



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

공학 박사 학위논문

고전력 응용을 위한
단결정 RF MEMS 스위치에 대한
연구

Study on SCS RF MEMS switch
for High Power Application

2015 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

황 성 현

고전력 응용을 위한
단결정 RF MEMS 스위치에 대한
연구

지도 교수 김용권

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2015 년 2 월

서울대학교 대학원
전기 컴퓨터 공학부
황성현

황성현의 공학박사 학위논문을 인준함
2015 년 2 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

국방 방위 체계의 가장 중요한 요소 중 하나인 레이더 시스템은 RF 시스템의 발전 방향과 맞추어 초소형화 고집적화 되고 있는 추세로서 기존의 벽돌 형태의 송수신기(Transceiver Receiver Module, TRM) 집적에서 고집적이 가능한 타일 형태의 송수신기 집적으로 발전을 모색하고 있다. 이를 위해 송수신기에서 가장 큰 체적을 차지하는 써큘레이터의 대체 소자 개발이 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 RF MEMS 스위치를 대체 소자로 제안하였다. 하지만 송수신기에 RF MEMS 스위치가 응용되기 위해서는 우수한 RF 특성과 더불어 10 W 이상의 고전력 수용이 가능하면서 10억 번 이상의 반복 수명이 보장되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 고전력 수용이 가능한 RF MEMS 스위치를 설계하고 구현하는 것을 목표로 하였다.

제안된 RF MEMS 스위치는 고전력 수용을 위하여 1 mN 이상의 복원력을 확보하였고 송수신기 적용을 위하여 50 V 이하의 구동 전압을 가지면서 최적화된 구조체의 설계를 제안하였다. 이를 통해 25 dB 이상의 높은 격리도와 복원력을 갖도록 하였고 설계된 치수는 comsol 시뮬레이션을 이용하여 다시 한번 검증하여 구조체의 설계가 적합함을 보였다. 10 W 이상의 전력을 견딜 수 있게 하기 위하여 열 해석을 수행하여 스위치에서 발생하는 최대 온도 증가를 분석하였고 발생하는 열은 최소화 하면서 열에 강한 구조의 접촉 부분을 설계 하였다. 실리콘 구조체 안에 공동을 형성하고 그 안에 접촉 금속을 형성 함으로써 금속의 두께를 수 μm 로 증가 시키더라도 접촉 후 전극간의 간격을

최소화 할 수가 있게 되었고 이로 인해 10 mN에 가까운 접촉력을 기대할 수 있었다. 이는 결국 열에 강하고 softening point가 높은 루테늄을 접촉 금속으로 사용하더라도 1 Ω 이하의 낮은 저항을 보장하게 되므로 인가하는 전력에 의한 온도 증가를 감소 시킬 뿐만 아니라 우수한 삽입 손실 특성을 보장한다.

제안된 스위치의 구현을 위해서 기본적인 사진 공정과 식각 공정 등을 포함하는 공정 과정을 확립하였다. 제안된 스위치는 실리콘 기판에 구조체를 형성하고 유리 기판에 전송선로를 제작한 후 양극 접합을 통해 실리콘 기판의 구조체를 유리 기판 위에 붙이는 방법을 사용하였다. 이때 실리콘 기판에서의 접촉 금속 형성은 스위치의 접촉 후 간격을 결정 짓게 되므로 접촉력 등의 성능에 매우 큰 영향을 미치게 되는데 기존의 도금 방법을 사용할 경우 균일한 두께의 접촉 금속 형성이 어려운 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 실리콘 기판에 공동을 형성한 후 SiO_2 로 틀을 형성하여 도금을 하고 CMP 공정을 통해 평탄화 함으로써 웨이퍼 전체에서 균일한 높이의 접촉 금속 형성이 가능하도록 하였다. 양극 접합 후 릴리즈 과정에서 발생하는 식각 후 잔류물은 스위치의 접촉을 방해하거나 단락의 원인이 되어 스위치의 구동 실패로 이어지므로 이를 반드시 제거 하여야 한다. 이를 위해 잔류물의 생성 메커니즘을 이해하고 물질의 구성을 밝혀 제거가 용이하도록 하였다. 본 연구에서는 이런 잔류 물질 들을 제거하기 위하여 루테늄 표면 또는 금 표면과 잔류물 사이의 접착을 끊는 방법을 이용하였다. 루테늄과 금은 귀금속에 속하여 유기물이나 다른 금속과의 접착력이 좋지 않으므로 효과적으로 잔류물 제거가 가능하게 된다. 본 연구에서는 친핵체를 가진 EKC 265 용액을 사용하여 금속표면 위에 있는 유기물질 및 폴리머들을 분리시키는 역할을 해주어 루테늄 표면의 잔류물을 제거 하도록 하였다.

제작된 스위치는 현미경 이미지와 SEM을 통하여 분석하여 제작이 잘 이루어 졌는지를 확인 하였고 설계 치수와의 비교를 통해 공정 과정의 확립이 적절히 이루어 졌음을 보였다.

제작된 스위치는 정전 구동 특성과 RF 성능 그리고 신뢰성을 평가하고 분석하여 군용 레이더의 송수신기에 응용이 가능함을 보였다. 풀인 전압(풀인 voltage)과 구동 전압(Actuation voltage)을 측정한 결과 평균적으로 41.6 V에서 스위치가 닫히기 시작하여 저항이 나타나기 시작하였고 약 50 V 이상에서부터 더 이상 저항이 낮아지지 않았다. 이 때의 스위치 접촉 저항을 확인한 결과 0.4 Ω 의 낮은 접촉 저항을 확인하였다. 제작된 스위치는 18 GHz에서 0.4 dB 이하의 삽입 손실을 보였고 25 dB 이상의 반사도와 격리도 특성을 보여 RF 성능이 우수함을 확인하였다, RF 측정 결과는 시뮬레이션 결과의 비교하여 유사함을 확인하여 제작이 잘 이루어 졌다고 판단 할 수 있다. 제작된 스위치의 신뢰도는 10 W의 고전력 수용을 몇 번이나 가능한지를 통해 평가하였다. 콜드 스위칭(cold-switching) 방법을 통해 반복 수명을 시험 한 결과 12억 번 이상의 반복 구동을 확인하였다. 시험 후 스위치 구조체의 변형이나 왜곡이 나타나지 않았고 접촉 저항과 삽입 손실의 변화를 확인 한 결과 접촉 저항이 감소하고 삽입 손실이 감소 하였는데 이는 제작된 스위치가 10 W의 고전력을 충분히 수용할 수 있음을 보여 준다. 모든 측정 결과들은 군용 레이더의 송수신기에 응용 되기에 충분한 결과이므로 추후 송수신기에 제안한 RF MEMS 스위치가 적용 가능 할 것으로 기대된다.

주요어 : 고전력, 10 W, RF MEMS 스위치, 반복 구동, 송수신기

학 번 : 2010-30235

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 동기	4
1.3 고전력 RF MEMS 스위치의 연구 동향.....	9
1.4 연구의 목적	14
1.5 논문의 구성	16
제 2 장 10 W 급 RF MEMS 스위치의 설계.....	18
2.1 10 W 급 RF MEMS 스위치를 위한 구조체 설계.....	18
2.1.1 구조체 설계의 흐름.....	18
2.1.2 구조체의 치수 설계.....	20
2.1.3 각 설계변수의 변화에 대한 스위치 성능 분석	28
2.2 10 W 급 RF MEMS 스위치를 위한 접촉부분의 세부 설계 ..	34
2.2.1 접촉부분 설계의 흐름	34
2.2.2 고전력에 의해 발생하는 열 해석	35
2.2.3 접촉 부분의 설계	40
2.3 설계된 소자의 RF 시뮬레이션.....	52
제 3 장 10 W 급 RF MEMS 스위치의 제작.....	54
3.1 10 W 급 RF MEMS 스위치의 제작 과정	54
3.1.1 하부 유리기판의 제작 과정	54

3.1.2 상부 실리콘 기판의 제작 과정.....	61
3.1.3 기판 접합 및 릴리즈.....	70
3.1.4 접촉 금속의 세척.....	72
3.2 스위치의 제작 결과.....	78
제 4 장 10 W 급 RF MEMS switch의 측정 결과.....	82
4.1 정전 구동 특성 분석.....	82
4.2 제작된 스위치의 RF 특성.....	85
4.3 고전력 수용 시험.....	89
4.4 고전력 수용 시험 후 성능 변화.....	92
제 5 장 RF MEMS 스위치의 실장.....	94
5.1 Glass frit을 이용한 실장 개요.....	95
5.2 Glass frit을 이용한 실장 과정.....	96
5.3 실장 특성 측정.....	99
5.4 실장 후 스위치의 RF 성능.....	102
5.5 제작한 RF MEMS 스위치의 성능 요약 및 비교.....	105
제 6 장 결론.....	106
참고 문헌.....	109
Abstract.....	115

표 목차

표 1.1	군용 레이더 송수신기용 RF MEMS 스위치의 성능 조건	8
표 2.1	RF MEMS 스위치 구조체의 설계 치수	26
표 2.2	금, 루테튬, 로듐, 백금의 녹는 점과 softening point.....	46
표 3.1	AZ 5214 Negative tone 공정 조건	55
표 3.2	JSR THB 111N Negative tone 공정 조건	57
표 3.3	크롬을 제거하기 위한 건식 식각 조건	59
표 3.4	AZ 4330 Positive tone 공정 조건.....	60
표 3.5	희생층 제거를 위한 Plasma ashing 공정 조건	61
표 3.6	잔류물 제거를 위한 EKC 265 사용 조건	77
표 3.7	제작 결과와 설계 치수의 비교	81
표 5.1	타 그룹 스위치와의 성능 비교.....	105

그림 목차

그림 1. 1	벽돌 형태의 송수신기와 타일 형태의 송수신기	6
그림 1. 2	써큘레이터와 RF MEMS 스위치의 체적 비교.....	7
그림 1. 3	UCSD에서 개발된 RF MEMS	10
그림 1. 4	Radant 사의 RF MEMS 스위치와 반복 수명 측정결과.....	11
그림 1. 5	Omron 社의 RF MEMS 스위치와 전력 수용 결과	12
그림 1. 6	서울대의 단결정 실리콘 RF MEMS 스위치	13
그림 1. 7	고전력 수용이 가능한 RF MEMS 스위치의 조건	14
그림 2. 1	풀인 전압과 각 변수의 관계	18
그림 2. 2	접촉 상태에서 복원력과 각 변수의 관계	19
그림 2. 3	구조체의 설계 흐름	20
그림 2. 4	1 mN의 복원력과 50 V의 풀인 전압에 대한 초기 간격과 (a) 스프링 상수, (b) 전극 크기의 관계	22
그림 2. 5	(a) 접촉판과 신호선, (b)접촉판의 이동가능 거리에 따른 격리도 변화.....	23
그림 2. 6	개량된 접촉판과 신호선, (b) 이동가능 거리와 격리도의 변화	24
그림 2. 7	설계 가능한 초기 간격의 범위.....	25
그림 2. 8	제안하는 스위치 구조체의 모습과 스프링 표 2. 1 RF MEMS 스위치 구조체의 설계 치수	26
그림 2. 9	구조체 해석을 위한 시뮬레이션 모델.....	28
그림 2. 10	스프링 폭의 변화에 따른 (a) 복원력과 (b) 풀인 전압의	

변화	30
그림 2. 11 스프링의 두께의 변화에 따른 (a) 복원력과 (b) 풀인 전압 변화	31
그림 2. 12 초기 간격의 변화에 따른 (a) 복원력과 (b) 풀인 전압의 변화	33
그림 2. 13 접촉 부분 설계의 흐름	34
그림 2. 14 열 해석을 위한 스위치의 모델과 단면도	37
그림 2. 15 신호선 저항의 요소	39
그림 2. 16 접촉 판의 두께에 따른 AC 저항	41
그림 2. 17 접촉 판의 두께에 따른 온도증가의 변화	42
그림 2. 18 접촉 저항과 입력 전력에 따른 온도 증가의 변화	43
그림 2. 19 적층 신호선의 개략도와 단면도	44
그림 2. 20 면 저항 측정을 위한 샘플의 구성	45
그림 2. 21 각 샘플의 면 저항 측정 결과그림	46
그림 2. 22 루테늄 적용 후의 온도 상승그림	47
그림 2. 23 각 금속 접촉에 대한 접촉력과 저항의 관계	48
그림 2. 24 접촉력을 최대화 하기 위한 구조체의 개선안	49
그림 2. 25 스위치 접촉 후 전극의 간격과 접촉력의 관계	50
그림 2. 26 최종 설계를 반영하였을 때의 입력 전력에 대한 온도 상승 변화	51
그림 2. 27 RF 시뮬레이션을 위한 스위치 모델	52
그림 2. 28 RF 시뮬레이션 결과 : (a)삽입손실, (b)반사도, (c)격리도	53
그림 3. 1 스위치의 유리 기판 제작 과정	56
그림 3. 2 CPW 전송선의 제작 후 사진	58
그림 3. 3 유리 기판의 제작 결과	61

그림 3. 4 실리콘 기판의 제작 과정.....	64
그림 3. 5 절연 막 형성 후 사진.....	65
그림 3. 6 TEOS 절연막과 접촉 금속의 올바른 형태	66
그림 3. 7 CMP를 이용한 균일한 높이의 접촉 금속 형성 방법.....	67
그림 3. 8 도금과 CMP 공정을 이용 하였을 때의 접촉막의 두께 비교.....	68
그림 3. 9 SiO ₂ 식각 후 접촉 금속의 모습	69
그림 3. 10 릴리즈를 위한 식각 마스크 제작 후 모습.....	71
그림 3. 11 제작 완료 후 스위치의 현미경 사진.....	72
그림 3. 12 전자주사 현미경(SEM)과 원소 분석기(EDX)를 이용한 잔류물의 스펙트럼 분석 결과.....	73
그림 3. 13 식각 후 잔류 물의 형성 과정	74
그림 3. 14 ECK 265 처리 (a) 전 (b) 후 CPW 비교.....	76
그림 3. 15 제작 완료 된 SPST와 SPDT의 현미경 사진.....	78
그림 3. 16 스위치의 전자 주사 현미경 사진	79
그림 3. 17 스프링 부분의 확대 사진과 치수	80
그림 4. 1 풀인 전압 측정을 위한 저항 측정 장치.....	82
그림 4. 2 인가 전압에 따른 접촉 저항의 변화.....	83
그림 4. 3 스위치의 각 포트.....	85
그림 4. 4 제작된 스위치의 RF 측정 결과: (a) 삽입손실, (b) 반사도, (c) 출력 포트에서의 반사도, (d) 격리도	88
그림 4. 5 고전력 수용 실험 결과.....	90
그림 4. 6 접촉 저항에 따른 10 W cold-switching 성능 시험 결과 ..	91
그림 4. 7 고전력 수용 시험 후 성능 변화 : (a) 접촉저항, (b) 삽입손실	93

그림 5. 1 Glass frit을 이용한 실장의 개략도	95
그림 5. 2 glass frit의 열처리 과정	97
그림 5. 3 RF MEMS 스위치의 실장 과정	97
그림 5. 4 실장된 웨이퍼의 현미경 이미지와 SEM 단면도	98
그림 5. 5 실장된 소자의 전단 강도 측정 장비와 방법	99
그림 5. 6 실장된 소자의 전단 강도 측정 결과	100
그림 5. 7 실장 후 헬륨 누수 측정 결과	101
그림 5. 8 실장 전후 RF MEMS 스위치의 RF 성능 비교	104

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

전기 소자로서 스위치는 신호를 연결 하거나 차단하는 역할을 한다. 효율적인 연결을 위해서는 신호의 손실이 없어야 하고 효과적으로 신호를 차단하기 위해서는 높은 격리도를 가져야 한다. 여기에 스위치가 RF 시스템에 적용되기 위해서는 수 메가 헤르츠에서 수십 GHz까지의 넓은 영역에서 손실이 작고 높은 격리도를 가져야 하면서 전력 소모가 작아야 한다. RF 시스템에서 가격이 저렴하고 안정적인 P-I-N 다이오드와 GaAs FET 스위치를 포함한 고체 스위치가 널리 사용되고 있지만 이들 스위치는 수 기가 헤르츠 이하의 동작 주파수를 가지고 주파수에 따라 수 dB의 높은 삽입손실을 가지며 비선형성을 나타내는 등의 단점이 있다 [1, 2].

근래에 들어서 RF 시스템은 더욱 복잡해지고 다기능 및 소형화가 되고 있을 뿐 아니라 보다 높은 동작 주파수를 가지게 되고 있는 반면 고체 스위치는 그 한계로 인해 스위치에 손실된 신호를 증폭 시켜 주거나 왜곡된 신호를 보상하기 위한 추가적인 노력이 필요한 실정이다. 이는 결국 RF 시스템의 복잡도와 비용을 더욱 증가 시키고 있으며 소형화의 방해가 되고 있다. 이러한 고체 스위치의 한계를 극복하기 위해 다양한 노력이 진행 되었는데 그 중 스위치의 소형화 필요성과 맞물려 MEMS 기술을 이용한 RF 시스템용 스위치 개발이 시작되었고 1990년대에 들어 그 첫 번째 연구 결과가 보고 되어 RF MEMS 스위치의 시초가 되었다[3, 4].

RF MEMS 스위치는 정전기, 압전, 자기, 열 등을 이용하여 기계적인 움직임을 바탕으로 신호선을 단락 시키거나 절연 시키게 되는데 이로 인해 수십 기가 헤르츠까지 작은 손실을 가지면서 높은 격리도를 가지고 있을 뿐 아니라 구동 방식에 따라서는 전력소모가 거의 없는 설계가 가능하다. 또한 선형성이 매우 좋고 반도체 공정을 이용하여 저가 생산이 가능하다는 점에서 가장 이상에 가까운 스위치의 개발을 가능하게 할 것으로 기대 받았다[5-8]. 이러한 기대에 힘입어 RF MEMS 스위치가 탄생한 이래로 우수 대학의 연구실과 연구기관에서 스위치 개발에 박차를 가했을 뿐만 아니라 국방 방위 체계에서 스위치의 중요성이 부각 되면서 미국에서는 Defense Advanced Research Project Administration (DARPA) 라는 국방부의 지원 아래 총 900억 이상의 기술개발 투자가 있었고 국내에서는 2010년대에 들어 국방부 산하의 국방과학 연구소나 민군기술협력진흥센터 등의 투자를 통해 연구가 진행 되고 있다[9-15].

연구의 일환으로 개발된 RF MEMS 스위치는 닫힘 상태에서는 1 Ω 이하의 접촉 저항을 가지면서 열림 상태에서는 10 fF 이상의 높은 정전용량을 가지므로 수십 GHz 이상의 영역에서는 고체 스위치보다 10 배 이상의 성능을 보장한다[16]. 또한 스위치의 낮은 접촉저항은 IP3에서는 75 dBm 이상의 높은 선형성을 약속할 뿐 아니라 IP2에서는 측정장비 한계까지의 값을 갖고 -90 dBc 이하의 매우 낮은 intermodulation distortion을 갖는다[17]. 이에 더해 정전 식이나 압전 식으로 구동되는 RF MEMS 스위치는 전류가 흐르지 않으므로 전력 소모가 없고 표면가공 공정 방법에 의해 다양한 기판 위에 제작이 가능하여 GaAs나 GaN 기반의 3-5족 트랜지스터와도 집적이 가능한데 이는 결국 밀리미터파 시스템까지 다양한 응용을 보장한다.

범국가적인 노력과 탁월한 소자 성능에도 불구하고 현재까지

시장에서 성공적인 평가를 받은 RF MEMS 스위치는 Omron 社의 스위치뿐 인데 이마저도 2014년에 판매 중단된 상태이다. RF MEMS 스위치의 상품화 실패의 가장 큰 원인은 신뢰성에 대한 부분으로써 RF 시스템에서 스위치는 적게는 수십만 번에서 많게는 10억 번 이상의 반복 구동이 가능하면서 작게는 수 mW에서 많게는 10 W 이상의 전력 수용이 요구되는데 대부분의 개발된 RF MEMS 스위치는 1 W 이하의 전력 수용이 가능하거나 밀봉 실장(hermetic package)이 되지 않아 시스템이 요구하는 수명을 만족 하지 못하고 있다[18]. 따라서 RF MEMS 스위치가 시장에 성공하기 위해서는 앞서 기술한 장점을 살리면서 고전력 수용이 가능한 동시에 밀봉 실장 된 신뢰성 높은 스위치 개발이 필요한 실정이다.

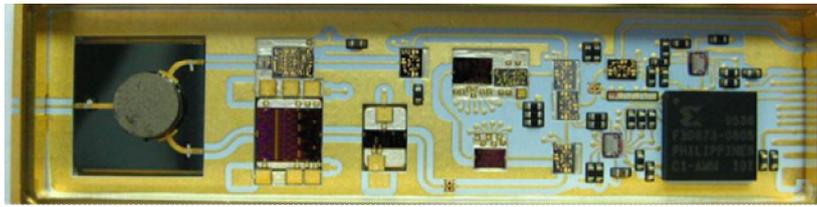
1.2 연구의 동기

고체 스위치들이 가지는 고주파에서의 성능 열화와 비선형성의 대안으로서 RF MEMS 스위치가 등장한 이후 고주파 응용을 위한 활발한 연구가 진행되어 왔다[19-24]. 일찍이 RF MEMS 스위치는 작은 크기와 탁월한 RF 성능을 장점으로 하여 정보 통신 분야에 응용되고자 하였다. 특히 휴대폰의 보급이 급격히 확대 되면서 보다 소형화되고 성능이 향상된 front-end-module 개발을 위하여 RF MEMS 기술이 사용되었고 송수신 스위치로 사용되는 고체 스위치를 RF MEMS 스위치로 대체하고자 하는 노력이 활발하였다[25-30]. 그 노력의 일환으로 RF MEMS 기술을 이용하여 만든 front-end-module이 장착된 휴대폰이 시장에 나오기도 하였지만 RF MEMS 스위치는 여전히 적용이 되지 않고 있는 상태이다. 이는 근래에 들어 휴대폰에서 주로 사용되는 0.7 ~ 2.7 GHz 영역에서 신호 특성이 크게 개선된 고체 스위치들이 속속히 개발되면서 단가 경쟁력이 갖추어지지 않은 RF MEMS 스위치가 시장 경쟁력을 가지고 있지 않기 때문이다. 그러나 6 GHz 이상의 고주파를 이용하는 자동 계측 장비, 광대역 신호 처리 장비나 인공위성 교환망, 인공위성의 교환망, 방어 체계, 지능형 기지국 안테나 등의 분야에서는 고체 스위치의 성능 한계로 인해 여전히 RF MEMS 스위치에 대한 필요성 제기되고 있다.

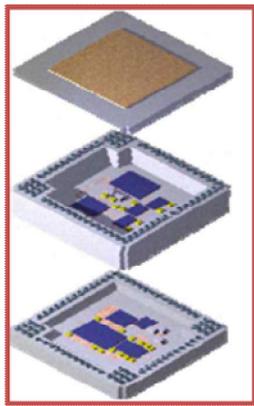
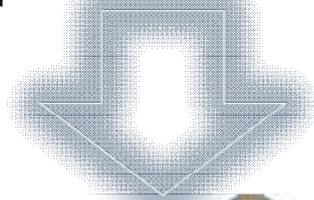
특히 국방 방위 체계에서 RF MEMS 스위치에 대한 수요가 증가하고 있는데 고성능 고집적화 방향으로 발전하고 있는 방위 시스템에서 낮은 손실을 갖는 RF MEMS 스위치를 사용함으로써 성능 향상뿐만 아니라 소형화도 가능할 것으로 기대하고 있다. 또한 방위

산업의 특성상 가격 경쟁력 보다는 성능을 우선 시 하므로 고성능에 신뢰성이 높은 RF MEMS 스위치 개발에 군의 투자가 이루어지고 있는 실정이다. 그 예로 미국에서는 DARPA의 지원아래 2000년 대에만 900억 이상의 투자가 이루어졌고 유럽에서는 유럽방위공동체(European Defense Community)와 유럽우주기관(European Space Agency) 등 범국가적인 투자가 이루어지고 있다. 국내에서는 국방부 산하의 민군기술 겸용 진흥 센터를 통해 군용 방위 체계의 레이더 시스템에 적용되기 위한 RF MEMS 스위치 개발에 투자가 이루어지고 있다.

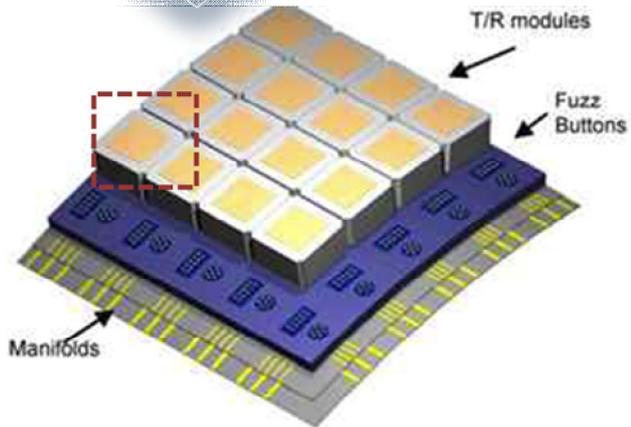
국방 방위 체계의 가장 중요한 요소 중 하나인 레이더 시스템은 RF 시스템의 발전 방향과 맞추어 초소형화 고집적화 되고 있는 추세로서 그림 1.1과 같이 기존의 벽돌 형태의 송수신기(Transceiver Receiver Module, TRM) 집적에서 고집적이 가능한 타일 형태로 발전을 모색하고 있다.



Brick type TRM (67 mm X 20 mm)



20 mm X 20 mm



Tile type TRM

그림 1.1 벽돌 형태의 송수신기와 타일 형태의 송수신기

이에 초소형화의 가장 큰 병목 점인 써큘레이터(Circulator)의 대체가 필수적인데 그 대체 소자로서 RF MEMS 스위치를 고려할 수 있다. 그림 1.2와 같이 써큘레이터를 RF MEMS 스위치로 대체 하면 체적 면에서 1/1000 정도로 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 써큘레이터에 의한 손실을 1/3 이하로 줄일 수 있어 고집적을 위한 송수신기 설계가 용이하다는 장점을 가질 수 있다.

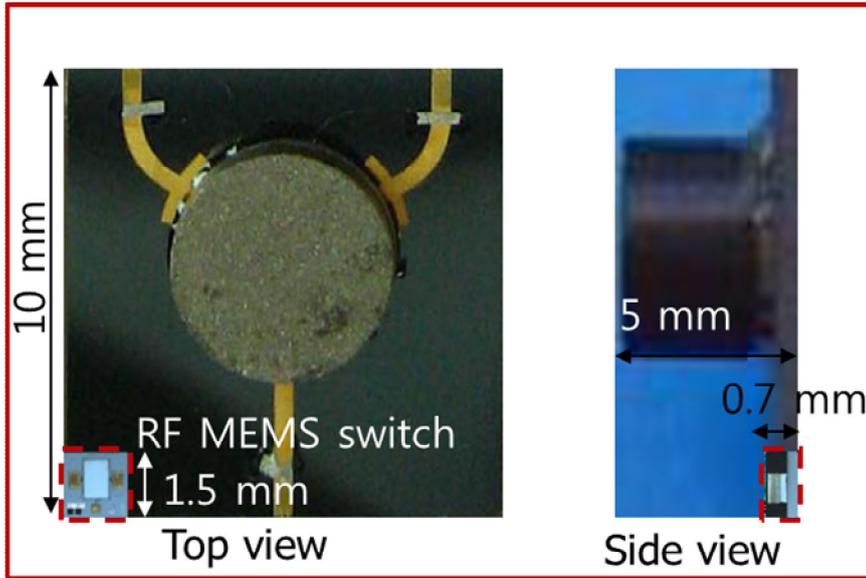


그림 1.2 써큘레이터와 RF MEMS 스위치의 체적 비교

하지만 군용 레이더의 송수신기에서 RF MEMS 스위치가 쓰이기 위해서는 표 1.1과 같은 높은 성능 조건을 만족해야 하는데, 특히 10 W 이상의 고전력을 10억 번 이상 수용가능 해야 하므로 이를 위한 완벽한 밀봉 실장까지 필요하다고 할 수 있다.

표 1.1 군용 레이더 송수신기용 RF MEMS 스위치의 성능 조건

	Condition
Target frequency	2 ~ 18 GHz
Insertion loss	< 0.5 dB
Isolation	> 20 dB
Power handling	10 W, 10⁹ cycles
Switching speed	15 μs
Actuation voltage	< 50 V

1.3 고전력 RF MEMS 스위치의 연구 동향

앞서 밝혔듯이 RF MEMS 스위치는 열이나 압전, 자기, 정전기 등의 다양한 구동 방식이 가능하지만 근래에 들어서는 구동 힘이 크고 안정적인 접촉이 가능한 정전기 구동 형태의 스위치가 대부분이고 일부 연구기관에서 압전체를 이용한 스위치가 연구 중에 있다. 그러나 압전 소자는 고전력이 흐를 경우 압전체의 구조유지가 어려워 고전력 응용에는 적합하지가 않고 정전기를 이용한 스위치들 만이 지금까지 1 W 이상의 전력 수용 결과를 보고하고 있다[31-34].

지금까지 학계에 발표된 고전력 스위치는 구조체 물질로 보았을 때 크게 금속 막 형태와 실리콘 박막 두 가지 형태가 주를 이루고 있다.

1.3.1 금속 막을 이용한 고전력 RF MEMS 스위치

금속 막 스위치의 경우 손실이 작고 사이즈가 작다는 장점이 있지만 균일한 특성을 가지도록 조정하기가 어렵고 열에 의한 뒤틀림이나 균열이 생기기 쉬워 크기에서 제약을 받을 수 밖에 없다. 스위치 크기의 제약은 구동을 위한 구동부의 크기제약으로 이어지므로 신뢰성 있는 동작을 위해서는 높은 구동 전압을 필요로 하게 된다는 단점이 있다.

그림 1.3은 미국 캘리포니아 대학교 샌디에이고 캠퍼스(UCSD)에서 개발된 RF MEMS 스위치이다[31]. 각 접촉 점마다 1 Ω 이하의 낮은 접촉 저항을 구현하여 40 GHz에서도 1 dB이하의 낮은 삽입손실을 보였고 스위치가 열린 상태에서는 8 fF 이상의 정전용량 값을 가져 20 GHz까지 20 dB 이상의 높은 격리도를 나타내어 우수한 RF 특성을 보고 하였다. 하지만 금속 스위치의 특성상 전극의 크기가 제한되어

있어 구동전압이 90 V 수준이고 고전력 수용 시험에서는 cold-switching 방법의 반복 구동 성능 시험 결과 5 W에서는 1억 번의 구동에 성공하였으나 10 W에서는 1000만 번의 반복 구동을 기록하였다.

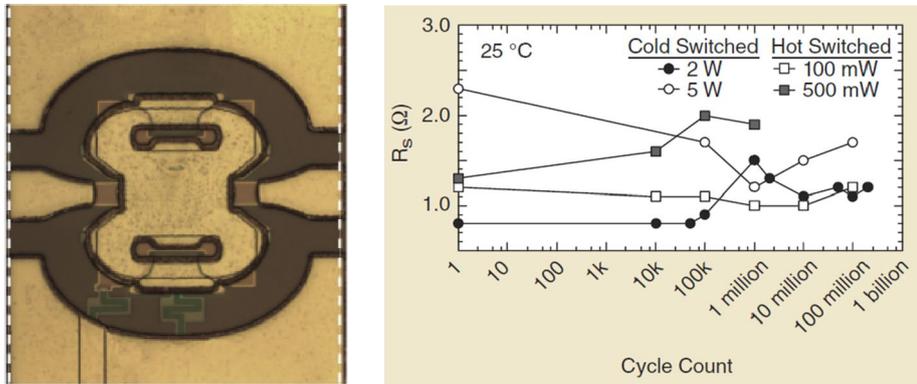


그림 1. 3 UCSD에서 개발된 RF MEMS

그림 1.4는 Radant 社의 RF MEMS 스위치로서 현재로서는 유일하게 시장에 진입해 있는 고전력용 RF MEMS 스위치이다[32]. Radant 社의 스위치는 외팔보 형태의 구조로서 UCSD의 스위치와는 달리 두 개의 접촉 점이 병렬 연결 형태의 모양을 가진다. 이로 인해 닫힌 상태에서 스위치 전체의 접촉 저항이 각 접촉 저항의 병렬 합이 되므로 그 값이 줄어들 뿐만 아니라 스위치를 통해 흐르는 전력이 각각의 접촉 점으로 분산되는 효과가 있다. 하지만 스위치가 열린 상태에서는 정전용량이 증가 할 수 밖에 없는데 이를 초기 간격의 적절한 조절을 통하여 20 GHz까지 20 dB이상의 격리도를 확보 하였다. 또한 밀봉 실장을 통하여 스위치의 신뢰도를 향상시켜 cold-switching 방법의 반복 구동 시험에서 10 W의 고전력을 10억 번까지 통과하였고 시험 후에도 성능의 변화가 없음을 확인하였다. 다만 작은 전극의

크기로 인해 다소 높은 90 V의 구동 전압이 필요하다는 단점이 있다.

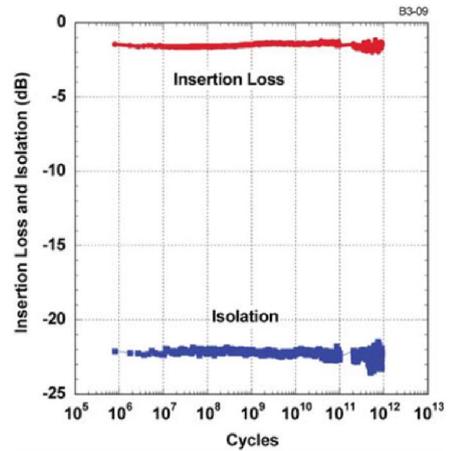


그림 1. 4 Radant 사의 RF MEMS 스위치와 반복 수명 측정결과

1.3.2 실리콘 막을 이용한 고전력 RF MEMS 스위치

실리콘 막을 이용한 스위치는 열과 반복 구동에 의한 크립이 없고 변형이 일어나지 않아 크기의 제약에서 자유롭다는 장점이 있지만 금속 스위치에 비해 손실이 크고 웨이퍼 본딩과 CMP와 같은 공정이 필요 불가결하여 공정이 복잡해 진다는 단점이 있다.

그림 1.5는 Omron 社에서 개발한 RF MEMS 스위치로서 실리콘 구조체를 사용하였다[33]. Omron 사 스위치의 가장 큰 특징은 앞서 소개한 스위치 들과는 달리 실리콘을 이용하여 큰 전극을 구현 할 수가 있어 mN 단위의 높은 복원력을 유지하면서 34 V의 낮은 구동 전압을 갖는 스위치를 개발하였다. 또한 밀봉 실장이 잘 이루어져 있어 고전력 수용에도 좋은 성능을 나타내었는데 스위치의 제품 정보에는 cold-switching 시험에서 5 W의 인가 전력에 10억 번의 반복 구동을 보장한다고 하였지만 다른 그룹에서 성능 시험 결과 9 W까지도 견디는 것으로 보고 되고 있다. 다만 다소 큰 구조체의 영향으로 인해 스위치의

삽입손실이 10 GHz에서 1 dB 정도로 높은 값을 보이고 있는 단점이 있다.

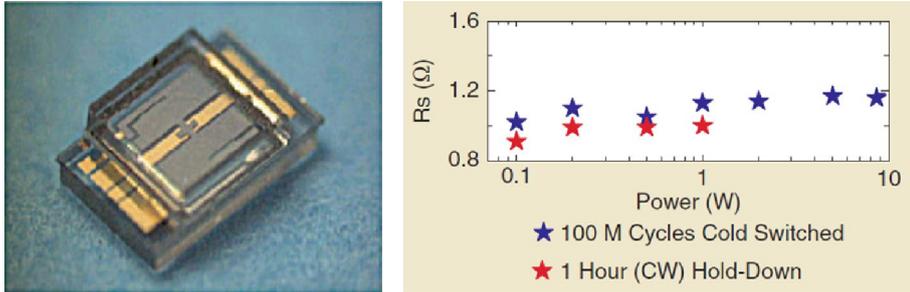


그림 1.5 Omron 社의 RF MEMS 스위치와 전력 수용 결과

그림 1.6은 서울대학교에서 개발한 단결정 실리콘 RF MEMS 이다[34]. 이 스위치의 가장 큰 특징은 실리콘 구조체의 이단 식각을 통해서 스프링과 스위치 구조체의 두께를 자유롭게 정의 할 수가 있어 설계 변화의 폭이 매우 넓다는 것이다. 이를 통해 15 V 이하의 구동 전압을 가진 저전압 구동이 가능하면서 1억 번 이상의 반복 구동 신뢰성을 가지는 고신뢰 스위치가 개발되었다. 낮은 복원력에도 불구하고 1 W 수준의 전력 수용이 가능하고 20 GHz까지 0.2 dB이하의 낮은 삽입 손실을 가지는 것으로 보고 되었다.

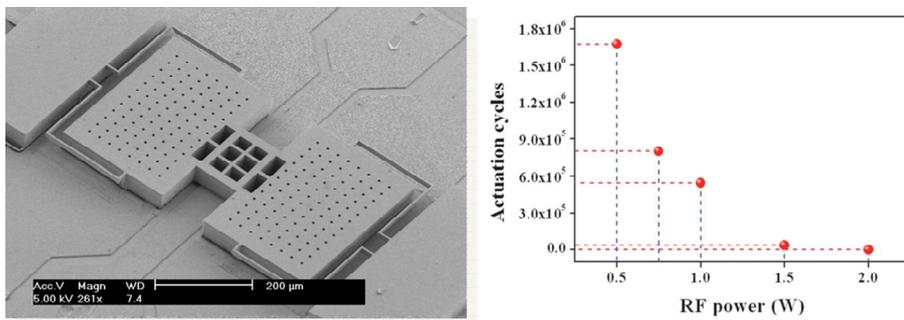


그림 1.6 서울대의 단결정 실리콘 RF MEMS 스위치

1.4 연구의 목적

본 논문에서는 군용 레이더의 송수신기에 사용이 가능하도록 하기 위하여 고전력 수용이 가능한 RF MEMS 스위치의 개발을 목표로 하고 있다.

10 W 이상의 고전력 수용이 가능한 RF MEMS 스위치에 대한 보고가 적은 이유는 고전력 스위치가 그림 1.7과 같이 복합적인 요소들의 접점에 있어 설계가 어렵기 때문이다.

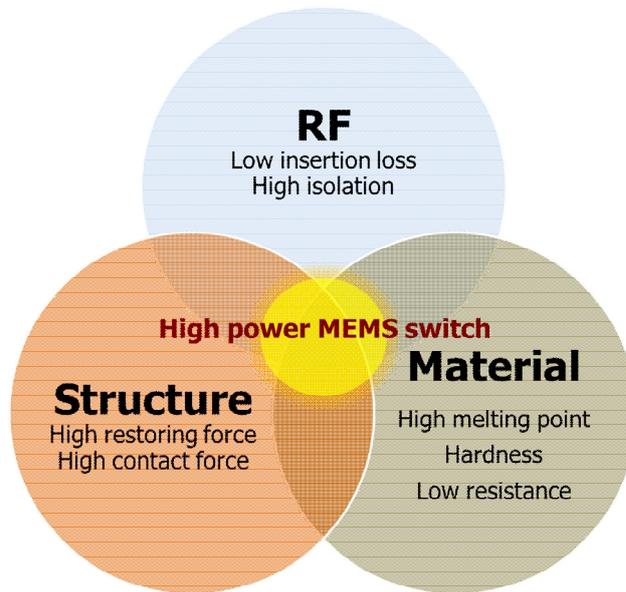


그림 1.7 고전력 수용이 가능한 RF MEMS 스위치의 조건

손실되는 신호에 의한 금속 발열을 최소화 하기 위해 낮은 삽입 손실을 가져야 하고 높은 격리도를 가져 자가 구동 현상(self actuation)을 방지하여야 한다. 구조적으로는 높은 복원력을 가져

접착에 강해야 하고 접착력이 강해 접촉 저항을 최소화 하여 저항에 의한 열발생을 줄여야 한다. 더불어 스위치에 쓰이는 물질은 열에 강하여 잘 녹지 않고 강도가 강해 변형되지 않아야 하며 접촉 금속은 낮은 저항을 가져야 한다. 이러한 요소들은 물론 공정가능한 틀 안에서 선택이 되고 설계되어야 비로소 고전력 수용이 가능한 RF MEMS 스위치 제작이 가능하다.

본 연구에서는 실리콘 구조체를 이용하여 안정적이면서 높은 복원력을 가지고 고전력 수송을 위한 접촉부분 설계 방법과 더불어 웨이퍼 레벨의 밀봉이 가능한 실장을 통해 신뢰성을 향상 시켜서 10 W 이상의 고전력을 수용하면서 10억 번 이상의 반복 구동 수명을 가진 RF MEMS 스위치 구현을 목표로 하였다.

1.5 논문의 구성

본 논문의 2 장에서는 10 W의 고전력 수용을 위한 RF MEMS 스위치 설계 방법을 기술하였다. 이를 위하여 1 mN 이상의 복원력을 가지면서 50 V의 구동 전압을 가지는 구조체의 최적 설계를 분석한다. 열 해석과 접촉 저항을 최소화 할 수 있는 방법, 그리고 적절한 접촉 금속의 선정을 통하여 10 W 이상의 전력이 흐르더라도 견딜 수 있는 접촉 부분을 설계한다.

3 장에서는 설계한 RF MEMS 스위치의 제작 과정과 그 결과에 대해 알아본다. 상부 기판과 하부 기판의 제작 공정과 접합 공정 후 릴리즈까지 면밀히 그 과정을 기술하고 설계값과 제작 결과를 비교 분석한다.

본 논문의 4 장에서는 제작된 RF MEMS 스위치의 성능을 측정한 결과에 대해서 기술한다. 제작된 스위치의 정전 구동 특성과 RF 성능 그리고 신뢰성 평가에 대해 분석한다. 정전 구동 특성에서는 풀인 전압(Pull-in voltage)과 구동 전압(Actuation voltage)을 측정하고 이때의 스위치 접촉저항을 확인한다. 스위치의 RF 성능은 SPDT 스위치의 두 경로에 대해 각각 삽입손실과, 반사도, 격리도를 측정 하고 시뮬레이션 결과와 비교하여 제작이 잘 이루어 짐을 확인 한다. 제작된 스위치의 신뢰도는 10 W의 고전력 수용을 몇 번이나 가능한지를 통해 평가한다. 이때 평가 방법은 콜드 스위칭(cold-switching) 방법으로서 스위치가 닫혀 있는 동안 1 번의 RF 전력을 인가하고 열려있는 동안 1번의 RF 전력을 인가하여 1 번 신호가 흐르고 1 번 차단 되는 것을 1 회로 하여 구동 횟수를 평가 하였다. 신뢰성 평가 후 스위치의 성능

변화 여부를 확인하기 위하여 접촉저항과 삽입손실의 변화를 분석하였다.

본 논문의 5 장에서는 제작된 스위치의 실장 방법에 대해서 분석한다. 제작된 스위치는 Glass frit 을 접착 물질로 하여 소자 위에 실리콘 뚜껑을 씌우는 실장 방법을 도입한다. 실장 후 본딩력과 수은 가스의 누출검사를 통해 MIL-STD 규격과 비교하여 실장의 밀봉 정도를 확인한다. 실장 후 소자의 RF 특성을 측정하여 실장이 소자의 성능에 미치는 영향을 분석하고 실장 된 소자의 설계가 잘 이루어졌는지 확인한다.

제 2 장 10 W 급 RF MEMS 스위치의 설계

2.1 10 W 급 RF MEMS 스위치를 위한 구조체 설계

2.1.1 구조체 설계의 흐름

그림 2.1은 RF MEMS 스위치의 가장 기본적인 특성인 풀인 전압과 각 파라미터의 관계를 나타낸 그림이다. 풀인 전압은 스위치의 전극의 크기와 초기간격에 의해 결정되는데 초기 간격이 커질수록 스위치의 동작 전압은 높아진다. 접촉식 스위치에서 사용되는 금속은 반복적인 접촉이나 고전력에 의한 열로 인해 점착력이 증가하는데 이를 회복하기 위해서는 기본적으로 높은 복원력을 가져야 한다. 이 때 스위치의 복원력은 그림 2.2와 같이 접촉상태까지 움직인 거리와 스위치의 스프링 상수에 의해 결정되는데 움직인 거리는 초기 간격의 영향을 받으므로 스위치의 적용 분야에 따른 적절한 설계가 요구된다.

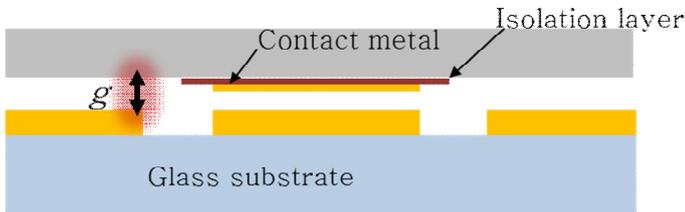


Fig. Schematic of the SCS switch at off-state

$$V_{pull_in} = \sqrt{\frac{8kg^3}{27\epsilon_0 A}}$$

ϵ_0 : permittivity of air
 k : spring constant
 g : initial electrode gap
 g_0 : gap after contact = 0.5 μm
 A : electrode area
 ϵ_0 : permittivity of dielectric

그림 2.1 풀인 전압과 각 변수의 관계

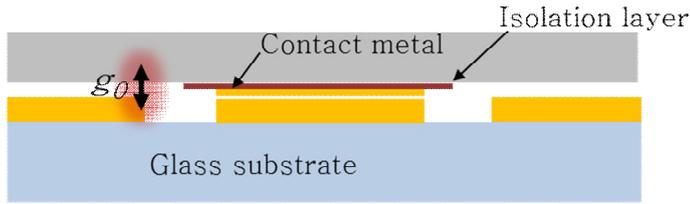


Fig. Schematic of the SCS switch at on-state

$$F_{restoring} = k \times (g - g_0)$$

displacement

- ϵ_0 : permittivity of air
- k : spring constant
- g : initial electrode gap
- g_0 : gap after contact= $0.5 \mu\text{m}$
- A : electrode area
- ϵ_d : permittivity of dielectric

그림 2.2 접촉 상태에서 복원력과 각 변수의 관계

본 연구에서는 연구 목표 중 하나인 군용 레이더의 송수신기 적용을 위하여 송수신기에서 가장 중요하게 요구하는 수용 가능 전력 10 W를 이겨낼 수 있는 복원력과 시스템에서 요구하는 적정 전압을 확정한 후 각 변수에 대한 설계 범위를 분석하여 최종적으로 구조체 설계를 완료하도록 한다.

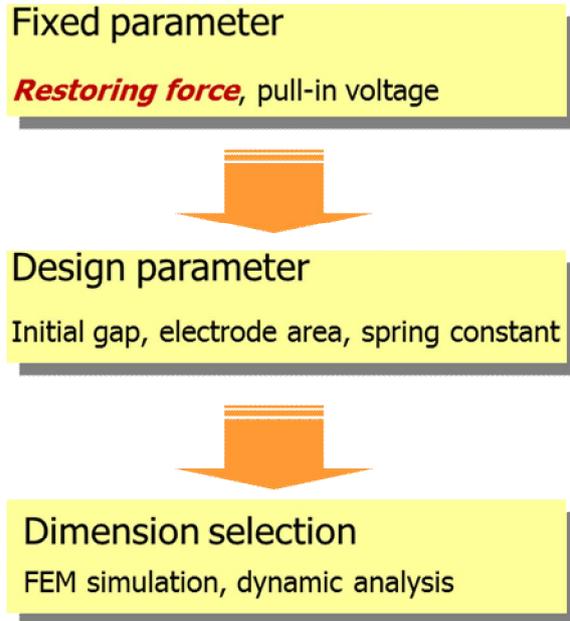


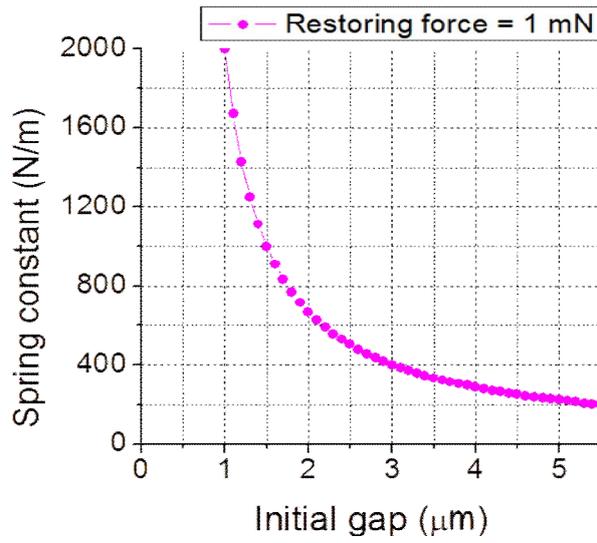
그림 2.3 구조체의 설계 흐름

2.1.2 구조체의 치수 설계

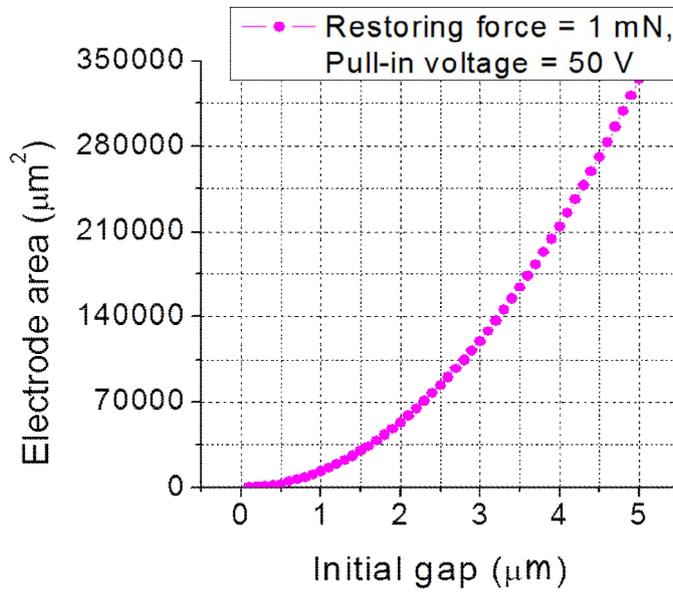
2004년에 발표된 논문의 보고에 의하면 MEMS 소자에서 금속끼리의 움 접촉이 반복적으로 일어난 후에는 접촉 후 점착에 의한 붙는 힘(adhesion force)이 발생하게 되는데 접촉 금속으로 금이 사용될 경우 발생하는 붙는 힘이 약 100~200 μN 정도인 것으로 분석하였다[35]. 본 연구에서 제안하는 스위치는 4개의 점 접촉이 이루어 지게 되므로 붙는 힘을 이겨내기 위해서는 최소 800 μN 이상의 복원력이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 금속끼리의 붙는 힘을 안정적으로 이겨내기 위하여 스위치가 1 mN의 복원력을 가지도록 할 필요가 있다.

스위치가 1 mN의 복원력을 가지기 위한 초기 간격과 스프링 상수의 관계는 그림 2.4 (a)의 그래프와 같이 정해지고 TRM 시스템의

요구 사항인 50 V의 풀인 전압을 가지기 위해서는 그림 2.4 (b) 와 같이 초기 간격에 의해 전극의 면적이 결정된다. 이때 초기간격이 작아질수록 스프링 상수는 커져 구조체의 안정성이 증가하는 동시에 스위치의 크기는 작아질 수 있고 이로 인해 동작 속도는 증가하게 되므로 작은 초기 간격이 작을 수록 이득임을 알 수 있다. 초기 간격이 2.5 μm 에서 1 μm 로 줄어들게 되면 스프링상수를 500 N에서 2000 N까지 약 4배 가량 증가시킬 수 있고 스위치 전극의 면적을 약 1/10로 줄일 수 가 있어 작은 크기의 구조체 설계가 가능하게 된다.



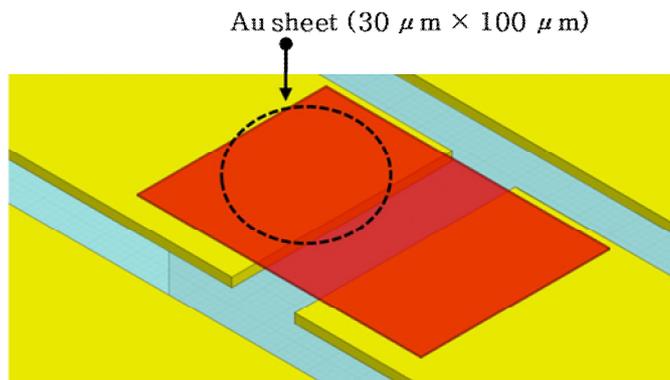
(a)



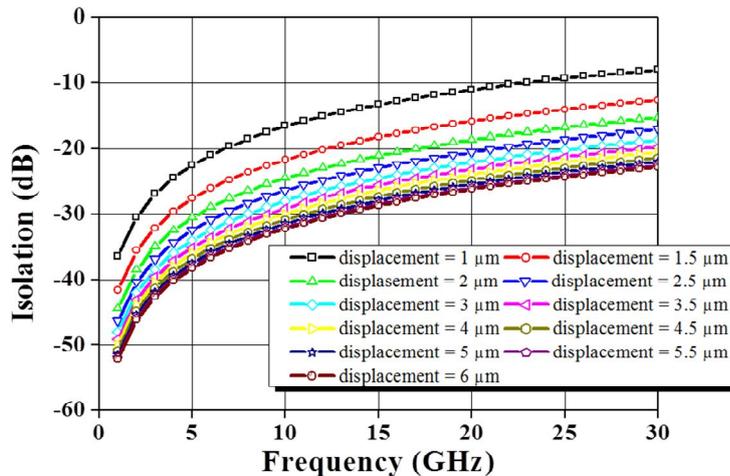
(b)

그림 2. 4 1 mN의 복원력과 50 V의 풀인 전압에 대한 초기 간격과 (a) 스프링 상수, (b) 전극 크기의 관계

하지만 초기 간격의 감소는 스위치의 중요 특성 중 하나인 격리도에 심각한 영향을 미치게 된다. 그림 2.5와 같이 개방된 신호선을 이어주는 접촉판의 크기가 $30\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 일 때 접촉판이 이동하는 거리와 격리도 사이에는 그림 2.6의 그래프와 같은 관계를 가진다. 접촉판이 신호선으로부터 $2\ \mu\text{m}$ 이하로 이격되어 있을 경우 20 GHz에서 20 dB 이하의 격리도를 갖게 되므로 신호격리가 완벽하게 이루어 지지 않게 된다.



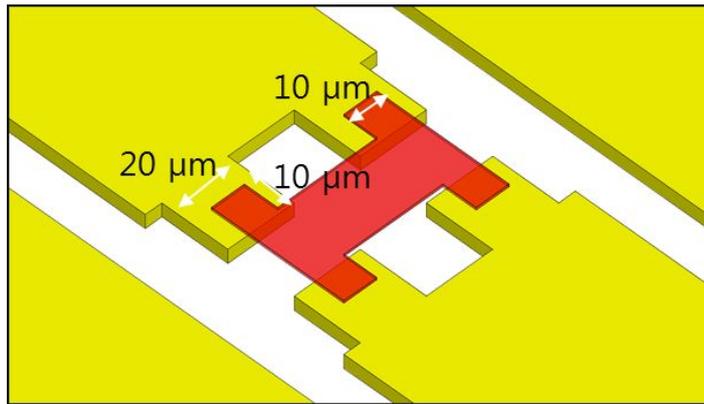
(a)



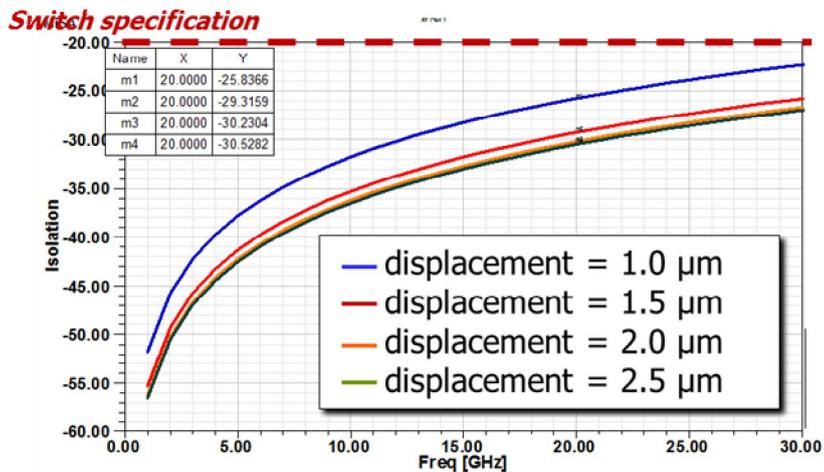
(b)

그림 2.5 (a) 접촉판과 신호선, (b)접촉판의 이동가능 거리에 따른 격리도 변화

이때 그림 2.6과 같이 접촉판과 신호선의 접합 면을 공정 가능한 영역까지 최소한으로 줄이게 되면 신호선으로부터 $1.0 \mu\text{m}$ 떨어진 거리에 접촉판이 위치해도 25 GHz까지 20 dB 이상의 높은 격리도 특성을 확보할 수 있게 되고 이를 통해 앞서 설명한 바와 같이 높은 스프링 상수를 가지면서 작은 크기의 스위치 설계가 가능하게 된다. 이때 스위치의 초기 간격은 접촉판의 두께와 절연막의 두께 그리고 접촉판의 위치가 합한 값이 된다.



(a)



(b)

그림 2.6 개량된 접촉판과 신호선, (b) 이동가능 거리와 격리도의 변화

그림 2.6과 같은 모양의 접촉판과 신호선의 접촉 부분을 적용하여 설계 가능한 초기간격의 범위를 그림 2.4의 두 그래프에 적용을 하면 그림 2.7 같이 나타낼 수 있다. 즉 스위치가 최소한의 초기 간격을 갖게 함으로서 구조체의 안정성을 최대화 하고 구조체의 크기를 최소화 할 수 있게 된다. 이에 앞서 선정된 1 mN의 복원력과 50 V의 풀인 전압을 적용시키면 스위치가 1.5 μm 의 최소 초기간격을 가질 때 1100 N/m의 스프링 상수와 38400 μm^2 크기의 전극을 최적 설계값으로 얻을 수 있다.

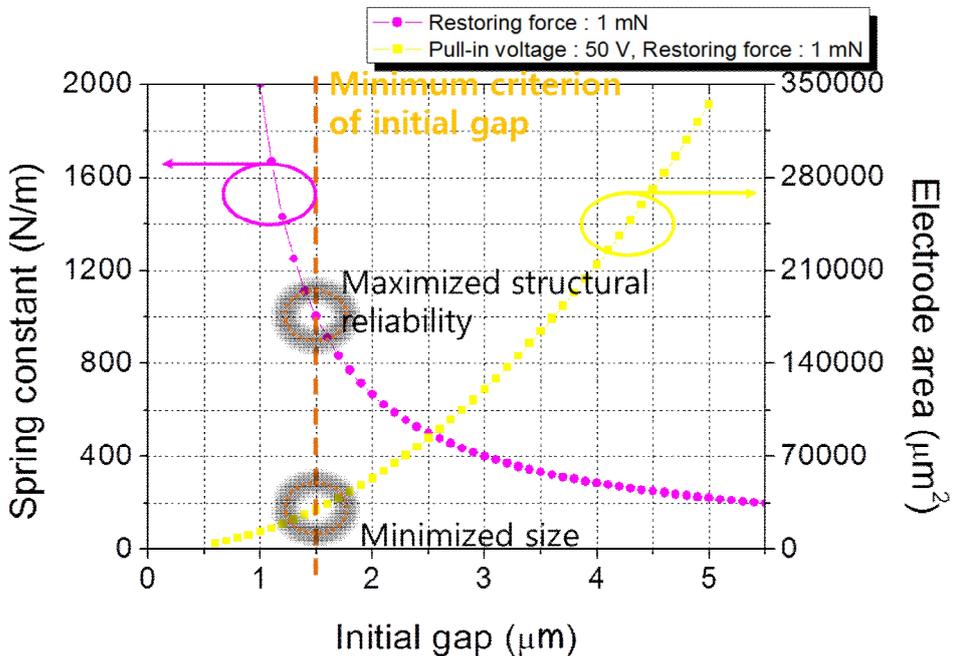


그림 2.7 설계 가능한 초기 간격의 범위

2007년에 발표한 김종만 박사의 졸업 논문을 참고로 하여 설계된 스위치 구조체의 모양과 1100 N/m의 스프링 상수와 38400 μm^2 의 전극 크기를 가지기 위한 스위치 구조체 각 치수를 그림 2.8과 표

2.1에 나타내었고 이때 사용한 계산방법을 표 2.2에 나타내었다[28].
각 치수를 확정된 결과 계산된 스위치 상수는 1102 N/m이고 이때의
풀인 전압은 약 46 V이며 예측된 복원력은 1.1 mN이다.

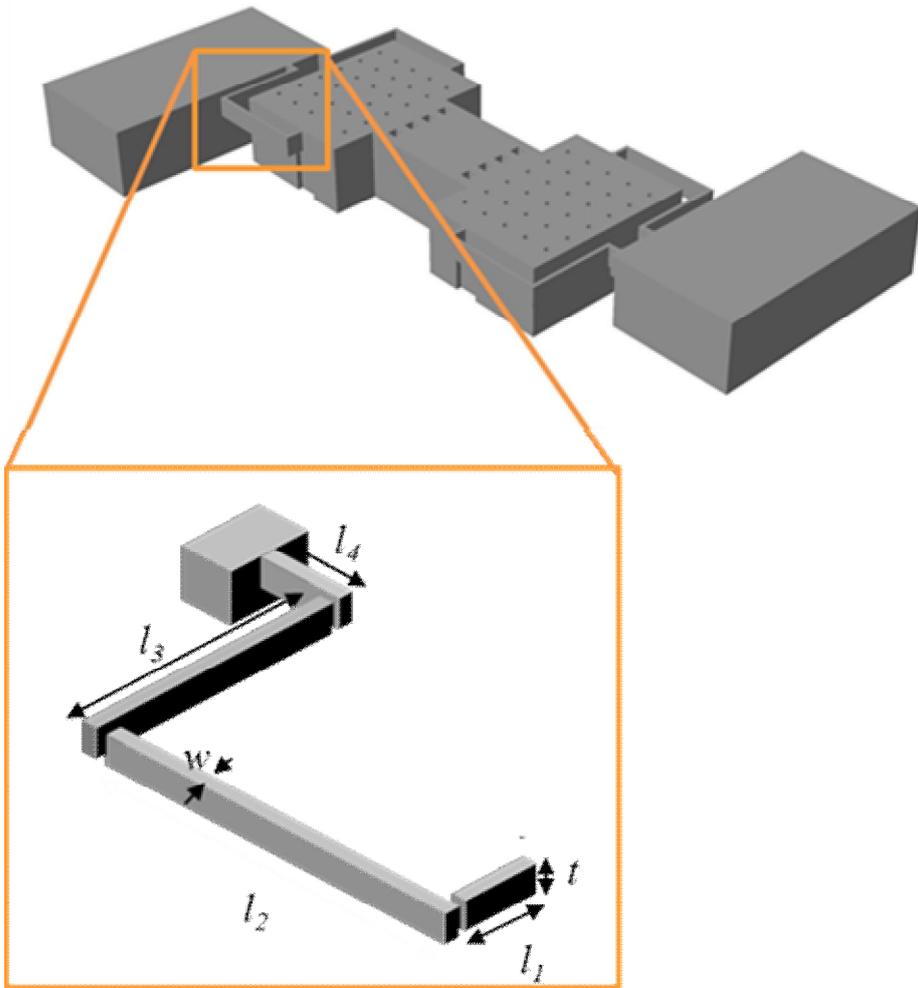


그림 2.8 제안하는 스위치 구조체의 모습과 스프링

표 2.1 RF MEMS 스위치 구조체의 설계 치수

Parameters		Design
Electrode area [μm^2]		$160 \times 120 \times 2$ $=38400 \mu\text{m}^2$
Initial gap [μm]		1.5
Membrane thickness [μm]		70
Spring thickness (t) [μm]		20
Spring width (w) [μm]		4
Spring length [μm]	l_1	10
	l_2	100
	l_3	75
	l_4	15
Spring constant [N/m]		1102.2
풀인 voltage [V]		46.2
Restoring force [mN]		1.1

설계치수의 검증을 위하여 FEM 시뮬레이션을 수행하였다. 설계한 스위치 구조체에 임의의 힘을 가해주고 구조체의 변이를 측정하여

스프링 상수를 계산해 내었다(그림 2.9). 그 결과 $1200 \mu\text{N}$ 의 힘을 주었을 때 약 $1.056 \mu\text{m}$ 의 변이가 관찰되었고 이에 의한 스프링 상수는 1131 N/m 으로 설계값에 근사한 값임을 확인하였다. 이 값에 의해 계산된 스위치의 풀인 전압은 47.1 V 로 설계치에 1 V 이하의 작은 오차를 가지는 값임을 확인하였다.

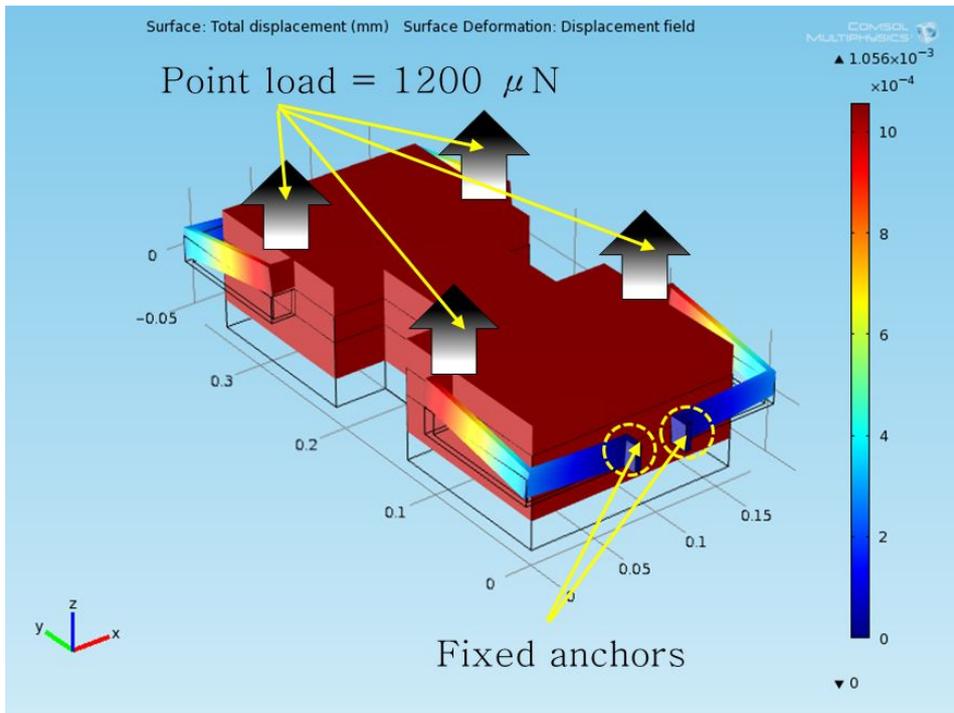


그림 2.9 구조체 해석을 위한 시뮬레이션 모델

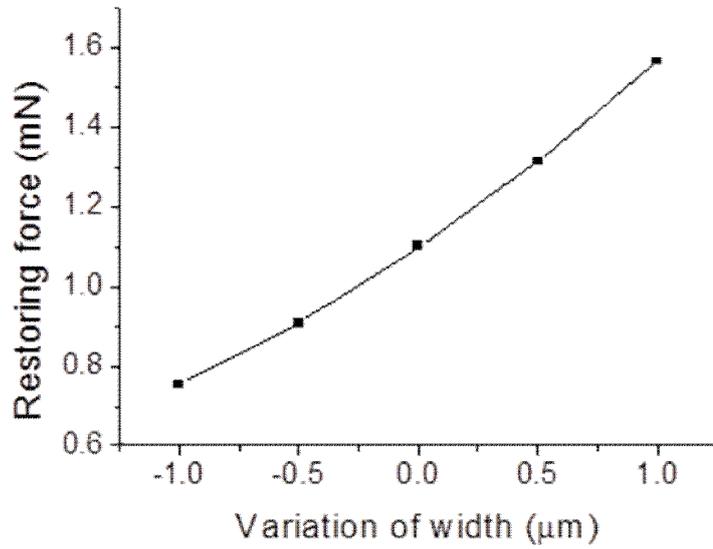
2.1.3 각 설계변수의 변화에 대한 스위치 성능 분석

MEMS 공정에서는 미세 패턴 형성 방법에 따라 작게는 $0.1 \mu\text{m}$ 에서 크게는 수 μm 단위의 공정 오차가 발생할 수 있다. 발생한 오차는 스위치의 성능에 거의 영향을 미치지 않을 수도 있지만 반대로 작은 오차가 큰 성능 변화를 야기 할 수도 있으므로 이에 대한 분석이 필요하다. 본 연구의 구조체 설계에서 정해진 치수를 기준으로 하여 공정에 의한 치수 변화가 발생하였을 때 구동 전압과 복원력 변화를

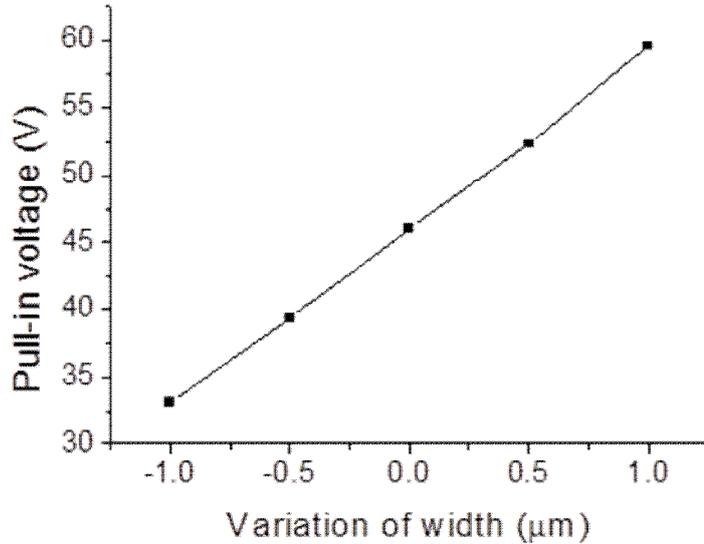
예측해 보고 문제점을 검토해 보도록 한다.

그림 2.10은 스프링의 폭의 변화량에 따른 스위치의 풀인 전압과 복원력의 변화를 나타내었다. 그래프 상에서 보면 1 μm 의 오차가 발생할 경우 10 V 이상의 풀인전압 변화와 0.5 mN 이상의 복원력 변화가 발생할 수 있지만 실제 스프링 제작에 사용되는 사진 공정과 식각 공정의 경우 평면 방향으로 $-0.2 \mu\text{m} \sim 0.2 \mu\text{m}$ 사이의 미세한 오차계 발생 하게 된다[36]. 이 경우 복원력의 변화를 예측해 보면 0.2 μm 의 변화가 발생하더라도 목표로 하는 1 mN 이상의 복원력을 확보할 수 있고 풀인 전압도 50 V 이하로 유지가 되는 것을 확인 할 수 있다. 특히 본 연구에서는 스프링의 두께를 정의하기 위해 사용하는 Az 5214 감광제의 공정조건을 엄격히 확립하여 공정에 대한 오차가 최소한이 되도록 노력하였다.

스프링 두께의 변화에 대한 스위치의 복원력과 풀인 전압 변화를 그림 2.11에 나타내었다. 스프링 두께에 대한 성능 변화가 민감한 것으로 나타났는데 2 μm 의 두께 변화가 일어날 경우 약 0.2 mN의 복원력이 변화하고 풀인 전압의 경우 약 4 V의 변화량을 나타내었다. 본 연구에서는 구조체의 두께 및 스프링의 두께를 정의하기 위하여 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정을 도입하여 1 μm 이내의 오차가 발생하도록 하여 성능의 변화를 최소화 하고자 한다.

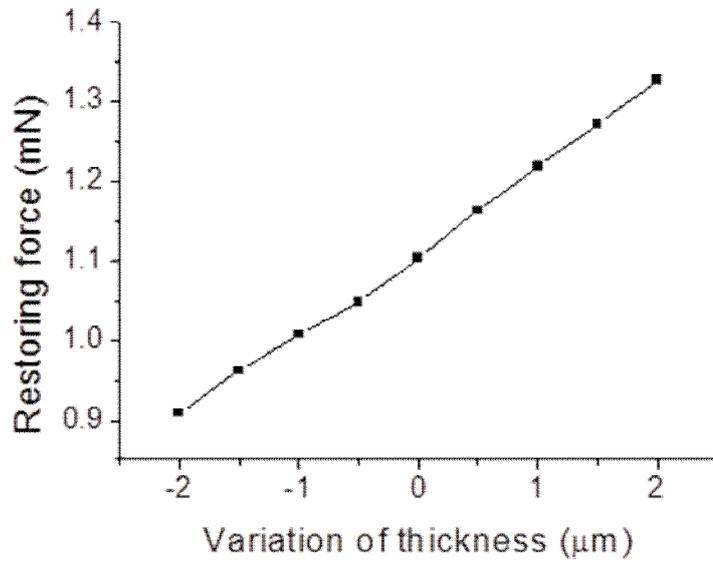


(a)

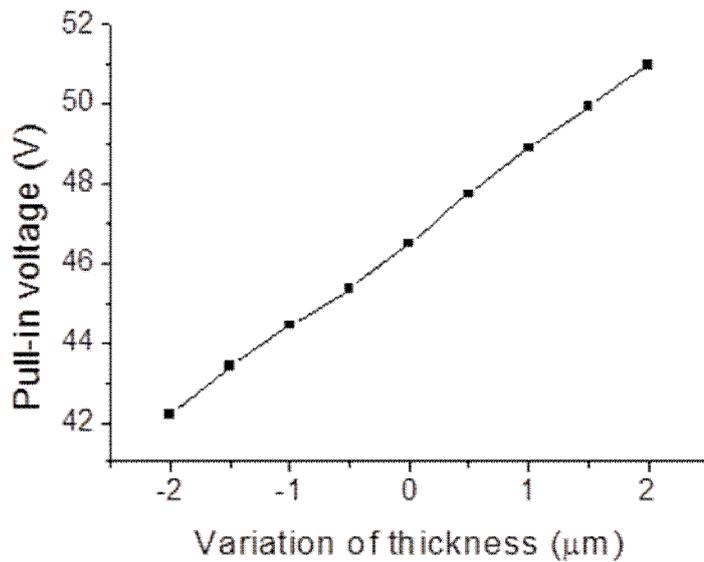


(b)

그림 2.10 스프링 폭의 변화에 따른 (a) 복원력과 (b) 풀인 전압의 변화



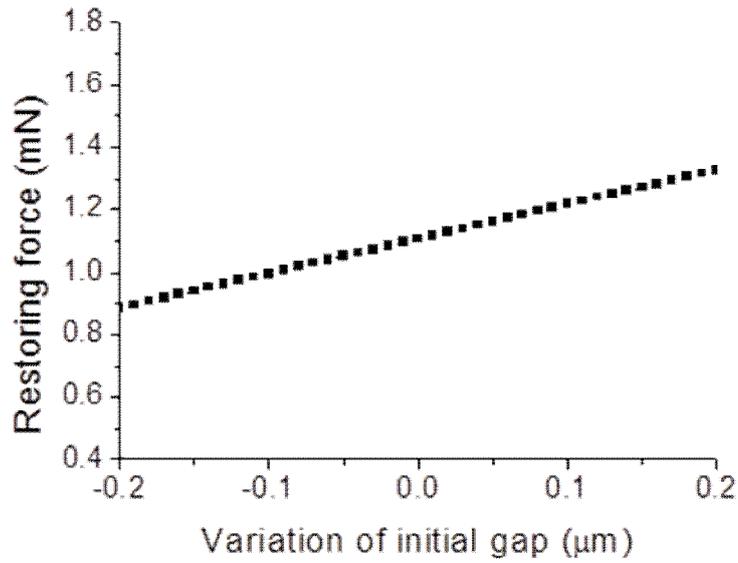
(a)



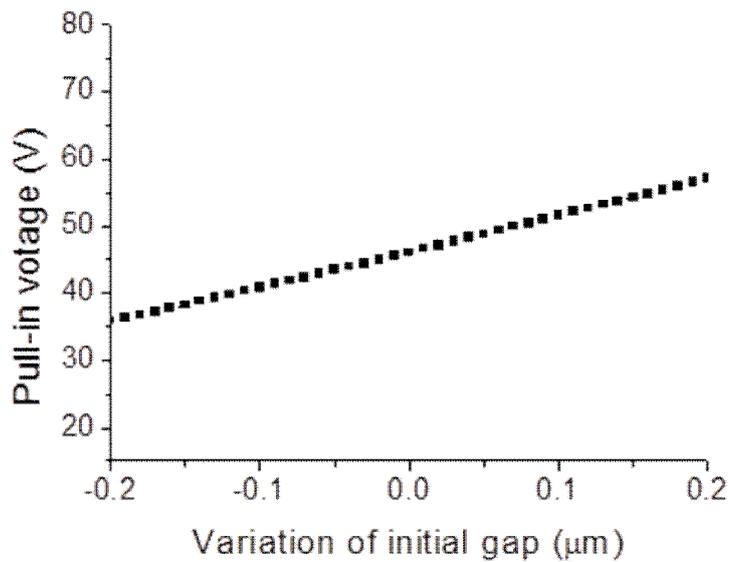
(b)

그림 2. 11 스프링의 두께의 변화에 따른 (a) 복원력과 (b) 풀인 전압 변화

그림 2.12는 스위치의 초기 간격의 변화에 따른 스위치의 풀인 전압과 복원력의 변화를 나타내었다. 복원력과 풀인 전압은 초기 간격의 변화에 매우 민감한데 설계치와 $0.2\ \mu\text{m}$ 의 오차만 나더라도 그래프에서 보는 바와 같이 복원력의 경우 $0.9\ \text{mN}$ 이하로 떨어지게 되고 풀인전압의 경우 $60\ \text{V}$ 가 넘게 된다. 본 연구의 설계 목표인 $1\ \text{mN}$ 이상의 복원력을 얻기 위해서는 설계치 보다 $0.1\ \mu\text{m}$ 이상 작아져서는 안되고 $50\ \text{V}$ 이하의 풀인 전압을 위해서는 설계치보다 $0.1\ \mu\text{m}$ 이상 간격이 증가해서도 안 된다는 것을 알 수 있다. 초기 간격은 실리콘의 식각 방법에 따라 제작 오차의 정도에 차이가 나타나는데 과거 실리콘 스위치의 제작에 사용한 건식 식각을 도입할 경우 오차가 $0.2\ \mu\text{m}$ 이상 발생하게 되므로 새로운 제작 방법이 필요하다[37]. 이에 본 연구에서는 초음파 진동을 동반한 습식 식각 방법을 도입하여 웨이퍼 전체에서 매우 균일한 식각 깊이를 얻고자 하였다. 이는 추후 3장의 공정 방법을 기술하며 다시 언급 하도록 한다.



(a)



(b)

그림 2.12 초기 간격의 변화에 따른 (a) 복원력과 (b) 풀인 전압의 변화

2.2 10 W 급 RF MEMS 스위치를 위한 접촉부분의 세부 설계

2.2.1 접촉부분 설계의 흐름

10 W 이상의 고전력 수용을 위해 RF 전력에 의해 발생하는 열에 대해 해석하고 열을 최소화 하기 위한 각 변수들을 설계한다. 이를 최종적으로 구조체에 적용하여 설계를 마무리 하였다.

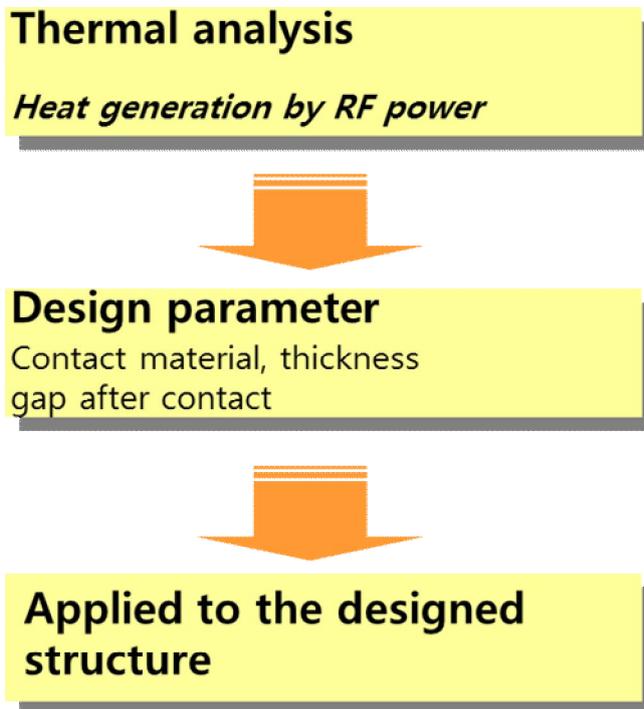


그림 2.13 접촉 부분 설계의 흐름

2.2.2 고전력에 의해 발생하는 열 해석

신호선에 고전력이 흐르게 되면 그림 2.14에서 보이는 스위치 접촉판에서 가장 높은 온도 증가가 일어나게 된다. 이때 발생하는 열이 금속의 softning point 아래가 되도록 해야 접촉금속의 열 변형을 예방할 수 있으므로 이를 예측하여 열 발생을 최소화 하여야 한다.

접촉판과 그 경계에서는 대류와 복사, 전도가 발생하게 되는데 이를 각각 분석하여 열 해석을 진행해야 한다[38].

뉴턴의 냉각 법칙에 의하면

$$\dot{Q}_{conv} = hA\Delta T$$

로 대류에 의한 열 전달을 모델링 할 수 있는데 Q 는 열 전달율(W)을 나타내고 h 는 대류에 의한 열 전달 계수(W/m²K)이며 A 는 대류에 노출되면 표면적을 나타낸다. 이때 대류에 의한 열 저항(K/W)을

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

로 정의할 수 있다.

반면 복사에 의한 열전달은 두 표면의 온도 차에 의해 아래와 같이

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon\sigma AF_{12}(T_{s1}^4 - T_{s2}^4)$$

로 정의 되는데 ϵ 는 표면 복사율을 σ 는 스테판-볼츠만(Stephan-Boltzman) 상수를 나타낸다. 또한 A 는 복사면적, F_{12} 는 표면1($s1$)에서 떠나 표면2($s2$)에 맞는 복사의 비율(Fraction of radiation)을 나타낸다.

전도에 의한 열 전달은 열 전도에 대한 푸리에의 법칙(Fourier's law of heat conduction)을 통해

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{\Delta T}{l}$$

로 표현되는데 k 는 열전도도(W/mK)이고 A 와 l 은 전도가 일어나는 물질의 단면적과 전도패스의 길이를 나타낸다. 대류에 의한 열 저항과 비슷한 방법으로 전도에 대한 열 저항을

$$R_{cond} = \frac{l}{kA}$$

로 나타낸다.

본 연구에서 제안하는 스위치 접촉판의 폭과 길이, 두께가 각각 60 μm , 60 μm , 3 μm 이고 사용하는 금속인 금의 k 값은 317 W/mK 이고 스위치 주위를 공기가 감싸고 있는 것으로 상정하여 h 는 40 W/m²K 으로 정해진다. 주어진 값들을 통해 전도와 대류에 의한 열 저항을 계산해 보면

$$R_{conv} = 6.94 \times 10^6 \text{ (K/W)}$$

$$R_{cond} = 1.05 \times 10^3 \text{ (K/W)}$$

로 전도에 비해 대류에 의한 열 저항이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

복사에 의한 열 전달율을 계산하기 위해 가장 많은 복사 전달이 가능한 경우로 가정하여 복사의 비율(F_{12})를 1로 하고 공기 중으로의 복사를 상정 하여 ϵ 는 0.03 의 값을 가지고 이때 공기의 온도를 방 온도 방 온도(room temperature)인 273 K 로 하였다. 접촉부의 온도 증가를 충분히 높은 값인 약 1000 K 로 가정하여 계산한 결과 복사에 의한 열 전달율은

$$\dot{Q} = 4.1 \times 10^{-5} \text{ (W)}$$

로서 매우 낮은 값을 갖는다. 즉 대류와 복사에 의한 열 전달은

매우 작으므로 무시 할 수 있다고 가정하는 것이 타당하고 따라서 접촉 부분의 열은 RF 전력으로 인한 줄 열이 주요 원인이라 가정할 수 있다. 이에 열전도가 일어나는 경로는 전류가 흘러가는 경로와 일치한다고 가정하고 해석을 진행하였다.

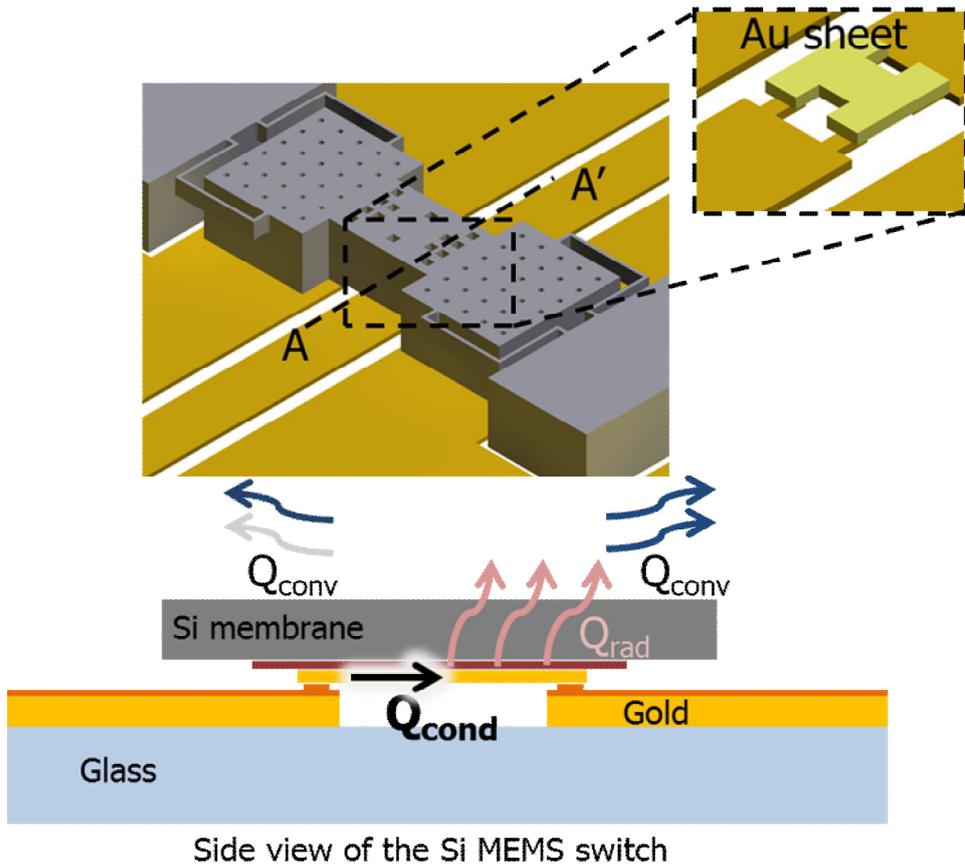


그림 2. 14 열 해석을 위한 스위치의 모델과 단면도

1967에 발표된 접촉 이론에 의하면 양단에 걸리는 전압에 의한 최고 온도에 대한 특성은 식 2.1과 같은 수식으로 표현될 수 있다[39].

$$T = \sqrt{\frac{V^2}{4L} + T_0^2} \quad (\text{식 2.1})$$

이 때 T_0 는 상온을 L 은 로렌츠 상수로서 $2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$ 의 값을 가진다.

입사되는 전력(P)은 전송선의 특성 임피던스(Z_0)와 전류(I_{rms})에 의해 식 2.3과 같이 표현되고

$$P = I_{rms}^2 Z_0 \quad (\text{식 2.3})$$

이때 흐르는 전류(I_{rms})와 저항(R)에 의해 판의 양단에 걸리는 전압(V_s)이 식 2.4와 같이 결정된다.

$$V_s = I_{rms} R \quad (\text{식 2.4})$$

저항(R)은 그림 2.15에서 볼 수 있는 바와 같이 신호선과의 접촉에 의해 발생하는 접촉저항(R_c)과 접촉판의 저항(R_s)의 합으로 표현되고

$$R = R_s + R_c \quad (\text{식 2.5})$$

식 2.3과 2.4의 정리를 통해 다음과 같이 판의 양단에 걸리는 전압을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s^2 = \frac{P \cdot R^2}{Z_0} \quad (\text{식 2.6})$$

식 2.5와 식 2.6을 식 2.1에 대입하여 정리하면 접촉판의 온도 증가를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \sqrt{\frac{P(R_s + R_c)^2}{4LZ_0} + T_0^2} \quad (\text{식 2.7})$$

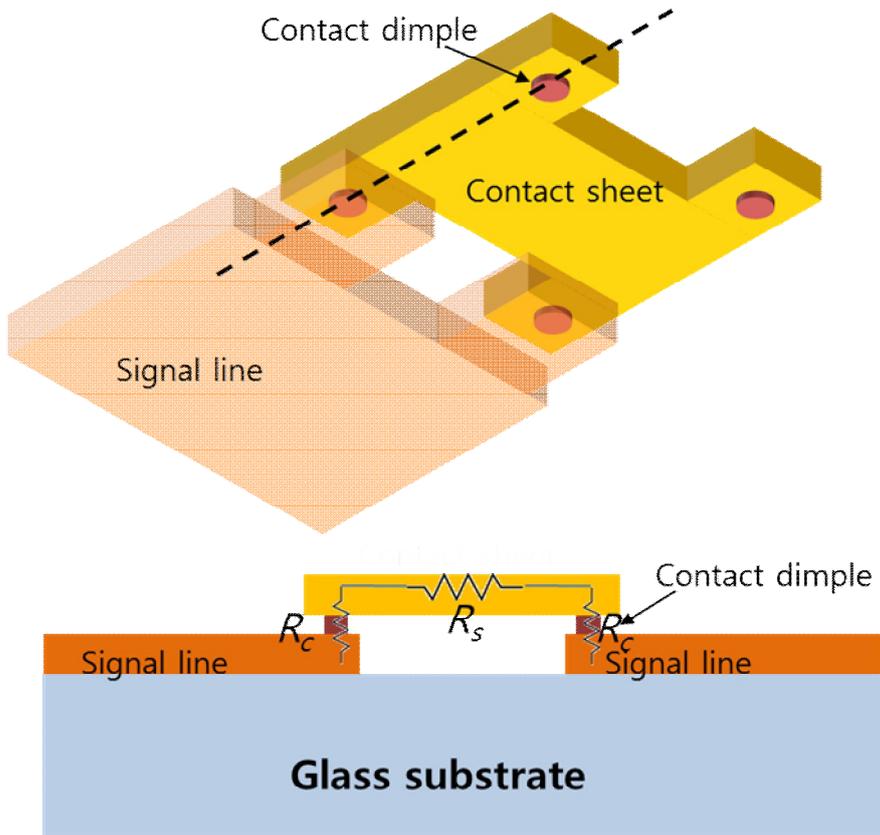


그림 2.15 신호선 저항의 요소

2.2.3 접촉 부분의 설계

스위치의 특성 임피던스를 일반적인 RF 시스템 적용을 위하여 50 Ω 으로 하면 결국 상승 온도가 식 2.6에 의해 접촉판의 저항과 접촉 저항에 의해 결정이 되게 된다.

접촉판의 경우 가로와 세로 방향으로는 CPW의 구조를 따라가야 하므로 변화가 불가능하다. 따라서 그 크기를 고정 시키고 두께 변화에 대한 AC 저항의 변화를 계산하고(그림 2.16) 식 2.7을 이용하여 온도 상승을 예측해 보았다. 접촉판의 두께가 증가하면 그에 따라 저항의 값이 감소 하지만 3 μm 이상이 되면 접촉저항이 약 0.06 Ω 이 되고 그 이상으로 두께를 증가 하여도 저항의 감소가 확연히 줄어 드는 것을 확인 할 수 있다.

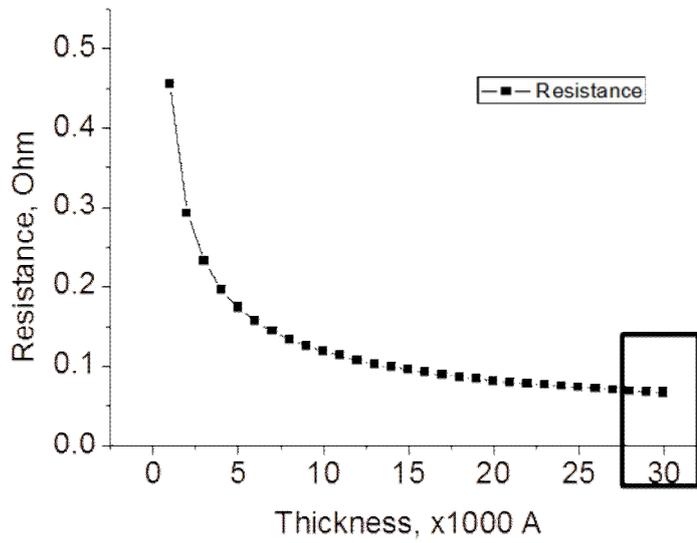
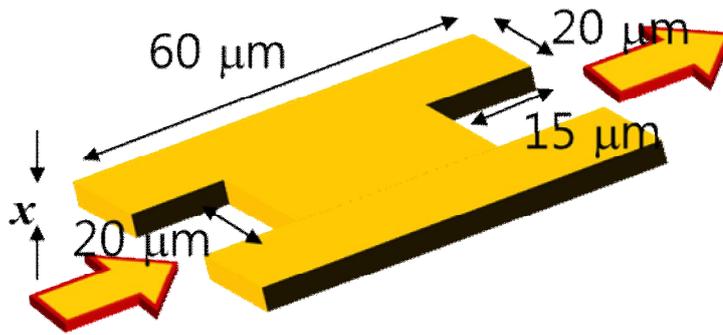


그림 2.16 접촉 판의 두께에 따른 AC 저항

그림 2.17와 같이 각 입력 전력에 대해 접촉 저항이 0.5 Ω 일 때 접촉판의 두께에 따른 온도 증가를 확인 해 보면 판의 두께가 0.3 μm 에서 3 μm 로 증가 할 경우 140 K 이상의 온도상승을 억제 할 수 있게 된다.

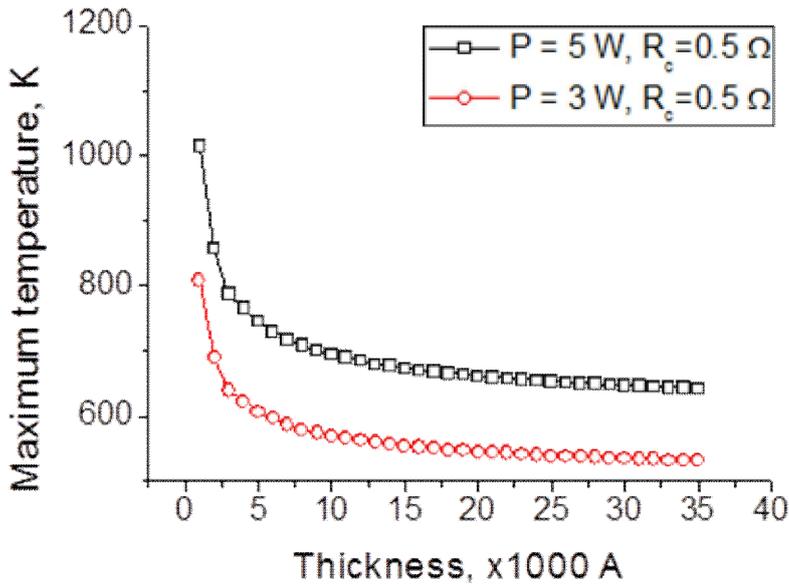


그림 2.17 접촉 판의 두께에 따른 온도증가의 변화

하지만 판의 두께를 늘려 판에 의한 저항을 최소화 한다고 해도 3 W 이상의 전력이 가해지면 접촉저항의 영향으로 인해 높은 열이 발생 하게 되는데 이를 그림 2.18에 나타내었다. 그림에서와 같이 접촉 저항이 0.1 Ω 이하가 되더라도 10 W의 전력이 가해지게 되면 접촉 부분의 물질로 사용되는 금의 softening point 이상으로 온도 증가가 일어나게 되어 금속의 변형을 야기하게 된다. 즉 이를 극복하기 위하여 지금까지 사용해 왔던 금 이외의 금속이 접촉 물질의 재료로서 필요하다고 할 수 있다.

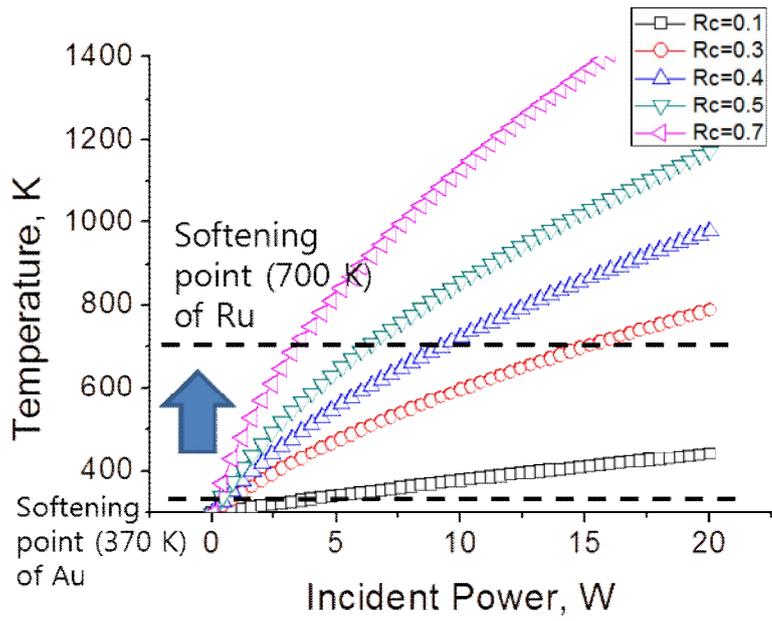


그림 2.18 접촉 저항과 입력 전력에 따른 온도 증가의 변화

이 때 스위치의 접촉 부분과 CPW의 물질로서 금 이외의 금속을 사용할 경우 도전성의 감소로 인해 스위치의 손실 증가를 초래하게 되므로 본 연구에서는 그림 2.19과 같이 금 위에 녹는 점이 높은 금속을 적층시키는 구조를 제안하였다. 이를 통해 CPW의 도전성을 금과 같이 유지하면서 접촉면에는 열에 강한 금속을 적용함으로써 보다 고 전력에 견딜 수 있게 된다.

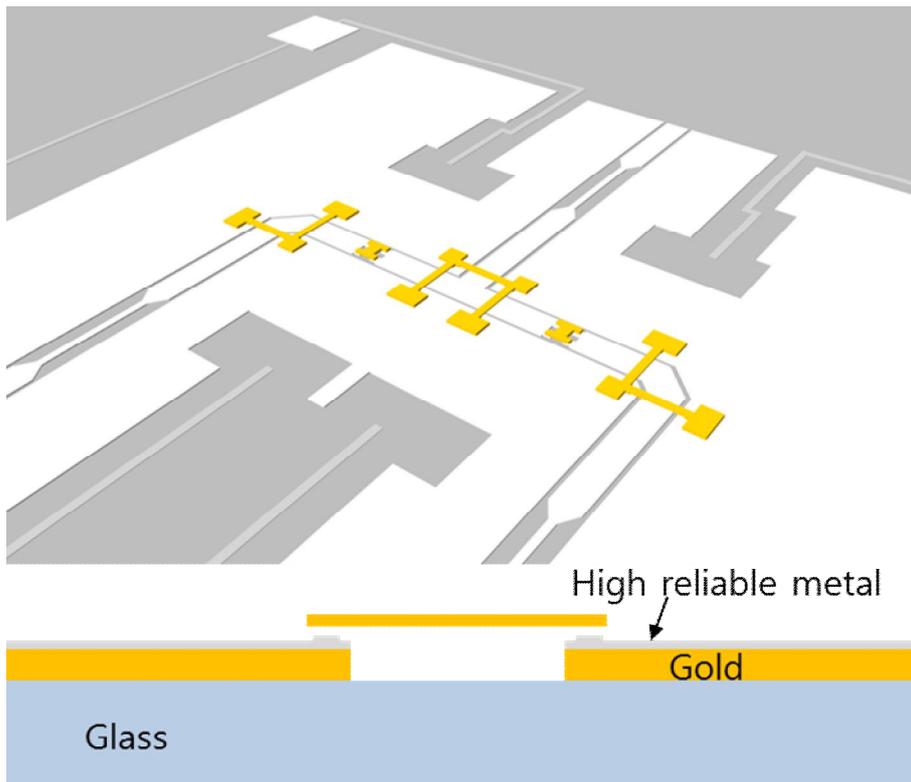


그림 2.19 적층 신호선의 개략도와 단면도

금 위에 적층시키는 금속을 결정하기 위하여 백금 군에 속하는 금속인 루테튬, 로듐, 백금에 대해 면 저항과 녹는점, softening point를 비교해 보았다.

면 저항을 비교하기 위하여 그림 2.20처럼 대조군으로 실리콘 기판 위에 도금 방법을 통하여 금을 3 μm 증착 하였고(#1) 각 실험군으로 루테튬(#2)과 로듐(#3) 그리고 백금(#4)을 금 위에 0.3 μm 증착 하였다.



그림 2. 20 면 저항 측정을 위한 샘플의 구성

4 인치 웨이퍼 상의 위, 아래, 좌, 우, 그리고 중앙의 각각 5개 샘플을 선택하여 면저항을 측정하였고 그 결과를 그림 2.21에 나타내었다. 대조군에서 가장 높은 저항이 측정 되었는데 이는 금속의 두께가 가장 낮은 것이 원인이라 할 수 있고 실험군에서는 루테튬이 가장 낮은 저항을 나타내는 것으로 확인되었다.

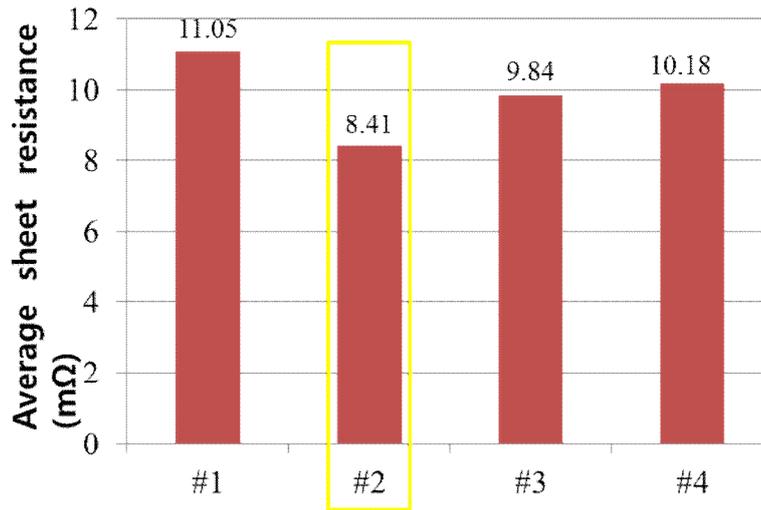


그림 2. 21 각 샘플의 면 저항 측정 결과그림

표 2.2과 같이 각 금속의 녹는 점과 softening point를 비교해 보면 루테튬이 가장 높은 온도를 보이므로 본 연구에서는 루테튬을 적층 금속으로 선택 하였다.

표 2. 2 금, 루테튬, 로듐, 백금의 녹는 점과 softening point

	Au	Ru	Rh	Pt
Melting point (K)	1337	2523	2239	2045
Softening point (K)	370	700	~ 600	540

루테늄을 적층 금속으로 적용할 경우 입사하는 전력에 대한 온도 상승을 분석해 보면 그림 2.22와 같다. 접촉 저항이 0.4 Ω 이하가 되면 10 W의 전력이 흘러도 루테늄의 softening point 이하로 온도가 상승하므로 전력에 의해 발생하는 열을 견딜 수 있게 된다.

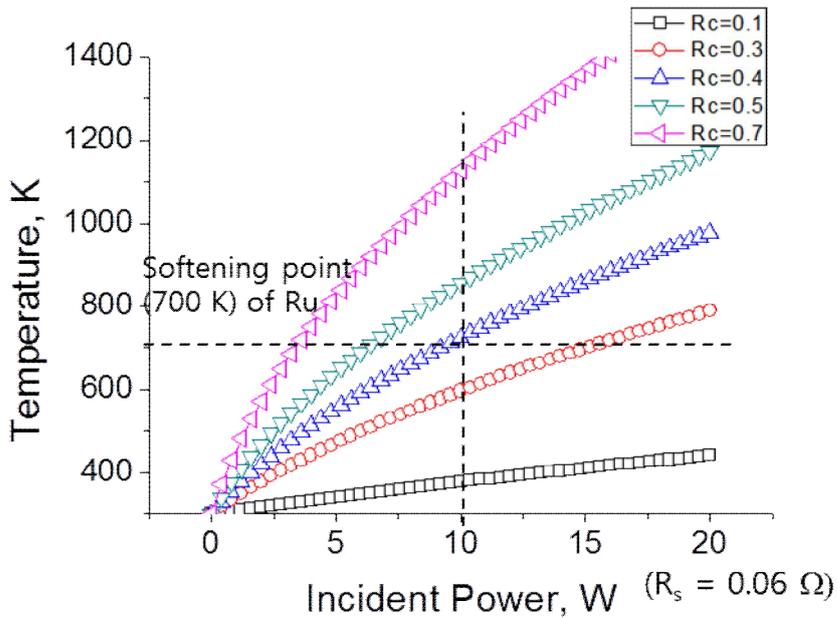


그림 2.22 루테늄 적용 후의 온도 상승그림

이때 접촉 물질의 변화 없이 저항을 줄이기 위해서는 다음 그래프(그림 2.23)와 같이 접촉력을 높여야 한다. 1998년에 보고된 연구에 의하면 금과 루테늄이 접촉할 경우 최소의 접촉 저항을 얻기 위해서는 그림 2.20과 같이 약 1 mN의 힘이 필요하다는 것을 알 수 있다[35].

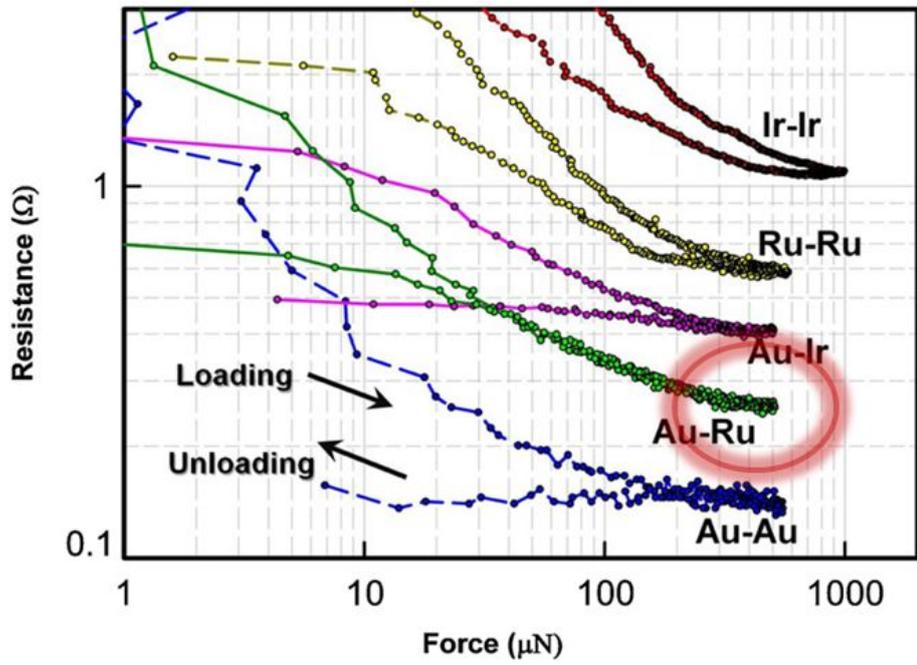


그림 2. 23 각 금속 접촉에 대한 접촉력과 저항의 관계

앞서 설계한 방법대로 접촉판의 저항을 낮추기 위해 그 두께가 두꺼워지면 그림 2. 24 (a)와 같이 접촉 후 전극간의 거리가 멀어져 접촉력이 매우 작아지게 된다. 이를 해결하기 위하여 그림 2.24 (b)와 같이 구조적 변화를 통해 극복 하도록 제안 하였다. 실리콘 구조체 안에 공동을 형성하고 그 안에 접촉 금속을 채워 넣어 접촉 후 간격을 최소화 하여서 접촉력을 비약적으로 상승 시킬 수 있게 된다.

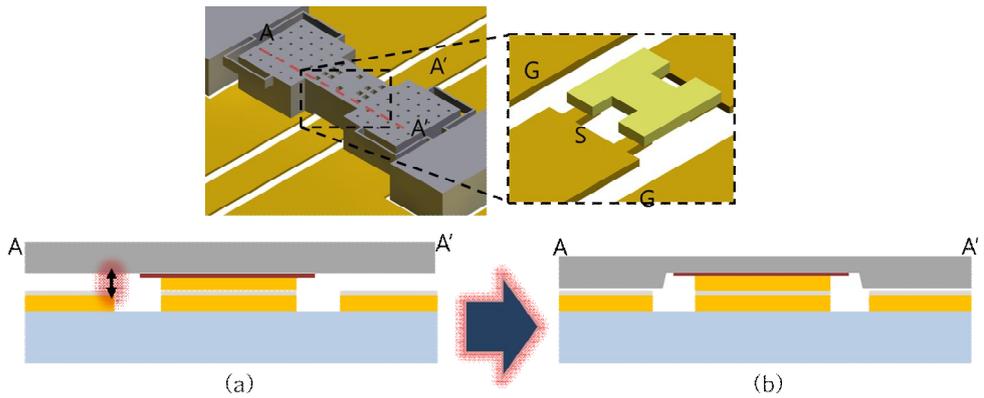


그림 2. 24 접촉력을 최대화 하기 위한 구조체의 개선안

개선된 구조체를 바탕으로 인가하는 전압에 따른 접촉력의 변화를 그림 2.25에 나타내었다. 접촉 후 전극간의 거리를 $0.2 \mu\text{m}$ 까지 줄일 경우 50 V 의 전압만으로 스위치를 구동 시켜도 10 mN 이상의 큰 힘을 얻을 수 있어 충분히 낮은 접촉 저항을 갖게 된다.

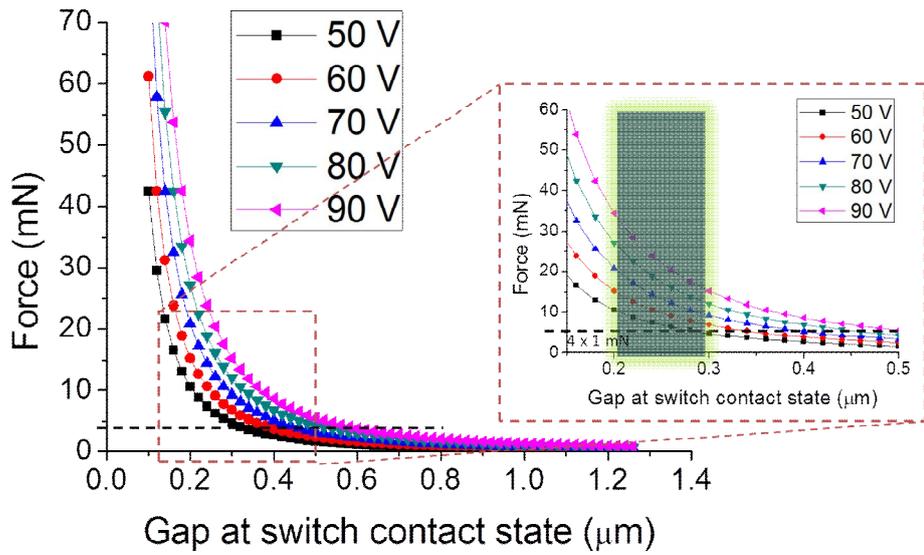


그림 2. 25 스위치 접촉 후 전극의 간격과 접촉력의 관계

설계를 반영하여 인가하는 전력에 따른 온도 상승을 그림 2.26과 같이 예측할 수 있다. 약 15 W의 전력이 인가 되더라도 접촉부분의 온도가 루테튬의 softening point인 700 K를 넘지 않아 고전력 허용이 가능 할 것으로 기대된다.

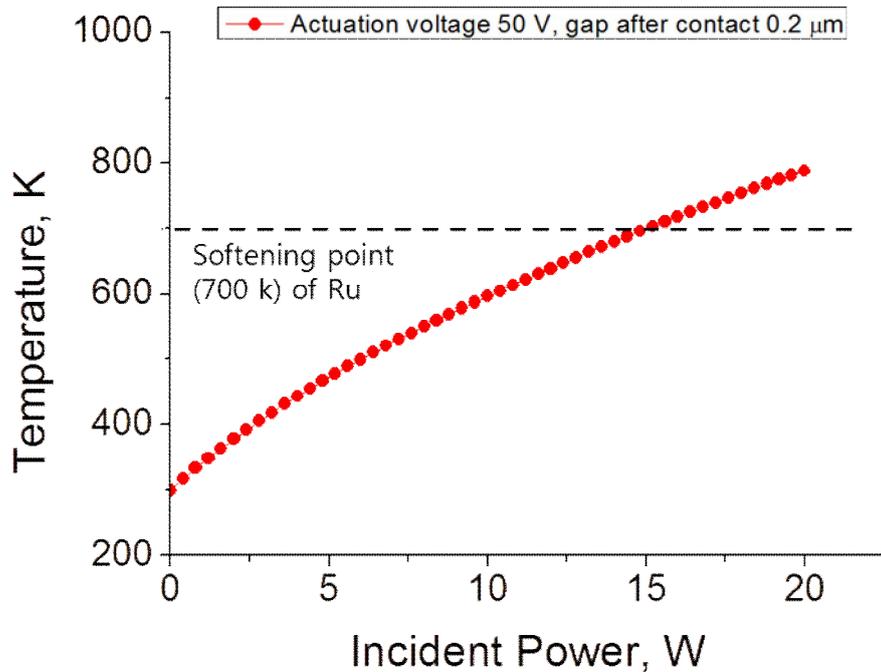


그림 2. 26 최종 설계를 반영하였을 때의 입력 전력에 대한 온도 상승 변화

2.3 설계된 소자의 RF 시뮬레이션

설계한 스위치의 RF 해석을 Ansoft 社의 HFSS 시뮬레이터를 이용하여 수행하였다. 수행한 모델은 그림 2.27와 같고 그 결과를 그림 2.28에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 스위치가 닫힌 상태일 때 18 GHz까지 0.31 dB 이하의 삽입손실을 나타내었고 20 dB 이상의 반사도를 나타내었다. 이 때 스위치가 열린 방향으로 신호선으로는 30 dB이상의 높은 격리도를 나타내어 설계된 소자가 스위치로서 적합한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

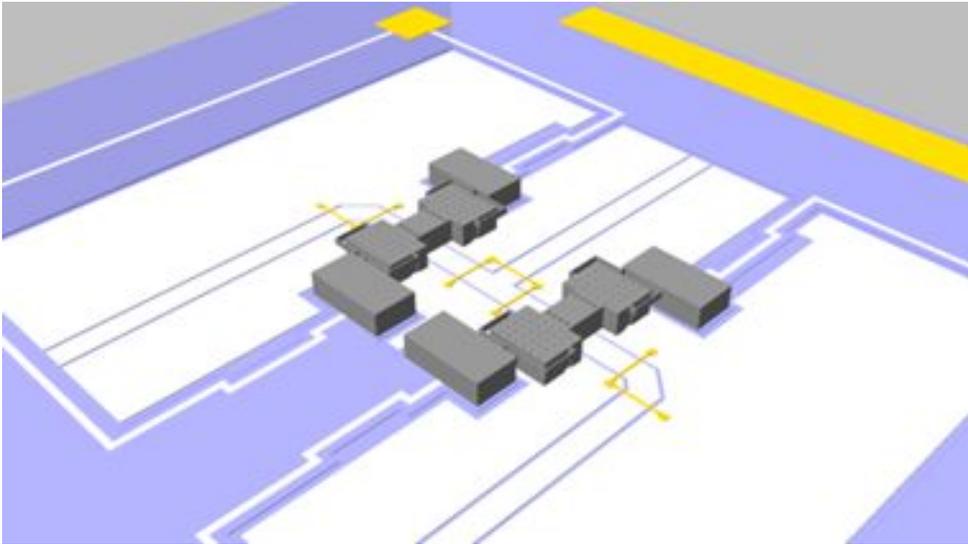
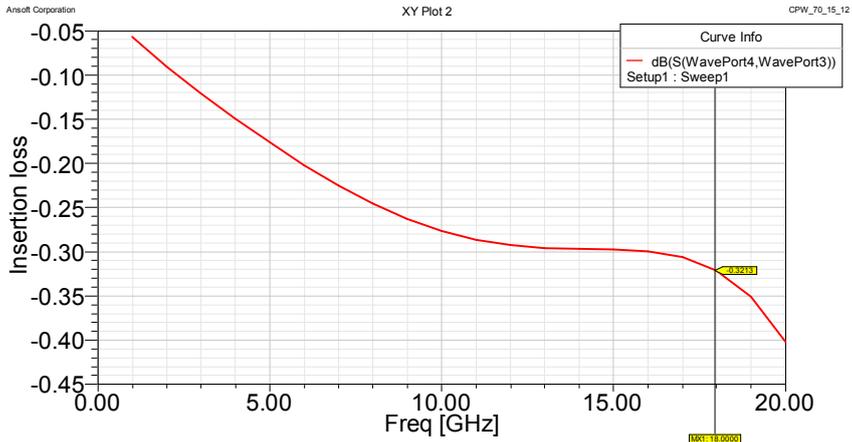
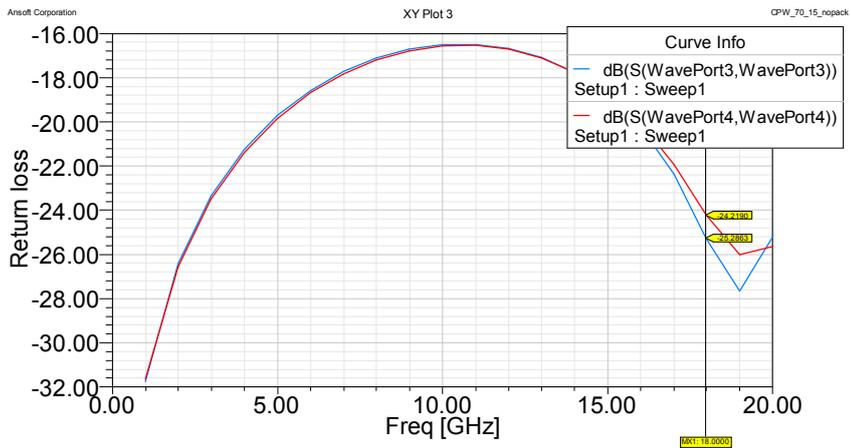


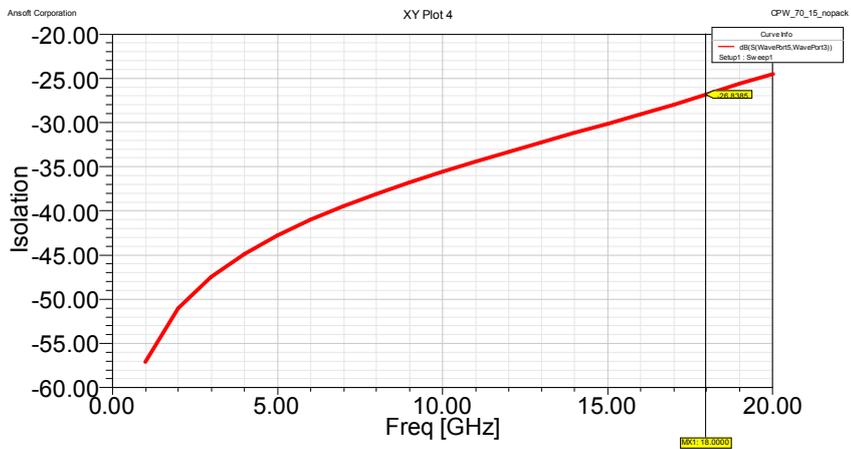
그림 2. 27 RF 시뮬레이션을 위한 스위치 모델



(a)



(b)



(c)

그림 2. 28 RF 시뮬레이션 결과 : (a)삽입손실, (b)반사도, (c)격리도

제 3 장 10 W 급 RF MEMS 스위치의 제작

3.1 10 W 급 RF MEMS 스위치의 제작 과정

3.1.1 하부 유리기판의 제작 과정

그림 3.1은 SPDT(Single Pole Double Throw) 형태의 RF MEMS 스위치의 유리 기판 쪽 제작 과정을 보여준다. 유리 기판의 공정은 바이어스 선을 형성하는 것으로 시작한다. 이를 위해 먼저 유리 기판(Pyrex™ 7440) 위에 1.4 μm 의 두께를 갖는 감광제(AZ5214)를 도포하고 사진 공정 기법을 이용하여 리프트 오프(Lift-off) 공정을 위한 틀을 형성한다. 표 3.1에 AZ5214 감광제의 사진공정 방법을 나타내었다. 틀 위에 열 증착(Thermal evaporation) 방법을 사용하여 20 nm 두께의 크롬과 0.2 μm 두께의 금, 그리고 20 nm의 루테튬을 차례로 증착한 후 아세톤을 이용하여 원하는 패턴만 남기고 나머지를 제거하는 리프트 오프(lift-off) 공정을 이용한다. (그림 3. 1(b)). 본 연구에서 제안하는 SPDT 형태의 스위치는 2개의 단위 스위치를 사용하며, 각 스위치에 구동 전압을 인가하기 위해서 각각 개별적인 바이어스 선을 형성한다. 이렇게 개별적으로 형성된 바이어스 선은 추후 실리콘과 유리 기판 접합 시 일부가 실리콘에 물리면서 접합되어 외부 패드로부터 인가된 전압을 실리콘 구조물 쪽으로 전달해주는 역할을 한다. 또한 이 과정에서 접촉 부분의 덤플을 미리 형성하여 제작 후 스위치 접촉이 원활하게 이루어 질 수 있도록 유도 하였다.

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 st exposure		Low vacuum contact / 25 mW/s 5 sec
PEB (Post Exposure Bake)		95 ° C @ Hot plate / 3 min 30 sec
2 nd exposure		Flood exposure / 25 mW/s 18 sec
Develop		6:1 AZ 300 MIF immersion / 2 min
Resulting Thickness		1.4 ~ 1.6 μm

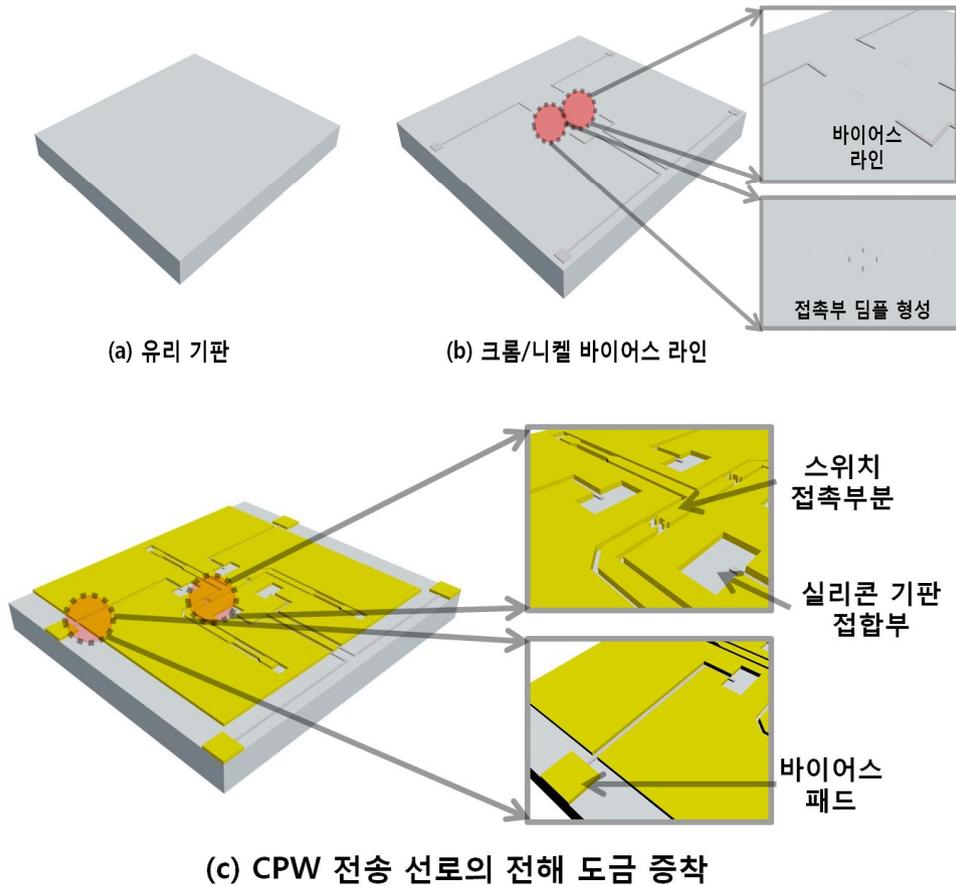


그림 3. 1 스위치의 유리 기판 제작 과정

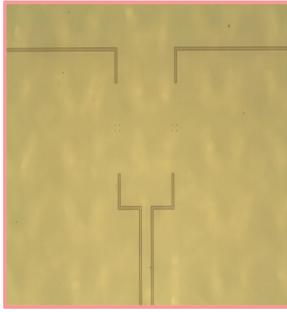
제작된 뒨플 위에 전송선으로 이용되는 CPW (Coplanar waveguide)를 형성한다. CPW는 앞서 기술한 방법과 같은 리프트 오프 공정을 통해 형성한다. 2장에서 기술한 바와 같이 1 μm 두께의 금과 0.15 μm 두께의 루테튬 적층을 CPW 금속으로 사용한다. 이때 리프트 오프 공정을 위해 Az계열의 감광제를 사용할 경우 루테튬 증착 시 발생하는 열에 의해 감광제가 갈라지는 현상이 발생하므로 열에 강한 JSR THB 111N을 사용하였다. 약 8 μm 이상의 높이로 형성되는 JSR THB 111N 감광제는 열에 의해 표면 갈라짐이 발생하더라도 유리 기판

면까지 의도하지 않은 금속이 증착되는 것을 막아 준다. 그러나 JSR THB 111N 감광제는 기본적으로 유리기판 위에서 접착력이 높지 않아 벗겨지기 쉬운데 110 도의 고온 위에 4분 30초간 열 처리를 하여 접착력을 높이고자 하였다. 자세한 JSR THB 111N의 사진공정 방법을 표 3.2에 나타내었다.

표 3.2 JSR THB 111N Negative tone 공정 조건

Step		JSR THB 111N Negative tone
Spin coating	Low spin	300 rpm / 10 sec
	High spin	2000 rpm / 40 sec
Soft-bake		110 ° C @ Hot plate / 4 min 30 sec
Exposure		Hard contact / 25 mW/s 20 sec
Develop		DVL-2000 immersion / 5min 30 sec
Resulting Thickness		9 ~ 10 μm

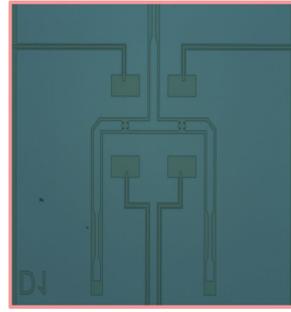
감광제(JSR THB 111N) 틀은 전용 식각액인 STR-1000을 이용하여 제거한다. 이때 루테늄 금속에 의해 감싸진 틀은 전용 식각액에서도 잘 제거가 되지 않지만 80℃로 가열된 STR-1000 용액에 약 3시간 동안 넣어 놓은 후에 초음파 세척을 함으로서 말끔히 제거하여 CPW 형성을 그림 3.2와 같이 마무리 하였다.



(a) 크롬/니켈 바이어스 라인의 제작 결과



(b) 접촉 딥플의 확대 사진



(c) CPW 전송 선로의 전해도금 결과

그림 3. 2 CPW 전송선의 제작 후 사진

제작된 CPW 위에 접지면 사이를 이어주기 위한 공중 다리(air bridge)를 형성한다. 본 연구에서 제안한 SPDT의 CPW처럼 꺾어진 형태의 신호선을 가질 경우 꺾어진 부분에서 발생하는 공진에 의해 신호 손실이 발생하게 된다. 공진이 사라지도록 하기 위해서는 꺾어진 부분에서 접지 사이를 이어 줌으로써 신호의 경로차를 없애 줄 필요가 있다. 공중 다리 제작을 위해 $3\ \mu\text{m}$ 두께의 희생층을 형성하고 씨앗층 증착 후 틀을 형성하여 도금 공정을 통해 패터닝 한다. 희생층과 틀로 Az4330 감광제를 이용하였고 도금 공정을 위해 크롬과 금(크롬 : 금 = $200\ \text{nm} : 2000\ \text{nm}$) 씨앗층을 희생층 위에 열 증착 하였다. 틀로 사용된 Az 4330 감광제는 아세톤에 의해 쉽게 제거가 되는 반면 희생층으로 이용된 감광제는 씨앗층의 보호를 받으므로 씨앗층 제거 후 다시 제거 되어야 한다. 틀로 사용된 감광제 제거 후 씨앗 층으로 사용된 금과 크롬을 습식 식각과 건식 식각을 이용하여 제거한다. 씨앗 층에 있는 금의 경우 습식 식각을 하더라도 CPW를 형성하는 금에 큰 영향을 주지 않지만 크롬의 경우 습식 식각을 이용하여 제거 할 경우 모세관 현상으로 과도한 식각이 일어나 CPW의 들뜸이 발생 할 수 있다.

이를 방지하기 위해 이방성 식각이 가능한 플라즈마를 이용하여 크롬을 제거한다. 크롬 층의 건식 식각에는 Oxford 社의 Plasmalab 80 Plus 장비를 이용하였다. 식각은 0.075 torr의 분위기에서 산소(O₂) 20 sccm, 염소(Cl₂) 20 sccm를 주입하며 5분 동안 플라즈마를 인가하여 진행하였으며, 플라즈마를 형성하는 RF 전력은 150 W로 조절하였다(표 3.3). 씨앗층 제거 후 공중다리를 띄우기 위한 희생층을 제거한다. 이때 아세톤을 이용하여 제거할 경우 모세관력에 의해 공중다리가 신호선에 붙어버리는 문제가 발생 할 수 있으므로 플라즈마를 이용한 건식 식각으로 제거한다. 본 연구에서는 Plasma ashing을 통해 희생층을 제거하였고 그 조건을 표 3.5에 나타내었다. 이를 통해 제작된 CPW 의 현미경 사진을 그림 3.3에 나타내었다. 제작 결과 공중다리가 잘 형성되어 있고 신호선이나 바이어스선이 변형 없이 잘 정의되어 있음을 알 수 있다.

표 3.3 크롬을 제거하기 위한 건식 식각 조건

Dry etching	Condition
Gas [sccm]	O ₂ : 20 / Cl ₂ : 20
Degree of vacuum [torr]	0.075
RF power [W]	150
Process time [min]	5
Etch rate [Å/min]	> 40

표 3. 4 AZ 4330 Positive tone 공정 조건

Step		AZ 4330 Positive tone
Spin coating	Low spin	500 rpm / 5 sec
	High spin	4000 rpm / 35 sec
Soft-bake		110 ° C @ Hot plate / 60 sec
Exposure		Hard contact / 28 mW/s 20 sec
Develop		AZ 300 MIF i μ mersion / 3min 30 sec
Resulting Thickness		3.6 ~ 3.8 μ m

표 3.5 희생층 제거를 위한 Plasma ashing 공정 조건

Dry etching	Condition
Gas [sccm]	700
RF power [W]	800
Process time [min]	2
Etch rate [$\text{\AA}/\text{min}$]	> 40

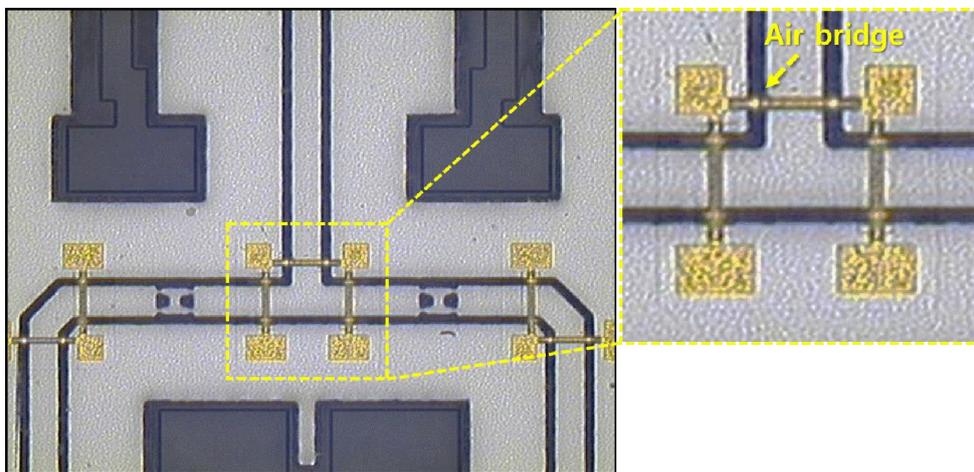


그림 3.3 유리 기판의 제작 결과

3.1.2 상부 실리콘 기판의 제작 과정

그림 3.4에서 볼 수 있듯이, 실리콘 기판 쪽의 공정은 실리콘을 식각하여 두 층의 단차를 만드는 과정으로 시작한다. 이를 위해 두 번의 식각 공정이 진행되며, 두 번의 식각 모두 실리콘 기판 중 선택적인

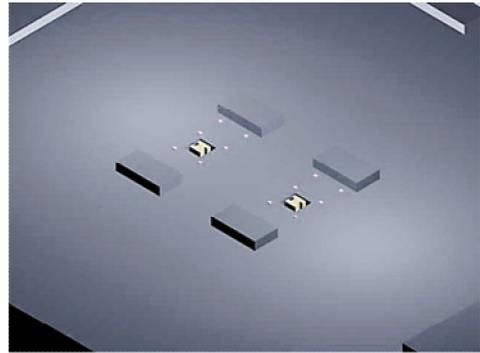
부분만을 식각하기 위해 식각 마스크를 각각 제작하였다. 스위치의 균일한 동작 특성을 위해 이 단차들이 정확하게 형성되어야 하므로, 두 번의 식각 모두 시간에 따른 식각으로 정확한 단차 조절이 가능한 KOH 이방성 습식 식각 방법을 이용하였다. 먼저 식각 마스크를 제작하기 위해 1.4 μm 의 두께를 갖는 감광제(AZ5214)를 실리콘 기판에 도포한 뒤, 사진 공정을 통해 열 증착(Thermal evaporation) 과정에서 마스크 물질이 증착될 부분을 정의한다. 도포된 감광제가 남아있는 부분 위에 증착된 마스크 물질은 감광제가 아세톤에 지워지는 과정에서 기판에서 떨어지게 되며, 이로써 식각 마스크의 제작이 완료된다. 감광제들이 완전히 기판에서 제거되도록 하기 위해 이 과정에서 초음파 진동기(Ultrasonicator)를 사용하였다. 한편, 본 공정에서 사용된 식각 마스크 물질은 크롬 0.02 μm 와 금 0.3 μm 이 연속 증착된 금속 마스크로, KOH 용액을 이용하여 비교적 낮은 단차를 식각 할 때 적합하다.

두 번의 식각 공정 중 첫 번째 단차의 깊이는 나중에 CPW 전송선로가 제작된 유리 기판과의 접합 시 구동 전극의 초기 간격을 결정하게 된다. 2장에서 언급한 바와 같이 초기 간격은 스위치의 구동 전압과 복원력에 매우 민감한 영향을 주므로 정확한 두께 조절이 필요하고 기판 전체에 걸쳐 단차의 깊이가 모두 일정해야 한다. 습식 식각은 앞서 언급한 것처럼 정확한 단차 조절이 가능할 뿐만 아니라, 기판 전체에 걸쳐 균일한 식각율을 보이는 장점이 있다. 본 공정에서 진행된 습식 식각 용액은 KOH 34 wt%였으며, 식각액의 온도는 62 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정되었다. 그리고 식각액의 원활한 대류와 이온의 활동을 돕기 위해 초음파 진동을 사용하였다. 앞에 제시된 조건을 통해 0.3~0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$ 정도의 매우 낮은 실리콘 식각률을 확인하였으며, 이를 통해 정확한 단차를 형성할 수 있었다. 첫 번째와 두 번째의 실리콘 식각의 목표

깊이는 각각 2.5 μm 와 4 μm 로 설정되었다. 실리콘의 식각 공정 이후에는 식각 마스크로 사용된 금과 크롬을 습식 식각 방법을 이용하여 모두 제거한다.



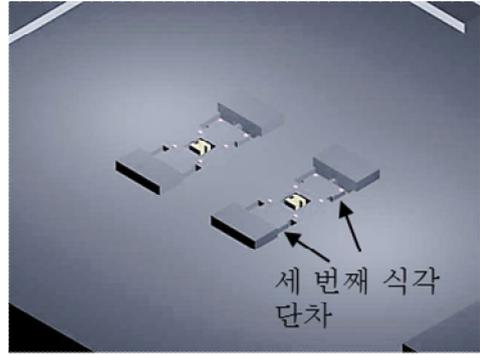
(a) 첫 번째 실리콘 식각



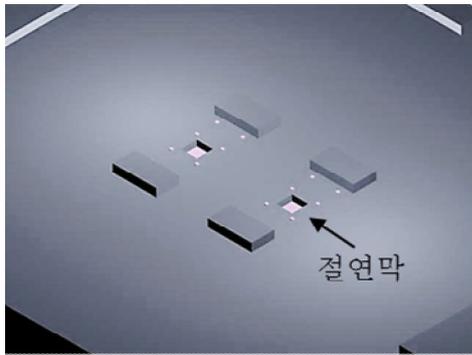
(d) 접촉 금속의 형성



(b) 두 번째 실리콘 식각



(e) 스프링 높이 조절을 위한 deep RIE 공정



(c) TEOS 산화막 증착

그림 3.4 실리콘 기판의 제작 과정

다음으로 형성된 단차 위에 절연막을 형성한다. 이 단계에서 형성되는 절연막은 실리콘 구조물과 접촉 금속을 전기적으로 절연하기 위한 절연막과, 두 구동 전극의 접촉을 막는 부분으로 나뉜다. 실리콘 구조물에는 스위치를 움직이기 위한 구동 신호가 인가되며, 이 구동 신호가 접촉 금속으로부터 완전히 분리되어야 접촉 금속을 통해 흐르는 전송 신호의 손실과 왜곡을 방지할 수 있다. 접촉 금속과 실리콘 구조물의 전기적 절연을 위한 절연막은 두 번째 단차의 표면에 형성되고(그림 3.5) 두 구동 전극의 접촉을 막기 위해 형성되는 절연 패턴은 구동 전극이 되는 첫 번째 단차의 표면에 형성되는데 이때 실리콘 전극의 네 모서리 부분에 형성된다. 절연 패턴은 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 크기의 정사각형 모양으로 정의하였고 절연 물질로는 TEOS 박막을 이용하였다. Applied Material Korea 社의 P-5000 장비를 이용하여 $0.2\ \mu\text{m}$ 의 두께로 TEOS를 증착한 후 $3\ \mu\text{m}$ 두께의 Az 4330 감광제를 패터닝하여 식각 마스크로 사용하였다. TEOS 식각을 위하여 Plasmalab 80 Plus 장비에서 O_2/CF_4 가스를 각각 5 sccm/50 sccm 사용하여 0.055 torr에서 150 W의 RF 파워로 5분간 식각하였다. 사용된 식각 마스크는 아세톤을 이용하여 제거함으로써 절연막 형성을 완료하였다.

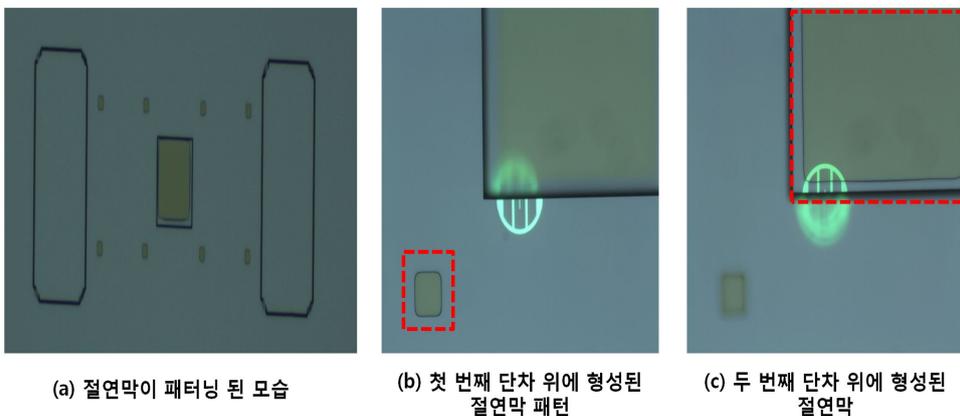


그림 3.5 절연 막 형성 후 사진

위와 같은 방법으로 두 번째 단차의 표면에 형성된 절연막 위에 스위치의 접촉부 금속을 형성한다. 스위치의 접촉부 금속은 구동 시 유리 기판위의 전송 선로 중 끊어진 부분에 접촉하여 양 쪽을 연결해주는 역할을 한다. 접촉부 금속은 그림 3.6에서 볼 수 있듯이 첫 번째 단차에 형성된 TEOS 절연 패턴보다 높이 증착되어야 유리 기판 상에 제작된 CPW 전송 선로와 접촉할 수 있다. 만약 접촉부의 금속이 첫 번째 단차에 형성된 절연 패턴보다 낮게 증착된다면, 스위치가 구동하여도 신호가 연결되지 않거나, 불완전한 접촉으로 인해 높은 삽입 손실을 가지게 된다. 반대로 접촉부 금속이 이 절연 패턴보다 과하게 높아지면 유리 기판에 제작된 CPW 전송 선로와의 초기 간격이 좁아져, 스위치의 열린 상태일 때도 고주파의 신호가 전송 선로를 타고 흐르게 되어 격리도가 낮아지는 문제점이 있다. 뿐만 아니라 2장의 설계에서 설명한 바와 같이 접촉 후 상하부 전극의 간격은 스위치의 성능에 매우 큰 영향을 주는데 이때의 간격이 접촉부의 높이에 따라 결정이 된다. 따라서 접촉부 금속의 높이는 정확하게 조절되어야 한다.

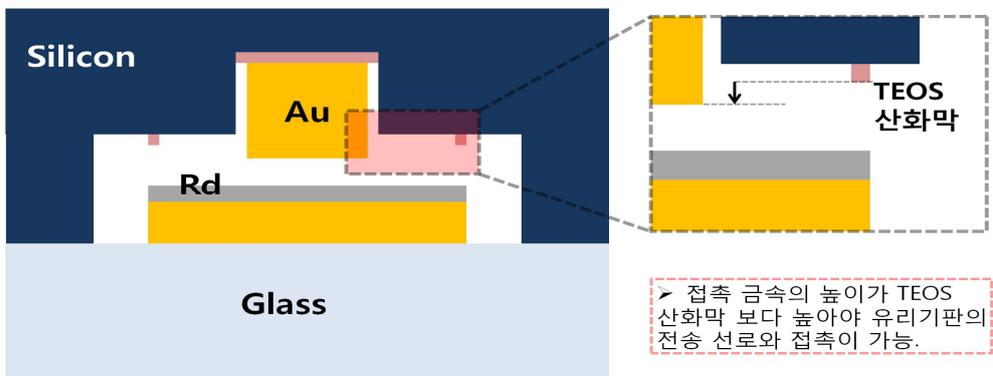


그림 3.6 TEOS 절연막과 접촉 금속의 올바른 형태

기존의 도금 공정을 이용할 경우 웨이퍼 상 패턴의 위치에 따라 전류의 패스 길이가 달라지게 되는데 이로 인해 패턴간에 도금 속도의 차이가 나게 되고 최종적으로 균일한 높이의 금속 형성이 힘들게 된다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 그림 3.7과 같은 공정을 제안하였다. 접착 금속이 형성될 동공을 형성하고 그 위에 SiO_2 절연막을 형성한 다음 도금을 통해 일정높이 이상의 금속을 형성한 후 CMP 공정을 통해 균일하게 깎아내어 웨이퍼 전체에 균일한 높이의 금속 형성을 가능하게 하였다.

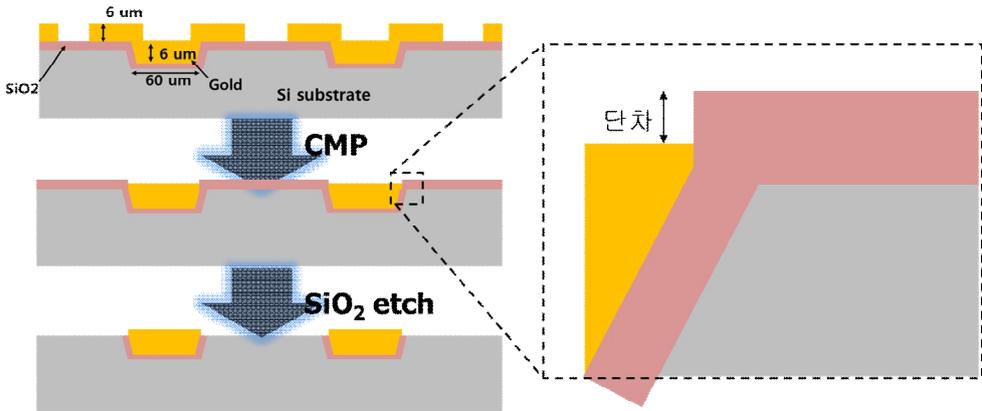


그림 3.7 CMP를 이용한 균일한 높이의 접착 금속 형성 방법

CMP 공정 후 SiO₂ 절연층과 금속 사이에 일정하게 단차가 발생하게 된다. 즉 SiO₂ 절연층의 높이를 조절하므로서 발생하는 단차를 통해 CMP와 SiO₂ 절연층 식각 후 실리콘 표면으로부터 일정한 높이를 가지는 금속 접촉부 제작이 가능하게 된다. 그림 3.8은 웨이퍼의 위치에 따른 금속의 형성된 높이를 나타내었다. CMP 공정법은 5.5 μm 를 목표 높이로 하였고 도금 공정은 4 μm를 목표 높이로 하여 실험하였다. 도금 공정의 경우 목표 높이인 4 μm에 오차 0.1 μm 이내에 해당하는 샘플이 43% 인 반면 CMP를 이용할 83 % 정도의 샘플이 목표 높이의 0.1 μm 오차 이내로 들어왔다.

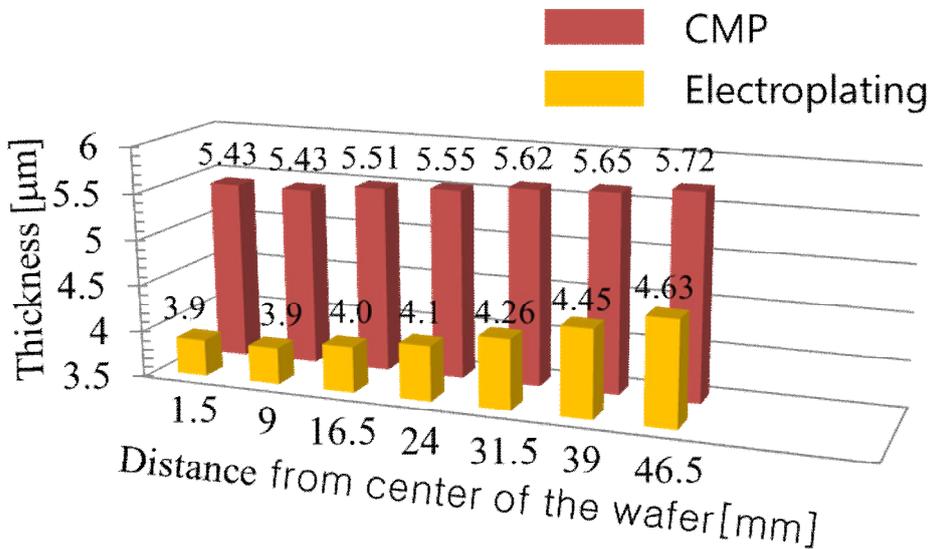


그림 3.8 도금과 CMP 공정을 이용 하였을 때의 접촉막의 두께 비교

그림은 3.9는 CMP 후 SiO_2 식각 전후의 모습을 찍은 사진으로 식각 후 실리콘 표면으로부터 약 $0.2 \mu\text{m}$ 높이로 접촉 금속이 잘 형성되었음을 알 수 있다.

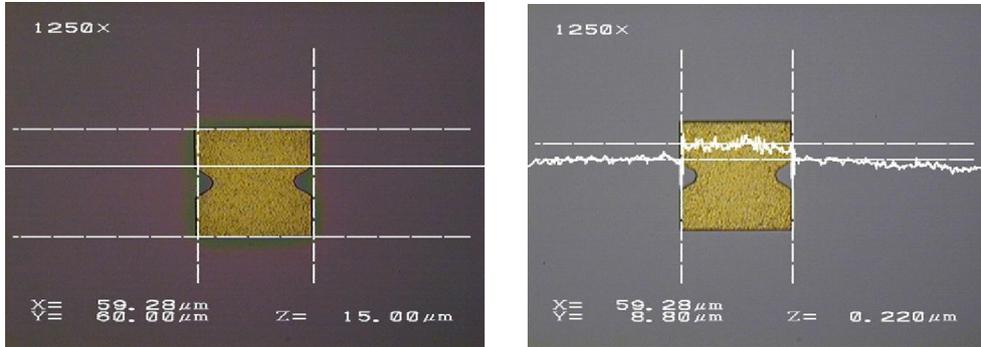


그림 3.9 SiO_2 식각 후 접촉 금속의 모습

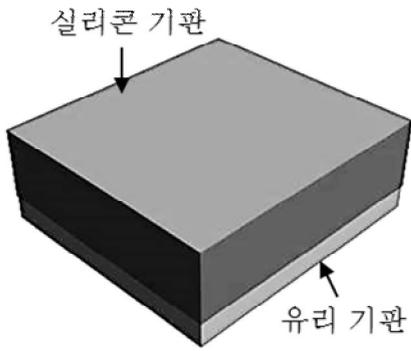
다음으로 실리콘 구조물의 최종 스프링 두께를 조절하기 위해 실리콘을 건식 식각하는 공정을 수행한다. 이 공정에서는 실리콘의 스프링이 될 부분을 실리콘 기판의 윗면에서부터 식각하여, 유리 기판과의 접합 이후 실리콘 기판의 뒷면에서 스위치 구조물을 정의할 때 결정되는 스프링의 높이를 조절한다. 스프링의 높이는 실리콘 구조물이 정전력(Electrostatic force)을 받아 움직일 때, 이를 방해하는 정도를 결정짓는 스프링 상수에 영향을 미친다. 실리콘 식각은 스프링이 정의될 부분만을 좁고 깊게 식각할 수 있는 방법이 필요한데 이를 위해 건식 식각 방법인 Deep Reactive Ion Etching (DRIE) 방법을 이용하였다. 그림 3.4 (f)와 같이 최종적인 스프링 두께 $20 \mu\text{m}$ 를 형성하기 위해 실리콘을 약 $50 \mu\text{m}$ 식각하였다. 식각 마스크로는 Az 4330 감광제를 이용하였고 DRIE 공정은 OERLIKON 社의 SLR-770-10R-B 장비를 이용하여 진행하였다.

3.1.3 기판 접합 및 릴리즈

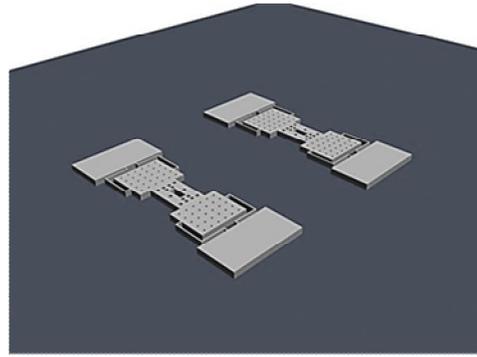
DRIE 공정을 완료한 실리콘 기판은 앞서 제작된 유리 기판과 양극 접합법을 이용하여 접합된다(그림 3.10). 양극 접합법은 실리콘과 유리 기판을 맞댄 상태에서 적절한 압력과 온도를 맞추어주고, 양 쪽에서 높은 전압을 인가하여 유리 기판에 있는 Na^+ 이온들을 실리콘 기판 쪽의 접촉면으로 이동시켜 접촉면에 강한 정전력이 발생하게 한다[38]. 접합 공정에 사용된 장비는 Carl süss 社의 EV501이며 사용된 양극 접합 공정 조건은 다음과 같다. 약 380°C 의 온도로 실리콘 기판과 유리 기판을 가열하고, 1000 N의 압력을 가하며 800 V의 전압을 인가하여 30 분간 접합한다. 높은 온도는 이온의 이동을 활성화 시키고 높은 압력을 줌으로써 바이어스 선에 의해 발생하는 단차를 최소화 한다. 접합이 진행 되면서 전압이 인가되어 접합이 이루어 지면 실리콘 기판에서 유리 기판으로 미세한 전류가 발생하게 되는데 이를 통해 간접적으로 접합이 이루어 지고 있음을 확인할 수 있다.

접합이 완료된 기판은 스위치 구조체의 두께와 스프링의 두께를 정의하기 위해 실리콘 기판을 식각 하여야 한다. 이때 스프링의 두께는 스위치의 복원력뿐만 아니라 구동 전압에도 영향을 주므로 정확한 정의가 필요하다. 본 연구에서는 CMP 공정을 통하여 실리콘 기판의 두께를 정확히 조절하도록 하였다. 또한 구조체의 두께를 70 μm 이상으로 하여 CMP에 의해 발생하는 압력으로 실리콘이 깨지는 현상을 방지하였다.

마지막으로 그림 3.10과 같이 리프트 오프 공정을 이용하여 알루미늄 식각 마스크를 패터닝하고 DRIE 공정을 이용하여 릴리즈 하여 스위치 공정을 마무리 한다.



(a) 양극 접합



(b) 실리콘 구조체 정의를 위한 알루미늄 마스크

그림 3.10 양극 접합과 릴리즈를 위한 식각 마스크 제작 후 모습

3.1.4 접촉 금속의 세척

제작이 완료된 스위치의 현미경 사진을 그림 3.11에 나타내었다. 스위치 구조체가 잘 정의되어 있고 유리 기판 위에 CPW 그리고 바이어스 선 잘 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그림에서 보이는 바와 같이 스위치 주변과 접촉 부분 밑에 그을음과 같은 잔류물들이 남아있음을 알 수 있다. 이러한 잔류물들은 CPW의 신호선과 접지선 사이의 합선을 일으키거나 스위치의 접촉을 방해하여 접촉 저항을 증가시키는 등의 스위치 주요 성능 열화의 원인이 될 수 있으므로 반드시 제거하여야 한다.

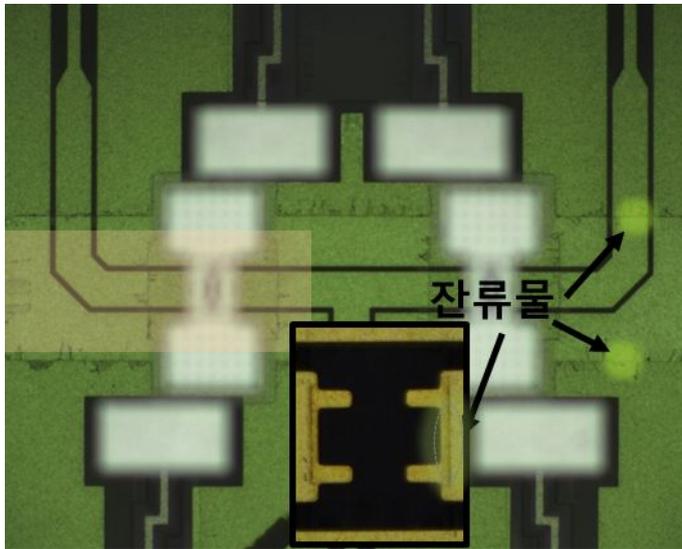


그림 3.11 제작 완료 후 스위치의 현미경 사진

잔류물들의 성분을 알아보기 위해 전자주사 현미경(SEM)과 원소 분석기(EDX)를 이용한 스펙트럼 분석 결과를 그림 3.12에 나타내었다. SEM 사진을 통해 실타래와 같은 잔류물들을 확인할 수 있고 스펙트럼

성분들을 보면 탄소(C), 불소(F), 산소(O), 실리콘(Si)과 같은 성분들이 주를 이루는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 원소들은 탄소와 불소로 이루어진 fluorocarbon 계열의 폴리머를 형성하는데 이 물질은 주로 실리콘의 수직 식각을 위한 DRIE 공정 중에 사용되는 식각 억제제(inhibiter)로서 수직 식각을 향상 시키기 위한 격벽 보호역할을 한다.

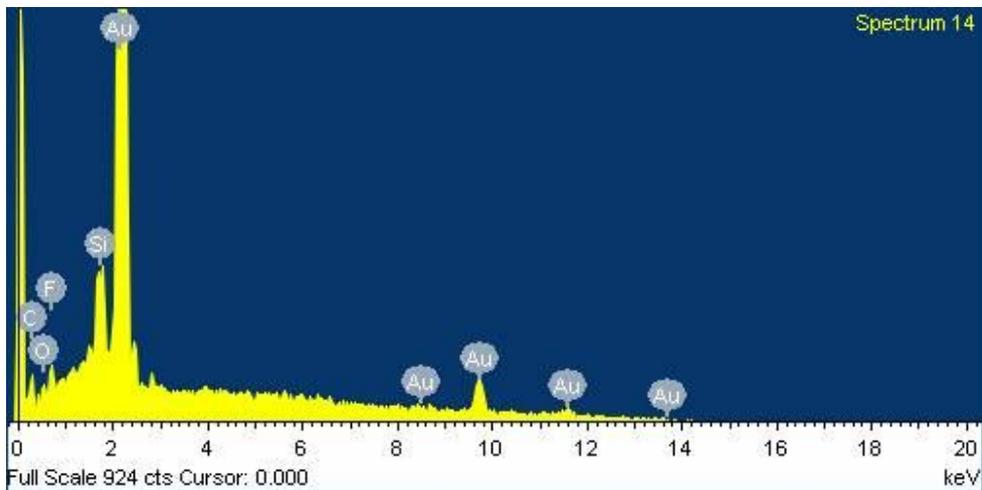
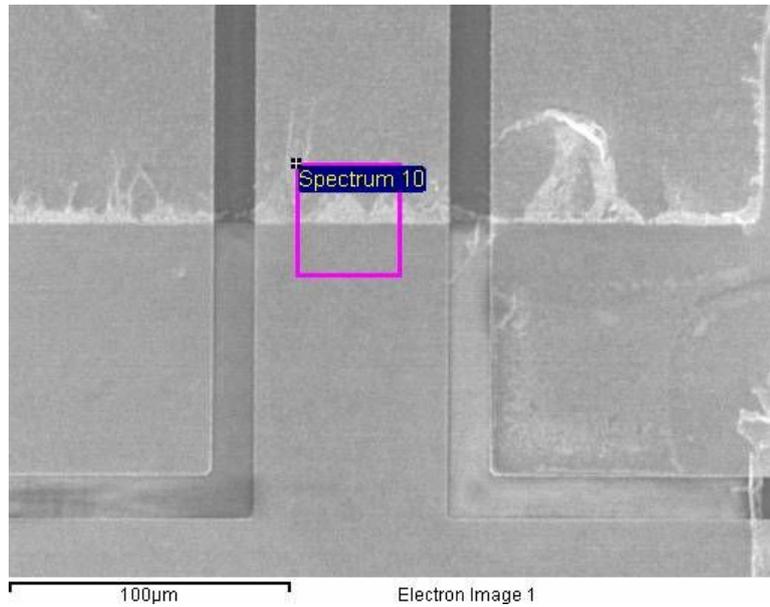


그림 3.12 전자주사 현미경(SEM)과 원소 분석기(EDX)를 이용한 잔류물의 스펙트럼 분석 결과

정상적인 공정의 경우 이러한 식각 억제 제는 식각 공정 과정에서 말끔히 제거가 되지만 그림 3.13와 같은 스위치 제작 과정의 특수한 상황에 의해 식각 억제 제가 제거되지 않고 남게 된다. 소자의 릴리즈를 위해 식각을 수행하다가 약 20 μm 정도가 식각 되면 그림 3.12 (a)와 같이 먼저 식각이 완료가 되는 부분이 발생하게 되는데 이때부터 식각 완료된 부분과 식각이 진행되는 부분 사이로 잔류물들이 남게 된다. 식각 억제 제는 등방성으로 고르게 증착이 되어야 하므로 낮은 파워에서 증착하게 되는데 이로 인해 식각이 완료된 부분을 통해 실리콘과 CPW사이로 식각 억제 제가 침투하여 증착이 된다. 이후 식각(etch)이 진행되는데 이때 수직 식각을 향상시키기 위해 높은 파워로 식각이 이루어진다. 따라서 식각을 위한 플라즈마가 깊숙이 증착된 식각 억제 제까지 침투하지 못하게 되는데 이러한 현상이 반복되면서 식각이 완료된 후 잔류물이 남게 된다.

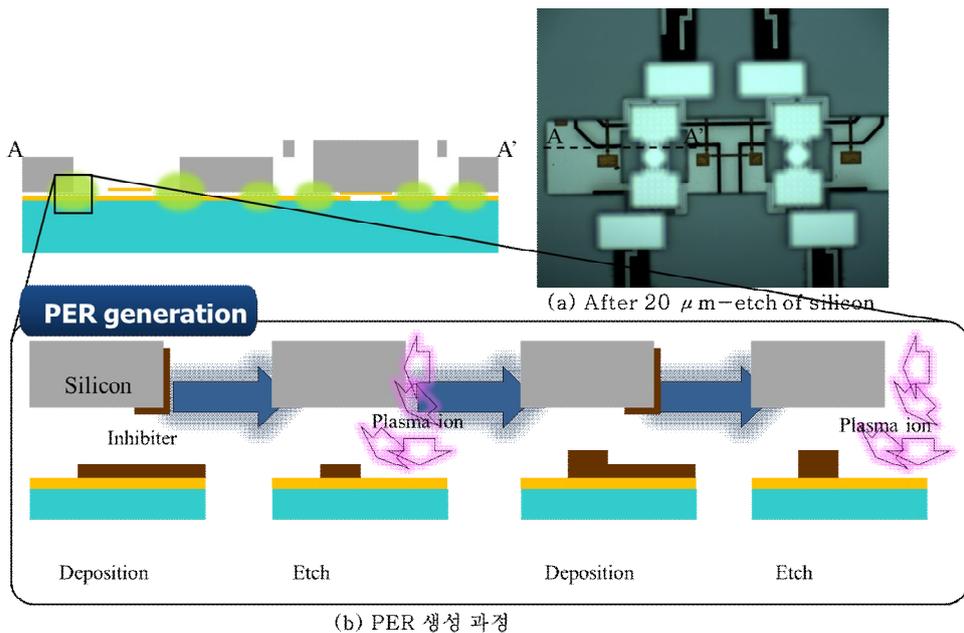
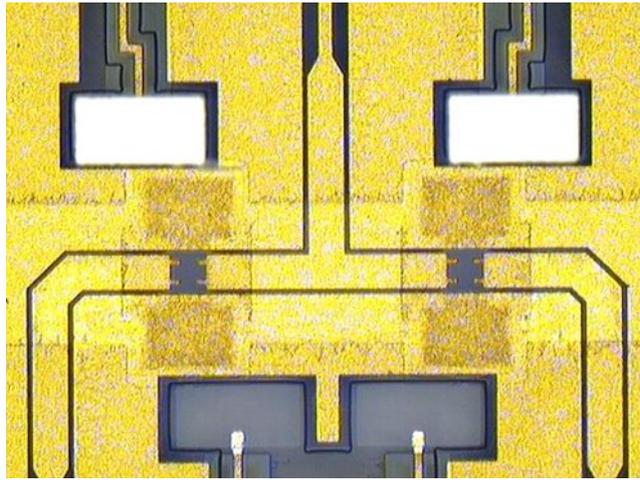
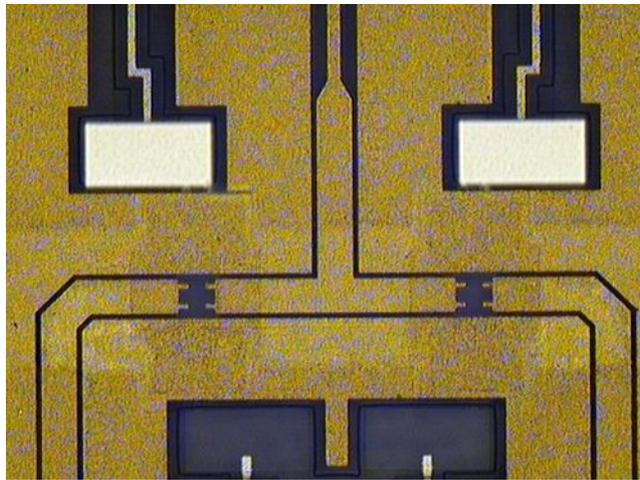


그림 3.13 식각 후 잔류 물의 형성 과정

이렇게 남은 잔류물은 식각도중 발생하는 실리콘과도 결합하여 복합체를 형성하게 되는데 DRIE 장비를 이용해서 식각을 더 진행하더라도 제거가 되지 않는다. 또한 이 물질은 테플론에 가까운 복합체로서 식각할 용액이 마땅치 않다. 본 연구에서는 이런 물질들을 제거하기 위하여 루테늄 표면과 잔류물 사이의 접착을 끊는 방법을 제안한다. 루테늄은 귀금속에 속하므로 유기물이나 다른 금속과의 접착력이 좋지 않으므로 효과적으로 잔류물 제거가 가능하게 된다. 잔류물의 제거를 위하여 DuPont사의 EKC 265 용액을 사용하였다. EKC 265 용액은 친핵체를 가지고 있어 금속표면 위에 있는 유기물질 및 폴리머들을 분리시키는 역할을 해주어 루테늄 표면의 잔류물을 제거하게 된다. 그림 3.14는 EKC 265 처리 전후의 유리기판 위 CPW를 비교한 결과이다. 비교를 위하여 스위치 구조체를 제거하고 비교하였다. 이를 통해 잔류물들이 효과적으로 제거되는 것을 알 수 있다. 이때 제거를 위한 EKC 265 사용 조건을 표 3.6에 나타내었다.



(a)



(b)

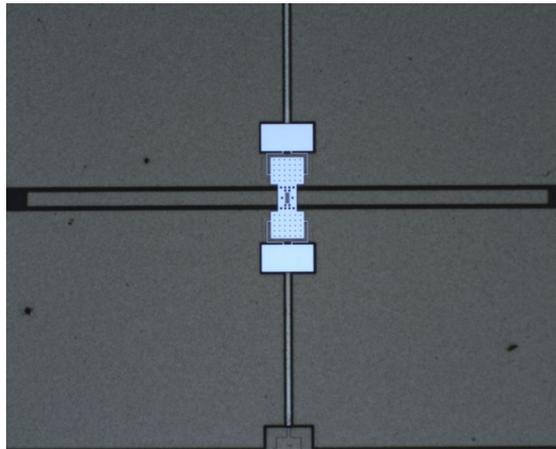
그림 3. 14 ECK 265 처리 (a) 전 (b) 후 CPW 비교

표 3.6 잔류물 제거를 위한 EKC 265 사용 조건

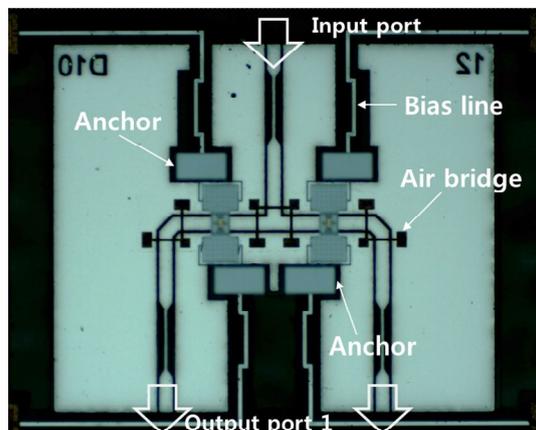
Step	AZ 4330 Positive tone
EKC 265	65 ° C / 30 min
IPA	Room temperature / 5 min
QDR	Room temperature / 10 min

3.2 스위치의 제작 결과

앞 절에서 설명한 제작 과정으로 만들어진 RF MEMS 스위치를 그림 3.15에 나타내었다. 제작 결과 바이아스 선과 CPW가 유리 기판 위에 잘 정의되어 있고 스위치 구조체가 형성 되어 있음을 확인 할 수 있다. SPDT 의 경우 CPW 위에 air bridge가 끊어지지 않고 잘 형성 되었고 또한 EKC 265 처리를 통하여 잔류물이 깨끗이 제거 되었다.



(a)



(b)

그림 3.15 제작 완료 된 SPST와 SPDT의 현미경 사진

보다 세부적인 확인과 제작 치수 확인을 위하여 전자 주사 현미경을 통하여 제작된 소자를 분석하였다.

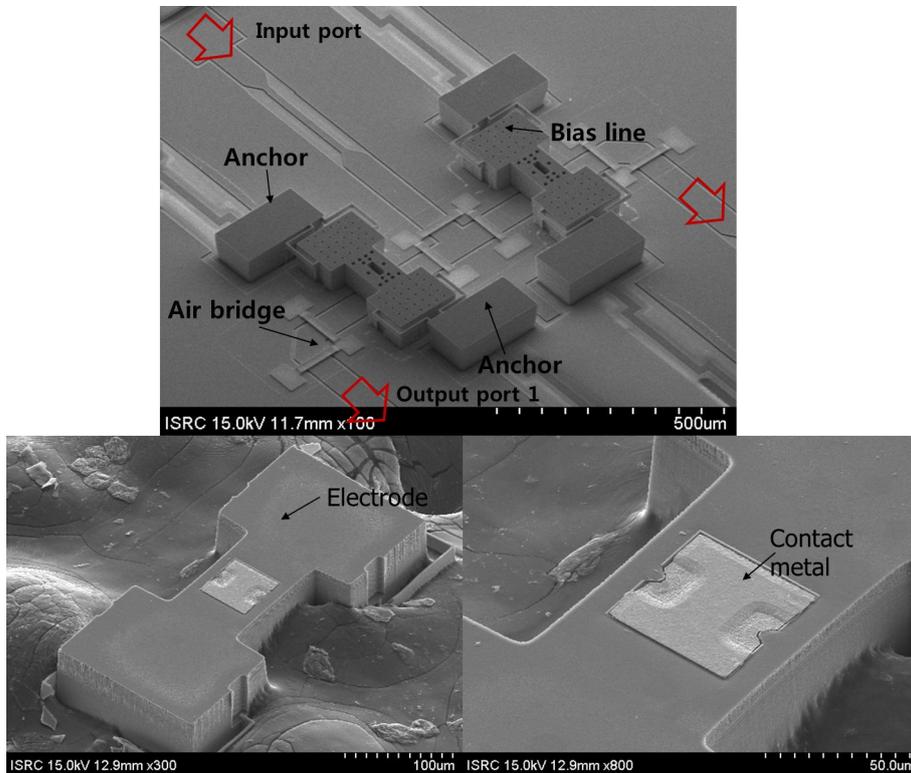


그림 3. 16 스위치의 전자 주사 현미경 사진

전자주사 현미경을 통하여 실리콘 구조체의 아랫면을 확인 해본 결과 구조체 안에 $3\ \mu\text{m}$ 깊이의 동공이 형성되어 있고 그 안에 절연막과 접촉금속이 잘 형성되어 있는 것을 확인해 볼 수 있다.

그림 3.17은 스위치의 각 세부 수치확인을 위하여 확대하여 촬영한 사진이다. 스프링 두께 정의를 위한 세 번째 공동 형성 시 식각이 설계치수보다 약 $2\ \mu\text{m}$ 더 되었지만 CMP 공정에서 구조체의 높이를 조절하여 설계치수에 근접한 스프링 두께를 확보하였다. 스프링의

길이와 폭도 설계치수에 가까운 값을 가지는 것으로 보아 공정 방법이 잘 확립되어 있음을 확인 할 수 있다.

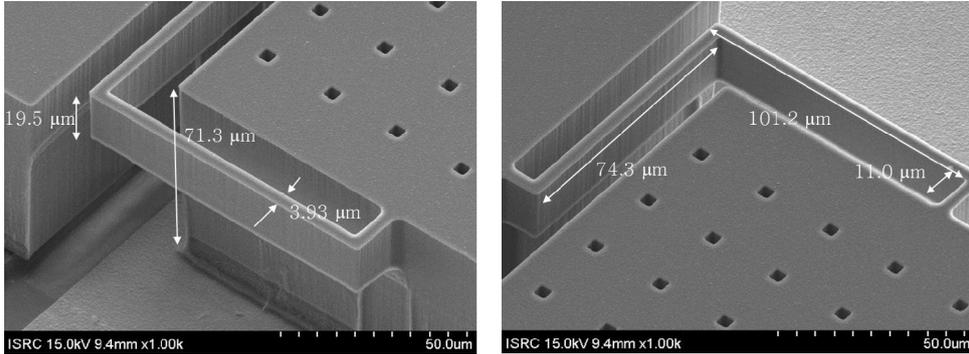


그림 3.17 스프링 부분의 확대 사진과 치수

표 3.7에 본 연구에서 제안한 스위치의 설계치수와 제작된 스위치의 치수를 비교해 놓았다. 제작 결과 스프링의 길이가 약 $1 \mu\text{m}$ 정도 늘어나고 초기간격이 $0.05 \mu\text{m}$ 줄어들어 풀인 전압이 설계치인 46.2 V 에서 43.3 V 로 줄어들었지만 제작된 스위치의 복원력이 1 mN 이상의 높은 값을 가지는 것으로 계산되어 고전력 응용을 위한 스위치 특성에 부합함을 알 수 있다. 치수 측정을 통해 예상된 스위치의 접촉력은 6.2 mN 이고 이는 스위치의 각 덤플이 약 1.5 mN 의 힘을 받는다고 예측할 수 있다. 이를 통해 스위치가 닫힌 상태일 때 루테튬과 골드가 접촉하여 1Ω 이하의 충분히 낮은 저항을 가질 것으로 기대된다.

표 3.7 제작 결과와 설계 치수의 비교

Parameters		Design	Fabrication
Electrode area [μm^2]		160 × 120	161 × 119
Initial gap [μm]		1.5	1.45
Gap after contact [μm]		0.2	0.26
Membrane thickness [μm]		70	71
Spring thickness (t) [μm]		20	19.5
Spring width (w) [μm]		4	3.9
Spring length [μm]	l_1	10	11.0
	l_2	100	101.2
	l_3	75	74.3
	l_4	15	14.2
Spring constant		1102.2	1047.3
풀인 voltage [V] (Calculation)		46.2	43.3
Restoring force [mN] (Calculation)		1.1	1.05
Contact force at 50 V [mN] (Calculation)		10.6	6.2

제 4 장 10 W 급 RF MEMS switch의 측정 결과

4.1 정전 구동 특성 분석

그림 4.1 은 제작된 스위치의 풀인 전압을 측정하기 위해서 필요한 측정 장치 구성이다. 제작된 스위치의 상하 움직임은 $1.5 \mu\text{m}$ 내외로 육안으로 확인하기는 거의 불가능하다. 따라서 그림과 같은 장치를 구성하여 끊어진 신호선 양단의 저항을 측정함으로써 스위치의 동작을 관찰한다. 즉 스위치가 구동하지 않은 상태에서는 신호선이 단절된 상태이므로 멀티 미터의 저항 값은 무한대를 가리키게 되고 스위치를 구동할 때는 끊어진 신호선을 연결해 주므로 특정한 값의 저항이 나타나게 된다. 이 때의 전압을 풀인 전압이라 볼 수 있다.

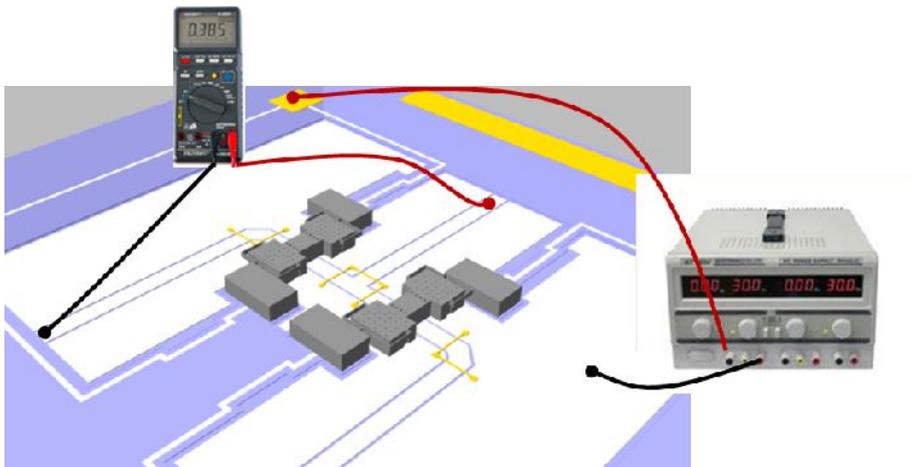


그림 4.1 풀인 전압 측정을 위한 저항 측정 장치

풀인 전압에서 특정한 값의 저항이 측정되지만 스위치에 인가하는

전압을 높여주면 신호선과 접촉막의 접촉력이 커지게 되어 저항이 점점 낮아지게 되는데 일정한 값 이하로 내려가지 않는 지점이 생긴다. 이때의 전압을 스위치 구동 전압(actuation voltage)이라고 하고 이때 측정된 저항을 접촉 저항(contact resistance)이라고 한다. 저항이 낮을수록 스위치에 의한 신호 손실이 줄어들기 때문에 실제 스위치의 동작을 위해서는 구동 전압을 인가한다. 그림 4.2는 5 개 스위치의 인가 전압에 대한 접촉저항의 변화를 측정한 그래프이다. 상하부 전극 양단에 0 V부터 시작해서 0.1 V씩 올라가며 전압을 인가하였고 저항의 변화를 관찰하여 풀인 전압을 측정하였다.

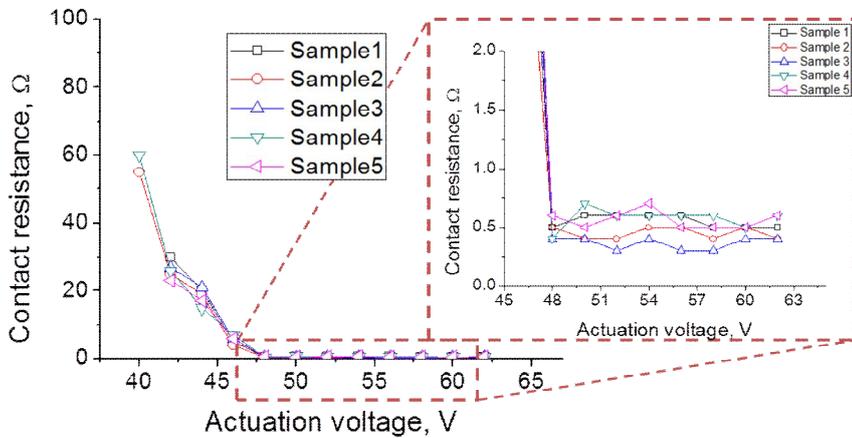


그림 4.2 인가 전압에 따른 접촉 저항의 변화

그래프를 통해 풀인 전압의 특성이 균일하게 분포함을 알 수 있다. 5 개의 스위치에 대한 문턱 전압의 평균값은 41.6 V였고 표준 편차는 1.6 V였다. 제작된 스위치 치수를 이용하여 다시 계산한 풀인 전압은 43.3 V로 측정 평균값과 1.6 V의 미세한 차이를 보였다. 이는 설계과정이 잘 정립되었음을 의미한다고 볼 수 있다. 5 개의 스위치

모두 50 V 이상에서 0.3~0.5 Ω 의 낮은 접촉저항을 나타냈다. 2 장에서 언급한 해석에 의하면 충분히 낮은 접촉 저항으로 인해 10 W의 고전력이 스위치에 흘러도 700 K 이상의 열이 발생하지 않아 금속의 softening 현상에 의한 변형이 일어나지 않을 것으로 기대 할 수 있다.

4.2 제작된 스위치의 RF 특성

제작된 스위치의 RF 특성을 측정하기 위하여 Aligent 社의 Network analyzer를 이용하였고 제작된 스위치를 구동시키기 위해 앞서 확인 한 구동 전압인 50 V를 인가하였다. 이때 그림 4.3과 같이 신호가 입력되는 부분을 1번 포트(Port 1), 나가는 부분을 출력 포트(Port2, Port3)로 하여 제작된 SPDT스위치의 RF 측정 결과를 그림 4.3에 나타내었다.

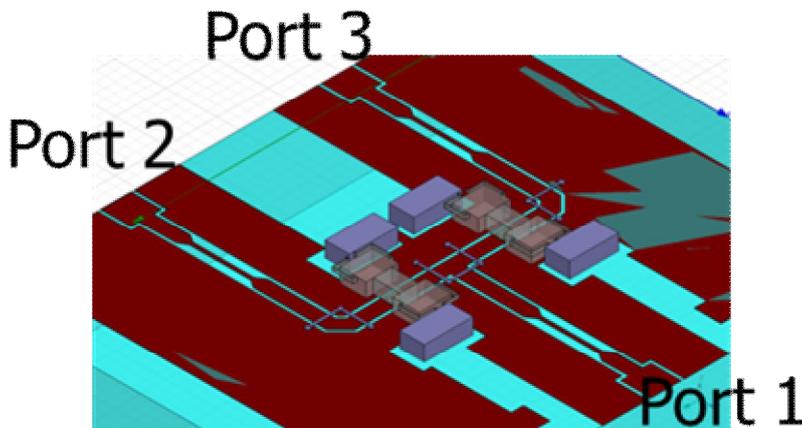
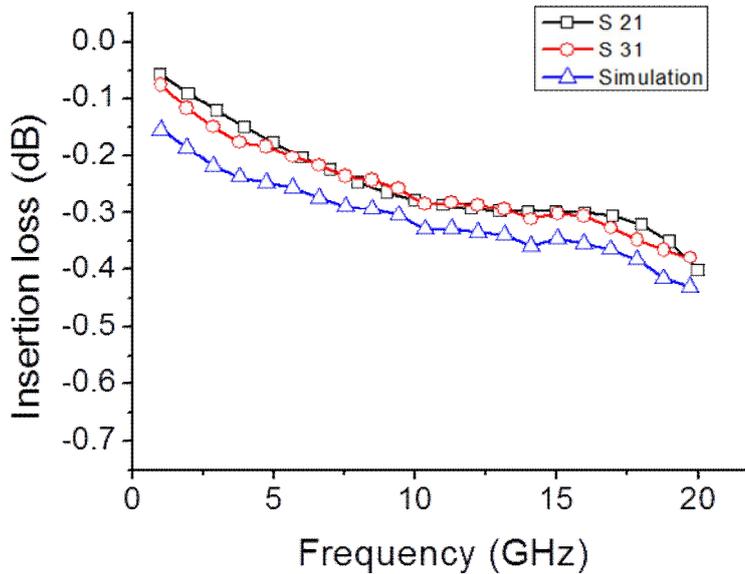


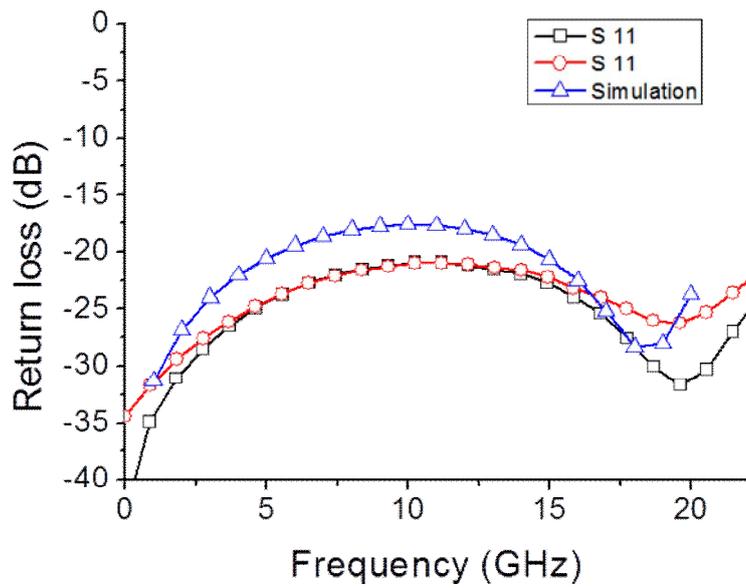
그림 4.3 스위치의 각 포트

각각의 출력 포트에 대한 삽입손실은 18 GHz까지 0.4 dB 이하였고 이때의 반사도는 모두 18 GHz까지 20 dB 이상의 값이 측정되었다. SPDT 스위치의 경우 신호선의 모양이 입력포트와 출력포트가 대칭이 아니게 되므로 출력 포트에서의 반사도를 관찰하여 설계가 잘 이루어졌는지를 확인하여야 한다. 그림 4.4 와 같이 출력 포트에서의 반사도가

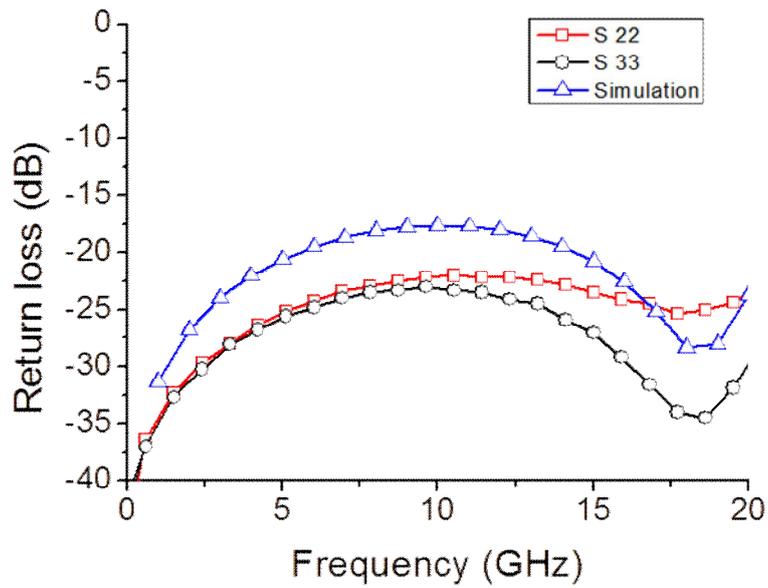
시뮬레이션과 비슷한 결과를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 격리도 측정을 위하여 측정을 하지 않는 포트 쪽의 스위치를 동작 시킨 후 신호의 격리 정도를 보았고 그 결과 18 GHz까지 25 dB 이상의 높은 격리도를 확인 할 수 있었다. 측정된 결과들은 시뮬레이션과 유사한 양상을 나타내었지만 손실이 조금 증가한 것으로 확인 할 수 있다. 이는 스위치의 접촉저항에 의해 신호 손실이 발생하고 스위치의 실리콘 기판으로 일정 부분의 신호가 전파되면서 손실이 발생하는 것으로 여겨진다. RF 성능 측정 결과는 군용 레이더의 송수신기에 적용되기 위한 요구 조건에 모두 부합 될 뿐만 아니라 보다 좋은 성능을 가지고 있어 다양한 응용 범위가 기대 된다.



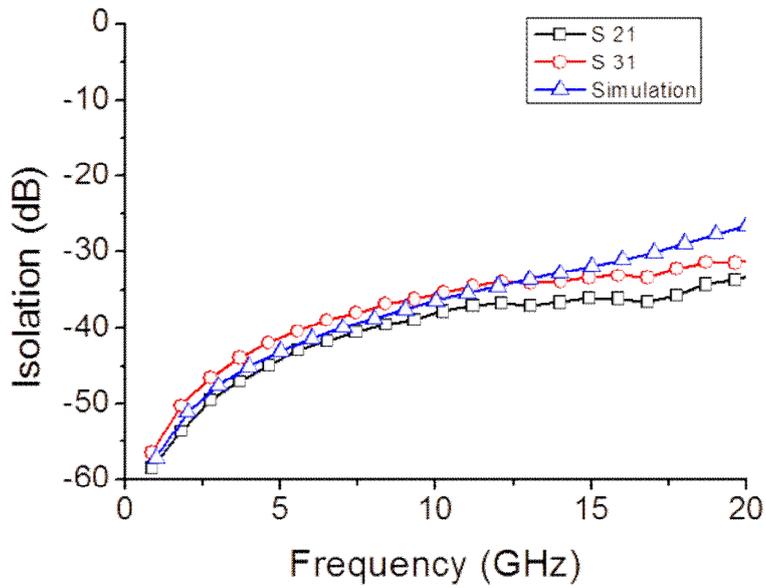
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4.4 제작된 스위치의 RF 측정 결과: (a) 삽입손실, (b) 반사도,
 (c) 출력 포트에서의 반사도, (d) 격리도

4.3 고전력 수용 시험

제작된 스위치의 신뢰도를 평가하기 위하여 10 W의 고전력 수용을 몇 번이나 가능한지를 측정하였다. 이때 평가 방법은 콜드 스위칭(cold-switching) 방법으로 스위치가 닫혀 있는 동안 1 번의 RF 전력을 인가하고 열려 있는 동안 1 번의 RF 전력을 인가하여 1 번 신호가 흐르고 1 번 차단 되는 것을 1 회로 하여 구동 횟수를 평가하였다. 반복 구동은 초당 10000번 즉 10 kHz의 횟수로 구동 시켰고 오실로스코프를 통해서 인가되는 전력의 신호와 출력되는 전력의 신호를 검출하여 정상적인 구동 여부를 판단 하였다. 측정 결과를 그림 4.5에 나타내었다. 그 결과 10 W에서 12억 번 이상의 연속 반복 구동 횟수를 확인하였고 시험 후에도 스위치의 외관에 변형이 없음을 확인 할 수 있었다. 또한 10 억 번째 구동에서 입력전력과 출력전력은 각각 39.97 dBm, 39.53 dBm 으로 약 0.45 dBm의 전력 손실을 나타내었는데 이는 앞서 측정한 스위치의 RF 특성과 비교 해 볼 때 약 0.15 dB 정도 손실이 증가 했음을 알 수 있다. 이는 10 W 이상의 고전력이 인가되면서 발생하는 열에 의해 에너지 손실이 발생하기 때문으로 여겨진다.

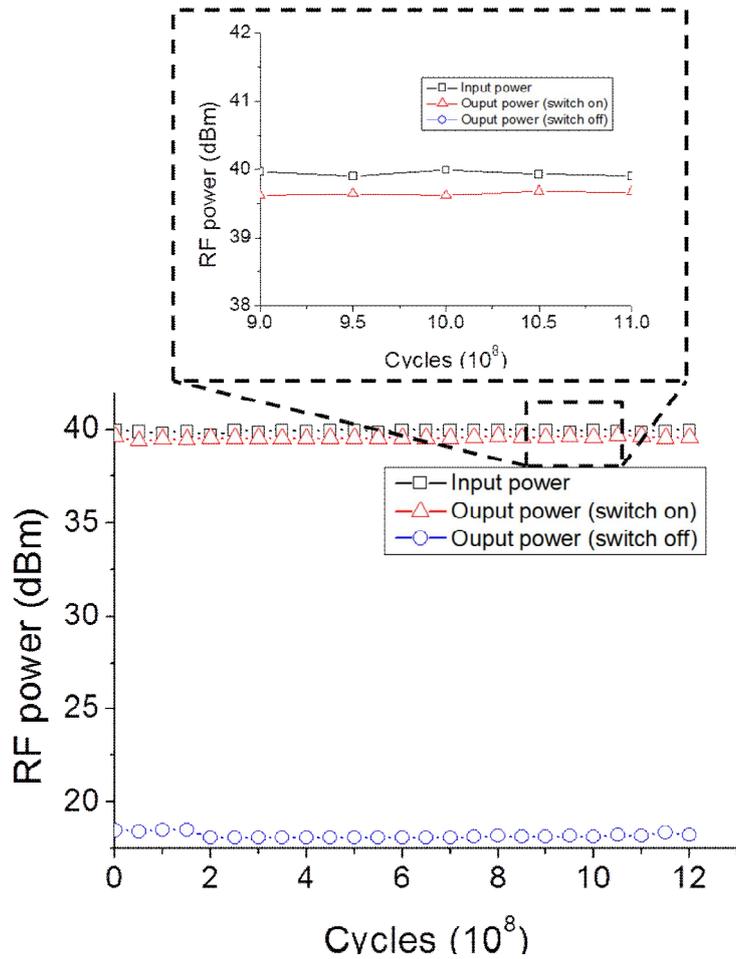


그림 4.5 고전력 수용 실험 결과

그림 4.6은 스위치의 저항 값에 따른 10 W cold-switching 시험의 결과를 나타내었다. 총 10개의 샘플을 측정 한 결과를 나타내었다. 저항의 크기가 작을 수록 반복 수명의 결과가 좋아지는 경향이 나타나지만 비슷한 저항 값을 가지더라도 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 제작된 스위치가 실장이 되어 있지 않기 때문으로 여겨진다. 측정을 위한 실험 환경이 미세 먼지가 거의 없는 청정실 상태가 아닌 일반 장소이므로 대기 중에 다양한 먼지가 존재 할 수 밖에 없는데 10 W 이상의 고전력에 의해 발생하는 전자기 장으로 인해 주위의

먼지가 끌려 오게 되고 스위치 구조체의 반복적인 상하 운동으로 인해 구조물 사이로 먼지가 들어가는 경우가 발생 할 수 있다. 이는 스위치의 접촉 저항을 크게 증가 시키는 원인이 되어 스위치 접촉 금속의 녹음으로 인한 점착을 발생 시키게 된다. 따라서 보다 스위치의 신뢰성을 향상시키고 균일한 신뢰성을 보장하기 위해서는 스위치의 실장이 반드시 이루어 져야 한다.

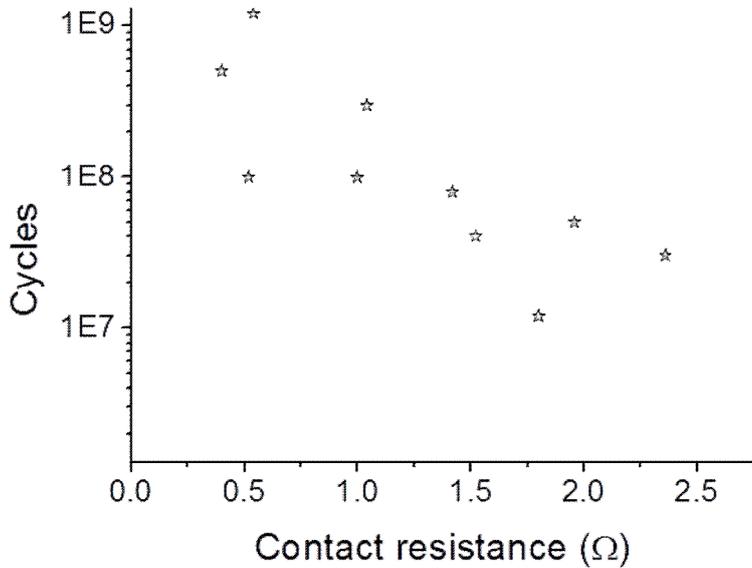
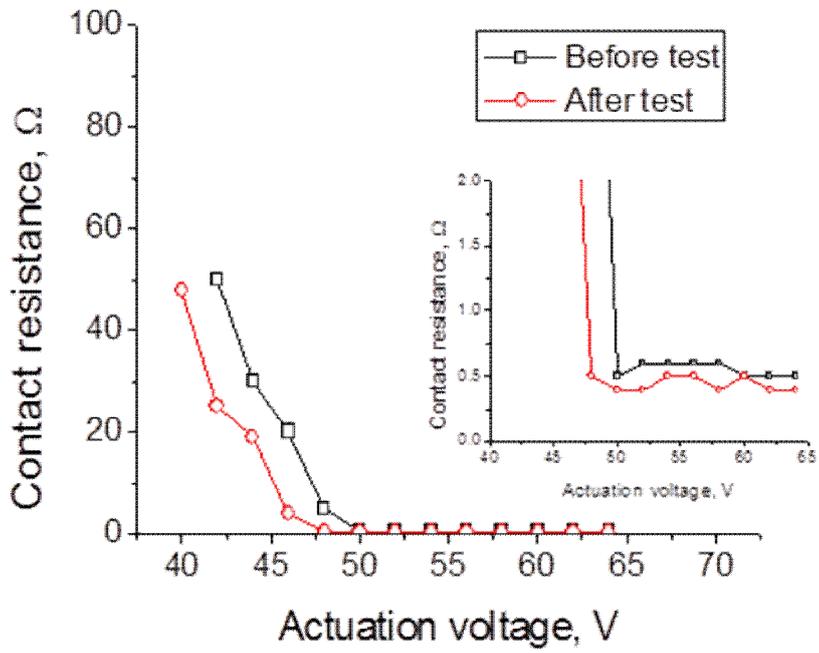


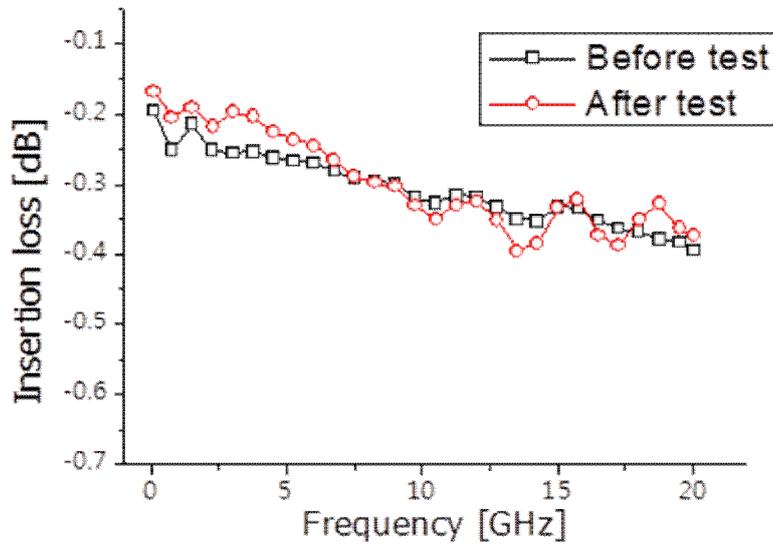
그림 4.6 접촉 저항에 따른 10 W cold-switching 성능 시험 결과

4.4 고전력 수용 시험 후 성능 변화

10 W의 고전력 수용 시험을 마친 후 스위치의 성능 변화를 확인하기 위하여 접촉 저항과 삽입 손실을 확인하였다. 접촉 저항의 경우 시험 후 저항이 감소되었는데 이는 고전력에 의해 접촉 금속의 표면이 세척되는 효과가 발생하거나 반복 구동에 인해 접촉 면적이 증가하였기 때문으로 분석된다. 줄어든 접촉 저항의 영향으로 삽입손실이 개선되는 효과가 발생하였고 그림 4.7과 같이 18 GHz에서 약 0.05 dB정도의 손실이 줄어듦을 확인 할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 4.7 고전력 수용 시험 후 성능 변화 : (a) 접촉저항, (b) 삽입손실

제 5 장 RF MEMS 스위치의 실장

4장의 반복 구동 실험 결과에서 보는 바와 같이 RF MEMS 스위치가 실장이 되지 않을 경우 주변 환경의 영향에 의해 구동 실패로 이어지게 된다. 따라서 스위치의 신뢰도를 높이고 균일한 반복 구동 특성을 확보하기 위해서는 반드시 실장이 이루어 져야 한다. 특히 MEMS 구조물은 습기에 약하고 구조물의 움직임이 공기저항의 영향을 받기 쉬우므로 밀봉 실장이 이루어 져야 한다. 따라서 본 연구에서는 스위치의 신뢰성 향상과 안정적인 고전력 반복구동 특성을 확보하기 위하여 밀봉 실장을 목표로 하였다.

5.1 Glass frit을 이용한 실장 개요

그림 5.1과 같이 본 연구에서 제안하는 실장 방법은 Glass frit을 접착제로 하여 고저항 실리콘을 씌우는 것이다. 먼저 구조적인 특성을 보면 고저항 실리콘을 캡(cap)으로 사용하여 실리콘 림(rim)으로 인한 신호의 누수를 최소화 하고자 하였고 실리콘 안에 소자가 들어갈 수 있는 공동을 형성하여 Glass frit을 이용하여 접합한다. 이때 신호선과 바이어스 라인은 평면으로 림 아래를 관통하게 되므로 추가적인 구조의 변화 없이 실리콘 캡의 접합만 이루면 되는 구조이다. 접착제로 사용하는 glass frit은 RF 특성이 우수하고 밀봉 실장이 가능할 뿐만 아니라 화학적으로도 매우 안정하면서 간단한 공정을 통해 형성이 가능하므로 MEMS 구조물의 실장에 적합하다고 할 수 있다.

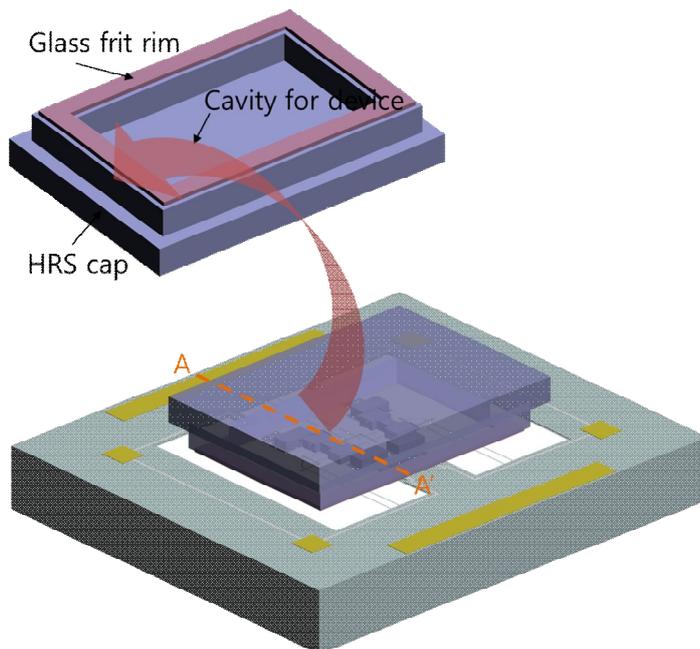


그림 5. 1 Glass frit을 이용한 실장의 개략도

5.2 Glass frit을 이용한 실장 과정

그림 5.1의 A-A' 를 잘랐을 때의 모습을 나타낸 glass frit을 이용한 실장 과정을 그림 5.3에 나타내었다. 먼저 고저항 실리콘의 접합면에 소자가 들어가기에 충분한 크기의 공동과 후에 절삭(dicing)으로 분리되기 쉽도록 작은 공동(cutting space)을 건식 식각을 통해 형성한다. 제작된 스위치 구조체의 두께가 대략 80 μm 이므로 본 구에서는 100 μm 깊이의 공동을 형성하였다. 형성된 림 위에 스크린 프린팅 기법을 이용하여 glass frit을 도포하여 열처리를 거친다. 세 번의 열처리를 거치도록 하는데 첫 번째는 110 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 10분간 가열하여 도포된 glass frit 표면의 용제(solvent)를 날려준다. 그 후 300 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 30 분간 열처리를 하는데 이 과정을 통하여 유기 첨가제를 방출하게 된다. 마지막으로 410 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 한번 녹이는 과정을 거치는데 이를 통해 glass frit안에 갇혀 있는 모든 가스가 배출되고 조밀한 유리 형태를 가진다. 세 번의 열처리는 연속적인 과정으로 이루어지는데 본 연구에서 행해진 열처리 과정을 그림 5.2에 나타내었다. Glass frit의 열처리가 끝난 실리콘 기판은 소자가 제작된 기판과 430 $^{\circ}\text{C}$ 의 열과 1500 N의 압력을 15분간 주면서 결합시킨다. 결합이 완료된 후 다이싱(Dicing)을 통해 실리콘 기판의 불필요한 부분을 잘라내어 실장을 완료한다.

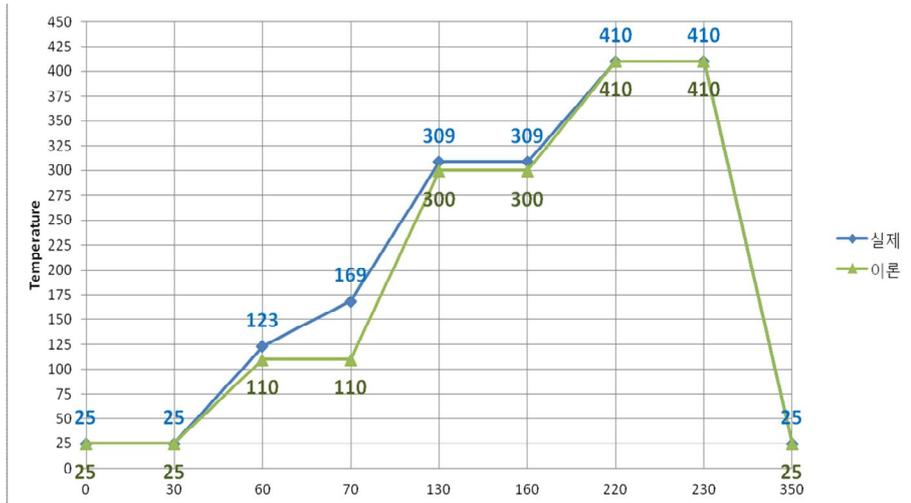


그림 5. 2 glass frit의 열처리 과정

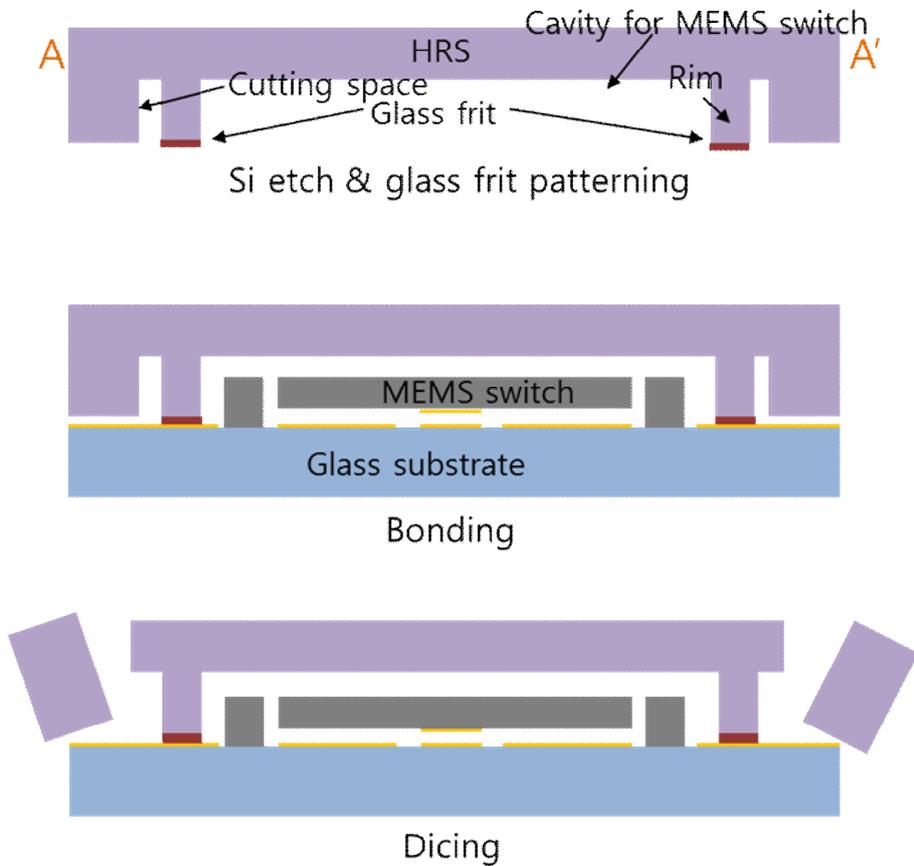


그림 5. 3 RF MEMS 스위치의 실장 과정

실장이 완료된 기관의 사진과 단면도를 분석한 SEM 사진을 통해 실장이 잘 이루어 졌음을 확인할 수 있다(그림 5.4).

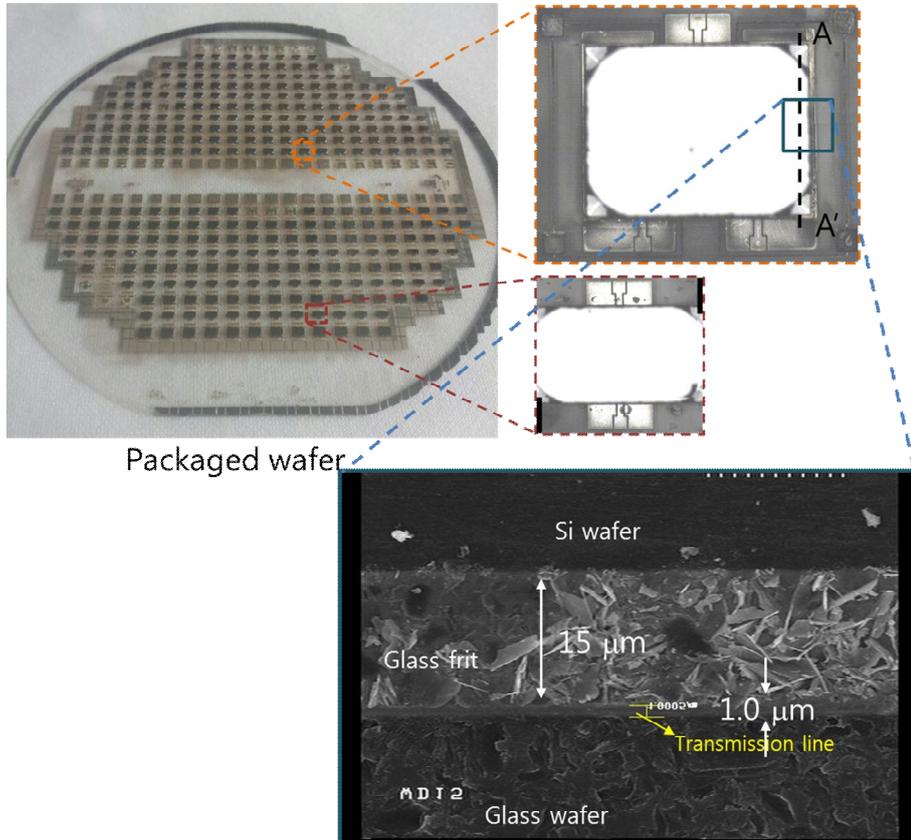


그림 5.4 실장된 웨이퍼의 현미경 이미지와 SEM 단면도

5.3 실장 특성 측정

Glass frit을 이용한 실장의 전단 강도 측정을 위하여 그림 5.5와 같이 Daze 社의 Daze 400 장비를 이용하여 실험을 진행하였다. 실험 방법은 실장된 소자의 실리콘 캡 한쪽 부분을 밀어서 떨어져나갈 때의 미는 힘을 측정하였다. 이때 실리콘 캡의 파손에 의해 떨어져나가는 경우도 발생하므로 캡을 분리 후 현미경 사진으로 관찰하여 림의 파손이 일어나지 않은 경우를 유의미한 측정으로 보았다.

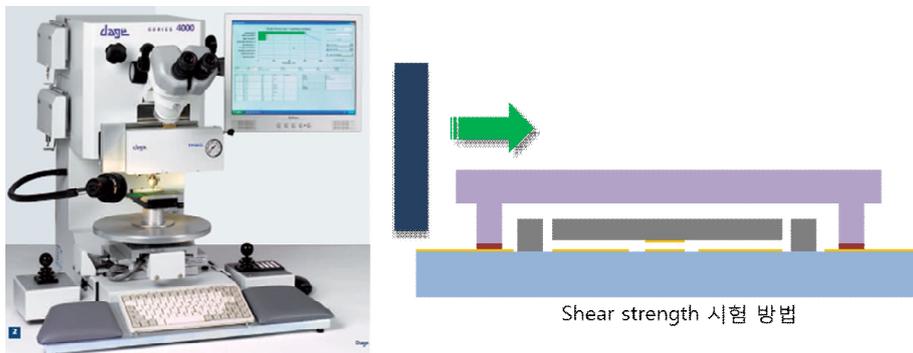


그림 5.5 실장된 소자의 전단 강도 측정 장비와 방법

7개의 샘플에 대한 전단 강도를 측정해 본 결과 최소 18.0 MPa에서 최대 32.5 MPa까지의 힘을 견디는 것으로 나타났고 평균 24.7(Std. 4.9) MPa의 전단 강도 결과를 얻었다. 미국의 mil-std-883E 규격에 의하면 소자의 실장 강도에 대한 조건이 기술되어 있는데 $0.3 \text{ mm}^2 \sim 4 \text{ mm}^2$ 의 면적을 가지는 소자에 대한 전단 강도 조건을 6 MPa 이상으로 규정하고 있다. 본 연에서 개발한 RF MEMS 스위치의 실장을 위한 캡의 면적이 2.7 mm^2 내외이므로 실장 후 전단 강도

측정이 규격에 만족 함을 알 수 있다.

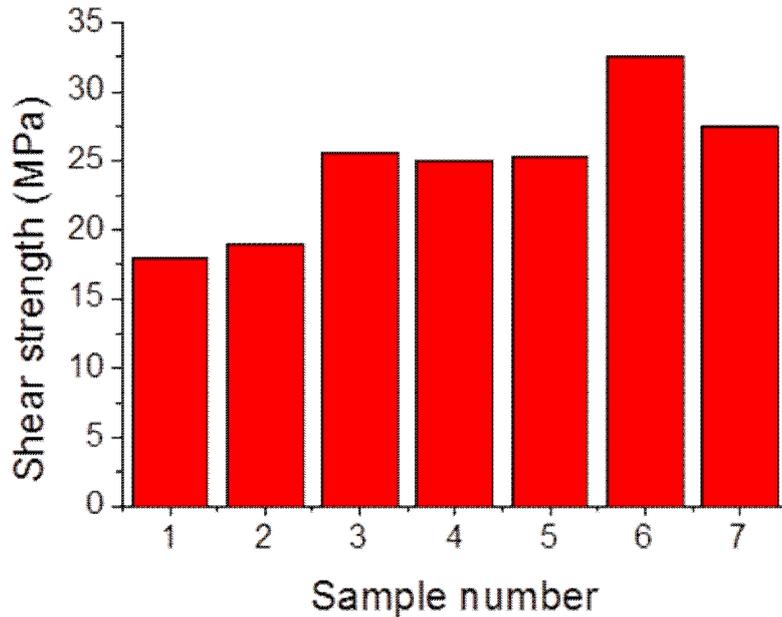


그림 5.6 실장된 소자의 전단 강도 측정 결과

본 연구에서 제안하는 glass frit을 이용한 접합 실장의 밀봉 정도를 관찰하기 위하여 헬륨 누수 실험을 시행하였다. 누수 실험은 한국표준과학연구원에서 이루어 졌고 실험 방법은 24시간 헬륨에 노출시킨 후 진공 챔버 안에서 10 분간 검출되는 헬륨의 양을 측정하였다. 한 번의 실험마다 40 개의 샘플을 묶음으로 하여 측정하였고 그 결과를 그림 5.7에 나타내었다. 측정 결과 실험 초기 평균적으로 1.63×10^{-8} mbar l/s 의 누수율을 기록하였으나 10분 후에는 9.49×10^{-9} mbar l/s를 기록하였다. 측정 값은 40개 샘플에 대한 값이므로 이를 1 개의 샘플 당 누수율은 2.37×10^{-10} 으로 밀봉이 잘 되었음을 알 수 있다. Mil-std-883E에는 부피가 0.01 cc이하인 경우 5×10^{-8} mbar l/s 이하로 규정하고 있는데 본 연구에서 제안한

실장의 부피는 0.00027 cc 이므로 규정을 만족하고 있다.

전단 강도 측정과 헬륨 누수 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 glass frit을 이용한 실장이 완벽한 밀봉 실장(hermetic package)이 가능한 것으로 나타났다.

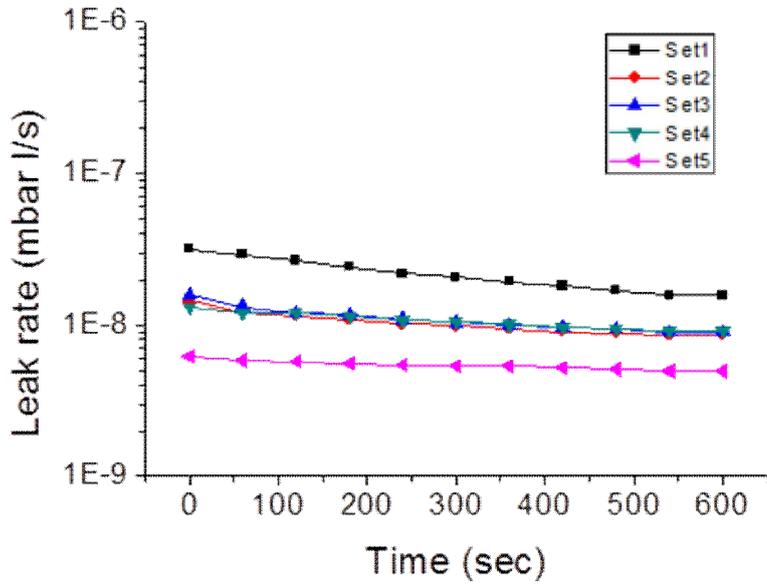
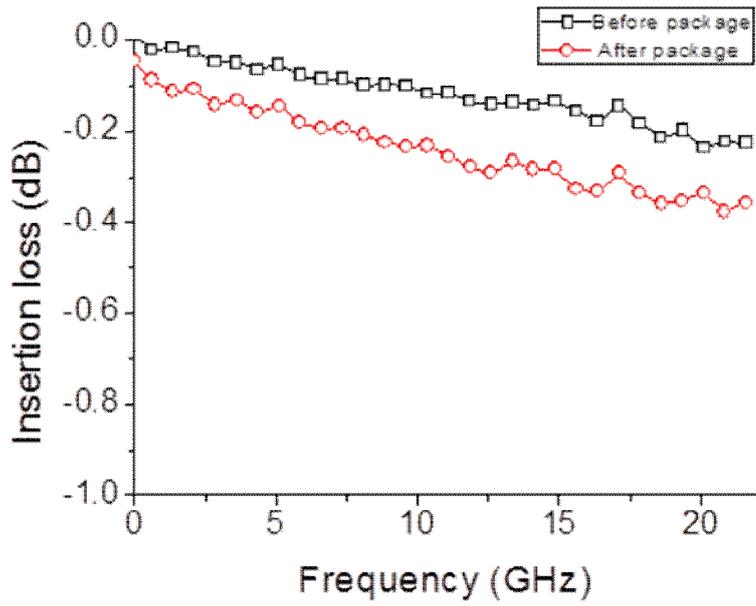


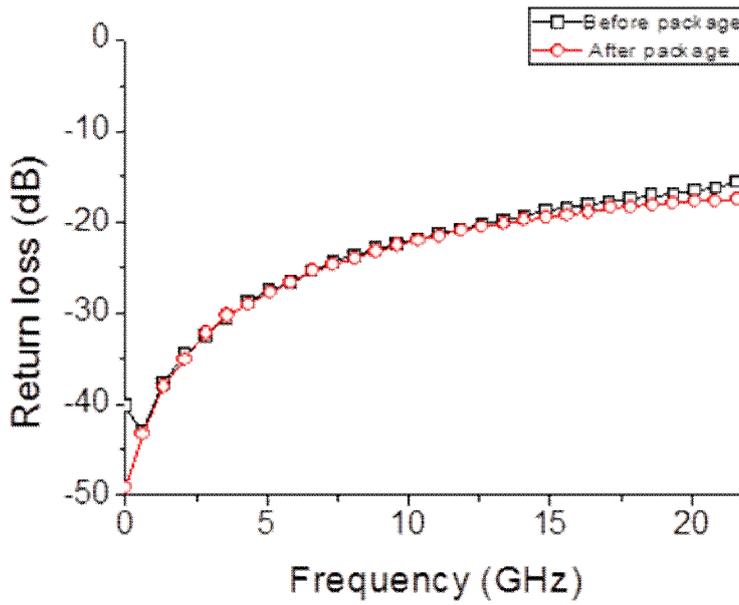
그림 5.7 실장 후 헬륨 누수 측정 결과

5.4 실장 후 스위치의 RF 성능

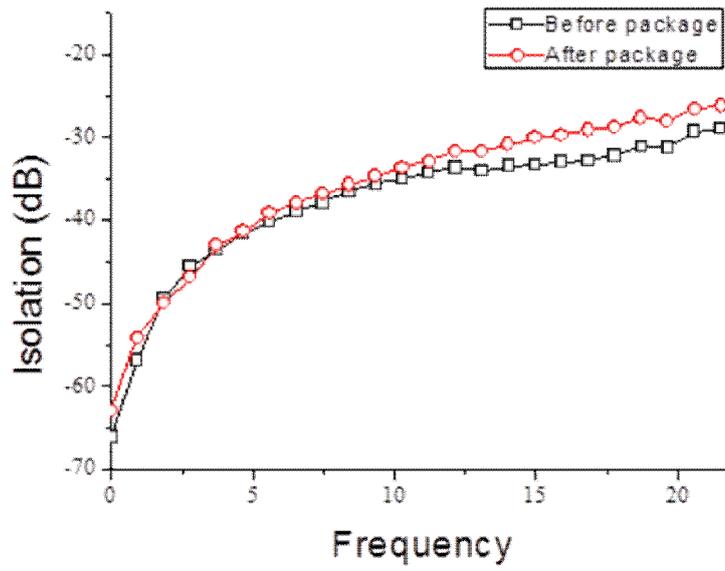
제작된 RF MEMS 스위치의 실장 후 RF 성능을 측정 하였다. 4장의 측정에서와 동일하게 50 V의 구동 전압을 인가하여 측정한 결과 18 GHz까지 0.4 dB이하의 삽입 손실을 나타내었는데 실정 전과 비교하여 0.1 dB정도 손실이 늘어났다. 이는 실장 캡으로 고저항 실리콘을 사용하더라도 림 부분에서 형성되는 신호의 누수를 완전히 막을 수 없기 때문이다. 반사도의 경우 실장 후 18 GHz까지 18 dB이상의 값을 가지는 것으로 측정되었고 스위치가 열린 상태일 때의 격리도는 27 dB이상으로 우수함을 알 수 있다. 실장 후의 RF 성능은 군용 레이더의 송수신기에 이용 가능한 성능으로 확인 되었다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 8 실장 전후 RF MEMS 스위치의 RF 성능 비교

5.5 제작한 RF MEMS 스위치의 성능 요약 및 비교

표 5.1에는 본 연구에서 제작한 고전력 RF MEMS 스위치와 타 그룹에서 개발한 스위치의 성능을 비교 하였다. 삽입 손실과 격리도 측면에서 보았을 때 동일 주파수 대역일 경우 금속 스위치들과 대등한 손실 정도를 나타내면서 보다 우수한 격리도 특성을 나타내고 있고 Omron 社の 실리콘 스위치와 비교하였을 때 두 가지 특성에서 모두 우수한 결과를 나타내었다. 본 연구에서 개발한 스위치는 10 W의 고전력 수용이 가능하여 Radant 社の 스위치와 대등한 결과를 나타내지만 실리콘 구조체를 사용하여서 넓은 크기의 전극을 안정적으로 제작 가능하였고 그 결과 구동 전압의 경우 절반 가량인 50 V를 기록하였다. 이는 GaN 소자의 구동 전압과 비슷한 수준으로서 승압 회로와 추가적인 요소 없이도 집적이 가능할 것으로 기대된다.

표 5.1 타 그룹 스위치와의 성능 비교

	Metallic switches			Silicon switches	
	Radant (SPDT)	UCSD (SPST)	DelfMEMS (SPST)	OMRON (SPST)	This work (SPDT)
Structure material	Gold	Gold	Gold	Silicon	Silicon
Actuation type	Electrostatic	Electrostatic	Electrostatic	Electrostatic	Electrostatic
Actuation voltage	90 V	90 V	N/A	34 V	50 V
Insertion loss	< 0.5 dB @ 20 GHz	< 0.5 dB @ 20 GHz	< 0.2 dB @ 3 GHz	< 1.0 dB @ 10 GHz	< 0.5 dB @ 20 GHz
Isolation	> 17 dB @ 20 GHz	> 20 dB @ 20 GHz	N/A	> 30 dB @ 10 GHz	> 25 dB @ 20 GHz
Power handling (cold switching)	10 W @ 10 GHz 10 ⁹ cycles	5 W @ 500 MHz 10 ⁸ cycles	3 W @ 7 GHz	10 W @ 500 MHz 10 ⁸ cycles	10 W @ 10 GHz 1.2x10⁹ cycles
Packaging	Hermetic	No	No	Hermetic	Hermetic

제 6 장 결 론

본 논문에서는 군용 레이더의 송수신기의 고집적화와 소형화를 위해 필요한 써클레이터의 대체 소자로서 RF MEMS 스위치를 제안하였다. 이 때 송수신기로 RF MEMS 스위치가 응용되기 위해서는 우수한 RF 특성과 더불어 고전력 수용이 가능하면서 수 억번 이상의 반복 수명이 보장되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 고성능의 RF 특성을 가지면서 고전력 수용이 가능한 RF MEMS 스위치를 구현하는 것을 목표로 하였다.

제안된 RF MEMS 스위치는 고전력 수용을 위하여 mN 단위의 복원력을 확보하고 송수신기 적용을 위한 적절한 구동 전압을 가지면서 최적화된 구조체의 설계를 제안하여 높은 격리도와 복원력을 갖도록 하였다. 설계된 치수는 시뮬레이션을 이용하여 다시 한번 검증하여 구조체의 설계가 적합함을 보였다. 고전력 수용을 위하여 열 해석을 기본으로 하여 인가하는 전력에 의해 증가하는 최대 온도를 분석하였고 발생하는 열을 최소화 하면서 열에 강한 구조의 접촉 부분을 설계 하였다. 열에 강한 루테튬과 같은 금속을 접촉 금속으로 사용하기 위해서는 금을 사용할 때보다 높은 접촉력을 필요로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 실리콘 구조체 안에 공동 안에 접촉 금속을 형성하여 접촉 금속의 두께를 자유롭게 증가 시키더라도 접촉 후 전극간의 간격을 최소화 하여 높은 접촉력을 확보 할 수 있도록 하였다. 이를 통해 열에 강한 접촉 부분 설계가 가능해 졌을 뿐만 아니라 접촉 저항의 감소로 인해 삽입 손실이 감소 되는 효과를 기대할 수 있다.

제안된 스위치는 실리콘 기판에 구조체를 형성하고 유리 기판에 전송선로를 제작한 후 양극 접합을 통해 실리콘 기판의 구조체를 유리 기판 위에 붙이는 방법을 사용하였다. 이 때 실리콘 기판에서 접촉 금속의 두께는 스위치의 접촉 후 간격을 결정 하게 되는데 이는 스위치의 접촉 저항에 큰 영향을 미치므로 균일한 두께의 제작이 이루어져야 한다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 실리콘 기판에 공동을 형성한 후 SiO_2 로 틀을 형성하여 도금을 하고 CMP 공정을 통해 평탄화 함으로써 웨이퍼 전체에서 균일한 높이의 접촉 금속 형성이 가능하도록 하였다. 양극 접합 후 릴리즈 과정에서 발생하는 식각 후 잔류물을 제거하기 위하여 루테튬 표면 또는 금 표면과 잔류물 사이의 접착을 끊는 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 친핵체를 가진 EKC 265 용액을 사용하여 금속표면 위에 있는 유기물질 및 폴리머들을 분리시키는 역할을 해주어 루테튬 표면의 잔류물을 제거 하도록 하였다.

제작된 스위치는 현미경 이미지와 SEM을 통하여 분석하여 제작이 잘 이루어 졌는지를 확인 하였고 설계 치수와의 비교를 통해 공정 과정의 확립이 적절이 이루어 졌음을 보였다. 제작된 스위치는 정전 구동 특성과 RF 성능 그리고 신뢰성을 평가하고 분석하여 군용 레이더의 송수신기에 응용이 가능함을 보였다. 풀인 전압(풀인 voltage)과 구동 전압(Actuation voltage)를 측정하고 이 때의 스위치 접촉 저항을 확인한 결과 0.3~0.5 Ω 의 낮은 접촉 저항을 확인하였다. 제작된 스위치는 18 GHz에서 0.4 dB 이하의 삽입 손실을 보였고 25 dB 이상의 반사도와 격리도 특성을 보여 RF 성능이 우수함을 확인하였다. RF 측정 결과는 시뮬레이션 결과의 비교하여 유사한 결과 임을 통해 제작이 잘 이루 졌음을 알 수 있다. 제작된 스위치의 신뢰도는 10 W의 고전력 수용을 몇 번이나 가능한지를 통해 평가하였다. 콜드 스위칭 방법을 통해 반복 수명을 시험 한 결과 12억

번 이상의 반복 구동을 확인하였고 시험 후 스위치의 접촉저항과 삽입손실의 열화가 없는 것으로 보아 제작된 스위치가 10 W의 고전력을 수용할 수 있음을 보였다.

본 연구에서 개발한 스위치는 타 그룹의 고전력 스위치와 비교하여도 낮은 수준의 삽입손실을 가지고 격리도 특성에서는 보다 우수한 값을 가진다고 할 수 있을 뿐만 아니라 현재 가장 높은 수준의 고전력 수용 특성을 가지고 있다. 제작된 스위치가 비록 Radant 社의 스위치와 대등한 전력 수용 능력을 가지지만 50 V 대의 낮은 구동 전압 특성을 가지고 있으므로 GaN 소자와 결합될 경우 추가적인 구동 회로 없이도 집적될 수 있을 것으로 기대된다.

모든 측정 결과들 토대로 보았을 때 1장에서 언급한 군용 레이더의 송수신기에 응용 되기에 충분한 결과이므로 추후 레이더의 송수신기에 제안한 RF MEMS 스위치가 적용 가능 하며 송수신기의 초소형화에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] H. S. Newman, J. L. Ebel, D. Judy, and J. Maciel, "Lifetime measurements on a high-reliability RF-MEMS contact switch," *IEEE Microwave and Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 100-102, Feb. 2008.
- [2] D. Hyman, A. Schmitz, B. Warneke, T. Y. Hsu, J. Lam, J. Brown, J. Schaffner, A. Walston, R. Y. Loo, G. L. Tangonan, M. Mehregany, and J. Lee, "Surface micromachined RF MEMS switches on GaAs substrates," *Int. J. RF Microw. CAE*, vol. 9, pp. 348-361, Aug. 1999.
- [3] P. M. Zavracky, S. Majumder, and N. E. McGruer, "Micromechanical switches fabricated using nickel surface micromachining," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 3-9, Mar. 1997.
- [4] P. M. Zavracky, N. E. McGruer, R. H. Morrison, and D. Potter, "Microswitches and microrelays with a view toward microwave applications," *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 338-347, 1999.
- [5] D. Hyman, A. Schmitz, B. Warneke, T. Y. Hsu, J. Lam, J. Brown, J. Schaffner, A. Walston, R. Y. Loo, M. Mehregany, and J. Lee, "Surface-micromachined RF MEMS switches on GaAs substrates," *Int. J. RF Microwave Computer-Aided Eng.*, vol. 9, pp. 348-361 1999.
- [6] N. S. Barker and G. M. Rebeiz, "Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wideband switches," *IEEE Trans.*

- Microwave Theory Tech., vol. 46, pp.1881–1890, 1998.
- [7] S. P. Pacheco, L. P. B. Katehi, and C. T.-C. Nguyen, "Design of low actuation voltage RF MEMS switch," IEEE MTT–S Int. Microwave Symp. Dig., pp.165–167 2000.
- [8] A. De Silva, C. Vaughan, D. Frear, L. Liu, S. Kuo, J. Foerstner, J. Drye, J. Abrokwah, H. Hughes, C. Amrine, C. Butler, S. Markgraf, H. Denton, and S. Springer, "Motorola MEMS switch technology for high frequency applications," in Proc. Microelectromech. Syst. Conf., Aug. 2001, pp. 22–24.
- [9] J. J. Yao and M. F. Chang "A surface micromachined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from dc up to 4 GHz," The 8th International Conference on Solid–State Sensors and Actuators Digest, pp.384–387 1995.
- [10] D. A. Goins, R. D. Nelson, and J. S. McKillop, "Design of a 20GHz low loss ohmic contact RF MEMS switch," in IEEE MTT–S Int. Microwave Symp. Dig., 2007, pp. 371–374.
- [11] T. Seki, Y. Uno, K. Narise, T. Masuda, K. Inoue, S. Sato, F. Sato, K. Imanaka, and S. Sugiyama, "Development of a large–force low–loss metal–contact RF MEMS switch," Sens. Actuators A, vol. 132, no. 2, pp. 683–688, 2006.
- [12] R. E. Mihailovich, M. Kim, J. B. Hacker, E. A. Sovero, J. Studer, J. A. Higgins, and J. F. DeNatale, "MEM relay for reconfigurable RF circuits," IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., vol. 11, pp.53–55, 2001.
- [13] G. M. Rebeiz and J. B. Muldavin, "RF MEMS switches and switch

- circuits,” IEEE Microwave Mag., vol. 2, no. 4, pp. 59–71, Dec. 2001.
- [14] M. Kim, J. B. Hacker, R. E. Mihailovich, and J. F. DeNatale, “A monolithic MEMS switched dual path power amplifier,” IEEE Microwave and Wireless Compon. Lett., vol. 11, no. 7, pp. 285–286, July 2001.
- [15] Goldsmith, J. Ehmke, A. Malczewski, B. Pillans, S. Eshelman, Z. Yao, J. Brank, and M. Eberly, "Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches," IEEE MTT–S Int. Microwave Symp. Dig., vol. 1, pp.227–230, 2001.
- [16] J. Papapolymerou, K. L. Lange, C. L. Goldsmith, A. Malczewski, and J. Kleber, "Reconfigurable double–stub tuners using MEMS switches for intelligent RF front–ends," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 51, pp.271–278, 2003.
- [17] G. L. Tan, R. E. Mihailovich, J. B. Hacker, J. F. DeNatale and G. M. Rebeiz, “Low–loss 2–and 4–bit TTD MEMS phase shifters based on SP4T switches,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn, vol. 51, no. 1, pp. 297–304, Jan. 2003.
- [18] G. M. Rebeiz, C. D. Patel, S.K. Han, *et al.*, “The Search for a Reliable MEMS Switch?,” IEEE Microwave Magazine, vol.13, pp.57–67, Feb 2013.
- [19] RF MEMS Theory, Design, and Technology. Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [20] L. P. B. Katehi, J. F. Harvey, and E. Brown, "MEMS and Si micromachined circuits for high–frequency applications," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, pp.858–866, 2002.

- [21] D. Peroulis, S. Pacheco, K. Sarabandi, and L. P. B. Katehi, "Tunable lumped components with applications to reconfigurable MEMS filters," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 1, pp.341–344 2001.
- [22] J. J. Hung, L. Dussopt and G. M. Rebeiz, "2-bit and 3-bit W-band RF MEMS phase shifters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 2, pp. 600–606, Feb. 2004.
- [23] C. Bozler, R. Drangmeister, S. Duffy, M. Gouker, J. Knecht, L. Kushner, R. Parr, S. Rabe, and L. Travis, "MEMS microswitch arrays for reconfigurable distributed microwave components," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 1, pp.153–156, 2000.
- [24] N. Somjit, G. Stemme, and J. Oberhammer, "Binary-coded 4.25-Bit Wband monocrystalline-silicon MEMS multi-stage dielectricblock phase shifters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 57, no. 11, pp. 2834–2840, Nov. 2009.
- [25] R. G. Polcawich, D. Judy, J. S. Pulskamp, S. Trolrier-Mckinstry, and M. Dubey, "Advances in piezoelectrically actuated RF MEMS switches and phase shifters," in *Proc. IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp.*, 2007, pp. 2083–2086.
- [26] B. A. Cetiner, L. Jofre, C. H. Chang, J. Y. Qian, M. Bachman, G. P. Li, and F. De Flaviis, "Integrated MEM antenna system for wireless communications," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp.1333–1337, 2002.
- [27] McKillop, J.S., "RF MEMS Switch ASICS," *Microwave Conference*, 2007. *APMC 2007. Asia-Pacific*, pp.1–4, Dec.

2007.

- [28] 김종만, “웨이퍼 단위로 실장된 단결정 실리콘 SP9T Rf MEMS 스위치에 관한 연구,” 공학 박사 학위 논문, 서울대학교 대학원 전기 컴퓨터 공학부, 2007년 8월.
- [29] De Silva, A.P.; Hughes, H.G.; "The package integration of RF-MEMS switch and control IC for wireless applications," *Advanced Packaging, IEEE Transactions on*, vol.26, no.3, pp. 255–260, Aug. 2003..
- [30] S. K. Reynolds, A. S. Natarajan, M. Tsai, S. Nicolson, J. C. Zhan, L. Duixian, D. G. Kam, O. Huang, A. Valdes-Garcia, and B. A. Floyd, “A 16-element phased-array receiver IC for 60-GHz communications in SiGe BiCMOS,” in *Proc. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp.*, May 2010, pp. 461–464.
- [31] C. D. Patel and G. M. Rebeiz, “RF MEMS switches with mN contact and release forces and low process sensitivity,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 59, no. 5, pp. 1230–1237, May 2011.
- [32] H. S. Newman, J. L. Ebel, D. Judy, and J. Maciel, “Lifetime measurements on a high-reliability RF-MEMS contact switch,” *IEEE Microwave and Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 100–102, Feb. 2008
- [33] (2009). RF MEMS switch. Omron Electronic Components LLC. Schaumburg, IL. [Online]. Available: www.components.omron.com
- [34] Kim, Jong-Man, et al. "The SiOG-based single-crystalline silicon (SCS) RF MEMS switch with uniform characteristics,"

- Journal of Microelectromechanical Systems, pp. 1036–1042, 2004.
- [35] Patton, S. T., and J. S. Zabinski, "Fundamental studies of Au contacts in MEMS RF switches," *Tribology Letters* vol. 18, no. 2, pp. 215–230, 2005.
- [36] 황성현, "단결정 실리콘 RF MEMS 스위치를 이용한 가변 CRLH-TL의 제작 및 특성에 대한 연구," 석사 학위 논문, 서울대학교, 2009년 8월.
- [37] 황정기, "Glass reflow를 이용한 저손실 RF MEMS 실리콘 스위치의 설계 및 제작," 석사 학위 논문, 서울대학교, 2013년 8월.
- [38] Jad B. Rizk, Elie Chaiban and Gabriel M. Rebeiz, "Steady State Thermal Analysis and High-Power Reliability Considerations of RF MEMS Capacitive Switches," in *Proc. IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp.*, 2002, pp. 239–243.
- [39] R. Holm, *Electrical Contacts: Theory and Application*, 4th ed. NewYork: Springer, 1967.

Abstract

Study on SCS RF MEMS switch for High Power Application

Hwang Sung-Hyun

Dept. of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The RADAR system which is the most important part of defense system has been improving from brick type to tile type in order to be integrated highly and small size. A circulator need to be replaced with new device because it takes possession of the largest space in TRM. A RF MEMS switch is proposed as alternate device of circulator. The RF MEMS switch should guarantee 10^9 cycles of life time with high power over 10 W as well as high RF performances in order to be applied to LADR system. Thus the purpose of this study is design and development of the RF MEMS switch with high power handling.

The proposed RF MEMS switch has restoring force over 1 mN for high power handling, actuation voltage under 50 V to be applied to TRM and optimized structure. The designed dimensions are verified by the FEM simulator. The designed switch has high isolation over

25 dB by the optimized structure. The switch's temperature rising by RF power is analyzed by thermal analyses in order to design that the switch overcomes 10 W of RF power. From the analyses, the generated heats in RF mems switch are minimized and the contact structure is designed to resist heat. Making contact material inside the cavity in the silicon structure reduces the gap between electrodes after the switch is contact state although the thickness of contact material is increased to sub-micron. As a result, the designed switch is expected to have an extremely high contact force with nearly 10 mN. This result means that the switch has lower contact resistance under 1Ω so it decreases the temperature rising by power and insertion losses of the switch even if the switch employ ruthenium for contact material which has high softening point and withstand heat.

In order to realize the proposed switch the fabrication processes must be established including photo lithography, etch process and so on. The proposed switch use fabrication method of anodic bonding to transfer the structure made on silicon wafer to glass wafer where the transmission lines and bias lines are defined. The dimensions of contact parts including contact metal's thickness are highly effective on the switch's characteristics such as contact force and actuation voltage because the dimensions decide the gap between the switch's electrodes after on state. If the contact material is formed by electroplating, the thickness of the material is ununiformed. To solve this problem CMP process using thick SiO_2 mold for electroplating is proposed. The SiO_2 layer is sufficiently

hard that it does not broken by CMP process. The thickness of the contact material is controlled by thickness of the SiO² layer. By the proposed method the uniformity for the material's thickness is improved. Post etch residues (PER) generated during the release process using deep-RIE must be removed because they disturb switch's contact or short between electrodes so that the switch shows actuation fail. In this study, the generation mechanism and material composition of the PER is analyzed. The EKC 265 which is commercially available is employed to remove the PER. The EKC 265 has nucleophiles so that it can break cohesion between noble metal and PERs.

The fabricated switch is inspected by using SEM. The fabricated switch's dimensions are well matched to designed values. It shows that the proposed fabrication process is well established.

The fabricated switch's performances in terms of electrostatic actuation, RF characteristics and life time are measured and analyzed to showing possibility for application to TRM. The measured $V_{\text{pull-in}}$ voltage of the switch is 41.6 V and there is no change in contact resistance over 50 V. At this time the contact resistance of the switch is 0.4 Ω . The switch shows that the insertion losses are smaller than 0.4 dB and the return losses are higher than 25 dB until 18 GHz. When the switch is off-state the isolations of the switch are lower than -25 dB until 18 GHz. The measured RF results are similar to the simulation results. The life time of the switch is evaluated by cold switching test with 10 W RF power. The switch tolerates the test over 1.2×10^9 cycles. After

the test, the switch do not shows structural deformation, increase of the contact resistance and degradation of the RF performances in terms of insertion loss and return loss. The results mean that the fabricated switch can handle RF power over 10 W.

Keywords : high power, 10 W, RF MEMS switch, life time, TRM

Student Number : 2010–30235