



### 저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



**저작자표시.** 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



**동일조건변경허락.** 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

**Glass reflow** 를 이용한 저손실 **RF MEMS**  
실리콘 스위치의 설계 및 제작

**Design and fabrication of low-loss RF MEMS silicon switch using  
glass reflow**

2013 년 8 월

서울대학교 대학원  
전기 컴퓨터 공학부  
황 정 기

# **Glass reflow** 를 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스위치의 설계 및 제작

## **Design and fabrication of low-loss RF MEMS silicon switch using glass reflow**

지도교수 김 용 권

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

황 정 기

황정기의 공학석사 학위논문을 인준함

2013 년 8 월

위 원 장 : \_\_\_\_\_

부위원장 : \_\_\_\_\_

위 원 : \_\_\_\_\_

# 초록

## Glass reflow를 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스위치의 설계 및 제작

서울대학교 대학원  
전기 컴퓨터 공학부  
황 정 기

본 연구에서는 처음으로 유리를 스위치 구조재의 일부로 사용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스위치를 제안하였다. 기존의 실리콘만을 구조재로 사용하여 제작되었던 RF MEMS 실리콘 스위치에서 접촉 금속 부근 구조재를 유리로 대체한 새로운 형태의 RF MEMS 실리콘 스위치를 본 연구를 통해 설계 및 제작하였으며, 접촉 금속 부근의 구조재로 실리콘보다 RF 특성에 적합한 유리를 사용함으로써 향상되는 신호 손실 특성을 이론적인 분석과 시뮬레이션을 통해 예측하고, 이를 측정 결과와 비교하였다. 제안된 유리가 구조재로 삽입된 실리콘 스위치는 5 ~ 30 GHz 의 주파수 대역의 신호에 대해 0.12 ~ 0.33 dB 수준의 삽입 손실을 보여 기존의 실리콘 스위치보다 최대 0.26 dB (0.38 ~ 0.54 dB), 그리고 고저항 실리콘을 구조재로 사용한 스위치보다 최대 0.19 dB (0.31 ~ 0.46 dB) 정도 삽입 손실이 향상된 결과를 보였다.

본 연구에서 제안하는 새로운 형태의 RF MEMS 실리콘 스위치의 제작은 유리 재용융 (Glass reflow) 공정을 기반으로 한 SiOG (Silicon On Glass)

공정으로 제안되었으며, 제안된 공정을 통해 유리 구조재가 삽입된 스위치를 성공적으로 제작하고, 스위치의 정상적인 정전 구동을 확인함으로써 제안된 공정의 유효성을 검증하였다.

한편, 낮은 삽입 손실을 가지는 RF MEMS 스위치는 실제 RF 응용에 사용될 경우 시스템에서 신호 손실 및 왜곡을 보상하기 위한 추가 회로를 줄일 수 있도록 하여 시스템의 복잡도와 비용을 줄이는 동시에 시스템의 크기도 줄일 수 있는 장점과 직결된다. 또한, 보다 낮은 손실을 가지는 RF MEMS 스위치의 개발은 기지국 안테나나 방위 체계 산업, 인공위성 교환망 등과 같이 엄격한 성능 요구 조건을 가지는 고주파 응용 분야들로의 RF MEMS 스위치 적용을 촉진시킬 것으로 기대된다. 따라서, 저손실 RF MEMS 스위치의 개발은 다양한 RF 응용에서 RF MEMS 스위치의 활용도를 높이는 데 이바지할 수 있다.

**주요어** : MEMS, RF MEMS 스위치, 저손실, 유리 재용융

**학번** : 2011-23390

# 목차

초록	i
목차	iii
표 목차	v
그림 목차	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 RF MEMS 스위치의 연구 동향	4
1.2.1 RF MEMS 스위치	4
1.2.2 RF MEMS 스위치의 응용 분야	8
1.3 연구의 동기 및 목적	12
1.4 논문의 구성	14
제 2 장 유리 재용융 공정을 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스위치의 이론과 설계	16
2.1 RF MEMS 실리콘 스위치가 제작된 CPW 전송 선로의 기관 손실 분석	16
2.2 CPW 전송 선로의 설계	22
2.3 스위치 구조의 설계	27
2.3.1 스위치의 접촉부 영역 설계	27
2.3.2 스위치 구조물 및 스프링의 설계	29
2.3.3 스위치의 구동 전압 특성 예측	31
2.3.4 스위치의 신호 전송 특성 예측	35

제 3 장 유리 재용융 공정을 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스 위치의 제작	38
3.1 전체 제작 과정	38
3.2 단위 공정	39
3.2.1 유리 재용융을 이용한 실리콘 기판의 제작	39
3.2.2 CPW 전송 선로 제작을 위한 유리 기판의 제작	50
3.2.3 실리콘-유리 기판의 접합 및 Release 공정	58
3.3 제작 결과	61
제 4 장 유리 재용융 공정을 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스 위치의 특성 측정	66
4.1 스위치 구동 전압 특성 측정	66
4.2 스위치 신호 전송 특성 측정	70
제 5 장 결론	77
참고문헌	79
ABSTRACT	84

# 표 목차

표 1.1 RF MEMS 스위치의 다양한 구동 방식 비교 .....	6
표 1.2 고체 RF 스위치와 RF MEMS 스위치의 주요 성능 비교.....	7
표 2.1 기관 손실을 해석하기 위해 사용한 물질 특성들 .....	21
표 2.2 CPW 전송 선로의 세부 설계 수치 .....	26
표 2.3 스위치 구조물 및 꺾은 선 형태 스프링의 세부 설계 수치..	30
표 2.4 풀인 전압에 연관되는 설계값들과 계산된 풀인 전압.....	34
표 2.5 HFSS 시뮬레이션에 사용한 물질 특성 요약.....	36
표 3.1 AZ 5214 Negative tone 공정 조건 .....	40
표 3.2 (진공) 양극 접합 공정 조건 .....	43
표 3.3 AZ 4330 Positive tone 공정 조건.....	45
표 3.4 TEOS 산화막을 제거하기 위한 건식 식각 조건.....	45
표 3.5 JSR THB 111N Negative tone 공정 조건.....	54
표 3.6 크롬을 제거하기 위한 건식 식각 조건.....	55
표 4.1 풀인 전압의 설계값과 측정값 비교 .....	68



# 그림 목차

그림 1.1	접촉 방식에 따른 RF MEMS 스위치의 구분: (a) 직접 접촉 방식; (b) 정전 용량 방식.....	5
그림 1.2	RF MEMS 스위치의 응용: (a) 위상 배열기; (b) 필터뱅크; (c) SP2T 송수신 스위치.....	8
그림 1.3	능동 위상 배열 안테나 (PAA)의 개략도.....	9
그림 1.4	위상 천이기의 원리: 선로의 전기적 길이 변화를 통한 위상 조절.....	9
그림 1.5	고체 RF 스위치를 이용한 능동 위상 배열기와 RF MEMS 스위치를 이용한 능동 위상 배열기의 비교.....	10
그림 1.6	통신 기술로의 RF MEMS 활용: (a) WiSpry 社의 RF MEMS FEM 개략도; (b) 이를 내장한 삼성의 스마트폰 Focus Flash™.....	11
그림 2.1	본 연구에서 사용한 첫 번째 가정의 설명을 돕기 위한 개념도.....	17
그림 2.2	본 연구에서 사용한 두 번째 가정의 설명을 돕기 위한 개념도.....	18
그림 2.3	스위치 구조물의 기판 손실 예측을 위해 표현된 스위치 구조의 바닥면 모식도.....	19
그림 2.4	60 $\mu\text{m}$ 길이 접촉 금속에서 스위치 구조물로 인해	

발생하는 기판 손실.....	20
그림 2.5 CPW 전송 선로의 개략도.....	22
그림 2.6 유효 유전율 계산을 위한 CPW 전송 선로의 개략도.....	23
그림 2.7 전송 선로의 신호선-접지면 사이 거리 결정을 위한 HFSS 시뮬레이션 결과.....	25
그림 2.8 기존의 실리콘 및 절연막으로 구성된 스위치 구조물과 제안하는 유리 구조재가 삽입된 스위치의 비교.....	27
그림 2.9 70 $\mu\text{m}$ 높이의 유리 구조재 영역의 면적 변화에 따른 신호 손실 특성 시뮬레이션 결과.....	28
그림 2.10 [26]에서 제안된 정전 구동 방식 단결정 실리콘 스위치의 개략도.....	29
그림 2.11 COMSOL 시뮬레이션을 통한 스프링 상수 확인.....	30
그림 2.12 정전 구동 방식 스위치의 등가 모델.....	31
그림 2.13 HFSS 시뮬레이션 모델: 유리가 삽입된 RF MEMS 실리콘 스위치.....	35
그림 2.14 접촉부 구성 및 구조재를 다르게 하여 신호 전송 특성을 예측한 시뮬레이션 결과.....	37
그림 3.1 미리 제작된 실리콘 기판과 유리 기판을 이용한 SiOG 공정 개요.....	38
그림 3.2 Lift-off 공정 개요.....	39
그림 3.3 유리가 삽입 될 구멍이 형성된 실리콘 기판의 모식도 제작 결과.....	42
그림 3.4 유리 재용융 공정의 개요.....	44

그림 3.5 유리가 채용용된 실리콘 기판에 제작된 절연막의 모식도와 제작 결과.....	46
그림 3.6 접촉 금속이 증착된 실리콘 기판의 모식도와 제작 결과..	47
그림 3.7 스프링 높이 조절을 위해 DRIE 공정을 진행한 실리콘 기판의 모식도와 제작 결과.....	48
그림 3.8 유리 기판의 식각 깊이를 계산하기 위한 개략도.....	49
그림 3.9 (a) 비정질 실리콘 (Amorphous silicon) 박막 위 감광제 정의 및 (b) RIE 공정을 통한 식각 마스크의 제작.....	51
그림 3.10 단위 셀의 유리 식각 모식도와 제작 결과.....	51
그림 3.11 알루미늄 바이어스 선의 모식도와 제작 결과.....	53
그림 3.12 CPW 전송 선로가 제작 완료된 유리 기판의 모식도와 제작 결과.....	56
그림 3.13 본 연구에서 사용한 스프링 두께 조절 방법의 이해를 돕기 위한 개략도.....	57
그림 3.14 CMP 공정을 거친 후 접합 기판의 실리콘 바닥면 모습.	58
그림 3.15 알루미늄 DRIE 마스크의 모식도와 제작 결과.....	59
그림 3.16 최종적으로 제작된 스위치의 모식도와 제작 결과.....	59
그림 3.17 제작된 SPST 스위치의 전자 주사 현미경 사진.....	60
그림 3.18 스위치의 스프링 제작 결과.....	61
그림 3.19 스위치의 구동 전극 제작 결과.....	61
그림 3.20 제작된 스위치의 Laser profiler 촬영 사진.....	62
그림 3.21 제작된 스위치의 3D profiler 측정 결과.....	63
그림 3.22 제작된 스위치 바닥면의 3D profiler 측정 결과.....	64

그림 4.1 정전 구동 풀인 전압 측정을 위한 개략도.....	66
그림 4.2 측정된 정전 구동 풀인 전압의 분포.....	67
그림 4.3 제작된 스위치의 신호 전송 특성 측정을 위한 장치 구성.	70
그림 4.4 측정 샘플의 CCD 촬영 모습.....	71
그림 4.5 기존의 스위치들과 제안하는 스위치의 격리도 특성 측정 결과.....	72
그림 4.6 기존의 스위치들과 제안하는 스위치의 반사 손실 특성 측정 결과.....	73
그림 4.7 기존의 스위치들과 제안하는 스위치의 삽입 손실 특성 측정 결과.....	74
그림 4.8 기존의 스위치들과 제안하는 스위치의 삽입 손실 특성 시뮬레이션 및 측정 결과.....	75

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구의 배경

1970년대를 시작으로 등장한 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 기술은 반도체 공정 기술을 기반으로 실리콘 또는 유리 기판 위에 표면 가공 (Surface micromachining), 몸통 가공 (Bulk micromachining) 공정을 이용하여 다양한 소자를 구현해냄으로써 공학에 크게 이바지하고 있다. 각속도계나 가속도계를 주요 응용으로 하는 관성 측정 장치 (IMU: Inertial Measurement Unit)를 시작으로, 소형·휴대용 광학 장비에 사용되는 마이크로 스캐너, 렌즈 등을 구현하는 MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems), 그리고 통신 모듈이나 집적 회로에 사용되는 가변 용량 및 인덕터, 스위치 등을 제작하는 RF MEMS에 이르기까지 MEMS 기술은 각 분야마다 MEMS 소자들이 가지는 독자적인 강점을 바탕으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

다양한 MEMS 소자들 중, RF MEMS 기술의 대표적 소자인 RF MEMS 스위치는 1990년대를 기점으로 개발이 시작되었다[1, 2]. 당시 RF MEMS 스위치는 고주파 신호에 대해 높은 신호 손실과 비선형성을 보이던 고체 RF 스위치들에 대한 탁월한 대안으로 여겨져 대학 및 연구소를 중심으로 활발한 연구들이 진행되며 차세대 RF 스위치로서 높은 기대를 받았다[3, 4]. 고체 RF 스위치의 대안으로서 RF MEMS 스위치에 대한 기대치는 2000년대 초반

통신 기술의 발전에 발맞추어 더욱 높아지게 되었다. 이는 점차 다기능화, 고성능화, 소형화의 기술적인 요구를 받는 통신 장비들에 고직접화, 고주파화, 초소형화 등의 장점을 지닌 RF MEMS 스위치가 적용될 수 있을 것으로 판단되었기 때문이다. 하지만, 당시에는 RF MEMS 스위치의 구동 신뢰성과 패키징 관련 기술이 성숙하지 못하였기에 RF MEMS 스위치가 실제 RF 응용들에 적용되지 못하였고, 이에 통신 기술자들은 고주파에서 성능이 열악한 고체 RF 스위치로 인한 손실 및 신호 왜곡을 보상하기 위한 추가 회로를 RF 시스템에 도입하게 되었다. 이는 RF 시스템의 복잡도와 비용, 그리고 크기를 증대시키는 원인이 되고 있으며, 현재까지 수 GHz 이상의 고주파에서 신호 전송 특성이 원만하지 못한 고체 RF 스위치를 대체하기 위하여 실제 RF MEMS 스위치를 다양한 RF 모듈 (Module)에 적용하고자 하는 연구들이 활발히 지속되고 있다[5-7].

한편, 최근에는 스마트폰에서 사용하는 주요 주파수 대역인 0.7 ~ 2.7 GHz 수준까지 신호 특성이 개선된 고체 RF 스위치들이 개발되어[8-10], 기술적 인프라와 단가 경쟁력을 아직 완전히 갖추지 못한 RF MEMS 스위치의 기술적 입지가 좁아지게 되었다. 하지만, RF MEMS 스위치의 시장 진입을 가로막던 반복 구동 신뢰성이나 패키징 문제를 개선하고자 한 연구들이 최근 결실을 맺고 있으며[11, 12], 6 GHz 이상의 주파수를 활용하는 RF 응용들에서 여전히 RF MEMS 스위치의 신호 전송 특성이 고체 RF 스위치의 그것보다 탁월하여, 광대역 신호 처리 장비 (Wideband Instrument), 인공위성 교환망 (Satellite Switching Network), 방어 체계 (Defense system), 그리고, 지능형 기지국 안테나 (Intelligent Base-Station Antennas) 등과 같은 고주파 응용으로의 RF MEMS 스위치 적용이

기대되고 있다[13].

앞서 언급한 고주파 RF 응용들로의 적용이 기대되는 RF MEMS 스위치는 시스템에서 여과기단 (Filter stage)이나 위상 천이단 (Phase shift stage) 등의 다양한 단 (Stage)에 사용될 수 있다. 이 때, 각 단에 위치하는 RF MEMS 스위치가 가지는 손실들은 단을 지나며 중첩 및 증폭되어 신호의 종단에서 큰 손실로 나타나게 되므로 [14], RF MEMS 스위치의 손실 특성은 시스템의 성능과 직결되는 것은 물론, 손실 보상을 위한 추가 회로의 개수와도 연관된다. 따라서, 보다 낮은 손실을 가지는 RF MEMS 스위치의 개발은 시스템의 성능 향상에 기여할 뿐만 아니라, 시스템에서 불필요한 보상 회로를 줄여 시스템의 복잡도와 비용, 크기를 줄이는 데에 이바지할 수 있다.

## 1.2 RF MEMS 스위치의 연구 동향

### 1.2.1 RF MEMS 스위치

RF MEMS 스위치는 직접 접촉 (Direct 또는 Ohmic contact) 방식과 정전 용량 (Capacitive 또는 Shunt type) 방식으로 나뉜다. 그림 1.1은 직접 접촉 방식과 정전 용량 방식 스위치의 모식도를 나타낸다. 그림 1.1에서 볼 수 있듯이, 직접 접촉 방식의 스위치는 평상시 개로 (Normally off) 상태를 유지하다가 구동력에 의해 스위치 구조물이 내려오면 스위치 구조물 바닥면에 형성된 접촉 금속이 끊어진 신호선을 직접 연결하여 단락 (On) 상태를 형성하게 된다. 반면, 정전 용량 방식의 스위치는 직류 성분에 대해서는 항상 개로 상태를 유지하고, 교류 성분에 대해서는 평상시 단락 (Normally on) 상태를 유지한다. 이는 정전 용량 스위치가 용량 (Capacitor)과 구성이 같기 때문이다. 정전 용량 스위치는 접촉 금속과 신호선 사이에 유전체가 증착되어 있는 형태를 지니며, 구동력에 의해 스위치 구조물이 내려오면 접촉 금속이 유전체에 접촉하며 MIM (Metal-Insulator-Metal) 용량을 형성하여, 변화된 용량 값에 따라 특정 주파수의 교류 신호를 접지단으로 우회시킨다. 결과적으로 종단으로 유출되는 특정 주파수의 교류 신호가 사라지게 되고, 정전 용량 RF MEMS 스위치는 입력단과 종단에 대해 RF 개로 (RF Open) 상태를 형성한다.

임피던스 (Impedance)의 변화를 통해 RF 단락 및 RF 개로 상태를 형성하는 정전 용량 스위치의 경우, 앞서 언급한대로 직류 성분의 신호에 대해서는 항상 단락 상태를 보이며, 용량 값의 변화폭에 따라 처리할 수 있는 주파수의 대역이 좁은 단점이 있다. 반면, 직접 접촉 방식의 RF MEMS



스위치는 금속과 금속의 직접적인 접촉을 통해 스위치의 단락 및 개로 상태를 구현하게 되므로 직류 성분을 포함한 광대역 신호를 처리할 수 있으나, 저항성 발열 (Ohmic heating)로 인한 접촉 금속의 산화나 마모, 그리고 미세 용융 (Micro-welding) 등의 현상으로 인한 반복 구동 신뢰성에 문제가 있다[15-17].

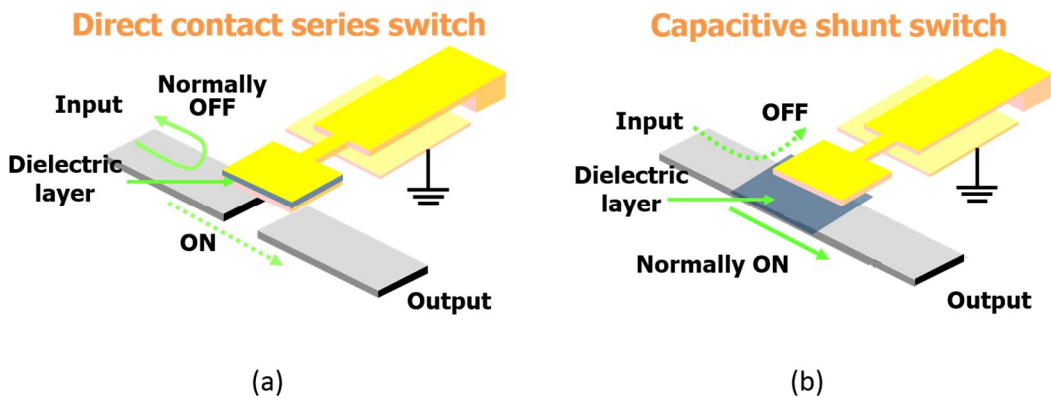


그림 1.1 접촉 방식에 따른 RF MEMS 스위치의 구분: (a) 직접 접촉 방식; (b) 정전 용량 방식.

한편 RF MEMS 스위치의 구동부를 움직이기 위해 정전력 (Electrostatic force), 전자기력 (Electromagnetic force), 열 변형력 (Thermoelastic force) 등을 활용한 RF MEMS 스위치들이 개발되어 왔다[3]. 이 중, 정전력 구동 방식은 구동력이 낮아 구동 전압이 다소 높은 단점이 있지만, 다른 구동 방식에 비해 전력 소모가 거의 없으며 응답 속도가 빠른 장점을 지녀, RF MEMS 스위치 구동에 가장 많이 사용되고 있다. 한편, 높은 구동 전압 문제는 정전 구동 방식의 RF MEMS 스위치가 실제로 휴대폰 등의 통신 장비에 적용되는 데에 큰 문제점으로 지적되어 왔으나, 점차 통신 장비들이 활용하는 전압 수준이 높아지고, 낮은 구동 전압을 가지는 RF

MEMS 스위치들이 개발됨에 따라 점차 문제가 해소되고 있다[18]. 표 1.1은 RF MEMS 스위치에 사용되는 다양한 구동 방식들의 주요 특성을 정리하였다[19].

표 1.1 RF MEMS 스위치의 다양한 구동 방식 비교

분류	정전 구동	전자기력 구동	열 변형 구동
구동력	Mediocre	High	High
구동 변위	Low	High	High
소모 전력	Negligible	High	High
응답 속도	Fast	Slow	Slow
제작 용이성	Mediocre	Difficult	Mediocre

한편, 1990년대를 시작으로 RF MEMS 스위치는 고체 RF 스위치를 대체하기 위한 대안으로 연구되어 왔다. 기존의 P-I-N 다이오드나 FET (Field Effect Transistor)과 같은 고체 RF 스위치 (Solid-state RF switch)들은 전자나 정공을 특정한 위치 (채널)에 유기 또는 고갈 시킴으로써 신호선 양 단을 단락 시키거나 개로 시킨다. 전자나 정공을 이용하여 RF 선로를 형성하는 고체 RF 스위치의 특성상 고체 RF 스위치는 고주파에서 높은 삽입 손실과 낮은 신호 격리도, 그리고 신호 왜곡으로 인한 비선형성을 보이는 문제점이 있었다. 최근 2005년 이후 이러한 문제점을 완화하여 스마트폰에서 사용하는 주파수 대역인 0.7 ~ 2.7 GHz 수준까지 특성이 향상된 고체 RF 스위치들이 개발 되었으나, 여전히 RF MEMS 스위치가 가지는 탁월한 특성에는 미치지 못하는 실정이다. 비록 고체 RF 스위치의 매우 낮은 단가가 RF MEMS 스위치의 시장 진입 장벽이 되고 있지만, 넓은 주파수 대역 (Wide bandwidth), 고주파에서의 선형성

(Linearity), 낮은 삽입 손실 (Low insertion loss), 저전력 (Low power consumption), 소형화 (Miniaturization) 등의 강력한 장점을 지닌 RF MEMS 스위치는 1~3 GHz 수준에서의 응용은 물론, 현재 고체 RF 스위치들이 원만히 대응하지 못하는 6 GHz 이상 대역의 RF 응용들로의 적용에 기대를 받고 있다. 표 1.2는 고체 RF 스위치와 정전 구동 방식의 RF MEMS 스위치의 주요 특성을 비교하여 보여준다.

표 1.2 고체 RF 스위치와 RF MEMS 스위치의 주요 성능 비교 [19]

분류	고체 RF 스위치	RF MEMS 스위치 (정전 구동 방식)
소자 크기	Very small	Very small
삽입 손실	Mediocre	Low
신호 분리도	Mediocre	Good
소모 전력	High	Negligible
전력 전송 용량	up to 45 dBm	< 40 dBm
응답 속도	10 – 100 ns	1 – 100 $\mu$ s
기계적 수명	Very good	Good
고주파에서의 선형성	Mediocre (for < 3GHz) Poor (for > 6 GHz)	Very good
가격	Low	NA

### 1.2.2 RF MEMS 스위치의 응용 분야

앞서 언급한 대로 RF MEMS 스위치가 고주파 응용에 적합한 장점을 가지고 있어 실제 RF 응용에 RF MEMS 스위치를 활용하기 위한 시도가 학교 및 연구소, 기업 등에서 활발히 진행되어 왔다. 한편, RF module에서 사용되는 RF MEMS 스위치의 응용은 기능적으로 신호 선로의 선택 또는 신호선 개폐의 두 가지로 나뉜다[20].

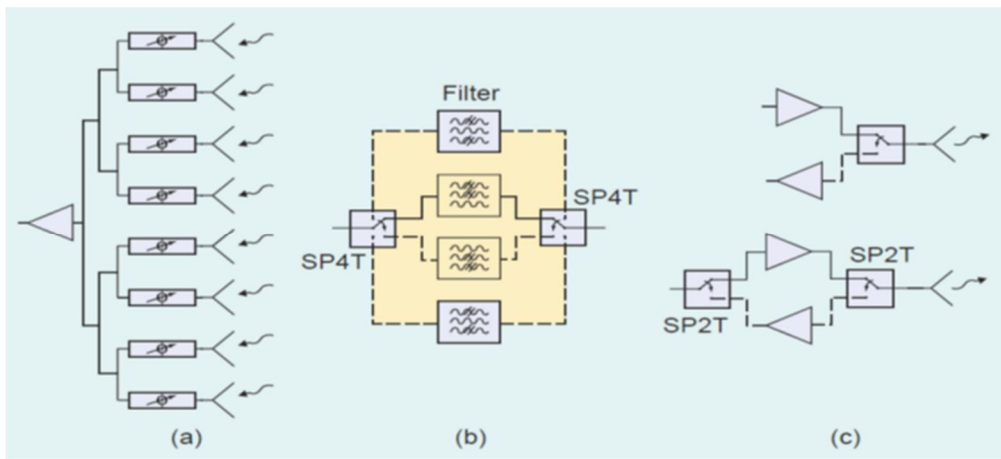


그림 1.2 RF MEMS 스위치의 응용: (a) 위상 배열기; (b) 필터 뱅크; (c) SP2T 송수신 스위치.

먼저 신호 선로의 선택의 기능을 하는 응용의 대표적인 예로 위상 배열기 (Phased array)와 필터 뱅크 (Filter bank)를 들 수 있다. 장거리 통신을 위한 군사 및 위성용 안테나, 레이더 응용에서는 통신 신호의 선택적이고 강력한 송수신을 위해 능동 위상 배열기 (APA: Active Phased Array 또는 PAA: Phased Active Array)를 사용한다. 그림 1.3에서 볼 수 있듯이 능동 위상 배열기에 배열된 각각의 안테나들에서 방출된 각기 다른 위상의 전자기파들은 보강 및 상쇄 간섭을 통해 방사 패턴 (Radiation pattern)을

형성하며, 각각의 방향으로 송신 또는 수신되는 복사 전력의 크기는 이 방사 패턴에 의해 결정된다. 따라서, 먼 거리의 대상에 신호를 집중시켜 전송하여야 하는 중·장거리 통신에서는 방사 패턴을 조정하는 장비인 능동 위상 배열기가 필수적이라 할 수 있다. 한편, 각 안테나에서 방출되는 전자기파의 위상 천이는 위상 천이기 (Phase shifter)에 입력된 전기 신호가 다양한 전기적 길이의 선로 (Path) 중 하나의 선로를 선택함으로써 이루어지며, 이 선로의 선택을 위해 RF 스위치가 활용된다(그림 1.4).

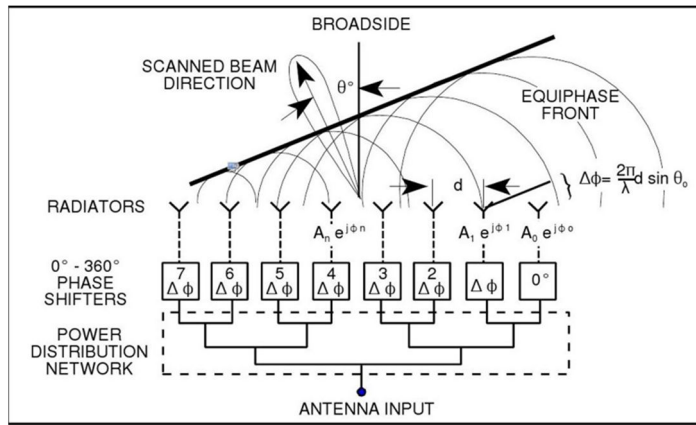


그림 1.3 능동 위상 배열 안테나 (PAA)의 개략도.

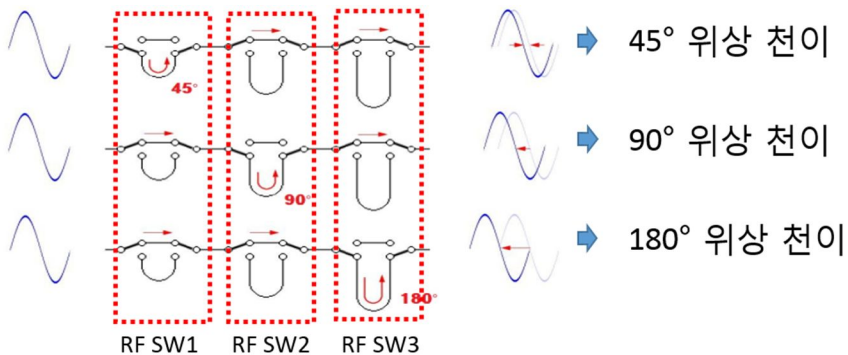


그림 1.4 위상 천이기의 원리: 선로의 전기적 길이 변화를 통한 위상 조절.

높은 주파수를 처리하는 위상 배열기 또는 위상 천이기가 원만한 성능을 가지기 위해서는 신호 선로 선택을 위해 사용되는 RF 스위치가 높은 주파수의 신호를 되도록 손실 없이 처리할 수 있어야 한다. 고체 RF 스위치를 사용한 위상 배열기의 경우, 고주파에서의 높은 손실과 비선형성이 발생하여 위상 천이단의 다음 단계 수신 모드 경우에는 저잡음 증폭기 (LNA: Low Noise Amplifier)를, 송신 모드에서는 전력 증폭기 (PA: Power Amplifier)를 각각의 RF 스위치에 필요로 하는 문제점을 지니고 있었다(그림 1.5). 하지만 앞서 언급한 대로 고주파에서의 손실 및 왜곡이 거의 없는 RF MEMS 스위치를 사용할 경우, 그림 1.5에서 볼 수 있듯이 저잡음 증폭기나 전력 증폭기 등의 추가 보상 회로를 크게 줄일 수 있어, 시스템의 복잡도와 비용, 그리고 크기를 줄일 수 있다[14].

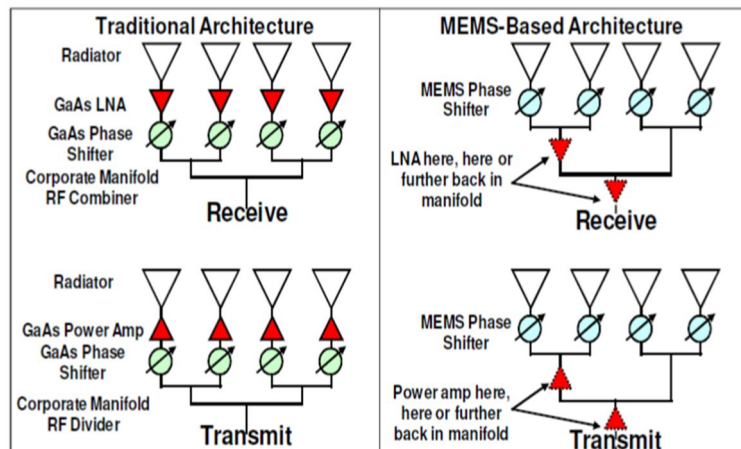


그림 1.5 고체 RF 스위치를 이용한 능동 위상 배열기와 RF MEMS 스위치를 이용한 능동 위상 배열기의 비교.

한편, 신호선 개폐의 기능을 활용하는 RF MEMS 스위치의 응용에는 FEM (Front-End Module)에 사용되는 송수신 스위치가 있다. 현재 많은

스마트폰에 사용되고 있는 FEM은, 그 전신이라고 할 수 있는 안테나-스위치 모듈 (ASM: Antenna-Switch Module)에서 고집적화, 고주파화, 다기능화 등의 기술적 요구를 받아 표면 탄성과 필터 (SAW: Surface Acoustic Wave filter), 송수 전환기 (Duplexer), 저역 통과 필터 (LPF: Low Pass Filter), RF 스위치 등이 집적되어 발전한 형태로, 장비의 부품 수를 감소시키는 동시에 부품간의 상호 연계 (Interconnection)에 따른 손실을 감소시켜 시스템의 비용과 전력 소모를 줄이는 장점을 지니고 있다. 한편, 앞서 언급한대로 현재 고주파에서 성능이 완화된 고체 RF 스위치들이 개발되어 0.7~2.7 GHz 대역을 이용하는 LTE (Long Term Evolution), W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 통신 장비들의 대부분이 고체 RF 스위치를 적용한 FEM을 채택하고 있으나, 2012년 RF MEMS 기술을 활용한 FEM이 WiSpry 社에 의해 개발되고, 삼성의 스마트폰에 적용되는 등 RF MEMS FEM의 활용도가 점차 기대되고 있다(그림 1.6) [21].

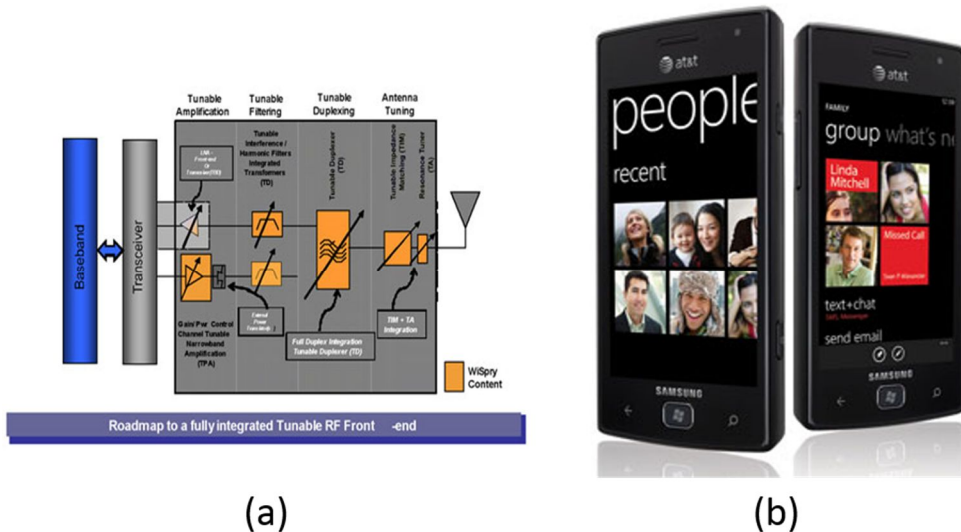


그림 1.6 통신 기술로의 RF MEMS 활용: (a) WiSpry 社의 RF MEMS FEM 개략도; (b) 이를 내장한 삼성의 스마트폰 Focus Flash™.

### 1.3 연구의 동기 및 목적

고체 RF 스위치들이 가지는 고주파에서의 높은 신호 손실과 비선형성으로 인해 RF MEMS 스위치가 적절한 대안으로 부상한 이후, 고주파 응용들에서 고체 RF 스위치를 RF MEMS 스위치로 대체하기 위한 활발한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 휴대용 통신 기기에 사용되는 FEM, 아이솔레이터 (Isolator), 위상 천이기를 비롯하여, 군사용 안테나 및 레이더 응용에 사용되는 능동 위상 배열기 등을 RF MEMS 스위치를 포함한 RF MEMS 모듈로 대체하기 위한 시도가 학교나 연구소, 기업 등에서 활발히 이루어지고 있다.

한편, 실제 RF MEMS 스위치가 RF 모듈에 적용될 경우 RF MEMS 스위치가 가지는 손실은 단을 거쳐가며 증폭되어 신호 종단에서는 큰 손실로 나타나게 되어 보다 낮은 삽입 손실을 가지는 RF MEMS 스위치일수록 보다 좋은 성능의 RF 모듈을 구현하는 데 유리하다. 이는 RF 모듈에 사용되는 RF 스위치의 손실이 시스템의 성능에 영향을 미침은 물론, 모듈 내의 추가 보상 회로의 필요성과도 연관되어 시스템의 비용과 크기에도 영향을 주기 때문이다. 따라서 낮은 삽입 손실을 가지는 RF MEMS 스위치의 개발은 향후 RF MEMS 스위치의 활용도를 높일 뿐만 아니라, RF MEMS 스위치의 응용 분야를 넓히는 데 이바지할 것으로 사료된다.

앞서 언급한 바와 같은 이유로 본 연구는 낮은 삽입 손실을 가지는 RF MEMS 스위치의 개발을 목표로 한다. 본 연구에서는 RF MEMS 실리콘 스위치 구조물에서 발생하는 손실을 줄이고자 하였으며, 이를 위해 기존의 RF MEMS 실리콘 스위치의 일부분을 실리콘보다 RF 특성이 좋은 유리로



대체하고자 한다.

본 연구에서 제안하는 형태의 RF MEMS 실리콘 스위치는 기존의 실리콘 스위치 구조물 중 접촉 금속 부근의 구조재만을 실리콘에서 유리로 대체한 형태이며, 이 구조를 구현하기 위해 유리 재용융 (Glass reflow)을 이용한 공정을 제안한다. 또한 제작 결과를 바탕으로 제안하는 공정의 유효성을 검증하고, S-parameter 측정을 통해 제안하는 새로운 형태의 RF MEMS 실리콘 스위치가 가지는 손실 특성 향상 정도를 확인하는 것을 목표로 한다.

## 1.4 논문의 구성

본 논문의 2 장에서는 먼저 기판의 전도성과 유전율로 인해 발생하는 기판 손실에 대한 이론을 바탕으로 전송 선로 상에 제작된 스위치 구조물이 신호 전송 특성에 미치는 영향을 분석한다. 다음으로 본 연구에서 사용된 CPW (Coplanar waveguide) 전송 선로를 설계하고, 제안하는 새로운 형태의 RF MEMS 실리콘 스위치의 세부 설계를 다룬다. 본 연구에서 목표로 하는 RF MEMS 스위치는 SPST (Single Pole Single Thru) 형태이며, 스위치의 세부 설계는 스위치 구조물에 삽입될 유리 구조체의 크기와 스위치에 사용된 꺾은 선 스프링의 세부 수치를 포함한다. 다음으로 설계된 스프링의 세부 수치를 바탕으로 제안된 스위치의 구동 전압 특성을 예측하며, 2 장의 마지막에는 최종적으로 설계된 스위치의 신호 전송 특성을 HFSS 시뮬레이션을 통해 예측한다.

3 장에서는 본 연구에서 제안하는 공정 방법의 전체적인 개요를 먼저 보이고 상세한 공정 개요를 제작 결과와 함께 보인다. 상세한 공정 개요에서는 유리 재용융 공정을 이용한 실리콘 기판의 제작 과정과 CPW 전송 선로가 제작되는 유리 기판의 제작 과정을 차례로 보이며, 다음으로 각기 제작된 두 기판의 양극 접합 및 release 공정을 보인다. 3 장의 마지막으로 제작된 스위치를 다양한 측정 장비들로 측정한 결과를 보이고 제작 결과에 대한 분석을 통해 제안된 공정 방법의 유효성을 검증한다.

4 장에서는 3 장에서 제안한 공정 방법을 통해 제작된 스위치의 정전

구동 특성 및 신호 전송 특성을 측정 및 분석한다. 정전 구동 특성 측정에서는 제작된 스위치 중 무작위로 선별된 5 개의 샘플의 풀인 전압을 측정하여 이를 2 장에서 예측한 구동 전압 특성과 비교 및 분석한다. 다음으로 신호 전송 특성 측정에서는 본 연구에서 제안된 유리 구조재가 삽입된 스위치의 S-parameter를 측정하여, 이를 대조군인 두 종류의 스위치 (실리콘 구조재 스위치와 고저항 실리콘 구조재 스위치)의 S-parameter 특성들과 비교하여 제안된 스위치의 유효성을 확인한다.

마지막으로 5 장에서는 본 연구의 결과를 요약하며 논문을 마무리 짓는다.

## 제 2 장 유리 재용융 공정을 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스위치의 이론과 설계

### 2.1 RF MEMS 실리콘 스위치가 제작된 CPW 전송 선로의 기판 손실 분석

직접 접촉 방식 RF MEMS 스위치의 삽입 손실은 크게 접촉 금속과 신호선 사이의 접촉 저항 (Contact resistance)으로 인한 손실과 기판의 전도성 (Conductivity)과 유전율 (Permittivity)로 인해 발생하는 기판 손실 (Substrate loss)로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 이 두 가지의 손실 중 기판 손실만을 해석한다.

기판 손실 중 기판의 전도성으로 인한 신호 손실은 전도성을 가진 물체에 조사된 전자기파가 반사되는 특성으로 인해 나타나게 된다. 전송 선로를 지나는 전자기파는 신호선과 접지면 사이에 전계가 집중되는 형태로 전송되는데, 이 사이 또는 근처에 위치한 기판이 전도성을 가질 경우 신호선과 접지면 사이를 통해 전송되는 전자기파가 분산되어 손실로 나타나게 되는 것이다. 따라서 보다 낮은 전도성을 가진 기판일수록 그 위에 제작된 전송 선로의 손실 특성이 좋다. 한편, 기판 전도성이 0.01 S/m 이하가 되면 더 낮은 기판 전도성으로 인한 손실 특성 향상 정도는 크지 않은 것으로 확인되었으며[22], 일반적인 실리콘 기판의 경우 수 S/m에서 수십 S/m 수준의 전도성을 가지고 있어 RF 전송 선로의 기판으로 적절하지 못하다.

한편, 기판 유전율로 인한 손실은 유전체 내부를 통과하는 전계로 인한 유전 분극 현상에 기인한다. 유전체에 고주파의 전계가 인가되면 전계 방향의 변화에 따라 유전체 내부 전하 배열이 규칙적으로 변하는 회전 운동을 하게 되는데, 이 회전 운동 에너지가 열 에너지로 방출되는 현상을 유전가열 (Dielectric heating)이라 하고, 방출된 열 에너지가 곧 전송 신호의 손실로 나타나게 된다. 이 유전체 손실은 주파수가 높아질수록 커지므로 고주파를 사용하는 RF 응용에서는 전체 손실에서 주요하게 다루어져야 한다.

본 연구에서는 스위치의 단락 상태 (On state)일 때 전송 선로의 일부분이 되는 접촉 금속이 스위치 구조물 바닥면에 제작되어 있어 스위치 구조물이 전송 선로의 기판처럼 작용하게 되는 상황에 주목하였으며, 이 현상을 해석하기 위해 다음과 같은 두 가지 가정을 수립하였다.

첫 번째 가정은 그림 2.1에서 보는 바와 같이 스위치가 삽입된 CPW 전송 선로에서 발생하는 총 삽입 손실은 하부 기판에 제작된 CPW 전송 선로로 인한 손실과 스위치 구조물로 인한 손실의 합과 같다는 것이다. 이 가정을 수립함으로써 두 손실 (그림 2.1 (a)와 (b))을 독립적으로 해석하고, 이를 합한 결과를 전체 손실로 예측한다. 한편, 접촉 저항으로 인한 손실은 해석에서 제외하였다.

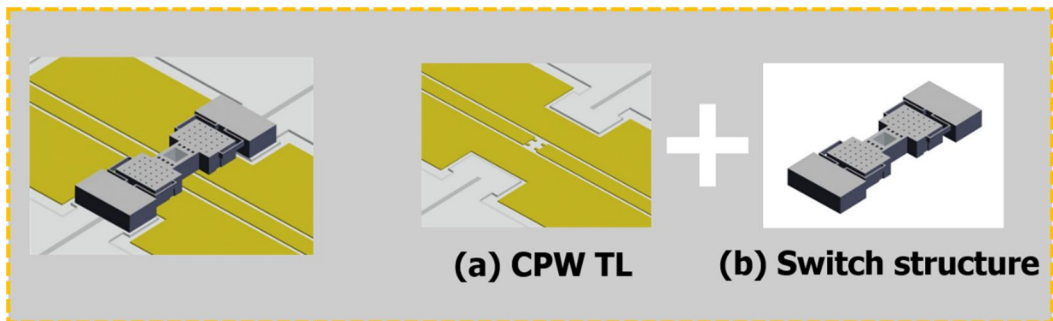


그림 2.1 본 연구에서 사용한 첫 번째 가정의 설명을 돕기 위한 개념도.

두 번째로 설정한 가정은 다음과 같다. 스위치가 형성되어 있는 CPW 전송 선로는 그림 2.2와 같이 세 부분으로 나뉘며, 각 부분에 따라 CPW의 기판으로 적용되는 구조재는 그림 2.2의 (a), (c) 경우에는 하부 기판으로, 그림 2.2의 (b)의 경우에는 상부 구조물인 스위치의 구조재를 따른다는 것이다.

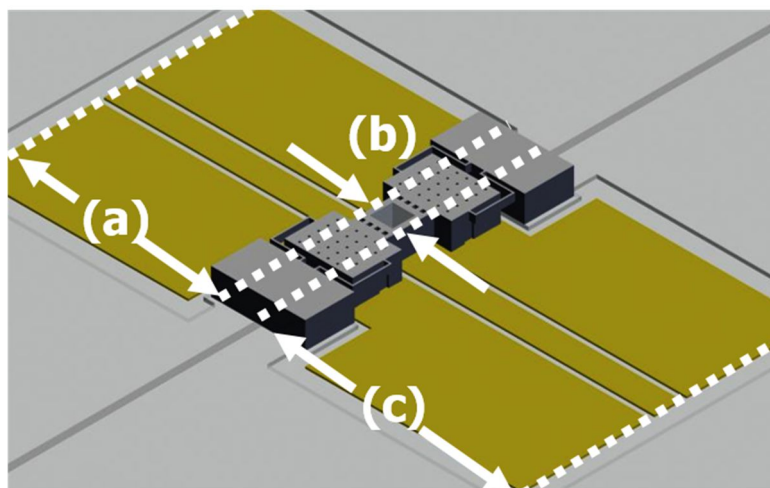


그림 2.2 본 연구에서 사용한 두 번째 가정의 설명을 돕기 위한 개념도.

한편, CPW 전송 선로의 손실은 [22]와 같이 해석할 수 있다. 먼저, 유전 손실  $\alpha_d$ 는 식 (2.1)과 같이 주어진다.

$$\alpha_d = \frac{0.869\pi}{\lambda_0} \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1} \frac{\epsilon_{\text{eff}}(f) - 1}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}(f)}} \tan\delta \quad [\text{dB/mm}] \quad \text{식 (2.1)}$$

식 (2.1)에서 나타난  $\epsilon_r$ 은 유전체의 비유전율을 나타내고,  $\lambda_0$ 는 자유공간에서의 파장의 길이로 식 (2.2)와 같이 주어진다. 한편, 손실 탄젠트인  $\tan\delta$ 는 식 (2.3)과 같이 주어진다. 여기서 사용된 전송 선로의 유효

유전율 (Effective permittivity of transmission line:  $\epsilon_{\text{eff}}$ )는 비대칭 유전체 구조를 가진 전송 선로의 해석에 사용되며, 자세한 내용은 2.2에서 설명한다.

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{f} \quad [\text{m}] \quad \text{식 (2.2)}$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} \quad \text{식 (2.3)}$$

그림 2.3은 식 (2.1) ~ 식 (2.3)을 통해 해석하고자 하는 스위치 구조물의 바닥면 모식도이다. 앞서 언급한대로 접촉 금속 부근 스위치 구조물에서 발생하는 손실을 확인하기 위해, 60  $\mu\text{m}$  길이의 접촉 금속이 형성된 구간에서는 CPW 전송 선로의 기판을 스위치의 구조재로 해석한다.

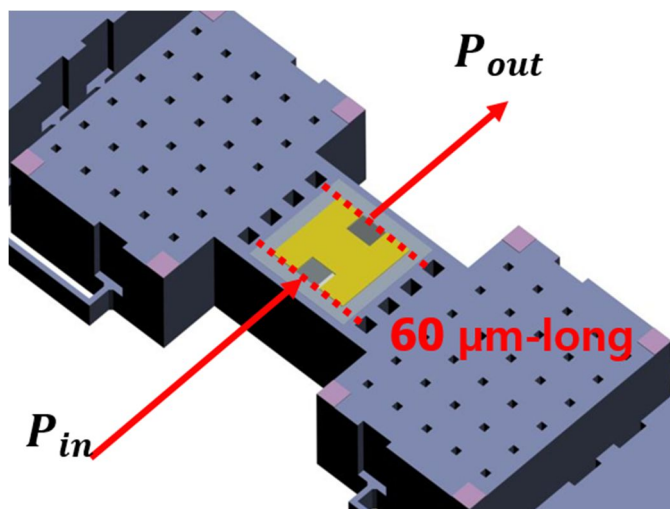


그림 2.3 스위치 구조물의 기판 손실 예측을 위해 표현된 스위치 구조의 바닥면 모식도.

스위치의 접촉 금속 부근 구조재 변경으로 인한 손실 특성 향상 정도를

확인하기 위하여, 실리콘, 고저항 실리콘 (HRS: High Resistivity Silicon), 유리를 구조재로 사용한 세 가지 경우를 고려하였으며, 식 (2.1) ~ 식 (2.3)을 이용하여 계산된 스위치 구조물로 인한 손실은 그림 2.4와 같다. 한편, 유효 유전율은 CPW 전송 선로의 설계를 마친 후 계산되었으며, 설계된 CPW 세부 수치에 따라 구조재가 실리콘과 고저항 실리콘의 경우 6.44, 유리의 경우 2.91로 계산되었다.

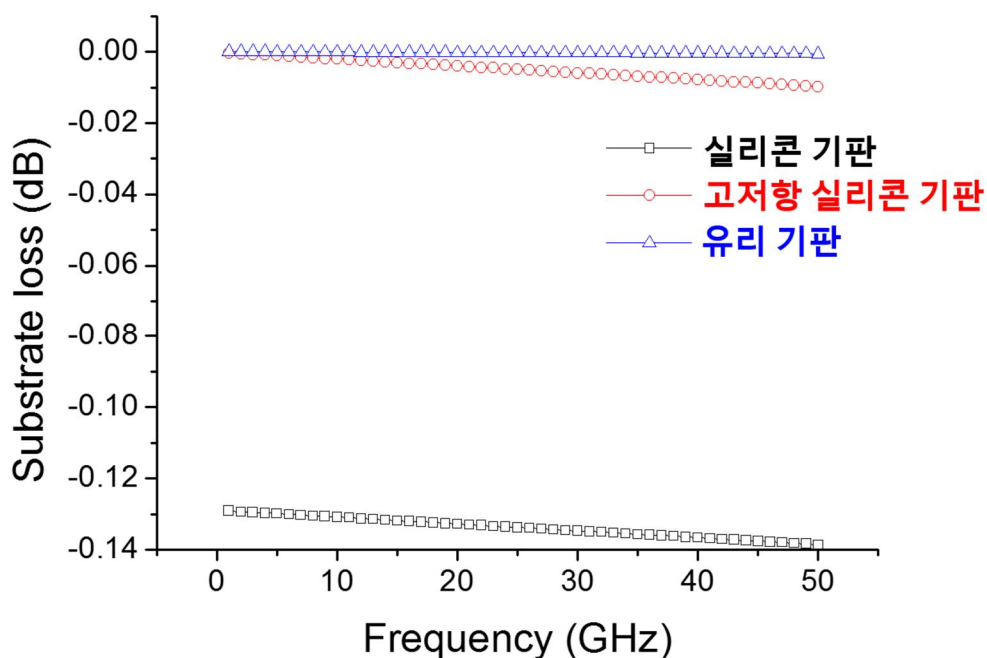


그림 2.4 60  $\mu\text{m}$  길이 접촉 금속에서 스위치 구조물로 인해 발생하는 기판 손실.

그림 2.4에서 볼 수 있듯이, 60  $\mu\text{m}$  의 길이의 접촉 금속에 대한 스위치 구조물로 인해 발생하는 기판 손실은 접촉 금속 위 구조재가 실리콘일 경우 1 ~ 50 GHz에 걸쳐 약 0.13 dB 수준으로 나타나는 반면, 전도성이 낮은 고저항 실리콘이나 유리는 구조재로 사용될 경우 기판 손실이 거의 없는



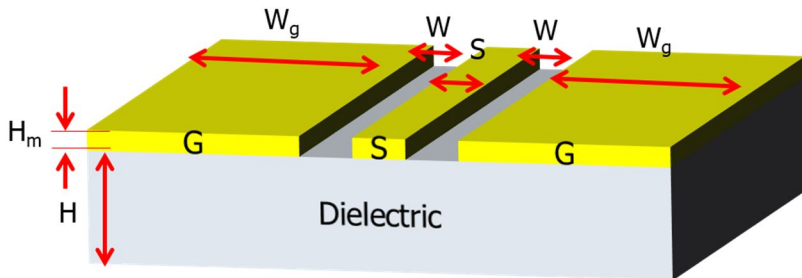
것으로 예측되었다. 한편, 실리콘과 고저항 실리콘의 경우 유전율로 인한 손실의 크기가 고주파로 갈수록 증가하는 결과를 보였으나, 60  $\mu\text{m}$  의 짧은 길이에 대해서는 전체 기판 손실에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 본 계산에 사용된 실리콘, 고저항 실리콘, 유리의 물성치는 표 2.1에 제시되었다.

표 2.1 기판 손실을 해석하기 위해 사용한 물질 특성들

물질 특성	상대 유전율 ( $\epsilon_r$ )	Bulk conductivity ( $\sigma$ ) [S/m]	$\epsilon''/\epsilon'$
실리콘	11.9	6.67	$1.5 \times 10^{-2}$
고저항 실리콘	11.9	0.01	$1.5 \times 10^{-2}$
유리	4.82	$1.25 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-3}$

## 2.2 CPW 전송 선로의 설계

1969년 C. P. Wen [23]에 의해 최초로 제안된 CPW 전송 선로는 그림 2.5에서 보여지는 바와 같이 가운데에 strip 형태의 신호 전송선을 두고 양쪽에 접지면 (Ground plane)을 가진 전송 선로이다. CPW 전송 선로에서 전자기파는 신호선과 접지면의 사이 공간을 통해 전파 (Propagation)되며, CPW 구조의 특성에 따라 Quasi-TEM mode를 보인다.



- |                  |                   |
|------------------|-------------------|
| S: 신호선 넓이        | $W_g$ : 접지면 넓이    |
| W: 신호선-접지면 사이 간격 | $H_m$ : CPW 금속 두께 |
| H: 기판 두께         |                   |

그림 2.5 CPW 전송 선로의 개략도.

한편, CPW는 평면 상에 신호선과 접지면이 형성되기 때문에 제작이 용이하고, 표면 실장착 기술 (SMT: Surface Mounting Technology)에 적합한 장점을 가지고 있으며, 분산 (Dispersion) 현상으로 인한 손실이 적어 넓은 대역의 주파수 신호를 손실 없이 처리할 수 있는 장점이 있고 [24], 때문에 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits)나 RF MEMS에 선호되는 전송 선로이다.

CPW 전송 선로의 설계는 50 Ohm 임피던스 정합 (Impedance

matching)을 통해 수행하며, 설계를 위해 먼저 전송 선로의 유효 유전율을 구해야 한다. Microstrip이나 CPW와 같이 기판과 공기를 동시에 경계 조건으로 가지는 전송 선로들은 전계가 두 영역으로 서로 다르게 형성되기 때문에 유전체인 기판 영역과 공기 영역에서의 전계를 동시에 고려해 주어야 하고, 이를 위해 등각 사상법 (Conformal mapping)을 이용하여 계산되는 유효 유전율을 사용한다. CPW 전송 선로의 유효 유전율은 신호선의 넓이, 신호선과 접지면 사이의 거리, 유전체 기판의 두께와 유전율의 함수로 결정되며, 이 유효 유전율을 토대로 전송 선로의 특성 임피던스 (Characteristic Impedance)를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 [25]에서 제시한 유한한 두께의 유전체 기판 상에 형성된 CPW 전송 선로의 해석을 따랐다(그림 2.6).

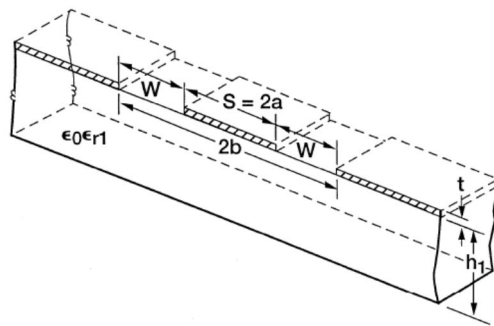


그림 2.6 유효 유전율 계산을 위한 CPW 전송 선로의 개략도.

유한한 두께의 유전체 기판 상에 형성된 CPW 전송 선로에서 신호선 폭의 절반값을  $a$ , 신호선 폭의 절반값에 신호선-접지면 사이 거리를 더한 값을  $b$ , 기판의 두께를  $h$ 로 정의할 때, 등각 사상법에 사용되는 타원 정적분 계수 (Modulus of complete elliptic integral)  $k$ 와  $k_1$ 은 식 (2.1)과 같이

정의 된다.

$$a = \frac{s}{2}, \quad b = \frac{s}{2} + W, \quad k = \frac{a}{b}, \quad k_1 = \frac{\sinh(\frac{\pi a}{2h})}{\sinh(\frac{\pi b}{2h})} \quad \text{식 (2.1)}$$

이어, 1종 정적분 함수 ( $K(k)$ : Elliptic integral of the first kind)와 보완 적분 함수 ( $K'(k)$ : Complementary integral)의 관계는 식 (2.2)와 같이 정의되고,

$$K'(k) = K(k'), \quad k' = \sqrt{1 - k^2} \quad \text{식 (2.2)}$$

최종적으로 식 (2.3)을 이용하여 유효 유전율은 식 (2.4)와 같이, 특성 임피던스는 식 (2.5)와 같이 얻어지게 된다[23, 25].

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \begin{cases} \left[ \frac{1}{\pi} \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right) \right]^{-1} & \text{for } 0 \leq k \leq 0.7 \\ \frac{1}{\pi} \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right) & \text{for } 0.7 \leq k \leq 1.0 \end{cases} \quad \text{식 (2.3)}$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k_1)K(k')}{K(k_1)K(k)} \quad \text{식 (2.4)}$$

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \frac{K(k')}{K(k)} \quad \text{식 (2.5)}$$

본 연구에서 설정한 500  $\mu\text{m}$  높이의 유리 기판과 70  $\mu\text{m}$  너비의 신호선

폭을 가진 CPW 전송 선로에서, 유리 기판의 비유전율 ( $\epsilon_{r\_유리} = 4.82$ )을 고려하여 계산된 50 Ohm 임피던스 정합 신호선-접지면 사이 거리는 10  $\mu\text{m}$  였으며, Ansoft 社의 시뮬레이션 툴인 HFSS (High Frequency Structure Simulator)를 통해 CPW 전송 선로 설계의 유효성을 확인하였다(그림 2.7). 한편, 전송 선로의 길이와 접지면의 폭은 각각 1450  $\mu\text{m}$  와 334  $\mu\text{m}$  로 설정되었고, 이는 스위치 구조물이 전송 선로의 가운데에 형성된 후에 신호선의 양 단에서 측정을 위한 접속 (Probing)을 원활히 할 수 있도록 설계된 수치이다. 한편, 본 연구에서 수행한 모든 시뮬레이션의 주파수 범위는 0-40 GHz 로 설정되었다.

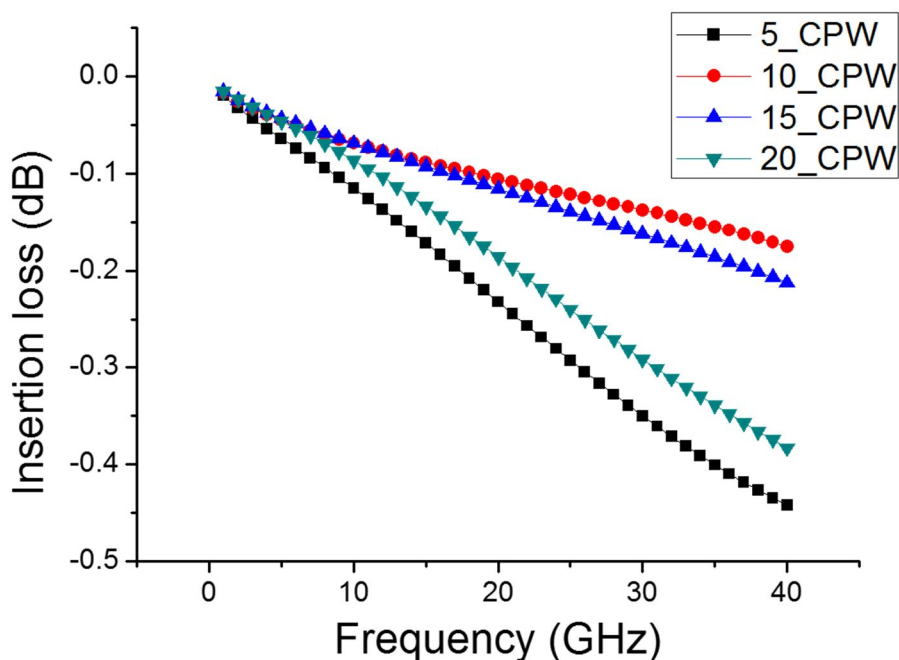


그림 2.7 전송 선로의 신호선-접지면 사이 거리 결정을 위한 HFSS 시뮬레이션 결과.

CPW를 형성하기 위해 공정에 사용될 기판은 500  $\mu\text{m}$  두께의 Borosilicate 유리 기판 (Pyrex<sup>TM</sup> 7740)으로 정하였으며, 최종적으로 설계가 완료된 CPW 전송 선로의 세부 수치는 표 2.2에 제시되었다.

표 2.2 CPW 전송 선로의 세부 설계 수치

설계 변수		값
CPW 전송 선로	신호선 폭	70 $\mu\text{m}$
	신호선-접지면 거리	10 $\mu\text{m}$
	접지면 폭	334 $\mu\text{m}$
	선로 길이	1450 $\mu\text{m}$
	전송선 두께	2.5 $\mu\text{m}$
	유효 유전율 ( $\epsilon_{\text{eff}}$ )	2.91
기판	기판 두께	500 $\mu\text{m}$
	상대 유전율 ( $\epsilon_r$ )	4.82
	손실 탄젠트 ( $\tan\delta$ )	0.0015

## 2.3 스위치 구조의 설계

### 2.3.1 스위치의 접촉부 영역 설계

기존의 RF MEMS 실리콘 스위치는 스위치 구조물이 실리콘으로만 구성되어 있어, 이 실리콘 구조물에 인가되는 구동 전압과 전송 신호를 분리하기 위해 실리콘과 접촉 금속 사이에 TEOS, SiN<sub>x</sub> 등의 절연막이 형성되었다. 본 공정에서는 유리 채용용 공정을 통해 삽입된 유리 구조재 위에 접촉 금속이 증착되어, 절연막이 필요하지 않다. 그림 2.8은 기존의 실리콘 및 절연막으로 구성된 스위치 ((a), (c))와 본 논문에서 제안하는 유리 구조재가 삽입된 스위치 ((b), (d))의 바닥면 ((a), (b))과 옆면 ((c), (d))의 모습을 보여준다.

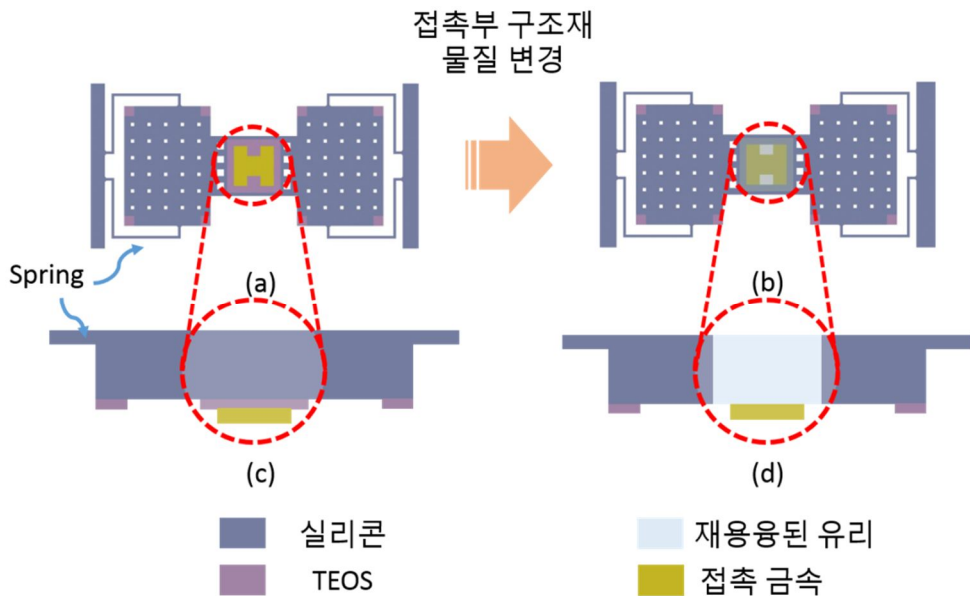


그림 2.8 기존의 실리콘 및 절연막으로 구성된 스위치 구조물과 제안하는 유리 구조재가 삽입된 스위치의 비교.

유리 재용융을 통해 실리콘 기판부에 형성되는 유리 구조재 영역은 실리콘 구조물과 접촉 금속을 완전히 절연해야 하므로 반드시 접촉 금속보다 넓게 형성되어야 하며, 본 연구에서 사용된 접촉 금속의 면적은 가로, 세로 각각 60  $\mu\text{m}$  이다. 공정의 안정성 고려하여 70  $\mu\text{m}$  높이로 설정된 유리 구조재 영역에 대해 가로-세로 길이의 변화에 따른 신호 손실 특성을 확인하기 위한 HFSS 시뮬레이션을 수행한 결과, 유리 구조재 영역이 각각 70  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$ , 그리고 90  $\mu\text{m}$  의 정사각형일 때의 세 가지 경우 손실 특성의 차이는 거의 없었다(그림 2.9). 한편, 유리 구조재의 넓이는 정렬 (Align) 공정의 용이성을 위해 80  $\mu\text{m}$ 의 정사각형으로 설정하였다.

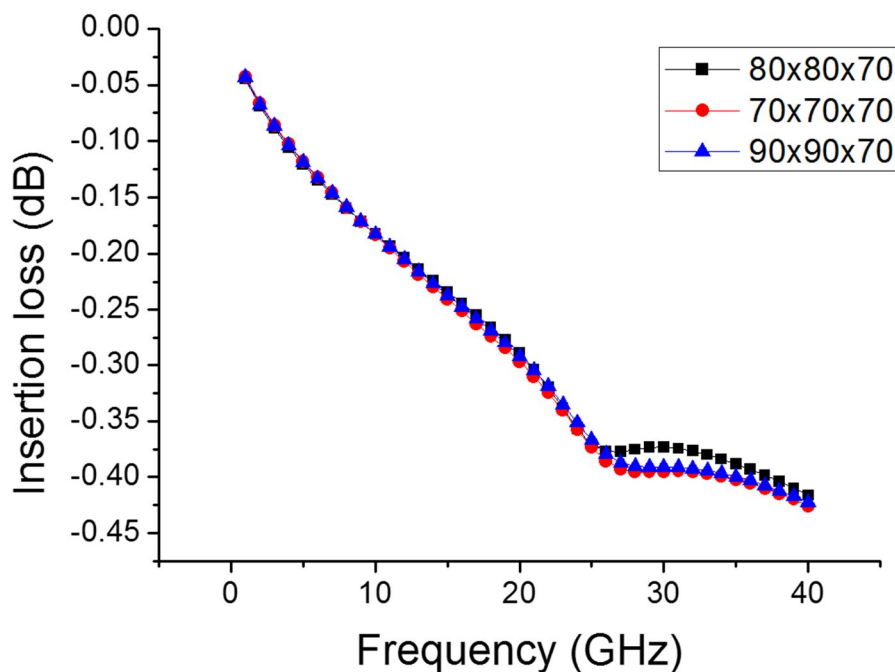


그림 2.9 70  $\mu\text{m}$  높이의 유리 구조재 영역의 면적 변화에 따른 신호 손실 특성 시뮬레이션 결과.



### 2.3.2 스위치 구조물 및 스프링의 설계

본 연구에서 제안하는 유리 구조체가 삽입된 스위치를 구현하기 위해, [26]에서 제안된 바 있는 형태의 직접 접촉식 정전 구동 RF MEMS 실리콘 스위치를 선택하였다(그림 2.10). 구조체로 사용된 단결정 실리콘 (SCS: Single Crystalline Silicon)은 탄성계수가 높고 ( $\approx 190$  GPa) 잔류 응력 (Residual stress)이 거의 없으며, 취성 (Brittleness)인 특성에 따라 소성 변형이 거의 없음은 물론, 항복 강도 (Yield strength)도 다른 물질에 비해 월등히 높아 ( $\approx 7$  GPa) 기계적으로 견고한 구조의 구현이 가능하다[19]. 본 연구에서 사용한 스위치 구조물 및 꺾은 선 형태의 스프링 설계 수치를 표 2.3에 나타내었다.

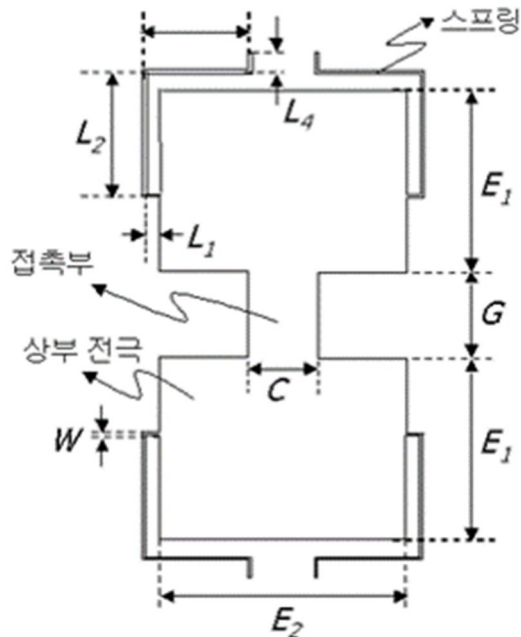


그림 2.10 [26]에서 제안된 정전 구동 방식 단결정 실리콘 스위치의 개략도.

표 2.3 스위치 구조물 및 꺾은 선 형태 스프링의 세부 설계 수치

설계 변수		값
전극 크기 ( $E_1 \times E_2$ ) [ $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ ]		130 × 180
스프링 두께 [ $\mu\text{m}$ ]		20
스프링 폭 [ $\mu\text{m}$ ]		4
접촉부 크기 ( $C \times G$ ) [ $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ ]		130 × 90
꺾은 선 스프링	$L_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	19
	$L_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	104
	$L_3$ [ $\mu\text{m}$ ]	91
	$L_4$ [ $\mu\text{m}$ ]	14

표 2.3에서 제시된 설계 수치를 가지는 스위치의 스프링 상수를 확인하기 위해 Altsoft 社의 유한 요소법 (FEM: Finite Element Method) 시뮬레이션 툴인 COMSOL을 이용하였고(그림 2.11), 설계된 스위치의 스프링 상수는 770 N/m 로 나타났다.

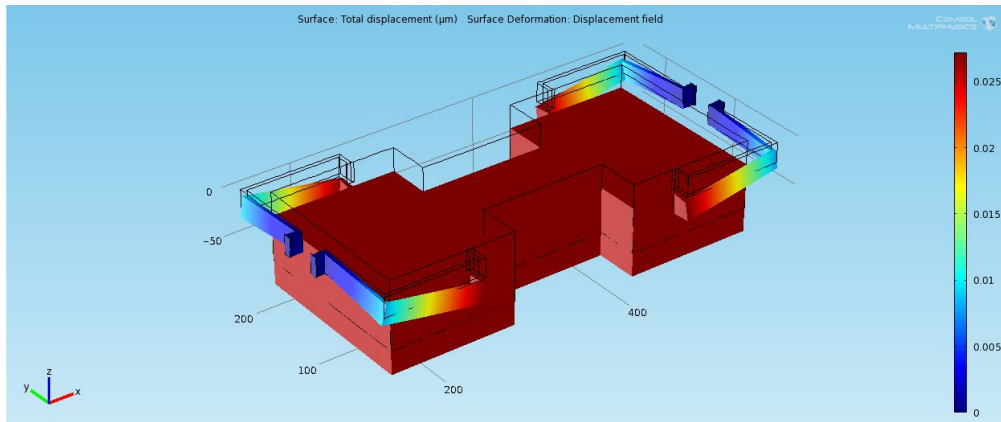


그림 2.11 COMSOL 시뮬레이션을 통한 스프링 상수 확인.

### 2.3.3 스위치의 구동 전압 특성 예측

2.3.2에서 설계된 정전 구동 방식 RF MEMS 스위치는 구동 전압 특성을 예측하기 위해 그림 2.12와 같이 등가화되었다.

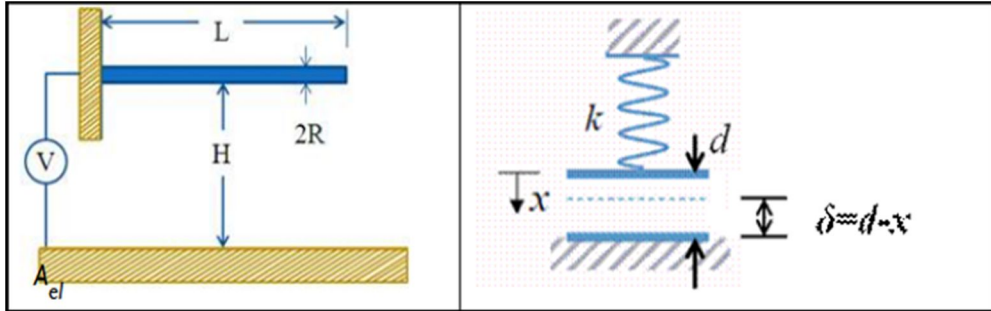


그림 2.12 정전 구동 방식 스위치의 등가 모델.

그림 2.12를 등가 모델로 하여 해석하고자 하는 정전 구동 방식 RF MEMS 스위치의 구동 원리는 다음과 같다. 그림 2.12에서 하부 전극은 고정되어 있고 상부 전극은 상하 운동이 가능한 스프링에 매달려 있는 전극일 때, 인가된 전압에 의해 상-하부 구동 전극 사이에 전위차가 발생하면 두 전극은 정전 용량처럼 작용하여 유도된 전하로 인한 전기 에너지를 가지게 된다. 이 전기 에너지는 곧 정전 포텐셜 (Electrostatic potential)로서, 같은 크기의 기계적인 일 (힘과 이동거리의 곱의 형태)을 할 수 있는 능력을 의미한다. 용량에서 발생하는 정전 포텐셜은 두 전극 사이의 거리에 따라 크기가 변하게 되므로 이 변화량이 곧 기계적인 일로 전환된 에너지량이 된다.

정전력의 크기를 계산하기 위한 정량적인 해석은 다음과 같다. 두 구동 전극이 형성하는 정전 용량을  $C$ 라 하고, 인가된 전압을  $V$ 라 할 때 두 구동 전극 사이에 형성되는 전기 에너지는 식 (2.6)과 같다.

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \quad \text{식 (2.6)}$$

한편, 그림 2.12에 나타난 변위  $x$ 에 따른 정전 용량 값은 전극 사이의 초기 거리  $d$ 와 두 전극이 마주보는 면적  $A$ 에 따라 식 (2.7)과 같다.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d-x} \quad \text{식 (2.7)}$$

여기서  $\epsilon_0$ 는 전극 사이의 물질인 공기의 유전율이다. 식 (2.7)을 식 (2.6)에 대입하여, 변위  $x$ 에 따른 전기 에너지를 다시 정리한 결과는 식 (2.8)과 같다.

$$W = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(d-x)} \quad \text{식 (2.8)}$$

전극 사이의 거리가 초기 거리  $d$ 에서 구동 이후의 거리  $(d-x)$ 로 변할 때 전기 에너지의 변화로 인해 발생하는 힘은 전기 에너지의 거리에 대한 변화율과 같으므로, 식 (2.9)와 같이 계산된다. 이 힘을 곧 정전력 ( $F_e$ )이라 한다.

$$F_e = -\frac{dW}{dx} = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(d-x)^2} \quad \text{식 (2.9)}$$

한편, 상부 전극이 매달려 있는 스프링의 스프링 상수를  $k$ 라 하면, 상부 전극의 변위가  $x$ 일 때 스프링이 원래의 형태로 돌아가고자 하는 복원력은 식

(2.10)과 같이 주어진다. 상부 전극은 식 (2.9)에서 발생한 정전력이 식 (2.10)처럼 표현되는 스프링 복원력과 평형을 이루는 거리만큼 움직이므로(식 2.11), 식 (2.9)와 식 (2.10)을 인가되는 전압  $V$ 에 대해 정리하면 이동 거리  $x$ 에 따른 구동 전압을 식 (2.12)와 같이 유도할 수 있다.

$$F_{\text{spring}} = kx \quad \text{식 (2.10)}$$

$$F_e = F_{\text{spring}} \quad \text{식 (2.11)}$$

$$V = \sqrt{\frac{2kx(d-x)^2}{\epsilon_0 A}} \quad \text{식 (2.12)}$$

식 (2.12)에서 이동 거리에 대한 전압의 최대값  $V_{\text{max}}$ 를 구하면, 식 (2.13)와 같이 도출된다.

$$V_{\text{max}} = V|_{x=\frac{1}{3}d} = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\epsilon_0 A}} \quad \text{식 (2.13)}$$

이 때의 전압 ( $V_{\text{max}}$ )을 스위치가 완전히 접촉을 이루게 하는 전압이라 하여 풀인 전압 (Pull-in voltage)이라 하고, 이는 전극의 위치가 초기 간격의 1/3 이상 가까워지면, 가까워진 거리로 인해 증가한 정전력이(식 2.9), 변위의 증가에 따라 강해진 스프링의 복원력 (식 2.10)보다 항상 크게 되어 구동 전극 사이 거리가 계속 가까워지게 되기 때문이다.

앞선 해석을 바탕으로 풀인 전압을 예측하기 위하여 본 연구에서 설계된

수치들을 표 2.4에 제시하였다. 2.3.2에서 설계한 꺾은 선 스프링의 스프링 상수는 770 N/m로 나타났으며, 구동 전극 사이의 초기 간격은 공정의 안정성을 고려하여 2  $\mu\text{m}$  로 설정하였다. 설계된 구동 전극 면적은 46800  $\mu\text{m}^2$  였으며, 이 수치들로 계산된 풀인 전압은 66.4 V 였다. 한편, 66.4 V 로 계산된 구동 전압은 하부 전극 (CPW의 접지면)의 도금 공정에서 도금 두께를 조절함으로써 낮출 수 있다.

표 2.4 풀인 전압에 연관되는 설계값들과 계산된 풀인 전압

설계값	값
스프링 상수 ( $k$ ) [N/m]	770
구동 전극 초기 간격 [ $\mu\text{m}$ ]	2
구동 전극 면적 [ $\mu\text{m}^2$ ]	46800
계산된 풀인 전압 ( $V_{\text{pull-in}}$ ) [V]	66.4

### 2.3.4 스위치의 신호 전송 특성 예측

앞서 2.3.1, 2.3.2에서 설계된 유리가 삽입된 실리콘 스위치 구조물과 CPW 전송 선로를 적용하여 HFSS 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션에서는 삽입 손실 특성을 확인하기 위해 접촉 금속과 끊어진 CPW 전송 선로가 맞닿아 있는 단락 상태를 시뮬레이션 모델로 설정하였다(그림 2.13).

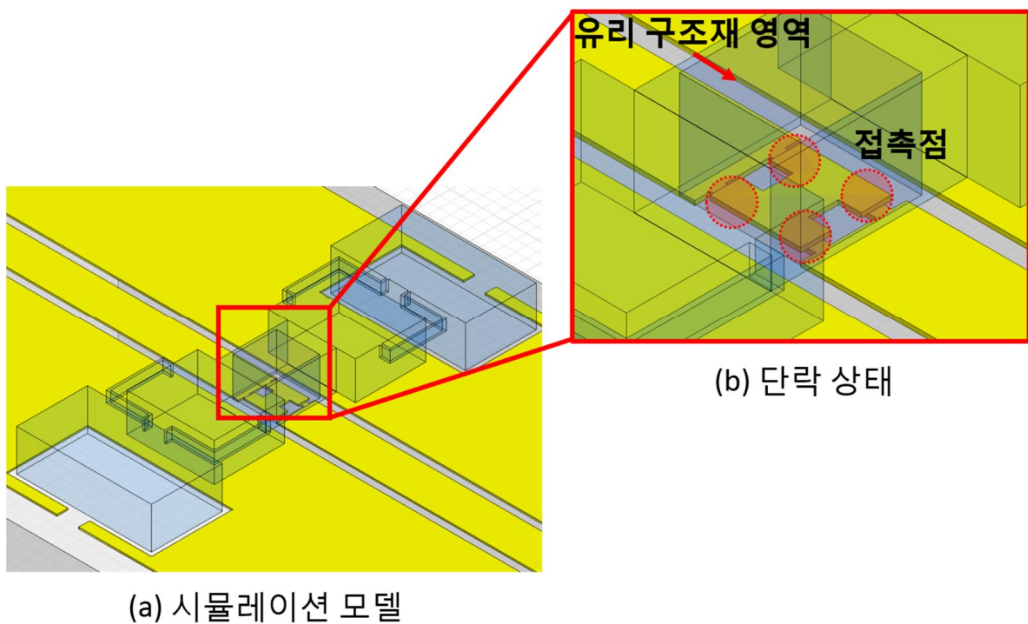


그림 2.13 HFSS 시뮬레이션 모델: 유리가 삽입된 RF MEMS 실리콘 스위치.

기존의 실리콘 스위치 (접촉부 구성: 실리콘-절연막-접촉 금속)와 고저항 실리콘 스위치 (접촉부 구성: 고저항 실리콘-절연막-접촉 금속), 그리고 본 연구에서 제안하는 유리 구조재가 삽입된 스위치 (접촉부 구성: 채용용된 유리-접촉 금속)의 세 가지 모델을 각각 시뮬레이션 하였으며, 세 모델의 스위치들은 접촉부 구성 및 구조재 외의 다른 모든 설계 사항을

같도록 하여 접촉부 구성 및 구조재의 변경으로 인한 손실 특성의 변화를 확인하고자 하였다. 시뮬레이션에 사용한 각 물질들의 물질 특성은 표 2.5와 같다.

표 2.5 HFSS 시뮬레이션에 사용한 물질 특성 요약

물질 특성	상대 유전율 ( $\epsilon_r$ )	Bulk conductivity [S/m]	손실 탄젠트 ( $\tan\delta$ )
유리	4.82	$1.25 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-3}$
실리콘	11.9	6.67	$1.5 \times 10^{-2}$
고저항 실리콘	11.9	0.01	$1.5 \times 10^{-2}$
TEOS 산화막	4.50	$7.00 \times 10^{-15}$	$3.8 \times 10^{-2}$
금	1.00	$4.10 \times 10^7$	0.0

그림 2.14는 HFSS 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션 결과 유리를 접촉부 구성 구조재로 사용한 스위치는 실리콘을 구조재로 사용한 스위치에 비해 1 ~ 40 GHz 대역에 걸쳐 최대 0.1 dB 가량까지 손실 특성이 향상될 것으로 예상되었다. 이는 본 연구에서 제안하는 스위치의 유효성을 보여준다. 시뮬레이션에 사용된 실리콘은 6.67 S/m의 전도성을 가지는 것으로 설정되었고, 보통의 실리콘 기판이 1 ~ 30 Ohm·cm 수준의 비저항 (3.3 ~ 100 S/m의 전도성에 해당)을 가지는 것을 감안하면, 일반 실리콘으로 제작된 스위치 구조물로 인해 발생하는 손실들을 억제할 필요가 충분하다고 판단된다.

한편, 고저항 실리콘은 보통 10 kOhm·cm 수준의 비저항을 가지고 있으며, 이는 0.01 S/m의 전도성에 해당하게 되므로, 앞서 해석한대로 유리를 접촉부 구조재로 사용한 경우와 비슷한 수준의 손실 특성을 보이는 것으로



예상되었다.

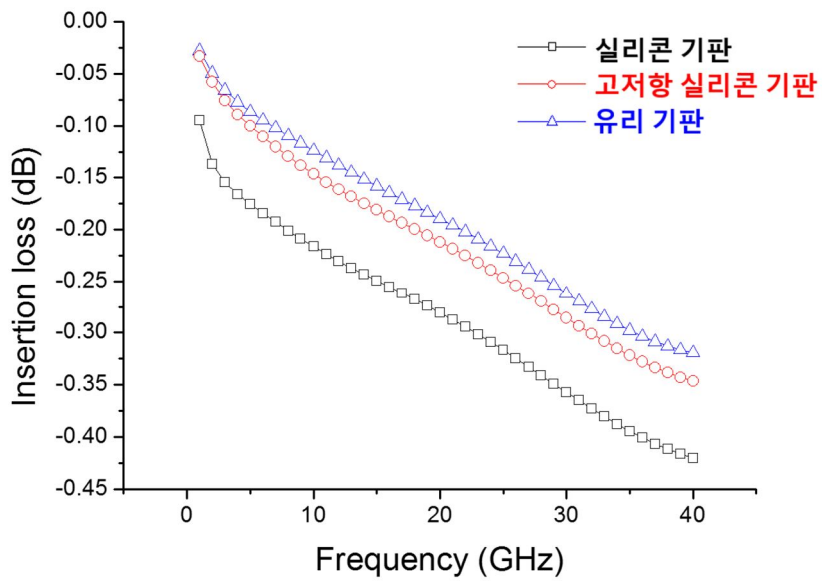


그림 2.14 접촉부 구성 및 구조재를 다르게 하여 신호 전송 특성을 예측한 시뮬레이션 결과.

# 제 3 장 유리 재용융 공정을 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스위치의 제작

## 3.1 전체 제작 과정

본 연구에서 제작된 RF MEMS 실리콘 스위치의 공정 과정은 크게 스위치 구조물이 형성되는 실리콘 기판 공정, 그리고 구동 신호선과 CPW가 제작되는 유리 기판 공정으로 나뉜다. 그림 3.1은 본 연구에서 제작한 실리콘 기판과 유리 기판을 이용한 SiOG 공정 개요를 보여준다. 각각 병렬적으로 제작된 실리콘 기판과 유리 기판 (그림 3.1 (a))은 정렬 양극 접합 공정 (Align anodic bonding)을 통해 접합 (그림 3.1 (b))되고, 접합된 기판의 실리콘 면에 스위치 구조물을 정의 (그림 3.1 (c))한 뒤, DRIE 공정으로 Release되어 (그림 3.1 (d)) 최종 완성된다.

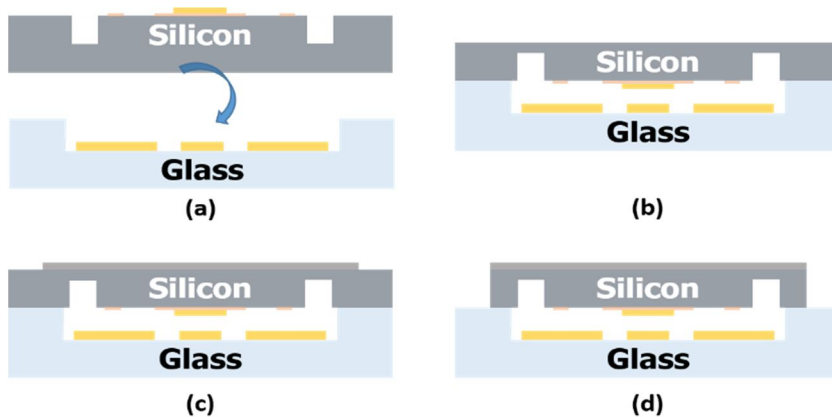


그림 3.1 미리 제작된 실리콘 기판과 유리 기판을 이용한 SiOG 공정 개요.

## 3.2 단위 공정

### 3.2.1 유리 재용융을 이용한 실리콘 기판의 제작

먼저, 유리가 삽입된 실리콘 구조물이 형성되는 실리콘 기판의 제작 과정을 설명한다. 본 연구에서 제안하는 구조대로 접촉 금속 아래 부분을 유리로 채워 넣기 위해서는 먼저 실리콘 기판을 식각하여 유리가 삽입될 수 있는 깊이의 구멍 (Cavity)을 형성하여야 한다. 구멍 형성을 위한 실리콘 기판 식각은 DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 공정을 통해 진행하며, DRIE 공정에 사용될 알루미늄 마스크는 Lift-off 공정을 통해 정의한다.

Lift-off 공정의 간략한 개요는 그림 3.2와 같다. 먼저 Lift-off 공정 중에 희생층 (Sacrificial layer)으로 사용될 감광제를 기판에 정의한 후 (그림 3.2 (a)), 증착 금속을 기판에 전면 증착한다(그림 3.2 (b)). 이 증착 과정에서 감광제가 정의되어 있는 부분에는 금속이 기판과 직접 증착되지 못하게 되고, 이어지는 아세톤 세척 과정에서 감광제 위에 증착된 금속이 감광제와 함께 기판에서 떨어져 나가게 된다(그림 3.2 (c)).

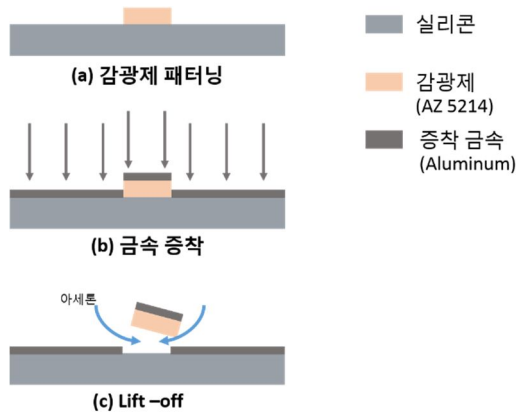


그림 3.2 Lift-off 공정 개요.

상세한 공정 내용은 다음과 같다. 먼저, 세척 공정 (SPM 및 BHF cleaning)을 거친 실리콘 기판에 감광제 (AZ 5214)를 1.4  $\mu\text{m}$  의 두께로 정의한다. 본 연구에서 사용된 AZ 5214 사진 공정 조건 (Negative tone)은 표 3.1에 제시되었다. 다음으로 열 증착 공정을 통해 DRIE 공정 중 마스크로 사용될 알루미늄을 0.25  $\mu\text{m}$  높이로 증착한 후, 아세톤에 담금으로써 Lift-off 공정을 마친다. 한편, 좁은 패턴으로 감광제가 정의되어 있는 기판을 Lift-off 할 경우, 아세톤이 좁은 감광제 노출부로 침투하지 못해 감광제가 완전히 제거되지 못하는 현상이 발생한다. 본 공정에서는 가로와 세로가 각각 80  $\mu\text{m}$  인 정사각형 모양으로 감광제를 정의하고, Lift-off 공정에서 감광제를 완전히 제거하기 위해 초음파 세척기 (Ultra-sonicator)를 사용하였다.

표 3.1 AZ 5214 Negative tone 공정 조건

Step		AZ 5214 Negative tone
Spin coating	Low spin	500 rpm / 5 sec
	High spin	4000 rpm / 35 sec
Soft-bake		95 ° C @ Hot plate / 2 min 30 sec
1 <sup>st</sup> exposure		Vacuum contact / 17 mW/s × 7 sec
PEB (Post Exposure Bake)		95 ° C @ Hot plate / 3 min 30 sec
2 <sup>nd</sup> exposure		Flood exposure / 17 mW/s × 35 sec
Develop		6:1 AZ 300 MIF immersion / 2 min
Resulting Thickness		1.4 ~ 1.6 $\mu\text{m}$

알루미늄 마스크가 정의된 실리콘 기판은 이어지는 DRIE 공정을 통해 식각되며, DRIE 공정의 간략한 개요는 다음과 같다. 먼저, 첫 번째 단계에서는 SF<sub>6</sub> 가스로부터 발생한 플로린 (Fluorine) Radical 이 실리콘

기판의 노출된 부분 (마스크에 가려지지 않은 부분)에 도달하여 실리콘과 반응하며 실리콘을 등방성으로 식각한다. 이어서 두 번째 단계에서는  $C_4F_8$  가스가 만들어낸 Inhibitor ( $nCF_2$ )가 등방성으로 식각된 실리콘의 표면에 증착된다. Inhibitor로 사용되는  $nCF_2$ 는 Teflon과 비슷한 고분자 다중체로, 등방 식각으로 노출된 실리콘의 표면을 덮어 플로린 radical을 막는 역할을 한다. 마지막 단계에서는 RF coil에 의해 발생된 플라즈마 (Plasma)가 이온들을 가속시켜 실리콘 기판에 수직인 방향으로 노출된 Inhibitor를 제거하며, 실리콘 기판에 수직인 방향의 실리콘을 노출 시켜 다시 플로린 Radical이 실리콘을 제거할 수 있도록 한다. 이 세 단계를 반복함으로써, DRIE 공정은 실리콘을 수직인 방향으로 깊게 식각할 수 있다.

상세한 공정 진행 내용은 다음과 같다. DRIE 공정은 OERLICON 社의 SLR-770-10R-B 장비를 이용하여 진행하였으며, 유리가 침투되는 면적은 가로, 세로 각각  $80\ \mu m$  로 설정되었다. 식각 깊이는 최종 스위치 구조물의 두께인  $70\ \mu m$  보다 깊은  $100\ \mu m$  로 설정되었으며,  $70\ \mu m$  보다 깊이 침투되는 유리는 추후 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 과정에서 제거된다. 그림 3.3은 유리가 삽입되기 위한 구멍 형성 모식도와 제작 결과를 보여준다.

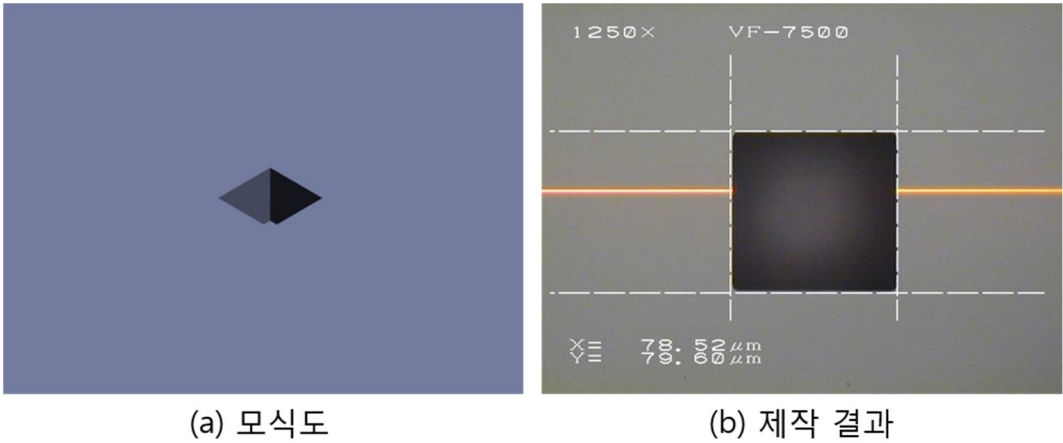


그림 3.3 유리가 삽입 될 구멍이 형성된 실리콘 기판의 모식도와 제작 결과.

구멍이 형성된 실리콘 기판은 bare 상태의 유리 기판과 진공 양극 접합 (Vacuum anodic bonding) 공정을 통해 접합된다. 이 공정은 뒤에 이어지는 유리 재용융 공정에서 실리콘 기판의 구멍으로 유리가 침투하도록 하기 위한 공정이다.

양극 접합 공정의 간략한 개요는 다음과 같다. 실리콘과 유리 기판을 맞댄 상태에서 적절한 압력과 온도를 맞추어주고, 양 쪽에서 높은 전압을 인가하여 유리 기판에 있는  $\text{Na}^+$  이온들을 실리콘 기판과의 접촉면으로 이동시켜 접촉면에 강한 정전력을 발생시킨다. 적절한 압력으로 접촉이 이루어지고, 접촉면의 강한 정전력이 실리콘과 유리 기판 사이에 강력한 전기장을 형성하면, 표면에서 단단한 공유 결합 층이 생성되며 접합이 완료된다. 접합 공정에 사용된 장비는 Carl Suss 社의 EV501 장비이며, 사용된 양극 접합 공정 조건은 표 3.2와 같다.

표 3.2 (진공) 양극 접합 공정 조건

Anodic bonding	Condition
Pressure [N]	600
Temperature [° C]	380
Applied voltage [V]	800
Process time [min]	10
Degree of vacuum [torr]	0.0006 for vacuum anodic bonding 760 for atmospheric anodic bonding

접합을 마친 실리콘 기판과 유리 기판은 접합 장비 내에서 충분히 식혀진 다음 상온으로 방출되며, 이는 급격한 온도 변화로 인한 스트레스를 최소화하여 안정한 접합을 하기 위함이다.

후속 공정인 유리 재용융 공정은 850 ° C 의 높은 온도에서 진행되며, 공정 중 실리콘 기판이 받는 응력을 최소화 하기 위해, 실리콘과 열 팽창 계수 (CTE: Coefficient of Thermal Expansion)가 비슷한 유리 기판 (Pyrex<sup>TM</sup> 7740)이 사용되었다. 진공 양극 접합이 완료된 SiOG 기판은 Furnace 장비에서 850 ° C 의 온도로 5시간 동안 가열되며, 이 과정에서 상부에 접합된 유리 기판이 녹아 실리콘 기판의 구멍으로 삽입된다(그림 3.4).

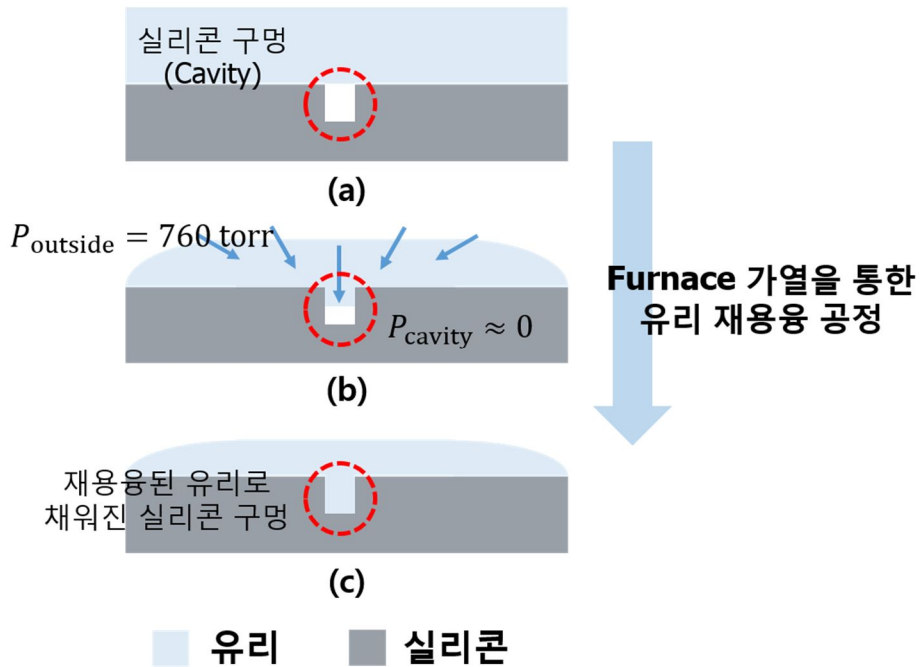


그림 3.4 유리 재용융 공정의 개요.

유리 재용융 공정을 마친 실리콘 기판은 CMP 작업을 거쳐 후속 공정이 진행될 실리콘 면을 드러내게 되며, 3D profiler를 이용하여 측정한 결과, 재용융된 유리는 CMP 공정 이후에 실리콘 면보다 약  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$  높게 남게 되는 것을 확인하였다.

다음으로 앞선 공정을 통해 유리가 삽입되어 있는 실리콘 기판 위에 두 구동 전극간의 접착을 막는 절연막을 형성한다. 이 절연 패턴은 실리콘 전극이 될 부분의 사각형의 각 모서리 끝에 가로, 세로  $15 \mu\text{m}$ 의 정사각형 모양으로 형성되며, 절연막의 형성 과정은 다음과 같다. 먼저 절연 물질인 TEOS 산화막을 Applied Material Korea 社의 P-5000 장비를 이용하여 실리콘 기판에  $0.2 \mu\text{m}$  두께로 전면 증착하고 식각 마스크로 사용될 감광제 (AZ 4330)를 사진 공정을 통해 정의하였다. 본 공정에서 사용한 AZ 4330



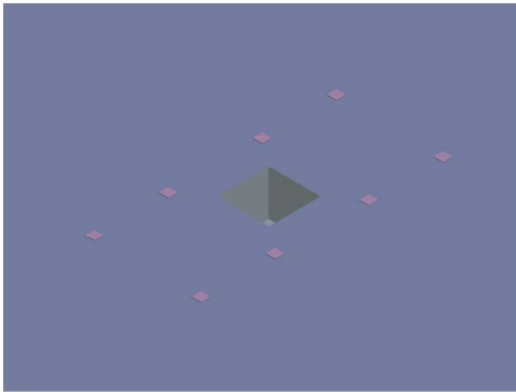
공정 조건은 표 3.3에 제시되었다. 그 후 Oxford 社의 Plasmalab 80 Plus 장비를 이용하여 감광제로 덮여 있지 않은 부분의 TEOS 산화막만을 선택적으로 건식 식각함으로써 산화막을 정의한다. TEOS 산화막을 제거하는데 사용한 조건은 표 3.4에 제시되었다. 마지막으로 식각 마스크로 사용되었던 감광제는 아세톤을 이용하여 제거함으로써 절연막 패턴의 정의가 완료된다. 그림 3.5는 절연막이 형성된 유리 재용융 실리콘 기판의 모식도와 제작 결과를 보여준다.

표 3.3 AZ 4330 Positive tone 공정 조건

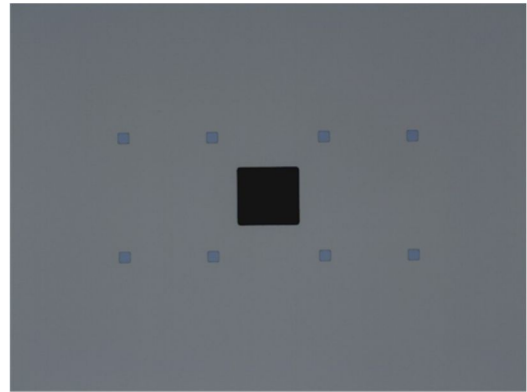
Step		AZ 5214 Negative tone
Spin coating	Low spin	500 rpm / 5 sec
	High spin	4000 rpm / 35 sec
Soft-bake		110 ° C @ Hot plate / 50 sec
Exposure		Hard contact / 17 mW/s × 22 sec
Develop		AZ 300 MIF immersion / 3min 30 sec
Resulting Thickness		3.6 ~ 3.8 μm

표 3.4 TEOS 산화막을 제거하기 위한 건식 식각 조건

Dry etching	Condition
Gas	O <sub>2</sub> : 5 sccm / CF <sub>4</sub> : 50 sccm
Degree of vacuum [torr]	0.055
RF power [W]	150
Process time [min]	5
Etch rate [Å/min]	400 ~ 500



(a) 모식도



(b) 제작 결과

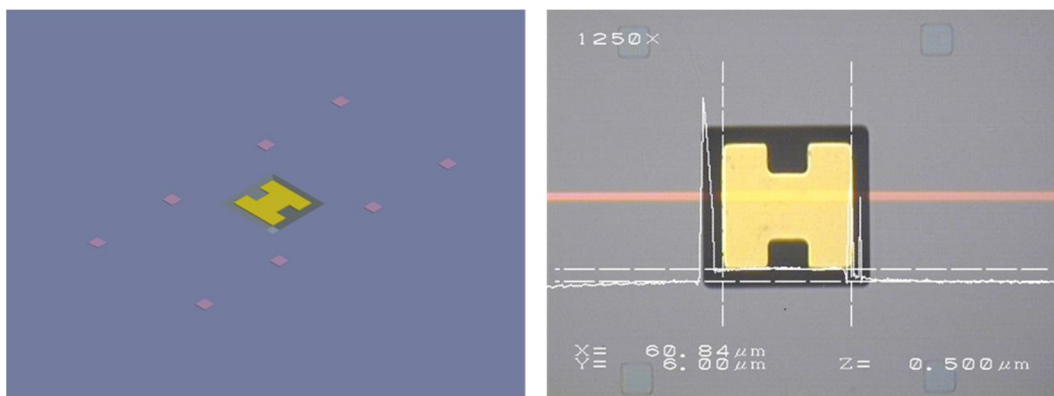
그림 3.5 유리가 채용용된 실리콘 기판에 제작된 절연막의 모식도와 제작 결과.

구동 전극 절연막 정의가 완료된 기판은 다음으로 접촉 금속이 증착된다. 실리콘 스위치의 접촉 금속은 스위치의 구동 시 유리 기판 위의 전송 선로 중 끊어진 부분의 양 끝에 접촉하여 두 선로를 연결해주는 역할을 한다. 접촉부를 구성하기 위한 금속으로는 전기 전도도가 우수하고 접촉 저항이 매우 낮아 고주파 회로에서 많이 사용되는 금을 이용하였으며, 증착 공정에는 도금보다 증착 균일도가 좋은 열 증착 방식을 이용하였다.

한편, 접촉 금속의 두께 조정은 다음과 같은 이유에서 매우 중요하다. 먼저 접촉 금속이 절연 패턴보다 낮게 증착되는 경우에는, 스위치가 구동하여도 전송 선로가 연결되지 않거나 불완전한 접촉을 하게 되어 높은 삽입 손실을 가지게 된다. 반대로 접촉 금속이 이 절연 패턴보다 과하게 높아지면 접촉 금속과 유리 기판에 제작된 CPW 전송 선로와의 초기 간격이 좁아져, 스위치의 개로 상태에서도 고주파의 신호가 전송 선로를 타고 흐르게 되어 신호 격리도가 낮아지는 문제점이 있다. 또한 접촉 이후 구동 전극 사이

간격이 넓어져, 두 전극 사이에 충분한 구동력을 발생시키기 위해 높은 구동전압을 사용해야 하는 문제점도 발생할 수 있다. 따라서 접촉 금속의 높이는 스위치의 전체 성능에 매우 중요한 역할을 하며, 정확하게 조절되어야 한다.

접촉 금속과 CPW 전송 선로 사이의 초기 간격을  $1.5\ \mu\text{m}$  로 구현하기 위해 설계된 접촉 금속의 높이는  $0.5\ \mu\text{m}$  이며, 이는 원활한 접촉을 고려함과 동시에 약 20 GHz 수준의 신호에 대한 금의 표피 깊이 (Skin depth)가  $0.5\ \mu\text{m}$ 임을 고려하여 선택되었다. 접촉 금속의 정의는 Lift-off 공정을 이용하였으며, 공정 세부 단계는 앞서 진행한 실리콘 식각 알루미늄 마스크의 제작과 같다. 한 가지 다른 점은 증착한 금속으로, 접촉 금속 형성을 위해 접착층 (Adhesion layer)으로 20 nm 두께의 크롬을 먼저 증착하고,  $0.5\ \mu\text{m}$  두께의 금을 연속 증착한 후 Lift-off 공정을 진행하였다. 모식도와 제작 결과를 그림 3.6에 제시하였다.



(a) 모식도

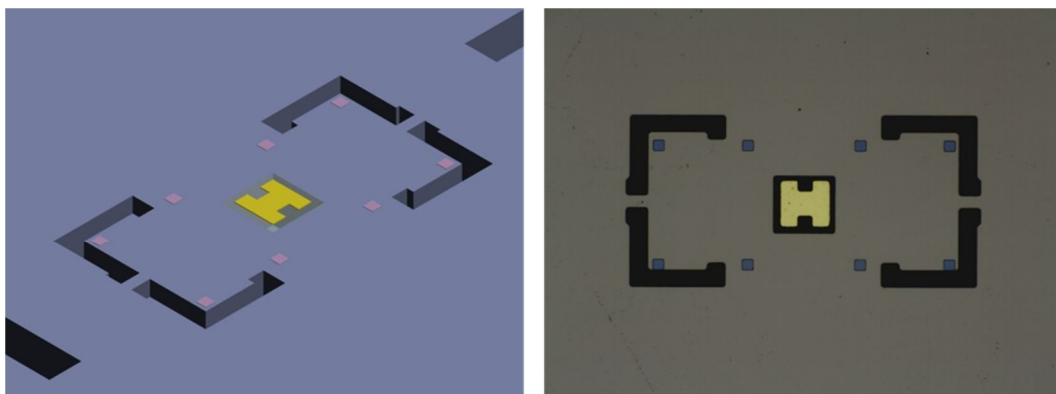
(b) 제작 결과

그림 3.6 접촉 금속이 증착된 실리콘 기판의 모식도와 제작 결과.

실리콘 기판 공정의 마지막 단계로, 실리콘 구조물의 스프링 두께를

조절하기 위한 건식 식각 공정을 수행하였다. 이 공정에서는 실리콘의 스프링이 될 부분만을 실리콘 기판의 윗면에서부터 식각하여, 부분적으로 식각된 실리콘 패턴을 만들게 되는데, 이렇게 식각된 부분은 나중에 진행되는 실리콘 기판 아랫면 CMP 공정에서 다른 부분보다 얇은 두께를 가지게 된다. 한편, 실리콘 기판 아랫면 CMP 공정은 유리 기판과 정렬 양극 접합 공정 이후 수행한다.

스프링 두께를 조절하기 위한 실리콘 식각은 스프링이 될 부분만을 좁고 깊게 식각하여야 하므로, 앞서 설명된 건식 식각 방법인 DRIE 공정을 사용하여 진행하였다. 70  $\mu\text{m}$  높이의 실리콘 구조물에서 최종적인 스프링 두께 20  $\mu\text{m}$  를 형성하기 위해 이 과정에서 실리콘을 50  $\mu\text{m}$  깊이로 식각하였다. 식각 마스크로는 앞선 공정에서와 마찬가지로 알루미늄 마스크를 정의하는 Lift-off 공정을 이용하였다. 이로써 실리콘 기판의 준비가 완료되며, 최종적으로 완성된 실리콘 기판의 모식도와 제작 결과는 그림 3.7과 같다.



(a) 모식도

(b) 제작 결과

그림 3.7 스프링 높이 조절을 위해 DRIE 공정을 진행한 실리콘 기판의 모식도와 제작 결과.



### 3.2.2 CPW 전송 선로 제작을 위한 유리 기판의 제작

다음으로 유리 기판의 제작 과정을 설명한다. 유리 기판 공정의 시작은 실리콘 기판의 접착 금속과 유리 기판 상에 제작되는 CPW 사이의 초기 간격 (Initial gap)을 결정하기 위한 유리 식각 공정이다. 접착 금속이  $0.5 \mu\text{m}$  높이로 증착되었고, CPW의 목표 증착 높이가  $2.5 \mu\text{m}$  이므로, 신호선과 접착 금속 사이에  $1.5 \mu\text{m}$  의 초기 간격을 형성하기 위한 유리 식각 깊이는  $4.5 \mu\text{m}$  이다. 한편, 구동 전극 간의 초기 간격은  $2 \mu\text{m}$  로 형성된다. 유리 식각 깊이의 계산에 대한 이해를 돕기 위한 개략도는 그림 3.8과 같다. 신호선과 접착 금속 사이의 거리는 격리도 (Isolation) 특성을 위해, 구동 전극 간의 거리는 구동 전압 특성을 위해 매우 중요한 설계 수치라고 할 수 있다.

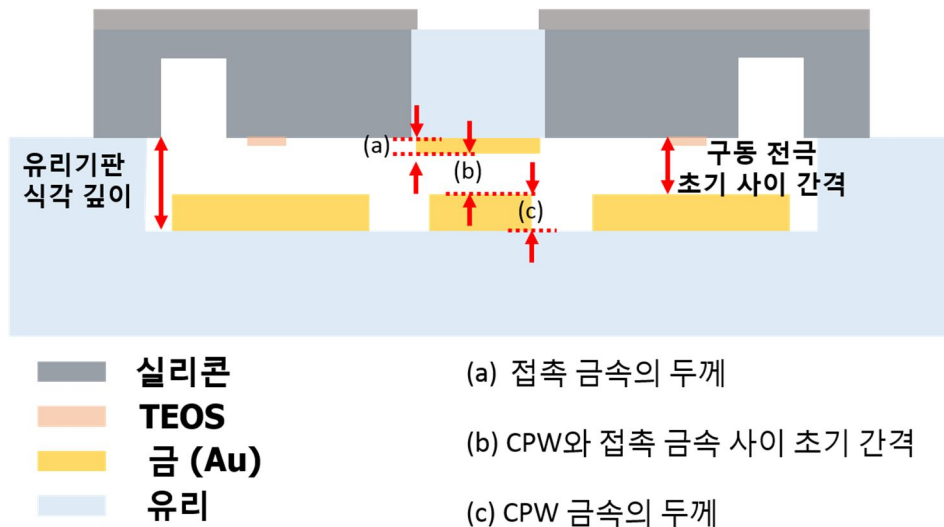
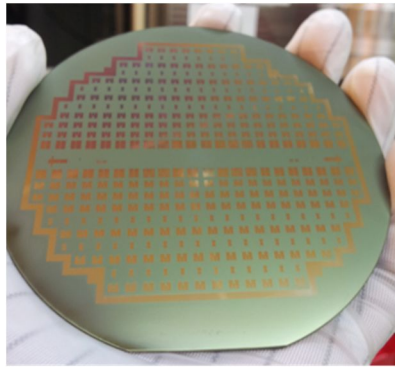


그림 3.8 유리 기판의 식각 깊이를 계산하기 위한 개략도.

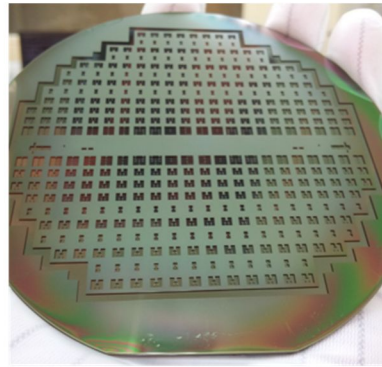
유리 기판의 식각은 불산계 용액을 이용하여 진행되는데, 원액 상태의 불산 (HF) 용액은 유리 기판을 매우 빠른 속도로 식각하기 때문에 ( $7.5 \mu\text{m}/\text{min}$  in HF 49% solution) [27], 낮고 정확한 유리 식각 깊이를 맞추기에

부적합하다. 따라서, 4.5  $\mu\text{m}$  의 식각 깊이를 정확히 맞추기 위해서는 식각액의 농도를 조절하여 식각율 (Etch rate)를 낮은 상태에서 충분히 조절이 가능한 시간 동안 식각을 진행해야 한다. 하지만 식각 시간이 너무 길어질 경우, 보통 유리 식각 공정에서 마스크 물질로 사용되는 비정질 실리콘 (Amorphous silicon)이나 금속 마스크 (Cr-Au) 등이 불산에 손상을 받게 되어 핀-홀 (Pin-hole)이나 마스크 뜯김 (Ripping off) 등의 현상이 발생하게 되므로 [28, 29], 식각 공정 시간은 10~20분 내외로 조절되어야 한다.

불산 계열의 식각액 중 하나인 BHF (Buffered Hydrofluoric Acid) 용액은 완충제인 불산 암모늄 (Buffer;  $\text{NH}_4\text{F}$ )과 불산의 농도 및 조성비에 따라 다른 유리 식각율을 보이는데, 본 연구에서 사용한 40 wt%의 불산 암모늄과 49 % 농도의 불산을 1:1의 비율로 혼합한 BHF 용액은 0.5 ~ 0.6  $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 식각율을 보였다. 유리 기판의 식각은 약 8분 30초 동안 진행하였으며, 유리 식각에 사용된 마스크는 550 ° C 에서 3000 Å의 두께로 저기압 화학 기상 증착 (LPCVD: Low Pressure Chemical Vapor Deposition)된 비정질 실리콘 박막이다. 한편, 식각 마스크의 정의는 앞서 실리콘 기판에서 TEOS 절연막을 형성하던 방식과 같다. 그림 3.9는 비정질 실리콘 박막 위에 감광제를 정의한 모습 (그림 3.9 (a))과 건식 식각을 통해 선택적으로 비정질 실리콘을 제거한 기판의 모습 (그림 3.9 (b))을 보여준다. 그림 3.10은 단위 셀의 식각 모식도와 공정 결과를 보여준다. 유리 식각 깊이의 평균과 균일도 (2-sigma Uniformity)는 각각 4.488  $\mu\text{m}$  와 0.6684 %로 각각 측정되어, 기판 전체에 걸쳐 매우 균일한 식각이 이루어진 것을 확인하였다.

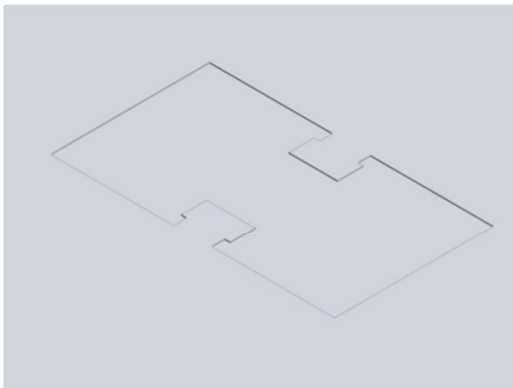


(a)

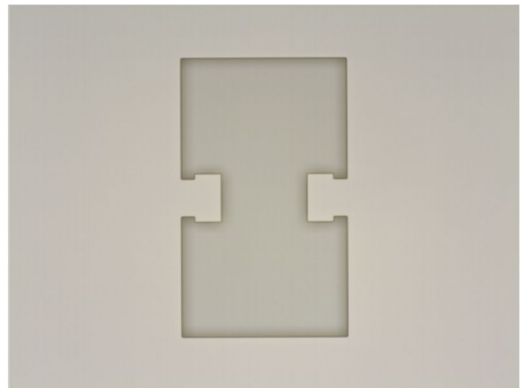


(b)

그림 3.9 (a) 비정질 실리콘 (Amorphous silicon) 박막 위 감광제 정의 및  
(b) RIE 공정을 통한 식각 마스크의 제작.



(a) 모식도



(b) 제작 결과

그림 3.10 단위 셀의 유리 식각 모식도와 제작 결과.

유리 기판 쪽의 두 번째 공정은 외부 전극을 통해서 스위치 구조물로 구동 전압을 인가하는 데 사용될 바이어스 선을 형성하는 것이다. 구동 전압 인가를 위한 바이어스 선 물질로 니켈 (Ni)과 알루미늄 (Al)이 주로 사용되는데, 본 공정에서는 바이어스 선을 뚫고 실리콘 기판이 유리 기판과



양극 접합을 하게 되기 때문에 실리콘과의 접촉력이 더 우수한 알루미늄을 바이어스 선 물질로 선택하였다(그림 3.11 (b)).

바이어스 선은 식각된 유리 기판 위에 알루미늄을 전면 증착한 후 감광제를 마스크로 활용하여 알루미늄 식각을 하는 방식으로 제작되었다. 이 공정에서는 알루미늄 식각을 이용하여 감광제로 덮여있지 않은 부분의 알루미늄만을 선택적으로 제거함으로써 바이어스 선의 형태로 알루미늄 패턴을 남긴다. 한편, 식각 마스크로 사용된 감광제는 아세톤을 이용하여 제거할 수 있다. 세부 공정 과정은 다음과 같다.

먼저 식각된 유리 기판 위에  $0.3\ \mu\text{m}$  두께의 알루미늄을 열 증착 방식을 통해 증착한다. 그 위에 감광제 (AZ 4330)를  $3.7\ \mu\text{m}$  의 높이로 회전 도포한 뒤 사진 공정 (Photolithography)을 통해 정의함으로써 알루미늄 식각에 사용될 마스크를 완성한다. AZ 4330의 사진 공정에 사용된 공정법은 표 3.3에 제시되었다. 다음으로 이 유리 기판을 PAN solution (Phosphoric-Acetic-Nitric Acid solution: 인산-초산-질산 용액)에 넣어 노출된 알루미늄만을 선택적으로 제거하였다. 본 공정에서는  $55\ ^\circ\text{C}$  로 가열된 PAN solution (인산:초산:질산:DIW=21:1:1:6)을 사용하였으며, 완전한 알루미늄 식각을 위해 약 2분 30초 동안을 식각하였다.

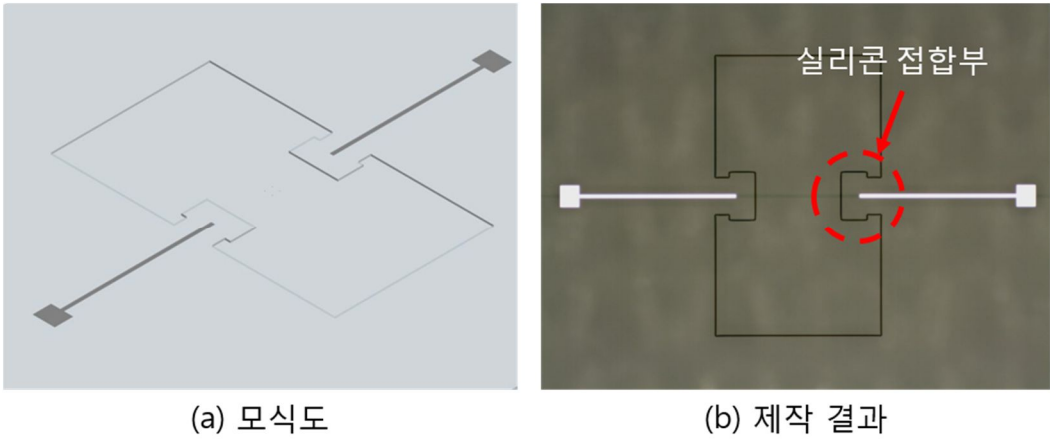


그림 3.11 알루미늄 바이어스 선의 모식도와 제작 결과.

이어서 유리 기판 위에 고주파 신호가 지나가게 될 전송 선로인 CPW를 형성한다. CPW의 형성은 전해 도금 방법을 통해 형성되며, 전해 도금 방법은 전계를 통해 도금을 하기 때문에, 이 전계 에너지를 기판 전체에 전달해 주는 동시에 금속이 도금될 시작점이 되는 씨앗층 (Seed layer)을 필요로 한다. 이를 위해 먼저 크롬 20 nm와 금 0.2  $\mu\text{m}$  를 열 증착 방법을 이용하여 연속 증착한다. 그리고 씨앗층 위에 감광제인 JSR THB 111N을 도포한 뒤 사진 공정을 통해 CPW 전송 선로를 정의할 도금틀 (Mold)을 형성한다. JSR THB 111N은 Cyanide 계열의 도금액에 대한 내성이 좋아 정의된 감광제 도금틀이 도금액에 손상을 거의 받지 않아 안정적인 도금이 가능한 장점이 있다. 본 제작 과정에서 사용된 JSR THB 111N의 사진 공정 조건은 표 3.5에 제시 되었으며, 감광제의 높이가 10  $\mu\text{m}$  가량의 높이로 정의되어 2.5  $\mu\text{m}$  의 도금 두께를 목표로 하는 전해 도금 과정에 충분한 높이를 제공한다.

표 3.5 JSR THB 111N Negative tone 공정 조건

Step		AZ 5214 Negative tone
Spin coating	Low spin	300 rpm / 10 sec
	High spin	2000 rpm / 40 sec
Soft-bake		90 ° C @ Hot plate / 5 min
Exposure		Hard contact / 17 mW/s × 30 sec
Develop		DVL-2000 immersion / 3min 30 sec
Descum		RIE etch O <sub>2</sub> :70 sccm / 0.1 torr / 100 W / 1 min
Resulting Thickness		9 ~ 10 μm

도금틀이 형성된 유리 기판 위에 전해 도금 공정을 이용하여 CPW 전송 선로가 형성된다. 접촉 금속과 마찬가지로 금을 신호 전송선 물질로 선택하였으며, 도금액은 EEJA 社의 Neutronex B를 이용하였다. 60 ° C로 가열한 본 도금액은 4 mA/cm<sup>2</sup>의 전류 밀도를 사용할 시, 도금 개방 면적 1 cm<sup>2</sup> 당 0.25 μm/min의 도금율을 보였다. 2.5 μm 의 도금 두께를 위해 총 10분 동안 직류 전해 도금을 진행하였으며, 기판 전체에 걸친 도금 두께의 평균 및 균일도 2.578 μm 와 12.60%로 각각 측정되었다. 12.60%의 도금 균일도는 풀인 전압을 불균일하게 하는 악영향을 미치므로, 추후 개선이 필요하다고 판단된다.

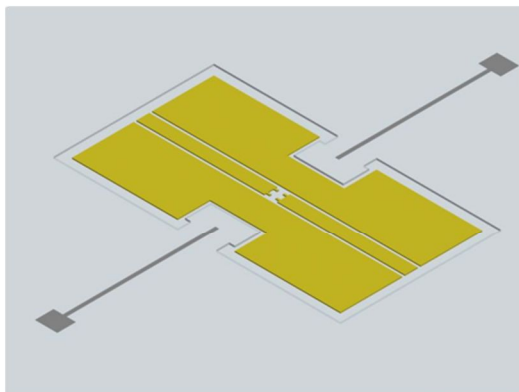
다음 공정은 전해 도금에 사용되었던 감광제 (JSR THB 111N)를 전용 Stripper인 STR-1000을 이용하여 제거하는 공정이다. 열 처리를 거쳐 경화된 JSR THB 111N은 80 ° C 로 가열된 STR-1000 용액에 10분 동안 담가둠으로써 완전히 제거할 수 있다. 그 후, 전해 도금 과정에서 씨앗층으로 사용된 금과 크롬을 차례로 식각하여 제거한다. 금은 전용 식각액을 사용하여

습식 식각 방식으로 제거하지만, 크롬은 등방성 식각인 습식 식각을 이용할 경우 크롬 층의 옆면이 심각하게 손상되어 크롬 위에 형성된 금이 부유하거나 떨어져 나가, 신호 특성 및 소자 안정성에 악영향을 미치게 되므로 이방성 식각인 RIE 건식 식각을 사용하여 제거한다. 200 Å 두께의 크롬 층의 건식 식각에는 Oxford 社의 Plasmalab 80 Plus 장비를 이용하였으며 공정 조건은 표 3.6에 제시되었다.

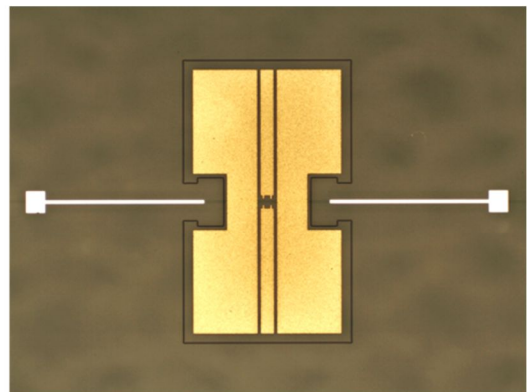
표 3.6 크롬을 제거하기 위한 건식 식각 조건

Dry etching	Condition
Gas	O <sub>2</sub> : 20 sccm / Cl <sub>2</sub> : 20 sccm
Degree of vacuum [torr]	0.1
RF power [W]	150
Process time [min]	5
Etch rate [Å/min]	> 40

그림 3.12는 CPW 전송 선로의 제작까지 완료된 유리 기판의 모식도와 제작 결과를 보여준다.



(a) 모식도



(b) 제작 결과

그림 3.12 CPW 전송 선로가 제작 완료된 유리 기판의 모식도와 제작 결과.

### 3.2.3 실리콘-유리 기판의 접합 및 Release 공정

앞서 준비가 완료된 실리콘 기판은 CPW 전송 선로가 제작 완료된 유리 기판과 양극 접합법을 이용하여 접합된다. 이 양극 접합법은 앞서 실리콘 기판 제작 과정 중 사용한 방법으로 진행되며, 표 3.2의 조건에서 상압 (Atmospheric pressure)을 이용한다는 점 외의 다른 조건은 모두 동일하다.

접합이 완료된 기판은 이후 CMP 공정을 통해 스프링 두께 및 스위치 구조물의 두께를 결정하게 된다. 본 공정에서 사용한 스프링 두께의 조절 방법에 대한 이해를 돕기 위한 개략도는 그림 3.13과 같다. 접합 전 실리콘 기판과 유리 기판의 두께, 그리고 접합된 기판의 두께를 측정함으로써 CMP 과정에서 제거될 실리콘 기판의 두께 (그림 3.13 (c))를 결정하게 되는데, 앞서 실리콘 앞면 DRIE 식각 공정에서 50  $\mu\text{m}$  깊이의 스프링 식각 패턴을 형성 (그림 3.13 (d))하였으므로, 본 공정에서 목표한 20  $\mu\text{m}$  의 스프링 두께 (그림 3.13 (e))를 제작하기 위해 결정된 실리콘 스위치 구조물의 두께는 70  $\mu\text{m}$  (그림 3.13 (b))이다.

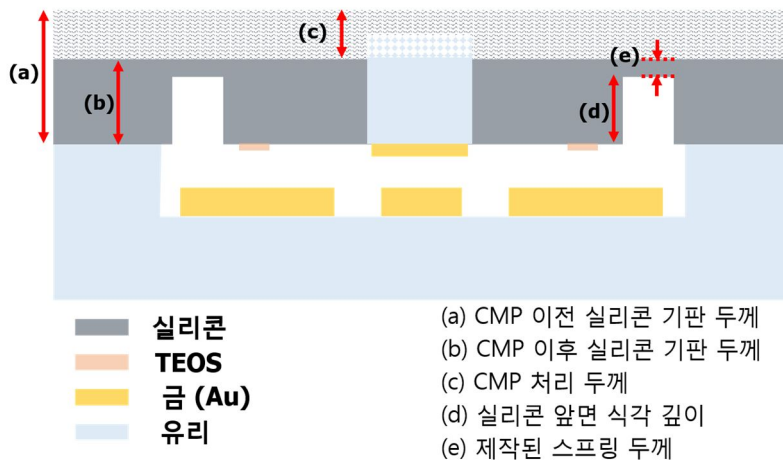
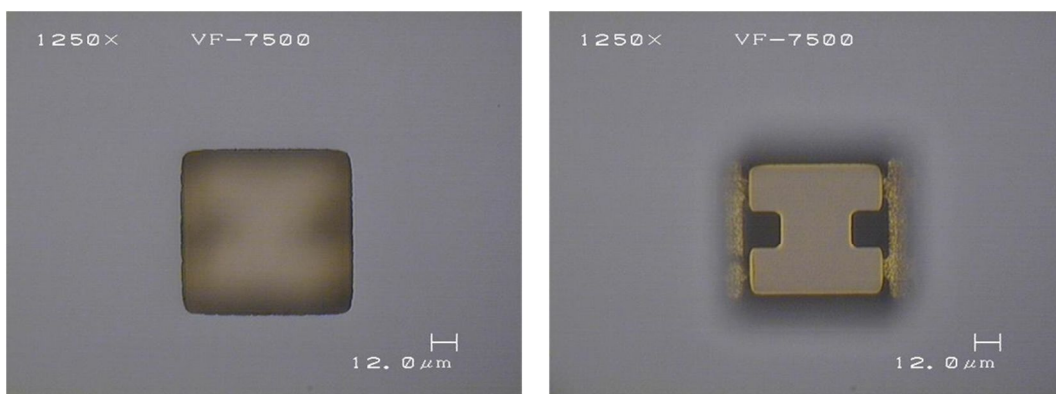


그림 3.13 본 연구에서 사용한 스프링 두께 조절 방법의 이해를 돕기 위한 개략도.

한편, CMP 공정을 거친 뒤의 접합 기판의 실리콘 바닥면은 앞면에서부터 삽입된 유리 구조재를 드러내게 된다. 그림 3.14는 접합 기판의 실리콘 기판에서 초점을 다르게 하여 실리콘 바닥면에 드러난 유리 구조재의 모습 (그림 3.14 (a))과 유리 구조재 아랫면에 증착된 접촉 금속의 모습 (그림 3.14 (b))을 보여준다.

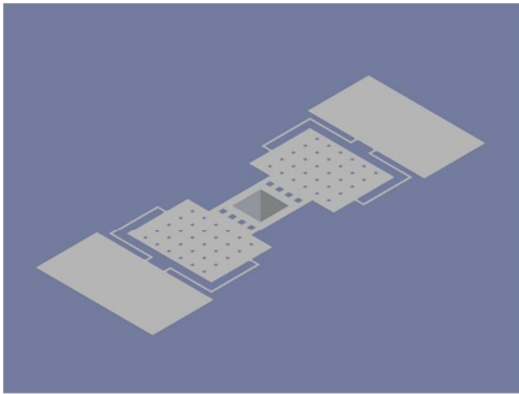


(a) 초점: 실리콘 바닥면

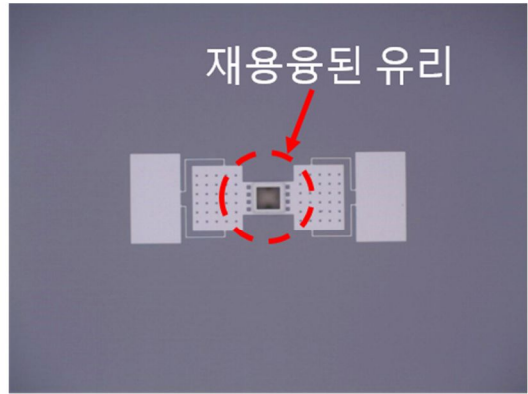
(b) 초점: 접촉 금속 증착면

그림 3.14 CMP 공정을 거친 후 접합 기판의 실리콘 바닥면 모습

다음으로 CMP 공정을 통해 두께가 조절된 접합 기판의 실리콘 면에 DRIE 공정을 위한 알루미늄 식각 마스크를  $0.2 \mu\text{m}$  두께로 정의한다. 알루미늄 마스크가 정의된 기판은 최종적으로 DRIE 공정을 통해 노출된 실리콘들을 제거함으로써 스위치들을 Release시키게 된다. 그림 3.15는 DRIE 공정에 사용될 알루미늄 마스크의 모식도와 제작 결과를 보여주며, 최종적으로 제작된 스위치의 모식도와 제작 결과를 그림 3.16에 나타내었다.

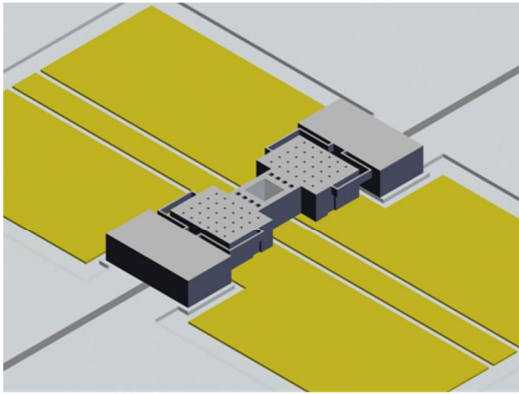


(a) 모식도

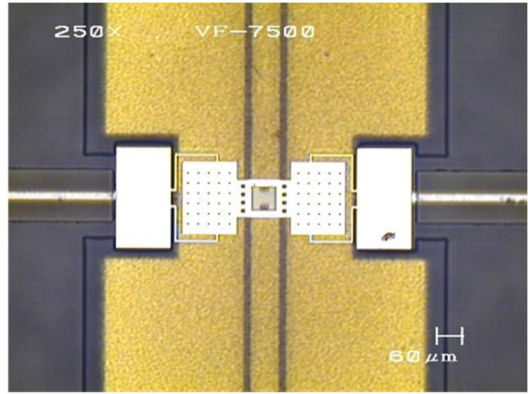


(b) 제작 결과

그림 3.15 알루미늄 DRIE 마스크의 모식도와 제작 결과.



(a) 모식도



(b) 제작 결과

그림 3.16 최종적으로 제작된 스위치의 모식도와 제작 결과.



### 3.3 제작 결과

그림 3.17은 앞서 설명한 제작 과정을 통해 완성된 RF MEMS 스위치를 Hitachi 社의 FE-SEM (Field-Emission Scanning Electron Microscopy) 장비를 이용해 촬영한 사진으로, 스위치의 접촉부 구조재가 채용용된 유리로 잘 대체되었음을 확인할 수 있다.

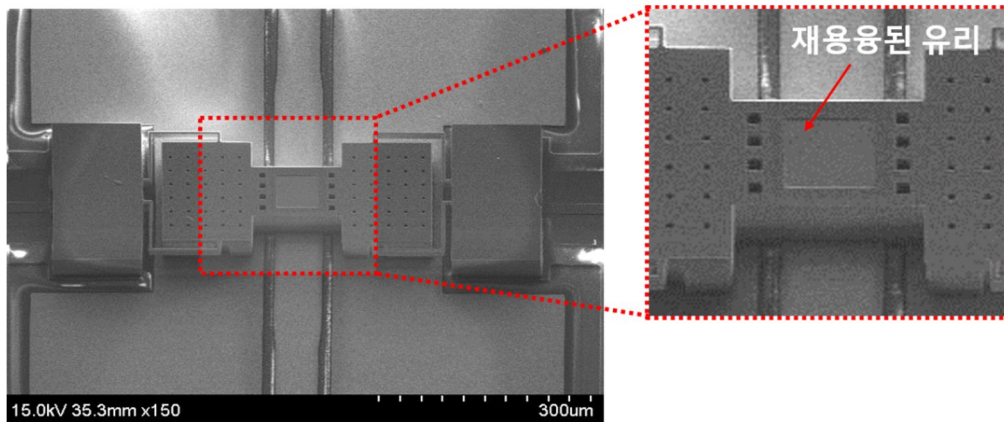


그림 3.17 제작된 SPST 스위치의 전자 주사 현미경 사진.

다음으로 스프링의 제작 결과를 확인하기 위해 제작된 샘플을 기울여 촬영하였다(그림 3.18). 스프링의 폭과 두께는 스프링 상수에 영향을 미치는 물론, 구동 전압과 복원력, 그리고 응답 속도에도 영향을 미치므로 스위치의 전체적인 구동과 성능을 정확히 구현하기 위해 정교하게 조절되어야 한다. 스프링의 옆면을 촬영한 결과  $4\ \mu\text{m}$  수준인 스프링 폭을 감안하여 관찰하였을 때, Undercut 현상이 거의 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다. 또한, 스프링의 옆면이 Scalloping이나 Notching 등의 현상도 거의 없어 스프링 형상 (Profile)의 변화도 거의 없는 것으로 확인되었다. 스프링의 폭과 두께는

샘플이 기울어져 있는 상태이기 때문에 FE-SEM 장비로 측정하지 않았으며, 뒤에 나타낼 Laser profiler와 3D profiler를 이용하여 각각 측정하였다.

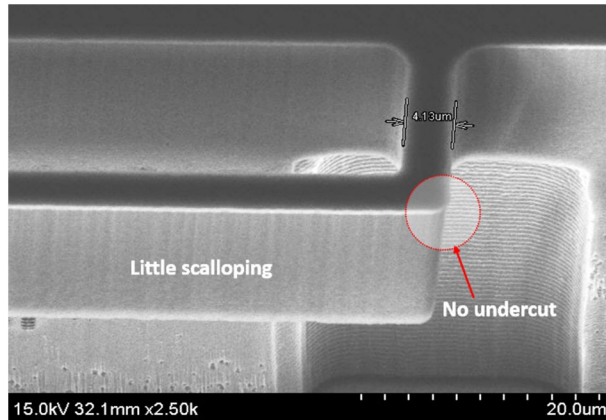


그림 3.18 스위치의 스프링 제작 결과.

한편, 전극의 넓이는 가로 세로  $130\ \mu\text{m} \times 180\ \mu\text{m}$  의 넓이로 설계되었으며, 제작 결과는  $129.5\ \mu\text{m} \times 180.6\ \mu\text{m}$  로 측정되어 전극의 넓이가 비교적 정확히 구현되었음을 알 수 있다(그림 3.19). 이는 Lift-off 공정을 이용한 DRIE 식각 마스크의 제작이 잘 이루어 졌음을 보여 준다.

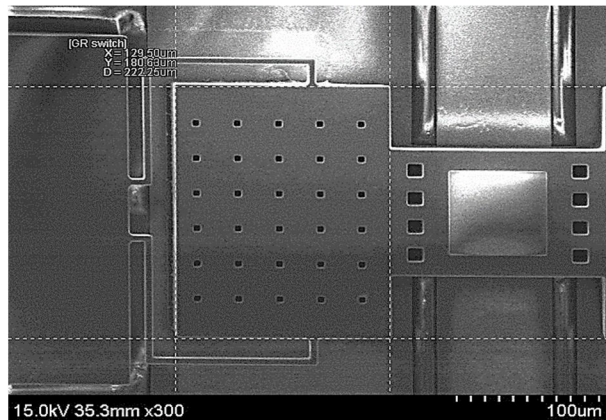


그림 3.19 스위치의 구동 전극 제작 결과.

그림 3.20은 제작된 스위치를 Keyence 社의 Laser profiler 장비인 VF-7510 Profile Micrometer로 촬영한 사진들로, 각각 렌즈의 초점을 스위치 구조물의 표면 (그림 3.20 (b))과 CPW 전송 선로의 표면 (또는 유리 구조재 아랫면의 접촉 금속 증착면; 그림 3.20 (c))으로 조절하여 촬영한 것들이다. 스위치 구조물의 가운데 부분에 형성되어 있는 유리 구조재 영역을 통해 스위치 구조물의 바닥면에 형성된 접촉 금속을 볼 수 있다. 한편, 그림 3.20 (d)에서 보는 바와 같이 측정된 스프링 폭은  $3.9\ \mu\text{m}$  로 설계값이  $4\ \mu\text{m}$  인 것을 고려할 때, 스프링 폭이  $0.1\ \mu\text{m}$  오차 내로 잘 제작되었음을 알 수 있다.

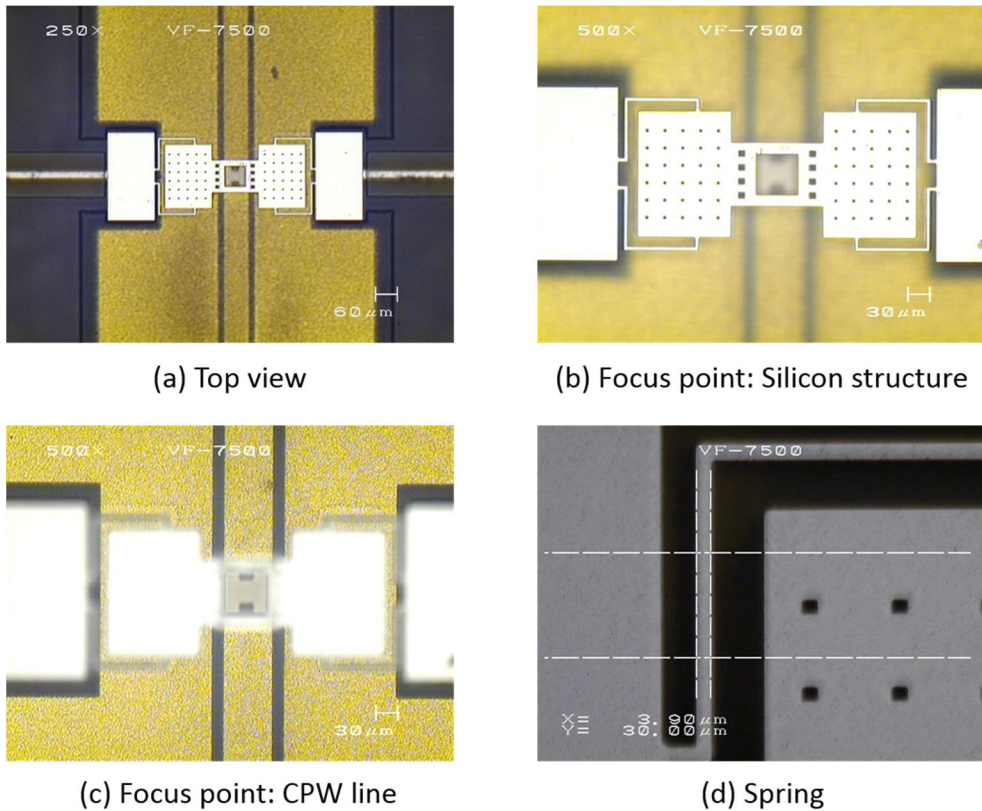


그림 3.20 제작된 스위치의 Laser profiler 촬영 사진.

그림 3.21는 3D profiler로 측정한 스위치 윗면의 형상이다. 측정에는 Nanofocus 社의  $\mu$ surf 장비를 이용하였다. 측정 결과, 제작된 스위치 구조물의 높이는 설계값인  $70\ \mu\text{m}$  보다 약  $2\ \mu\text{m}$  높은  $72\ \mu\text{m}$  로 나타났으며, 이는 CMP 공정에서의 오차로 판단된다. CMP 공정을 통해 스위치 구조물의 두께와 스프링의 두께가 동시에 결정되는 것을 감안할 때, 실제 제작된 스프링의 두께 또한  $2\ \mu\text{m}$  두껍게 제작되었음을 알 수 있다.

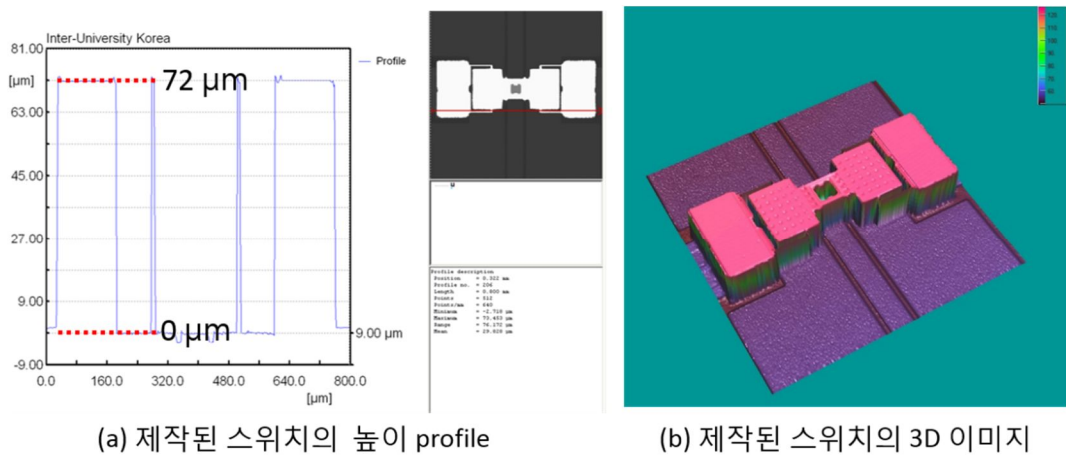
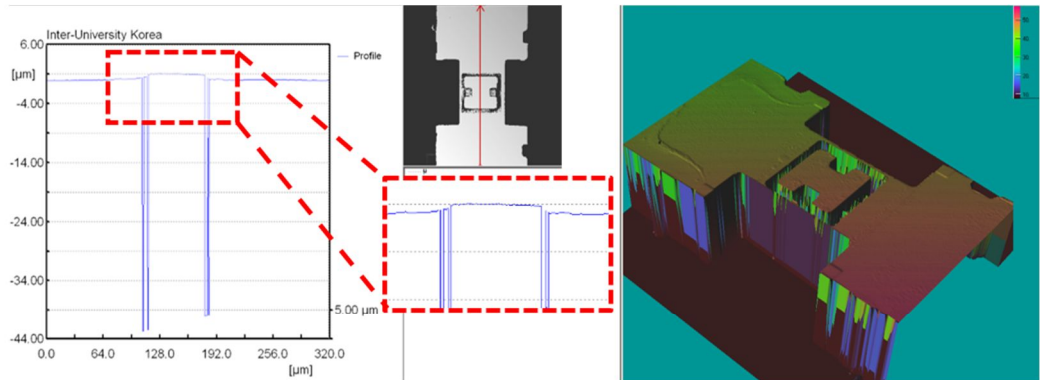


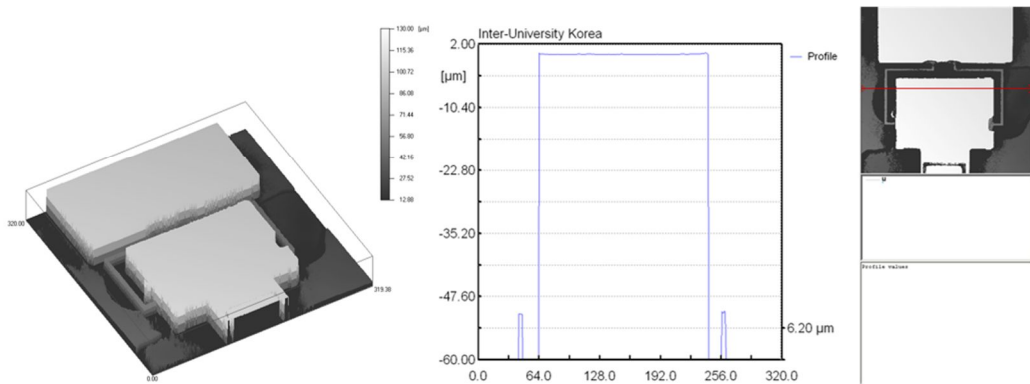
그림 3.21 제작된 스위치의 3D profiler 측정 결과.

그림 3.22은 스위치 구조물을 강제로 뜯어내어 스위치 구조물 바닥면의 형상을 3D profiler로 측정한 사진이다. 먼저, 접촉 금속의 형상을 확인한 결과, 접촉부 금속이 다른 실리콘 구조물보다 약  $0.6 \sim 0.7\ \mu\text{m}$  가량 더 높게 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 채용용된 유리 영역이 CMP 공정 이후 주변부보다 약  $0.1 \sim 0.2\ \mu\text{m}$  높게 남게 되고, 이 유리 표면 위에  $0.5\ \mu\text{m}$  의 높이로 접촉 금속이 증착되었기 때문이다. 접촉 금속의 높이가 전극이나 절연 패턴보다 높게 형성되었으므로 스위치의 정상적인 개로 및

단락 동작을 기대할 수 있으며, 앞선 전자 주사 현미경, Laser profiler, 그리고 3D profiler를 이용한 촬영 및 측정 결과를 토대로 본 연구에서 설계하여 제안한 스위치의 제작이 잘 되었음을 확인하였다.



(a) 접촉 금속의 형상 프로파일과 3D 이미지



(b) 스위치 구조물과 스프링의 형상 프로파일

그림 3.22 제작된 스위치 바닥면의 3D profiler 측정 결과.

## 제 4 장 유리 재용융 공정을 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스위치의 특성 측정

### 4.1 스위치 구동 전압 특성 측정

본 연구에서 제안된 RF MEMS 실리콘 스위치는 실리콘 구조물과 CPW 접지면을 각각 상부, 하부 전극으로 이용하는 정전 구동 방식을 채택하고 있다. 정전 구동 방식의 RF MEMS 스위치는 구동 전압이 구동 전극에 인가되었을 때 두 전극 사이에 발생하는 정전 인력을 구동력으로 사용하는데, 두 전극 사이의 초기 간격의 1/3 이상 움직이도록 하는 구동 전압을 특히 풀인 전압 (Pull-in voltage)이라 한다. 이는 전극 사이의 간격이 좁을수록 작용하는 인력이 강해지는 정전력의 특성 때문에 초기 간격의 1/3 이상 가까이 움직인 전극은 구동 전압을 더 올리지 않아도 높아진 인력 때문에 계속 가까워지게 되기 때문이다. 한편, 일반적으로 실제 RF MEMS 스위치의 정전 구동에는 풀인 전압에 1.2 ~ 1.3배 정도의 전압을 구동 전압으로 사용하며, 이는 스위치의 빠른 동작 및 강한 접촉력을 구현하기 위함이다[3].

본 연구에서 제작된 스위치의 풀인 전압을 측정하기 위하여 그림 4.1과 같은 측정 구성을 이용하였다. 측정 구성에 관한 설명은 다음과 같다. 초기에 개로 상태인 CPW 신호선 양단에 멀티미터를 연결하여 저항값을 읽으면 거의 무한한 값의 저항을 보이는데 이는 신호선의 가운데 부분이 물리적으로 끊어져 있기 때문이다. 하지만 실리콘 구조물에 구동 전압을 인가하면 발생한

정전력으로 인해 스위치가 동작하여 신호선 양단을 연결해주고 멀티미터에 유한한 저항값이 읽히게 된다. 본 측정 방식은 이러한 원리를 이용하여, 구동 전압을 낮은 전압에서부터 점차 높여가며 멀티미터에 유한한 저항값이 읽히는 시점을 찾아내고, 이때를 접촉의 시작으로 판단하여 풀인 전압으로 측정한다.

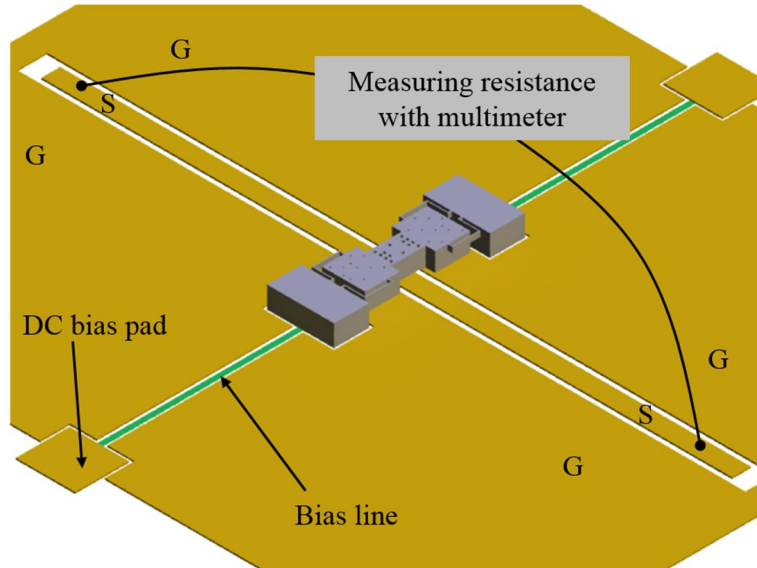


그림 4.1 정전 구동 풀인 전압 측정을 위한 개략도.

그림 4.2는 앞서 설명된 방식을 사용하여 측정한 풀인 전압 결과이다. 제작된 스위치 중 5 개의 샘플을 무작위로 선정하여 측정하였으며, 확인한 풀인 전압의 평균과 표준 편차는 각각 81 V 와 7.68 V로 측정되었다. 이는 앞서 2 장에서 설계한 풀인 전압인 66.4 V에 대해 약 22 %의 오차로 이에 대한 분석은 다음과 같다.

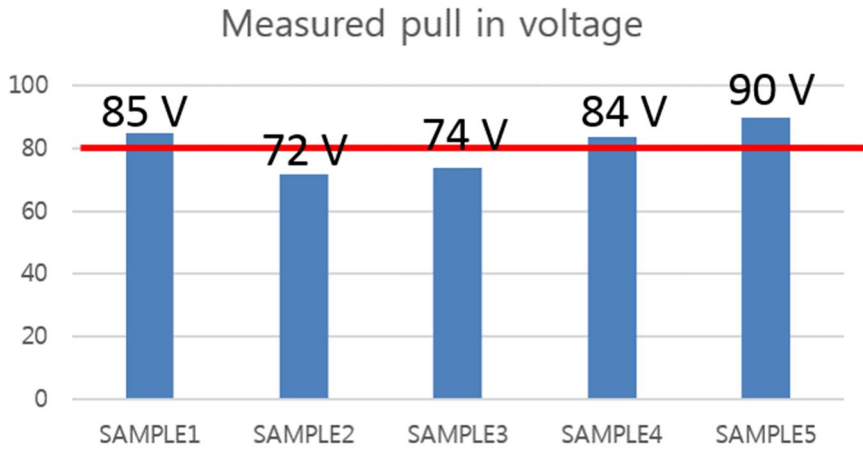


그림 4.2 측정된 정전 구동 풀인 전압의 분포.

먼저 3 장에서 측정한 스프링 두께의 차이로 인한 영향을 확인하여 보았다. 설계값이 20  $\mu\text{m}$  인 스프링의 측정값은 22  $\mu\text{m}$  였으며, 이는 앞선 3.2.3에 설명된 CMP 공정에서 기관의 두께가 정확히 조절되지 못하였기 때문으로 사료된다. 한편, COMSOL 시뮬레이션을 통해 확인한 22  $\mu\text{m}$  두께를 가지는 꺾은 선 스프링의 스프링 상수는 901 N/m 였으며, 이는 20  $\mu\text{m}$  두께의 스프링일 때의 스프링 상수 770 N/m 보다 약 130 N/m 정도 큰 값이다.

다음으로, 정전 구동 풀인 전압의 결정에 중요한 변수의 하나인 구동 전극 사이 초기 간격으로 인한 영향을 고려해 보았다. 측정을 통해 확인한 구동 전극 사이 초기 간격은 설계값인 2  $\mu\text{m}$  보다 0.1  $\mu\text{m}$  큰 2.1  $\mu\text{m}$  로 측정되었으며, 설계값보다 떨어진 구동 전극 사이의 초기 거리는 풀인 전압을 높이는 원인이 된다.



스프링의 두께와 구동 전극 초기 사이 간격의 실측을 통해 다시 계산한 풀인 전압은 77.2 V 였으며, 이는 설계값을 이용한 계산에서 보였던 21.9 %의 오차를 4.8 %까지 줄인 것으로, 설계값보다 높은 구동 전압에 대한 오차 해석이 유효하였음을 보여준다.

표 4.1 풀인 전압의 설계값과 측정값 비교

설계값	설계값	측정값
스프링 두께 [ $\mu\text{m}$ ]	20	22
스프링 상수 ( $k$ ) [N/m]	770	901
구동 전극 초기 간격 [ $\mu\text{m}$ ]	2.0	2.1
구동 전극 면적 [ $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ ]	46800	46800
계산된 풀인 전압 ( $V_{\text{pull-in}}$ ) [V]	66.4	77.2
측정된 풀인 전압 ( $V_{\text{pull-in}}$ ) [V]	81.0	
계산값과 측정값의 오차 (%)	21.9	4.8

## 4.2 스위치 신호 전송 특성 측정

그림 4.3은 VNA (Vector Network Analyzer)를 이용하여 RF MEMS 스위치의 신호 전송 특성 측정을 위한 장치 구성도를 보여주며, 그림 4.4는 신호 전송 특성을 측정 중인 샘플의 모습을 CCD (Charge Coupled Device)로 촬영한 모습이다. 본 연구에서는 신호 전송 특성의 측정을 위해 Agilent 社의 VNA 장비인 8361A를 이용하였다. 신호 전송 특성의 측정은 제작된 스위치 샘플을 프로브 스테이션 (Probe station)의 Loading chuck에 진공을 이용하여 고정시킨 뒤, 그림 4.4에서 보는 바와 같이 두 개의 GSG 프로브를 CPW 전송 선로의 양 끝에 접속시켜 두 GSG 프로브 사이를 오가는 전력량을 VNA를 이용하여 측정함으로써 이루어진다. 한편, 스위치 구조물에 구동 전압을 인가하기 위하여 바늘 형태 (Needle-type)의 DC 프로브를 이용하며, 스위치 샘플 아래의 바이어스 선으로 연결된 DC 바이어스 패드에 연결한다. 그림 4.4는 DC 바이어스 패드를 한 화면에 담지 못하여 DC 프로브를 스위치 구조물에 직접 연결해 둔 모습이다.

한편, VNA를 이용하여 측정하는 RF 스위치의 신호 전송 특성은 스위치가 개로 상태 (Off-state)일 때와 단락 상태 (On-state)일 때로 나뉜다. 먼저, 스위치의 개로 상태에서 측정하는 신호 전송 특성을 격리도 (Isolation)라 하며, 이는 신호선이 개로 상태일 때 한 단으로 유입된 신호가 다른 단에서 검출되는 정도를 나타낸다. CPW 전송 선로의 끊어진 신호선은 물리적으로 떨어져 있지만 스위치 구조물을 통해 고주파의 성분이 지나갈 수 있으며, 스위치의 개로 상태에서 스위치 구조물을 통해 다른 단으로 전달되는 신호가 적을수록 좋은 격리도를 가진 스위치라 할 수 있다. 다음으로,

스위치의 단락 상태에서 측정하는 신호 전송 특성을 삽입 손실 (Insertion loss)이라 한다. 삽입 손실은 스위치가 동작하여 신호선 양단을 전기적으로 연결하였을 때, 한 단으로 유입된 신호가 다른 단으로 얼마만큼 손실 없이 전달되는가를 나타낸다. 이 외에 스위치의 단락 상태에서 한 단으로 유입된 신호가 같은 단으로 되돌아 오는 정도를 나타내는 반사 손실 (Return loss)이 있다.

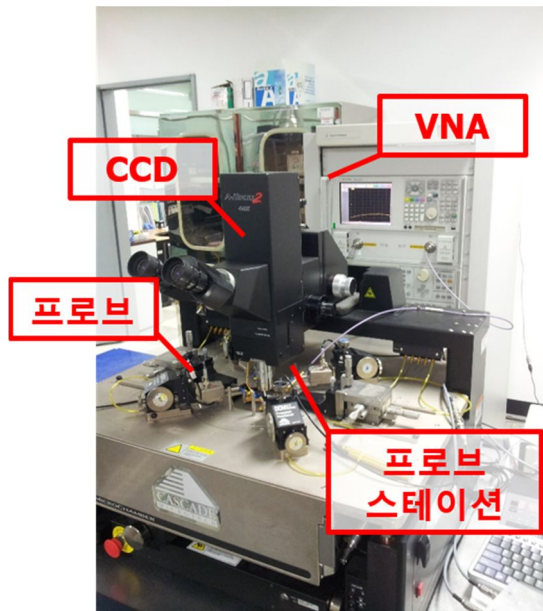


그림 4.3 제작된 스위치의 신호 전송 특성 측정을 위한 장치 구성.

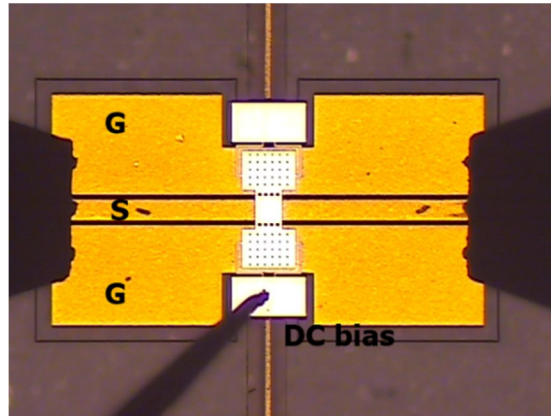


그림 4.4 측정 샘플의 CCD 촬영 모습.

본 연구에서 제안된 유리 구조재가 삽입된 스위치의 신호 전송 특성 향상 정도를 확인하기 위해, 기존의 실리콘 및 절연막 접촉부 구조의 스위치와 고저항 실리콘 및 절연막 접촉부 구조의 스위치를 본 연구에서 제안한 형태의 스위치와 동일한 설계를 이용하여 제작하였으며, 접촉부 구조재에 따라 각각을 실리콘 스위치, 고저항 스위치, 유리 채용용 스위치로 명명하였다. 앞서 언급한 대로, 세 종류의 스위치는 스위치 구조물의 접촉부 구성 및 구조재만 상이하고, CPW 전송 선로나 스위치 구조물의 다른 모든 설계는 동일하다. 한편, 제작에 사용된 실리콘과 고저항 실리콘 기판의 기판 전도성은 각각 7.69 S/m, 0.012 S/m로 측정되었고, 이는 앞서 계산 및 시뮬레이션에 사용한 수치들과 비슷한 값을 확인하였다.

본 연구에서 제작한 세 종류의 스위치의 격리도와 반사 손실, 그리고 삽입 손실을 주파수 범위 5 GHz ~ 30 GHz 에서 측정하였다. 격리도 측정에는 구동 전압 없이 측정을 하였으며, 반사 손실과 삽입 손실의 측정에는 스위치의 완전한 접촉을 위해 100 V의 구동 전압을 사용하였다. 먼저, 그림 4.5는 세 가지 종류의 스위치들의 격리도 특성을 보여준다.

그림에서 볼 수 있듯이 세 가지 종류의 스위치 모두 5 ~ 30 GHz 주파수 범위에서 최대 -29 dB 수준의 격리도를 보였으며, 이는 일반적으로 RF 응용에 사용되기에 충분한 값이다. 측정 결과를 통해, 접촉 금속 부근 구조재의 변경이 격리도 특성에 미치는 영향은 매우 미미한 것으로 나타났다. 한편, 앞서 측정된 접촉 금속과 CPW 전송 선로간의 초기 간격이 1.6  $\mu\text{m}$  간격으로 떨어져 있기 때문에, 추후 구동 전압을 낮추기 위하여 구동 전극 사이의 초기 간격을 낮추면 격리도도 본 연구에서 측정된 수준보다 악화될 것으로 예상된다.

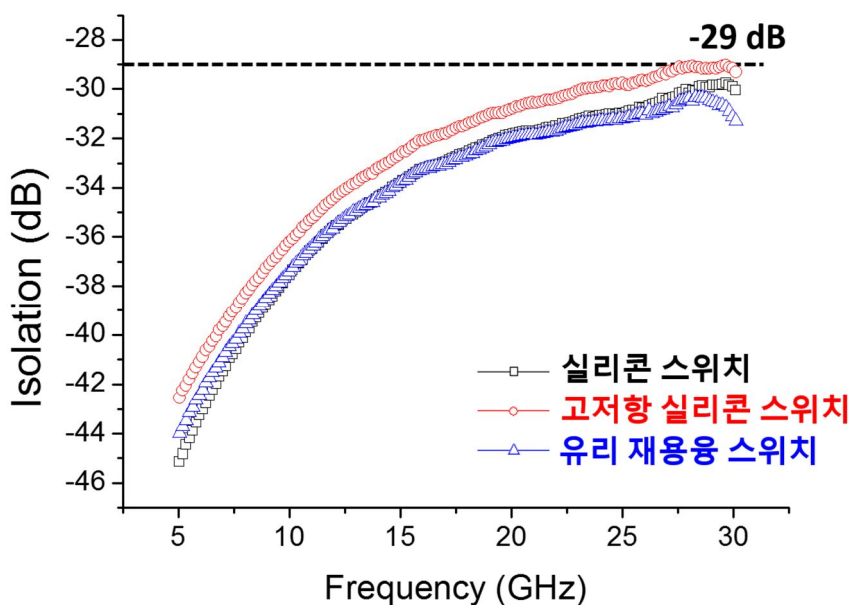


그림 4.5 기존의 스위치들과 제안하는 스위치의 격리도 특성 측정 결과.

다음으로 그림 4.6은 제작된 스위치들의 반사 손실을 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이 실리콘 스위치가 세 종류의 스위치 중에서 가장 훌륭한 반사 손실 특성을 보였으나, 세 종류의 스위치 측정 주파수 대역인 5 ~ 30 GHz 신호에 대해 모두 -24 dB 이하의 반사 손실을 보여 세 종류의

스위치들이 모두 매우 적은 수준의 반사 전력을 가지는 것으로 확인 되었다.

한편, 반사 손실 특성은 RF MEMS 스위치가 안테나와 같은 RF 응용에 사용될 때 중요한 성능 지표가 된다. 보통의 안테나 구성에서는 높은 전력을 안테나로 보내 송신 복사 전력을 최대화하기 위해 송수신 스위치의 전 단계 전력 증폭기 (Power amplifier)를 위치시킨다. 이 송수신 스위치로 반사 손실 특성이 좋지 못한 RF MEMS 스위치가 사용될 경우, 전력 증폭기로부터 입력된 높은 전력에 비례하여 높은 반사 전력 (Reflected power)이 발생하고, 이 반사 전력은 전력 증폭기로 들어가 상호 변조 (Intermodulation)를 일으켜 신호의 왜곡을 야기하고, 심한 경우에는 전력 증폭기에 손상을 입히기도 한다.

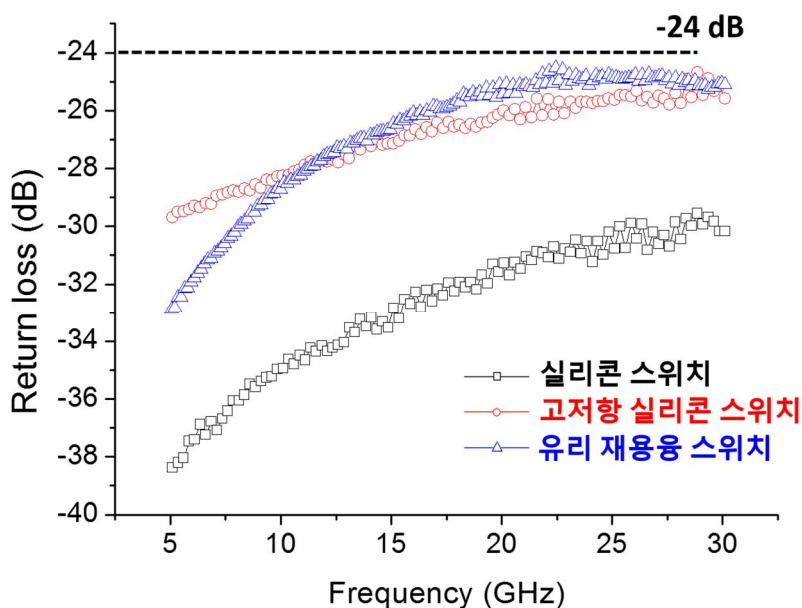


그림 4.6 기존의 스위치들과 제안하는 스위치의 반사 손실 특성 측정 결과.

마지막으로 본 연구의 최종 목적인 삽입 손실 특성을 측정하였다. 측정 결과는 다음과 같다. 기존의 실리콘 스위치와 고저항 실리콘 스위치는 측정

주파수 대역 (5 ~ 30 GHz)의 중심 주파수인 20 GHz 의 신호에 대해 각각 0.48 dB, 0.38 dB 수준의 신호 손실을 보였다. 그러나 본 연구에서 제안하는 형태인 유리 재용융 스위치의 경우, 20 GHz 수준에서 약 0.25 dB를 가지는 것으로 나타나 기존의 실리콘 스위치나 고저항 실리콘 스위치에 비해 각각 0.23 dB, 0.13 dB 정도의 신호 손실 특성 개선을 보이는 것으로 확인되었다. 측정 주파수 전체 범위에 걸친 삽입 손실 특성은 다음과 같다. 먼저, 실리콘 스위치는 0.38 ~ 0.54 dB 수준의 삽입 손실을 보였고, 고저항 실리콘 스위치는 0.31 ~ 0.46 dB, 그리고 유리 재용융 스위치는 0.12 ~ 0.33 dB 수준의 삽입 손실을 보였다. 그림 4.7에서 볼 수 있듯이 세 종류의 스위치들이 보이는 삽입 손실 특성 그래프는 y 축 (dB)으로 평행 이동한 듯한 모습을 보였으며, 이는 본 연구에서 제안한 스위치 구조재의 변경으로 인한 삽입 손실 특성 향상에 유전율로 인한 손실 특성 향상이 미미한 영향을 미쳤다는 것을 보여준다.

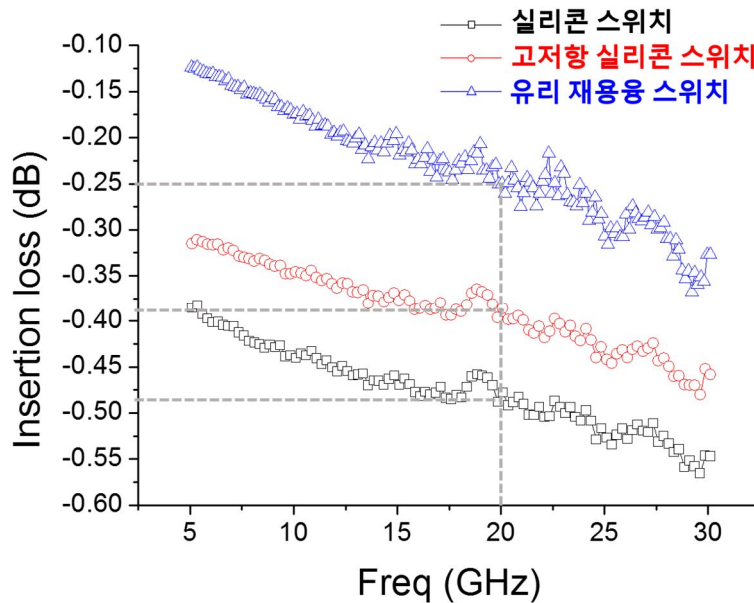


그림 4.7 기존의 스위치들과 제안하는 스위치의 삽입 손실 특성 측정 결과.

그림 4.8은 세 종류의 스위치가 가지는 삽입 손실 측정값을 앞서 2장에서 수행한 시뮬레이션 결과와 함께 보여준다. 파란색 삼각형, 빨간색 원, 검은색 사각형이 각각 유리 재용융 스위치, 고저항 실리콘 스위치, 그리고 실리콘 스위치를 나타내며, 그래프를 구성하는 심볼이 비어있는 그래프들이 측정 결과, 심볼이 채워져 있는 그래프들이 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 4.8의 그래프에서 확인할 수 있듯이, 측정 그래프와 시뮬레이션 그래프가 부합하는 결과를 보이고 있으며, 이는 앞서 2장에서 설립한 가정을 바탕으로 수행한 이론적인 분석 및 시뮬레이션이 유효하였음을 보여준다.

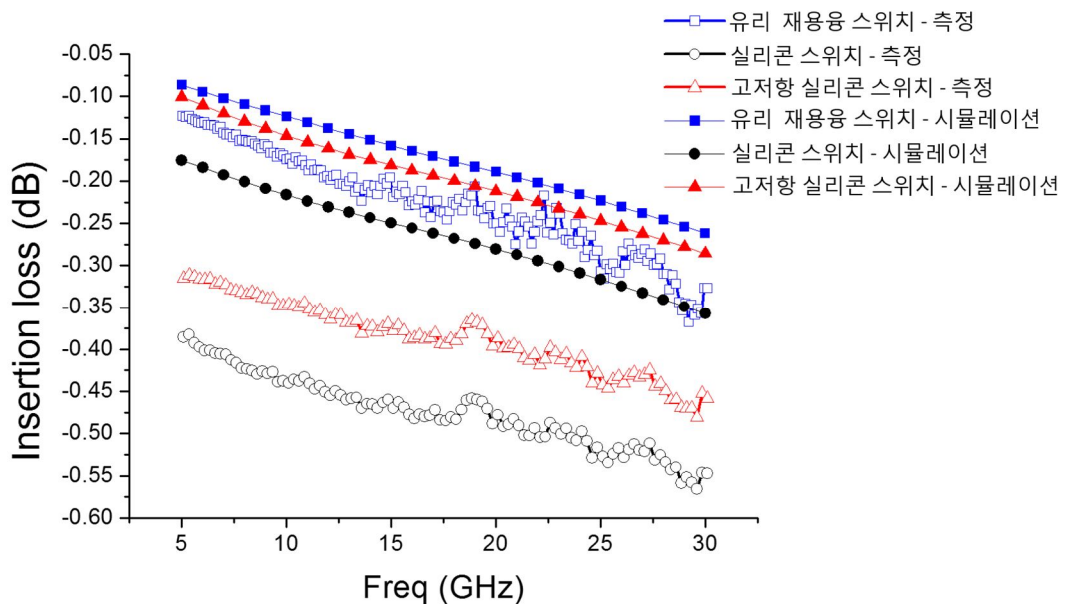


그림 4.8 기존의 스위치들과 제안하는 스위치의 삽입 손실 특성 시뮬레이션 및 측정 결과.



## 제 5 장 결론

본 논문에서는 기존의 정전 구동 방식 RF MEMS 실리콘 스위치 구성에서 접촉 금속 부근의 구조재를 실리콘에서 유리로 변경함으로써 스위치 구조물로 인한 신호 손실을 줄이고자 하였다. 본 연구에서 제안하는 구조의 RF MEMS 실리콘 스위치의 유효성을 검증하기 위해 CPW 전송 선로 상에 제작된 스위치 구조물로 인한 손실을 CPW 전송 선로의 기판 손실과 연관하여 이론적인 분석을 수행하였고, 이를 통해 본 연구에서 제안한 스위치로부터 기대되는 삽입 손실 특성 향상 정도를 예측하였다. 또한, CPW 전송 선로 및 제안하는 형태의 스위치를 설계한 후, 이를 토대로 시뮬레이션을 수행하여 본 연구에서 적용한 이론적인 분석이 유효하였음을 보였다.

다음으로, 본 연구에서 제안하는 형태의 RF MEMS 실리콘 스위치를 제작하기 위해 유리 재용융 공정을 기반으로 한 SiOG 공정을 제안하였고, 제안된 공정 방법을 통해 새로운 형태의 RF MEMS 실리콘 스위치를 성공적으로 제작 및 구동시킴으로써 제안된 공정방법의 유효성을 검증하였다. 한편, 제작된 스위치의 풀인 전압은 77.2 V로 측정되었다.

그리고, 제안하는 형태의 RF MEMS 실리콘 스위치의 RF 손실 특성 향상 정도를 실제로 확인하기 위해 실리콘 및 절연막으로 구조물이 제작된 스위치와 고저항 실리콘 및 절연막으로 구조물이 제작된 스위치를 제안하는 형태의 스위치와 병렬로 제작하여, 세 가지 스위치들의 RF 손실 특성을 비교 및 분석하였다. 측정 주파수 대역은 5 ~ 30 GHz로 설정되었으며, 본

연구에서 제안된 유리 구조재가 삽입된 스위치는 5 ~ 30 GHz의 주파수 신호에 대해 0.12 ~ 0.33 dB 수준의 낮은 삽입 손실을 가지는 것으로 확인되었다. 이는 기존의 실리콘 및 절연막을 접촉 금속부 구조재로 활용한 스위치보다 최대 0.26 dB (0.38 ~ 0.54 dB), 그리고 고저항 실리콘 및 절연막을 구조재로 활용한 스위치보다는 최대 0.19 dB (0.31 ~ 0.46 dB) 삽입 손실이 개선된 결과로서, 앞서 수행한 이론적인 분석과 시뮬레이션의 유효하였음과 제작 과정이 원만히 잘 이루어졌음을 보여준다.

한편, 보다 낮아진 삽입 손실 특성을 가진 RF MEMS 실리콘 스위치의 개발은 RF MEMS 스위치의 활용도를 높이는 동시에 보다 다양한 RF 응용으로의 RF MEMS 스위치 적용을 촉진 시킬 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] P. M. Zavracky, "Micromechanical switch with insulated switch contact," U.S. Patent No. 5,638,946, Jun 17, 1997.
- [2] P. M. Zavracky, S. Majumder, and N. E. McGruer, "Micromechanical switches fabricated using nickel surface micromachining," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 6, pp. 3-9, Mar 1997.
- [3] G. Rebeiz, *RF MEMS theory, design and technology*. New York: Wiley, 2003.
- [4] U. L. Rohde and D. P. Newkirk, *RF/microwave circuit design for wireless applications*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2004.
- [5] A. Pourziad, S. Nikmehr, and H. Veladi, "A Novel Multi-State Integrated RF MEMS Switch for Reconfigurable Antennas Applications," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 139, pp. 389-406, 2013.
- [6] K. Chih-Hsiang, K. M. J. Ho, and G. M. Rebeiz, "An Electronically-Scanned 1.8-2.1 GHz Base-Station Antenna Using Packaged High-Reliability RF MEMS Phase Shifters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, pp. 979-985, 2013.
- [7] O. Bayraktar, O. A. Civi, and T. Akin, "Beam switching reflectarray monolithically integrated with RF MEMS switches," *IEEE*

- Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, pp. 854–862, 2012.
- [8] O. Inac, D. Shin, and G. M. Rebeiz, "A Phased Array RFIC With Built-In Self-Test Capabilities," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, pp. 139–148, 2012.
- [9] D.-W. Kang, J.-G. Kim, B.-W. Min, and G. M. Rebeiz, "Single and four-element Ka-band transmit/receive phased-array silicon RFICs with 5-bit amplitude and phase control," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, pp. 3534–3543, 2009.
- [10] S. K. Reynolds, A. S. Natarajan, T. Ming-Da, *et al.*, A. Valdes-Garcia, and B. A. Floyd, "A 16-element phased-array receiver IC for 60-GHz communications in SiGe BiCMOS," in *Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), 2010 IEEE*, California, USA, 23–25 May 2010, pp. 461–464.
- [11] S. Dutta, M. Imran, R. Pal, *et al.*, "Effect of residual stress on RF MEMS switch," *Microsystem technologies*, vol. 17, pp. 1739–1745, 2011.
- [12] B. Kim, R. Melamud, R. A. Candler, *et al.*, "MEMS packaging for reliable resonators and oscillators," in *Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International*, 2012, pp. 1–3.
- [13] G. M. Rebeiz, C. D. Patel, S. K. Han, *et al.*, "The Search for a Reliable MEMS Switch?," *Ieee Microwave Magazine*, vol. 14, pp.

- 57-67, Jan-Feb 2013.
- [14] B. Pillans, L. Coryell, A. Malczewski, *et al.*, "Advances in RF MEMS phase shifters from 15 GHz to 35 GHz," in *Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International*, 2012, pp. 1-3.
- [15] J. Funari, "Micro-surface welding," U.S. Patent No. 4,171,477, Oct 16, 1979.
- [16] M. S. Machate, "Joule heat effects on reliability of RF MEMS switches," M.S. Dissertation, Mechanical Engineering Department, Worcester Polytechnic Institute, May, 2003.
- [17] A. Tazzoli, G. Meneghesso, "Acceleration of Microwelding on Ohmic RF-MEMS Switches," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 20, pp. 552-554, 2011.
- [18] J. M. Kim, S. Lee, J. H. Park, *et al.*, "Electrostatically driven low-voltage micromechanical RF switches using robust single-crystal silicon actuators," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, p. 095007, Sep 2010.
- [19] 김종만, "웨이퍼 단위로 실장된 단결정 실리콘 SP9T RF MEMS 스위치에 관한 연구," 공학 박사 학위 논문, 서울대학교 대학원 전기 컴퓨터 공학부, 2007년 8월.
- [20] G. M. Rebeiz, J. B. Muldavin, "RF MEMS switches and switch circuits," *Microwave Magazine, IEEE*, vol. 2, pp. 59-71, 2001.
- [21] <http://mwrf.com/active-components/rf-mems-switches-are-primed-mass-market-applications>.

- [22] G. E. Ponchak, "RF Transmission Lines on Silicon Substrates," in *Microwave Conference, 1999. 29th European*, Munich, Germany, Oct. 1999, pp. 158-161.
- [23] C. P. Wen, "Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for nonreciprocal gyromagnetic device applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 17, pp. 1087-1090, 1969.
- [24] K. C. Gupta, R. Garg, I. J. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip lines and slotlines*. Boston, MA: Artech house Dedham, 1996.
- [25] R. N. Simons, *Coplanar waveguide circuits, components, and systems*. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [26] 김종만, "SiOG 기판을 이용한 단결정 실리콘 RF MEMS 스위치의 제작 및 특성에 관한 연구," 공학 석사 학위 논문, 서울대학교 대학원 전기 컴퓨터 공학부, 2004년 2월.
- [27] S. T. Tso, J. A. PASK, "Reaction of glasses with hydrofluoric acid solution," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 65, pp. 360-362, 1982.
- [28] C. Iliescu, B. Chen, and J. Miao, "On the wet etching of Pyrex glass," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 143, pp. 154-161, 2008.
- [29] J. M. Nagarah, D. A. Wagenaar, "Ultradeep fused silica glass etching with an HF-resistant photosensitive resist for optical imaging applications," *Journal of Micromechanics and*

*Microengineering*, vol. 22, p. 035011, 2012.

# ABSTRACT

## **Design and fabrication of low-loss RF MEMS silicon switch using glass reflow**

In this paper, we firstly propose a novel low-loss RF MEMS silicon switch which utilizes reflowed glass as a switch structure near the contact metal. A new concept of electrostatically-driven RF MEMS silicon switch was presented and realized through the proposed fabrication process. By introducing reflowed glass into the silicon switch structure, the substrate loss induced by switch structure has greatly reduced. To verify the enhancement in loss characteristic, we fabricated 3 different types of RF MEMS silicon switches (silicon-, high resistance silicon-structured switch, and the proposed switch) and measured their insertion losses. In the frequency range of 5 to 30 GHz, the proposed RF MEMS switch with reflowed glass inside the switch structure showed insertion loss of 0.12 ~ 0.33 dB, while silicon- and high resistance silicon-structure switch showed 0.38 ~ 0.54 dB, 0.31 ~ 0.46 dB, respectively.

Before fabrication, theoretical analysis and simulations were carried out to predict the enhancement in insertion loss brought by the introduction of the reflowed glass. The expected improvement in the insertion loss characteristic of proposed RF MEMS switch was greater than 0.1 dB, compared to the conventional RF MEMS silicon switch.

Proposed fabrication method of the novel RF MEMS switch was based on SiOG process, assisted with the glass reflow process. The proposed fabrication process was validated with successful fabrication of the proposed switch. We believe that the proposed



fabrication process could be used for a wide range of RF MEMS area where low-loss characteristic is needed.

Low insertion loss characteristic of RF MEMS switch can contribute to reduce not only the complexity and cost, but also the size of the system by eliminating additional circuitry for loss compensation in the system. Therefore, it can be said that development of low loss RF MEMS switch can widen RF application fields where RF MEMS switch can be used. Furthermore, with this enhanced loss characteristic, RF MEMS silicon switch is expected to be used in the RF applications of strict performance requirement, such as base-station antenna, defense system, satellite switching network, etc.

Keywords : MEMS, RF MEMS switch, Low loss, Glass reflow

Student number : 2011-23390