

## AlGaAs/GaAs HBT 에미터 전극용 Pd/Si계 오믹 접촉

김일호†

충주대학교 신소재공학과/나노기술연구소  
(2003년 6월 11일 접수)

### Pd/Si-based Emitter Ohmic Contacts for AlGaAs/GaAs HBTs

Il-Ho Kim†

Dept. of Materials Science and Engineering/Nano Technology Lab.,  
Chungju National University, Chungbuk 380-702

(Received June 11, 2003)

#### 요 약

AlGaAs/GaAs HBT 에미터 오믹 접촉을 위해 n형 InGaAs에 대한 Pd/Si/Ti/Pt 및 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉 특성을 조사하였다. Pd/Si/Ti/Pt 오믹 접촉의 경우, 증착 상태에서는 접촉 비저항을 측정할 수 없을 정도의 비오믹 특성을 보였으며, 375°C에서 10초 동안 열처리한 경우  $5 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ 의 높은 접촉 비저항을 나타내었다. 그러나 열처리 조건을 425°C, 10초로 변화시킬 경우  $2 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ 의 낮은 접촉 비저항을 나타내었다. Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉의 경우, 450°C까지의 열처리 동안에 전반적으로 우수한 오믹 특성을 나타내어 400°C, 20초의 급속 열처리 조건에서 최저  $3.9 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ 의 접촉 비저항을 나타내었다. 두 오믹 접촉 모두 오믹 재료와 InGaAs의 평활한 계면을 유지 하면서 우수한 오믹 특성을 나타내어, 화합물 반도체 소자의 오믹 접촉으로 충분히 응용 가능하였다. Pd/Si/Ti/Pt 및 Pd/Si/Pd/Ti/Au를 AlGaAs/GaAs HBT의 에미터 오믹 접촉으로 사용하여 제작된 HBT 소자의 고주파 특성을 측정 한 결과, 차단 주파수가 각각 63.9 GHz 및 74.4 GHz로, 또한 최대공진 주파수가 각각 50.1 GHz 및 52.5 GHz로 우수한 작동특성을 보였다.

주제어 : 오믹접촉, Pd/Si, InGaAs, 이종접합 쌍극자 트랜지스터

#### Abstract

Pd/Si/Ti/Pt and Pd/Si/Pd/Ti/Au ohmic contacts to n-type InGaAs were investigated for applications to AlGaAs/GaAs HBT emitter ohmic contacts. In the Pd/Si/Ti/Pt ohmic contact, as-deposited contact showed non-ohmic behavior, and high specific contact resistivity of  $5 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$  was achieved by rapid thermal annealing at 375°C/10 sec. However, the specific contact resistivity decreased remarkably to  $2 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$  by annealing at 425°C/10sec. In the Pd/Si/Pd/Ti/Au ohmic contact, minimum specific contact resistivity of  $3.9 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$  was achieved by annealing at 400°C/20sec. In both ohmic contacts, low contact resistivity and non-spiking planar interface between ohmic materials and InGaAs were maintained. Therefore, these thermally stable ohmic contact systems are promising candidates for compound semiconductor devices. RF performance of the AlGaAs/GaAs HBT was also examined by employing the Pd/Si/Ti/Pt and Pd/Si/Pd/Ti/Au systems as emitter ohmic contacts. Cutoff frequencies were 63.9 GHz and 74.4 GHz, respectively, and maximum oscillation frequencies were 50.1 GHz and 52.5 GHz, respectively. It shows very successful high frequency operations.

**Key Words** : Ohmic contact, Pd/Si, InGaAs, Heterojunction bipolar transistor(HBT)

† E-mail : ihkim@chungju.ac.kr

## 1. 서 론

AlGaAs/GaAs HBT (heterojunction bipolar transistor)는 우수한 고속특성, 대전력 구동능력, 균일한 문턱전압 및 높은 파괴전압 등으로 인해 초고속 광통신용 전자소자로서 매우 유망하다. 초고속 광통신 시스템에 사용되는 고주파 반도체 소자의 경우 소자의 특성 향상과 안정한 동작을 위해서 기생성분을 제거하는 것이 매우 중요하다. 기생성분, 특히 기생저항 중 가장 큰 비중을 차지하는 성분이 오믹 접촉 저항 (ohmic contact resistance)이다. 따라서 HBT와 같은 고속소자의 제작에 있어서, 신뢰성 있고 접촉저항이 낮은 오믹 접촉 시스템을 개발하는 것이 중요하며, 화합물 반도체 소자의 제조공정의 안정성 및 재현성 측면에서, 고온에서도 화학적 및 열적으로 안정하고 표면과 계면이 양호한 고온 오믹 접촉계에 대한 연구가 진행되어 왔다 [1]. W, Ti, Mo 등과 같은 내열금속을 이용하여 고온 안정성을 향상시키고, 고온 안정성을 저해하는 Au계 화합물을 형성하지 않는 오믹 접촉을 개발하려는 연구가 활발히 진행 중이다 [2]. 이러한 관점에서 최근, Au계 화합물을 형성하지 않으면서 열적으로 안정한 오믹 접촉을 형성하는, 소위 고상 재결정 (SPR : solid phase regrowth)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [3-6].

고상 재결정에 의한 Pd/Si계 [3,7] 오믹 접촉은 열처리 후 확산거리가 수백 Å 정도로 작고, 접촉계면과 표면이 평탄하며, 열적으로 안정하기 때문에 GaAs계 화합물 반도체에 대한 오믹 접촉 재료로 많은 연구가 진행되고 있다. GaAs에 Pd를 증착시킨 뒤 Pd<sub>x</sub>GaAs의 3원계 화합물이 생성되며 열처리를 통해 분해가 이루어지는 동시에 Si과 반응을 하여 Pd-Si계 화합물(Pd<sub>2</sub>Si)을 형성한다. 여기서 기판 내부로 확산되는 Si 원자가 Ga 공공을 치환하여 GaAs 표면상의 n형 불순물 농도를 높임으로써 궁극적으로 오믹 접촉저항을 낮추는 원인으로 작용하게 된다. AlGaAs/GaAs HBT의 에미터 캡층 (emitter capping layer)으로 사용되는 n형 InGaAs에 대해서도 상기 오믹 접촉형성의 반응기구가 적용될 수 있을 것으로 판단된다 [8]. 그러나 InGaAs 중의 In은 반응성이 매우 커서 낮은 온도에서도 In계 화합물이 생성되며, 이러한 경우 접촉 저항이 급격히 증가되므로 오믹

접촉 재료의 선택에 유의해야 한다. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As에서 x가 0.5이상일 경우 Schottky barrier height가 약 0.2 eV로 작기 때문에 상온에서 어떠한 금속과도 오믹 접촉 특성을 보이는 것으로 알려져 있으나 [9], HBT 소자의 제작 공정에서 300~400°C의 열처리가 불가피하며, 이로 인한 오믹 금속과 InGaAs의 반응 및 확산에 의한 오믹 접촉의 안정성에 문제가 있다.

따라서 본 논문에서는 AlGaAs/GaAs HBT 에피층 (epitaxial layers) 중에서 에미터 캡층으로 사용되는 n형 InGaAs에 대한 오믹 접촉으로서 Pd/Si/Ti/Pt 및 Pd/Si/Pd/Ti/Au계를 택하여, 이에 대한 오믹 접촉 특성을 조사하였고, 금속 열처리 (RTA : rapid thermal annealing)에 따른 상변화, 원자 재분포 및 미세 계면구조를 분석하였다. 또한 화합물 반도체 소자에의 응용 측면에서, 본 연구에서 개발된 Pd/Si계 오믹 접촉 시스템을 AlGaAs/GaAs HBT 소자에 적용하여, 차단 주파수와 최대공진 주파수의 작동특성과 주파수 응답특성을 조사하였다.

## 2. 실험방법

표 1과 같이 AlGaAs/GaAs HBT의 에미터 캡층을 형성하기 위하여, 직경 3 inch 반질연성 GaAs(100) 기판 위에 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition)로 도핑농도  $1 \times 10^{19}$  Si/cm<sup>3</sup>의 n형 In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As (이후 InGaAs로 표기함)의 에피층을 형성하였다.  $5 \times 10^{-7}$  Torr의 진공도에서 EBE (electron beam evaporator)

Table 1. Epitaxial layer structure of the AlGaAs/GaAs HBT used in this study.

layer	Al(or In) fraction	doping (cm <sup>-3</sup> )	thickness (Å)	
cap	n <sup>-</sup> -InGaAs	0.5	$1 \times 10^{19}$ Si	400
	n <sup>-</sup> -InGaAs	0→0.5	$1 \times 10^{19}$ Si	400
	n <sup>-</sup> -GaAs	0	$3.7 \times 10^{18}$ Si	1000
emitter	n-AlGaAs	0.3→0	$5 \times 10^{17}$ Si	500
	n-AlGaAs	0.3	$2 \times 10^{17}$ Si	1500
base	p <sup>+</sup> -GaAs	0	$3 \times 10^{19}$ C	700
collector	n <sup>-</sup> -GaAs	0	$2 \times 10^{16}$ Si	4000
subcollector	n <sup>-</sup> -GaAs	0	$4 \times 10^{18}$ Si	5000
buffer	AlGaAs	0.3	undoped	3000
	GaAs	0	undoped	3000
substrate	semi-insulating 3" GaAs (100) wafer			

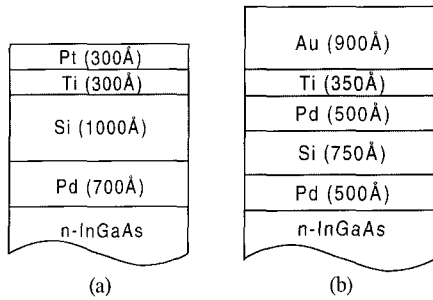


Fig. 1. Schematic cross-sectional views of the (a) Pd/Si/Ti/Pt and (b) Pd/Si/Pd/Ti/Au ohmic contact layers on n-InGaAs.

에 의해 Pd(700 Å)/Si(1000 Å)/Ti(300 Å)/Pt(300 Å) 및 Pd(500 Å)/Si(750 Å)/Pd(500 Å)/Ti(350 Å)/Au(900 Å)의 오믹 재료를 그림 1과 같이 InGaAs 위에 형성한 후 N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> 가스 분위기에서 300~450°C에서 10~60초 동안 급속 열처리를 하였다. Pd/Si/Ti/Pt 오믹 접촉은 Pd-Si계 화합물의 형성을 통해 SPR 오믹 접촉 기구를 유도한 것이며, Ti/Pt층은 확산 방지층으로 사용된 것이다. Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉은 Pd-Si계 화합물 형성을 촉진하기 위하여 Pd 중간층을 삽입한 경우이며, Ti층은 확산 방지와 상부 Au층에 대한 접착성 향상을 목적으로 사용되었고, Au층은 전기적 특성을 향상시키기 위한 전극 재료로 사용되었다.

100×100 μm<sup>2</sup>의 정사각형 패드(pad)를 5, 10, 15, 20, 30 μm 간격으로 배열하여 두 패드간의 전기저항을 측정하는, 소위 TLM (transmission line method 또는 transfer length method)으로 접촉 비저항 (specific contact resistivity, ρ<sub>c</sub>)을 측정하였다. 오믹 접촉의 전기적인 특성을 측정하기 위하여 Cascade microprobe station과 HP4145B semiconductor parameter analyzer를 이용하였다. TLM 패턴(pattern) 제작 공정 전에 μ-asher를 이용하여 InGaAs 표면에 존재할 수 있는 유기물을 제거하였다. 오믹 접촉을 형성하기 전에 InGaAs 표면에 형성되어 있는 산화물 및 불순물을 제거하기 위하여, HCl:H<sub>2</sub>O=1:1 용액으로 산세한 후 탈이온수(deionized water)로 세척하였고 고순도 질소 기체로 건조하였다. 포토리소그래피(photolithography) 공정과 EBE 장비에 의해 오믹 접촉을 형성한 후, PR(photoresist) 및 PR 위에 증착된 오믹 급속을 제

거하기 위하여 리프트오프(lift-off) 공정을 수행하였다.

RTA에 의한 상변화 및 원자 재분포를 각각 XRD(X-ray diffraction)와 AES(Auger electron spectroscopy)를 이용하여 조사하였다. XRD 분석시 Cu K<sub>α</sub> target을 사용하였고, 전압 30 kV, 전류 40 mA, scanning 속도 3°/min의 조건으로 분석하였다. 한편 AES 분석시 전자의 가속전압은 10 keV이었고, Ar<sup>+</sup>(5 keV, 5 mA)를 사용하여 약 60 Å/min의 속도로 깊이 분석을 실시하였다. 이때 각 원소 분석에서 사용된 kinetic energy level은 Pd<sup>MNN</sup>(315~345 eV), Ti<sup>LMM</sup>(360~395 eV), In<sup>MNN</sup>(397~415 eV), Ga<sup>LMM</sup>(1050~1080 eV), As<sup>LMM</sup>(1205~1237 eV), Si<sup>KLL</sup>(1590~1628 eV), Pt<sup>NVV</sup>(1940~1980 eV) 및 Au<sup>NVV</sup>(2000~2035 eV)이었다. 오믹 재료와 InGaAs의 계면을 XTEM(cross-sectional transmission electron microscopy)으로 관찰하였다. XTEM 시편 준비 과정에서 GaAs dummy wafer에 G1 epoxy를 사용하여 분석용 시편을 접착하였고, 가속전압 200 keV 상태에서 (110) projection centered beam image 방법으로 분석하였다.

소자 응용적인 측면에서, 본 연구에서 개발된 Pd/Si계 오믹 접촉 시스템을 AlGaAs/GaAs HBT 소자의 제작에 적용하여, HBT의 작동특성을 조사하였다. 전술한 바와 같이 MOCVD로 성장시킨 AlGaAs/GaAs HBT 에피구조는 표 1과 동일하였고, 모두 13장의 포토마스크를 사용하여 공정을 진행하였다. 포토리소그래피 공정은 0.1 μm 이내의 정렬오차를 갖는 GCA사의 i-line stepper를 사용하였다. AlGaAs/GaAs HBT의 일반적인 메사식각(mesa etching)을 위해서는 순메사 형상과 빠른 식각속도를 갖는 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=4:1:50 용액을 사용하였고, 베이스 표면을 노출시키는 에미터 메사식각에만 역메사 형상 구현이 가능한 NH<sub>4</sub>OH:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=20:7:973 용액과 느린 식각속도를 갖도록 희석된 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=4:1:90 용액을 함께 사용하였다. 에미터 전극으로 본 연구에서 개발된 Pd/Si/Ti/Pt 또는 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉을 사용하였고, 베이스 및 컬렉터 전극은 일반적으로 사용되는 Pt/Ti/Pt/Au 및 Ni/Ge/Au/Ti/Au를 사용하였다.

급속배선 공정을 위하여 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) 방법에 의해 SiN 막을 250°C에서 5000 Å의 두께로 웨이퍼 전면에 도포하였고, 공정 조건으로서 50W의 RF 전원, 700 mTorr의

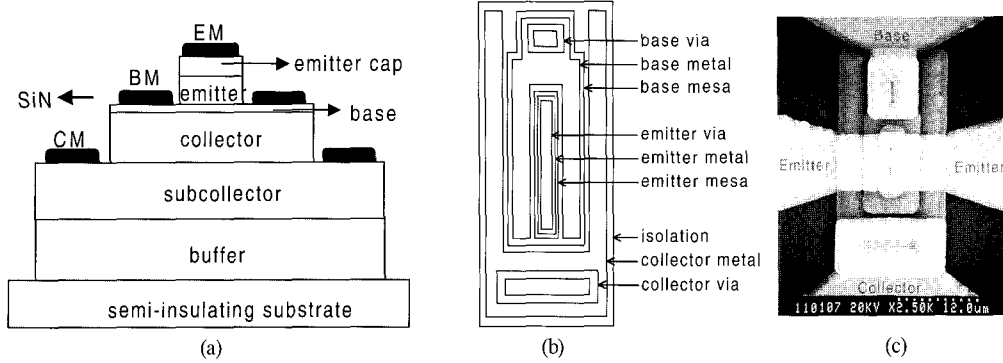


Fig. 2. Schematic illustrations of the AlGaAs/GaAs HBT. (a) cross-sectional view (b) top view (c) HBT with emitter size of  $1.5 \times 10 \mu\text{m}^2$

압력,  $\text{SiH}_4/\text{NH}_3/\text{He}/\text{H}_2$ 의 가스를 70/4/700/300 SCCM의 유량을 사용하였다. SiN상에 contact hole을 위한 패턴을 형성한 후, MERIE (magnetically enhanced reactive ion etching) 장비에 의한  $\text{C}_2\text{F}_6$  플라즈마를 이용하여 에미터, 베이스 및 컬렉터 접촉창을 식각하여 오픈하였다. 배선금속으로 Ti(500 Å)/Au(4500 Å)를 EBE에 의해 형성하였고, 배선금속의 단차 피복성을 좋게 하기 위하여 웨이퍼가 놓이는 susceptor를 회전시켰다. 최종적으로 passivation을 위해 SiN막으로 250°C에서 5000 Å의 두께로 웨이퍼 전면에도포하고 동일한 조건의 건식식각에 의해 패드를 오픈함으로써 AlGaAs/GaAs HBT를 제작하였고, 본 연구에서 제작된 에미터 상층구조 single finger AlGaAs/GaAs HBT의 단면 및 평면 개략도와 사진을 그림 2에 나타내었다.

AlGaAs/GaAs HBT 소자의 AC 파라미터를 추출

하기 위하여 network analyzer와 ANACAT software를 사용하여 단위 소자에 대한 microwave response를 측정하였다. 0.5 GHz부터 39.5 GHz까지의 주파수 영역에서 sweep한 ANACAT 데이터로부터 얻은 S 파라미터를 변환하여 차단 주파수(cutoff frequency,  $F_c$ )와 관계된 교류 전류이득(current gain,  $h_{21}$ ) 및 전력이득(maximum available gain, MAG)과 관계된 최대 공진 주파수(maximum oscillation frequency,  $F_{max}$ )를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Pd/Si/Ti/Pt 오믹 접촉

그림 3은 RTA 온도와 시간에 따른 Pd/Si/Ti/Pt 오믹 접촉 비저항의 변화를 나타낸 것이다. 상온에서 In

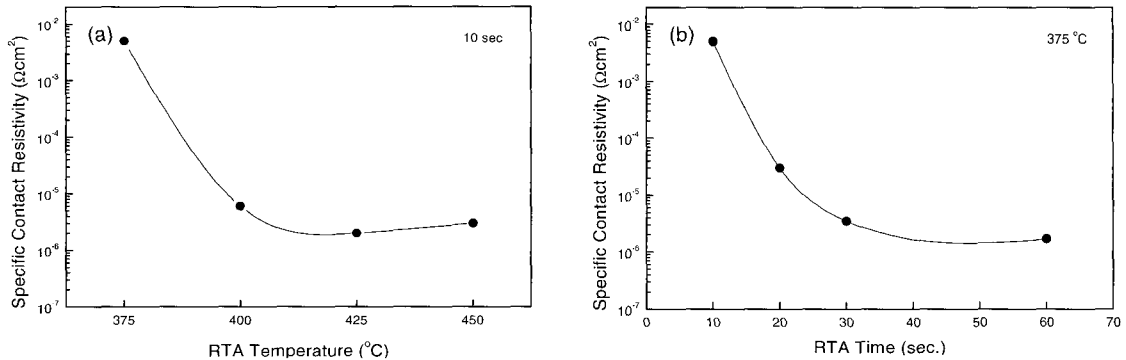


Fig. 3. Variation of the specific contact resistivity of the Pd/Si/Ti/Pt contacts to n-InGaAs with RTA (a) temperature and (b) time.

의 몰분율이 0.5일 때 InGaAs와 금속간의 에너지 장벽이 0.2 eV 정도로 낮기 때문에 열처리 전에도 비교적 낮은 접촉 비저항을 예측하였으나 접촉 비저항을 측정할 수 없을 정도의 절연 특성을 보였다. 이는 증착 상태의 Si(1000 Å)층이 반응 전이므로 절연층으로 작용하였기 때문이다. 375°C에서 10초 동안 열처리할 경우  $5 \times 10^3 \Omega \text{cm}^2$ 의 접촉 비저항을 보였으나, 이는 매우 높은 값이며 따라서 오믹 접촉 특성이 아닌 Schottky 접촉 특성을 보였다. 그러나 400°C 이상으로 열처리 온도를 상승할 경우  $10^{-6} \Omega \text{cm}^2$  정도의 우수한 오믹 특성을 나타내었고, 450°C에서도  $3 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ 의 낮은 접촉 비저항을 유지하였다. 따라서 Pd/Si/Ti/Pt계 재료는 고온 안정성이 우수한 오믹 접촉 시스템으로 판단된다. 그림 3(b)는 375°C에서 열처리 시간을 달리 하여 오믹 접촉 비저항을 측정한 결과로서, 급속 열처리 시간을 60초까지 증가시킴에 따라 접촉 비저항이 크게 감소하여 최저  $1 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ 를 나타내었다. 그러나 실제 AlGaAs/GaAs HBT 제작 공정에서 375°C, 60초 동안의 열처리는 온도는 적당하지만 비교적 장시간이기 때문에 HBT 에피층의 도펀트가 재확산할 우려가 있다. 따라서 Pd/Si/Ti/Pt 오믹 접촉계를 이용할 경우 400~425°C에서 10~20초 동안의 급속 열처리가 적당하다고 판단된다.

그림 4는 Pd/Si/Ti/Pt 오믹 접촉에 대하여 급속 열처리 조건에 따른 상변화를 XRD로 분석한 결과이다. 급속 열처리에 의해 Pd<sub>2</sub>Si 상이 생성되는 것을 확인하였고, 그 외 다른 상의 생성은 확인되지 않았

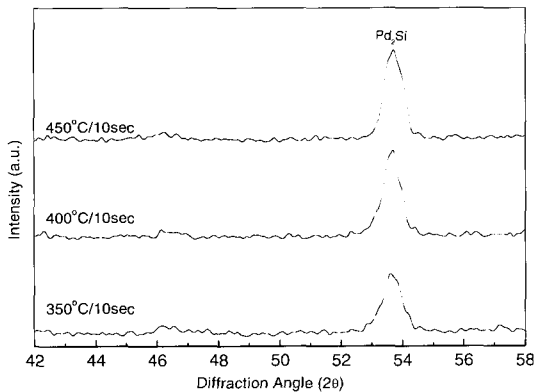


Fig. 4. XRD patterns of the Pd/Si/Ti/Pt contacts to n-InGaAs.

다. N형 InGaAs에 대한 Pd/Si계 오믹 접촉 기구는 Pd/Ge계 [10,11] 고상 재결정 기구와 유사하며, 상온에서 준안정상인 3원계 화합물 Pd<sub>x</sub>GaAs가 GaAs 표면에 수십 Å의 두께로 형성되고, 고온에서의 열처리를 통해 Si과 반응하여 Pd<sub>2</sub>Si 상을 형성하면서 Si이 도핑된 GaAs 재결정층을 형성한다. 이로 인해 GaAs의 표면 도핑 농도가 증가하여 터널링에 의해 오믹 접촉 저항이 감소하게 된다.

그림 5는 Pd/Si/Ti/Pt 오믹 접촉에 대하여 급속 열처리에 의한 구성 원자의 재분포를 AES 깊이 분석

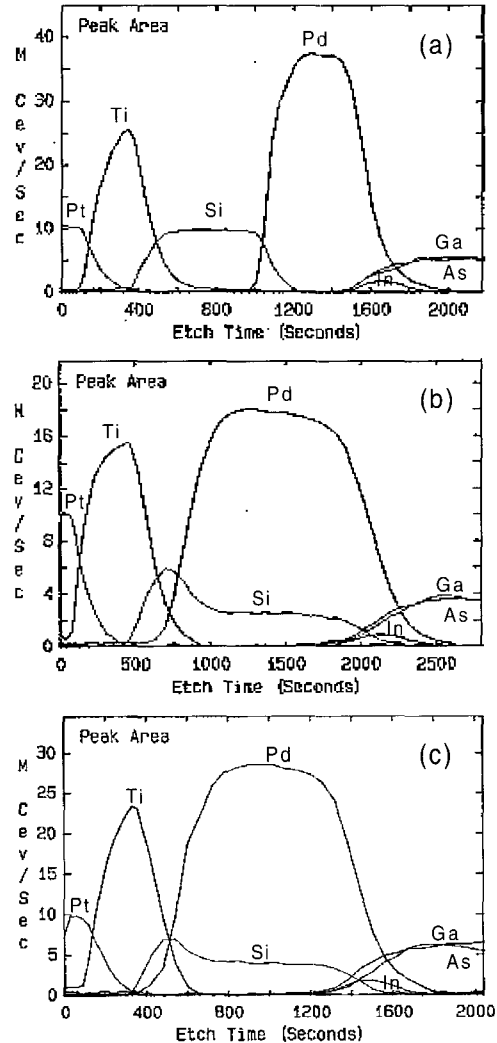


Fig. 5. AES depth profiles of the Pd/Si/Ti/Pt contacts to n-InGaAs. (a) as-deposited (b) 375°C/10 sec (c) 425°C/10 sec

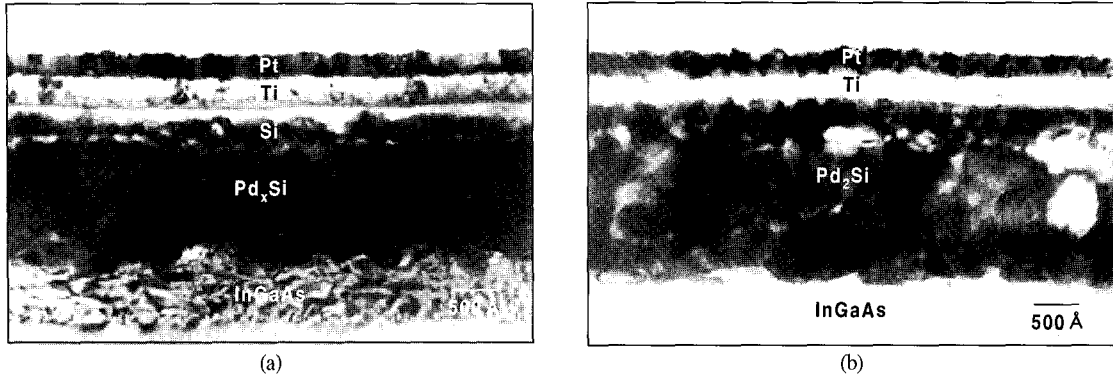


Fig. 6. Cross-sectional TEM views of the Pd/Si/Ti/Pt contacts to n-InGaAs. (a) 375°C/10 sec (b) 425°C/10 sec

으로 측정된 결과이다. 열처리에 의해 Si와 Pd이 상호 확산하여 반응함을 알 수 있다. 그림 5(b)에서와 같이 375°C/10초의 열처리에 의해 Si이 부분적으로 Pd와 반응하고 잔류한 Si이 존재하였으며, 이는 접촉 비저항이 높은 결과를 초래하였다. 열처리 온도가 상승함에 따라 Si이 내부로 더욱 확산하여 Pd와 Si이 보다 균질하게 분포한 것을 알 수 있다. 열처리 조건에 따른 오믹 접촉 구성 원소들의 이러한 분포양상은 오믹 특성과 밀접한 관련이 있다. 한편 Ti/Pt층은 450°C까지의 열처리 조건에서도 특별한 변화가 없었으며, 이는 확산 방지층으로 충분히 활용 가능함을 의미한다.

그림 6은 InGaAs와 Pd/Si/Ti/Pt 오믹 접촉의 계면을 XTEM으로 관찰한 것으로, 375°C/10초의 급속 열처리에 의해 Pd-Si계 화합물의 형성 및 Si 잔류층

을 확인하였고, Ti/Pt층이 증착상태 그대로 유지되었음을 확인하였다. 한편 425°C/10초의 급속 열처리에 의해 Si의 대부분이 Pd와 반응하여 Pd<sub>2</sub>Si층을 형성하고 오믹 재료와 InGaAs가 매우 평탄한 계면을 유지하였다.

### 3.2 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉

그림 7은 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉에 대하여 급속 열처리 온도와 시간에 따른 접촉 비저항의 변화를 나타낸 것이다. Pd/Si/Ti/Pt의 경우와 마찬가지로, 열처리 전에는 접촉 비저항을 측정할 수 없을 정도의 절연 특성을 보였다. 이는 증착 상태의 Si(750 Å)층이 반응 전이므로 절연층으로 작용하였기 때문이다. 300°C에서 10초 동안 열처리할 경우  $2 \times 10^5 \Omega$

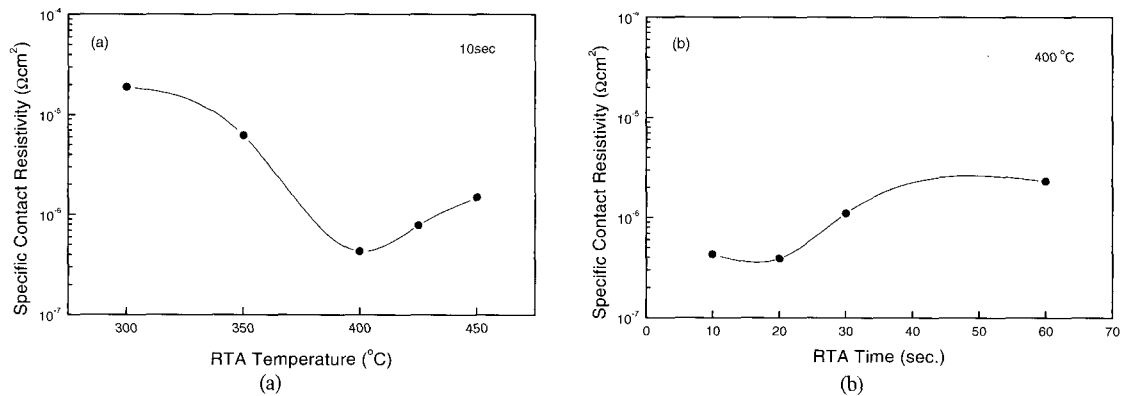


Fig. 7. Variation of the specific contact resistivity of the Pd/Si/Pd/Ti/Au contacts to n-InGaAs with RTA (a) temperature and (b) time.

cm<sup>2</sup>의 접촉 비저항을 보였고, 400°C에서 10초 동안 열처리할 경우  $4.3 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ 의 우수한 오믹 특성을 나타내었으며, 450°C에서도  $1.5 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ 의 낮은 접촉 비저항을 유지하였다. 따라서 Pd/Si/Pd/Ti/Au계 재료는 고온 안정성이 우수한 오믹 접촉 시스템으로 판단된다. 그림 7(b)는 400°C에서 열처리 시간을 달리 하여 오믹 접촉 비저항을 측정한 결과로서, 20초까지는  $\text{mid-}10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ 의 접촉 비저항을 유지하였으나, 30초 이상으로 연장할 경우 접촉 비저항이  $\text{low-}10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ 으로 약간 증가하였다. 따라서 실제 AlGaAs/GaAs HBT 제작 공정에 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉계를 이용할 경우 400°C에서 10~20초 동안의 급속 열처리가 적합하다고 판단된다.

그림 8은 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉에 대하여 급속 열처리 조건에 따른 상변화를 XRD로 분석한 것이다. 급속 열처리에 의해 Pd<sub>2</sub>Si 상이 생성되는 것을 확인하였고, 이때 Si이 InGaAs의 표면에서 성장하여 표면 도핑 농도를 증가시켜 오믹 저항이 감소한 것으로 사료된다. 본 논문의 경우, 상온에서 n형 InGaAs의 barrier height가 낮은 상태이기 때문에, 급속 열처리에 의해 오믹 접촉 저항이 감소한 이유는 barrier height의 감소에 의한 것이 아니라, Si이 InGaAs 표면으로 확산하여 표면 도핑 농도를 증가시킴으로써 barrier width가 감소하여 터널링에 의한 것으로 판단된다. 따라서 초기 Pd과 InGaAs의 반응으로 인한 준안정상은 발견할 수 없었지만, Pd<sub>2</sub>Si 상이 생성되고 접촉 비저항이 감소한 것으로 미루어 InGaAs의 경우도 Pd/Si계 고상 재결정에 의한 오믹 접촉이 가능하다고 사료된다. 한편 425°C 이상에서 접촉 비

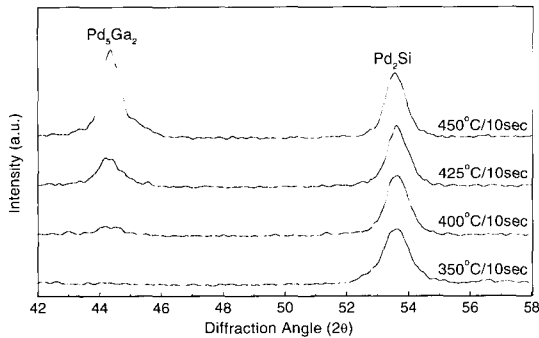


Fig. 8. XRD patterns of the Pd/Si/Pd/Ti/Au contacts to n-InGaAs.

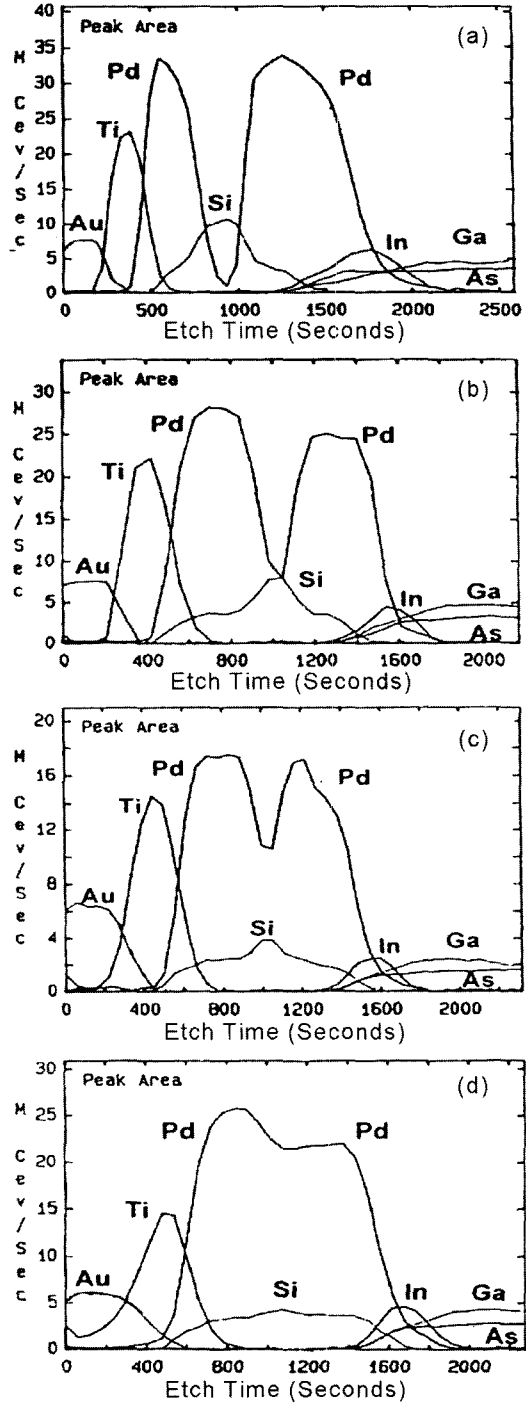


Fig. 9. AES depth profiles of the Pd/Si/Pd/Ti/Au contacts to n-InGaAs. (a) as-deposited (b) 300°C/10sec (c) 400°C/10sec (d) 450°C/10sec

저항이 증가하는 이유는 오믹 재료와 InGaAs가 반응하여 Pd<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub> 상이 형성된 것과 관련이 있으며, 그 결과 국부적으로 InGaAs 표면의 화학량론적 조성이 파괴되어 barrier height가 증가한 것에 기인한다. 그러나 Au를 함유한 오믹 접촉에서 발견되는 Au-In계 및 Au-Ga계 화합물이 450°C에서도 발견되지 않았고, 따라서 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉은 높은 안정성이 우수한 것으로 나타났다.

그림 9는 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉에 대하여 급속 열처리에 의한 구성 원자의 재분포를 AES 깊이 분석으로 측정된 결과이다. 열처리에 의해 Si와 Pd가 상호 확산하여 Pd-Si계 화합물을 형성함을 알 수 있다. 400°C/10초의 열처리에 의해 그림 7(a)의 경우처럼 접촉 비저항을 보이고 있지만, 그림 9(c)와 같이 반응하지 않고 잔류한 Si가 관찰되었다. 그러나 더욱 고온에서 열처리할 경우, 그림 8과 같이 Pd<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>가 생성되어 InGaAs 표면을 파괴하고 이로 인해 접촉 비저항이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 열처리 온도가 상승함에 따라 Pd<sub>3</sub>Si 생성에 의한 접촉 비저항 감소효과와 Pd<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>의 생성에 의한 접촉 비저항 증가효과가 복합적으로 작용하여, 그림 7과 같이 400°C에서 열처리한 경우 가장 낮은 접촉 비저항을 나타낸 것으로 판단된다. 한편 450°C까지의 열처리에도 Au의 확산 저지층으로서 Ti층이 적절히 작용함으로써 Au와 In 및 Ga의 반응이 원천적으로 차단되어 InGaAs의 분해현상이 관찰되지 않았다.

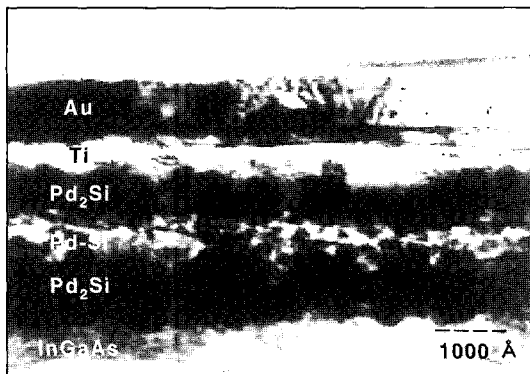


Fig. 10. Cross-sectional TEM view of the Pd/Si/Pd/Ti/Au contacts to n-InGaAs after RTA at 400°C/10sec.

그림 10은 InGaAs와 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉의 계면을 XTEM으로 관찰한 것으로, 400°C에서 급속 열처리 후에도 평탄한 계면을 유지하였다. 급속 열처리에 의해 Pd-Si계 화합물의 형성을 확인하였고, Ti층에 의해 Au의 내부확산이 저지되었음을 확인하였다. 그러나 Pd-Si계 화합물에 대한 보다 정량적이고 깊이 있는 분석이 요구된다.

### 3.3 AlGaAs/GaAs HBT 소자의 RF 특성

그림 11은 Pd/Si계를 에미터 오믹 접촉으로 이용하여 제작한 AlGaAs/GaAs HBT의 주파수 응답특성을 측정된 것으로, 에미터 크기가 1.5×10<sup>2</sup> μm<sup>2</sup>인 소

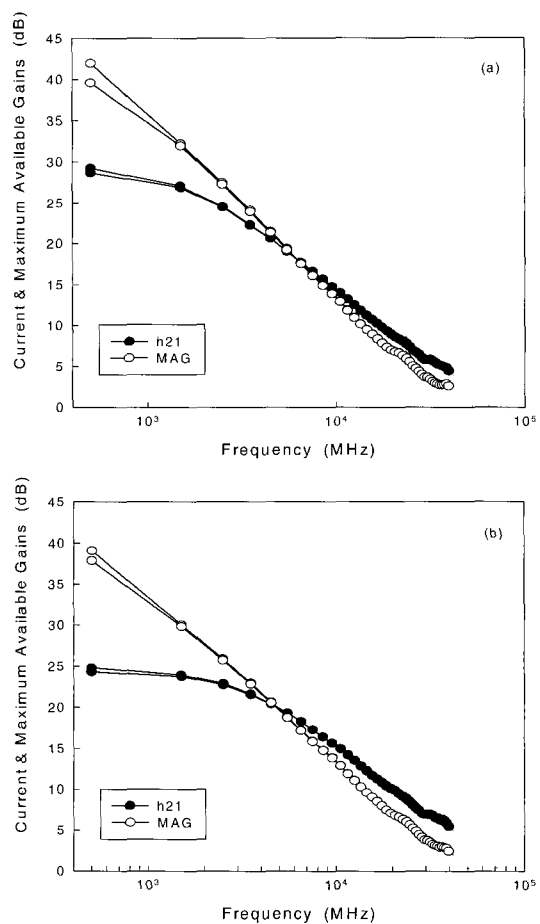


Fig. 11. Current and maximum available gains of AlGaAs/GaAs HBTs employing (a) Pd/Si/Ti/Pt and (b) Pd/Si/Pd/Ti/Au emitter ohmic contacts (V<sub>ce</sub>=1.5V).



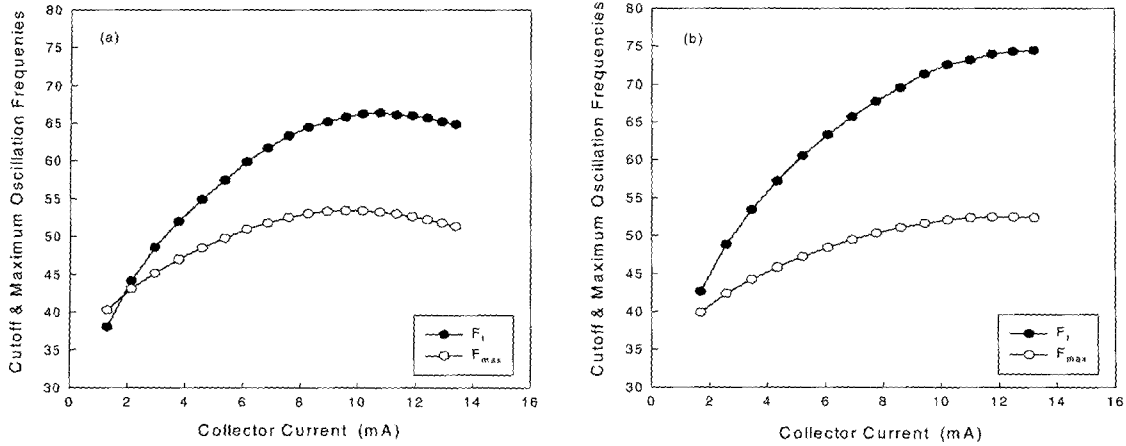


Fig. 12. Cutoff and maximum oscillation frequencies of AlGaAs/GaAs HBTs employing (a) Pd/Si/Ti/Pt and (b) Pd/Si/Pd/Ti/Au emitter ohmic contacts.

자에 대한 특정 바이어스 조건에서의 전류이득( $h_{21}$ )과 전력이득(MAG)을 나타낸 것이다. 이때의 에미터-컬렉터 전압( $V_{ce}$ )은 1.5V이었으며, 데이터 곡선에서 -20 dB/dec. 기울기의 직선과 x축(주파수)과의 절편으로부터 차단 주파수( $F_c$ )와 최대공진 주파수( $F_{max}$ )를 구하였다. 차단 주파수는 소자의 전류이득이 1이 되는 주파수이며, 최대공진 주파수는 전력이득이 1이 되는 주파수를 의미한다. 에미터 오믹 접촉으로 Pd/Si/Ti/Pt를 이용한 경우,  $F_c=63.9$  GHz ( $I_c@F_c=11.2$  mA)와  $F_{max}=50.1$  GHz( $I_c@F_{max}=9.5$  mA)의 특성을 보였다. 한편 Pd/Si/Pd/Ti/Au를 사용한 경우,  $F_c=74.4$  GHz( $I_c@F_c=13.2$  mA)와  $F_{max}=52.5$  GHz( $I_c@F_{max}=11.8$  mA)의 특성을 보여 Pd/Si/Ti/Pt를 사용한 경우보다 우수한 고주파 특성을 보였다. 이는 Pd/Si/Pd/Ti/Au의 오믹 접촉 비저항이 더 낮은 결과이다.

그림 12는 컬렉터 전류( $I_c$ )에 따른  $F_c$ 와  $F_{max}$ 의 변화를 측정된 것이다. 컬렉터 전류가 증가함에 따라  $F_c$ 와  $F_{max}$ 가 증가하다가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 전형적인 Kirk 효과 [12]에 의한 현상으로, 전류밀도가 계속 증가하여 어느 임계값을 초과하면 전자와 정공들이 베이스-컬렉터 공핍층에 축적되어 베이스 영역이 확장되는 효과(base pushout)가 발생하여, 결국 전자의 베이스 통과시간이 길어져  $F_c$ 와  $F_{max}$ 가 감소하게 된다.

#### 4. 결 론

AlGaAs/GaAs HBT의 에미터 오믹 전극으로의 응용을 목표로 n형 InGaAs에 대한 Pd/Si/Ti/Pt 및 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉 특성을 조사하였고, 급속 열처리 에 따른 미세구조, 원자 재분포 및 상변화 분석을 병행하였다. 두 오믹 접촉 모두 급속 열처리에 의해 450°C 까지 우수한 오믹 특성을 나타내어  $low-10^{-6}$  Ωcm의 접촉 비저항을 보였다. 이는 Pd-Si계 화합물의 형성과 InGaAs 표면으로 확산한 Si doping과 밀접한 관계가 있었다. 또한 열처리 후에도 오믹 접촉 재료와 InGaAs 계면 및 표면이 매우 평탄하였고, Ti층 또는 Ti/Pt층이 그대로 유지되어 Au overlayer의 사용 가능성도 시사하였다. 본 연구에서 개발된 오믹 접촉 시스템을 AlGaAs/GaAs HBT 에미터 오믹 접촉으로 사용하여 제작된 HBT 소자의 작동특성을 평가한 결과, 모두 우수한 차단 주파수와 최대공진 주파수의 고주파 특성을 보였다. 따라서 Pd/Si/Ti/Pt 및 Pd/Si/Pd/Ti/Au 오믹 접촉 시스템은 고온 안정성이 우수하고 접촉저항이 만족할 정도로 낮기 때문에 n형 InGaAs층이 필요한 초고속 화합물 반도체 소자에의 응용 전망이 밝은 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2002-041-D00306).

## 참 고 문 헌

- [1] Y. C. Shih, M. Murakami, E. L. Wilkie, and A. C. Calleri, *J. Appl. Phys.* **62**, 582 (1989).
- [2] K. Tanahashi, H. J. Tanaka, A. Otuki, and M. Murakami, *J. Appl. Phys.* **72**, 4183 (1992).
- [3] L. S. Yu, L. C. Wang, E. D. Marshall, S. S. Lau, and T. F. Kuech, *J. Appl. Phys.* **65**, 1621 (1989).
- [4] A. Paccagnella, L. C. Wang, C. Canali, G. Castellana, M. Dapor, G. Donzelli, E. Zanoni, and S. S. Lau, *Thin Solid Film* **187**, 9 (1990).
- [5] E. D. Marshall, B. Zhang, L. C. Wang, P. F. Jiao, W. X. Chen, T. Sawada, S. S. Lau, K. L. Kavangh, and T. F. Kuech, *J. Appl. Phys.* **62**, 942 (1987).
- [6] L. C. Wang, S. S. Lau, E. K. Hsieh, and J. R. Velebir, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 2677 (1989).
- [7] L. C. Wang, Y. Z. Li, M. Kappes, S. S. Lau, D. M. Hwang, S. A. Schwarz, and T. Sands, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 3016 (1992).
- [8] I.-H. Kim, *Mater. Lett.* **57**, 2769 (2003).
- [9] J. Tersoff, *Phys. Rev. B* **32**, 6968 (1985).
- [10] I.-H. Kim, S. H. Park, T.-W. Lee, and M.-P. Park, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 1854 (1997).
- [11] I.-H. Kim, S. H. Park, J.-W. Kim, J.-M. Lee, T.-W. Lee, and M.-P. Park, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, 1854 (1997).
- [12] F. Ali and A. Gupta, *HEMTs and HBTs: Devices, Fabrication and Circuits* (Artech House, Boston · London, 1991), ch.4.