

論文95-32A-3-13

개선된 T-gate기술로 제작한 초저잡음 AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic HEMT 소자의 특성

(A Super Low Noise Characteristics of AlGaAs/InGaAs/GaAs Pseudomorphic HEMTs Fabricated by the Improved T-Gate)

李進熙*, 尹亨燮*, 崔相洙*, 朴喆淳*, 朴亨茂*

(Jin-Hee Lee, Hyung-Sup Yoon, Sang-Soo Choi, Chul-Soon Park, and Hyung-Moo Park)

요약

게이트 길이가 $0.15\mu\text{m}$ 인 AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic HEMT (PHEMT) 소자를 종래의 T-gate 공정보다 게이트 단면적을 2배 이상 증대시킨 새로운 T-gate기술로 제작하였다. 게이트 길이와 폭이 각각 $0.15\mu\text{m}$, $140\mu\text{m}$ 인 PHEMT는 12GHz에서 잡음지수가 0.45dB, 이득이 10.8dB인 초저잡음 특성을 보였다. 그리고 PHEMT소자의 차단주파수는 94GHz이고, 상호전달전도도는 418 mS/mm인 특성을 얻었다.

Abstract

We have successfully fabricated a super low noise pseudomorphic HEMT(PHEMT) device with AlGaAs/InGaAs/GaAs structure by using improved T-Gate which have increased a large gate cross-sectional area about two times in comparison with those of conventional T-gate processes. The PHEMTs with $0.15\mu\text{m}$ -long and $140\mu\text{m}$ -wide gates have exhibited a super low noise characteristics, the noise figure of 0.45dB with associated gain of 10.87dB at 12GHz. The cut-off frequency of the device is 94GHz with a transconductance of 418mS/mm.

I. 서론

갈륨비소 기판을 사용하는 고 전자이동도 트랜지스터 (HEMT : High Electron Mobility Transistor)는 높은 주파수에서의 저잡음특성과 소자특성이 우수하여 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits) 및 초고속 LSI(Large Scale Integrated Circuits)의 제작에 각광을 받고있는 소자

이다^[1~2]. 이것은 전자이동도가 크고 이차원 전자가스(2DEG : 2 Dimensional Electron Gas)의 농도가 높아 전하수송특성이 뛰어나기 때문이다. HEMT 소자의 carrier 공급층으로는 균일하게 도핑한 AlGaAs층을 사용하고 있으며, 최근 들어서는 면도핑 방법이 많이 사용되고 있다^[3]. 그리고 채널 층으로는 초기에는 GaAs층이 주로 사용되었으나 현재는 pseudomorphic층인 InGaAs층을 채택하고 있다^[4~5]. 그 이유는 InGaAs 채널층의 도입으로 인해 채널이 양자우물화 되고 밴드갭 불연속성도 커진다. 따라서 채널층에서의 전자이동도가 GaAs 채널보다 1.5배 정도 크고 이차원 전자가스의 농도가 2배정도 높아져서

* 正會員, 韓國電子通信研究所 半導體研究團

(Elec., Telecommunications Research Institute, Semiconductor Technology Division)

接受日字 : 1994年 10月 12日

HEMT 소자의 특성을 개선시킬수 있기 때문이다. HEMT 소자의 제작공정 측면에서 보면 소자의 gate 길이가 짧아질수록 필연적으로 기생저항이 증가하여 소자의 성능이 저하되는 현상이 발생하기 때문에 gate 의 단면적을 크게 하여 저항을 감소시킬 수 있는 T-gate 형성기술이 필요하다. 또한 문턱전압 (Threshold Voltage : V_{th})을 안정하게 조절하고 소자의 특성을 개선하기 위해서는 식각깊이를 정확하게 조절할 수 있는 게이트리세스 식각공정이 요구되고 있다. 게이트리세스 식각공정에서 기존의 황산, 질산, 인산 등의 식각용액은 AlGaAs에 대해 GaAs층을 선택적으로 식각하기 어렵다. 반면에 선택적 게이트 리세스 식각공정은 식각깊이를 정확하게 제어할 수 있고 소자특성의 균일도 개선, 수율향상 및 재현성있는 소자를 제작 할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

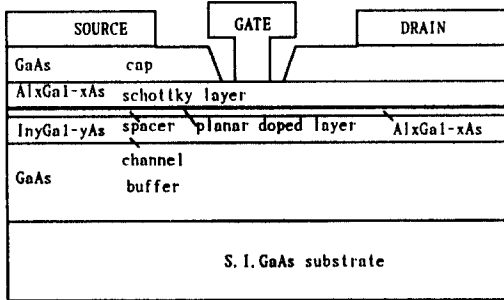


그림 1. 제작에 사용한 PHEMT 소자의 에피구조.
Fig. 1. The epitaxial layer structure of fabricated PHEMT.

본 연구에서는 T형 gate의 단면적을 크게 한 개선된 T-gate 형성기술과 AlGaAs에 대한 GaAs의 선택적 식각특성이 뛰어난 구연산계 용액을 이용한 선택리세스 식각방법으로 게이트 길이가 0.15 μm 인 AlGaAs/InGaAs pseudomorphic HEMT(PHEMT) 소자를 제작하였고 DC특성과 고주파수에서의 잡음특성 등을 조사하였다. 제작한 PHEMT 소자는 12GHz에서 잡음 지수가 0.45dB, 이득이 10.87dB인 초저잡음특성을 보였다. 그리고 최대 상호전달전도도(Transconductance : gm)는 418mS/mm이고 이 때의 차단주파수는 94GHz의 우수한 고주파특성을 나타내었다.

II. 실험

본 실험에서 성장한 PHEMT 에피 웨이퍼의 단면구조를 그림 1에 나타내었고 분자선 에피택시 장치(MBE)로 성장하였다. 에피구조는 V_{th} 를 -1.0V로 맞

추고, 가장높은 gm특성을 갖도록 1차원 Poisson-Schrodinger 방정식으로 계산하여 결정하였다. 에피 구조 성장은 우선 반절연성 GaAs 기판에 6000Å 두께의 undoped GaAs 완충층과 150Å의 strained 층인 InGaAs 채널을 성장하고, 2DEG층으로의 carrier 공급원으로는 면도핑층을 사용하였다. Schottky gate 층은 doping을 하지않은 AlGaAs층을 사용하였고 오믹접촉 저항을 낮추기 위해서 $5.0 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 으로 높게 도핑한 GaAs cap층을 차례로 성장하여 PHEMT 에 피구조를 완성하였다. Hall측정결과 여기서 상온(300K)에서의 2DEG층의 carrier농도는 $2.15 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 이고 전자의 이동도는 $6,300\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이었으며 77K 에서 2DEG층의 carrier농도는 $2.41 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 이고, 전자의 이동도는 $16,600\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이었다.

본 연구에서 제작한 PHEMT는 게이트 길이가 0.15 μm , 게이트는 두개의 finger로 구성되어 있고, 폭이 70 μm 인 두개의 게이트로 구성되어 있으므로 실제의 게이트폭은 140 μm 이다. 소스와 드레인간의 간격은 3.0 μm 이다. PHEMT 소자의 제작은 소자격리, 오믹접촉전극 형성, T형 게이트 패턴형성, Schottky 게이트 전극형성 등의 공정 순서로 진행하였다.

소자사이를 전기적으로 분리하기 위하여 광학 스텝 퍼로 활성영역을 정의한 후 GaAs cap 층과 2DEG층 아래까지 메사 식각하였다. 이 때 사용한 식각용액은 $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 4 : 1 : 90$ 의 조성을 가지며, 식각깊이는 2,500Å으로 하였고 식각 경사도는 60도 정도의 양각을 갖도록 하였다.

저항성 접촉공정은 형상반전 리소그라피 공정으로 감광막의 형상이 음각인 패턴을 형성하여 금속이 쉽게 리프트 오프되도록 하였다. 먼저 n형의 저항성 접촉 공정은 AuGe계 오믹 금속을 thermal evaporator에 의해 증착하고 낮은 저항을 얻기 위하여 금속열처리장치를 사용하여 N_2 분위기에서 390 $^\circ\text{C}$ 에서 20초 동안 열처리하였다.

리소그라피 공정에서는 해상도와 정렬정밀도가 가장 중요하다. 더우기 HEMT소자에서는 게이트길이가 소자특성에 지배적인 영향을 주므로 미세 게이트의 형성이 필수적이다. 본 연구에서는 전자빔 직접노광장치를 사용하여 게이트 길이가 0.15 μm 인 T형 게이트 패턴을 형성하였다. 이 때 사용한 감광막은 PMMA와 P(MMA-MAA)이였으며 단면적이 큰 개선된 T형 게이트를 형성하기 위하여 전자선을 다단계로 노광하였다. 게이트리세스 식각은 구연산과 과산화수소를 3 : 1로 희석한 용액을 사용하였으며 GaAs의 식각율은 분당 1,700Å 이고 약 15 %정도 과식각을 하였다. 이

때 AlGaAs에 대한 GaAs의 선택적 식각비율은 20 이상이었다. Schottky gate금속은 Ti/Pt/Au를 전자선 증착기를 사용하여 각각 400Å/200Å/4400Å의 두께로 증착한 후 리프트 오프하여 형성하였다.

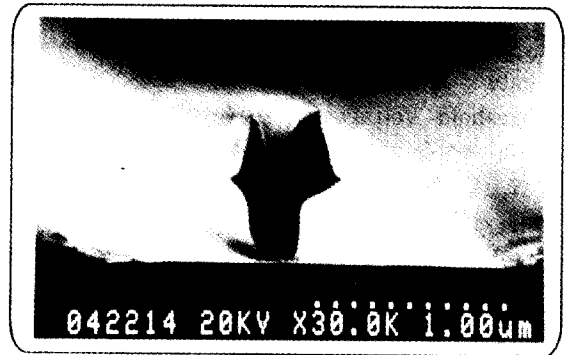
소자의 전기적측정은 DC, RF 및 잡음지수 특성으로 나누어서 조사하였다. DC측정은 HP4145B parameter analyzer를 사용하여 상호전달전도도(gm), 문턱전압(V_{th}), 드레인포화전류(I_{dss}) 등을 측정하였다. 그리고 RF 및 잡음지수 측정에서는 HP 8510B network analyzer / ATN NP5B solid state 튜너를 사용하여 차단주파수, 잡음지수, 이득 등을 측정하였다.

III. 결과 및 분석

PHEMT 소자의 오믹특성은 5, 10, 15, 20, 30 μ m의 금속간 거리를 갖는 TLM (Transmission Line Model) 패턴을 사용하여 구하였다. PHEMT 소자의 오믹접촉 저항값은 0.23 Ω -mm로서 비교적 낮은 저항값을 나타내고 있다. 전자빔 직접노광장치에 의한 T-gate의 단면형상은 앞에서 언급한 바와 같이 전체공정에서 가장 중요한 공정이다. 게이트형성시 가장 중요하게 고려할 점은 역시 짧은 게이트 길이에 대해 상대적으로 낮은 저항값을 어떻게 얻는가 하는 것이다. 즉 저항을 낮추기 위하여 T-gate의 상부 면적을 넓게하여 단면적을 크게하는 방법이 가장 쉬운 방법이다. 따라서 본 연구에서는 T-gate의 상부의 면적을 넓게하기 위하여 다단계 노광방법을 사용하였다. 다단계 노광방법은 T-gate의 바다부분과 상부 부분을 서로 분리시킨 후 각부분의 노광량을 서로 다르게 하여 정렬 및 노광하는 방법이다. 이 방법으로 T-gate의 단면적을 기존의 T-gate보다 2배이상 넓게 한 개선된 T-gate를 형성할 수 있었다. 전자빔 직접노광방법으로 형성한 T-gate의 단면형상을 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 (a)는 통상적인 T-gate를 나타내고 있으며, 그림 2의 (b)는 다단계 노광방법으로 형성한 개선된 T-gate형상을 나타낸 것이다. 기존의 T-gate인 경우 S-parameter 최적화를 통해서 얻은 게이트저항은 2.8 Ω 이고, 본 연구에서 사용한 다단계 노광방법으로 형성한 개선된 T-gate인 경우의 게이트저항은 1.2 Ω 으로 게이트저항이 2배 이상 개선되고 이로 인하여 아래의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 잡음특성이 향상된다.

그리고 제작한 PHEMT 소자의 DC 특성으로서 Schottky diode 특성은 3 : 1 구연산계 용액을 이용하여 N' GaAs층만을 선택적으로 식각한 후, 게이트 금속과 소스전극 사이에서 측정하였다. Schottky

diode의 순방향 특성에서 구한 diode의 이상지수값은 1.54 이었다.



(a)



(b)

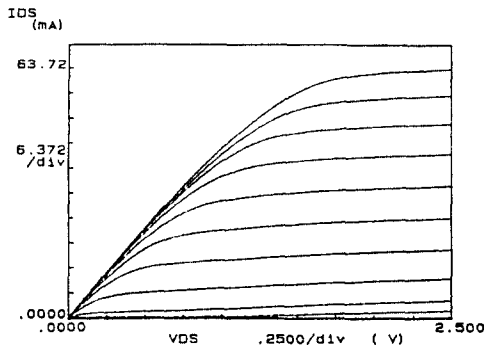
그림 2. (a) 단일노광 방법에 의해 제작한 T-gate 형상. (b) 다단계 노광방법에 의해 형성한 개선된 T-gate의 단면형상. (footprint: 0.15 μ m, top width : 0.6 μ m)

Fig. 2. (a) Cross-sectional SEM photography of gate fabricated with single exposure. (foot print : 0.15 μ m) (b) Cross-sectional SEM photography of gate fabricated with multiple exposure. (footprint : 0.15 μ m, top width : 0.6 μ m)

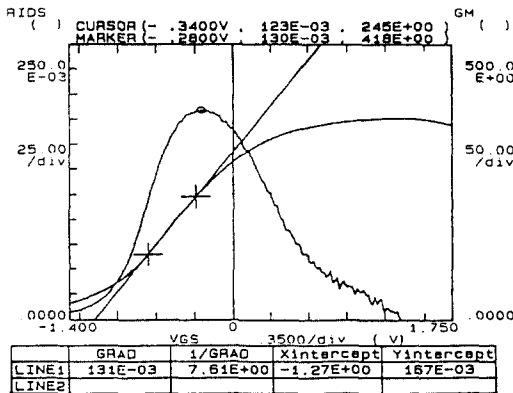
PHEMT 소자의 또 다른 DC 특성으로서 I-V, Vg-gm특성을 조사하였다. 그림 3에서는 게이트 길이가 0.15 μ m, 게이트 폭 140 μ m인 PHEMT 소자의 I-V 특성(a)와 상호전달전도도특성(b)를 각각 나타내었다. 이들 소자는 전자빔 직접노광장치로 다단계 노광방법을 사용하여 개선된 T-gate패턴을 형성한 후, 3:1 구연산계 용액으로 GaAs를 선택 식각하였다. 그리고 V_{th} 를 정밀하게 조절하기 위해서 매우 낮은 농도를 갖

는 $H_3PO_4/H_2O_2/H_2O$ 용액으로 AlGaAs층을 천천히 식각하면서 최종 게이트 리세스 식각을 하였다.

$L_g \times L_w$ 가 $0.15\mu m \times 140\mu m$ 의 크기를 갖는 PHEMT소자의 대표적인 DC 특성을 살펴보면 그림 3과 같다. 그림 3의 (a)에서는 전류-전압 특성을 나타내었고 그림에서 보는 바와 같이 게이트 전압을 0.8V에서 -0.2V간격으로 변화시키면서 측정된 것이고 0 V일 때 포화전류 I_{DSS} 는 32mA로 나타났다. 그림 3의 (b)에서는 게이트전압에 대한 상호전달전도도 특성을 보여주고 있으며 최대 상호전달전도도는 $418mS/mm$ 이고, V_{th} 는 -1.27 V로 나타났다.



(a)



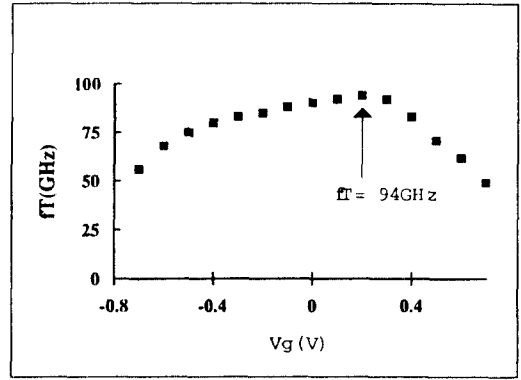
(b)

그림 3. 소자크기가 $0.15\mu m \times 140\mu m$ 인 PHEMT 소자의 I-V 특성 (a) 및 상호전달전도도 특성 (b)

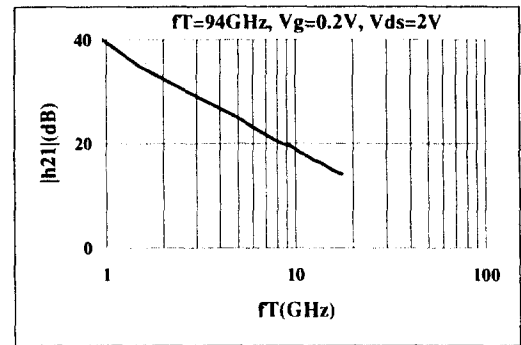
Fig. 3. The (a) I-V and (b) transconductance characteristics of PHEMT device with the gate length of $0.15\mu m$ and gate width of $140\mu m$.

한편, 제작한 PHEMT 소자의 RF 및 잡음 특성은

다음과 같다. 그림 4는 network analyzer로 측정된 차단주파수를 나타내었다. 그리고 그림 4의 (a)는 소스 드레인 전압(V_{ds})이 2V일 때 게이트 전압에 따른 차단주파수 특성을 나타내었으며 게이트 전압이 0.2V일 때 가장 높은 차단주파수값을 얻을 수 있었다. 그림 4의 (b)는 게이트 전압이 0.2V일 때 측정된 차단주파수를 나타내고 있으며 차단주파수가 94GHz로 매우 우수한 특성을 나타내었다.



(a)



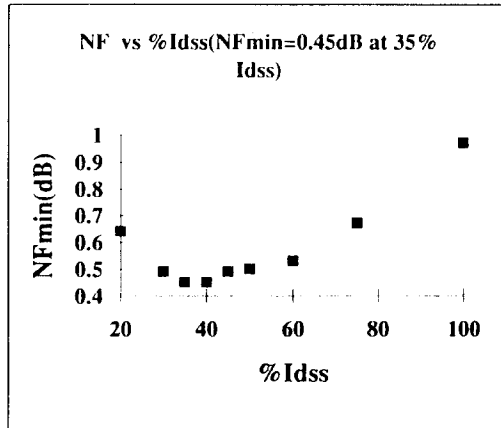
(b)

그림 4. PHEMT 소자의 차단주파수 특성. (a) 차단주파수의 게이트전압 의존성 (b) 전류이득의 주파수 의존성

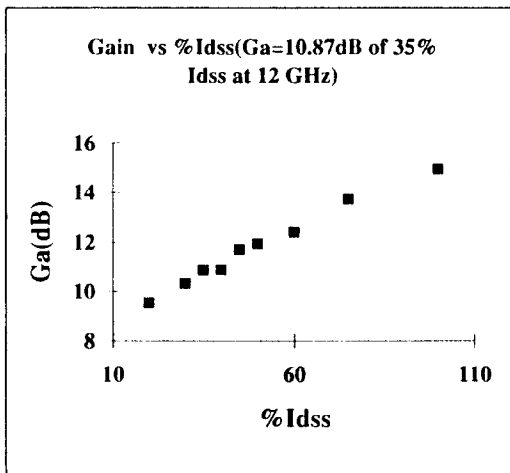
Fig. 4. The cut-off frequency characteristics of the PHEMT device. (a) Gate-bias dependence of cut-off frequency. (b) Frequency dependence of current gain $|h_{21}|$.

그림 5는 ATN 잡음지수 측정기로 $0.15\mu m \times 140\mu m$ 크기를 갖는 PHEMT 소자의 잡음 및 이득 특성을 작동주파수 12GHz에서 측정된 결과를 나타낸 것이다.

그림 5의 (a)는 게이트 전압이 0볼트이고 소스 드레인 간 전압이 2V 일 때의 드레인 포화전류를 I_{dss} 로 정의하고, I_{dss} 를 20%에서 100%까지 변화시키면서 구한 잡음지수 특성을 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 5. 12GHz에서의 잡음지수(a) 및 전류이득(b)의 드레인 전류의존성. (소자의크기 : $0.15 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m}$)

Fig. 5. Drain current dependence of noise figure(a) and the associated gain(b) on the $0.15 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m}$ gate device at 12GHz.

그림에서와 같이 35% I_{dss} 에서 잡음지수가 최소인 0.45dB를 얻을 수 있었다. 그리고 그림 5의 (b)는 I_{dss} 를 20%에서 100%까지 변화시키면서 구한 이득 특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이

35% I_{dss} 인 경우 작동주파수 12GHz에서 이득이 10.87dB로 우수한 이득특성을 나타내었다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 기존의 T-gate인 경우 게이트 저항이 2.8Ω 이고, 본 연구에서 사용한 다단계 노광방법으로 형성한 개선된 T-gate인 경우의 게이트저항은 1.2Ω 으로 게이트저항이 2배 이상 개선되고 이로 인하여 잡음특성이 향상된 것으로 사료된다. 이 때 게이트 저항은 S-parameter 최적화를 통해서 얻은 값이다.

IV. 결 론

본자선 에피성장(MBE)기를 사용하여 AlGaAs/InGaAs구조를 가지는 PHEMT 에피를 성장하였고 소자를 제작한 후 그 특성을 조사하였다. 급속 열처리 방법으로 열처리 한 결과 오믹접촉의 저항이 0.23Ω -mm 이하인 양호한 특성을 얻었다. 게이트 길이가 $0.15 \mu\text{m}$ 이고 폭이 $140 \mu\text{m}$ 인 2-finger PHEMT소자에서 상호전달전도도의 최대값은 418 mS/mm인 특성을 보였으며, 차단주파수는 94GHz이었다. 그리고 12GHz에서 잡음지수가 0.45dB, 이득이 10.87dB인 초저잡음 특성을 얻었다. 이 잡음지수 값은 finger가 두개인 $0.15 \mu\text{m}$ PHEMT소자에서는 가장 낮은 잡음특성을 나타낸 것이다. 이것은 본 연구에서 사용한 개선된 T-gate경우 게이트저항이 1.2Ω 으로 게이트저항이 2배이상 낮아져서 잡음특성이 향상된 것으로 사료된다.

※ 본 연구는 정보통신부의 연구비 지원으로 수행된 것임.

참 고 문 헌

- [1] J.J. Berenz, K. Nakano, and K.P. Weller, Low-noise high electron mobility transistors, IEEE Monolithic Circuits Symp. Dig., p.83, 1984.
- [2] M.Abe, T. Mimura, et al., Recent advances in ultra high speed HEMT LSI technology, IEEE Trans. Electron Devices ED-36, p.2021,1989.
- [3] M. Hueschen, N. Moll, E. Grown, and J. Miller, Pulse-doped MODFET's, IEDM Tech. Dig., p.348, 1986.
- [4] A.A Ketterson, W.T. Masselink et al., Characterization of InGaAs/AlGaAs pseudomorphic modulation-doped field

transistors, IEEE Trans. Electron Devices ED-33, p.564, 1986.

[5] Jin-Hee Lee, Hyung-Sup Yoon, et al.,

abrication and Characterization of GaAs /AlGa As HEMT device J. KITE, vol.31-A, no.9, p.14, 1994.

----- 저 자 소 개 -----

李 進 熙(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照

현재 한국전자통신연구소 반도체연구
구단 화합물소자연구실, 선임연구원

尹 亨 燮(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照

현재 한국전자통신연구소 반도체연구
구단 화합물소자연구실, 선임연구원

崔 相 洙(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照

현재 한국전자통신연구소 반도체연구
구단 미세구조연구실, 선임연구원

朴 喆 淳(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照

현재 한국전자통신연구소 반도체연구
구단 화합물소자연구실 실장

朴 亨 茂(正會員) 第 31卷 A編 第 9號 參照

현재 한국전자통신연구소 반도체연구
구단 단장