

MEMS Gyroscope를 위한 feed-through 노이즈 제거 기법

논문
58-11-26

Feed-through Noise Reduction Technique for MEMS Gyroscope

박 경 진* · 강 성 목** · 백 창 욱*** · 김 호 성†
(Kyung-Jin Park · Seong-Mook Kang · Chang-Wook Baek · Ho-Seong Kim)

Abstract - Since the dimensions of MEMS gyroscope are very small compared to those of conventional gyroscope, MEMS gyroscope should be able to measure charge of pico-coulomb caused by very small change of electrodes gap. However, feed-through signal from driving electrodes to the sensing electrodes due to the electromagnetic coupling is much greater than the sensing signal, which degrades the sensitivity of MEMS gyroscope. This paper introduces the feed-through noise canceling technique using dummy port and confirms the feasibility of feed-through noise canceling experimentally. Experimental results shows that, when driving signal is 6 Vpp, 30 kHz, feed-through signal of vacuum packaged Si Gyroscope decreases from -53.2 dBm to -77.1 dBm by using feed-through reduction technique. Q-factor that could not be measured without noise reduction is measured to be about 2500 and resonance frequency to be 7.018 kHz.

Key Words : MEMS Gyroscope, Feed-through, Noise reduction, Q-factor

1. 서 론

Gyroscope는 Coriolis effect를 이용하여 물체가 회전하는 각속도를 측정하는 센서이다.[1] 이는 비행기의 관성유도장치, 인공위성의 위치제어장치, 정밀 유도 미사일 등에 장착되어 각속도에 의한 미세한 변위가 발생하는 것을 측정하게 된다. 최근에는 반도체 공정이 발달하면서 MEMS Gyroscope의 개발이 활발해 지고 있다. MEMS Gyroscope는 크기가 매우 작고 대량생산으로 인해 값이 싸서 휴대전화, 게임기, 카메라, 차량용 네비게이션 등 휴대가 가능한 만큼 작은 전자제품에도 많이 사용되며 더욱 많은 분야에 적용가능하다.[2] 그러나 MEMS 구조물은 반도체 공정에 의해 제작되므로 그 크기가 매우 작아서 MEMS Gyroscope에서 얻어지는 신호의 크기는 수 pico-coulomb 단위의 매우 작은 신호이다. 그러므로 MEMS Gyroscope의 성능 향상을 위해서는 노이즈 문제를 반드시 해결해야한다. 특히 실제 제작된 MEMS 구조물은 전극과 전극사이의 간격이 수 십 μm 단위이기 때문에 전극이 직접 연결되지 않아도 공간을 통해서 전달되는 Feed-through noise가 매우 심각한 문제이다.[3] 구동 전극에 인가된 구동신호가 공간을 통해서 검출 전극으로 Feed-through되면 그 크기는 구동에 의해 발생하는 검

출 신호에 비하여 10배 이상 크기 때문에 Feed-through 신호에 검출 신호가 가려져 측정할 수가 없다. 또한 Feed-through 신호는 검출 신호와 주파수도 같기 때문에 필터를 이용하여 제거할 수 없으므로 새로운 제거 기법이 필요하다.

본 논문에서는 MEMS Gyroscope의 심각한 문제가 되는 Feed-through 노이즈를 제거하기 위해 구동 신호와 180° 위상차가 나는 신호를 dummy port에 인가하여 상쇄 기법을 고안하였고 실험을 통하여 그 효용성을 증명하였다. 먼저 본 연구에서 개발 중인 MEMS 구조물에 대해 소개하고 Feed-through 신호 제거 기법에 대한 설명과 실험 결과를 제시하였다. 또한 본 연구에서 제안한 Feed-through reduction 기법을 적용한 MEMS Gyroscope의 Q-factor 측정과 self-oscillation 실험 결과를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 MEMS 각속도계의 구조

본 연구에서는 현재 활발히 개발되고 사용되는 Si 기반 MEMS Gyroscope 보다 sensitivity가 높은 gyroscope를 개발하기 위해 Quartz 기반 MEMS Gyroscope를 개발중이다. Quartz 기반의 MEMS 구조물은 Q-factor가 수 만 단위로 Si 기반의 MEMS 구조물에 비해 수 십 배 커서 sensitivity가 높을 것으로 예상된다.[1] 그러나 공정 기술이 Si 기반 공정에 비해 정밀하지 못하여 공정 기술 개발에 힘쓰고 있다. 그림 1은 Quartz resonator의 Q-factor를 측정하기 위해 제작한 수정 진동자(DETF : Double Ended Tuning Fork, 이하 DETF) 전체의 모습이다. 중앙에 tuning fork 부분은 제작 후 부유가 되는 부분이고 나머지 검출전극, 구동전극,

* 준 회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 석사과정
** 정 회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 박사과정
*** 정 회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 교수
† 교신저자, 정회원 : 중앙대 공대 교수
E-mail : hkim@cau.ac.kr
접수일자 : 2009년 8월 21일
최종완료 : 2009년 9월 7일
※ 본 논문은 본 학회 2009년 하계학술대회 학술위원회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회 심사 후 본 논문지에 게재 되었음.

고정부 부분은 제작 후에도 고정되어 있는 부분이다. 소자 전체 사이즈는 $1350\ \mu\text{m} \times 2800\ \mu\text{m}$ 이며, 모드 이격을 위해 필요한 shoulder 의 너비와 길이는 각각 $110\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m}$ 이다.

DETF의 구동 원리는 tuning fork를 중심으로 양 옆의 구동전극에 동 위상의 구동신호가 인가되면 부유되어 있는 tuning fork가 그림 2에 나타난 것과 같이 양옆으로 벌어졌다가 모아졌다하는 운동을 반복하게 된다. 이때 나머지 네 개의 검출전극과 tuning fork 사이의 간격 변하면서 커패시턴스 변화량 ΔC 가 발생하고 bias 전압 V_{bias} 에 비례하여 발생하는 전하의 변화량 Δq 가 발생한다.[1] 이를 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\Delta q = V_{Bias} \Delta C \quad (1)$$

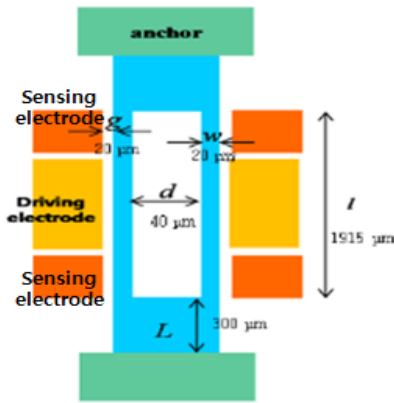


그림 1 수정 진동자(DETF)의 모식도

Fig. 1 Mimetic diagram of Quartz resonator(DETF)

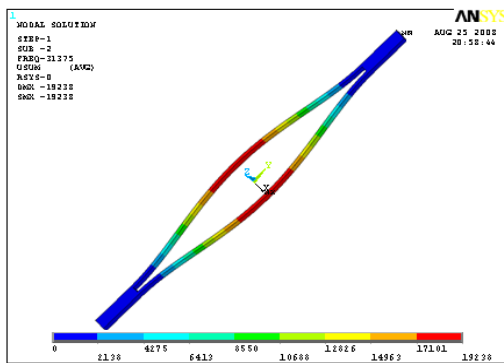


그림 2 DETF의 tuning 모드 시뮬레이션 (주파수 31.375 kHz)

Fig. 2 Tuning mode simulation of DETF (31.375 kHz)

2.2 Feed-through 신호의 측정

Feed-through 신호의 특성을 알아보기 위해 그림 3과 같이 구동전극 한 곳에서 구동신호를 인가하고 나머지 구동전극을 검출전극으로 사용하였다. 구동전극과 검출전극 사이의 거리는 약 $120\ \mu\text{m}$ 로 매우 가까워서 Feed-through 현상에 영향을 많이 받는다. Feed-through 신호의 크기를 확인하

기 위해서 실험한 결과, 그림 4에 나타난 것과 같이 구동신호가 6Vpp일 때 검출전극에서 측정된 Feed-through 신호는 구동신호와 위상이 같고 크기가 400mVpp으로 구동신호의 약 6.66%였다. 검출 전극에서는 구동 신호에 의해 DETF가 tuning 모드로 운동하여 발생한 전하에 의한 신호만 출력되어야 하지만 구동 신호가 Feed-through되어 출력 단에서 측정되었다. feed-through 신호의 크기는 약 -40dBm 이고 실제 운동에 의해 발생하는 전하에 의한 신호는 약 -70dBm 이다. 그러므로 Feed-through 신호를 제거해야만 운동에 의해 발생한 신호를 측정할 수 있다.

본 연구에서는 이 Feed-through 신호를 제거하기 위해 구동 신호와 180° 위상차가 나는 신호를 DETF의 dummy port에 인가하여 간섭현상을 이용하는 상쇄 기법을 고안하고 실험하였다.

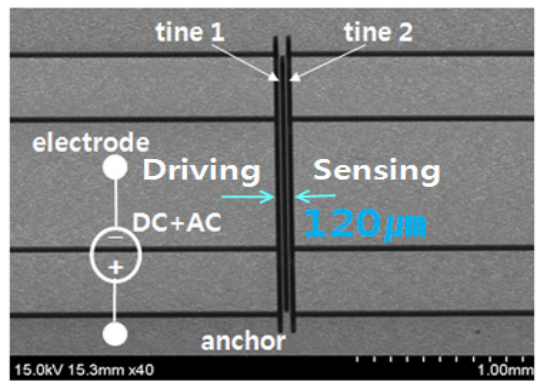


그림 3 DETF 수정 진동자의 SEM 사진

Fig. 3 SEM of DETF

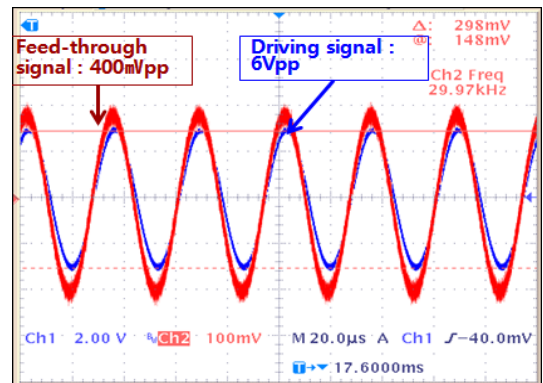


그림 4 구동전극에 인가된 구동신호(6Vpp)와 검출전극에서 측정되는 feed-through 신호(400mVpp)

Fig. 4 Induced driving signal(6Vpp) at driving electrode and detected feed-through signal(400mVpp) at sensing electrode

2.3 Dummy port를 이용한 Feed-through 노이즈 상쇄 기법

본 연구에서 고안한 Feed-through 신호 상쇄 기법은 간섭현상을 이용한 것이다. 그림 5에서 나타난 것과 같이 구동 전극에 함수발생기로 구동 신호를 인가하고, inverting

amp를 사용하여 Dummy port에 구동 신호와 위상차가 180°인 신호를 인가한다. 그러면 그림 6과 같이 검출 전극에 구동 전극으로부터 구동 신호가 feed-through 되고, 또한 Dummy port로부터 구동 신호 180° 위상차를 가진 canceling 신호가 feed-through 된다. 그 결과 검출 전극에서는 간섭현상에 의해 feed-through된 신호는 제거된다. 이때 검출되는 신호는 구동신호와 90° 위상차를 가지므로 canceling 신호에 의해 제거되지 않는다.[1] feed-through 현상이 제거되면 검출전극에서는 구조물의 운동에 의해서 발생하는 전하를 측정할 수 있게 된다.

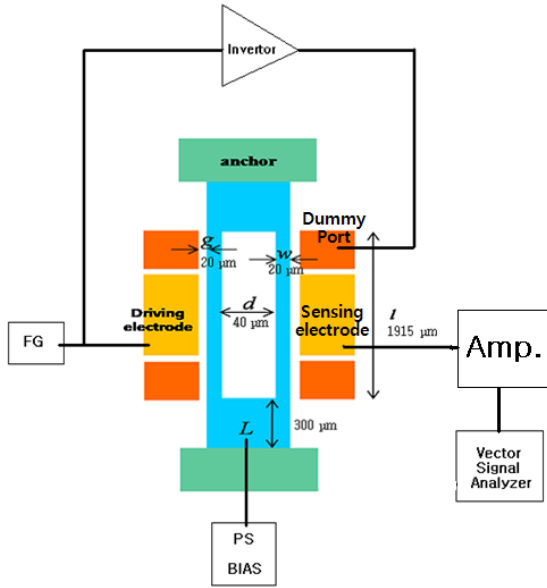


그림 5 Dummy port를 이용한 Feed-through reduction 회로 실험 환경 블록도
 Fig. 5 Feed-through reduction circuit using dummy port experimental block diagram

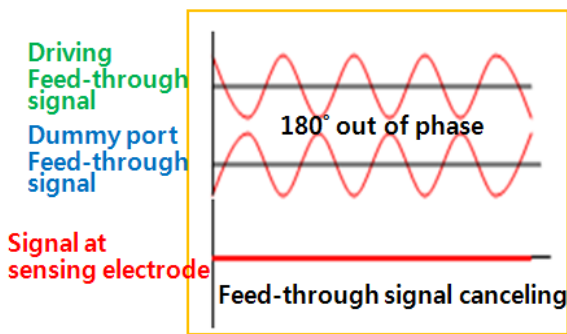
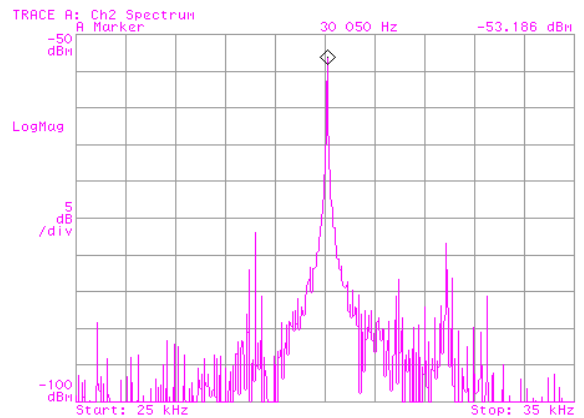


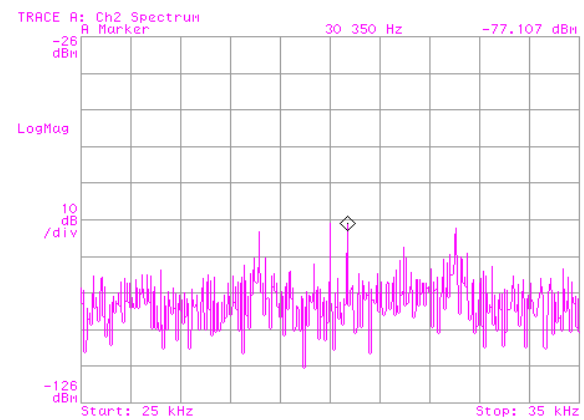
그림 6 간섭현상을 이용한 Feed-through 노이즈 제거 기법
 Fig. 6 Feed-through noise reduction technique using interference effect

그림 5에서 나타난 회로를 이용하여 실험한 결과를 그림 7에서 나타내었다. 이때 사용된 vector signal analyzer는 HP 89410A로 DC부터 10 MHz까지 측정가능하며 resolution b/w가 312.5 uHz까지 설정이 가능하다. 그림 (7-a)는

Dummy port를 이용한 Feed-through reduction 회로에서 상쇄 기법을 적용하지 않은 경우이고, 그림 (7-b)는 적용한 경우를 나타내었다. 구동신호는 6 Vpp, 30 kHz로 인가하고 Feed-through reduction을 적용하지 않은 경우 30 kHz에서 약 -53.2 dBm이었던 신호가 적용 후에 약 -77.1 dBm으로 약 24 dB가 줄어드는 것을 확인하였다. 이 때, 구동전극과 검출전극 사이 거리와 dummy port와 검출전극 사이거리가 다르기 때문에 인버터의 gain을 조절하여 feed-through 신호가 가장 작아지는 값을 찾아야한다. 또한 구동 신호와 반전 신호의 위상차가 정확히 180°가 나지 않을 경우 노이즈 제거의 한계점이 있다.



(7-a)



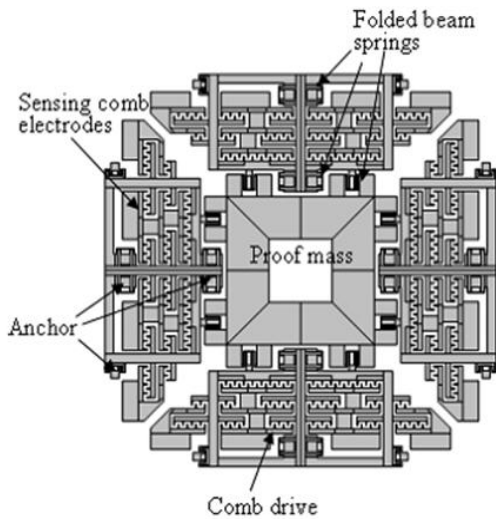
(7-b)

그림 7 Spectrum analyzer로 측정한 Feed-through noise reduction 결과
 Fig. 7 Experimental result of feed-through noise reduction measured by spectrum analyzer

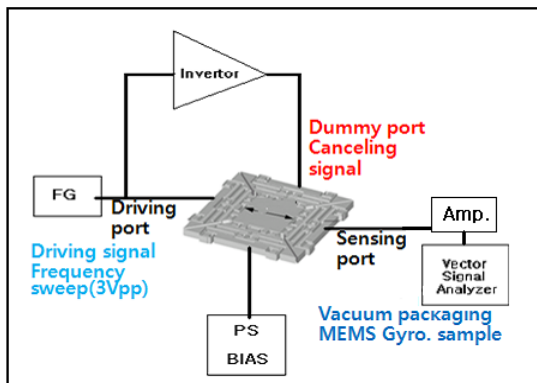
2.4 Q-factor 측정

Feed-through noise reduction 회로를 이용하여 MEMS 구조물의 Q-factor 측정 가능성을 확인하기 위해 진공 패키징된 Si 기반 MEMS 자이로스코프를 측정하였다. 그림 8에 실험에 사용한 Si 기반 MEMS 자이로스코프의 평면도(8-a)와 회로의 개요도(8-b)를 나타내었다. 이 MEMS 자이로스코프는 두 개의 구동 전극에 180° 위상차가 있는 구동신호를 각각 인가하면 중앙의 proof mass가 Coriolis force에 의

해 움직이고 이때 sensing comb 사이의 간격이 변하면서 전하가 발생하는 구조이다.[4] 그러나 Feed-through noise reduction 회로를 적용하기 위해서 하나의 구동 전극만 구동 신호를 인가하고 네 개의 검출 전극 중에서 하나의 검출 전극을 dummy port로 사용하였다. 그 결과 그림 9에서 나타낸 것과 같이 Feed-through noise 상쇄 기법을 적용하지 않을 경우 노이즈 레벨이 -45.6 dBm(9-a)이었던 것이 상쇄할 경우 -95.3 dBm(9-b)로 약 50 dB이나 줄어들어 구조물의 운동에 의해 발생하는 전하를 측정하였다. 그 결과 그림 10에서 나타낸 것과 같이 Bias(5V)를 on 할 경우 약 7.016kHz에서 공진하는 것을 볼 수 있었다. 이 때 Q-factor는 약 2500이었다. 공진 점에서 신호의 크기는 -71.197dBm으로 Feed-through reduction 회로를 사용하지 않았을 경우 Feed-through된 신호의 1/10보다 작았다. 그러므로 Feed-through reduction 회로를 사용해야만 공진신호를 측정할 수 있었다.

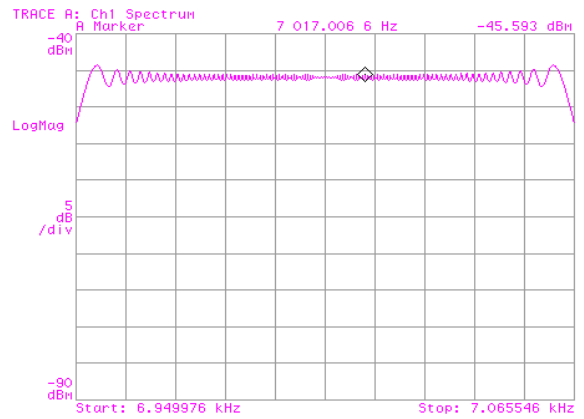


(8-a)

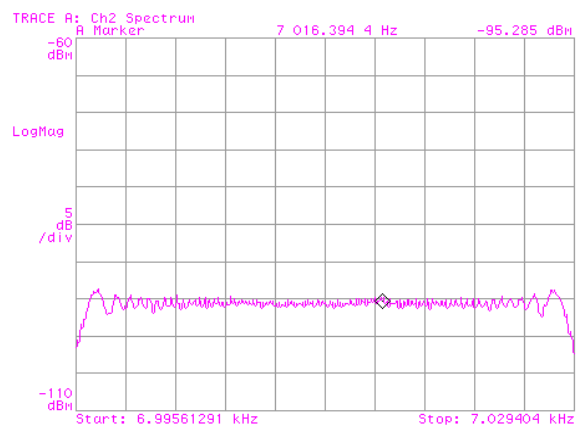


(8-b)

그림 8 Si 기반 MEMS Gyroscope의 평면도(8-a)와 Feed-through noise reduction 회로 적용 블록도(8-b)
 Fig. 8 Si based MEMS gyroscope plane figure(8-a) and Feed-through noise reduction circuit diagram applied to Si based MEMS gyroscope(8-b)



(9-a) Canceling off



(9-b) Canceling on

그림 9 feed-through noise reduction 회로의 노이즈 제거 효과
 Fig. 9 The effect of feed-through noise reduction circuit

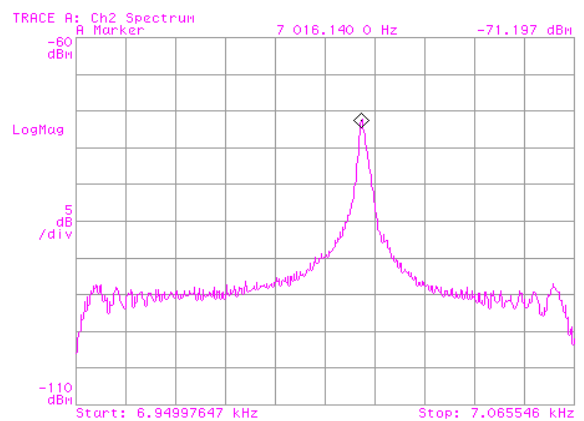


그림 10 Feed-through reduction 회로를 사용하여 Bias(5V) 인가 시, 공진점(7.016kHz) 측정
 Fig. 10 The resonance point(7.016kHz) measurement under Bias(5V) by using feed-through noise reduction circuit

2.5 Self oscillation loop

Feed-through reduction 회로를 이용하여 MEMS 구조물의 self oscillation 실험을 하였다. 그림 11과 같이 self oscillation loop를 형성하고 DC 전원만 각 소자에 인가하게 되면 그림 12와 같이 공진점 약 7kHz에서 self oscillation하는 것을 확인 할 수 있었다. self oscillation loop의 동작 원리는 DC 전원을 인가하면 이 때 발생하는 white noise에 의해 MEMS Gyroscope가 운동하는데 고유 진동주파수에서 가장 큰 전하량 변화가 나타난다. 이것이 charge amp에 의해서 전압 신호로 변환되고 band-pass filter를 거쳐 구동신호와 위상을 맞추기 위한 phase shifter를 통과하게 된다. 그리고 AGC(automatic gain control) 회로에 의해 일정한 크기로 MEMS 구조물을 구동시키게 된다. 이 과정이 반복되면서 구조물의 고유 진동주파수에서 공진점이 나타나게 된다. 그러나 feed-through reduction 회로를 이용하여 노이즈를 제거하지 않으면 MEMS 구조물의 공진점에서 oscillation 하지 못하고 다른 노이즈에 의해 공진점이 흔들리게 된다.

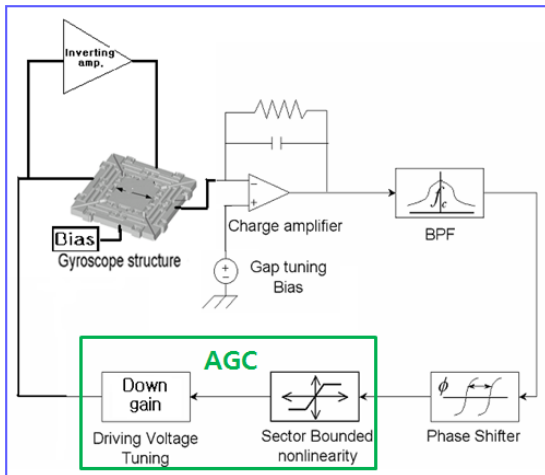
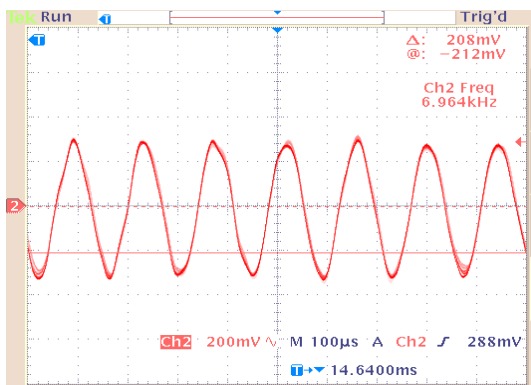
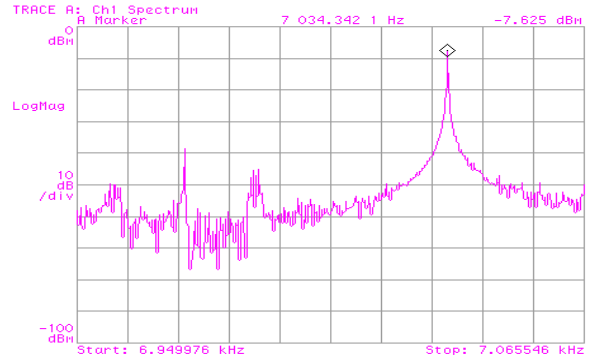


그림 11 Feed-through noise reduction 회로를 사용한 self oscillation loop

Fig. 11 Self oscillation loop using feed-through noise reduction circuit



(12-a) Oscilloscope signal



(12-b) Frequency response of self oscillation

그림 12 feed-through reduction 회로를 사용한 경우 MEMS Gyroscope의 공진점에서 self oscillation

Fig. 12 Self oscillation on MEMS gyroscope resonance point by using feed-through noise reduction circuit

3. 결 론

본 논문에서는 이 Feed-through 노이즈를 제거하기 위해 구동 신호와 180° 위상차가 나는 신호를 DETF의 dummy port에 인가하여 간섭현상을 이용하는 상쇄 기법을 고안하고 feed-through reduction 회로를 적용한 실험을 통하여 그 효용성을 증명하였다. 그 결과 수정기반 DETF의 경우 구동 신호가 6Vpp, 30kHz일 때, Feed-through reduction 회로를 적용하지 않은 경우 30kHz에서 -53.186dBm이었던 신호가 적용 후에 -77.107dBm으로 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 Si 기반 MEMS Gyroscope의 경우는 Feed-through 노이즈 때문에 측정 할 수 없었던 Q-factor를 Feed-through reduction를 적용하여 실험을 통하여 약 2500임을 측정하였고, MEMS gyroscope의 공진점 약 7 kHz에서 self oscillation 하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 Feed-through 노이즈 제거 기법을 사용할 경우 간단히 dummy port 하나만 추가함으로써 Feed-through 노이즈를 제거 할 수 있으므로 MEMS Gyroscope 설계가 간단해 지고 기존의 Guard-ring 방법에 비해 wire bonding도 용이해 진다고 사료된다.[6][7]

향후 feed-through reduction 회로의 정밀도를 향상 시켜 feed-through 신호를 더욱 완벽히 제거할 것이다. 이를 이용하여 수정기반 DETF의 진공패키징이 된 샘플을 제작되면 Feed-through noise reduction 회로를 적용하여 Si 기반 MEMS Gyroscope 보다 더 큰 Q-factor를 실험을 통해 확인할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 방위사업청 지정 국방MEMS특화연구센터의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Cent Acar, Andrei Shkel, "MEMS Vibratory Gyroscopes Structural Approches to Improve Robustness", Springer, 2009
- [2] 박경진, "MEMS 각속도계를 위한 AGC 및 전하증폭기", 대한전기학회, 하계학술대회 논문초록집, p 401, 2008
- [3] Matthew A. Hopcroft, "Temperature-Stabilized Silicon resonator for frequency references", 2007
- [4] 이준영, "Design, fabrication and measurement of a single crystalline silicon high precision micro-gyroscope", 2006
- [5] Henry W. Ott, "Noise reduction techniques in electronic systems", WILEY, second edition, ch 6, 1988
- [6] Tim Williams, "EMC for Product Designers", NEWNES, second edition, 1996
- [7] Mark I. Montrose, "Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance", IEEE PRESS, April 1995



김 호 성 (金 鎬 成)

1957년 10월 11일생. 1980년 서울공대 전기 공학과 학사 1982년 동 대학원 전기 공학과 석사. 1992년 SUNY at Buffalo 전기공학과 박사. 1983년 9월-1986년 8월 금성 전기 기술연구소 주임 연구원. 1993년 3월-현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수

Tel : 02-820-5292

Fax : 02-825-9210

E-mail : hkim@cau.ac.kr

저 자 소 개



박 경 진 (朴 硬 鎭)

1981년 7월 31일생. 2008년 중앙대학교 전자전기공학부 학사. 2008년 3월-현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정.



강 성 목 (姜 聖 默)

1984년 3월 3일생. 2007년 중앙대학교 전자전기공학부 학사. 2009년 중앙대학교 전자전기공학부 석사. 2009년 3월-현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정.



백 창 욱 (白 昌 煜)

1970년 11월 12일생. 1993년 서울대 전기 공학과 졸업. 2000년 서울대 전기컴퓨터 공학부 대학원 졸업 (공박). 2000-2002년 서울대 반도체공동연구소 특별연구원. 2002-2005년 서울대 전기컴퓨터공학부 BK 조교수. 현재 중앙대학교 전자전기공학부 부교수.