

다공질 실리콘 산화법을 이용한 MMIC 기판의 제조 및 그 특성

권오준*, 김경재**, 이재승*, 이종현*, 최현철*, 이정희*, 김기완*

Fabrication and Characteristics of MMIC Substrate using Oxidation of Porous Silicon

O. J. Kwon*, K. J. Kim**, J. S. Lee*, J. H. Lee*, H. C. Choi*, J. H. Lee*, K. W. Kim*

요 약

본 연구에서는 기존의 열산화막과 거의 버금가는 전기적 및 화학적인 성질을 가진다고 알려져 있는 다공질 실리콘 산화막을 이용하여 마이크로스트립 전송선을 제작하였다. 실리콘 기판의 결정상태를 유지하면서 표면적과 화학적 활성이 큰 다공질 실리콘층(porous silicon layer)을 형성한 다음, 이를 열산화 하여 수 십 μm 두께의 산화막을 실리콘 기판 상에 제조하였다. 수 십 μm 이상의 양질의 산화막을 얻기 위한 다공질 실리콘의 산화시에 스트레스에 의한 웨이퍼의 휘어짐을 방지하기 위하여 다단계의 열산화 공정을 수행하였다. 제조된 실리콘 산화막 상에 마이크로스트립 전송선을 제작하고 그 마이크로웨이브 특성을 측정하여 MMIC 기판으로서의 응용 가능성을 조사하였다.

Abstract

Microstrip line was fabricated on the oxidized porous silicon layer which has nearly electrically and chemically identical properties with thermally oxidized silicon layer. Thick oxidized porous silicon layer of few tenth of micrometers was prepared by thermal oxidation of porous silicon layer on silicon substrate. Multi-step thermal oxidation process was used to obtain high quality and thick oxidized silicon layer and to release thermal stress. Microstrip line was fabricated on the oxidized porous silicon layer. Its microwave characteristics were measured and the availability for MMIC substrate was investigated.

1. 서 론

위성통신, 이동전화, 데이터 통신, 무선 LAN, 방송 등 정보 통신 산업의 급격한 발달로 인하여 고성능, 소형의 신뢰성과 경제성이 높은 마이크로웨이브 소자 및 시스템의 개발이 요구되어지고 있다^[1]. 이를 위해서는 단일 마이크로웨이브 집적회로(Monolithic Microwave Integrated Circuit : MMIC)내에서 소자 자체의 성능향

상과 더불어 전송선로의 대용량화 및 초고속화가 필요하게 되었고 이를 뒷받침 해줄 MMIC 기판에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지는 반절연성(semi-insulating)의 특성을 가지고 있으며, 성능이 뛰어난 마이크로웨이브 FET를 제조할 수 있는 GaAs가 MMIC의 기판으로 널리 사용되어 왔다^[2]. 그러나, GaAs를 사용한 집적회로 제조 공정은 고가(高價)일뿐만 아니라 실리콘 집적회로 공정에 비해 까다롭고, 생산성이 낮아 비경제적이다. 이러한 문제점으로 인해 저렴한 비용의 잘 확립된 실리콘 집적회로 제조공정을 이용하여 실리콘 MMIC를 개발하

* 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook National Univ.)

** LG 반도체(LG Semicon Co., Ltd.)

<접수일자 : 1999년 2월 20일>

고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔는데^[3], 최근에는 E. Crabbé 등^[4]이 113 GHz 이상의 차단주파수를 갖는 실리콘 바이폴라 트랜지스터를 개발했다는 연구보고가 있었다. 그러나, 실리콘 기판은 마이크로웨이브 영역에서의 큰 도전성으로 인해 전송선로의 손실이 크고, 소자간의 용량성 결합 등으로 MMIC의 실현에 어려움이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 일반적으로 높은 비저항을 가진 실리콘 기판을 사용하거나, 실리콘 기판 상에 절연층을 형성한 다음 그 위에 수동소자나 전송선로를 구현하는 방법을 사용해 왔다^{[3][5]}. 그러나, 높은 비저항의 웨이퍼는 결정성장 시키는 데 비교적 가격이 비싸고 후속 열 공정으로 의해 원래의 높은 비저항을 유지하기 힘들다^[6]. 또한, 기존의 반도체 공정으로는 마이크로웨이브 영역에서의 전송선로 특성을 개선하고, 양호한 소자간 격리 특성을 얻기에 충분한 수십 μm 정도의 두꺼운 절연층을 제조하는 것이 불가능하였다.

따라서, 본 논문에서는 실리콘 기판 상에 두꺼운 절연층을 형성하여 마이크로웨이브 전송선로 특성을 개선하기 위해 다공질 실리콘 산화법을 이용하였다. 다공질 실리콘은 산화시에 기공에서 급격한 속도로 산화가 진행되기 때문에 다공질 실리콘 층과 실리콘 기판 사이에 스트레스가 발생하여 웨이퍼의 표면이 손상되고 휘어짐이 발생한다. 이의 방지를 위하여 650°C와 1000°C에서 산화를 각각 진행하는 다단계 산화공정을 수행하였다. 산화공정이 끝난 후 5 inch 웨이퍼에서 전혀 휘어짐이 발생하지 않았다. 다공질 실리콘 산화층 위에 마이크로웨이브 전송선로를 형성하고 특성을 측정하였다.

II. 제조 및 측정

1. 다공질 실리콘 형성

기판의 비저항이 각각 0.8~1.2 Ωcm , 17~21 Ωcm 인 5 inch, p 형 (100) 웨이퍼를 사용하여 다공질 실리콘을 형성하였다. 반응시 양호한 저항성 접촉을 형성하여 균일한 전장분포를 얻기 위하여 봉소로 확산공정을 하여 기판의 뒷면에 p' 층을 형성하였고, HF 전해용액을 사용하여 기판의 뒷면에 전류를 공급하였다. 산화 공정후 산화층의 표면상태가 양호하도록 다공질 실리콘의 표면상태를 개선 하고자 HF에 에탄올($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)을 혼합하여 양극 반응시 발생하는 수소 기포를 제거하였

다. 산화시 완전 산화를 위한 기공도는 46 % 이상으로 알려져 있으며 웨이퍼의 수축과 팽창을 최소화하기 위해서는 56% 정도의 기공도가 적당하다^[7]. 최적의 기공도와 20~30 μm 정도 두께의 다공질 층을 얻기 위해 기초실험을 근거로 하여 용액농도 43 wt.%, 전류밀도 30 mA/cm², 반응시간 10분의 조건을 사용하였다.^[8] 형성된 다공질 실리콘의 두께는 약 30 μm , 기공도는 56 %, 그리고 표면은 매우 균일하였다.

2. 다공질 실리콘의 다단계 산화

약 30 μm 정도의 두꺼운 다공질 실리콘을 일반 산화공정으로 산화를 하게 되면 형성된 기공에서 급격한 속도로 산화가 일어나며 큰 스트레스를 발생시키게 된다. 특히 양산 공정을 위한 전체웨이퍼 위에 형성되어 있는 다공질 실리콘 층의 산화는 일반적인 방법으로는 불가능하다.

본 연구에서는 다단계 산화 공정을 통하여 5 inch 웨이퍼 상에 양질의 다공질 실리콘 산화층 형성에 성공하였다. 다공질 실리콘의 산화시 발생하는 표면 손상이나 휘어짐 등의 문제점을 최소화하기 위해 그림 1과 같은 다단계 산화법을 사용하였다.

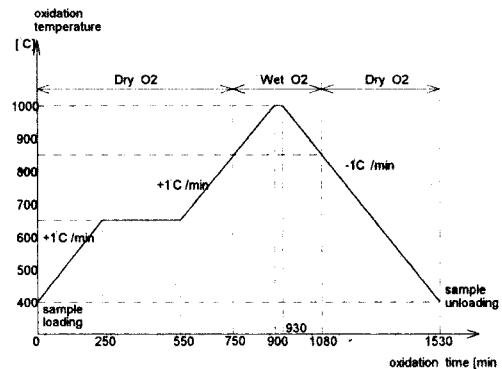


그림 1. 다공질 실리콘의 다단계 산화 공정도.

Fig. 1. Multi-step thermal oxidation procedure of porous silicon.

400°C의 저온에서 웨이퍼를 장착하여 서서히 온도를 증가시킴으로써 고온 장착으로 인한 급격한 산화 작용으로 다공질 실리콘 웨이퍼상의 표면 손상 및 휘어짐이 발생하는 것을 방지하였다. 전체적인 온도 상승 속도는 +1°C/min으로 유지하여 산화시에 받는 응력을 최대한 풀어줄 수 있도록 하였다. 650°C에서 5시간 정

도 산화하여 기공내부에 충분한 산화체를 공급하면서 다공질 실리콘의 표면 상태를 안정화시킨 다음 1000°C의 고온에서 열처리 공정을 수행하여 산화층 내부에 잔존하는 기공을 제거하면서 조밀화를 수행하였다. 산화공정이 끝난 후 웨이퍼를 꺼낼 때도 손상을 방지하기 위해 -1°C/min의 하강 속도를 유지하여 400°C에서 웨이퍼를 제거하였다.

그림 2는 산화층의 단면 및 표면 SEM 사진이다. 표면 상태가 양호한 약 30 μm 두께의 실리콘 산화층이 형성되었음을 알 수 있다.

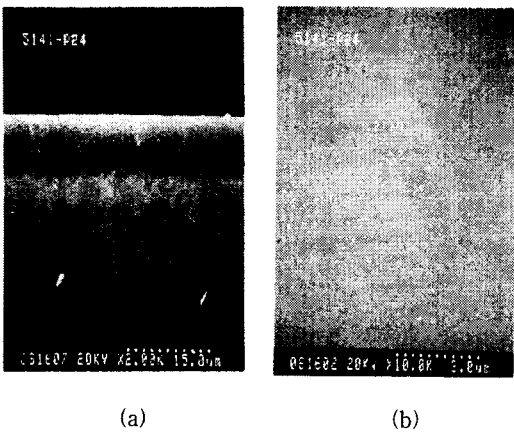


그림 2. 다단계 산화법으로 형성된 다공질 실리콘 산화층의 SEM 사진. (a) 단면 사진 (b) 표면 사진
Fig. 2. SEM photograph of oxidized porous silicon using multi-step oxidation method.
(a) cross sectional view (b) surface view

그림 3은 5 inch 웨이퍼의 산화공정 후의 사진이다. 그림에서 알 수 있듯이 두꺼운 산화막의 형성에도 불구하고 웨이퍼의 휘어짐이 없음을 알 수 있다. 이것은 후속 공정을 위하여 대단히 중요하다.

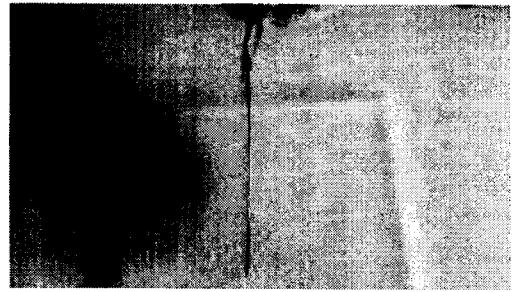
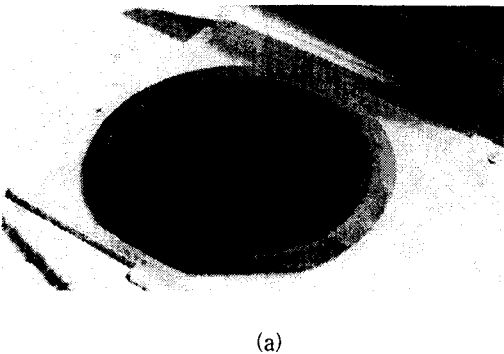


그림 3. 다단계 산화공정 후의 5인치 웨이퍼의 사진.
(a) 평면 사진 (b) 측면 사진
Fig. 3. Photograph of 5 inch silicon wafer after multi-step oxidation.
(a) plain view (b) side view

그림 4는 형성된 다공질 실리콘 산화층과 일반적인 열산화법에 의한 실리콘 산화층의 FTIR 비교 분석결과이다. (a)의 경우 H-O 결합이 조금 보이는데, 이는 다공질 실리콘이 형성되었을 때 다공질 실리콘의 기공 표면에 흡착된 수소 결합에 의한 것으로 여겨진다. 그리고 600 cm⁻¹의 위치에서 약간의 Si-Si 결합이 보이고 있으나, 두 경우에 대하여 Si-O 결합이 거의 유사하게 나타나는 것으로 보아 다공질 실리콘이 거의 완전하게 화학양론적인 조성을 가지는 실리콘 산화층으로 바뀌었다는 것을 알 수가 있다.

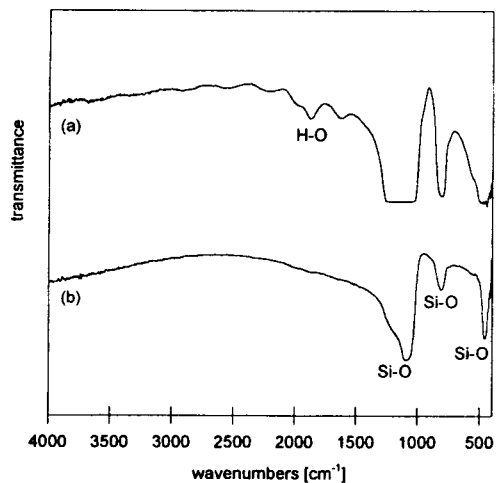


그림 4. (a)다공질 실리콘 산화층과 (b)열산화층의 FTIR 비교 분석.
Fig. 4. Comparison of FTIR of (a)oxidized porous silicon and (b)thermally oxidized silicon.

그림 5는 형성된 다공질 실리콘 산화층과 일반적인 열산화법에 의한 실리콘 산화층의 C-V 비교 분석결과이다. (b)의 경우는 인가된 전압에 따라 capacitance 값이 변하고 있으나 (a)의 경우는 두꺼운 산화막의 결과로 인하여 capacitance 값의 변화가 없음을 보여주고 있다.

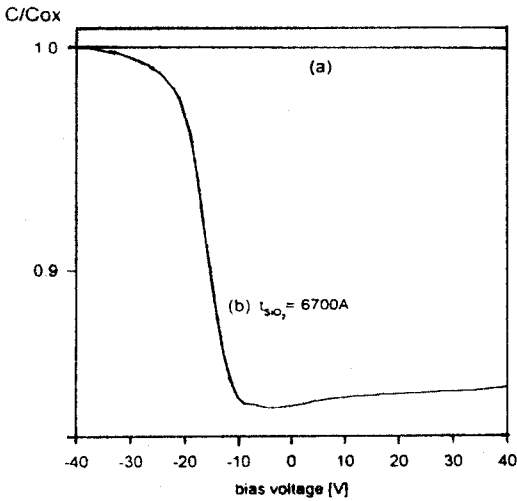


그림 5. (a) 다공질 실리콘 산화층과 (b) 열산화층의 C-V 비교 분석.

Fig. 5. Comparison of C-V characteristic of (a) oxidized porous silicon and (b) thermally oxidized silicon.

3. 마이크로스트립 전송선 제작 및 특성 측정

두꺼운 실리콘 산화막이 형성된 실리콘 기판의 양면에 알루미늄을 열증착하고, 윗면은 사진식각공정을 사용하여 그림 6과 같이 마이크로스트립 전송선을 제작하였다. 표 1과 같은 사양을 갖는 전송선의 마이크로파대 특성을 평가하기 위하여 손실, 특성임피던스, 분산 및 slow-wave factor 등을 측정하여, 이론치와 비교하였다. 추가된 이론치는 Full-wave spectral domain 기법을 사용하여 계산하였다.^[9] 일반적인 기판과 비교하여 산화막의 영향을 살펴보기 위해 기판의 유전손실만 고려하고, 전송선의 도체 손실은 고려하지 않았다.

3.1 손실특성

전송손실특성을 알아보기 위하여 주파수에 따른 감쇄수를 그림 7에 나타내었다. 이론적 계산에서 기판의 유전손실만 고려하고 전송선의 도체손실은 고려하

지 않았기 때문에 측정값이 약 0.3 ~ 0.5 dB/mm 정도의 offset이 주어지고 주파수에 따른 감쇄의 경향은 일치함을 볼 수 있다.

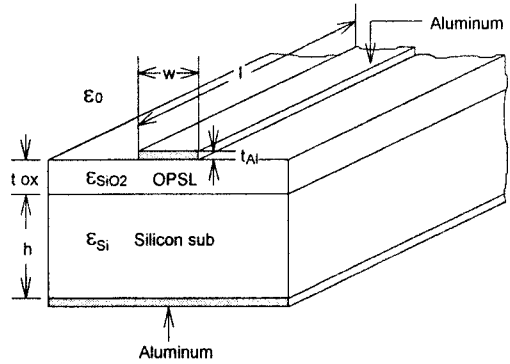


그림 6. 제조된 마이크로스트립 전송선의 구조도.
Fig. 6. Schematic diagram of micro-strip line structure.

표 1. 제조된 마이크로스트립 전송선의 사양.
Table 1. Specifications of microstrip line.

| 사 양 \ 기판종류 | 1 Ωcm, p-type (0.8~1.2Ωcm) | 20 Ωcm, p-type (17~21Ωcm) |
|---|----------------------------|---------------------------|
| OPSL thickness, t_{ox} | ~ 30 μm | |
| OPSL relative permittivity, ϵ_{SiO_2} | 3.85 | |
| strip line width, w | 65 μm | |
| strip line thickness, t_{Al} | 0.15 μm | |
| strip line length, l | 10 mm | |
| strip conductor (Al) conductivity, σ | 3.5×10^7 S/m | |
| silicon sub. relative permittivity, ϵ_{Si} | 11.8 | |
| silicon sub. thickness, h | 600 μm | |
| silicon sub. width | 10 mm | |

비저항이 1 Ω·cm인 Si 기판의 경우 7 GHz 대역까지, 20 Ω·cm 기판의 경우 전체 측정범위에서 1 dB/mm

이하의 우수한 감쇄특성을 나타내었다. 5 GHz 이상의 주파수 대역에서는 20 Ω·cm 기판이 상대적으로 우수한 감쇄 특성을 나타내었는데, 이는 Si 기판의 비저항이 클수록 손실이 작다는 것을 나타낸다.

이상의 결과를 기존의 열산화공정으로 제조된 1.8 μm 두께의 실리콘 기판과 비교해 보면 측정 범위내에서 0.3 ~ 1 dB/mm 정도로 손실이 크게 감소하였다. GaAs 기판의 경우에 비해서는 손실이 큰 편이지만 실제 집적회로내의 소자나 전송선의 크기(~100 μm)를 고려한다면 상당히 유효한 결과이고, 이로부터 두꺼운 산화막을 이용한 실리콘 기판의 마이크로웨이브 영역 손실특성이 우수함을 알 수 있다.

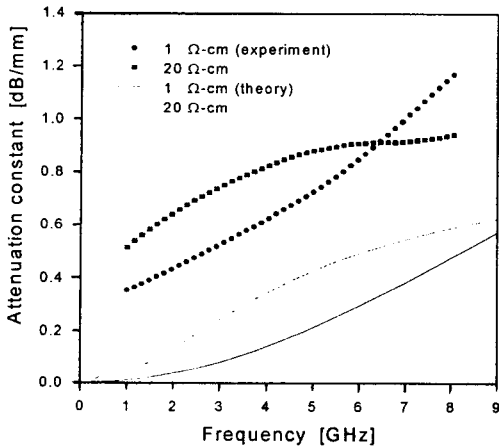


그림 7. 주파수에 따른 감쇄 상수.

Fig. 7. Attenuation constant vs. frequency.

3.2 특성 임피던스

1 Ω·cm 기판의 주파수에 따른 특성임피던스를 그림 8에 보였으며, 특성임피던스의 실수부는 거의 50 Ω의 일정한 값을 유지하고 허수부는 거의 0 을 나타내어 아주 양호한 특성을 보여주었고, 측정오차와 도체손실을 무시하였기 때문에 약간의 차이가 발생하였으나 이론적인 결과와도 잘 일치하였다. 특성 임피던스에서 허수항이 나타내는 것은 전송선의 도체 또는 유전체 손실이 있음을 나타낸다.

3.3 분산 특성 및 slow-wave factor

마이크로스트립 전송선 신호파의 왜곡(distortion)을 일으키는 위상 속도와 유효유전상수의 주파수 의존정도를 분산(dispersion)특성이라고 한다.

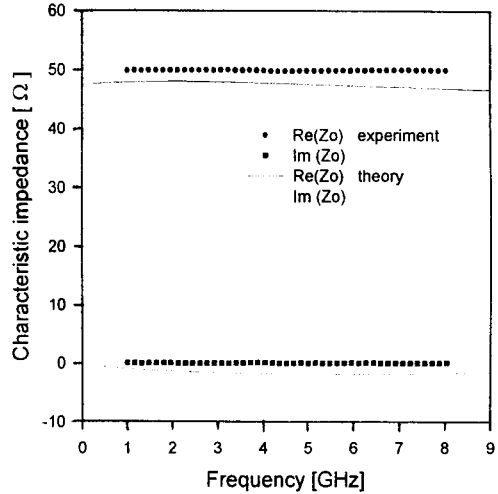


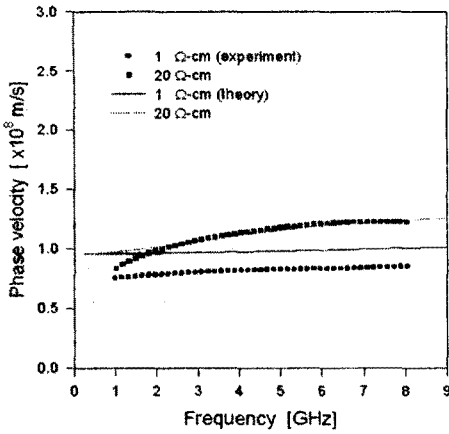
그림 8. 1 Ω·cm 기판의 주파수에 따른 특성 임피던스.
Fig. 8. Characteristic impedance of 1 Ω·cm substrate vs. frequency

제안된 마이크로스트립 전송선의 분산 특성을 알아보기 위하여 주파수에 따른 위상속도와 유효유전상수 및 slow-wave factor를 각각 그림 9에 나타내었다. 2 GHz 이하 및 1 Ω·cm 기판의 경우, 측정 오차 및 도체손실의 무시로 인해 일정한 offset이 발생하였으나, 경향이 거의 일치함을 볼 수 있다. 실리콘의 비저항이 1 Ω·cm인 기판의 경우, 측정 주파수 대역에서 위상속도의 변화가 거의 없는 아주 양호한 특성을 나타내었고, 20 Ω·cm 기판의 경우는 조금씩 위상 속도가 증가하는 경향을 보이거나 비교적 양호한 분산 특성을 나타내었다.

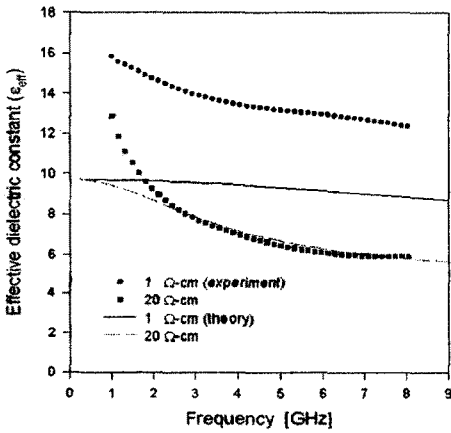
유효유전상수는 비저항이 1 Ω·cm인 기판의 경우 주파수에 따라서 서서히 감소하는 경향을 나타내었고, 20 Ω·cm인 기판의 경우 2 GHz 까지는 급격한 감소를 보이다가 그 이후에는 양호한 분산 특성을 보였다.

이상의 결과들을 낮은 주파수 대역에서 급격한 변화를 보이는 1.8 μm 두께의 산화막이 제조된 실리콘 기판의 경우와 비교해 보면 우수한 분산 특성임을 알 수 있다. 분산특성은 동작주파수와 기판 두께의 곱(fh)에 관련되므로 본 실험에서 사용된 기판의 두께를 얇게 한다면 분산 특성을 더욱 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

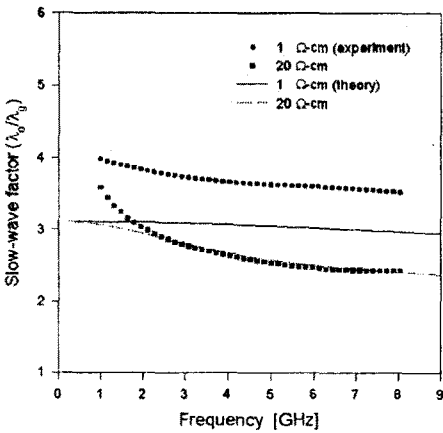
OPSL/Si 기판 상에 제조된 마이크로스트립 전송선의 유효유전상수는 실리콘 산화막 또는 실리콘 기판의 유전상수 보다 큰 값을 가짐을 볼 수 있는데, 그림 9



(a)



(b)



(c)

그림 9. 주파수에 따른 (a) 위상 속도, (b) 유효 유전상수, 및 (c) slow-wave factor.

Fig. 9. (a) phase velocity, (b) effective dielectric constant, and (c) slow-wave factor vs. frequency.

(c)는 slow-wave factor를 보이고 있다. $1 \Omega \cdot \text{cm}$ 기판의 경우, 측정 주파수 대역에서 작은 분산을 보이며 slow-wave factor 값이 4 정도로 유지되었고, $20 \Omega \cdot \text{cm}$ 기판의 경우, 2 GHz 대역까지는 약간의 분산을 나타내다가 그 이후에는 작은 분산을 보이며 2.5 정도의 slow-wave factor 값을 유지하였다. 전송속도를 효과적으로 줄일 수 있는 slow-wave 모드 동작으로 인해 고주파 집적회로의 소형화가 가능하므로 MMIC에의 응용이 가능하며, 이를 compact화함으로써 전체적인 손실도 더욱 감소하게 된다.

IV. 결론

본 논문에서는 실리콘 기판 상에 두꺼운 다공질 실리콘 산화막을 제조하고, 이를 이용한 마이크로스트립 전송선의 마이크로웨이브 특성을 연구하여 MMIC 기판으로서의 응용 가능성을 확인하였다.

다공질 실리콘을 형성한 다음 다단계 산화 공정을 이용하여 산화시켜 충분히 응력을 풀어줌으로써 웨이퍼의 휘어짐이나 갈라짐이 없이 약 $30 \mu\text{m}$ 두께의 표면 상태가 양호한 실리콘 산화막을 제조할 수 있었으며 이때 형성된 산화막의 제반 특성은 열산화막과 거의 같았다. 제조된 기판의 마이크로웨이브 특성을 측정하기 위하여 OPSL/Si 기판 상에 알루미늄을 도체로 사용하여 마이크로스트립 전송선을 제작하였다.

1~8 GHz 대역의 측정 주파수 범위 내에서 거의 1 dB/mm 이하의 양호한 손실 특성을 나타내었고, 주파수가 증가함에 따라 $20 \Omega \cdot \text{cm}$ 기판이 더욱 양호한 손실 특성을 보였다. MMIC 내의 소자와 전송선의 dimension을 고려할 때 이 측정값은 상당히 양호한 손실값으로 생각된다. $1 \Omega \cdot \text{cm}$ 기판의 경우 특성 임피던스가 주파수에 따라 거의 변화가 없고, 특히 허수부는 0을 유지함으로써 이상적인 특성을 나타냈다. 측정 주파수 대역 내에서 $1 \Omega \cdot \text{cm}$ 기판은 위상 속도와 유효 유전 상수가 거의 변화를 보이지 않아 좋은 분산 특성을 나타내었고, $20 \Omega \cdot \text{cm}$ 기판은 낮은 주파수 대역에서는 약간의 분산을 보이다가 그 이후에는 양호한 분산 특성을 나타내었다. slow-wave factor는 $1 \Omega \cdot \text{cm}$ 기판의 경우가 더 큰 값을 나타내었다. 이상의 결과들로부터 사용 목적으로 하는 주파수 대역에 적절한 비저항의 실리콘 기판을 선택하고, 두께를 조절하여 두꺼운 다공질 실리콘 산화막을 형성하면 MMIC 기판으로서의 응용가능성이 충분하리라 여겨진다.

참고 문헌

- [1] Hugh J. Finlay, Rolf H. Jansen, Jhon A. Jenkins, and Ian G. Eddison, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-36, pp. 961-967, June 1988.
- [2] Yoshiro Fukuoka, Yi-Chi Shih, and Tatsuo Itoh, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, pp. 567-573, July 1983.
- [3] Adolfo C. Reyes, Samir M. El-Ghazaly, Steve J. Dorn, Michael Dydyk, Dieter K. Schroder, and Howard Patterson, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-43, pp. 2016-2022, Sep., 1995.
- [4] E. Crabbé et al., presented at 1991 *IEEE Device Research Conference*, Santa Barbara, CA, June, 1993.
- [5] Hideki Hasegawa, Mieko Furukawa, and Hisayoshi Yanai, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-19, pp. 869-881, Nov. 1971.
- [6] Josef Buechler, Erich Kasper, Peter Russer, and Karl M. Strohm, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 34, pp.1516-1521, Dec. 1986.
- [7] J. J. Yon et al., *J. Appl. Phys.* 62 (3), pp. 1042-1048, 1987.
- [8] 류 창우, 심 준환, 이 정희, 이 종현, 배 영 호, 허 중수 "다공질 실리콘을 이용한 저온 산화막의 제조," 한국재료학회지, 제6권, 제5호, pp. 489-493, 1996.
- [9] Thomas Becks and Ingo Wolff, "Analysis of 3-D Metallization Structure by a Full-wave Spectral Domain Technique," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 40, No. 12, pp. 2219-2227, Dec., 1992.

著 者 紹 介



권오준

1951년 7월 18일생. 1977년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1989년 경북대학교 산업대학원 반도체공학전공 졸업(공학석사), 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정, (주)에티스 대표이사. 주

관심분야 : 실리콘 RF MMIC, GaAs power FET 등.



이계승

1970년 5월 30일생. 1996년 2월 경북대학교 물리학과 졸업(이학사), 1998년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심분야 : MMIC, 화합물

반도체 등.

김경재

1970년 6월 28일생.

1995년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1997년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 현재 LG반도체 연구원, 주관심분야 : MMIC, TCAD 소자 simulation 등.

최현철

1960년 2월 2일생. 1982년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1984년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사), 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사), 현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수, 주관심분야 : 전파전파 및 역산란해석, 초고주파 회로 및 시스템 설계, EMI/EMC 등.

이종현

『센서학회지 제 1권 제 1호』 논문 92-21, p.194 참조.
현재 경북대학교 전자전기공학부 교수

김기완

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-01, p.8 참조.
현재 경북대학교 전자전기공학부 교수

이정희

『센서학회지 제4권 제2호』 논문 95-4-2-04 p.28 참조.
현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수