

논문 2002-11-3-06

## 복합 산화법과 MEMS 기술을 이용한 RF용 두꺼운 산화막 에어 브리지 및 공면 전송선의 제조

김국진\*, 박정용\*\*, 이동인\*\*, 이봉희\*\*\*, 배영호\*\*\*\*, 이종현\*\*, 박세일\*

### Fabrication of Thick Silicon Dioxide Air-Bridge and Coplanar Waveguide for RF Application Using Complex Oxidation Process and MEMS Technology

Kook-Jin Kim\*, Jeong-Yong Park\*\*, Dong-In Lee\*\*, Bong-Hee Lee\*\*\*,  
Yong-Hok Bae\*\*\*\*, Jong-Hyun Lee\*\*, and Se-Il Park\*

#### 요 약

본 논문에서는 양극반응과 복합 산화법( H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub> 분위기에서 500℃, 1시간 열산화와 1050℃, 2분간 RTO(Rapid Thermal Oxidation) 공정)를 이용한 두꺼운 OPSL(Oxidized Porous Silicon Layer)을 형성하여 이를 마이크로머시닝 기술을 이용함으로써 10 μm 두께의 OPS(Oxidized Porous Silicon) 에어 브리지를 제조하고, 그 위에 전송선로를 형성하여 그 RF 특성을 조사하였다. OPS 에어 브리지 위에 형성된 CPW(Coplanar Waveguide)의 손실이 OPSL 위에 형성된 전송선의 삽입손실보다 약 2 dB 정도 적은 것을 보여주었으며, 반사손실은 OPSL 위에 형성된 전송선의 반사손실보다 적으며 약 -20 dB를 넘지 않고 있다. 본 연구에서 개발한 산화된 다공질 실리콘 멤브레인 및 에어 브리지 구조는 CMOS 공정 후에 사용 가능하며, 초고주파 회로 설계시 편리성과 유용성을 제시하고 있다.

#### Abstract

This paper proposes a 10 μm thick oxide air-bridge structure which can be used as a substrate for RF circuits. The structure was fabricated by anodic reaction, complex oxidation and micromachining technology using TMAH etching. High quality films were obtained by combining low temperature thermal oxidation (500 °C, 1 hr at H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub>) and rapid thermal oxidation (RTO) process (1050 °C, 2 min). This structure is mechanically stable because of thick oxide layer up to 10 μm and is expected to solve the problem of high dielectric loss of silicon substrate in RF region. The properties of the transmission line formed on the oxidized porous silicon (OPS) air-bridge were investigated and compared with those of the transmission line formed on the OPS layers. The insertion loss of coplanar waveguide (CPW) on OPS air-bridge was (about 2 dB) lower than that of CPW on OPS layers. Also, the return loss of CPW on OPS air-bridge was less than about -20 dB at measured frequency region for 2.2 mm. Therefore, this technology is very promising for extending the use of CMOS circuitry to higher RF frequencies.

- 
- \* 한국표준연구원(Korea Research Institute of Standards and Science)
  - \*\* 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook Nat'l University)
  - \*\*\* 포항1대학 전자통신공학파(School of Electronic & Telecom. Eng., Pohang 1 College)
  - \*\*\*\* 위덕대학교 전자공학파(Dept. of Electronics, Uiduk University)
- <접수일자 : 2002년 1월 22일>

## 1. 서 론

통신 서비스 단말기용 마이크로웨이브 부품은 III-V 화합물 반도체와 실리콘 반도체에 의하여 주로 제작되고 있다. III-V 화합물 반도체는 한 기관에 단일 칩화하는 MMIC 형태로 기술 발전이 이루어지고 있으며, 실리콘 반도체는 기지국 용으로 주로 쓰이고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 단말기는 소

형화, 경량화 및 저 소비 전력형의 마이크로웨이브 소자를 요구하고 있어 현재에는 주로 GaAs 화합물 반도체가 이러한 요건을 만족하여 쓰이고 있으나, 향후 3~4년 이후에는 실리콘이 이를 대체할 것으로 예측된다. GaAs 기판은 반절연성이므로 고주파수 대역에서의 전송 특성이 양호하나 실리콘 기판과 비교할 때 비용이 많이 들고, 생산성이 낮아 비경제적이다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 일반적으로 높은 비저항을 가진 실리콘 기판을 이용하거나<sup>(2)</sup>, 실리콘 기판 위에 두꺼운 절연층을 형성한 다음 그 절연층 위에 수동소자나 전송선로를 제조하는 구조를 택하였다.<sup>(3,4,5,6)</sup> 그러나 높은 비저항을 갖는 실리콘 웨이퍼는 결정을 성장시키는데 많은 비용이 들고, 능동소자의 성능과 안정성이 문제가 되며, 또한 후속 열처리 공정으로 인하여 초기의 높은 비저항을 유지하기 어렵다.<sup>(7)</sup> 또한 기존의 집적회로 제조공정으로는 마이크로웨이브 영역에서 전송선로에서의 특성을 개선하고 소자간에 양호한 격리 특성을 얻기에 충분한 절연층을 형성하는 것이 거의 불가능하다. 이를 해결하기 위해 마이크로머시닝 기술을 이용하여 공중에 띄운 3-D 형태의 산화막을 제조하여 이 위에 전송선로 및 수동소자를 제작하는 연구가 보고되고 있다<sup>(8,9,10)</sup>. 그렇지만 그 특성은 우수하나 일반 집적회로 공정에서 제조되는 산화막 두께가 얇아 그 구조가 약하여 깨어지기 쉽다는 단점이 있다.

본 논문에서는 실리콘 기판의 결정상태를 유지하면서 표면적과 화학적 활성이 큰 PSL을 형성한 다음, 복합 산화법( $H_2O/O_2$  분위기에서  $500^\circ C$ , 1시간 열산화와  $1050^\circ C$ , 2분간 RTO (Rapid Thermal Oxidation) 공정)으로  $10 \mu m$  이상의 저온 OPSL(Oxidized Porous Silicon Layer)을 제조한 뒤, TMAH 용액을 이용한 표면 마이크로머시닝 기술을 사용하여 고주파영역에서 큰 손실을 일으키는 실리콘을 제거한 새로운 형태인 OPS(Oxidized Porous Silicon) 에어 브리지 구조를 형성시키는 방법을 개발하였고, 형성된 OPS 에어 브리지 산화막 위에 공면 전송선로를 제조하여 저온 OPSL 위에 제조한 전송선로와 그 전송 특성을 비교 분석하였다.

## II. 설계 및 제조

본 실험에서 사용된 시편은 (100)면의 p-형

기판 위에 저압 화학 기상 증착(low pressure chemical vapor deposition: LPCVD)법을 이용하여  $1500 \text{ \AA}$ 의 질화막을 성장시킨 웨이퍼로,  $2 \times 2 \text{ cm}$ 의 시편을 이용하여 실험을 수행하였다.

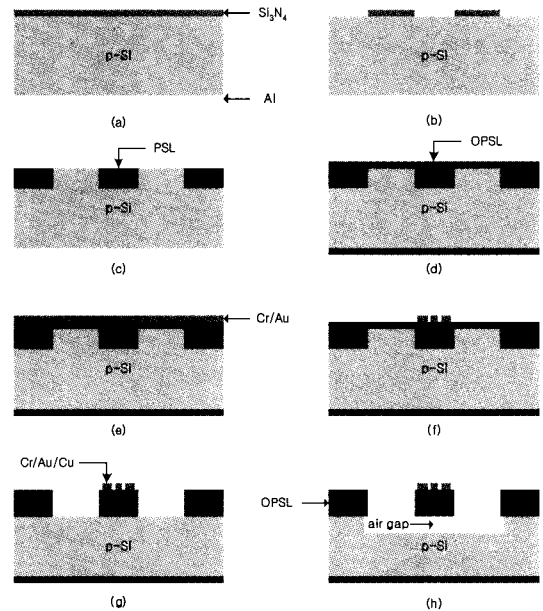


그림 1. OPS 에어 브리지 제조 공정의 단면도.  
Fig. 1. Cross section of the fabricated structures.

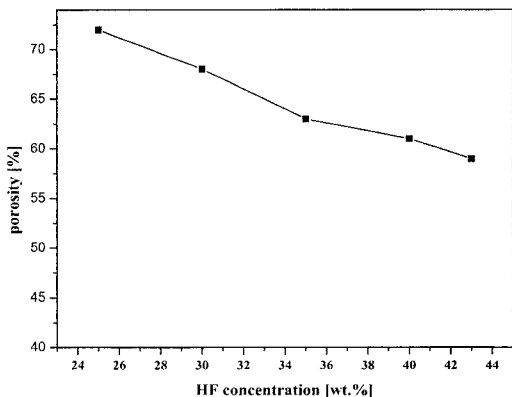
그림 1은 OPS 에어 브리지 제조 공정의 단면도를 나타낸 것이다. 먼저 웨이퍼를 초기 세척한 다음 양극반응시 저항성 접촉을 좋게 하기 위하여 뒷면에 붕소(boron)를  $1050^\circ C$ 에서 20분간 열 확산시킨 후 열 확산시 생성된 BSG(boron silica glass)를 제거하고 알루미늄(Al)을 진공 열 증착기를 이용하여 전극을 형성하였다(Fig. 1(a)). 앞면에 PR(photo resist)로 코팅한 후 마스크 작업을 통해 양극반응을 실행할 영역을 정의하고 RIE(reactive ion etching)를 이용하여 실리콘 질화막을 식각한 후 PR을 제거하였다(Fig 1(b)). 양극 반응조에 시편을 장착하고 양극반응을 수행하여 다공질 실리콘 층(PSL)을 형성하였다. 이때 전류밀도는  $20 \text{ mA/cm}^2$ 이었고, 반응용액은 43 wt.% 불산 이었다(Fig. 1(c)). 양극반응 후 저온 산화법을 수행하기 전에 불산 원액에 넣어 실리콘 질화막과 알루미늄을 제거한 후 진공 챔버(chamber) 속에서 기공 속의 잔존 물질을 제거하였다. 다음 공정으로 새

로운 복합 산화법을 이용하여 PSL을 산화시켜 두꺼운 OPSL을 형성하였다(Fig 1(d)). OPSL 위에 전송선로를 형성하기 위해 열 증착기를 이용하여 0.25  $\mu\text{m}$  두께의 Cr/Au를 증착(Fig. 1(e))한 후, CPW(Coplanar Waveguide) 패턴 형성을 위해 OPSL 위의 금속을 식각시켰다.(Fig. 1(f)) 그리고 직렬저항을 줄이기 위해 CPW 라인 위에 2  $\mu\text{m}$  두께의 구리를 도금한 후, 표면 마이크로머시닝을 위해 마스크 작업을 한 후 RIE를 통해 실리콘을 10  $\mu\text{m}$ 정도 제거하였다(Fig. 1(g)). 마지막으로 TMAH 식각 반응조에 넣어 마이크로머시닝을 수행하여 OPS 에어 브리지를 형성하였다(Fig. 1(h)).

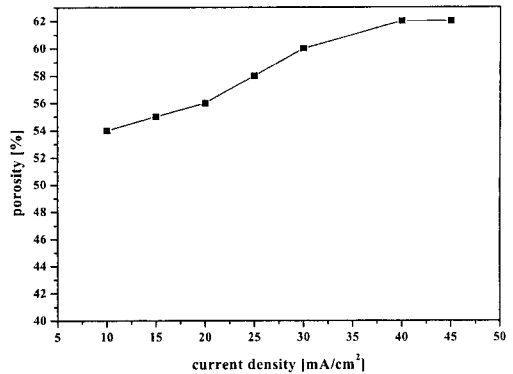
### III. 결과 및 검토

#### 3.1 PSL의 특성

다공질 실리콘을 산화시킬 때 웨이퍼에 스트레스(stress)를 주지 않는 최적 기공도인 56% 정도의 기공도를 가지는 다공질 실리콘층을 형성할 수 있는 조건을 찾기 위하여 다공질 실리콘층의 형성조건에 따른 기공도(시편의 무게를 이용하여 측정)를 조사하였다<sup>[11]</sup>. 다공질 실리콘층의 기공도 및 두께에 관계하는 변수로는 기관의 불순물 농도, 반응시의 전류밀도와 불산 용액의 농도, 반응시간 등이 있다. 그림 2는 불산 용액의 농도와 전류밀도의 변화에 따른 기공도를 보여주고 있다. 이 실험으로 56%의 기공도를 얻기 위한 조건은 불산 용액 43 wt.%, 전류밀도 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 임을 알 수 있었다.



(a) 불산 농도에 따른 기공도



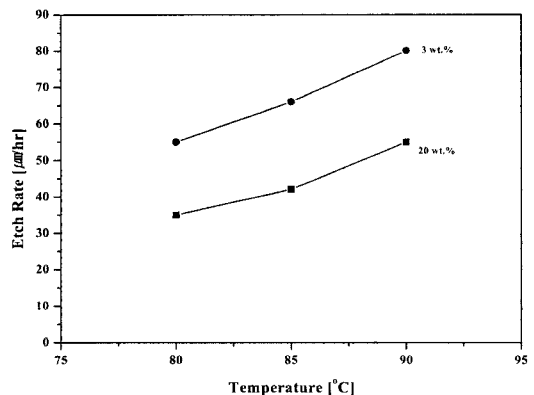
(b) 전류밀도에 따른 기공도

그림 2. 불산용액과 전류밀도에 관계된 PSL의 기공도.

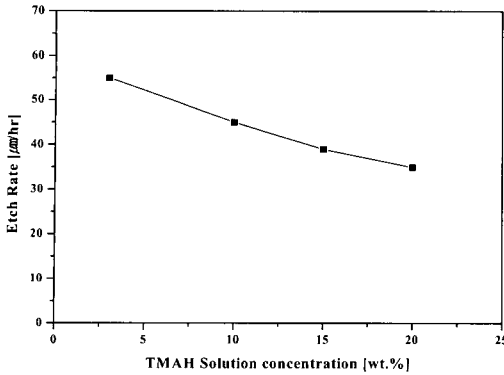
Fig. 2. The porosity of PSL with respect to HF concentration and current density.

#### 3.2 TMAH의 식각특성

그림 3은 온도 및 농도에 따른 실리콘의 식각률을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 일정한 TMAH wt.% 농도에 대해 온도를 80  $^{\circ}\text{C}$ , 85  $^{\circ}\text{C}$ , 90  $^{\circ}\text{C}$ 로 각각 변화를 주었을 때 p-형 (100) 실리콘의 식각률 변화를 보여주고 있다. 본 실험에서 TMAH 수용액의 농도를 일정하게 유지하고 온도를 변화시키면서 실리콘의 식각률을 측정 한 결과, 온도가 증가함에 따라 식각률이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 다음 실험으로는 온도를 일정하게 유지하고 TMAH 수용액의 농도를 변화시키면서 식각률 측정과 식각 표면의 상태를 관찰하였다.



(a) 온도에 따른 식각률



(b) TMAH 농도에 따른 식각률

그림 3. 온도 및 농도에 따른 실리콘의 식각률.  
Fig. 3. The etch rate with respect to temperature and TMAH concentration.

그림 3(b)에서 알 수 있듯이 온도를 80 °C로 일정하게 유지한 상태에서 TMAH 수용액을 이용하여 실리콘을 식각했을 때 수용액의 농도가 감소함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

### 3.3 OPS 에어 브리지 제조

앞의 양극반응 조건에 의해 10 μm 두께의 저온 OPSL을 형성한 후 80 °C, 20 wt.% TMAH 용액을 이용한 마이크로머시닝을 이용하여 OPS 에어 브리지를 형성하였다. TMAH 용액은 알루미늄을 식각하지 않는 성질 때문에 후면정렬과 같은 공정없이 모든 공정이 끝난 반도체 소자의 이방성 식각이 가능하다.

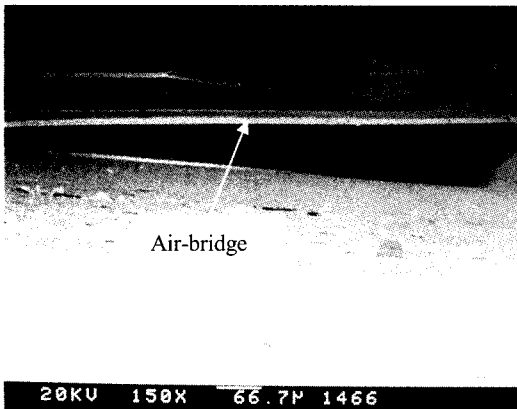


Fig. 4. OPS 에어 브리지의 SEM 사진.  
Fig. 4. The SEM image of OPS air-bridge.

OPSL이 <110>방향으로 식각될 때 (111)면이 드러나 거의 식각되지 않는 TMAH 용액의 이방성 특성 때문에, OPSL을 <100>방향으로 배열시킨 후 OPS 에어 브리지를 제조하기 위하여 마이크로머시닝을 수행하였다. 그림 4는 마이크로머시닝된 OPS 에어 브리지를 나타낸 것으로, 300 μm 폭 에어 브리지 전체가 마이크로머시닝이 되었으며, OPSL 밑에는 어떠한 실리콘도 남아있지 않는 것을 보여준다. 그 <100>방향의 식각률은 시간당 약 32 μm임을 알 수 있고, 마이크로머시닝된 OPS 에어 브리지의 두께는 약 10 μm이다. 그림 5는 시료의 단면도로 중요한 공면 전송선의 규격을 보여주고 있으며<sup>[12]</sup>, 이때 전송선의 길이는 2.2 mm이다.

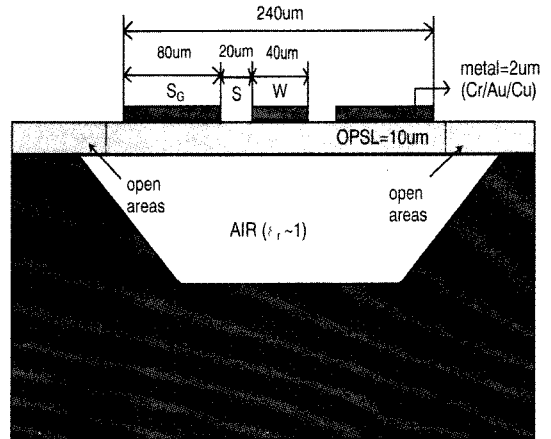
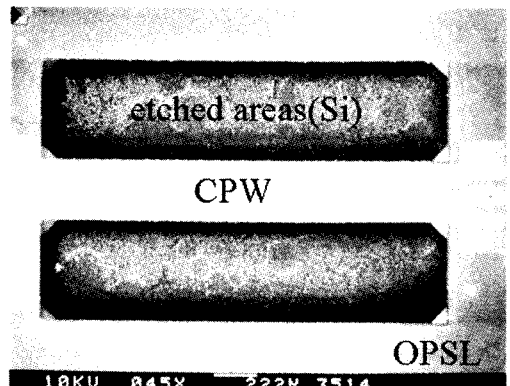
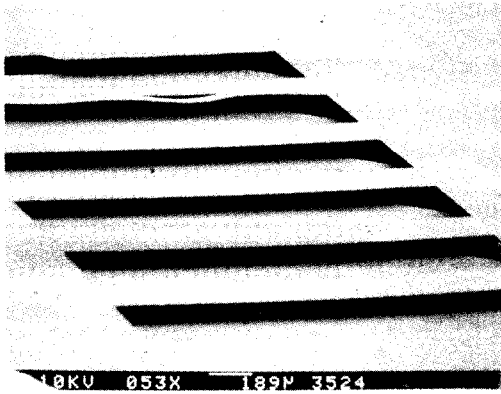


Fig. 5. 전송선의 단면을 나타내는 CPW의 개략도.  
Fig. 5. Simplified diagram of the coplanar waveguide for CMOS implementation showing the cross-section of the transmission line.



(a) 에어 브리지 위에 형성된 CPW



(b) 에어 브리지 형성 사진

Fig. 6. OPS 에어 브리지 위 CPW의 SEM 사진.

Fig. 6. SEM image of CPW on OPS air-bridge.

그림 6은 300  $\mu\text{m}$  폭의 OPS 에어 브리지 위에 제조된 CPW를 나타낸 것이다. 그 전송선의 규격은 OPS 에어 브리지의 폭제한에 따라서  $S-W-S_g = 40-20-80 \mu\text{m}$ 로 정했다.

OPS 에어 브리지 위에 제조된 CPW와 OPSL 위에 제조된 CPW와 비교하기 위하여, 그들의 S-파라미터를 주파수함수로 측정하였다. S-파라미터 측정은 HP8510b NA(주파수범위 45 MHz - 40 GHz)와 Cascade Microtech Probe(50 GHz까지)사용해서 수행하였다. 손실 계산식은 삽입손실 =  $|S_{21}|^2 / (1 - |S_{11}|)$ , 그리고 반사손실 =  $-20 \log |S_{11}|$ 이다<sup>[13]</sup>. 그림 7은 10  $\mu\text{m}$  두께의 PSL을 저온 산화시켜 형성된 산화막 및 OPS 에어 브리지 위에 제작된 공면 전송선로의 삽입손실 특성을 나타낸 것이다. OPS 에어 브리지 위에 형성된 공면 전송선의 손실이 저온 OPSL 위에 형성된 전송선의 삽입손실보다 약 2 dB 정도 적은 것을 보여준다. 이는 OPS 에어 브리지가 전송손실을 줄이는데 기여함을 알 수 있다. 그림8은 10  $\mu\text{m}$  두께의 저온 OPSL 및 OPS 에어 브리지 위에 제작된 공면 전송선로의 반사손실을 나타낸 것으로 OPS 에어 브리지 위에 제작된 공면 전송선로의 반사손실은 저온 OPSL 위에 형성된 전송선의 반사손실보다 적으며 약 -20 dB를 넘지 않고 있다. 반사손실이 주파수가 증가하면서 감소하는 것은 임피던스 부정합에 따른 공진이 발생하기 때문이며 공진 현상은 OPS 에어 브리지의 경우가 더욱 뚜렷하게 나타난다. 그리고 공진점, 26 GHz

에서부터 다시 증가함을 볼 수 있다.

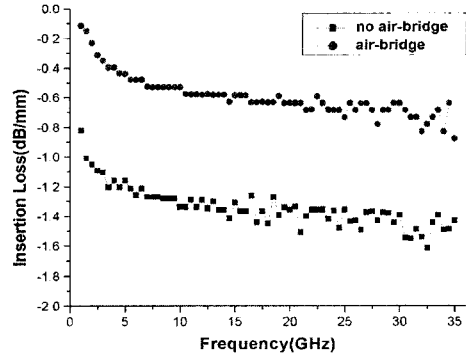


Fig. 7. 주파수 함수로서 OPS 에어 브리지 위 CPW의 삽입손실.

Fig. 7. Insertion losses of CPW on OPS air-bridge as a function of frequency.

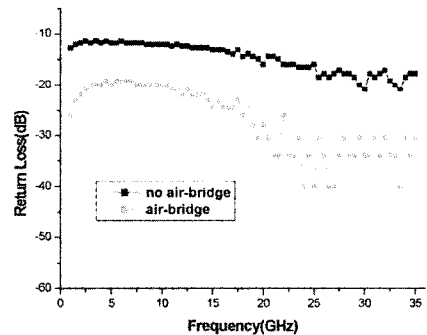


Fig. 8. 주파수 함수로서 OPS 에어 브리지 위 CPW의 반사손실.

Fig. 8. Return losses of CPW on OPS air-bridge as a function of frequency.

## IV. 결 론

실리콘 질화막( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )을 마스크로 실리콘 부분과 다공질 실리콘 형성부분으로 구분한 후 이를 양극 반응하고, 새로운 복합 산화법을 이용하여 10  $\mu\text{m}$ 의 OPSL을 제조한 뒤, 그 위에 공면 전송선을 제조하고, TMAH 수용액을 이용하여 OPSL 하부의 실리콘을 제거한 OPS 에어 브리지 제조하여, 그 위에 형성된 전송선로의 RF 특성을 조사하였다. OPS 에어 브리지 위에 형성된 공면 전송선의 손실이 OPSL 위에 형성된 전송선의 삽입손실보다 약 2 dB 정도 적은 것을

보여주었으며, 반사손실은 OPSP 위 에 형성된 전송선의 반사손실보다 적으며 약 -20 dB를 넘지 않고 있다. 이는 기생 커패시턴스가 줄어들었으며, 고주파 영역의 전송신호에 대해서도 OPS 에어 브리지가 전송손실을 줄이는데 기여함을 알 수 있었다. 본 연구에서 개발한 산화된 다공질 실리콘 멤브레인 및 에어 브리지 구조는 동일 평면상에 수동소자와 능동소자가 같이 집적화된 초고주파회로 개발 시에 공정에 대한 높은 안정성과 효율성을 가지며, 패키징에서의 유연성과 신뢰성도 크게 높일 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] U. L. Rohde, and D. P. Newkirk, "RF/Microwave circuit design for wireless applications", John Wiley & Sons. Inc., 2000.
- [2] J. Bruechler et al., "Silicon high-resistivity-substrate millimeter-wave technology", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-34, pp.1516-1521, Dec. 1986.
- [3] C. M. Nam and Y. S. Kwon, "Coplanar Waveguides on Silicon Substrate with Thick Oxidized Porous Silicon(OPS) Layer", IEEE Microwave and Guided wave Letters, Vol. 8, No. 11, pp.369-371, Nov. 1998.
- [4] H. S. Gamble, P. Baine, M. Bain, et al., "SSOI technology for intergrated Schottky barrier diode", Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2001. Digest of Papers.
- [5] R. L. Peterson, R. F. Drayton, "Dielectric properties of oxidized porous silicon in a low resistivity substrate", Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International, Volume 2, pp. 767-770, 2001
- [6] M. Aubourg, J. P. Villote, F. Godon and Y. Garault "Finite Element Analysis of Lossy Waveguides-Application to Microstrip Lines on Semiconductor Substrate," IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. MTT-31, pp. 346-350, 1983.
- [7] R. Sorrentino, G. Leuzzi and A. Silbermann "Characterisrics of Metal-Insulator-Semiconductor Coplanar Waveguides for Monolithic Microwave Circuits," IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. MTT-32, pp. 410- 416, 1984.
- [8] M. L. Ha, C. M. Nam, S. H. Shin and Y. S. Kwon, "High performance RF passive elements on thick oxidized porous silicon(OPS) membrane", 9th Korean Conference on Semiconductors, pp. 57-58, Feb. 2002.
- [9] K. J. Herrick, T. A. Schwarz, and Linda P. B. Katehi, "Si-micromachined Coplanar Waveguides for use in high-frequency circuits", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 6, June 1998.
- [10] V. Milanovic, M. Gaitan, E. D. Bowen, and M. E. Zaghloul, "Microachined Coplanar Waveguides in CMOS Technology", IEEE microwave and guided wave letters, vol. 6, No. 10, Oct. 1996.
- [11] Y. Watanabe, Y. Arita, T. Yoksyama and Y. Igarashi, "Formation and properties of porous silicon and its application", J. Electrochem. Soc., vol. 122, no 10, pp. 1351-1355, 1975.
- [12] M. Ozgur, V. Milanov, C. Zincke, M. Gaitan, and M. E. Zaghloul, "Quasi-TEM characteristic impednce of micromachined CMOS coplanar waveguides", Microwave Theory and

Techniques, IEEE Transactions vol. 48, pp. 852-854, May. 2000.

[13] 남충모 " Selectively Oxidized Porous

Silicon (SOPS) Substrate for Packaging", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1998.

著 者 紹 介



**김 국 진**  
1960년 09월 25일생.  
1983년 경북대학교 전자공과 졸업(공학사).  
1986년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸(공학석사).  
현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 근무.  
주관심 분야 : MEMS 기술, 마이크로센서 기술.



**이 봉 희**  
1990년 경북대학교 전자공과 졸업(공학사).  
1992년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사).  
현재 포항 1 대학 정보통신과 전임강사.  
주관심 분야 : 반도체 공정 기술, MEMS 기술.

**박 정 용**  
1965년 5월 1일생.  
1988년 9월 경북대학교 전자전기공학부 졸업(공학사)  
1991년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
2002년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학박사).  
현재 (주) 티오스 기술연구소 근무  
주관심 분야 : MEMS, 센서 applications 등 임.



**배 영 호**  
1984년 경북대학교 전자공과 졸업(공학사).  
1987년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사).  
1992년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학박사).  
현재 위덕대학교 전자공학과 조교수



**이 동 인**  
1988년 경북대학교 전자공과 졸업(공학사).  
2000년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사).  
현재 경북대학교 전자공학과 대학원 박사과정.

주관심 분야 : MEMS 기술, Micro Actuator, FBAR.

**이 중 현**  
1949년 6월 26일생.  
1972년 2월 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사).  
1976년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).  
1981년 11월 Institute National Polytechnique de Grenoble 반도체공학(공학박사).  
현재 경북대학교 전자전기공학부 교수 및 재단법인 대구테크노파크사업단 단장.  
주관심 분야 : 반도체 공정기술, SOI 기술, 실리콘 마이크로머시닝 기술 및 센서 응용기술 등임.

**박 세 일**

1961년 9월 30일생.

1985년 2월 서울대학교 자연과학대학 물리학과  
졸업(이학사).

1987년 2월 한국과학기술원 물리학과 졸업(이  
학석사).

1990년 2월 한국과학기술원 물리학과 졸업(이  
학박사).

1990년 3월~현재 한국표준과학연구원 전자소  
자그룹 책임연구원.

주관심 분야 : 초전도 전자공학 응용소자, 센서  
및 MEMS 등임.