

論文96-33A-12-8

# 열적 증착법을 이용한 Air-Bridge 제작과 그 응용에 관한 연구

## (Studies on Air-Bridge Fabrication Using Thermal Evaporation Method and its Application)

李 逸 炯 \*, 金 星 秀 \*, 尹 寬 基 \*, 金 尙 明 \*\*, 李 鎮 九 \*

(Il-Hyeong Lee, Sung-Soo Kim, Kwan-Ki Yoon, Sang-Myung Kim, and Jin-Koo Rhee)

### 요 약

본 논문에서는 초고주파 대역의 능동소자, 수동소자 및 MMIC에서 격리된 전극을 상호연결하기 위한 간단한 air-bridge 공정법을 제안하였다. 제안한 air-bridge 공정은 열적증착법을 이용하였으며, 사용된 포토리스 그라피 방법으로는 2  $\mu\text{m}$  두께까지 증착된 금속을 용이하게 리프트-오프 할 수 있는 영상반전 공정과 비교적 공정이 간단한 positive PR 공정을 함께 사용하였다. Air-bridge 공정의 실험결과, 교차된 부분의 air-gap 두께 3.5  $\mu\text{m}$ , air-bridge 금속 두께 2  $\mu\text{m}$ , air bridge 금속의 폭 5~60  $\mu\text{m}$ , air-bridge post 간격 25~200  $\mu\text{m}$  범위에서 붕괴되지 않는 양호한 air-bridge를 제작할 수 있었다. 이를 이용하여 제작한 초고주파 전력용 GaAs MESFET는 10 GHz에서 MAG가 10 dB 였고, 200  $\mu\text{m}$ ×6 회전인 직사각형 나선인덕터의 인덕턴스는 X-band에서 4.5 nH 였다.

### Abstract

In this paper, a simple fabrication technique of an air bridge for interconnection of isolated electrodes of microwave active and passive devices and MMIC's is proposed. The proposed air-bridge processes are mainly combinations of thermal evaporation, positive photoresist and image reversal processes for easy lift-off of up to 2.0  $\mu\text{m}$  thick metal. According to the results of air-bridge processes, it is confirmed that air gap and thickness of the air-bridge are about 3.5  $\mu\text{m}$ , and 2.0  $\mu\text{m}$ , respectively. And it is also possible to make the fine air-bridge with widths of 5~60  $\mu\text{m}$  and post-intervals of 25~200  $\mu\text{m}$  without collapse. Finally, GaAs power MESFET's and rectangular spiral inductors are fabricated and measured in order to confirm of feasibility of the proposed air-bridge processes. The MAG of the fabricated power MESFET's is 10 dB at 10 GHz, and the inductance of the(200  $\mu\text{m}$  × 6 turns) rectangular spiral inductors 4.5 nH in X-band.

### I. 서 론

정보고속화와 개인휴대 통신화 등에 따른 이동 및 위성통신에 사용되는 통신 시스템의 소형화, 경량화 및

고신뢰도 등의 요구로 GaAs계를 이용한 초고주파 단 일칩 집적회로(MMIC : Monolithic Microwave Integrated Circuit)의 개발에 대한 중요성이 점차 부각되고 있는 실정이다.<sup>[1-2]</sup> 따라서, MMIC의 성능을 좌우하는 초고주파 저접합·고전력 능동소자 및 수동소자의 제작을 위한 제반 공정기술은 매우 중요하다. 특히, 능동소자, 수동소자 및 MMIC의 제작에 필수적인 격리된 전극을 상호 연결하는 공정기술의 개발은 매우 중요한 과제중의 하나이다. 일반적으로 잘 알려진 격리전극을 상호연결하는 방법으로는 와이어 본딩

\* 正會員, 東國大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng., Dongguk University)

\*\* 正會員, 韓國通信

(KT Research Lab.)

接受日字: 1995年4月6日, 수정완료일:1996년12월12日

(wire-bonding), 플립칩(flip chip), 비어 홀(via-hole) 및 크로스 오버(cross-over) 등이 있다. 이 방법들 중에서 크로스 오버 기술이 다른 기술들에 비해 공정이 용이한 편으로 크로스 오버 방법에는 공정이 비교적 간단한 절연체 격리구조와 공정이 다소 복잡한 air-bridge 구조가 있다. 절연체 격리구조는  $\text{SiO}_2$  또는  $\text{Si}_3\text{N}_4$  등의 절연물질로 교차된 부분의 두 전극을 격리시키는 방식이다. Air-bridge 구조는 격리전극간에 air-gap을 형성시키는 방식이다. Air-bridge 구조는 절연체 격리구조에 비해 공기의 비유전율이  $\text{SiO}_2$  또는  $\text{Si}_3\text{N}_4$  등의 절연체의 비유전율보다 훨씬 낮고 air-gap의 두께가 절연체의 두께보다 훨씬 두꺼우므로 초고주파에서 나타나는 기생 캐패시턴스의 크기를 크게 줄여 소자의 특성을 개선시킬 수 있다. 이러한 air-bridge 공정의 두꺼운 air-bridge 금속을 형성하는 방법에는 Au plating과 진공 증착을 이용하는 방법이 있다. 진공 증착을 이용할 경우 Au plating에 비해  $2.0 \mu\text{m}$  이상의 두꺼운 금속을 증착한 후 리프트-오프하기 위한 over-hang 구조를 갖는 두꺼운 PR(photoresist) 리소그래피 기술이 필요하며 Au의 소비량이 증가하는 단점이 있으나, 공정이 매우 간단하고 증착된 금속의 표면이 매우 양호하여 초고주파용 능동 및 수동소자 제작에 유리하다는 장점이 있다.<sup>13,51</sup>

본 논문에서는 진공 열증착방식을 이용한 간단한 air-bridge 공정을 제안하고 제안된 공정의 응용 가능성을 검증하기 위해 초고주파 전력용 GaAs MESFET와 직사각형 나선 인덕터를 제작한 후 DC 및 RF 특성을 측정하고 분석하였다.

## II. Air-bridge 제작을 위한 영상반전공정

영상반전공정(IR : Image Reversal)은 미세선폭 제어가 용이하며, 특히, 자동적으로 over-hang 구조를 갖는 리소그래피 패턴을 얻을 수 있다. 또한, 공정조건을 적절히 변형하면 PR의 두께를 증가시킬 수 있어서 두꺼운 금속의 증착 및 리프트-오프에도 매우 유용하다. 이러한 영상반전공정을 본 연구실에서 자체적으로 연구하여 제안한 air-bridge 공정의 포토리소그래피에 이용하였다. 그림1에서는 본 논문에서 사용한 기존의 Positive PR 공정과 연구된 영상반전공정의 세부공정 조건을 비교하였다. 영상반전공정은 AZ5214E PR을 사용하였으며, Positive PR 공정은 AZ1518 PR을 사

용하였다. Positive PR 공정을 이용하여 over-hang 구조를 얻기 위해서는 MCB(monochrolobenzne) 처리가 반드시 필요하지만 영상반전공정을 이용하면 reverse baking 및 flood exposure를 실시하여 자동적으로 over-hang 구조를 얻을 수 있다.<sup>161</sup> 특히, 그림1에서와 같이 영상반전공정에서 HMDS(hexa-methyl-disilazan)와 PR 코팅, 열처리 및 노광등의 최적 조건을 공정실험을 통하여 구했다. 즉, 리소그래피된 PR이 over-hang 구조이면서 동시에 두께가  $0.5 \mu\text{m} \sim 3.0 \mu\text{m}$  범위인 패턴을 얻을 수 있었으며, 본 논문에서 제안한 air-bridge 공정의 두꺼운 air-bridge 금속을 증착 후 리프트-오프하였다.

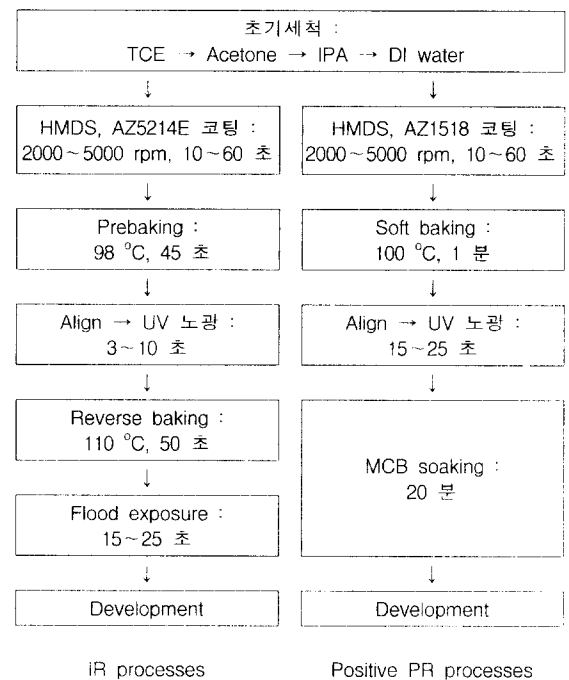


그림 1. Over-hang 구조를 위한 영상반전공정과 positive PR 공정 비교

Fig. 1. IR and positive PR processes for over-hang structures.

## III. 증착을 이용한 Air-bridge 공정

그림2는 본 논문에서 제안한 격리된 전극을 air-bridge로 연결하기 위한 증착을 이용한 air-bridge 공정의 단면도이다. 그림2(a)는 air-bridge로 연결될 부분을 높게 만들기 위해 Au를 7000Å 정도 증착하여 간격이  $30 \mu\text{m}$ 인 air-bridge post를 형성한 모습이다.

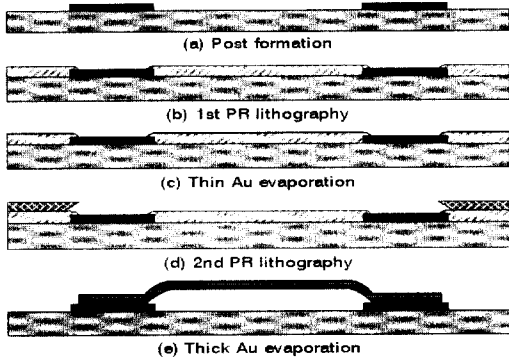


그림 2. 제안된 Air-bridge의 공정단면도  
Fig. 2. Cross-sections of the proposed air-bridge processes.

그림 2(b)는 positive 공정을 이용한 surface via 패턴 포토리소그래피로 공정순서는 HMDS 및 AZ1518 코팅(2000 rpm, 10 초), soft baking(100 °C, 60 초), 패턴정렬 후 UV 노광(15 초) 및 현상을 실시한 후 hard baking(115 °C, 2~3 분) 을 실시하여 PR을 굳혀주었다. 이때, 현상된 PR의 가장자리가 낮아지도록 하여 금속배선의 끊어짐을 방지할 수 있도록 하였다. Hard baking 후의 PR # 1의 두께는 약 3.5 μm 이다. 그림 2(c)는 웨이퍼 표면에 약 100~200Å 정도의 Au 박막을 증착시킨 모습으로 Au 박막이 다음 공정의 포토리소그래피에서 PR # 1의 현상을 방지한다. 이때 Au 박막의 두께가 너무 두꺼우면 다음 공정의 패턴정렬은 물론 air-bridge 금속 증착후 리프트-오프가 어려워지고, 너무 얇으면 다음공정의 포토리소그래피가 어려워지기 때문에 Au 박막 두께의 최적화는 매우 중요하다. 그림 2(d)는 영상반전공정을 이용한 금속 패턴 포토리소그래피(PR # 2)후의 모습으로 공정순서는 HMDS 및 AZ5214E 코팅(2000 rpm, 10 초), prebaking(98 °C, 45 초), 패턴정렬 후 UV 노광(7 초), reverse baking(110 °C, 50 초), flood exposure(25 초)를 실시한 후에 현상하였다. PR # 2의 패턴은 리프트-오프에 용이한 over-hang 구조이며 두께는 2.5 μm 이다. 그림 2(e)는 약 1.5~2 μm 두께의 Au를 증착한 후 아세톤으로 리프트-오프하여 air-bridge 제작이 완성된 모습으로, 금속증착 직전에 표면에 노출된 Au 박막을 Au 에칭용액(Concentration N : KCN : H<sub>2</sub>O = 2 ml : 1 mg : 20 ml)으로 에칭하여 리프트-오프가 매우 용이하도록 하였다.

상기의 연구된 공정을 이용하여 여러가지 형태의 능동소자 및 수동소자를 제작한 결과 air-bridge 높이 3.5 μm, air-bridge 금속 두께 2 μm, air-bridge의 폭 5~60 μm, air-bridge post 간격 25~200 μm 범위인 다양한 종류의 air-bridge를 용이하게 제작할 수 있었다. 그림 3과 그림 4는 상기의 air-bridge 공정을 통하여 제작된 능동 및 수동소자의 air-bridge 부분의 SEM 사진이다.

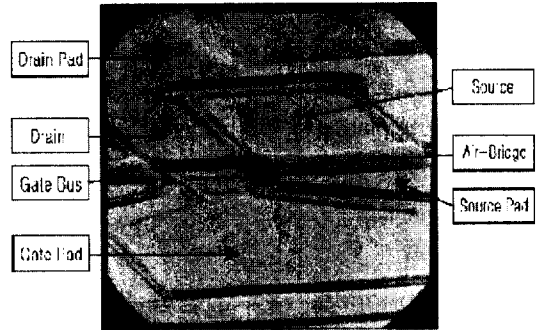


그림 3. 제안된 air bridge 공정으로 제작된 능동소자의 SEM 사진  
Fig. 3. A SEM photo of the fabricated active device using proposed air-bridge processes.

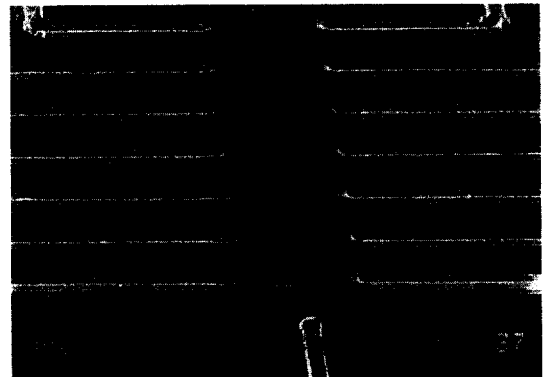


그림 4. 제안된 air-bridge 공정으로 제작된 직사각형 나선 인덕터의 SEM 사진  
Fig. 4. A SEM photo of the fabricated rectangular spiral inductor using proposed air-bridge processes.

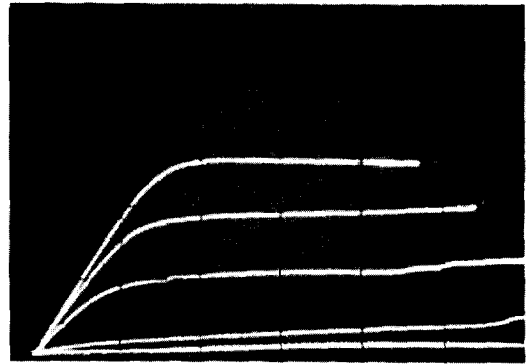
그림 3은 게이트 길이가 0.4 μm인 전력용 GaAs MESFET의 source와 source pad 사이를 그림 2에 제안된 air-bridge 공정을 이용하여 제작한후 촬영한 게이트 부분의 SEM 사진으로 게이트 버스라인과 두

계 2  $\mu\text{m}$ 인 air-bridge 사이의 air-gap은 3.5  $\mu\text{m}$  이상의 두께이고 post간의 간격은 30  $\mu\text{m}$  이며 air-bridge 금속의 폭은 50  $\mu\text{m}$  이다. 그림 4는 제작된 rectangular spiral 인덕터의 air-bridge 부분의 SEM 사진으로 금속 두께 2  $\mu\text{m}$ , 폭 5  $\mu\text{m}$ 인 air-bridge Au 금속이 첫 번째 레벨 Au 금속을 3.5  $\mu\text{m}$  높이로 overlay 함을 알 수 있다.<sup>17, 81</sup> Plating을 이용한 air-bridge 공정이 2  $\mu\text{m}$  이상 두꺼운 금속막 형성에 유리하고 선택적 plating이 가능하여 Au 소모량이 적다는 장점이 있다. 한편, 본 논문의 증착을 이용한 air-bridge 공정은 Au 의 소모량은 다소 많지만 lift-off 공정으로 2  $\mu\text{m}$  두께의 금속막을 쉽게 형성할 수 있기 때문에 plating에 비해 공정이 간단하다. 특히, 형성된 금속 표면 morphology가 매우 양호하다는 장점이 있다.<sup>181</sup>

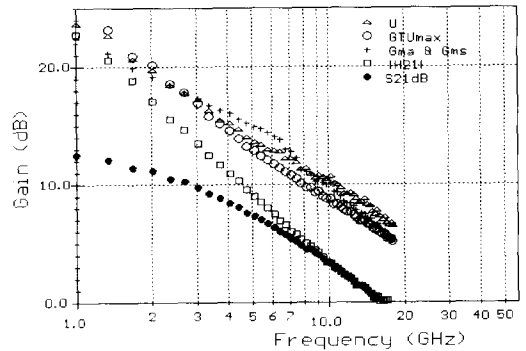
IV. Air-bridge로 제작된 능동 및 수동 소자의 DC 및 RF 특성

제안한 air-bridge 공정의 실용 가능성을 검증하기 위해 air-bridge 공정으로 능동 및 수동소자를 제작한 후 DC 및 RF 특성을 측정하였다. 그림 5는 air-bridge 공정을 이용하여 제작된 게이트길이  $\times$  단위 게이트 폭  $\times$  게이트 핑거수가 0.4  $\mu\text{m} \times 150 \mu\text{m} \times 6$  개인 전력용 GaAs MESFET의 DC 및 RF 특성이다. 제작에 사용된 에피층 웨이퍼 구조는 (100) 반절연 GaAs 기판 위에 우선 두께 5000Å의 buffer층을 MBE 방법으로 성장 시킨 후, 그 위에 도핑농도가  $2.0 \sim 0.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  이고 두께가 1000Å인 high doped n-GaAs층과 도핑농도가  $5.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 이고 두께가 2000Å인 low doped n-GaAs층을 연속적으로 성장시켰으며, 마지막으로, 700Å의 undoped passivation GaAs층과 도핑농도가  $3.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  이고 두께가 700Å인 n<sup>+</sup> cap층을 MBE로 성장한 구조를 이용하였다. 그림 5(a)는 DC 특성으로  $V_{ds} = 1.0\text{V/div}$ ,  $V_{gs} = -1.0\text{V/step}$ ,  $I_{ds} = 0.1\text{A/div}$  이고 포화전류 265 mA, 핀치-오프 전압 3V, 무류전압 (knee voltage)은 1.5V이다. 그림 5(b)는 HP사의 8722A vector network analyzer와 MicroTek사의 Cascade probe를 이용하여  $V_{ds} = 5 \text{ V}$ ,  $I_{ds}=0.5 I_{dss}$ 의 바이어스 조건에서 S-파라미터를 측정된 후 주파수에 따른 이득 특성을 계산한 것으로 소신호 이득

(● :  $S_{21}$ ), 전류 이득(□ :  $H_{21}$ ), 최대 가용 전력 이득 & 최대 안정 전력 이득(+ :  $G_{ma}$  &  $G_{ms}$ ), 최대 단방향 전송 전력 이득(○ :  $G_{TUmax}$ ), 단방향 전력 이득( $\Delta$  : U)등의 특성을 동시에 나타내었다. 그림에서 전류 이득 차단 주파수는 16 GHz 이고, 최대 공진 주파수는 45 GHz 이상이다. 또한, 10 GHz에서의 MAG는 약 10 dB를 얻었다.<sup>191</sup>



(a) DC characteristics(0.1A/div, 1.0V/div, -1.0V/step)



(b) RF characteristics ( $I_{ds}=0.5I_{dss}$ ,  $V_{ds}=5\text{V}$ ,  $f=1 \sim 18 \text{ GHz}$ )

그림 5. Air-bridge로 제작된 전력용 GaAs MESFET의 DC 및 RF 특성

Fig. 5. Measured DC and RF characteristics of the fabricated GaAs power MESFET using proposed air bridge processes.

그림 6은 상기의 air-bridge 공정으로 제작된 여러 종류의 수동소자 중에서 나선길이 $\times$ 회전수가 200  $\mu\text{m} \times 6$ 인 직사각형 나선 인덕터의 측정된 S-파라미터 특성으로 측정은 능동소자와 동일한 측정장비를 이용하였으며, 주파수 범위는 1~18 GHz 이다. 측정된 S-파라미터를 Libra를 이용하여 등가회로 파라미터를 추출

한 결과 X-band에서 설계한 값인 4.7 nH와 거의 유사한 4.5 nH를 얻을 수 있었다.<sup>[10]</sup>

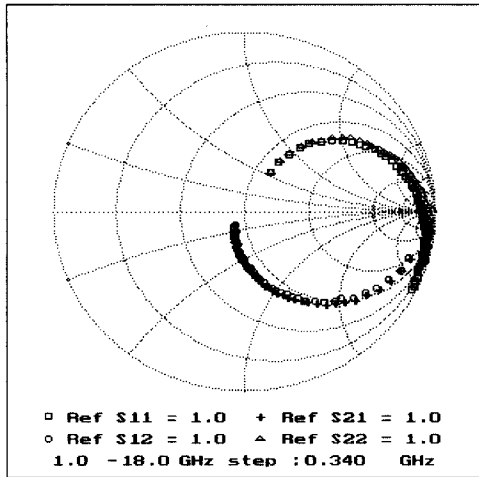


그림 6. Air-bridge로 제작된 직사각형 나선인덕터의 S-파라메타 특성

Fig. 6. Measured S-parameters characteristics of the fabricated rectangular spiral inductor using proposed air-bridge processes.

### V. 결론

본 논문에서는 초고주파 대역의 능동·수동소자 및 MMIC에서 격리된 전극을 상호 연결할 수 있는 열적 증착법을 이용한 간단한 air-bridge 공정법을 제안하였다. 제안한 air-bridge 공정의 응용 가능성을 검증하기 위해 전력용 GaAs MESFET 및 직사각형 나선인덕터를 제작한후 DC 및 RF 특성을 측정하였다. 제안한 air-bridge 공정은 기본적으로 열증착을 이용하였으며, 영상반전공정과 positive PR 공정을 교대로 이용하였다. Air-bridge 제작 결과, air-bridge 높이 3.5  $\mu\text{m}$ , air-bridge 금속 두께 2  $\mu\text{m}$ , air-bridge 금속의 폭 5~60  $\mu\text{m}$ , air-bridge post 간의 간격 25~200  $\mu\text{m}$ 를 갖는 여러 종류의 air-bridge 를 용이하게 제작할 수 있었다. 또한, 제안된 air-bridge 공정으로 제작된 전력용 GaAs MESFET에서 16 GHz 의 전류이득 차단주파수와 45 GHz 이상의 최대공진주파수를 얻었으며, 10 GHz 에서 10 dB 의 MAG를 얻을 수 있었다. 또한, 제작된 직사각형 나선 인덕터로부터 X-band에서 4.5 nH의 인덕턴스를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 제안된 증착을 이용한 air-bridge 공정

은 GaAs MESFET, HEMT 및 HBT 등의 초고주파 전력용 능동소자와 직사각형 나선 인덕터 및 커패시터등의 수동소자는 물론 MMIC 에서 격리된 전극의 상호 연결에 매우 유용한 반도체 공정기술이라 사료된다.

※ 본 연구는 한국과학재단과 1994 년도 교육부 학술 연구조성비(ISRC 94-E-3248) 및 국방과학연구소(ADD-94-7-1)의 연구비지원에 의해 연구되었음.)

### 참고 문헌

- [1] Masafumi S., Suoichi K., "38-GHz-band high power amplifier module for satellites on-board use," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 40, no. 6, pp. 1215-1222, June 1992.
- [2] K. L. Tan, Dwight C. Streit, R. M. Dia, Shing K. Wang, A. C. Han, Pei-Ming D. Chow, Tien Q. Trinh, P. H. Liu, J. R. Velebir, and H. C. Yen, "High-Power V-Band Pseudomorphic InGaAs HEMT", IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-12, No. 5, pp. 213-214, May, 1991.
- [3] Ralph Williams, "Modern GaAs Processing Methods," Artech House, 1990.
- [4] 이진구 등 "AlGaAs/GaAs 계를 이용한 전력용 증폭기의 MMIC 화에 관한 연구," 서울대 반도체 공동연구소 연구보고서 ISRC 94-E-3141, 1994. 5
- [5] 이진구 등 "X-band용 고효율 MMIC 전력증폭기의 연구," 한국과학재단 최종 연구 보고서 1995. 10
- [6] Il Hyeong Lee, Sang-Myung Kim, Kwan-Ki Yoon, Suk-Hyun Shin, and Jin-Koo Rhee, "The Fabrication of a Sub-micron Gate using IR Process", Proceedings of KITE Fall Conference, pp. 356~358, 1992.
- [7] 이일형, 김상명, 이웅호, 이진구, "Air-bridge 공정을 이용한 GaAs Power MESFET 의 제작 및 특성 연구," 대한전자공학회 논문지, 제32권, A편, 제12호, pp. 136-141. 1995. 12
- [8] 이진구등, "차기세대 MMIC 소자 개발연구", 국방과학연구소 1차년도 최종보고서, 1994. 12

[9] Il-Hyeong Lee, Sung-Soo Kim, Yeon-Sik Chae, Jin-Seub Yoon and Jin-Koo Rhee, "Studies on Fabrication Techniques of Sub-0.4  $\mu\text{m}$  T-gate and  $\Gamma$ -gate Structures Using UV-Lithography", 4th ICVC, pp.

313-316, Oct., 15-18, Seoul, Korea, 1995.

[10] 윤관기, 김상명, 이진구, "GaAs MMIC를 위한 캐패시터와 인덕터의 설계 및 제작에 관한 연구", 동국대학교 반도체연구소 반도체 재료 및 회로 논문집, 제 1 집, pp. 9-15, 1994.

---

저 자 소개

---

李逸炯(正會員) 第 31卷 A編 第 1 號 參照  
현재 동국대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중



金星秀(正會員)  
1970년 3월 5일생. 1993년 강릉대학교 물리학과 학사. 1997년 2월 동국대학교 대학원 전자공학과 공학석사. 주관심 분야는 화합물 반도체 소자 및 MMIC 설계·제작등임

尹寬基(正會員) 第 33卷 A編 第 9 號 參照  
현재 동국대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중

金尙明(正會員) 第 30卷 A編 第 8 號 參照  
현재 한국통신 신입 연구원

李鎭九(正會員) 第 31卷 A編 第 1 號 參照  
현재 동국대학교 전자공학과 교수.