イオンビームエッチングによる水晶振動子の周波数変動

Frequency change of the Quartz crystal resonator by ion beam etching

塩野　忠久，長田 祐介（昭和真空），中川恭彦（山梨大院・医工）

Tadahisa SHIONO,Yusuke OSADA (Showa Shinku co.,ltd) and Yasuhiko NAKAGAWA (Univ. Yamanashi)

In frequency adjustment of the crystal resonator by ion beam etching, the phenomenon which frequency shifts immediately after etching arose, and it became the big cause which barred utilization. So, theoretical analysis of this frequency change was conducted. Temperature distribution change of the crystal resonator at the time of ion beam irradiation was calculated by the FDM. Thermal stress distribution was calculated from temperature distribution, and change of resonance frequency was calculated from change of the elastic constant. Analysis carrying out about AT, BT, and SC cut, calculation and an experimental result were well in agreement. Therefore, it turned out that thermal stress arises in temperature distribution change produced by ion beam irradiation, an elastic constant changes, and frequency changes.

1. はじめに

水晶振動子の製造工程では、個々の周波数を測定しながら、真空蒸着や、イオンビームエッチングによって電極膜厚を変化させ個々の周波数を合わせ込む周波数調整[1]工程がある。蒸着法に比べ、イオンビームエッチング法は、デバイス特性、連続運転に優れているが、周波数調整後に周波数が変化する現象が生じ、実用化を妨げた。この周波数変動は解明されないまま現在に至っている。

我々は、イオンビームエッチングによる水晶振動子の周波数変動について理論的解析を行い、イオンビーム照射による温度分布変化で熱応力が生じ、弾性定数が変化して周波数が変化することが分かった。

2. エッチングによる周波数変化

イオンビームエッチングによる周波数調整では、エッチング後の周波数変化が生じる。熱陰極イオンガンを用いて、イオンビームエネルギー300eV、イオンビーム電流密度1mA/cm^{2}のArイオンビームを水晶振動子に照射したときの周波数変化をFig.1 に示す。水晶振動子はAg電極、電極径 3φ、水晶径 7.5φ、周波数 25MHzのAT cutで、最初の 2 秒間イオンビーム照射している。エッチングによって周波数は高くなるが、エッチング直後の数秒間で周波数が下がり数十秒で周波数は変化しなくなる。十分長時間経過した時、水晶振動子の電極膜厚の変化による周波数変化分が残り、照射中はリニアに変化していると考え、エッチングによる膜厚変化分を差し引いたものを示している。ビーム照射直後に膜厚変化によらない周波数変動が生じ、1 秒程度でほぼ飽和している。ビーム照射終了後にこれと逆の周波数変動が生じていることがわかる。

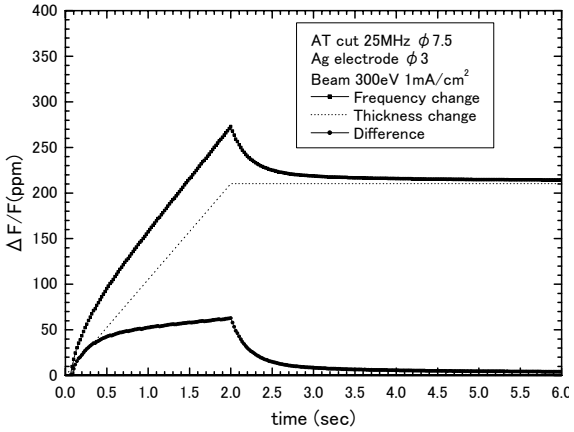

Fig. 1 Frequency change by etching

3. 周波数変動の理論的解析

水晶板の内部と表面の温度勾配によって生じる熱応力によって通常の静的な周波数温度特性では説明出来ない､動的な周波数-温度特性が生じる[2]ことが報告されている。そこで、イオンビーム照射による温度上昇で生じる温度分布の変化で熱応力が生じ、これによって弾性定数が変化して周波数が変化するとして解析を行った。解析は、丸板水晶素板に円形電極が形成され、この電極に照射されたイオンビームのエネルギーが全て吸収されるとして計算を行っ

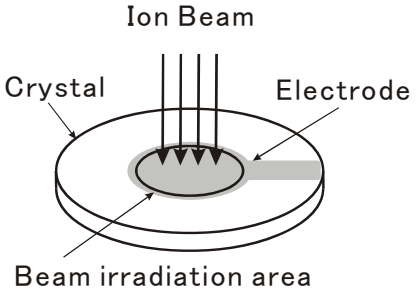

Fig.2 Analysis model

---

shiono@showashinku.co.jp

た。この時の水晶片は等方体で熱的にフローティングとしている。温度分布の変化は、差分法による数値シミュレーションによって求めた。ビーム電圧Vb, イオンビーム電流密度Ibdとした時W=Vb×Ibdのビーム電力密度が全て水晶振動子に吸収されるとするものである。イオンビーム照射による温度変化では厚さ方向の温度差は0.02℃以下と小さいことから一定とし、径方向の温度分布について求めた。このときの温度分布より生ずる熱応力を中実円板の熱応力[3]として求めた．円柱座標系を用いて、中心からの位置rでの熱応力σ_{rr}、$\sigma_{\theta\theta}$、σ_{zz}、$\sigma_{r\theta}$は円板の半径をb、位置rでの温度上昇をτとして

$$\sigma_{rr}=\frac{\alpha E}{r^2}\left(-\int_0^r \tau r dr+\frac{r^2}{b^2}\int_0^b \tau r dr\right) \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta}=\alpha E\left(\frac{1}{r^2}\int_0^r \tau r dr+\frac{1}{b^2}\int_0^b \tau r dr-\tau\right) \quad (2)$$

$$\sigma_{zz}=\sigma_{r\theta}=0$$

で表される。ここでαは熱膨張率、E がヤング率である。

応力による弾性定数の変化[4]は

$$\frac{\partial\left(\rho_0 W^2\right)}{\partial P}=-\left(N\cdot M\right)^2-2wF-G$$

$$w=\left[\rho_0 W^2\right]_{P=0}=c_{prqs}N_p N_q U_r U_s$$

$$F=s_{abrs}M_a M_b U_r U_s \quad (3)$$

$$G=s_{abuv}C_{uvprqs}M_a M_b N_p N_q U_r U_s$$

から

$$\Delta c_{55}=\left\{-2c_{55}F-G\right\}P \quad (4)$$

で表される。共振周波数の変化量は摂動法より

$$\frac{\Delta\omega}{\omega}=\frac{1}{4U_{vv}}\int_V\left(S_v^*:\Delta c:S_v\right)dV \quad (5)$$

で与えられるここで圧電定数と誘電率の変化は小さいので無視し、積分範囲を V=(電極面積)×(基板厚さ)とすると

$$\frac{\Delta\omega}{\omega}=\frac{1}{\rho w^2 A_0^2 SH}\int_V \Delta c_{55}\left(\frac{\pi}{H}\right)^2 A_0^2\cos\left(\frac{\pi}{H}x_3\right)dV$$

$$=\frac{1}{2c_{55}S}\iint_S\left\{\left(-2c_{55}S_{11}-S_{11uv}C_{uv3131}\right)M_1^2+\left(-2c_{55}S_{12}+S_{22}C_{uv3131}\right)M_2^2\right\}P dx_1 dx \quad (6)$$

となる。ここで、応力 P 及び M1、M2 は

$$P=\sqrt{\sigma_{xx}^2+\sigma_{yy}^2}\quad M_1=\frac{\sigma_{xx}^2}{P}\quad M_2=\frac{\sigma_{yy}^2}{P} \quad (7)$$

で表される。熱応力分布より，式(6)(7)を用いて数値積分することによって、共振周波数の変化を求めた。

4. 周波数変動の解析結果

周波数 25MHz、水晶素板 7.4φ、電極径 3φに300eV、1mA/cm2 のイオンビームを照射した時の計算結果と実験結果の比較を Fig.3 に示す。それぞれ AT cut、BT cut および SC cut について計算と実験を行っており、水晶の厚みは AT cut で 67μm、BT cut で 102μm、 SC cut で 76μm になる。AT cut、BT cut および SC cut ともに計算と実験結果はよく一致している。

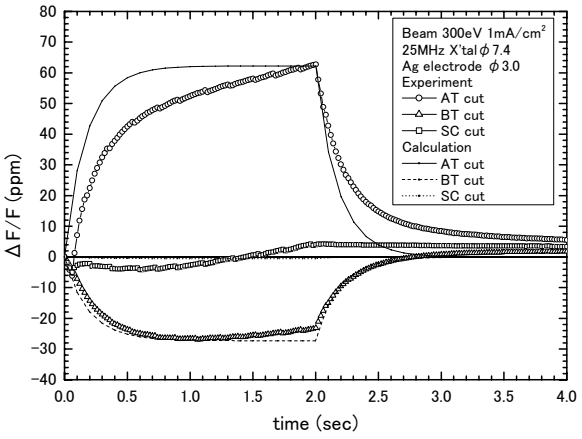

Fig. 3 Analysis result of frequency change

5. むすび

イオンビームエッチングによる水晶振動子の周波数変動について理論的解析を行った。イオンビーム照射によって生じる温度分布の変化で熱応力が生じ、これによって弾性定数が変化して周波数が変化することが分かった。

引用文献

1. 塩野忠久，久保信一，伊藤誠，土倉一夫，電子情報通信学会論文誌 C，Vol.J89-C, No.4, pp137-144, Apr.2006
2. 八鍬和夫,奥田信也,白井憲二,白井勘次,山科幹彦,電子回路部品・材料研究会資料,1970
3. 竹内洋一郎,野田直剛,熱応力,日新出版,1989
4. R.N.Thurston,H.J.McSkimin,P.Anderson.Jr, J.Appl.Phs. vol 37.1.1966