Check for updates

Journal of Sensor Science and Technology
Vol. 29, No. 5 (2020) pp. 354-359
http://dx.doi.org/10.46670/JSST.2020.29.5.354
pISSN 1225-5475/eISSN 2093-7563

3중 접합 공정에 의한 MEMS 공진기의 웨이퍼레벨 진공 패키징

양충모[1] · 김희연[1] · 박종철[1] · 나예은[1] · 김태현[1] · 노길선[1] · 심갑섭[1] · 김기훈[2,+]

Wafer-level Vacuum Packaging of a MEMS Resonator using the Three-layer Bonding Technique

Chung Mo Yang[1], Hee Yeoun Kim[1], Jong Cheol Park[1], Ye Eun Na[1], Tae Hyun Kim[1], Kil Son Noh[1], Gap Seop Sim[1] and Ki Hoon Kim[2,+]

Abstract

The high vacuum hermetic sealing technique ensures excellent performance of MEMS resonators. For the high vacuum hermetic sealing, the customization of anodic bonding equipment was conducted for the glass/Si/glass triple-stack anodic bonding process. Figure 1 presents the schematic of the MEMS resonator with triple-stack high-vacuum anodic bonding. The anodic bonding process for vacuum sealing was performed with the chamber pressure lower than 5×10^{-6} mbar, the piston pressure of 5 kN, and the applied voltage was 1 kV. The process temperature during anodic bonding was 400 °C. To maintain the vacuum condition of the glass cavity, a getter material, such as a titanium thin film, was deposited. The getter materials was active at the 400 °C during the anodic bonding process. To read out the electrical signals from the Si resonator, a vertical feed-through was applied by using through glass via (TGV) which is formed by sandblasting technique of cap glass wafer. The aluminum electrodes was conformally deposited on the via-hole structure of cap glass. The TGV process provides reliable electrical interconnection between Si resonator and aluminum electrodes on the cap glass without leakage or electrical disconnection through the TGV. The fabricated MEMS resonator with proposed vacuum packaging using three-layer anodic bonding process has resonance frequency and quality factor of about 16 kHz and more than 40,000, respectively.

Keywords: MEMS gyro sensor, Anodic bonding, Wafer level vacuum packaging, Q-factor

1. 서 론

MEMS 기술과 프로세스 기술의 발전으로 전력 소비가 낮고 크기가 소형이고 가격대가 낮은 고성능 MEMS 공진기를 이용해서 휴대기기에서 새로운 애플리케이션이 가능하게 되었다. 다중축 MEMS 자이로센서 구조가 소형화되고 경제적인 가격대로 수 mm²면적의 단일 패키지 속에 디지털 인터페이스를 통합함으로써 휴대기기의 MEMS 자이로 센서 채택이 크게 증가하고 있다. 센서가 작아짐으로 자이로 센서와 가속도 센서를 하나의 센서로 모듈화하여, 다양한 6축 관성센서에 적용을 하고 있는 추세이다[1-6]. MEMS 관성센서에서 자이로 센서는 오래 전부터 해운, 우주, 산업용 로봇공학, 자동차 등의 다양한 애플리케이션에 사용돼 왔다. 최근 10년간 모바일용에 많이 적용이 되고 있으며, 이를 위해서는 기존의 자이로 센서의 크기에 고신뢰성 초소형화가 가능하여야 한다, 이를 위해서는 패키징 기술이 매우 중요하며, 웨이퍼레벨 패키징(WLP)방법을 적용한 자이로 센서의 제작이 필수이다. 웨이퍼레벨 패키징에 필요한 본딩은 Eutectic, Anodic, Fusion 본딩기술이 사용하고 있으며, 각 본딩은 기판 및 접합 소재, 정렬, 접합온도 등에 따라 최종 수율이 좌우된다.

자이로 센서의 성능을 좌우하는 핵심 기술은 Si MEMS부의 형상의 구현 및 센서 내부의 높은 진공화가 필요하다. 따라서, 고진공 웨이퍼레벨 패키징 기술을 적용한 MEMS자이로 센서를 제작하여, 센서내부의 고진공도를 측정하기 위해 Resonator 특성인 공진주파수에서의 Quality Factor값을 확인하여 성능을 확인하여왔으나[7-10], 내부 진공도를 평가하기 위한 정량적인 방법은 아직 제시되지 못하고 있다.

[1] 나노종합기술원 (National Nano Fab Center)
291 Daehak-ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34141, Korea
[2] (주) 유비트로닉스 (Ubitronics)
101/209, 88 Shinwon-ro YongTong-Gu Suwon 16681
[+]Corresponding author: khkim@ubitronix.co.kr
(Received: Sep. 16, 2020, Revised: Sep. 28, 2020, Accepted: Sep. 28, 2020)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

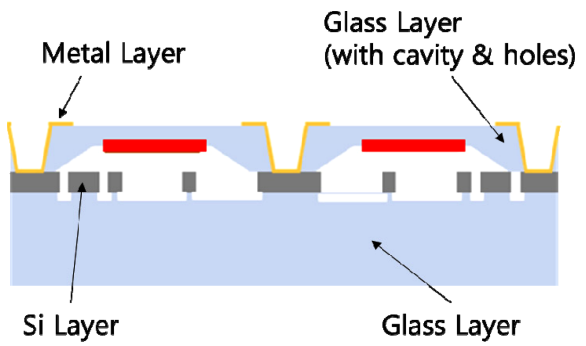


Fig. 1. Concept of MEMS resonator structure

본 연구에서는 기존 모바일용 MEMS 공진기의 성능면에서 우수한 수준의 성능을 확보하고자, SOG(Si on Glass)웨이퍼를 적용하고, 공진기 내부를 고진공화하기 위해 Cap 웨이퍼는 Glass 웨이퍼를 적용하여 제작하였다. 고수율의 진공접합이 가능하도록 Glass-Si-Glass의 세가지 기판을 고진공상태에서 동시에 접합이 가능한 3중접합기술을 적용하였다. 또한, 일련의 웨이퍼레벨 패키징 공정을 8인치 웨이퍼에서 제작을 한 후 웨이퍼 레벨에서의 Q factor와 진공도와의 상관관계를 통해 신뢰성 평가 방법을 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 고성능 MEMS 공진기 구조 설계

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 MEMS공진기 구조 개념도이다. 구조물을 유리층-실리콘층-유리층의 샌드위치 구조 위에 외부와 전기적 연결을 하는 금속층으로 구성된다. 유리층은 각각 진공환경을 구현하기 위해 공동(cavity)과 관통 구멍(hole)이 제작된 기판과 실리콘 구조물의 가공을 위한 희생층 기판의 역할을 한다. 실리콘 층은 MEMS 공정을 이용하여 구조물이 형성되는 층이다. 이러한 MEMS 공진기는 일반적으로 Si 구조물이Comb 구조, 혹은 Ring 구조가 많이 적용되고 있으며, 이러한 구조물이 진공상태에서 기계적인 움직임을 전기적 신호로 변환하여 감지하는 센서이다.

2.2 고성능 MEMS 공진기 구조 설계

MEMS공진기의 구조를 Si wafer에 구현하고, Si 구조물의 구동을 위한 Gap형성하기 위해 SOG(Si on Glass)를 적용하여 구현을 하였다. Si과 Glass를 Anodic Bonding공정을 이용하여, 접합하였으며, 본 연구에서는 16kHz대역의 중심 주파수에서의 공진을 이용하기 위해 Si 두께를 150 um두께로 설계를 하였으며, 이를 구현하기 위해 Si wafer 와 Boro-33 Glass wafer와의 Anodic 본딩 후, Si Grinder장비를 이용하여, Si wafer의 두께 150 um를 구현하였으며, 그 이후, Deep Reactive Ion Etching(DRIE)공정을 이용하여, Si Ring 구조를 형성하였다.

Si 구조물의 부유(Gap)층을 형성하기 위하여, HF(4:1)용액을 이용하여, Si 구조의 하부의 Glass 층을 에칭하여, 형성하였다. 이로써, SOG wafer 부분의 구조를 구현하였으며, 그 이후, 공진특성을 높이기 위해 Si구조 층이 형성된 SOG wafer를 Cap wafer로 덮어, 내부를 고진공화 처리를 하여야 한다. 이를 위해 우선, Cap wafer를 Glass(BORO-33)를 이용하여 제작하였으며, Cap wafer 내부의 고진공화를 위해 아웃개싱 컨트롤(제거) 기술(Getter 증착 기술)이 필요하다.

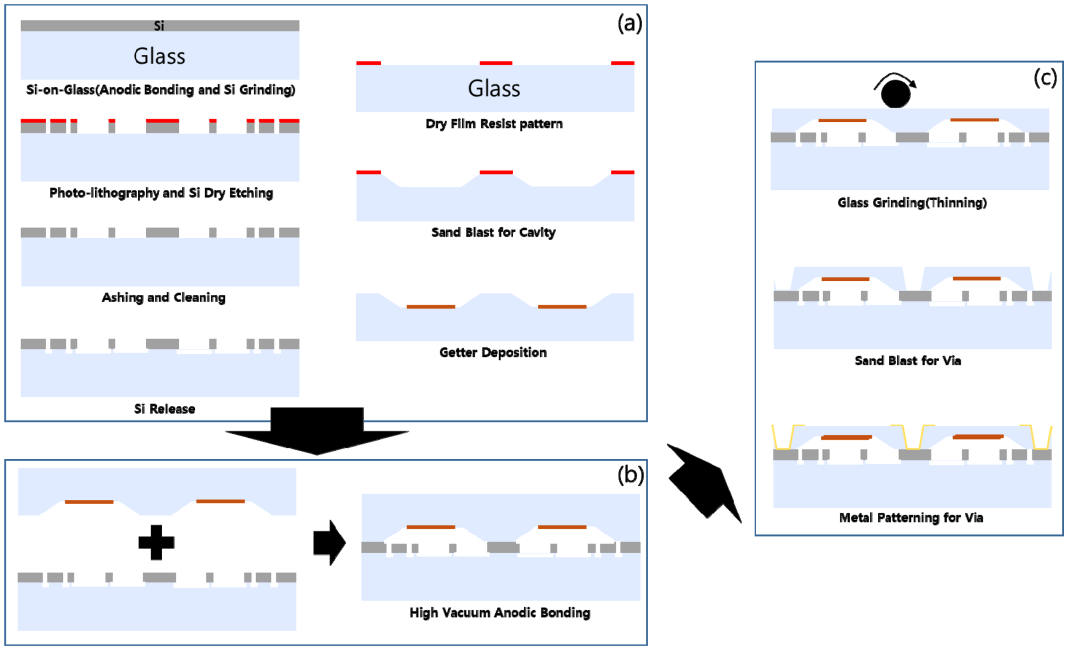


Fig. 2. Process Flow of MEMS resonator

본 연구에서는 Cap wafer내부의 아웃개싱의 흡착을 위한 Getter 물질을 Ti박막을 Cap 내부 천정의 증착으로 형성하였으며, 이는 E-beam evaporator 장비를 이용하여 증착하였다. Getter의 활성화는 본딩 시 가해지는 온도(350 °C)를 통해 실시하였다.

Fig. 2(a)는 위에서 서술한 공정 기술의 공정도이다. MEMS공진기는 금속 패키징. 세라믹패키징, 웨이퍼레벨 패키징 등 다양한 형태의 패키징 기술이 적용되고 있다. 본 연구에서는 대량생산과 패키징 비용 절감 및 초소형화를 위해 웨이퍼레벨 패키징 기술을 개발하여 MEMS공진기에 적용하였다. 본 연구에 적용한 웨이퍼레벨 패키징 기술은 앞에서 언급한 공정 프로세스를 적용하여 제작된 SOG에 구현된 구조 웨이퍼와 센서 내부의 진공도를 유지시키기 위해Cap 웨이퍼를 제작하여, 웨이퍼레벨로 본딩이 가능한 챔버에서 진공도를 1×10^{-6}mbar에서 Anodic Bonding법으로 접합하는 방법을 적용하였다. 구체적인 Anodic 본딩 조건은 400V의 전압을 인가하여, 350 °C 1000N압력으로 접합시간 30분으로 공정을 진행하였다. Fig. 3은 고진공 웨이퍼레벨 Anodic 본딩시 진행된 각각의 공정조건 Flow Chart이다. 그래프에서 붉은색 전압을 200V, 300V, 400V씩 단계로 인가하면서, Si과 Glass과의 계면에서의 전자의 이동으로 발생하는 전류의 증가를 통해 접합을 확인할 수가 있으며, 전압인가와 동시에 접합이 진행될때의 챔버내부의 진공도가 10^{-6}mtorr수준을 확인할 수가 있었다.

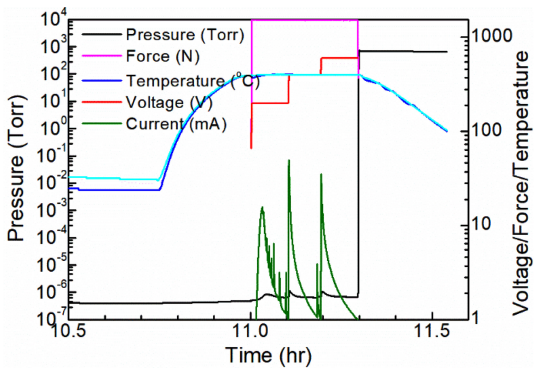


Fig. 3. Anodic Bonding Conditions

고진공으로 패키징된 공진기의 내부에서 발생하는 다양한 가스들로 인하여, 고진공을 유지하는데 방해가 되는 현상을 Getter 재료를 패키징된 공진기 내부 흡착시켜 고진공을 유지하는 기술이 최근에 적용되고 있으며, 본 연구에서는 MEMS 소자에 많이 적용하고 있는 Ti박막을 Getter재료로 선정하여 Cap Wafer 내벽에 증착시켜 고진공을 유지하였다. Fig. 4는 고진공 웨이퍼레벨 본딩 후 Cap 웨이퍼 방향에서 Glass를 투과하여 형성된 Ti Getter형상을 본 광학현미경 사진이다. Ti Getter는 SUS재질의 Shadow Mask를 이용하여 E-beam evaporator 장비로 증착을 하였으며, 약 500 nm의 두께로 증착하으며, Cap wafer 내부에 정확히 증착되었음을 확인할 수 있었다.

패키징된 공진기의 구동을 위해서 센서내부와 패키징된 외부와의 전극의 연결공정이 필수이다. 이를 위해, 본 연구에서는 수직배선연결방식(Vertical Feed Through)을 적용하여 공정개발을 하였으며, Cap wafer재질이 Glass이므로 VFT공정을 Sand Blast 방법을 적용하여, Cap 내부의 공진기와 연결을 하였다. Glass 두께가 두꺼우면, Sand Blast 공정의 특성상 75도 경사로 Hole이 형성되어, 결국 센서 전체의 면적이 넓어지는 문제가 발생하기 때문에 Cap wafer의 두께를 줄이기 위해 고진공 웨이퍼 레벨 본딩 후 Cap wafer를 Grinding하여 두께를 줄였으며, 그 이후, 센서 내부와 외부를 연결하는 VFT의 Via공정을 진행하였다. Via 형성 후, Metal 은 Al을 Sputtering법으로 증착을 하였으며, Via 내부와 PAD와의 단차 패터닝을 위해 Photo-Lithography를 Spray coating공정을 적용하여 공정을 그림 Fig. 2(c)와 같이 진행하였다. Fig. 5는 MEMS 공진기 단면도 (a) 이고, Fig. 5(b) 는 제작된 MEMS공진기의 광학현미경 단면 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이, Via 형성이 Si wafer 면과 닿아 있으며, Al 전극이 경사면에 단선없이 고르게 패터닝이 형성되었음을 확인할 수 있었다.

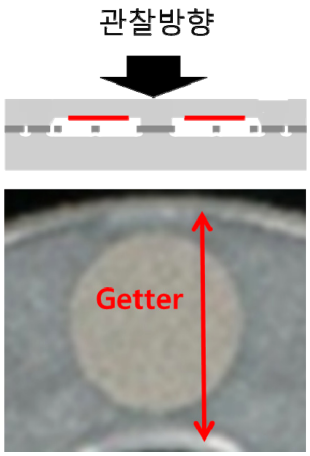


Fig. 4. Photo of Ti Getter Formation

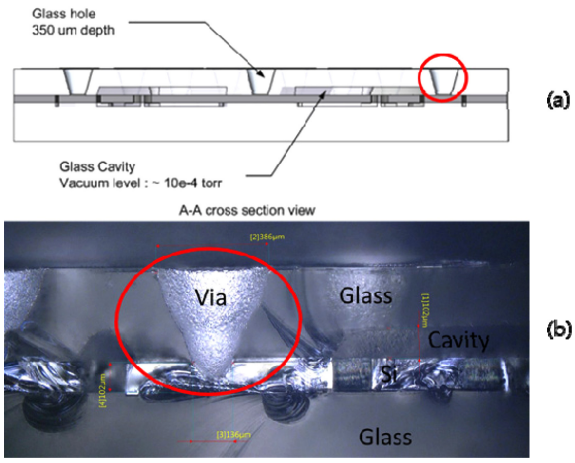


Fig. 5. (a) Cross-Sectional structure and (b) Photo of Vertical Feed-Through (VFT) of MEMS resonator

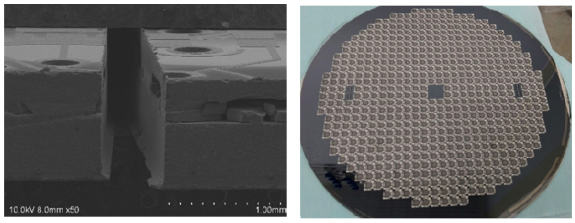


Fig. 6. (a) Structure of whole MEMS resonator SEM image (b) Structure of whole MEMS resonator optical microscope image

Fig. 6(a)는 최종적으로 제작된 MEMS공진기의 SEM 이미지이며, 이를 통한 Glass/Si/Glass의 3중 접합구조에서, Si 구조물에서의 Gap형성, Glass Cap구조 모양 및 Vertical Feed Through용 Al Metal PAD형상 등의 공진기 전체이미지를 SEM으로 확인할 수가 있었다. Fig. 6(b)는 본 연구에서 8인치 웨이퍼에서 제작된 MEMS 공진기의 전체 광학현미경 이미지이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 웨이퍼레벨 진공 패키지의 성능 측정

제작된 MEMS 공진기의 성능을 확인하기 위해 중심주파수에서의 Quality Factor 값으로 확인을 하고자 하였다. Q값은 주기적 진동시스템에서의 에너지의 손실에 대한 값을 나타내는데 그 값은 수식(1)과 같이 전체 에너지를 손실량으로 나눈 값으로 표현된다.

$$Q = \frac{U_{total}}{\Delta U_{loss}} \tag{1}$$

관성센서는 일반적으로 2차 시스템으로 표현을 할 수 있고 그 개념은 수식(2)와 같다. 이러한 시스템을 평형방정식으로 유도를 하면 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F \tag{2}$$

m은 공진자의 질량, b는 감쇠계수, k는 스프링계수, x는 변위 그리고 F는 힘이다. 이 식은 질량 m으로 양변을 나누어서 아래와 같이 표현되고

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F}{m} \tag{3}$$

여기서 감쇠비는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta = \frac{b}{2m\omega_0} \tag{4}$$

감쇠비가 1보다 작은 경우 시스템은 경감쇠 시스템이 되고 이

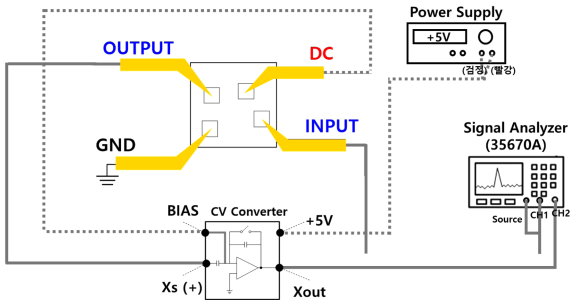


Fig. 7. Conceptual Diagram of MEMS resonator Measurement System

때 Q값은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = \frac{1}{2\zeta} \tag{5}$$

Fig. 7은 8인치 웨이퍼 레벨 공진기의 특성 평가 환경을 나타내는 모식도이다. Dynamic signal Analyzer (HP35670A)를 이용하여 구조물의 주파수응답특성을 측정하고 이 때 얻은 감쇠계수 값을 Q값으로 환산한다. 진공도에 변화가 생기면 감쇠계수 값이 변화하게 되고 역시 Q값도 변화하게 된다. 감쇠계수에 영향을 주는 요소에는 패키지 내부의 진공도와 온도에 의한 구조재료의 영향이 있다. 본 시험에서는 온도의 영향을 배제하므로 Q값에 영향을 주는 주요 인자는 공기에 의한 감쇠계수라고 생각할 수 있다. 따라서 시험결과로 진공도의 변화를 확인 할 수 있다. 특성 평가 시료는 Probe-station의 진공 (~$10e^{-5}$ 수준) 상태 이거나, 진공 패키징 한 상태이다. CV converter 는 소자 특성에 맞게 특수 제작한 일종의 amplifier 이다. DC Power supply 로 일정한 전압 +5V을 인가한 상태에서 Signal Analyzer 로 Frequency sweep 을 진행하였다.

Frequency sweep 조건은 Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이, Center frequency 를 16.0 또는 16.5 kHz 로 설정하였는데, 이는 소자 설계의 목표값이다. Span frequency 는 2회에 걸쳐 범위를 좁혀 나간다. 1차로 Center frequency 기준으로 ±500 Hz 범위에서 공

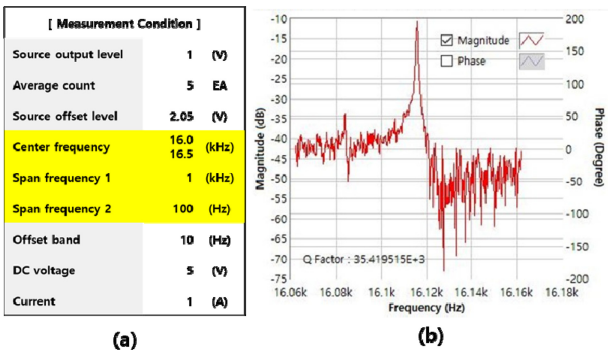
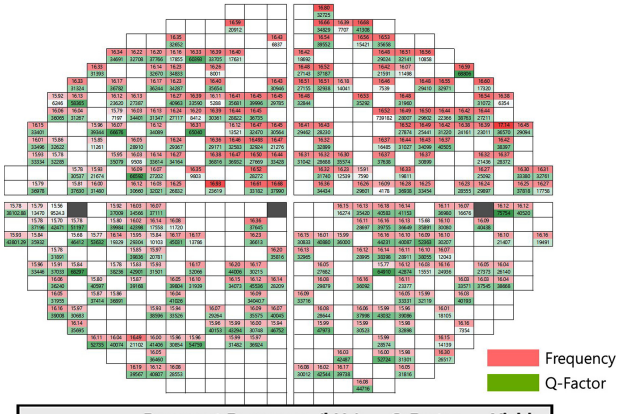


Fig. 8. (a) Signal Analyzer Evaluation Conditions and (b) Measured Q-factor



	Resonant Frequency (kHz)	Q Factor	Yield
min	15.56	4178	
MAX	17.14	739182	
AVE	16.18	34532	
STD	0.24	42787	
EA	294		294
Total chip			550
Yield			53%
Q Factor	Above 5k	293	53%
	Above 10k	279	51%
	Above 20k	252	46%
	Above 40k	50	9%

Fig. 9. Measurement Result of MEMS resonator in 8 inch wafer

진 주파수 범위를 찾고, 2차로 Center frequency 기준으로 ±50 Hz 범위에서 보다 정확한 공진 주파수 지점을 찾는다. 이 때 찾은 공진 주파수(peak frequency)에서의 Damping coefficient(ζ)를 산출해낸다. 산출한 Damping coefficient 으로 Q factor 를 계산하여 얻는다. Q factor(Q) 계산식은 Q=1/2ζ 이다. Fig. 8(b)의 그래프에서와 같이 공진 주파수에서의 Q값을 확인 할 수가 있었다.

Fig. 9에서 이러한 조건으로 8인치 웨이퍼상에서 제작된 MEMS 공진기의 특성 평가 결과를 보여준다. 웨이퍼내에서의 붉은색은 중심 주파수를, 초록색은 Q-Factor값을 나타낸다. 수율은 chip의 Q factor 확인 여부에 따라서 양불 판정을 정의하였다. 총 chip 550개 중에서 Q factor 확인은 293개로, 53%의 수율을 확인하였고, Q factor 10k 이상은 279개로 51%의 수율을 확인하였다.

3.2 웨이퍼레벨 패키징된 공진기의 내부 진공도와 Q-Factor의 상관관계

본 연구에서 고진공 웨이퍼레벨 패키징 공정이 적용된 MEMS 공진기의 내부 진공도를 예측하기 위해 진공챔버를 이용하여, 각 진공도 별로 Q-factor값을 측정하여, Fig. 10과 같이 그래프로 나타내었다. Q값이 10,000이상이면, MEMS 공진기 내부의 진공도가 10 mTorr이하임을 확인할 수가 있었으며, 20,000이상

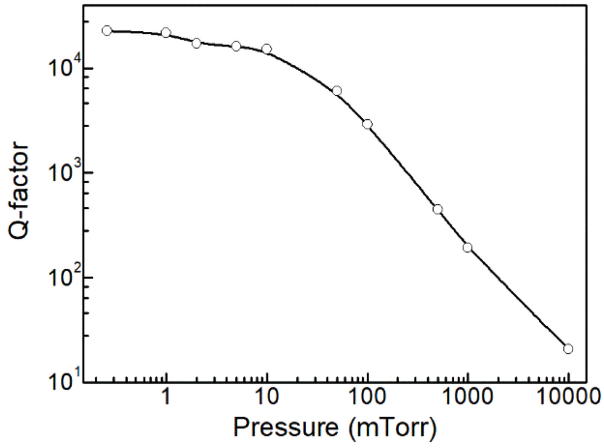


Fig. 10. Q-factor value according to vacuum degree change

의 Q값을 도출하기 위해서는 센서내부의 진공도를 1 mTorr이하로 유지하여야 가능함을 알 수가 있었다.

4. 결 론

웨이퍼레벨 고진공 패키징 기술을 적용한 MEMS 공진기의 설계와 제조, 웨이퍼레벨에서의 Q-factor의 측정 및 웨이퍼 레벨의 성능평가 기술을 확보하였다. 본 연구를 통하여 개발된 고성능 MEMS 공진기는 향후 고사양의 자이로센서 적용이 필요한 드론급의 민수 및 군수분야에 적용가능하리라 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 한국연구재단 과제(2015M3A7B7045376, 2020M3H4A3081763)와 정보통신기획평가원의 ICT R&D 혁신 바우처 지원사업 과제(2019-0-01296)의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

[1] M. Lemkin, B. E. Boser, D. M. Auslander, and J. H. Smith, “A 3- axis force balanced accelerometer using a single proof-mass”, *Proc. Int. Solid State Sens. Actuators Conf.*, pp. 1185-1188, Chicago, USA, 1997.

[2] K. Kwon and S. Park, “A bulk-micromachined three-axis accelerometer using silicon direct bonding technology and polysilicon layer”, *Sens. Actuators, A*, Vol. 66, No. 1, pp. 250-255, 1998.

[3] R. Toda, N. Takeda, T. Murakoshi, S. Nakamura, and M. Esashi, “Electrostatically levitated spherical 3-AXIS accelerometer”, *Proc. IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst.*,

pp. 710-713, Las Vegas, USA, 2002.

[4] T. Fujita, T. Mizuno, R. Kenny, K. Maenaka, andM. Maeda, “Two-Dimensional Micromachined Gyroscope”, *Proc. Int. Solid State Sens. Actuators Conf.*, pp. 887-890, Chicago, USA, 1997.

[5] S. An, Y. S. Oh, K. Y. Park, S. S. Lee, and C. M. Song, “Dual-axis microgyroscope with closedloop detection”, *Sens. Actuators A*, Vol. 73, No.1, pp. 1-6, 1999.

[6] T. Juneau, A. P. Pisano, and J. H. Smith, “Dualaxis operation of a micromachined rategyroscope”, *Proc. Int. Solid State Sens. Actuators Conf.*, p. 883-886, Chicago, USA, 1997.

[7] P. Monajemi and F. Ayazi, "A High-Q Low -Voltage HARPSS Tunable Capacitor”, *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Vol. 2, pp. 749-754, 2005.

[8] M. F. Zaman, A. Sharma, and F. Ayazi, "High Performance Matched-Mode Tuning Fork Gyroscope”, *IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mech. Syst.*, pp. 66-69, Istanbul, Turkey, 2006.

[9] M. C. Lee, S. J. Kang, K. D. Jung, S. H. Choa, and Y. C. Cho, "A high yield rate MEMS gyroscope with a packaged SiOG process”, J. micromech. Microeng., Vol. 15, No. 11, pp. 2003-2008, 2005.

[10] B. Boxenhorn and P. A. Greiff, "Vibratory micromechanical gyroscope", *AIAA Guid. Control Conf.*, pp. 1033-1040, Mineapolis, USA, 1998.