + B_a) \quad (10)$$

ただし、

$$G_a = G_0 \Gamma \frac{\sin^2 \varphi}{\varphi^2}$$

$$B_a = \frac{2G_0}{NC\delta + \kappa_{11} + \kappa_{12}} \left(\Gamma \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi} - 1 \right)$$

$$\Gamma = \frac{2 - (\delta + \kappa_{11} + \kappa_{12})\kappa_{12}^{-1}}{2(1 - \sin^2 \varphi) - (\delta + \kappa_{11} + \kappa_{12})\kappa_{12}^{-1}}$$

なお、この特性の温度に対する変化は、厳密には基板自体の伸縮と音速の変化とが重ね合わされて共振周波数 f_r (あるいは f_0) の温度変化として表される。しかし問題を取扱う際には、伸縮がなく (L :一定) 音速のみが変化するものとして考えてもさしつかえがない。基板材料が水晶の場合、この温度依存性は、二次の係数に従うものとなる。また、温度変化とともに音速が変化する場合は共振特性の変化をシミュレーションによって確かめると、共振周波数が音速変化に従ってずれるのと同じ割合で共振特性における任意のインピーダンスを与える周波数が音速変化によってずれることが確認されている。なお、この現象は、実験的にも裏付けることができるものである。

このような ITD 形の弾性表面共振器は、通常、Fig. 11 (a) のような並列回路で記述されることが多い。ところで、このような特性の共振器を Fig. 11 (b) の様な直列共振回路で表示できるかどうかは不明であり、したがって

等価回路定数も明らかでない。そこで、ここでは共振周波数と反共振周波数の値より各定数を導くことにする。すなわち、式(10)において、 N が十分大なるときには、

$$\frac{f_r - f_a}{f_a} \approx \frac{8}{\pi^2} \frac{\Delta v}{v_f}$$

となる。この値より容量比 C_T/C_1 が求まり、

$$\frac{C_T}{C_1} = 1 / \frac{16}{\pi^2} \frac{\Delta v}{v_f}$$

となる。これより、

$$C_0 = C_T$$

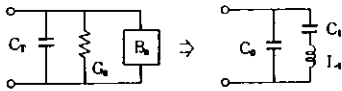
$$C_1 = \frac{16}{\pi^2} \frac{\Delta v}{v_f} C_0$$

$$L_1 = 4\pi^2 C_1 f_0^2 (1 - x'_{11} - x'_{12})^2$$

のように定数が定められ、アドミタンス Y はこれを用いて次式のように近似される。

$$Y = j\omega C_0 + \frac{1}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}} \quad (11)$$

ここで最も問題となるのは、本来発振器としての動作点となるべき共振周波数と反共振周波数との間の周波数におけるアドミタンス特性が、上記の直列共振回路で考える場合と厳密に評価する式(10)の場合とで一致するかどうかである。そこで、代表的な構造をもつ IDT 共振器について厳密式(10)と近似式(11)とにより、それぞれ Y の虚部



(a) Equivalent Circuit (b) Series Resonant Circuit

Fig.11 Equivalent circuits of SAW resonator.

(サセプタンス)の計算を行ない比較してみた。その結果を、Fig. 12 に示す。この図をみると、膜厚の厚い場合でアドミタンスの絶対値の小さい動作領域となる部分では、式(10)および式(11)の計算結果は良くその傾向が一致することがわかる。すなわちたとえば、膜厚が $0.1 \mu\text{m}$ の場合には、 $\Delta f_x = 0.01 \sim 0.05 \text{ MHz}$ の領域の特性は、直列共振近似のものと同様の傾斜をもち、平行移動するとほぼ重ね合わせることができる。なお、サイドローブによる副共振は、図中では $\Delta f_x = -0.5 \text{ MHz}$ 付近に出ている。これは低周波側のサイドローブであるが、高周波側にも、ほぼ $\Delta f_x = 0.3 \text{ MHz}$ 付近に同様の副共振が生じる。この付近では、もはや直列共振の近似は成立しなくなる。一般に高周波側のサイドローブは対数 N にほぼ反比例して

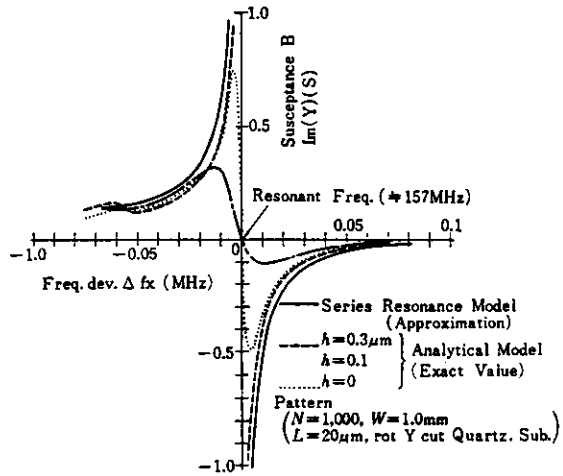


Fig.12 Comparison of series resonance model and analytical model.

共振周波数に接近する。したがって、 $N=6,000$ 対以上となると、 $\Delta f_x = 0.05 \text{ MHz}$ 付近でもこの近似は成立しなくなることになる。逆にいうと、 $\Delta f_x = 0.01 \sim 0.2 \text{ MHz}$ の領域を動作点とすると、通常の共振器では副共振の影響を受けずに温度補償の可能となることがこの結果より推定できる。

以上の検討により、共振器としては動作点次第で章2の原理が適用しうる可能性のあることがわかった。

3.2.2 異なる温度特性の基板を得る方法¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾

Fig. 13 に 2 次の温度係数をもつ基板材料を得る方法を示す。図に示すように、

- 水晶基板における基板回転角度 β を変化させる
- 伝ぱん方向 α を変える
- 電極の膜厚あるいは材料を変える

の方法が考えられる。いずれの場合にも図中(i)に示す通り単一基板上に設置することができる。

(a)の基板回転角度を変える方法を用いる場合、現在まで知られているデータによると、ほぼ 150°C 程度、頂点温度を変えることが可能である。このとき、留意すべき点は、回転角度が変れば音速も変化するため、それぞれの共振器の電極マスクとして周期長の異なったものを用意する必要がある事である。

(b)の伝ぱん方向を変える方法では、図示した ST カット近傍の結晶を用いる頂点温度は最大 60°C 程度変えることができる。また、文献の 15) に示された方位を用いると 100°C 程度の温度幅を実現でき、しかも同一周期長の

マスクを用いて実現できる。

(c)の方法では、複数個の共振器に対して、基板、マスクとも同一のものが使える利点がある。しかし、大きい頂点温度を実現しようとすると、共振器相互で Q 値の差異を生ずる恐れがある。この様な制約から、温度変化の範囲としては 50°C 程度が限界と考えられる。この方法は、むしろ周波数調整を目的として他の方法と併用するのが適当であろう。

これらの方法を単独で、あるいは組み合わせて利用することで、現在のところ、 200°C 程度までの頂点温度差をもつ弾性表面波共振器が実現可能である。

なお、二次の温度係数は、上記の方法をとる場合 $(3\sim 4)\times 10^{-8}$ 程度の大きさとなる。

3.2.3 弾性表面共振器による温度補償の可能性

Fig. 14はFig. 12で調べた特性と同様の特性をもつ共振器を並列接続して発振器を構成する場合につき調べた結果を示す。ここでは2つの代表的な共振器のおおの頂点温度間隔を 80°C とし、並列接続したときのインピーダンスの虚部を一定とする周波数を発振周波数とみなし、その温度変化特性を求めている。この図は式(10)を直接計算に用いたが、式(11)の近似式を用いる場合、平坦特性を与える周波数が若干(0.005 MHz 程度)変化するが、

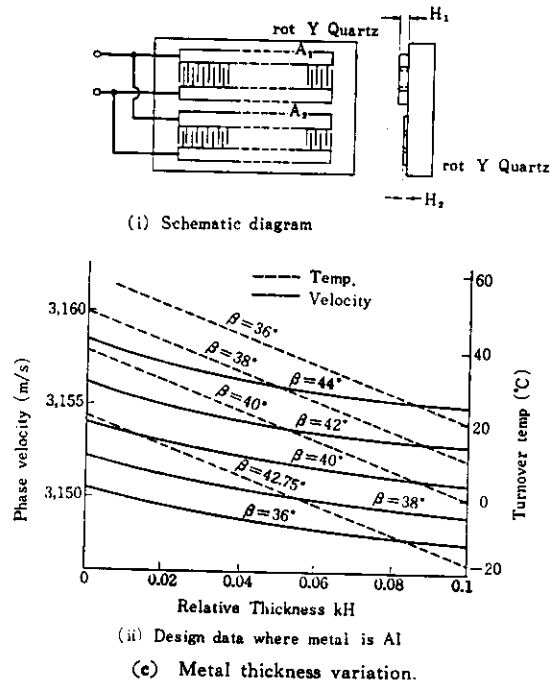
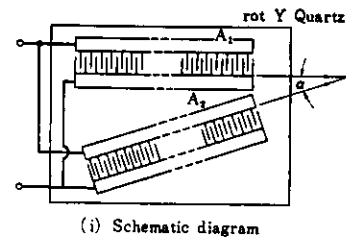
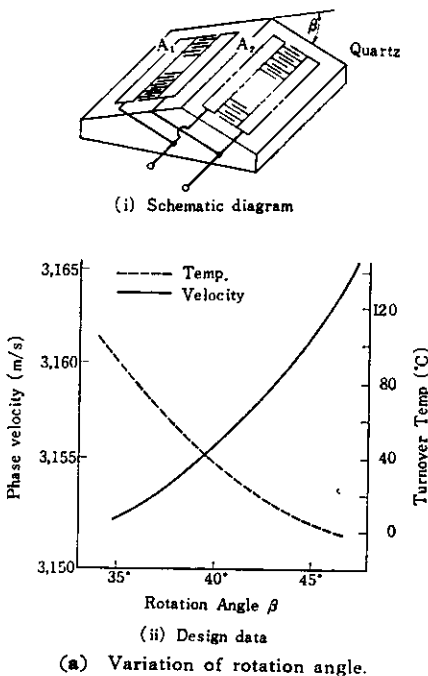


Fig.13 Various Construction of SAW resonators with different temperature characteristics.

全く類似の特性が算出される。図中、パラメータは一定のアドミタンス値でありこれが負荷に対応するものである。なお動作点としては $\Delta f_x = 0.3 \sim 0.4 \text{ MHz}$ 付近であり、節 3.2.2 で考察した実現可能領域に入っている。

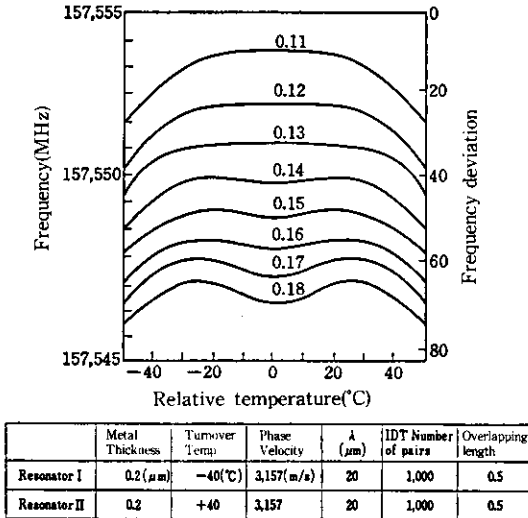
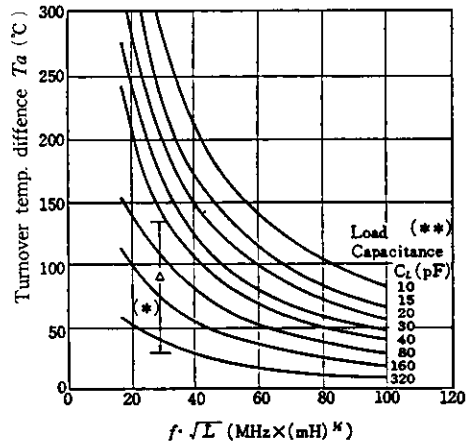


Fig.14 Typical design example of SAW temperature compensated oscillator (parameters are $/\text{Im}(Y)/$).

上記の結果より、弾性表面波共振器を用いて温度補償発振器が実現できること、およびこの計算の範囲では式 (11) の評価式で考えても妥当な値を得る事がわかった。

さて、このような弾性表面波共振器の二つの共振器の周波数・温度特性が平坦な幅は、頂点温度間隔 T_d に関係し、 T_d の大きい程平坦温度幅も広くなる (この関係の詳細は付録に述べる)。そこで、共振器の等価インダクタンス L_1 、周波数 f 、および頂点温度間隔がどのような値をもつときに発振周波数が最大平坦特性となるかを求めた。この関係を Fig. 15 に示す。図中パラメータは負荷容量であり、これには共振器の制止容量 $2C_T$ が含まれている。図中、Fig. 14 の特性をもつ発振器の動作点を Δ 印で示した。更に、Fig. 14 の発振器に用いた共振器と同一の等価定数をもつ共振器を用いた発振器で、実現できる T_d の範囲は以下のように決る。すなわち、 T_d の上限は、負荷を容量性として動作させるとき、図中のパラメータが制止容量 $2C_T (=50 \text{ pF})$ より大きい値をもつ事で決められる。また T_d の下限は実現できる共振器のリアクタンス ($\text{Im}(Z) > 0$) の最小値 (すなわち、Fig. 12 の $-\text{Im}(Y)$ の最大値) が目安を与える。この例では $\text{Im}(Y)$

$\approx 0.6 \text{ S}$ であり、これを負荷容量に直すと 600 pF 程度となる。したがって Fig. 14 のものと同じ等価定数をもつ共振器で実現できる温度範囲は、図中の矢印で記したようになる。なお発振器を構成するに当たって、インダクティブな負荷を導入する場合、 T_d の上限は更に大きくなる。サイドロープ等による副共振器がその範囲を決めるものとなり、理論的には 300°C 程度まで可能となる。



Δ : Example shown in Fig. 5

(*) Realizable Region by using IDT Resonator used in Fig. 5

(**) Damp capacitance $2C_T$ also included

(a) Resonator I (35° rot Y-X, Resonant $Q_p = 13,000$)
(Antiresonant $Q_a = 20,000$)

Fig.15 Condition for that curve relationship between T_d and $f \cdot \sqrt{L}$.

Fig. 15 同様の表示をバルク波振動子を用いた発振器について行なう場合、現在ある振動子のうちで $f \cdot \sqrt{L}$ の最小は 35 程度で、それ以下のものはないとされている¹⁶⁾。ところが弾性表面波共振器を用いる場合、上記の例では $f \cdot \sqrt{L} \approx 29$ であり、この共振器の対数を増大又は交さ幅を増大させればこの値はさらに小さくたとえば 10 以下にすることも可能である。更に、キャビティ形の共振器のように反射格子を付加した共振器を用いると高インピーダンスとなり、 $f \cdot \sqrt{L} = 300$ 程度までも容易に実現できる。このことは、弾性表面波共振器を用いたこの種の温度補償発振器の設計の自由度が大きく、外部回路構成も容易なことを示す。Fig. 15 をみるとわかるように一般に広い温度範囲の平坦特性を実現するには、同一の負荷条件では IDT 共振器のように低インピーダンスの共振器が適しており、容量負荷のもとでは 150°C 程度の T_d を実現できる。また、インダクティブな負荷を用いると、 T_d を数 100°C 以上となし得る。更に、等価回路定数が構造変化により簡単に変わ得るため、同じ頂点温度

範囲の発振器を実現するにも回路構成上の自由度が大きいことが上記の検討よりわかった。

3.2.4 容量による共振周波数調整

複数の共振器を使用する際、共振周波数のずれが生じる可能性が大である。またこの共振周波数のずれは平坦特性に直接影響を及ぼすものである。したがって、ここでは、一方の共振器の共振周波数がずれた場合を想定して、容量を Fig. 16 のように直列接続することで周波数調整を行なうことを試み、その条件を明らかにしておく。

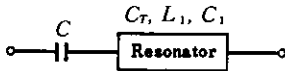


Fig.16 Trimming of resonant frequency by series capacitance C .

Fig. 16 の回路において、共振器のインピーダンス Z は、

$$Z \approx j\omega L \left\{ 1 - \frac{\omega_r^2}{\omega^2} \left(\frac{C_1 + C}{C} \right) \right\} \quad (12)$$

となる。したがって、 C を付加したときの共振周波数は Δf を用いて示すと、

$$C \approx \frac{f_r}{2\Delta f} C_1 \quad (13)$$

となる。すなわち、 Δf なる周波数を微調するには、式(13)の容量を付加すればよい。一般にこの方法を適用すると、実現できるインピーダンス特性に制限が生じる事となり、等価回路定数も若干の変動を受けてしまう。Fig. 14 の特性をもつような共振器で、平坦特性の実現に支障を与えない Δf の上限を数値計算によって求めたところ、 $\Delta f/f \approx 1 \times 10^{-4}$ となることが確認されている。

3.3 実験的検証

3.3.1 用いた共振器の特性

まず二種類の回転角度をもつ基板上に共振器を設置して実験を行なうこととした。実験に用いた共振器の諸元を Table 1 に示す。実験に用いた共振器は、IDT トラン

Table 1 Design parameters of SAW resonators used in the experiments.

	Substrate	IDT No of (*) pairs	Periodic length	Overlapping length	Metal (Al) thickness
Resonator I	35°rot Y-X	1,000	20.07 μm	0.5mm	0.2 μm
Resonator II	46°rot Y-X	1,000	20 μm	0.5mm	0.2 μm

(*) 400 reflecting grating Al strip is placed in order to reduce side lobe.

スデューサの外側に 400 本のストリップを有するものである。このストリップの有無は、共振・反共振周波数のような主共振特性上には大きな影響を及ぼすものではなく、サイドロープ特性の抑圧に有効となっている。両共振器の諸特性を求めると Table 2 の様に表される。

Fig. 17 に上記の共振器のおのおのを用いて、単独の共振器をもつ発振器を構成した場合の発振周波数の温度変化特性を測定した結果を示す。この実験によると、共振器 I では頂点温度 65°C、二次の係数 3.3×10^{-8} 、共振器 II では、頂点温度 -15°C、二次の係数 4×10^{-8} となっている。

3.3.2 並列接続した共振器の特性

発振器の回路構成を行なう前に予検討として行なった並列接続した共振器の温度変化特性の測定結果を Fig. 18 に示す。Fig. 18 は共振器のリアクタンス値を一定とする周波数の温度変化特性を求めたものであり、能

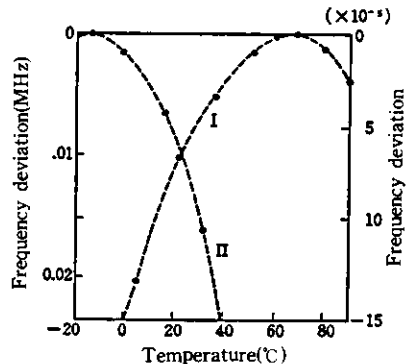


Fig.17 Temperature dependance of single resonator SAW oscillators.

Table 2 Characteristics of SAW resonators used in the experiments (*)

	Resonant Freq. (MHz)	Anti Res. Freq. (MHz)	Resonant Q	Anti Res. Q	C_r	C_i
Resonator I	157.015	157.094	13,000	20,000	25pF	0.025pF
Resonator I	157.012	157.099	20,000	23,000	25pF	0.028pF

(*) Measured at room temperature (20°C)

動素子の動作点変化等に伴う特性変動を考慮しない場合、発振器の発振周波数に相当するものである。

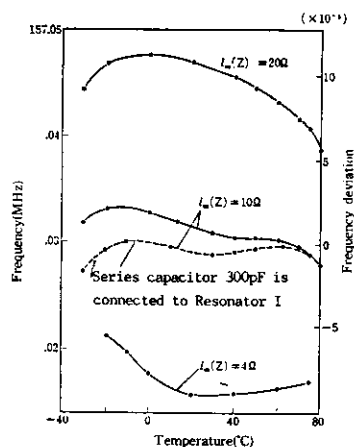


Fig.18 Temperature dependence of frequency at which impedance of parallel connected circuit is with constant value.

3.3.3 発振器回路の構成

発振回路としては、Fig. 19の回路を用いる事とした。2つの共振器自体の共振周波数のずれの他、この回路では若干の温度係数 ($0.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度) をもつことから、ここでは $C_x = 90\text{pF}$ なる直列容量を負荷し両者の動作点

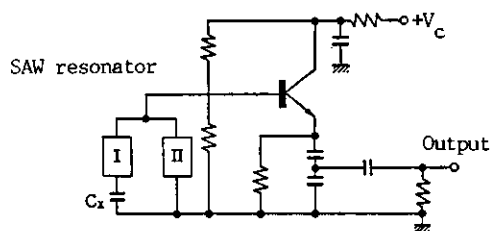


Fig.19 Oscillator circuit.

での周波数を一致せしめた。この直列容量によって、共振器Iの共振周波数を、約 70×10^{-6} 移動せしめたことになる。

Fig. 20は発振周波数の温度変化特性である。図中実線が実験結果で、最大平坦特性を実現した場合(上段)と、双峰特性を実現した場合(下段)とを示す。併記した破線は単一共振器を用いた従来回路の特性である。この結果をみると、 60°C 以上の温度範囲で 2×10^{-6} 以下の温度

特性が得られ、従来の発振器に比べ一桁以上の温度特性の改善が認められる。なお、代表的な発振スペクトルをFig. 21に示す。この発振器の電源電圧の変動に対する安定度は、数%の電圧変動に対し発振周波数の変動が 2×10^{-7} 以下という値であった。

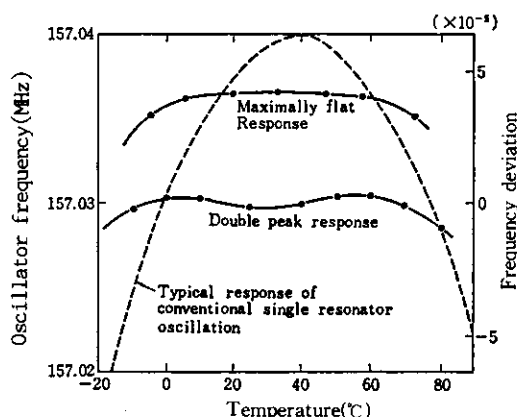


Fig.20 Response of SAW oscillator ($C_x = 90\text{pF}$, $V_c = 4\text{V}$).

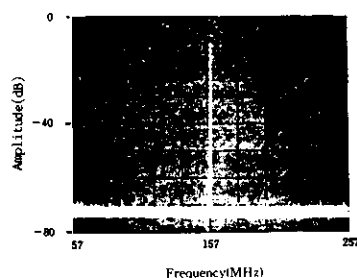


Fig.21 Spectrum of SAW temperature stable oscillator.

4. むすび

弾性表面発振器とその安定化について概説し、安定化のうちでも特に重要な中期安定度(温度特性)の向上に関する検討結果を詳述した。

中期安定度の向上に関しては、温度係数が二次の特性で、頂点温度が互いに異なり、頂点温度での共振周波数の等しい弾性表面波共振器を複数個並列接続することにより、広い温度範囲で変動の小さい温度補償発振器を実現できることを理論的・実験的に明らかにした。

ここで検討した弾性表面波発振器の特長は、

- (1) 温度特性改善に関し、従来とられてきた各種の方法に比べて温度係数一定の温度範囲が広いこと
- (2) 基板そのものには手を加えないため、安定性・信頼性については何ら劣化要因がないこと
- (3) 回路構成が簡単で特別な工作・加工技術を必要としないこと

などである。

弾性表面波発振器は、数 10 MHz 帯から数 GHz にかけて各種の通信装置に利用されており、今後広範な応用分野の拡大が期待されている。本報告に述べた高安定化技術は、弾性表面波発振器の信頼性を高め、適用分野を拡大するのに有用であると考えられる。

文 献

- 1) M. F. Lewis: "Surface Acoustic Wave Devices and Application-6, Oscillators-", Ultrasonics 12, pp. 115~123 (1974)
- 2) H. E. Karrer, J. F. Dias: "Surface Acoustic Wave Oscillators", Proc. 28th Ann. Freq. Cont. Symp., pp. 266~269 (May 1974)
- 3) 吉川: "SAW 発振器の現状と将来", 昭和 53 年電気四学会連大, No. 104, p. 3-87 (1978)
- 4) T. E. Parker: "Current Development in SAW Oscillator Stability", Proc. 31st Ann. Freq. Cont. Symp., pp. 359~364 (1977)
- 5) T. E. Parker, M. B. Schultz: "SiO₂ Film Overlays for Temperature-stable Surface Acoustic Wave Devices", Applied Physics Letters, 26, 3, p. 75 (1 Feb. 1975)
- 6) 木村, 小高, 吉川: "弾性表面波基板における表面加工層とその素子特性への影響", 信学技報, US77-20 (1977-07)
- 7) T. Kimura, I. Kotaka, S. Yoshikawa: "Estimation of SAW Attenuation due to Platelet Effects", J. Appl. Phys., 50, p. 4762 (1979)
- 8) 小高, 吉川: "弾性表面波素子の経時特性について——熱処理の効果", 昭和 53 年信学会全大, No. 87 (1978-03)
- 9) 小高, 吉川: "弾性表面素子の経時特性について——電極膜厚と経時特性の関係", 昭和 54 年信学会全大, No. 87 (1979-03)
- 10) 宝川, 吉川: "最大平坦な周波数温度特性をもつ弾性表面波発振器", 日本音響学会誌, 35, 1, pp. 11-20 (1979)
- 11) D. J. Fewing, C. R. S Ince: The Marconi Review, 31, pp. 57~76 (1968)
- 12) 平間, 尾上: "三個の振動子を用いた温度補償水晶発振器", 信学会論文誌(A), 56-A, pp. 155~162 (1973)
- 13) 小山田, 吉川, 石原: "多対 IDT を用いた弾性表面波発振器の解析とその応用", 信学会論文誌(A), 60-A, pp. 805~812 (1977)
- 14) J. F. Dias et al: "The Temperature Coefficient of Delay Time for X-propagating SAW of & Quartz", IEEE Trans. SU-22, pp. 46~54 (1976)

- 15) 箕輪, 十文字: "弾性表面波素子の中心周波数及びその温度特性", 信学技報, US76-23 (1976)
- 16) 清水, 坂上: "水晶基板弾性表面波の零温度係数カット", 信学技報, US77-63 (1977)
- 17) T. E. Parker, M. B. Schultz: "Temperature Stable Materials for SAW Devices", Proc. 29th Ann. Freq. Cont. Symp., pp. 143 (1975)

付 録 平坦特性の実験

いま、最大平坦特性を与える場合、周波数変動 $\Delta f/f_0$ を $n \times 10^{-6}$ 以下に収めうる温度範囲 T_n を求めると、以下のようになる。すなわち最大平坦特性をもつときの発振周波数は、

$$f = f_0 - \beta \frac{T_d^2}{4} (2 + t^2 - 2\sqrt{1+t^2})$$

$$\left(\text{ただし, } f_0 = f_1 - \frac{3\beta T_d^2}{4} \right)$$

となる。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{|\alpha| T_d^2}{4} (2\sqrt{1+t^2} - 2 - t^2) = -n \times 10^{-6}$$

したがって、

$$2\sqrt{1+t^2} - 2 - t^2 = -n \frac{4 \times 10^{-6}}{|\alpha| T_d^2}$$

なる条件により、 $\Delta f/f$ が $n \times 10^{-6}$ となる相対温度

$$t_n = \pm \sqrt{n \frac{4 \times 10^{-6}}{|\alpha| T_d^2}} \cdot 2\sqrt{n \frac{4 \times 10^{-6}}{|\alpha| T_d^2}}$$

が求められる。これより、 T_n を算出すると、

$$T_n = T_d \sqrt{n \frac{4 \times 10^{-6}}{|\alpha| T_d^2}} + 2\sqrt{n \frac{4 \times 10^{-6}}{|\alpha| T_d^2}}$$

となる。一方、Fig. A-1 の様な双峰特性となる場合にも、同様の計算によって求められ、

$$T_n = T_n + T_d \left(n \frac{4 \times 10^{-6}}{|\alpha| T_d^2} \right)^{1/4} \times \left(2 - \sqrt{2 + \sqrt{n \frac{4 \times 10^{-6}}{|\alpha| T_d^2}}} \right)$$

となる。

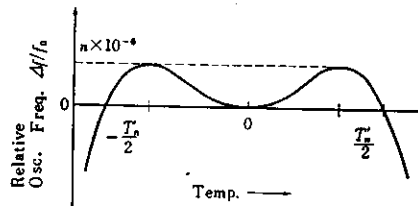


Fig. A-1 Maximum range variation.