

論文2002-39SD-1-4

PHEMT Passivation을 위한 Si₃N₄ 적층에 관한 연구(Studies on the deposition of Si₃N₄ for the passivation of PHEMT's)

申在完*, 朴炫昶*, 朴亨茂*, 李鎮九*

(Jae Wan Shin, Hyung Chang Park, Hyung Moo Park, and Jin Koo Rhee)

요약

본 논문에서는 PECVD 장비를 이용하여 PHEMT 소자의 passivation 막으로 사용되는 Si₃N₄ 박막의 특성을 최적화하고, 0.25 μm급 PHEMT 제작에 적용하였다. 제작된 PHEMT(60 μm×2 fingers)의 소자 특성을 측정된 결과, passivation 후 드레인 포화전류와 최대 전달 컨덕턴스는 passivation 전보다 각각 2.7% 와 3% 씩 증가하였으며, 전류이득 차단 주파수는 53 GHz, 최대 공진 주파수는 105 GHz 였다.

Abstract

In this paper, high quality silicon nitride film is achieved using Plasma Enhanced Chemical Deposition(PECVD) system, and applied in passivating PHEMT's. Passivated PHEMT's(60 μm×2 fingers) showed an increase of 2.7 % and 3 % in the drain saturation current and the maximum transconductance, respectively. The current gain cut-off frequency of 53 GHz and maximum oscillation frequency of 105 GHz were obtained from the fabricated PHEMT's.

I. 서론

급속하게 발전해 나가는 정보 통신 및 이동 통신 기술은 주파수 대역을 밀리미터파(millimeter wave)에 이르기까지 확장시켜가고 있으며, 이에 따라 밀리미터파 대역에서 동작 가능한 고속 소자의 개발과 제작에 필요한 공정확립의 필요성이 증가되고 있다. 특히, III-V 족 화합물 반도체인 GaAs는 Si에 비해 빠른 이동도와

높은 포화 전류를 얻을 수 있고 밀리미터파 대역에서 동작이 가능하여 고속 소자에 응용될 수 있으며, 절연 기판을 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 이러한 GaAs 를 이용하여 제작한 MESFET, HEMT, 및 HBT 등의 소자는 공정과정 중 전자의 이동을 위한 채널이 노출 되어 있기 때문에 소자의 동작특성이 채널부근에서의 표면효과(surface effect)에 매우 민감하다. 또한, 산화(oxidation)공정이나 분진에 의한 오염을 통한 소자의 열화현상도 문제시되고 있다. 이러한 채널부분의 표면 효과를 줄이고, 화학적인 오염과 물리적인 손상을 방지 하기 위해 passivation 공정이 필수적으로 수행되어야만 하며, passivation된 소자의 특성 저하가 없어야만 한다¹⁾.

본 논문에서는 passivation용으로 사용될 수 있는 Si₃N₄를 PECVD 장비를 이용하여 적층하였으며, 양질의 Si₃N₄를 적층하기 위하여 가스의 유량에 따른 적층

* 正會員, 東國大學校 밀리미터파 新技術研究센터
(Millimeterwave INnovation Technology research center, Dongguk Univ)

※ 본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의
하여 수행되었습니다.

接受日字:2001年8月21日, 수정완료일:2001年11月15日

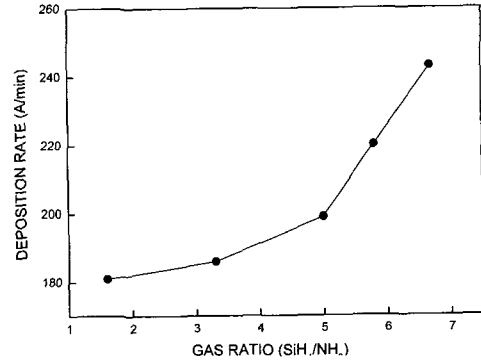
를, 굴절률 및 식각율을 관찰하였다. 또한, FT-IR (Fourier Transform-Infrared) 측정을 이용하여 성장된 박막의 조성 및 박막내의 수소함유량을 관찰하였다. 최적화공정에서 얻어진 연구결과를 토대로 GaAs 소자에 대한 적용가능성을 평가하기 위해 게이트 길이가 0.25 μm 인 GaAs PHEMT의 passivation에 적용하고, passivation 전·후의 DC 및 주파수특성을 측정·비교하였다.

II. 가스의 유량에 따른 Si_3N_4 의 특성 분석

본 논문에서는 Si_3N_4 박막 적층 공정의 최적화를 위하여 박막 적층에 사용되는 각 가스의 유량의 변화에 따른 적층율, 굴절률 및 BHF(Buffered HF, $\text{NH}_4\text{F} : \text{HF} = 7 : 1$)에 대한 식각율 등의 박막 특성 분석을 수행하였다. 성장된 Si_3N_4 박막의 두께와 굴절률을 파장이 6,328 Å인 Ellipsometer(L117, Gaertener)와 Alpha-Step(TENCOR Instruments)을 이용하여 측정하였으며, BHF($\text{NH}_4\text{F} : \text{HF} = 7 : 1$)에 대한 식각율을 조사하여 공정조건과 박막의 견고성의 관계를 조사하였다. 또한, 적층된 박막 내의 수소 함유량을 FT-IR을 이용하여 계산하였다.

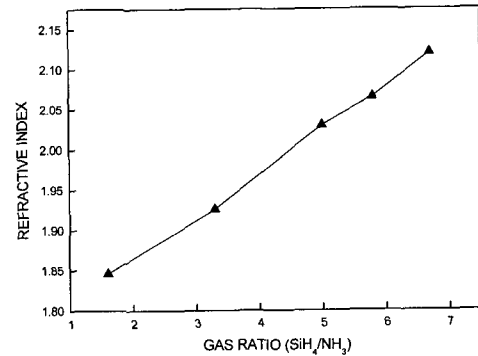
본 논문에서는 공정 가스의 혼합비에 따른 Si_3N_4 박막 특성을 분석하기 위한 사전 실험으로 SiH_4/NH_3 혼합비가 5일 때 공정 압력, RF power 및 공정 온도의 변화에 따른 박막 특성의 변화를 분석하였다. 성장 압력이 520 mtorr에서 700 mtorr로 증가할수록 적층율은 142 Å/min에서 193 Å/min으로 증가하고 굴절률은 1.99에서 2.03으로 증가한 반면 BHF에 대한 식각율은 1050 Å/min에서 950 Å/min으로 감소하였다. 700 mtorr 이상의 압력에서는 적층율, 굴절률 및 식각율이 모두 증가하여 박막의 견고성이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 RF power가 35 W에서 60 W로 증가할수록 적층율은 168.2 Å/min에서 247.7 Å/min으로 증가하고 굴절률은 2.067에서 1.973으로 감소하였으며, BHF에 대한 식각율은 690 Å/min에서 1095 Å/min으로 증가하였다. 그리고 공정 온도가 150 °C에서 350 °C로 변화함에 따라 250 °C의 공정 온도에서 최적의 굴절률과 식각율을 얻었다^[2].

그림 1은 SiH_4/NH_3 혼합비에 따른 박막의 특성을 관찰한 것으로 상기의 사전 실험을 통하여 N_2 가스의 유량을 60 sccm, 플라즈마 형성시의 전극 간격을 7.5 cm,



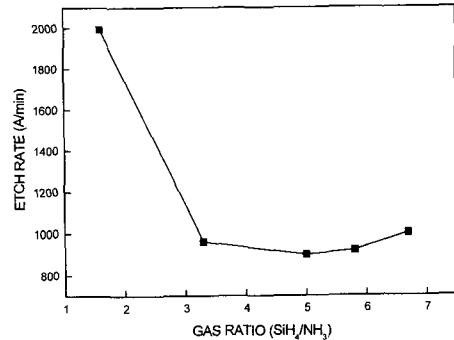
(a) 적층률의 변화

(a) A variation of deposition rate.



(b) 굴절률의 변화

(b) A variation of refractive index.



(c) BHF에 대한 식각율의 변화

(c) A variation of etching rate with respect to BHF.

그림 1. SiH_4/NH_3 혼합비에 따른 박막의 특성 변화
Fig. 1. Properties of Si_3N_4 as a function of SiH_4/NH_3 flow ratio.

플라즈마 형성을 위한 RF power는 45 W, 공정온도는 250°C, 공정압력은 700 mTorr로 유지하였다. SiH_4/NH_3 혼합비는 NH_3 가스의 양을 6 sccm으로 고정하고 SiH_4 가스의 양을 10, 20, 30, 35 및 40 sccm으로 변화시켜

가스의 혼합비를 1.6, 3.3, 5, 5.8 및 6.7로 하여 Si₃N₄를 적층하였다. 그림 1(a) 및 (b)에서 SiH₄ 가스의 비율이 증가할수록 박막의 적층율 및 굴절률은 증가하였으며, 그림 1(c)에서 가스의 혼합비가 1.6(SiH₄/NH₃=30/6 sccm)일 때 적층률 및 굴절률에 비해 식각율이 매우 큰 현상을 볼 수 있는데 이는 다른 가스 혼합비에 비하여 SiH₄의 비율이 상대적으로 작아 FT-IR 측정 결과 박막 구성에 Si의 양이 적어져 BHF에 대한 식각율이 다른 혼합비에 비해 상대적으로 큰 것으로 사료된다. 또한 BHF용액에 대한 식각율은 SiH₄/NH₃가스의 혼합비가 5(SiH₄/NH₃=30/6 sccm)일 때 최소 값을 나타내었다.

그림 2는 적층된 Si₃N₄ 박막의 각 가스 혼합비에 따른 박막 내의 수소량을 나타낸 것으로 FT-IR 측정을 통하여 박막내의 Si-H 결합과 N-H 결합으로부터 박막 내의 수소량을 계산한 것이다. Si₃N₄ 적층시 박막내의 수소량이 적을수록 박막의 절연 내압이 높기 때문에 최적의 박막 특성을 얻을 수 있다. 가스의 혼합비가 5(SiH₄/NH₃ = 30/6 sccm)일 때 수소량이 최소값을 나타내었으며, 그때의 조건에서 계산된 박막내의 전체 수소량은 $2.35 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 이었다.

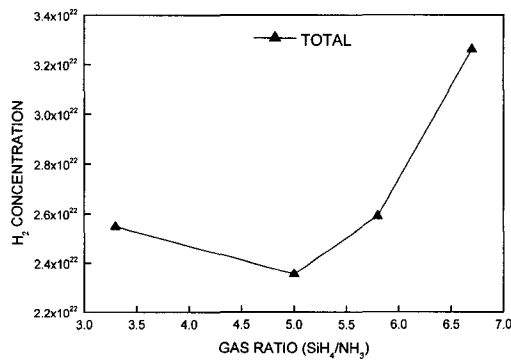


그림 2. 전체 수소량의 변화
Fig. 2. A variation of total hydrogen quantity.

양질의 Si₃N₄ 박막을 적층하기 위한 공정 조건으로 상기의 그림 1과 그림 2에서 가스의 혼합비를 5(SiH₄/NH₃ = 30/6 sccm), N₂ 유량을 60 sccm, 플라즈마 형성시의 전극 간격을 7.5 cm, 플라즈마 형성을 위한 RF power는 45 W, 공정온도는 250 °C, 공정압력은 700 mTorr로 하여 Si₃N₄ 박막을 적층하였다. 적층된 박막의 조성 및 박막내에 함유되어 있는 수소 결합을 FT-IR을 이용한 적외선 흡수 양상으로 확인하였다. 그

림 3은 적층된 박막의 파수에 따른 적외선 흡수 양상으로, 841 cm⁻¹ 에서 적외선 흡수가 나타나 전형적인 Si₃N₄의 조성을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 또한 수소에 대한 결합을 나타내는 Si-H 결합은 거의 나타나지 않았으며, 1175 cm⁻¹ 의 파수에서 N-H 결합에 의한 흡수만이 미약하게 나타났다. 또한 박막 내의 수소량은 적층 공정 중에 발생할 수 있는 플라즈마에 의한 채널의 손상 정도를 예측할 수 있으므로 수소량이 적을수록 능동 소자의 passivation 후에 소자의 특성 저하를 막을 수 있다. 적층된 Si₃N₄ 박막 내의 수소량은 FT-IR 측정 결과에서 Si-H 및 N-H 결합의 정도로 파악할 수 있고, 본 논문에서 적층된 박막은 기 발표된 논문^[4]에 비해 적은 양의 Si-H 및 N-H 결합을 볼 수 있다.

상기의 실험을 통하여 최적의 공정 조건으로 성장된 박막은 적층률이 193 Å/min이고, 굴절률은 2.03, BHF에 대한 식각율은 950 Å/min의 특성을 나타내었으며, 박막의 전기적 성질을 연구한 결과, 7.2 MV/cm의 절연 내압 및 6.9의 비유전율을 얻었다.

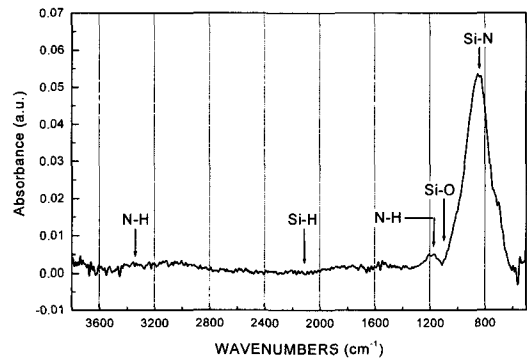


그림 3. Si₃N₄ 박막의 적외선 흡수 스펙트럼
Fig. 3. IR spectrum of Si₃N₄.

III. PHEMT passivation

본 논문에서는 양질의 Si₃N₄ 적층 조건을 이용하여 실제 GaAs 소자의 passivation에 적용하여 소자의 특성변화를 확인하였다. passivation 실험에 사용된 GaAs 소자는 게이트 길이가 0.25µm인 60µm × 2 finger-PHEMT이며, passivation 박막의 적층 전·후의 DC 및 주파수 특성을 비교하였다. 그림 4는 PHEMT 제작에 사용된 웨이퍼 구조로 소자의 항복 전압과 2DEG(2 Dimensional Electron Gas)의 전하 밀도를 높이기 위해

5×10¹²cm⁻²의 Si planar doping 층이 삽입된 구조로 설계하였다.

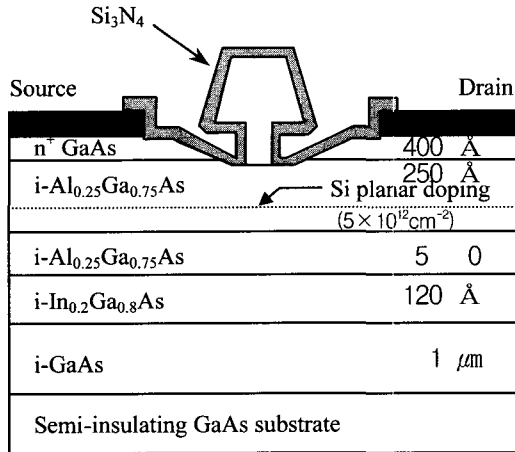


그림 4. PHEMT의 에피층 구조
Fig. 4. Epi-layer structure of PHEMT.

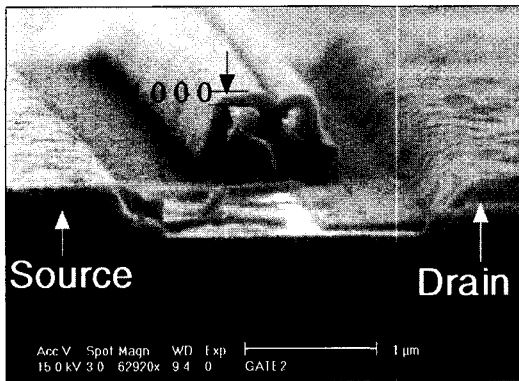


그림 5. Passivation된 gate의 SEM 사진
Fig. 5. SEM photograph of the passivated gate.

PHEMT는 금속-반도체 접촉의 접촉 저항을 줄이기 위한 저 저항 오믹 접촉 공정, 미세 게이트 형성을 위한 T-게이트 전자선 묘화(e-beam lithography) 공정 및 격리된 전극을 연결하기 위해 열적 증착법을 이용한 에어 브리지(air-bridge) 공정^[3] 등의 단위 공정들을 이용하여 제작되었다. 또한 상기의 단위 공정을 이용하여 제작된 PHEMT를 측정후 Si₃N₄ 박막 적층 공정을 통하여 passivation 후의 특성을 측정하였다. 그림 5는 1000 Å 두께의 Si₃N₄로 passivation된 0.25 μm의 게이트 SEM 사진을 나타낸 것으로 전체적으로 양호한 적층 상태를 확인할 수 있다. 적층된 Si₃N₄의 두께가

1200 Å 이상이 되면 적층된 박막에 의한 소자의 스트레스(stress)가 증가하여 소자 특성의 열화 현상을 나타내었으며, 1200 Å이하의 두께에서는 동일한 특성 변화를 나타내었다. 그러나 800 Å이하의 두께에서는 증착된 금속층 끝(edge)부분에서 적층이 이루어지지 않아 후속 금속 증착 공정에서 전기적인 단락 현상을 나타내었다. 이러한 이유와 공정 오차를 고려하여 소자의 passivation에 사용된 Si₃N₄의 두께를 1000 Å으로 결정하였다.

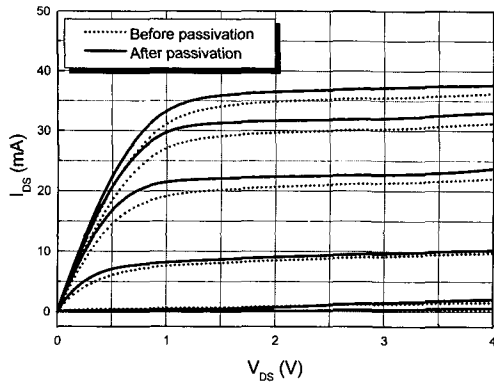
표 1은 SiH₄/NH₃의 혼합비에 따라 1000 Å의 두께로 passivation된 소자의 DC 및 주파수 특성 변화를 나타낸 것으로 가스의 혼합비가 5일 때 가장 적은 수소 함유량으로 인해 소자 특성이 향상되었음을 알 수 있다.

표 1. Passivation에 의한 소자 특성 비교
Table 1. Comparison of device characteristics as passivation.

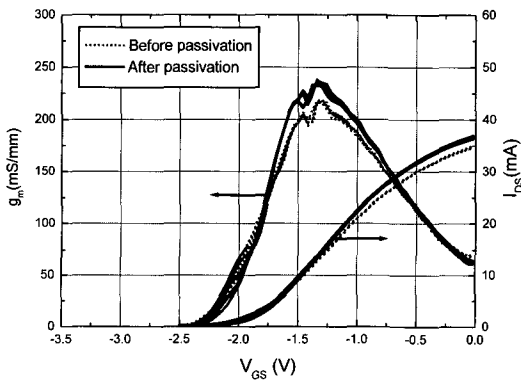
SiH ₄ /NH ₃ 혼합비	DC 특성				주파수 특성	
	Idss (mA)	Vk (V)	VP (V)	gm (mS/mm)	fT (GHz)	fmax (GHz)
Passivation 전	35	1.1	-2.5	215	43	109
1.6(10/6 sccm)	31	1.0	-2.5	207	39	108
3.3(20/6 sccm)	33	1.0	-2.5	213	42	109
5(30/6 sccm)	37	0.9	-2.5	238	54	109
5.8(35/6 sccm)	32.5	1.0	-2.5	212.6	42	108
6.7(40/6 sccm)	26	1.1	-2.5	197.8	33	105

그림 6은 제작된 PHEMT의 passivation 전·후의 DC 특성을 나타낸 것으로, 그림 6(a)의 전류-전압 특성에서 passivation 전에는 무릎 전압은 1.1 V, 핀치-오프 전압은 -2.5 V, 드레인 포화 전류는 35 mA로 292 mA/mm의 드레인 전류 밀도를 나타내었으며, passivation 후에는 무릎 전압은 0.9 V, 핀치-오프 전압은 -2.5 V, 드레인 포화 전류는 37 mA로 드레인 전류 밀도는 308 mA/mm로 증가하였다. 그리고, 그림 6(b)의 전달 컨덕턴스 특성에서 V_{GS} = -1.34 V 및 V_{DS} = 2.5 V 일 때 passivation 전에는 215 mS/mm에서 passivation 후에는 238 mS/mm로 증가된 최대 전달 컨덕턴스를 얻었다.

제작된 PHEMT의 주파수 특성을 8510C 벡터 회로망 분석기(Vector Network Analyzer)를 이용하여 1 GHz에서 40 GHz의 주파수 범위에서 측정하였다. 측정



(a) 전류-전압 특성
(a) I-V characteristics



(b) 전달 컨덕턴스 특성
(b) Transconductance characteristics

그림 6. 60 μm×2 PHEMT의 passivation 전·후의 DC 특성
Fig. 6. DC Characteristics of a 60 μm × 2 PHEMT before and after passivation.

시 소자에 인가된 바이어스 조건은 드레인 전압을 2.5 V로, 게이트 전압을 -1.34 V로 하였다. 그림 7은 PHEMT의 이득 특성으로, 전류 이득 차단주파수의 경우, passivation 후 25 %가 증가하는 결과를 얻었다. passivation 후의 전류이득 차단주파수(f_T)는 54 GHz이고, 최대 공진 주파수(f_{max})는 109 GHz 이었다. 전류이득 차단주파수 및 최대 공진 주파수는 40 GHz의 S 파라미터를 이용하여 계산된 H_{21} 의 크기와 최대 가용 이득(G_{ma})를 -6 dB/octave의 기울기로 외삽하여 추출하였다. Passivation이 이루어지지 않은 소자의 경우 게이트 리세스 식각시 노출된 AlGaAs 층의 표면에 불완전한 격자 구조(dangling bond)가 존재하여 외부 이온이 흡착되어 소자 내의 채널을 통해 전자가 이동할 때 이

온이 지나는 전기적인 특성으로 인해 이동되는 전자의 산란이 발생하여 소자의 특성이 감소된다. Passivation 된 소자의 경우에는 노출된 불완전한 격자 구조에 Si_3N_4 의 Si이 흡착되어 안정적인 격자를 형성하여 이동 전자의 산란을 최소화하여 소자의 특성 저하를 막고 후속 공정에서 발생할 수 있는 기타 이온에 의한 소자 특성 저하를 방지할 수 있다^[5]. 이러한 이유로 인하여 passivation 후의 소자의 전류값, 전달 컨덕턴스 및 RF 특성이 향상된 것으로 분석되었다.

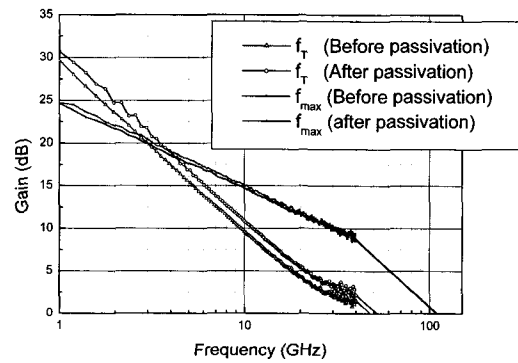


그림 7. 60 μm×2 PHEMT의 이득 특성
Fig. 7. Gain Characteristics of 60 μm×2 PHEMT before and after passivation.

IV. 결 론

본 논문에서는 PECVD 시스템을 이용하여 PHEMT 소자의 passivation 막으로 사용되는 Si_3N_4 박막의 특성을 최적화하고, 0.25 μm급 PHEMT에 적용하였다. 공정 파라미터에 따른 Si_3N_4 박막의 특성 변화를 관찰한 결과, 최적 공정조건은 SiH_4/NH_3 반응 가스의 혼합비율 5($\text{SiH}_4/\text{NH}_3=30/6$ sccm), 성장압력은 700 mTorr, 챔버 내 전극의 간격은 6.5 cm, 플라즈마 생성을 위한 RF power는 45 W이다. 성장된 박막의 특성은 적층률이 193 Å/min이고, 굴절률은 2.03, BHF에 대한 식각율은 950 Å/min을 얻었다. 단위 게이트 폭이 60 μm이며, 게이트 핑거 수가 각각 2개인 PHEMT 소자의 전류-전압 특성 및 전달 컨덕턴스 특성을 관찰한 결과, passivation 전의 무릎 전압은 1.3 V, 핀치-오프 전압은 -2.5 V, 드레인 포화 전류는 $V_{GS}=0$ V 및 $V_{DS}=2.5$ V에서 35 mA로 드레인 전류 밀도는 292 mA/mm이었으며, passivation 후의 무릎 전압은 0.9 V, 핀치-오프 전압은 -2.5 V, 드레인 포화 전류는 $V_{GS}=0$ V 및 $V_{DS}=2.5$ V

에서 37 mA로 드레인 전류 밀도는 308 mA/mm로 증가하였다. 전달 컨덕턴스 특성은 $V_{GS} = -1.34$ V 및 $V_{DS} = 2.5$ V에서 passivation 전에는 215 mS/mm에서 passivation 후에는 238 mS/mm로 향상되었다. S-파라미터의 경우 passivation 전·후의 변화는 거의 발생하지 않았다. 전류 이득 차단주파수는 passivation 후 25%의 증가하는 결과를 얻어 전류이득 차단주파수(f_T)는 54 GHz이고, 최대 공진 주파수(f_{max})는 109 GHz를 얻었다. 본 논문의 결과는 30 GHz이상의 마이크로파 대역 MMIC 회로 제작시 소자의 passivation 공정에 응용 가능하다.

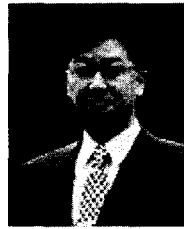
참 고 문 헌

[1] Fazal Ali, Aditya Gupta, HEMTs and HBTs: Devices, Fabrication, and Circuits, Artech House, pp. 88-89, 1991.
 [2] 신재완, 이복형, 이성대, 전병철, 이일형, 이진구, "PECVD를 이용한 Si₃N₄박막의 공정변수에 따른 특성분석과 응용," 1999년도 대한전자공학회 하계 종합학술대회 논문집, 제 22권, 1호, pp. 926-929, 1999.
 [3] 이일형, 김성수, 윤관기, 김상명, 이진구, "열적 증착법을 이용한 Air-Bridge 제작과 그 응용에 관한 연구," 대한전자공학회 논문지, 제 32권, A편, 제12호, pp. 53-57, 1996
 [4] M. orfert, K. Richter, "Plasma enhanced chemical vapor deposition of SiN film for passivation of three-dimensional substrates", Surface and Coatings Technology 116-119, pp. 622-628, 1999.
 [5] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1981.

저 자 소 개



申在完(學生會員)
 1999년 2월 : 국립환경대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2001년 2월 : 동국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). <주관심분야> 유전 박막 적층 및 화합물 반도체 소자 제작 등



朴炫澈(正會員)
 1995. 9~현재 : 동국대학교 전자공학과 부교수. 1992. 11~1995. 8 : University of Virginia 연구원. 1986. 2. : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1989. 1. : Cornell University 전자공학과 졸업(공학석사). 1993. 1. : Cornell University 전자공학과 졸업(공학박사)



李鎭九(正會員)
 1969 : 국립항공대학교 전자공학과(공학사). 1975 : 서울대학교 전자공학과(공학석사). 1982 : Oregon State University 전기공학과(공학박사). 1985 : Cray Research, USA, Research Scientist. 1985 : Microwave Semiconductors, USA, Senior Engineer. 1990~1991 : University of Michigan, Visiting Research Scientist. 1999~현재 : 대한전자공학회 상임이사. 1995~현재 : 한국 전자과학회 이사. 1996~현재 : 한국산업인력관리공단, 기술사 검정 심의위원. 1985~현재 : 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수. 1999~현재 : 밀리미터파 신기술 연구센터 소장



朴亨茂(正會員)
 1999. 12~현재 : 동국대학교 전자공학과 부교수. 1978. : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1980. : 한국과학기술원(KAIST) 전자공학과 졸업(공학석사). 1984. : 한국과학기술원(KAIST) 전자공학과 졸업(공학박사)