

論 文
36~10~4

수정 진동자를 이용한 박막두께 감시장치의 제작과 특성

Design Method of the Quartz Crystal Thickness Monitor and its Characteristics

徐龍雲* · 黃琪雄**
(Yong-Woon Seo · Ki-Woong Whang)

ABSTRACT

This paper shows the design method and the experimental results of the thin film thickness monitor. The thin film thickness monitor uses 6 MHz quartz crystal in sensor and cooling system for the fine operation. The thin film thickness are measured by the digital frequency counter.

1. 서 론

수정 진동자는 높은 주파수 안정도를 갖고있어 전자회로의 주파수 제어장치로 지금까지 널리 사용되어 왔다. 증착중에 있는 박막의 두께를 측정하는 방법으로 수정 진동자의 이용가능성은 Sauerbray에 의해 처음 제시되었다.¹⁾

발전하고있는 수정 진동자에 다른 물질이 증착되면 증착된 물질은 수정의 기계적 성질에 변화를 가져오므로 증착된 물질의 양에 따라 수정의 공진 주파수가 변화하게 된다. 이러한 공진 주파수의 변화량과 박막 두께와의 관계를 구해서 박막의 진공 증착시 그 두께와 증착율을 간접적인 측정방법으로 제어할 수 있다.

박막증착의 감시 장치로서는 수정진동자를 이용하는 방법외에도 Microbalance, Ionization 방법과 광학적 간섭에 의한 직접적인 측정방법등이 있으나 그 중 수정진동자에 의한 방법은 그 제작이 용이하

면서도 모든 종류의 박막 제작에 적용이 가능하고, 실제로 10^{-7}gcm^{-2} 정도의 높은 감도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 수정 진동자에 대해 지금까지 연구 조사된 사실들을 근거로 수정진동자에 의한 박막두께 및 증착율 감시 장치의 제작 방법과 그 특성을 제시한다.

2. 수정 진동자의 일반 특성

수정의 압전기 현상은 기계적인 변형에 의해서 전계가 발생하는 압전기 직접효과와, 전계에 의해서 기계적인 진동이 나타나는 압전기 역효과가 있으며 이러한 현상은 수정외에도 전기석, Rochelle 염 등에서도 잘 관찰된다. 수정편은 그림 1 처럼 수정을 절단하는 방위에 따라 각각 다양한 특징을 나타내며, 수정편의 진동 방식은 그림 2 와 같은 종진동, 굴곡진동, 미끄럼진동의 세가지로 대별된다.²⁾ 또한 수정편의 공진 주파수는 그림 3 과 같은 온도계수를 갖고 있으며³⁾ 수정편의 진동방식 횡수, 절단방위에 따라 결정된다.

표 1 은 범용으로 사용되는 각 수정편에 대한 특성을 나타낸 것이다.

*正 會 員 : 三星綜合技術院 研究員

**正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1987年 3月 24日

1次修正 : 1987年 7月 20日

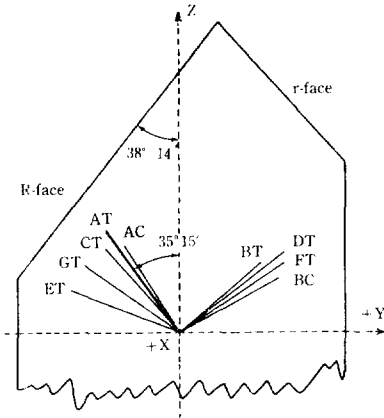


그림 1. 수정의 절단 방식에 따른 명칭
Fig. 1. Crystal Cutting Modes

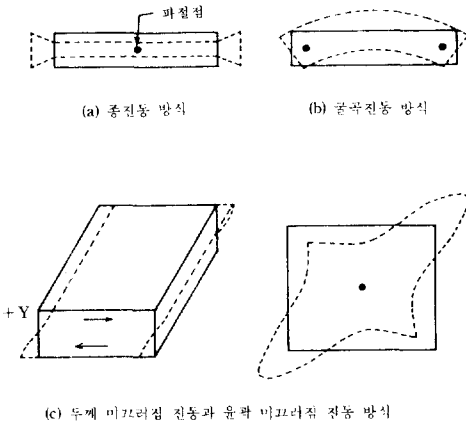


그림 2. 수정편의 진동방식
Fig. 2. Vibration Modes of Quartz Crystal

표 1. 여러가지 수정편에 대한 진동 방식과 주파수 상수값

Table 1. Vibration Modes and Frequency Constant vs Cutting Modes of The Quartz Crystal

Cut	Vibration Mode	Usable Frequency (KHz)	Frequency Constant
AT	Thickness	800-30,000	1670KHz-mm
BT	Shear	3,000-22,000	2560 "
CT	Face	150- 500	3080 "
DT	Shear	80- 300	2070 "
GT	Longitudinal	90- 250	
MT	inal	50- 200	2700 "
NT	Flexural	3- 50	5700 "

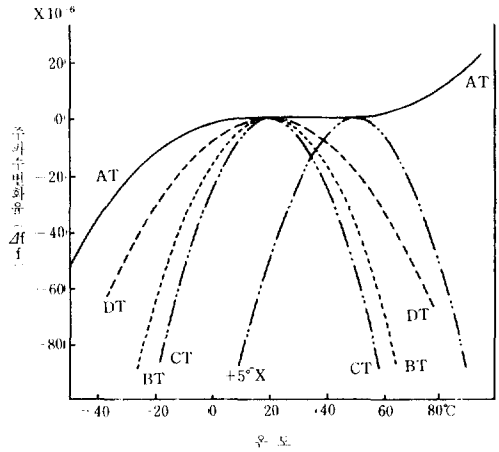


그림 3. 수정편의 온도계수 곡선
Fig. 3. Temperature Constants of Quartz Crystal

여러 종류의 수정편들 중에서 증착중인 박막의 두께를 측정하는 센서로 이용되기 위해서는 온도계수가 $-20^{\circ}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 의 넓은 온도 범위에서 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 정도로 낮고 파절점이 없는 두께 미끄럼 진동을 하는 AT-cut 이 가장 적합하다.

AT-cut 수정 진동자의 기본 공진 주파수 f 는 식 (1) 처럼 주어진다.⁴⁾

$$f = \frac{1}{2d} \left(\frac{c}{\rho_q} \right)^{1/2} = \frac{N}{d} = \frac{1670}{d} \text{ (kHz)} \quad (1)$$

- d : 수정편의 두께 (mm)
- ρ_q : 수정편의 밀도 (2.65 g/cm^3)
- c : 수정편의 미끄럼 탄성상수
- N : 주파수 상수 (1670 mmkHz)

이때 AT-cut 수정의 antinodal 표면적 A 에 질량 m 만큼 다른 물질이 증착되면 공진 주파수의 변화량은 식 (2) 와 같이 표현된다.⁵⁾

$$\Delta f = -f \frac{km}{\rho_q Ad} = -C_f t \bar{\rho}_{film} \quad (2)$$

- C_f : 수정의 질량 감도 ($\frac{f^2 k}{N \rho_q}$)
- $\bar{\rho}_{film}$: 박막의 밀도
- t : 박막의 두께

식 (2)로부터 $t \ll d$, $\Delta f < 0.01f$ 정도의 범위를 만족한다면 Δf 는 증착물질의 두께 t와 비례관계로 근사시킬수 있음을 알 수 있다. 표 2는 AT-cut 수

표 2. 여러 주파수 범위의 AT-Cut수정에 대한 상수값 및 감도

Table 2. Constants and Sensitivity of AT-cut Crystals for a Range of Frequencies

Resonant Frequency of Crystal f (Mc/s)	Mass Determination Sensitivity C_f	Mass Change per Unit Area detected for 1 c/s m/A (gcm)	Thickness of Crystal (mm)
1	2.26E6	4.42E-7	1.67
3	2.03E7	4.91E-8	0.56
6	8.15E7	1.23E-8	0.28
10	2.26E8	4.42E-9	0.167
15	5.10E8	1.96E-9	0.11

정의 공진 주파수에 대한 상수값과 그때의 감도를 나타낸다.^{6), 7)}

3. Monitor의 설계와 제작

수정편의 공진 주파수는 그 두께에 의해 적당히 선택될 수 있고 식(2)에서 보면 C_f 가 f^2 에 비례하므로 고유 진동수가 높은 것일수록 감도가 좋다.

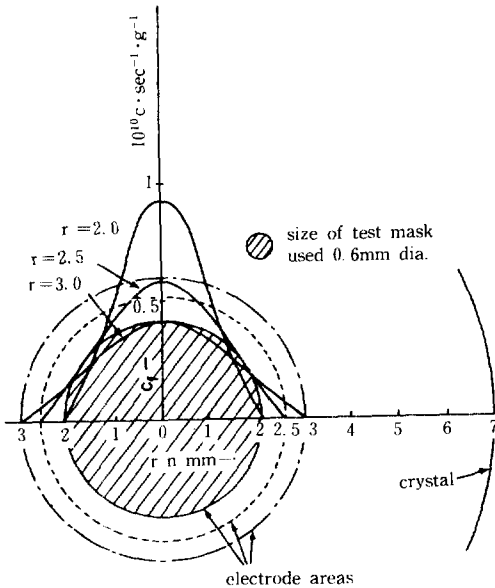


그림 4. AT-cut 수정의 미소 질량감도 곡선
Fig. 4. Differential Weighing Sensitivity for an AT-cut Crystal at various Distances from the Center

그러나 주파수 변화량 Δf 와 증착된 박막의 두께 t 의 선형적 비례관계의 관점에서 보면 낮은 공진 주파수를 갖는 수정편이 더욱 많은 양을 증착해도 선형적 비례관계를 유지하므로 사용 목적상 5~6MHz 용의 수정을 선택하는 것이 적당할 것이다.

수정편의 미소 질량 감도를 보면 그림 4에 나타난 것처럼 전극의 중심부분이 가장 강한 정규분포 곡선 모양을 띈다.⁸⁾ 그러므로 수정편의 전극면적보다도 증착 면적을 더 크게 제작하는 경우 표 2에서 제시한 감도와 비슷하고, 증착면적이 더 작은 경우 노출된 전극 부위의 미소 질량 감도를 적분하여 그 증착면에 대한 감도 C_f 를 식(3)처럼 구할 수 있다.

$$C_f' = \int_0^R C_f(r) \cdot 2\pi r dr \quad (3)$$

C_f' : 중심에서 r만큼 떨어진 곳의 미소 질량 감도

R : 증착면의 반경

본 실험에서 사용한 수정 진동자는 두께 0.28mm 인 공진 주파수 6MHz를 사용하였다. 수정편의 직경은 14mm이며 전극은 수정편 양면에 직경 6mm인 원형으로 알루미늄을 증착하여 사용하였고 그림 5와 같은 모양으로 지지하였다.

전극의 인입선은 수정 진동자의 진동에 미치는 영향을 최소화해야 하므로, 수정편의 가장자리에서 연결되어지고 탄력있는 재질이 요구되며 스프링 클립에 의해 수정을 지지하고 동시에 전극과 인입선과의 연결을 할 수도 있다. 이런 경우 수정을 세척하거나 교체하는데 용이하나 전기적 접점이 불량하면 직렬저항이 증가하여 주파수 안정도가 떨어지게 되므로 주의가 필요하다.

AT-cut 수정편이 비록 온도계수가 가장 낮지만

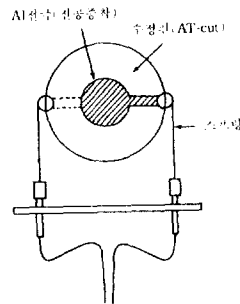


그림 5. 수정편의 지지와 전기적 접합
Fig. 5. Typical Crystal Mounting

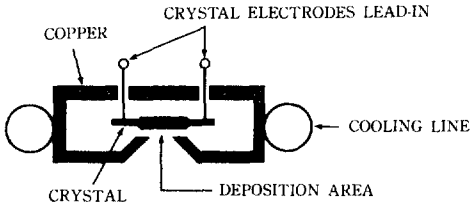


그림 6. Sensor Head의 구조
Fig. 6. Structure of Sensor Head

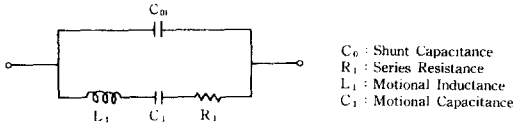


그림 7. 수정 진동자의 전기적 등가 회로
Fig. 7. Equivalent Circuit for Quartz

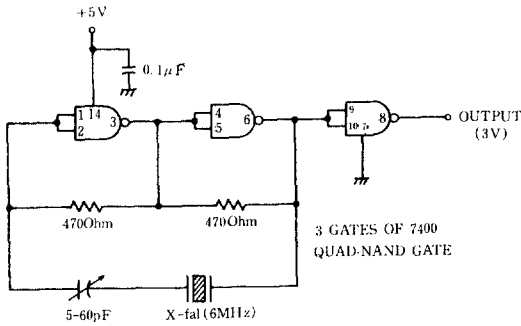


그림 8. 수정 진동자의 발진회로
Fig. 8. 6MHz Oscillator Circuit

증착원으로부터 발생하는 방사열은 수정의 공진 주파수에 영향을 끼칠 만큼 수정을 가열하게 된다. 이러한 불안정 상태를 극복하기 위해서 본 실험 장치에서는 그림 6과 같은 냉각 장치를 갖는 Sensor Head를 제작하여 사용했고, 증착원으로부터 약 35cm 떨어지게 설치했다.

수정의 에이징(Aging) 현상은 수정편의 표면변형, 오염등에 의해서 주로 발생되며 특히 알루미늄전극의 산화현상에 의해 발생되나 이런 현상은 최소화할 수 있고 $10^{-8} \sim 10^{-11}$ Hz/day 정도로 문제시 되지 않는다.²⁾

외부로부터 유도되는 기계적 진동이나 고주파는 수정진동자의 주파수에 영향을 줄 수 있으므로 노출된 선은 모두 실드된 전선을 사용하였다.

수정 진동자의 전기적 등가 회로는 그림 7과 같이 표시되며,²⁾ 수정을 발진시키기 위한 주변회로

는 그림 8과 같이 구성했다.¹⁾ 전원 전압의 변동에 따른 발진 주파수의 변동을 막기위해 정전압 전원을 사용했고 주파수 측정기는 1Hz 까지 측정할 수 있는 디지털 카운터를 사용했다.

4. 실험 결과

설계 제작된 Quartz Thickness Monitor 는 그림 9와 같이 장치되었다. 진공 증착기는 두개의 보우트가 장치되어있고, 반응성 증착을 할 수 있도록 산소 가스 라인이 진공증착기내에 설치되었으며, 기판 온도를 조절할 수 있도록 구성되어 있다.

본 실험은 Starting Material로 SiO, TiO 분말을 산소 분위기에서 반응성 진공 증착을 하여 SiO₂, TiO₂ 고유의 굴절율을 나타내는 SiO₂, TiO₂ 박막을 제작하고 박막두께와 수정 발진 주파수의 변화량의 관계를 측정하는 방법으로 제작한 Quartz Thickness Monitor 의 특성을 검토한다.

그림 10은 모니터와 비슷한 위치에 있는 기판상의 Si-wafer 위에 증착된 SiO₂, TiO₂ 막을 엘립소미터(Ellipsometer)로 그 두께를 측정하여 주파수 변화량과의 상관관계를 구한 것이다. 증착 조건은 SiO₂, TiO₂ 막 둘다 기판온도 300°C, 산소 압력 1×10^{-4} torr, 제작한 모니터에 의한 주파수 변화율(증착율) 4Hz/sec 를 유지하였다. 이 때 얻어진 막의 굴절율은 SiO₂, TiO₂ 각각 1.46, 2.42 가 얻어졌고

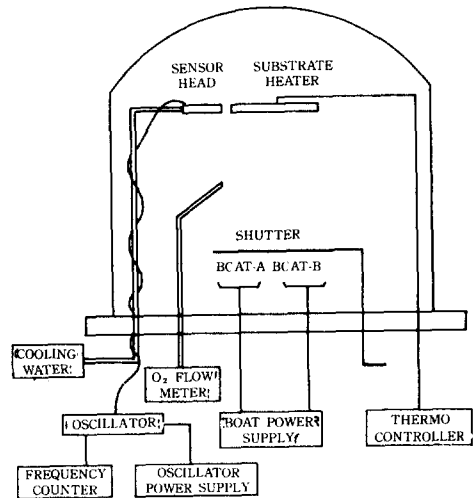


그림 9. Quartz Thickness Monitor 가 설치된 진공 증착기 개략도

Fig. 9. Diagram of Evaporator

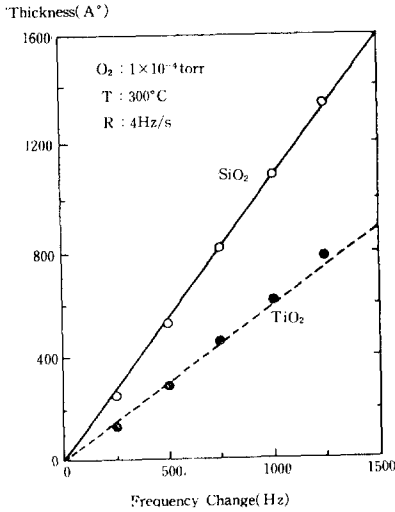


그림 10. 주파수 변화량에 대한 박막두께

Fig. 10. Thin Film Thickness for Frequency change

같은 증착 조건에서는 반복 실험에서 거의 일치하는 결과를 얻었다.

또, 그림 10 으로부터 SiO₂ 막과 TiO₂ 막에 막에 대한 실험식을 식(4)와 같이 얻을 수 있었는데, 표

는 SiO₂와 TiO₂막을 이용한 다층막 간섭필터의 제작에 사용되었는데, 광 투과특성이 컴퓨터에 의한 설계치와 거의 유사하게 나타남으로써 그 신뢰성이 충분히 입증되었다.¹⁰⁾ 이러한 다층막 간섭필터는 막의 굴절율과 각각의 막들의 두께가 광 투과특성에 직접적으로 영향을 미치게 되므로 각각의 박막 두께 및 그 굴절율들이 정확히 제어되어야만 설계치의 투과특성과 비슷하게 나타나기 때문이다.

Quartz Thickness Monitor는 발전 주파수에 불안정성을 가져다 주는 모든 요인들 즉, 전원전압 변동, Source Radiation에 의한 수정의 온도변화등이 제거된 경우 1 Hz의 주파수 변화로서 10⁻⁸ gcm⁻² 정도의 감도를 얻을 수 있으며, SiO₂, TiO₂막 외에도 알루미늄등을 비롯한 모든 금속, 비금속의 증착에 사용될 수 있고 고주파를 이용한 스파터링(Sputtering) 장비에서도 사용이 가능하다.

REFERENCE

- 1) Sauerbrey G., 'Application of Vibrating Quartz to the Weighing of Thin Films and for Microweighing', Z, Physik, 155, p206, 1959
- 2) Virgile e. Bottom, "Introduction to Quartz Crystal Unit Design" Van Nostrand Reinhold Company

증착된 박막의 밀도를 구해보면 각각 1.15g/cm³, 2.05g/cm³가 되는데 이 값은 기관위에 증착된 박막의 밀도(SiO₂: 2.2~2.7g/cm³, TiO₂: 4.29g/cm³)보다도 작게 나타난다. 이것은 가열된 기관과 냉각된 수정 진동자의 온도 차이등과 같은 증착조건 차이에 나타나는 현상이며¹⁰⁾ 기관위에 있는 시료에 증착되는 박막의 두께와 증착율을 측정하는 데는 아무런 어려움이 없다.

$$\Delta f = -0.94 \Delta t \text{ (SiO}_2\text{ 막)} \quad (4)$$

$$\Delta f = -1.67 \Delta t \text{ (TiO}_2\text{ 막)}$$

이 수정 진동자는 초기주파수의 약 2% 정도의 주파수 변화량까지는 식(4)에서 얻은 관계식에 유지되며, 수정 진동자의 알루미늄 전극 위에 증착된 물질은 묽은 NaOH 용액으로 Al을 에칭(Etching)

New York, 1984

- 3) 本間良平, '水晶振動子につりて', 日本の科學と技術, 5, p. 47, 1971
- 4) A. W. Warner and C. D. Stockbridge, J. Appl. Phys., 34, p. 437, 1963
- 5) W. Steckelmacher et al., Trans. 10th Natl. Vaccun Symp., The Macmillan Company, New York, p. 415, 1963
- 6) L. Holland F. Inst. P., "Thin Film microelectronics", London, 1965
- 7) Kasturi L. Chopra, "Thin Film Phenomena", McGraw-Hill Book Company, New York, 1969
- 8) Sauerbrey. G. 'Influence of Electrode Mass on the Vibration Amplitude of Thin Quartz Oscillator Plates', Arch. Elektr. Ubertr., 18, p. 671, 1964

9) '수정을 한식회로 박막 시키는 법' 전자과학 2월호