2017년 12월

17ZB2100-01-3130P

스마트센서용 전기적 감지기반 고정밀 나노공진기 연구

Study on high precision nano resonator based on electrical sensing for smart sensors

한국전자통신연구원
Electronics and Telecommunications Research Institute

세부과제 연차실적 보고서

연차실적 보고서

과제유형	1. 기초미래선도형 (0) 2. 공공인프라형 ( ) 3. 산업화형 ( )				
대과제명	ICT 소재부품 핵심원천기술 개발				
세부과제명	스마트센서용 전기적 감지 기반 고정밀 나노공진기 연구				
세부과제 책임자	소속 및 부서	ICT소재부품연구소 실감소자연구본부 융복합센서연구그룹	직위 (직급)	책임	
	성명	양일석			
총연구기간	2017 년 1 월 1 일 부터 2020 년 12 월 31 일 까지 (48 개월)				
당해연도 연구기간	2017년 1월 1일 부터 2017년 12월 31일 까지 (24개월) (1차년도)				

총연구비	정부출연금	3,712,000 천원	당해년연구비	정부출연금	928,000 천원
	민간부담금	0 천원		민간부담금	0 천원
	계	3,712,000 천원		계	928,000 천원

참여인력(M/Y)	총 연 구 기 간	7명 (12.0 M/Y)
	당해연도 연구기간	5명 (2.8 M/Y)

참여기관	기관명	연구책임자	기관명	연구책임자
참여연구기관				
위탁연구기관	충남대학교 산학협력단	고형호		
	호서대학교 산학협력단	한승오		

키워드 (6~10개)	나노공진기 소자, 액상동작 나노공진기 소자, 나노공진기 기반 구동/감지 회로, 액상동작 나노공진기 기반 구동/감지 회로, 전기적 감지 기반 나노공진기 모듈, 전기적 감지 기반 액상동작 나노공진기 모듈, 액상동작 나노공진기 기반 혈당 센서, 나노공진기 기반 바이오 센서

정부출연금사업 연차평가 보고서를 제출합니다.

2017 년 12 월 일

세부과제책임자 : 양 일 석 (인)
직 할 부 서 장 : 엄 낙 웅 (인)

한국전자통신연구원장 귀하

제 출 문

본 연구보고서는 내부연구과제인 “스마트센서용 전기적 감지기반 고정밀 나노공진기 연구“의 결과로서, 본 과제에 참여한 아래의 연구팀이 작성한 것입니다.

2017년 12월

연구책임자 : 책임연구원 양 일 석 (ICT소재부품연구소)
연구참여자 : 책임연구원 양 우 석 (ICT소재부품연구소)
선임연구원 제 창 한 (ICT소재부품연구소)
선임연구원 김 이 경 (ICT소재부품연구소)
선임연구원 이 현 중 (ICT소재부품연구소)

< 요약문 >

연구 필요성	o 스마트센서는 반도체 및 MEMS 기술 기반에서 나노기술 기반으로 발전해 나아가고 있으며, 이에 따라 유망 스마트센서용 나노 핵심원천기술 개발이 요구됨 o 차세대 유망 스마트센서인 바이오센서는 미래 신성장동력으로 부각되고 있으며, 이에 따라 나노 기술 기반의 바이오센서 핵심원천기술 개발이 요구됨 o POCT 바이오센서, IoT 기반 식품안전 센서 등 차세대 유망 스마트센서 개발에 고정밀 질량 감지 나노공진기 기술을 실제적으로 활용하기 위해서는 기상 동작 광학적 감지 방식이 아닌 액상 동작 전기적 감지 기반 나노공진기 기술 개발이 요구됨 - 기상 동작 나노공진기의 경우 액체 상태의 바이오마커 및 식품 유해 화학물질 감지를 위해서 별도의 장시간 정밀한 건조 공정이 필연적으로 요구되므로 POCT 및 IoT 적용을 위한 실시간 센서 개발에 기술적 한계가 있음 - 광학적 감지 나노공진기의 경우 감지회로의 소형화/저가격화에 한계가 있어서 POCT 및 IoT 적용을 위한 현장시험(In-Situ Testing) 센서 개발이 어려움 o 액상 동작 전기적 감지 기반 나노공진기 및 이를 응용한 스마트센서 기술 연구는 아직 세계적으로 초기단계로 핵심원천기술 선점이 가능함 - 액상 동작 나노공진기 기술은 Basel 대학*IBM 공동연구팀이 선도하고 있는데, 광학적 감지 및 구체적 응용 센서 미선정 등의 측면에서 기술적으로 미흡함 - 나노공진기 전기적 구동/감지 회로 기술은 주로 기상 동작 위주로 연구개발 되고 있으며, 액상 동작의 경우도 측정장비의 보조용 회로 정도로 한정되어 기술적으로 미흡함 - 액상 동작 나노공진기와 전기적 구동/감지 회로를 접목한 나노공진기 모듈 연구는 거의 없음 o 기존 기상동작 광학식 감지 방식과 차별화된 액상동작 전기적 감지 기반 나노공진기 소자, 회로 및 모듈 핵심원천기술 확보로 나노 공진기 기반 바이오 센서 관련 미래기술 분야 선점 및 기술 경쟁력 강화 o 전기적 감지 기반 액상동작 나노공진기 모듈 핵심원천기술 확보로 헬스케어, 환경, 모바일 등 바이오 센서 응용 분야 관련 신산업 창출 및 신시장 선점 가능

연구개발 목표	< 최종 연구 목표 > o 액상 동작 전기적 감지 기반 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 개발 및 스마트센서 응용 연구 < 세부 연구 목표 > o 액상 동작 나노공진기 소자 연구 - 공진주파수 ≥8MHz - Q-factor ≥50 o 전기적 고정밀 구동/감지 회로 연구 - Q-factor 향상 비율 ≥4배 - 주파수 정밀도 ≤25ppm o 질량 감지용 SiP(System in Package) 나노공진기 모듈 연구 - 질량 감지 정밀도 ≤80pg
1차년도 연구개발 내용	o 나노공진기 요구사항/구조/사양 도출 - 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 전기적 구동/감지 회로 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 성능/구조 사양 도출 - 나노공진기 스마트센서 응용분야/요구사항 도출
연구개발성과	o High Resonance Frequency, High-Quality Factor 특성을 구비한 액상동작 나노공진기 소자 규격 및 구조 결정 - 8MHz 이상 공진주파수, 50 이상 Quality Factor 특성을 가지는 Out of Plane 과 LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS (Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 규격 및 구조 확립 - COVENTOR 설계 툴로 상위수준 시뮬레이션 결과와 실제 공정 편차 및 동작 환경을 고려하여 LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 규격 확립 - SOI 웨이퍼 기반 LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 종합공정 연구 - SOI 웨이퍼 기반 LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자용 압전박막, 전극층 및 절연층 핵심 단위공정 연구 o 액상동작 나노공진기 소자 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 규격 및 구조 결정 - 4배 이상의 Q-factor 향상 비율 , 25 ppm 이하의 주파수 정밀도를 가지는 Self-Sustaining Oscillator 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 규격 및 구조 결정 - 100배 이상의 Q-factor 향상 비율 , 1 ppm 이하의 주파수 정밀도를 가지는 액상동작 나노공진기 소자 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수순 설계 및 시뮬레이션 완료 o 액상동작 나노공진기 소자 기반 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격 및 구조 결정 - 80 pg 이하 질량 센싱 정밀도를 가지는 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격 및 구조 확립 - 15 pg 이하 질량 센싱 정밀도를 가지는 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 상위수순 설계 및 시뮬레이션 완료

연구개발성과	o 액상동작 나노공진기 스마트센서 응용분야 연구 - 스마트 바이오 센서에 응용 가능한 미세질량변화 검출 모듈과 미세점도측정 모듈 요구사항 도출 o 액상동작 나노공진기 소자 기반 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격 및 구조 결정 - ±2% 이하 저항 감지 범위 정확도를 가지는 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격 및 구조 확립 - ±2% 이하 저항 감지 범위 정확도를 가지는 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 상위수순 설계 및 시뮬레이션 완료
활용계획 및 기대효과	o 미세질량변화 검출 센서, 미세점도측정 센서 등 액상동작 나노공진기 기반 스마트 바이오 센서로 활용 o 현장진단 바이오센서 모듈, IoT 헬스케어 및 환경/식품 모니터링 모듈 등에 활용 o 기존 기상동작 광학식 감지 방식과 차별화된 액상동작 전기적 감지 기반 나노공진기 소자, 회로 및 모듈 핵심원천기술 확보로 나노 공진기 기반 바이오 센서 관련 미래기술 분야 선점 및 기술 경쟁력 강화 o 전기적 감지 기반 액상동작 나노공진기 모듈 핵심원천기술 확보로 헬스케어, 환경, 모바일 등 바이오 센서 응용 분야 관련 신산업 창출 및 신시장 선점 가능
연구성과의 질적 우수성	o 세계 최고 수준 액상동작 나노공진기 소자 구조 연구 o 세계 최고 수준 액상동작 나노공진기 소자 전기적 구동/감지 회로 구조 연구 o 세계 최고 수준 미세질량과 미세점도 감지용 액상동작 SiP 나노공진기 모듈 구조 연구 o 액상동작 SiP 나노공진기 모듈 구조 관련 국제/국내 특허 출원 2건 o 액상동작 SiP 나노공진기 모듈 구조 관련 SCI 논문 투고 1편 및 국외 논문 발표 1편

목　　차

1. 연구개발 목표 및 내용 ····· 8

2. 연구개발 결과 ····· 9

3. 연구개발 성과 ····· 30

4. 연구개발 결과의 활용방안 및 기대효과 ····· 31

5. 연구개발비 집행 실적 ····· 33

1. 연구개발 목표 및 내용

가. 최종 목표

구 분	내 용
최종목표	o 액상 동작 전기적 감지 기반 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 개발 및 스마트센서 응용 연구
세부목표	o 액상 동작 나노공진기 소자 연구 - 공진주파수 ≥8MHz - Q-factor ≥50 o 전기적 고정밀 구동/감지 회로 연구 - Q-factor 향상 비율 ≥4배 - 주파수 정밀도 ≤25ppm o 질량 감지용 SiP(System in Package) 나노공진기 모듈 연구 - 질량 감지 정밀도 ≤80pg

나. 당해연도 연구개발 목표 및 내용

구 분	목 표	내 용
1차년도 (2017)	o 나노공진기 요구사항/구조/사양 도출	- 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 전기적 구동/감지 회로 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 성능/구조 사양 도출 - 나노공진기 스마트센서 응용분야/요구사항 도출

2. 연구개발 결과

가. 연구개발 계획 대비 결과

1) 연구개발성과

<table>
<tr><th>계획</th><th>연구개발 성과</th></tr>
<tr><td>1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출

- 공진주파수 : ≧ 8MHz
- Q-factor : ≧ 50</td><td>o 액상동작 나노공진기 소자 규격 및 구조 결정

- High Resonance Frequency , High-Quality Factor 특성을 구비한 액상동작 나노공진기 소자 연구
. 진공 혹은 공기동작 대비 나노공진기 소자의 구동이 제한적이고 특성 저하가 매우 심한 액상동작 나노공진기 소자에서는 High Resonance Frequency와 High-Quality Factor 특성을 가지는 나노공진기 구조가 요구 됨
. 액상동작 나노공진기 소자에서 가장 중요한 디자인 변수는 나노공진기 소자 자체 공진 저항 Rm(Motional Resistance) 성분을 최소화하는 구조가 요구 됨
. 저전력 동작, 초소형화 및 구동 감지/구동회로 연계를 고려하여 압전 감지 및 구동형 액상동작 나노공진기 구조가 필요 함
. 액상동작 기반 미세질량변화 감지 나노공진기 소자 구조는 Out of Plane Bulk Extension 동작모드가 In Plane 동작모드 보다 High Resonance Frequency, High-Quality Factor 특성이 우수 함
. 액상동작 기반 미세점도변화 감지 나노공진기 소자 구조는 In Plane Length Extension(LE) 동작모드가 Out of Plane 동작모드 보다 High Resonance Frequency, High-Quality Factor 특성이 우수 함

<table>
<tr><th colspan="2">Operating mode</th><th>장점</th><th>단점</th><th>비고</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Out of plane mode</td><td>Bending</td><td>구조 및 동작 모드 단순함
유체의 점도/밀도에 민감함
초소형화 가능</td><td>점도 변화에 민감함
액상에서 특성 저하 심함</td><td>기체 상태에서의 극미세 질량 검출에 유리</td></tr>
<tr><td>Bulk extension</td><td>질량 측정에 유리함
High Q
초소형,초박형, 대면적화 가능</td><td>동작 주파수가 높음(~100 MHz, high order mode)
밀도 변화에도 민감하게 반응
액상에서 특성 저하</td><td>액상 동작에서 질량 검출에 유리
(과제 목표에 적합)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">In Plane mode</td><td>Shear</td><td>질량 측정에 유리함
High Q 가능</td><td>박막형에서 민감도 낮음
동작 주파수가 높음</td><td>벌크형 공진기(QCM)</td></tr>
<tr><td>Lateral Sliding (LS)</td><td>밀도에 의한 영향이 적고
점도에 민감함</td><td>구동 방식 제약/소형화 어려움
낮은 주파수 대역 (~100 kHz)</td><td></td></tr>
<tr><td>Length Extension (LE)</td><td>점도 변화에 민감함
고점도 동작 유리
초소형화 가능</td><td>밀도 영향이 함께 측정됨
높은 Rm(mechanical resistance)</td><td>과제 목표 점도 측정에 적합</td></tr>
<tr><td>Width Extension (WE)</td><td>High Q, Low Rm
고점도 동작 유리, 초소형화 가능</td><td>LE 대비 밀도 영향에 더 민감
동작 주파수가 높음</td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><th colspan="2">Operating mode</th><th>장점</th><th>단점</th><th>비고</th></tr>
<tr><td colspan="2">Out of plane mode</td><td>구조 및 동작 모드 단순함
초소형화 가능
질량 측정에 유리함
High Q 가능</td><td>밀도 변화에도 민감하게 반응
고점도에서 특성 저하가 심함</td><td>기체 상태에서의 극미세 질량 검출에 유리. FBAR, SAW, Oscillator 등으로 주로 이용됨</td></tr>
<tr><td rowspan="4">In Plane mode</td><td>Shear</td><td>질량 측정에 유리함
High Q 가능</td><td>박막형에서 민감도 낮음
동작 주파수가 높음(~100 MHz, high order mode)</td><td>벌크형 공진기(QCM)</td></tr>
<tr><td>Lateral Sliding (LS)</td><td>밀도에 의한 영향이 적고
점도에 민감함</td><td>구동 방식 제약/소형화 어려움
낮은 주파수 대역 (~100 kHz)</td><td></td></tr>
<tr><td>Length Extension (LE)</td><td>점도 변화에 민감함
목표 주파수 대역 구동 가능 (< 100MHz)
고점도 동작 유리
초소형화 가능</td><td>밀도 영향이 함께 측정됨
높은 Rm(mechanical resistance)</td><td>과제 목표 점도 측정에 적합</td></tr>
<tr><td>Width Extension (WE)</td><td>High Q 가능
Low Rm
고점도 동작 유리
초소형화 가능</td><td>LE 대비 밀도 영향에 더 민감
동작 주파수가 높음(>100 MHz, high order mode)</td><td></td></tr>
</table>
< 동작 모드에 따른 나노공진기 소자 특성 비교 분석 결과 ></td></tr>
</table>

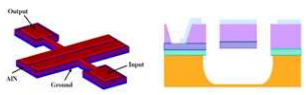
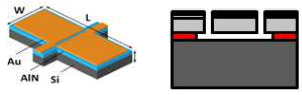
<table>
<tr><th>계획</th><th>연구개발 성과</th></tr>
<tr><td>1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출

- 공진주파수 : ≧ 8MHz
- Q-factor : ≧ 50</td><td>

o 액상동작 나노공진기 소자 규격 및 구조 결정

- 액상동자 나노공진기 소자의 움직임 특성이 위 아래 움직임 보다는 좌우 움직임 특성이 우수한 Floating Plate TPoS (Thin-film Piezpelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 구조가 요구 됨

. 액상동작 나노공진기 소자 구조로 SCS(Single Crystal Silicon) TPoS 구조가 더 적합 함

<table>
<tr><th></th><th>Thin-film Piezoelectric type</th><th>Thin-Film Piezoelectric on Silicon(TPoS) type</th></tr>
<tr><td></td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>장점</td><td>✓ 간단한 설계 및 공정
✓ 구조 설계가 용이함
✓ 낮은 동작 주파수 및 주파수 설계 용이</td><td>✓ Large coupling factor (low mechanical loss of Si)
✓ High structural integrity
✓ 박막 잔류 응력 변형에 강함
✓ High power handling
✓ High Q 확보 가능(>100)</td></tr>
<tr><td>단점</td><td>✓ 박막 잔류 응력에 민감함
✓ 공정 편차가 큼
✓ 설계 치수(aspect ratio) 제약이 발생</td><td>✓ SOI wafer 사용
✓ Anchor loss 가 커짐
✓ 추가 공정(DRIE, GPE 등) 필요
✓ 초소형화 불리</td></tr>
</table>

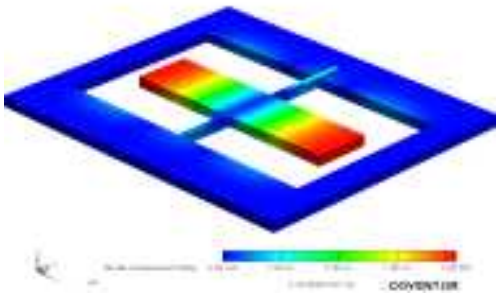
< 박막형과 SCS TPoS 구조 특성 비교 분석 결과 >

o 액상동작 나노공진기 소자 규격 및 구조 결정

- 진공 혹은 공기 대비 High Resonance Frequency , High-Quality Factor 특성을 구비한 액상동작 나노공진기 소자 규격 및 구조 확립

. 8MHz 이상 공진주파수, 50 이상 Q 특성을 가지는 Out of Plane Bulk Extension 동작모드 Floating Plate TPoS (Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 규격 및 구조 확립

. 8MHz 이상 공진주파수, 50 이상 Q 특성을 가지는 In Plane LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 규격 및 구조 확립

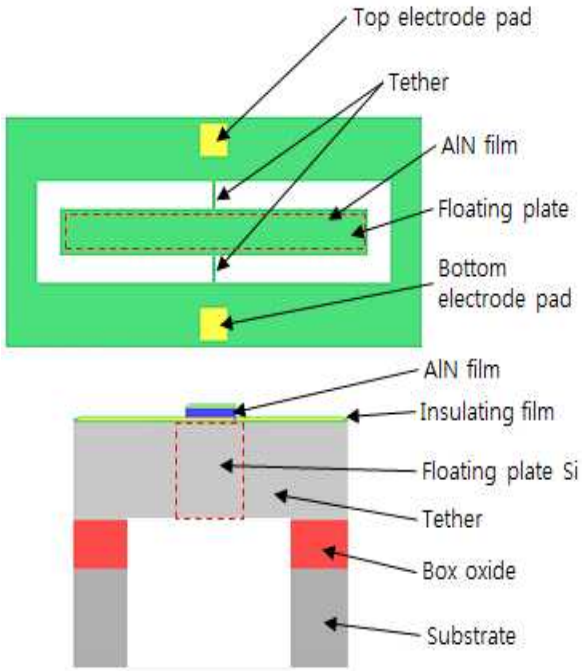


< In Plane LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 개념도 ></td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>계획</th><th>연구개발 성과</th></tr>
<tr><td>1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출

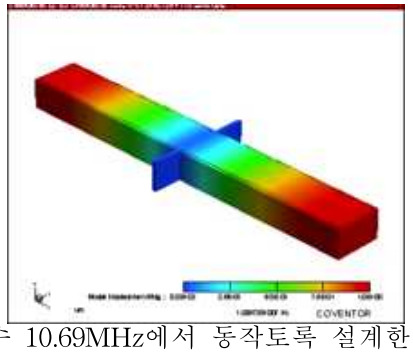
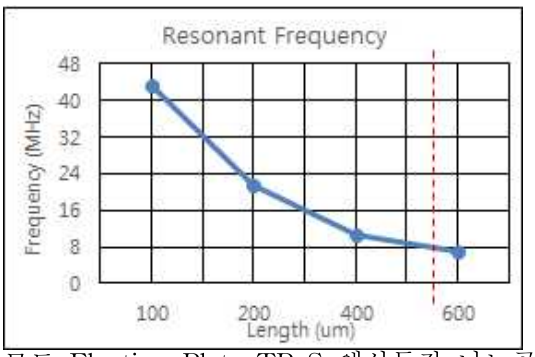
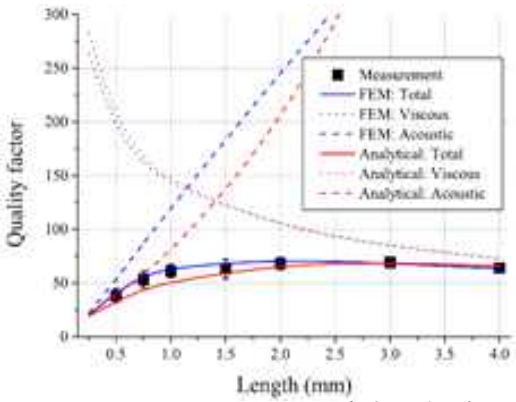
- 공진주파수 : ≧ 8MHz
- Q-factor : ≧ 50</td><td>o LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 연구

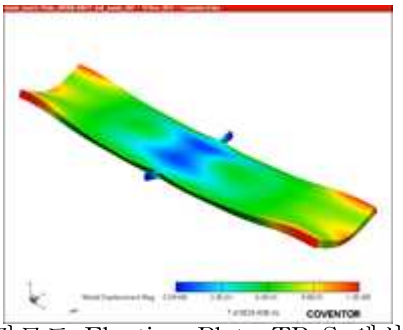
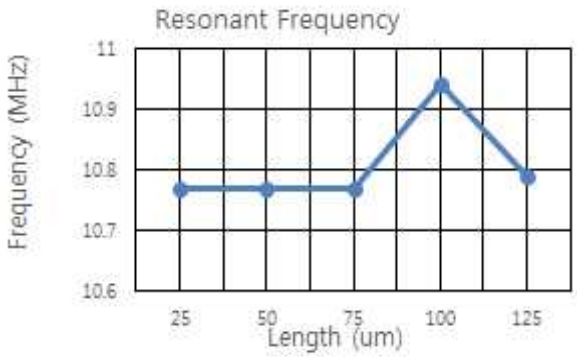
- LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 정의
. 나노공진기 소자 설계변수 : 나노공진기 소자 길이, 폭, 두께
: tether 길이, 폭
. Tether 역할 : TPoS 나노공진기 소자를 Si 기판에 연결

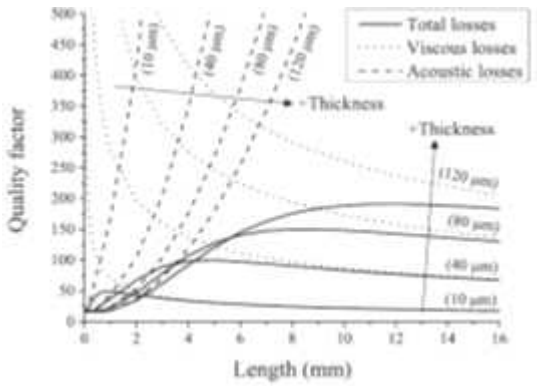
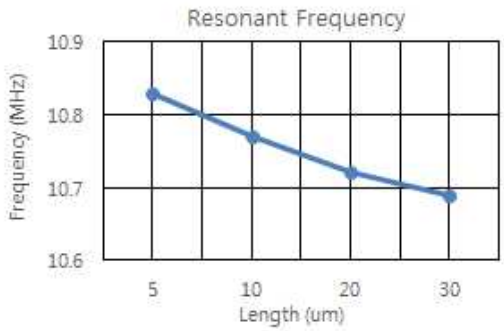
 

< LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 개념도 >

<table><tr><th colspan="2">설계 파라미터</th><th>관련 동작 특성</th></tr><tr><td rowspan="3">Floating Plate</td><td>Width</td><td>공진 모드 변형</td></tr><tr><td>Length</td><td>공진 주파수
Q-factor</td></tr><tr><td>Thickness</td><td>공진 모드 변형
Q-factor</td></tr><tr><td rowspan="2">Tether</td><td>Width</td><td>Anchor loss (Q-factor)</td></tr><tr><td>Length</td><td>Anchor loss (Q-factor)</td></tr></table>
< LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 ></td></tr>
</table>

계획	연구개발 성과
1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 공진주파수 : ≧ 8MHz - Q-factor : ≧ 50	o COVENTOR 설계 툴로 설계변수에 따른 LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 연구 - 나노공진기 소자의 공진주파수 및 Quality Factor 상관관계분석을 통한 나노공진기 소자 길이 변화에 따른 동작 특성 시뮬레이션 완료 . 공진주파수 8MHz 이상 이고 Q-factor 가 50 이상으로 동작하기 위한 나노공진기 소자의 길이는 550um 이하  < 공진 주파수 10.69MHz에서 동작토록 설계한 LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 단면도 >  < LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 길이 변화 vs. 공진주파수 동작 특성 시뮬레이션 결과 >  < LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 길이 변화 vs. Quality factor 동작 특성 시뮬레이션 결과 >

계획	연구개발 성과
1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 공진주파수 : ≧ 8MHz - Q-factor : ≧ 50	o COVENTOR 설계 툴로 설계변수에 따른 LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 연구 - 나노공진기 소자의 공진주파수 및 Quality Factor 상관관계분석을 통한 나노공진기 소자 폭 변화에 따른 동작 특성 시뮬레이션 완료 . 공진주파수 8MHz 이상, Q-factor 가 50 이상이고 나노공진기 소자의 끝단에 변형이 일어나지 않게 동작하기 위한 나노공진기 소자의 폭은 75um 이하  < 설계한 LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 폭 100um 시 끝단 공진 변형 현상 >  < LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 폭 변화 vs. 공진주파수 동작 특성 시뮬레이션 결과 > < LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 폭 변화에 따른 끝단 공진 변형 시뮬레이션 결과 >

계획	연구개발 성과
1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 공진주파수 : ≧ 8MHz - Q-factor : ≧ 50	o COVENTOR 설계 툴로 설계변수에 따른 LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 연구 - 나노공진기 소자의 공진주파수 및 Quality Factor 상관관계분석을 통한 나노공진기 소자 두께 변화에 따른 동작 특성 시뮬레이션 완료 . 공진주파수 8MHz 이상, Q-factor 가 50 이상이고 나노공진기 소자의 끝단에 변형이 일어나지 않게 동작하기 위한 나노공진기 소자의 두께는 10um 이상 ~ 20um 이하  < 설계한 LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 두께 변화 vs. Quality factor 동작 특성 시뮬레이션 결과 >  < LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 두께 변화 vs. 공진주파수 동작 특성 시뮬레이션 결과 > < LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 두께 변화에 따른 끝단 공진 변형 시뮬레이션 결과 >

<table>
<tr><th>계획</th><th>연구개발 성과</th></tr>
<tr><td>1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출

- 공진주파수 : ≧ 8MHz
- Q-factor : ≧ 50</td><td>

o LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 결정

- 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 최적화
. 주요 공진 모드(1st LE mode)와 다른 공진 모드의 간격 최대화 조건
. 공진 모드상에서 주요 방향 이외의 변형 최소화 조건
. 공진기 공정에 따른 초기 변형 최소화 조건
. Anchor loss 및 Fluid acoustic loss term 최소화 조건

<table>
<tr><th colspan="2">설계 파라미터</th><th>설계값 범위</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Floating Plate</td><td>Width</td><td>≤ 75 μm</td></tr>
<tr><td>Length</td><td>≤ 550 μm</td></tr>
<tr><td>Thickness</td><td>10 μm ≤</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Tether</td><td>Width</td><td>5 μm</td></tr>
<tr><td>Length</td><td>30 μm</td></tr>
</table>

< LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 최적화 설계 변수 >

- COVENTOR 설계 툴로 상위수준 시뮬레이션 결과와 실제 공정 편차 및 동작 환경을 고려하여 LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 규격 확립

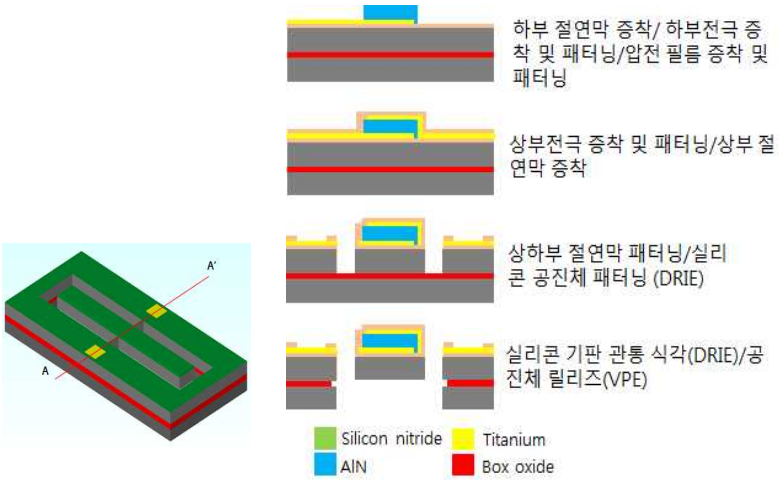
. Si 두께 : 10um ~ 20um , . AlN 두께 : 0.5um
. 소자 Width : 75um/50um/25um . 소자 Length : 400um
. 공진 주파수 : 10.77 MHz . Q-factor : 50 ~ 150

<table>
<tr><th colspan="2">Structure</th><th>Type1</th><th>Type2</th><th>Type3</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Floating Plate</td><td>Width (μm)</td><td>75</td><td>50</td><td>25</td></tr>
<tr><td>Length (μm)</td><td colspan="3">400</td></tr>
<tr><td>f_s</td><td>10.76</td><td>10.77</td><td>10.77</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Tether</td><td>Width (μm)</td><td colspan="3">5</td></tr>
<tr><td>Length (μm)</td><td colspan="3">30</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Electrode thickness</td><td>Top (μm)</td><td colspan="3">0.2</td></tr>
<tr><td>Bottom (μm)</td><td colspan="3">0.2~0.5</td></tr>
<tr><td colspan="2">AlN thickness (μm)</td><td colspan="3">0.5</td></tr>
<tr><td colspan="2">Si thickness (μm)</td><td colspan="3">10 ~ 20</td></tr>
</table>

< LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 설계 변수 >

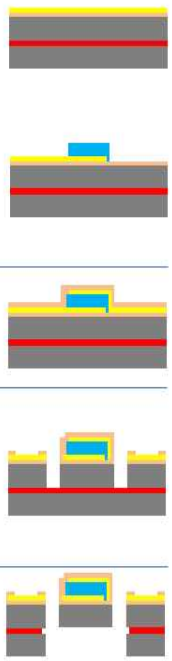
</td></tr>
</table>

계획	연구개발 성과
1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 공진주파수 : ≧ 8MHz - Q-factor : ≧ 50	o LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 종합공정 설계 연구 - 압전 박막 및 전극에 대한 절연층을 포함하는 액상동작 나노공진기 소자 제작 종합공정 연구 . SOI wafer 기반 공정 설계 . 전극 절연층 : Silicon Nitride film (전극 상/하부에 증착 및 패터닝)



< LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 종합공정 흐름도 (AA') >

SEQ	PROCESS	P.CODE	WAFER INSTRUCTN	TARGET & MEASURE	DATE	I/O	OPER	RE-MARK
1	wafer clean & marking	WT04-P001						
2	PECVD SiN dep	PE02-N010		2,000A				
3	Ti dep	SP02-T004		2,000A				
	1st PHOTO			Bottom electrode				
4	Ti etch	DR06-M002		2,000A				
5	Plasma Strip. PR(metal)	DR06-R001						
	PR Strip. Solvent(metal)	WT01-R001						
6	AlN dep		TiO clean just before dep.	10,000A				
	2nd PHOTO			AlN pattern				
7	AlN wet etch		TMAH(25%, room temp)	10,000A				
8	Plasma Strip. PR(metal)	DR06-R001						
9	PR Strip. Solvent(metal)	WT01-R001						
10	Ti/Al dep	SP02-M003		200/2000A				
	3rd PHOTO			Top electrode				
11	Ti/Al etch	DR06-M002		200/2,000A				
12	Plasma Strip. PR(metal)	DR06-R001						
13	PR Strip. Solvent(metal)	WT01-R001						
14	PECVD SiN dep	PE02-N010		2000A				
	4th PHOTO			PAD open				
15	SiN etch	DR06-N001		2,000A				
16	Plasma Strip. PR(metal)	DR06-R001						
17	PR Strip. Solvent(metal)	WT01-R001						
	5th PHOTO			Trench open				
18	SiN etch	DR06-N001		2,000A				
19	Si etch	DRIE	외부 공정					
20	Plasma Strip. PR(metal)	DR06-R001						
21	PR Strip. Solvent(metal)	WT01-R001						
	6th PHOTO			Backside open				
22	Si etch	DRIE	외부 공정					
23	Plasma Strip. PR(metal)	DR06-R001						
24	PR Strip. Solvent(metal)	WT01-R001						
25	Oxide etch	VPE	외부 공정					



< LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 Run Sheet >

<table>
<tr><th>계획</th><th>연구개발 성과</th></tr>
<tr><td>1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출

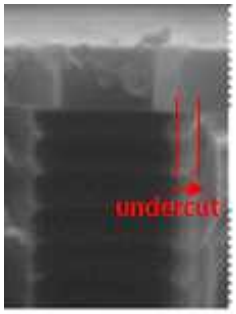
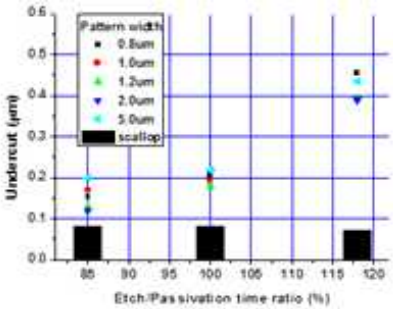
- 공진주파수 : ≧ 8MHz
- Q-factor : ≧ 50</td><td>o LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 단위공정 설계 연구

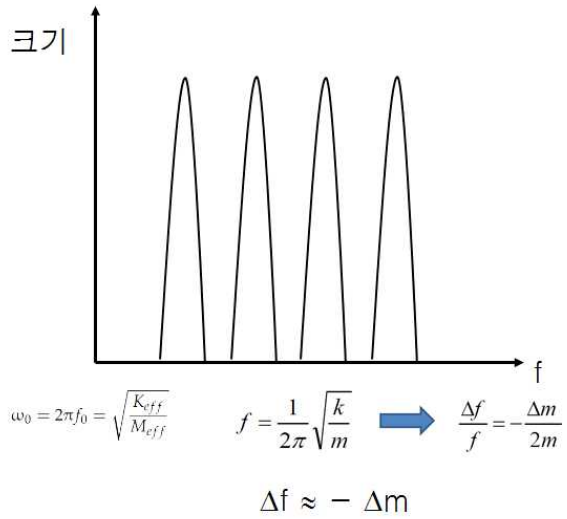
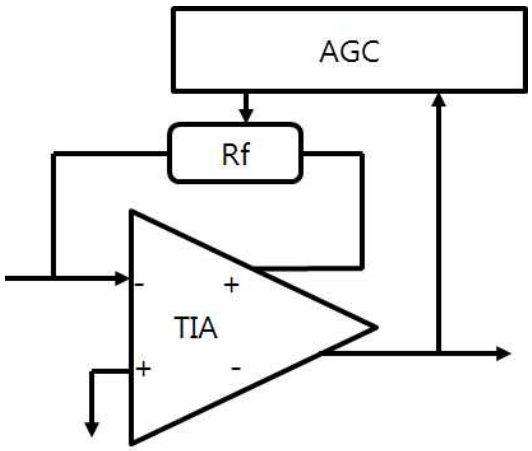
- 압전 박막, 전극층 및 절연층 증착 시 발생하는 잔류 응력 분석 연구
. 나노공진기 구성 재료별 공정에 따른 잔류 응력 조사
. 각 재료별 두께와 잔류 응력 조절을 통해서 잔류 응력 보상으로 변형 최소화 필요
. AlN의 경우 압전 특성 향상을 위해서 공정 조건 변경이 어려움
. Silicon Oxide, Al 은 공정상 잔류 응력 조절이 어려움
. PECVD Silicon Nitride의 경우 가스량 및 압력 조절을 통해서 잔류 응력의 조절이 용이함

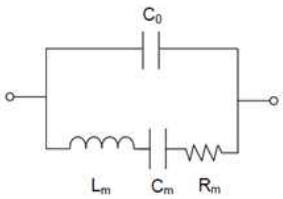
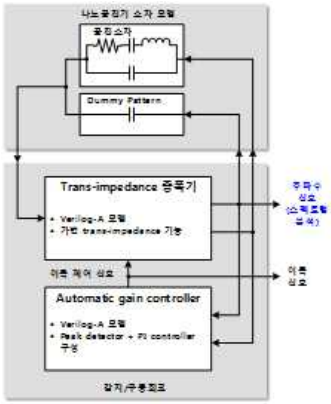
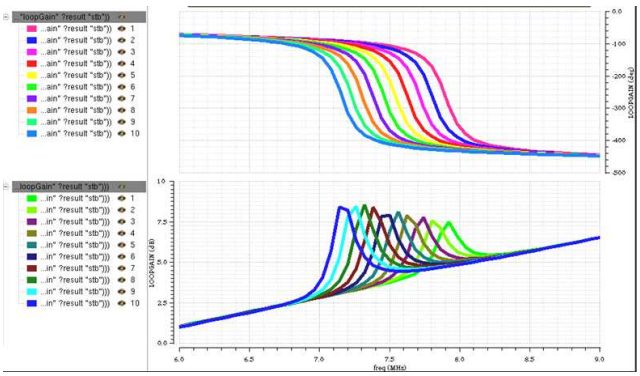
<table>
<tr><th>Material</th><th>Residual stress</th><th></th></tr>
<tr><td>Silicon Oxide</td><td>-300 Mpa</td><td>SOI wafer</td></tr>
<tr><td>Silicon Nitride (PECVD)</td><td>-100 ~ 100 MPa</td><td>Variable</td></tr>
<tr><td>AlN</td><td>300~ MPa</td><td>High tensile</td></tr>
<tr><td>Al</td><td>~100 MPa</td><td>Tensile</td></tr>
</table>
< LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 재료별 잔류 응력 분석 결과 >

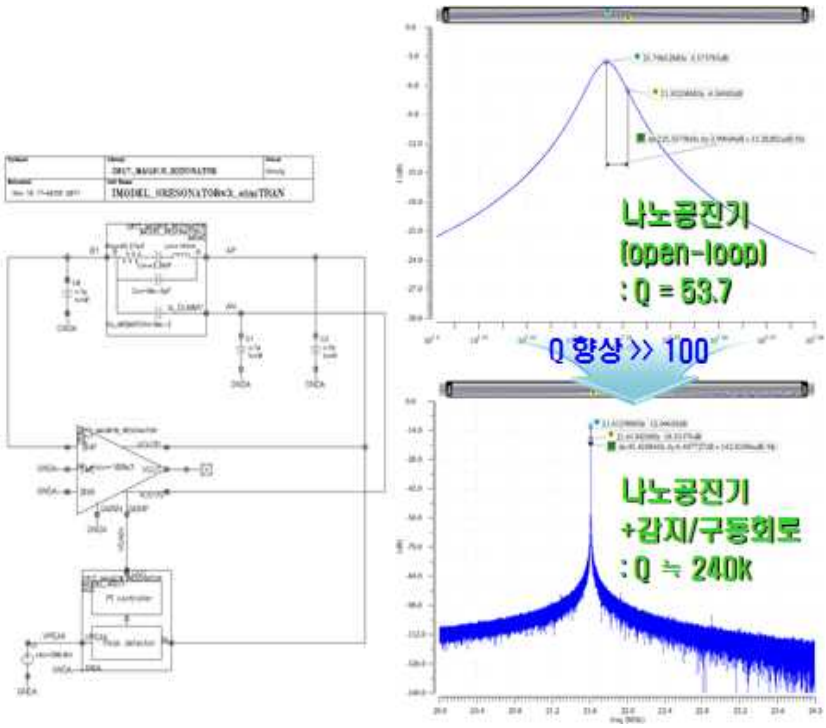
- 압전 박막, 전극층 및 절연층 증착시 발생하는 잔류 응력 변형을 고려한 LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 시뮬레이션 연구
. PECVD Silicon Nitride의 잔류 응력에 따른 나노공진기 소자 끝단의 변형을 COVENTOR 시뮬레이션을 통해서 분석
. AlN 및 Al이 인장 응력을 가지므로, SiN 필름의 잔류 응력을 압축 응력으로 하여 보상
. 압축 응력값이 커질수록 끝단 변형이 감소: 0.62 um -> 0.55 um

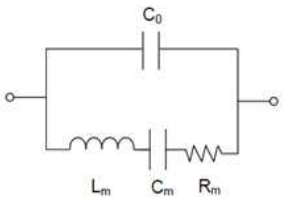
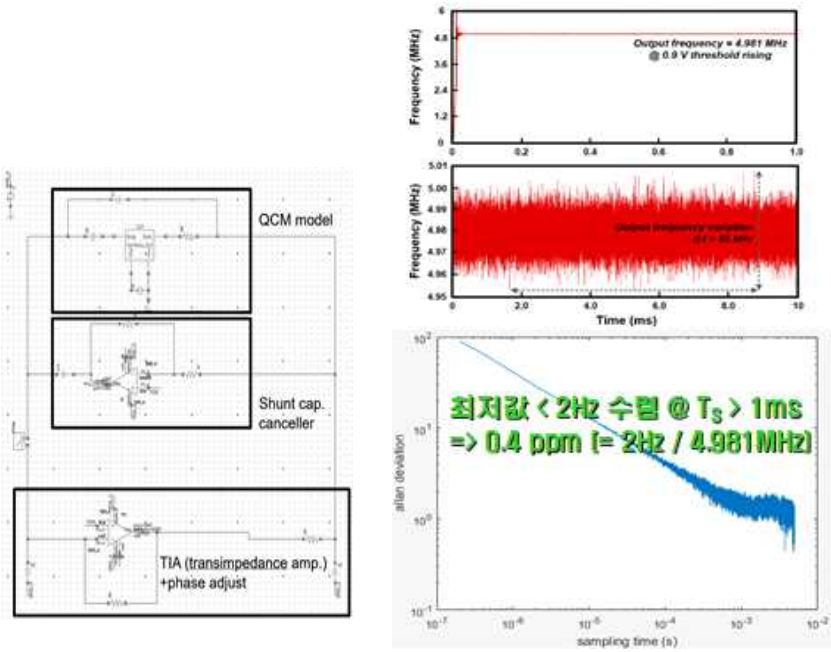
<table>
<tr><th>SiN residual stress (Mpa)</th><th>Residual deform @resonator end</th></tr>
<tr><td>-20</td><td>+0.62 um</td></tr>
<tr><td>-100</td><td>+0.55 um</td></tr>
</table>
< LE 동작모드 Floating Plate TPoS 액상동작 나노공진기 소자 잔류 응력 시뮬레이션 결과 ></td></tr>
</table>

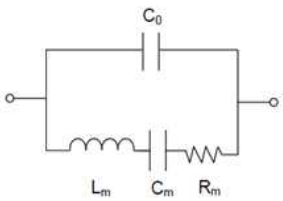
계획	연구개발 성과
1. 나노공진기 소자 구조/동작 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - 공진주파수 : ≧ 8MHz - Q-factor : ≧ 50	o LE(Length Extension) 동작모드 Floating Plate TPoS(Thin-film Piezoelectric on Silicon) 액상동작 나노공진기 소자 단위공정 설계 연구 - Deep silicon etch 공정 편차에 의한 나노공진기 소자 사이즈 편차 연구 . 실리콘 deep trench 형성 단위공정에서 Bosch Process를 사용함에 따라 언더컷이 발생하여 설계 사이즈 대비 실제 나노공진기 소자 및 tether의 치수가 작아지는 문제 발생 . 나노공진기 소자 질량 변화 및 tether의 강성 변화로 인하여 나노공진기 소자의 공진 주파수에 편차가 발생하는 문제 발생 . 문제를 해결하기 위하여 Deep trench 공정의 언더컷에 대한 사전 테스트를 통하여 언더컷을 확인하고, 실제 마스크 설계 시에 반영하여 보정이 요구 됨   < 실리콘 Deep Trench 단위공정의 언더컷 분포 > - 전극층, 절연층 및 AlN 압전 박막의 공정 호환성 연구 . 액상동작 나노공진기 소자에서는 AlN 압전 박막의 상하부에 전극 메탈이 요구 됨 . 요구되는 전극 메탈은 AlN 압전 박막 및 절연층과의 CMOS metal 공정 호환성이 요구 됨 . 전극 메탈 및 절연층과 AlN 압전 박막층이 식각에서 선택적으로 패터닝이 가능하도록 식각 선택비 전극층 단위공정 확보가 요구 됨 . HF를 이용한 액상동작 나노공진기 소자 릴리즈 공정과 호환되는 전극 메탈 물질이 요구 됨 . 액상동작 나노공진기 소자에서는 상부/하부 전극 메탈에 대한 전기적 절연층이 요구 됨 . 요구되는 절연층은 전극 metal 공정과 공정호환성과 전극 메탈 및 AlN과 높은 식각 선택비 절연층 단위공정 확보가 요구 됨 . HF 를 이용한 액상동작 나노공진기 소자 릴리즈 공정과 호환되면서 액상에서 장기간 안정적인 절연이 가능하고 잔류 응력이 거의 없거나 조절이 용이하면서 탄성계수가 실리콘과 유사한 절연층 물질이 요구 됨

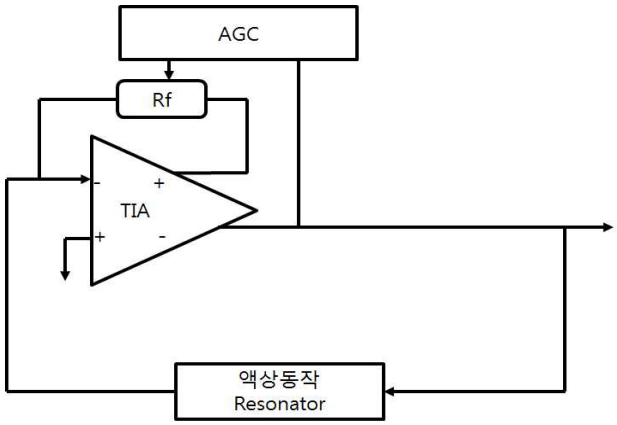
계획	연구개발 성과
2. 전기적 구동/감지 회로 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - Q-factor 향상 비율 : ≧ 4 - 주파수 정밀도 : ≤ 25 ppm	**o 액상동작 나노공진기 소자 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 규격 및 구조 결정** - Self-Sustaining Oscillator 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 규격 및 구조 결정 . 구성 : TIA(Trans Impedance Amplifier) 와 AGC(Automatic Gain Controller) 회로가 피드백으로 구성 . 감지 알고리즘 : 액상동작 나노공진기 소자 자체 등가 저항을 상쇄하고 출력단에 로딩되는 질량 변화에 따라 이동하는 미세공진주파수 변화를 감지 . Q-factor 향상 비율 : ≧ 4 . 주파수 정밀도 : ≤ 25 ppm  < 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 개념도 >  < Self-Sustaining Oscillator 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 블록도 >

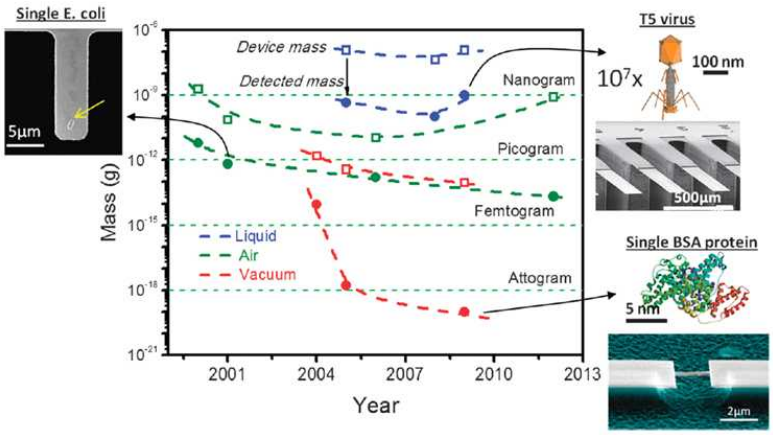
계획	연구개발 성과
2. 전기적 구동/감지 회로 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - Q-factor 향상 비율 : ≧ 4 - 주파수 정밀도 : ≤25 ppm	o 액상동작 나노공진기 소자 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수순 설계 및 동작 검증 시뮬레이션 완료 - 높은 공진 주파수, High Q-factor 특성을 가지는 액상동작 나노공진기 소자 BVD(Butterworth-van Dyke) 등가 모델링 완료 . Lm : Motional Inductance, . Cm : Motional Capacitance . Rm : Motional Resistance . C_0 : Parallel Capacitance  < 액상동작 나노공진기 소자 BVD 등가 모델 > - Self-Sustaining Oscillator 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 TIA(Trans Impedance Amplifier), AGC(Automatic Gain Controller) 회로 상위수준 설계 및 동작 검증 완료 . 사용 툴 : Verilog-A  < 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수준 블록도 >  < 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수준 시뮬레이션 결과 >

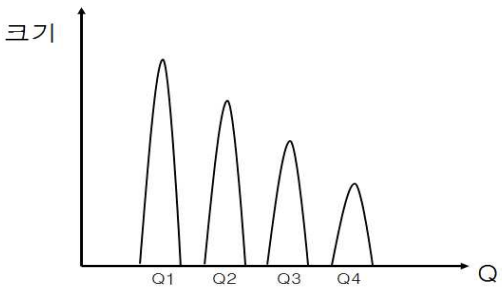
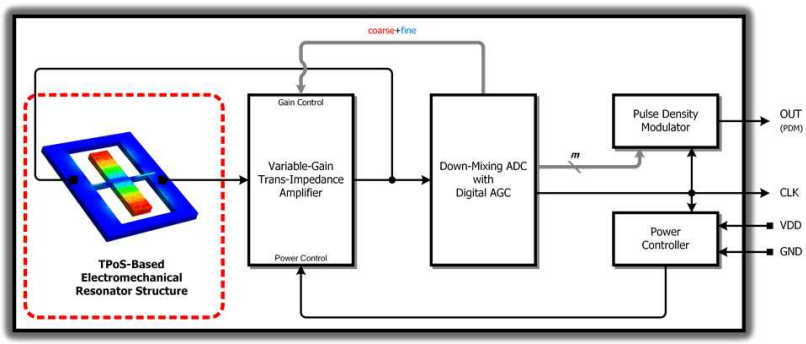
계획	연구개발 성과
2. 전기적 구동/감지 회로 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - Q-factor 향상 비율 : ≧ 4 - 주파수 정밀도 : ≤ 25 ppm	o 액상동작 나노공진기 소자 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수순 Q-factor 향상 비율 성능 검증 시뮬레이션 완료 - 상위수준 회로에서 나노공진기 소자 자체의 Open-loop Q-factor 와 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로의 Close-loop Q-factor 비로 100배 이상 Q-factor 향상 비율 성능 검증 시뮬레이션 완료 . 사용 툴 : Verilog-A . 공진 주파수 : 21.39MHz, . Lm : 16mH, . Cm : 3.36fF . Rm : 45.27kΩ, . C_0 : 1pF . 나노공진기 소자 자체의 Open-loop Q-factor : 53.7 . 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로의 Close-loop Q-factor : 240,000 . 아주 이상적인 조건으로 검증 . 실제 구현 시에 필요한 충분한 마진 확보 필요  < 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수준 회로도 및 Q-factor 향상 비율 성능 시뮬레이션 결과 >

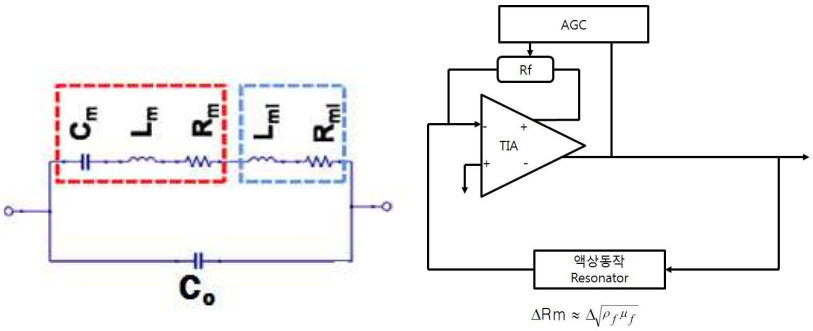
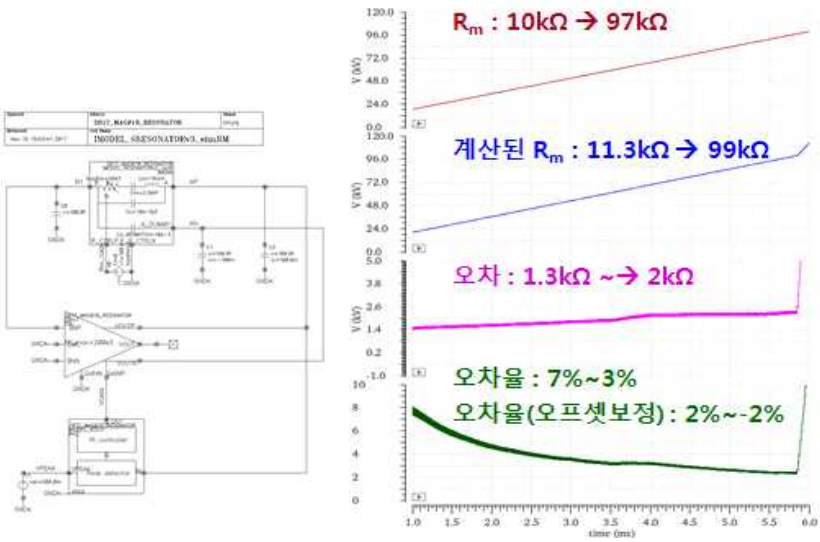
계획	연구개발 성과
2. 전기적 구동/감지 회로 시뮬레이션 및 최적 구조 도출 - Q-factor 향상 비율 : ≧ 4 - 주파수 정밀도 : ≤ 25 ppm	o 액상동작 나노공진기 소자 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수순 주파수 정밀도 성능 검증 시뮬레이션 완료 - 상용 제품 액상동작 QCM(Quartz Crystal Microbalance) 소자 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수준 설계 완료 - 상용 제품 액상동작 QCM(Quartz Crystal Microbalance) 소자 BVD(Butterworth-van Dyke) 등가 모델링 완료 . 공진 주파수 :5 MHz, . Lm : 30mH, . Cm : 33fF . Rm : 10Ω(dry) ~ 3.5kΩ(85% glycerol), . C_0 : 20pF  < 상용 제품 QCM BVD 등가 모델 > - 나노공진기 소자 병렬 커패시터 C_0 상쇄용 Shunt Cap Canceller 모델링 완료 - Verilog-A 상위수준 회로에서 Allan Deviation 계산을 통한 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 상위수준 1ppm 이하 주파수 정밀도 성능 검증 시뮬레이션 완료 . Allan Deviation 절대치 : 2Hz 이하 . 실제 설계 시 잡음과 열에 의한 잡음 증가에 따른 마진 확보 필요  < 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 상위수준 회로도 및 주파수 정밀도 성능 시뮬레이션 결과 >

계획	연구개발 성과
3. 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 성능/구조 사양 도출 - 질량 센싱 정밀도 : ≤ 80 pg	o 액상동작 나노공진기 소자 기반 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격 및 구조 결정 - 높은 공진 주파수, High Q-factor 특성을 가지는 액상동작 나노공진기 소자와 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로가 SiP(System In Package) 형태로 구성된 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격 및 구조 확립 . 공진주파수 : ≧ 8MHz, . Q-factor : ≧ 50 . Q-factor 향상 비율 : ≧ 4, . 주파수 정밀도 : ≤ 25 . 질량 센싱 정밀도 : ≤ 80 pg < 액상동작 나노공진기 소자 기반 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 개념 구조도 > o 액상동작 나노공진기 소자 기반 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 상위수준 모델링 완료 - 높은 공진 주파수, High Q-factor 특성을 가지는 액상동작 나노공진기 소자 BVD(Butterworth-van Dyke) 등가 모델링 완료 . 공진 주파수 : 21.39MHz, . Lm : 16mH, . Cm : 3.36fF . Rm : 45.27kΩ, . C_0=1pF  < 액상동작 나노공진기 소자 BVD 등가 모델 > - Self-Sustaining Oscillator 기반 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로 모델링 완료 . TIA(Trans Impedance Amplifier) 모델링 . AGC(Automatic Gain Controller) 모델링

계획	연구개발 성과
3. 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 성능/구조 사양 도출 - 질량 센싱 정밀도 : ≤ 80 pg	o 액상동작 나노공진기 소자 기반 질량 감지용 SiP 나노공진기 모듈 상위수준 설계 및 검증 완료 - 높은 공진 주파수, High Q-factor 특성을 가지는 액상동작 나노공진기 소자와 미세주파수 변화 전기적 구동/감지 회로로 구성된 질량 감지용 나노공진기 모듈 상위수준 회로 설계 완료 . 사용 툴 : Verilog-A . 감지 알고리즘 : 나노공진기 모듈에서 미세공진주파수 변화를 감지하면 미세질량변화를 감지 가능  $\Delta f \approx -\Delta m$ < 질량 감지용 나노공진기 모듈 상위수준 블록도 > - Verilog-A 상위수준 회로에서 질량 감지용 나노공진기 모듈 상위수준 15pg 이하 질량 센싱 정밀도 성능 검증 완료 . 공진 주파수 : 21.39MHz, . Lm : 16mH, . Cm : 3.36fF . Rm : 45.27kΩ, . C_0 : 1pF . 수치 해석을 통한 질량 센싱 정밀도 계산 . 실제 구현 시 충분한 마진 확보 필요 W (um) / L (um) / T (um) / ρ (g/cm³) / m (ng) / f (MHz) / Δf (Hz) / Δm (pg) 50 / 200 / 10 / 2.65 / 265 / 21.39 / 8.556 / 0.212 265 / 21.39 / 534.75 / 13.25 < 질량 감지용 나노공진기 모듈 질량 센싱 정밀도 시뮬레이션 결과 >

계획	연구개발 성과
4. 나노공진기 스마트센서 응용분야/요구사항 도출	o 액상동작 나노공진기 기반 스마트 센서 응용분야 연구 - 기존 기상 동작 광학식 감지 방식과 차별화된 액상동작 전기적 감지 방식 나노공진기 기반 스마트 바이오 센서에 응용 - 스마트 바이오 센서에 응용 가능한 미세질량변화 검출 모듈과 미세점도측정 모듈 요구사항 도출 . 질량 센싱 정밀도 : ≤80 pg . 미세저항 감지 범위 정확도 : ≤ ±2%  < 액상동작 바이오센서 응용분야 질량 센싱 정밀도 요구사항> - 현장진단 바이오 서비스, IoT 헬스케어 서비스 등 의료분야, 및 환경 모니터링 서비스, 식품 모니터링 서비스 등 환경/식품 모니터링 분야, 산업용 기기, 로봇기기, 군수 등 산업분야에 응용 가능 < 액상동작 전기적 감지 나노공진기 기반 바이오 센서 응용분야 >

계획	연구개발 성과
5. 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격/구조 사양 도출 - 저항 감지 범위 정확도 : ≤ ±2 %	o 액상동작 나노공진기 소자 기반 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격 결정 - High Q-factor 특성을 가지는 액상동작 나노공진기 소자와 미세저항 변화 전기적 구동/감지 회로가 SiP(System In Package) 형태로 구성된 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격 및 구조 확립 . Q-factor : ≧ 50 . 저항 감지 범위 정확도 : ≤ ±2 % . 감지 알고리즘 : 액상동작 나노공진기 소자 자체 공진 주파수에 무관하게 출력단에 로딩되는 점도변화에 따라 크기가 변하는 미세저항 변화를 감지  $Q \approx 1/R_m \quad \Delta Rm \approx \Delta\sqrt{\rho_f \mu_f}$ < 미세저항 변화 전기적 구동/감지 회로 개념도 > o 액상동작 나노공진기 소자 기반 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 구조 결정 - High Q 특성을 가지는 TPoS (Thin-film Piezoelectric on Silicon) Type 액상동작 나노공진기 소자 구조 확립 - 2 step 제어 가능한 광범위 미세저항 디지털 구동/감지 회로 구조 확립 . 기존 아날로그 AGC(Automatic Gain Controller) 대신에 2 Step 제어 가능한 디지털 AGC 구조 제안  < 액상동작 나노공진기 소자 기반 점도 감지용 나노공진기 모듈 구조도 >

계획	연구개발 성과
5. 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 규격/구조 사양 도출 - 저항 감지 범위 정확도 : ≤ ±2 %	o 액상동작 나노공진기 소자 기반 점도 감지용 SiP 나노공진기 모듈 상위수준 설계 및 검증 완료 - 높은 공진 주파수 특성을 가지는 액상동작 나노공진기 소자와 미세저항 변화 전기적 구동/감지 회로로 구성된 점도 감지용 나노공진기 모듈 상위수준 회로 설계 완료 . 사용 툴 : Verilog-A . 감지 알고리즘 : 나노공진기 모듈에서 미세저항 변화를 감지하면 미세점도 변화를 감지 가능 . 높은 공진 주파수 특성을 가지는 액상동작 나노공진기 소자 BVD (Butterworth-van Dyke) 등가 모델링 완료 . Self-Sustaining Oscillator 기반 미세저항 변화 전기적 구동/감지 회로 모델링 완료  < 점도 감지용 나노공진기 소자 BVD 모데링 및 모듈 상위수준 블록도 > - Verilog-A 상위수준 회로에서 나노공진기 소자 자체의 등가 저항 범위와 회로를 이용하여 나노공진기 소자 자체 등가 저항에 해당되는 이득 가변 저항 범위의 오차율로 ±2% 저항 감지 범위 정확도 성능 검증 시뮬레이션 완료 . 공진 주파수 : 21.39MHz, . Lm : 16mH, . Cm : 3.36fF . Rm : 45.27kΩ, . C_0 : 1pF  < 점도 감지용 나노공진기 모듈 상위수준 회로도 및 저항 감지 범위 정확도 성능 시뮬레이션 결과 >

2) 연구개발 달성현황 및 검증 방법

성과지표 (주요성능 Spec)	단위	세계최고 수준	기술개발 목표치	달성현황	달성율	검증 방법
			1차 년도 (2017년)	1차 년도 (2017년)	1차 년도 (2017년)	
1. 액상동작 나노공진기 소자 공진주파수	MHz	0.8	≥ 8	≥ 8	100%	모의실험
2. 액상동작 나노공진기 소자 Q-factor	-	31	≥ 50	≥ 50	100%	모의실험
3. 전기적 구동/감지 회로 Q-factor 향상 비율	배	20	≥ 4	≥ 100	100%	모의실험
4. 전기적 구동/감지 회로 주파수 정밀도	ppm	5	≤ 25	≤ 1	100%	모의실험
5. SiP 나노공진기 모듈 질량 센싱 정밀도	pg	880	≤ 80	≤ 15	100%	모의실험
6. 미세저항 감지 범위 정확도	%	-1.7 ~ 1.7	-2 ~ 2	-2 ~ 2	100%	모의실험

나. 당해 (연도・단계) 정량적 연구성과 목표 및 달성도

<table>
<tr><th>구 분</th><th colspan="3">성과지표</th><th>당해연도 목표</th><th>달성율</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="9">공통지표
(필수제시)</td><td colspan="3">표준화된 IF 상위
20% SCI 논문(건)</td><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="7">특허</td><td colspan="2" rowspan="2">특허활용률
(기술이전건수/특허등록보유건수)</td><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">국제표준
특허(건)</td><td>출원</td><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>등록</td><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">3극 특허(건)</td><td>출원</td><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>등록</td><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">국제표준승인표준기고서(건)</td><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">연구비 대비 기술료 수입(%)</td><td>-</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">특성지표
(자율제시)</td><td colspan="3">국제 특허 출원</td><td>1</td><td>100 %</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">국내 특허 출원</td><td>1</td><td>100 %</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">SCI 논문</td><td>-</td><td>1편 투고</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">논문 발표</td><td>-</td><td>1편 발표</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

3. 연구개발성과(해당되는 성과만 기재)

가. 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1		한국	ETRI		PR20171185KR (원 관리번호)				100
2		한국	ETRI		PR20171185KR (원 관리번호)				100

나. 국내 및 국외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호
1	Low-Phase-Noise Self-Sustaining Amplifier IC with Parallel Capacitance Cancellation for Low-Q Piezoelectric Resonator	Microsystem Technologies	Hyoung ho Ko				SCI	논문 투고 완료	

다. 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	International Multi-Conference on Engineering and Technology Innovation 2017 (IMETI 2017)	Hyungseup Kim	2017.10.29	Hualien	Taiwan

4. 연구개발 결과의 활용방안 및 기대효과

가. 연구성과의 질적 우수성

○ 액상 동작 전기적 감지 기반 나노공진기 및 이를 응용한 스마트센서 기술 연구는 아직 세계적으로 초기단계의 기초핵심원천기술 임

- 본 과제의 연구내용은 액상 동작 나노공진기 소자와 전기적 구동/감지 회로를 동시에 개발하여 모듈 형태로 구현 및 상호 연동하여 질량 감지 특성평가를 수행하는 것으로 성공시 세계최초의 연구결과 임

나. 활용방안

○ 향후 연구개발 결과의 활용 계획

- 헬스케어, 환경, 모바일 등 스마트 바이오 센서 관련 추후 메가 프로젝트 수탁에 활용 계획
- 액상동작 나노공진기 소자, 전기적 감지/구동 회로, 모듈 핵심기술 확보로 다양한 스마트 바이오 센서 개발에 활용 계획

○ 유망시장 분야

- 연속 혈당 측정 센서 시장
- IoT 헬스케어용 바이오 센서 시장
- 환경 및 식품 모니터링 센서 시장
- 산업용 유해물질 검출 환경 센서 시장

○ 활용 범위

- 의료, 환경, 산업공정, 군사, 모바일 플랫폼, 농업&식품, 자동차, 연구 등 다양한 분야에 응용 가능한 액상동작 나노공진기 기반 스마트 바이오 센서로 활용 가능
- 혈당분석 바이오센서, 독성물질 분석 및 모니터링 바이오센서, 유해물질 및 부패촉진 모니터링 바이오센서, 심전도 측정 바이오 센서 등에 적용 가능

바이오센서 응용 분야	적용 가능한 바이오 센서
의료	혈당, 암세포, 콜레스테롤, 심장병 바이오마커, 전염병, 임신, 약물중독, 혈당검사, 젖산, 요소 등 분석에 활용되는 바이오센서
환경	독성물질 검출, 생물학적 독성물질 검출, 환경 모니터링 바이오센서
연구	병원균 및 신약개발 연구에 활용되는 바이오센서
산업공정	식품공정, 음료수 포장공정, 우유 및 치즈 생산 공정 및 제약회사 등 각 공정 검사 및 미생물 검출 분석에 사용되는 바이오센서
군사	사린, 탄저균 등 대량살상 무기로 사용가능한 생물학적 무기 감지에 사용되는 바이오센서
모바일 플랫폼	혈당, 심전도 등 스마트폰에서 활용 가능한 바이오센서
농업 & 식품	곡식, 과일 등의 잔류농약, 항생제, 병원균, 중금속과 같은 유해물질 및 부패 촉진 물질 검출에 사용되는 바이오센서
자동차	자율주행 등 운전자의 인지능력 탐지에 사용되는 바이오센서
기타	호텔, 교육기관, 구내식장, 식수, 백화점 공급 등에서의 검수 시 활용되는 바이오센서

< 액상동작 전기적 감지 나노공진기 기반 응용분야 및 적용 가능한 바이오 센서 >

나. 파급효과

○ 기존 기상동작 광학식 감지 방식과 차별화된 액상동작 전기적 감지 기반 나노공진기 소자, 회로 및 모듈 핵심원천기술 확보로 나노 공진기 기반 바이오 센서 관련 미래기술 분야 선점 및 기술 경쟁력 강화

- 현장진단 바이오센서, 연속혈당 측정 센서 등의 유망 스마트센서에 활용도가 높은 액상동작 전기적 감지 기반 나노공진기 핵심원천기술 선점
- 현장진단 바이오 서비스, IoT 헬스케어 서비스 등 의료분야, 및 환경 모니터링 서비스, 식품 모니터링 서비스 등 환경/식품 모니터링 분야, 산업용 기기, 로봇기기, 군수 등 산업분야에 확대 응용 가능

○ 전기적 감지 기반 액상동작 나노공진기 모듈 핵심원천기술 확보로 헬스케어, 환경, 모바일 등 바이오 센서 응용 분야 관련 신산업 창출 및 신시장 선점 가능

- Healthcare & Medical 바이오 센서 세계시장은 2017년에서 2022년까지 지속적으로 성장할 것으로 전망 됨

5. 연구개발비 집행 실적

(단위: 천원)

항목	비목 \ 금액				계획 금액	사용액	잔액	집행률(%)
인건비	인건비	내부 인건비	지급	현금	240,000	240,000	0	100
				현물	-	-	-	
		외부 인건비	지급	현금	-	-	-	
				현물	-	-	-	
	학생인건비		현금		-	-	-	
	소계				240,000	240,000	0	100
직접비	연구시설 장비·재료비		현금		414,175	409,437	4,738	98.856039
			현물		-	-	-	
	연구활동비				25,558	21,373	4,185	83.625479
	연구과제추진비				9,286	6,308	2,978	67.930218
	연구수당				51,601	47,789	3,812	92.612546
	위탁연구개발비				80,000	80,000	0	100
	연구지원비				2,580	2,580	0	100
	성과활용 지원비				15,000	15,000	0	100
	평가관리비				1,800	1,800	0	100
	소계				600,000	584,287	15,713	97.381167
간접비	간접비				88,000	88,000	0	100
연구개발비 총액					**928,000**	**912,287**	**15,713**	98.306789

주 의

1. 이 연구보고서는 한국전자통신연구원의 주요사업으로 수행한 연차 연구결과입니다.

2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 한국전자통신연구원에서 수행한 주요사업 연구결과임을 밝혀야 합니다.