

AlGaAs/GaAs HBT 에미터 전극용 Pd/Ge계 오믹 접촉

김 일 호[†]

충주대학교 신소재공학과/나노기술연구소

Pd/Ge-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

(2003년 3월 6일 받음, 2003년 7월 16일 최종수정본 받음)

Abstract Pd/Ge/Ti/Pt and Pd/Ge/Pd/Ti/Au ohmic contacts to n-type InGaAs were investigated for applications to AlGaAs/GaAs HBT emitter ohmic contacts. In the Pd/Ge/Ti/Pt ohmic contact, minimum specific contact resistivity of $3.7 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ was achieved by rapid thermal annealing at $400^\circ\text{C}/10 \text{ sec}$. In the Pd/Ge/Pd/Ti/Au ohmic contact, minimum specific contact resistivity of $1.1 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ was achieved by annealing at $400^\circ\text{C}/10 \text{ sec}$, but the ohmic performance was degraded with increasing annealing temperature due to the reaction between the ohmic contact materials and the InGaAs substrate. However, non-spiking planar interface and relatively good ohmic contact ($\text{high-}10^{-6} \Omega \text{cm}^2$) were maintained after annealing at $450^\circ\text{C}/10 \text{ sec}$. 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/Ge/Ti/Pt and Pd/Ge/Pd/Ti/Au systems as emitter ohmic contacts. Cutoff frequencies were 63.5 GHz and 65.0 GHz, respectively, and maximum oscillation frequencies were 50.5 GHz and 51.3 GHz, respectively, indicating very successful high frequency operations.

Keywords Pd/Ge, ohmic contact, HBT, compound semiconductor

1. 서 론

최근 광소자와 전자소자를 집적화하는 OEIC(optoelectronic integrated circuit)가 차세대 IC로서 각광 받음에 따라 광특성과 초고주파 특성을 겸비한 GaAs계 화합물 반도체 및 그 관련 공정에 대한 연구가 더욱 활발해지고 있다.¹⁾ AlGaAs/GaAs HBT(heterojunction bipolar transistor)는 우수한 고속특성, 대전력 구동능력, 균일한 문턱전압 및 높은 파괴전압 등으로 인해 초고속 광통신용 전자소자로서 매우 유망하다. 반도체 소자의 구조 및 제작 공정상의 이유로 발생하는 기생저항과 접합용량은 소자의 작동특성을 저해하는 치명적인 요소이다. 이는 소자의 작동 주파수가 증가할수록 더욱 심각하기 때문에, 초고속 광통신 시스템에 사용되는 고주파 반도체 소자인 경우 기생성분을 제거하는 것이 매우 중요하다. 기생성분, 특히 기생저항 중 가장 큰 비중을 차지하는 성분이 오믹 접촉저항(ohmic contact resistance)이다. 따라서 HBT와 같은 고속소자의 제작에 있어서, 신뢰성 있고 접촉저항이 낮은 오믹 접촉 시스템을 개발하는 것이 중요하다.

Au/Ge계 오믹 접촉의 대체 재료로 연구되고 있는 Pd/Ge계 오믹 접촉은 열처리 후 확산거리가 수백 Å 정도로 작고, 접촉계면과 표면이 평탄하며, 열적으로 안정하기 때문에 GaAs계 화합물 반도체에 대한 오믹 접촉 재료로 응용하고자 하는 연구가 진행되고 있다.^{2,4)} 이제까지 밝혀진 연구결과에 의하면, 상온에서 GaAs에 Pd를 증착시키면 먼저 Pd_xGaAs 의 3원계 화합물이 생성되며 열처리를 통해 분해가 이루어지는 동시에 Ge과 반응을 하여 Pd-Ge계 화합물을 형성한다. 여기서 Ge은 Pd과 반응하면서 GaAs 표면으로 확산하여 Ga 공공을 치환함으로써 GaAs 표면을 n^+ 상태로 도핑시키고, 궁극적으로 터널링(tunneling)에 의해 오믹 접촉저항을 낮추는 원인으로 작용하게 된다. 이러한 오믹 접촉 기구를 SPR(solid phase regrowth)⁵⁾이라 한다. SPR 과정에 의하여 형성된 오믹 접촉은 우수한 표면 및 계면 특성과 edge definition이 양호하고 오믹 접촉시 반도체 기판의 소비가 매우 적은 장점을 가지고 있어, 화합물 반도체 소자의 오믹 접촉 시스템으로 활발히 연구되고 있다.

GaAs에 비해 전자 이동도(mobility)가 높고 금속에 대한 에너지 장벽이 낮아 HBT나 HEMT(high electron mobility transistor) 등의 초고속 화합물 반도체 소자에 최근 활발하게 응용되고 있는 n형 InGaAs에 대해서도

[†]E-Mail : ihkim@chungju.ac.kr

상기 오믹 접촉형성의 반응기구가 적용될 수 있을 것으로 판단된다.^{6,7)} 그러나 InGaAs 중의 In은 반응성이 매우 커서 Au를 사용하는 오믹 접촉 시스템의 경우 낮은 온도에서도 Au와 반응하여 Au-Ga계 및 Au-In계 화합물이 생성되며, 이러한 경우 접촉 저항이 급격히 증가됨과 더불어 표면 및 계면이 불건전하므로 오믹 접촉 재료의 선택에 유의해야 한다. In_xGa_{1-x}As에서 x가 0.5 이상일 경우 Schottky barrier height가 약 0.2 eV로 작기 때문에 상온에서 어떠한 금속과도 오믹 접촉 특성을 보이는 것으로 알려져 있으나,^{8,9)} HBT 소자 제작 공정에서 300~400°C의 열처리가 불가피하며, 이로 인한 오믹 접촉 재료와 InGaAs의 반응 및 확산에 의한 오믹 접촉의 안정성에 문제가 발생할 수 있다.

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

2. 실험 방법

Table 1은 본 연구에서 사용된 AlGaAs/GaAs HBT의 에피층 구조를 나타낸 것이다. HBT의 에미터 캡층을 형성하기 위하여, 직경 3 inch 반절연성 GaAs(100) 기판 위에 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition)로 도핑농도 1×10^{19} Si/cm³의 n형 In_{0.5}Ga_{0.5}As(이후 InGaAs로 표기함)의 에피층을 형성하였다. 5×10^{-7} Torr의 진공도에서 EBE(electron beam evaporator)에 의해 Pd(500 Å)/Ge(1200 Å)/Ti(300 Å)/Pt(300 Å) 및 Pd(500 Å)/Ge(1200 Å)/Pd(500 Å)/Ti(350 Å)/Au(900 Å)의 오믹 접촉 재료를 Fig. 1과 같이 InGaAs 위에 형성한 후 N₂/H₂ 가스 분위기에서 300~450°C에서 10~60초 동안 급속 열

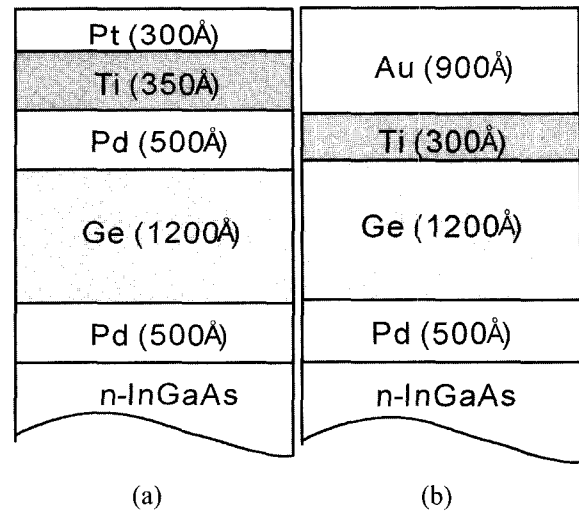


Fig. 1. Schematic cross-sectional views of the (a) Pd/Ge/Ti/Pt and (b) Pd/Ge/Pd/Ti/Au ohmic contact layers on n-InGaAs.

처리를 하였다. Pd/Ge/Ti/Pt 오믹 접촉은 Pd-Ge계 화합물의 형성을 통해 SPR 오믹 접촉 기구를 유도한 것이며, Ti/Pt층은 확산 방지층으로 사용된 것이다. Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉은 Pd-Ge계 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.

$100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 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)¹⁰⁾으로 접촉 비저항(specific contact resistivity)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:H₂O = 1:1 용액으로 산제한 후 탈이온수(deionized water)로 세척하였고

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

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

고순도 질소 기체로 건조하였다. 포토리소그래피(photo-lithography) 공정과 EBE 장비에 의해 오믹 접촉을 형성한 후, PR(photoresist) 및 PR 위에 증착된 오믹 금속을 제거하기 위하여 리프트오프(lift-off) 공정을 수행하였다.

RTA에 의한 상변화 및 원자 재분포를 각각 XRD(X-ray diffractometer)와 AES(Auger electron spectroscopy)를 이용하여 조사하였다. XRD 분석시 Cu $K\alpha$ target을 사용하였고, 전압 30 kV, 전류 40 mA, scanning 속도 3°/min의 조건으로 분석하였다. 한편 AES 분석시 전자의 가속전압은 10 keV이었고, Ar^+ (5 keV, 5 mA)를 사용하여 약 60 Å/min의 속도로 깊이 분석을 실시하였다. 오믹 접촉재료와 InGaAs의 계면을 XTEM(cross-sectional transmission electron microscopy)으로 관찰하였으며, 이때 가속전압 200 keV 상태에서 (110) projection centered beam image 방법으로 분석하였다.

소자 응용적인 측면에서, 본 연구에서 개발된 Pd/Ge계 오믹 접촉 시스템을 AlGaAs/GaAs HBT 소자의 제작에 적용하여, HBT의 작동특성을 조사하였다. 전술한 바와 같이 MOCVD로 성장시킨 AlGaAs/GaAs HBT 에피구조는 Table 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 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O = 4:1:50$ 용액을 사용하였고, 베이스 표면을 노출시키는 에미터 메사식각에만 역메사 형상 구현이 가능한 $NH_4OH:H_2O_2:H_2O = 20:7:973$ 용액과 느린 식각속도를 갖도록 희석된 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O = 4:1:90$ 용액을 함께 사용하였다. 에미터 전극으로 본 연구에서 개발된 Pd/Ge/Ti/Pt 또는 Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉을 사용하였고, 베이스 및 컬렉터 전극은 일반적으로 사용되는 Pt/Ti/Pt/Au 및 Ni/Ge/Au/Ti/Au를 사용하였다.

금속배선 공정을 위하여 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) 방법에 의해 SiN 막을 250°C에서 5000 Å의 두께로 웨이퍼 전면에 도포하였고, 공정 조건으로서 50 W의 RF 전원, 700 mTorr의 압력, $SiH_4/NH_3/He/H_2$ 의 가스를 70/4/700/300 SCCM의 유량으로 사용하였다. SiN 막에 contact hole을 위한 패턴을 형성한 후, MERIE(magnetically enhanced reactive ion etching) 장비에 의한 C_2F_6 플라즈마를 이용하여 에미터, 베이스 및 컬렉터 접촉장을 식각하여 오픈하였다. 배선 금속으로 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 전면에 도포하고 동일한 조건의 건식식각에 의해 패드를 오픈함으로써 AlGaAs/GaAs HBT를 제작하였고, 본 연구에서 제작된 에미터 상층구조 single finger

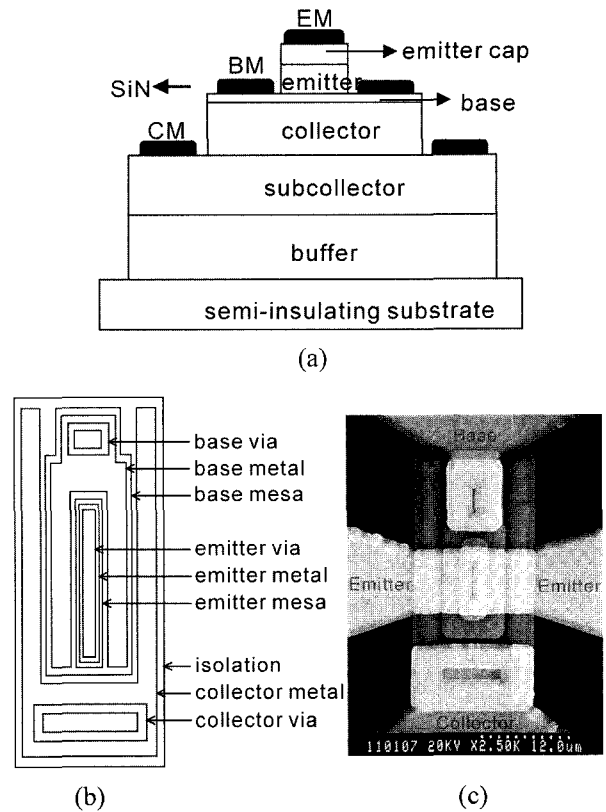


Fig. 2. Schematic illustrations of the AlGaAs/GaAs HBT. (a) cross-sectional view (b) top view (c) HBT with emitter size of $1.5 \times 10 \mu\text{m}^2$

AlGaAs/GaAs HBT의 단면 및 평면 개략도와 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

AlGaAs/GaAs HBT 소자의 AC 파라미터를 추출하기 위하여 network analyzer와 ANACAT software를 사용하여 단위 소자에 대한 microwave response를 측정하였다. 0.5 GHz 부터 39.5 GHz 까지의 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 최대공진 주파수(maximum oscillation frequency, F_{max})를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Pd/Ge/Ti/Pt 오믹 접촉

Fig. 3은 RTA 조건에 따른 오믹 접촉 비저항의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)에서와 같이, In의 물분율이 0.5일 때 $In_xGa_{1-x}As$ 와 금속간의 상온에서의 에너지 장벽이 0.2 eV 정도로 낮기 때문에 열처리하기 전에도 $3.2 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ 의 비교적 낮은 접촉 비저항을 나타내었다. 열처리 온도를 상승함에 의해 접촉 비저항이 더욱 감소하여 400°C에서 10초 동안 열처리하였을 때 $3.7 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$ 로 최저 비저항을 나타내었다. 또한 열처리 온도를 450°C까지 상승하여도 $low-10^{-6} \Omega\text{cm}^2$ 의 낮은 접촉 비저

항을 유지하였다. Fig. 3(b)는 375°C에서 열처리 시간을 달리 하여 오믹 접촉 비저항을 측정한 결과로서, 열처리 시간을 증가시키면 접촉 비저항이 증가하는 경향을 보였다. 따라서 Pd/Ge/Ti/Pt 오믹 접촉을 실제 AlGaAs/GaAs HBT 제작 공정에 응용할 경우 400°C 이상에서 10~20초의 단시간 내에 열처리를 수행하는 것이 바람직하다.

XRD로 분석한 RTA 조건에 따른 상변화를 Fig. 4에

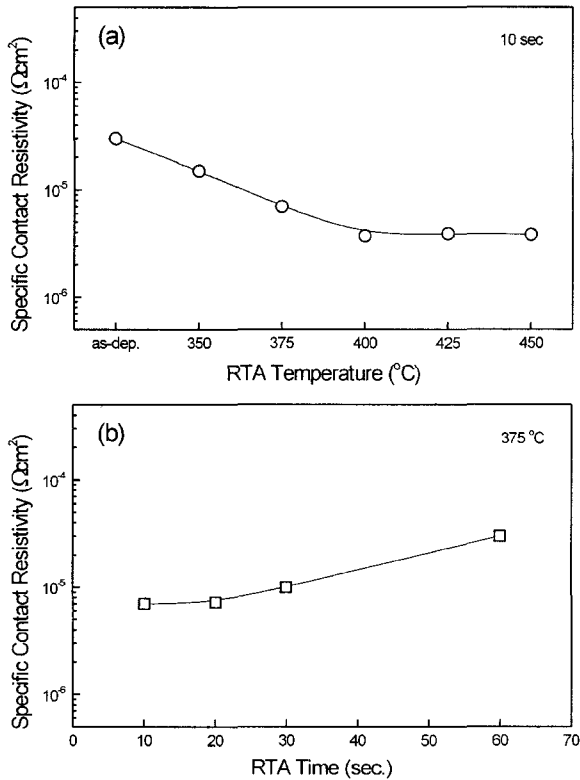


Fig. 3. Variation of the specific contact resistivity of the Pd/Ge/Ti/Pt contacts to n-InGaAs with RTA (a) temperature and (b) time.

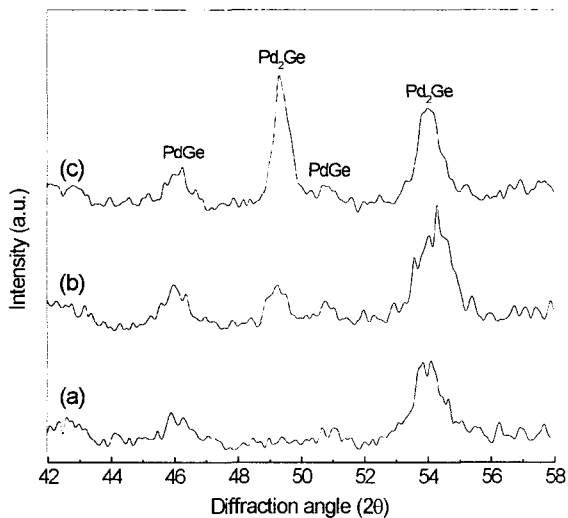


Fig. 4. XRD patterns of the Pd/Ge/Ti/Pt contacts to n-InGaAs. (a) 350°C/10sec (b) 400°C/10sec (c) 450°C/10sec

나타내었다. 급속 열처리에 의해 Pd-Ge계 화합물(PdGe, Pd₂Ge)이 생성되는 것을 확인하였다. RTA 온도가 상승함에 따라 Pd₂Ge상의 생성이 우세함을 알 수 있다. 그러나 450°C/10초의 RTA에 의해서도 InGaAs와 오믹 접촉재료와의 반응 생성물은 확인되지 않았다. P. H. Hao 등⁴⁾과 E. D. Marshall 등⁸⁾이 보고한 n형 GaAs에 대한 Pd/Ge계의 SPR 오믹 접촉 기구에 의하면, 상온에서 준안정상인 3원계 화합물 Pd_xGaAs가 GaAs 표면에 수십 Å의 두께로 형성되고, 고온에서의 열처리를 통해 Ge과 반응하여 Pd-Ge계 화합물을 형성하면서 Ge이 도핑된 GaAs 재결정(재성장)층을 형성한다. 이로 인해 GaAs의 표면 도핑 농도가 증가하여 터널링(tunneling)에 의해 오믹 접촉 저항이 감소하게 된다. 이러한 SPR 과정은 Pd/Ge계뿐만 아니라 Pd/Si계,¹¹⁾ Pd/Zn계,¹²⁾ Pd/In계¹³⁾ 등에서도 나타나며, 기판이 GaAs가 아닌 AlGaAs,¹⁴⁾ GaP,¹⁵⁾ InP,¹⁶⁾ InGaAsP¹⁶⁾, AlInP¹⁷⁾ 등에서도 나타날 수 있다고 보고되고 있지만, 아직 실험적 자료가 많지 않다. 본 논문의 경우, 열처리 전에 이미 n형 InGaAs의 barrier height 자체가 오믹 접촉을 나타낼 만큼 낮은 상태이기 때문에, 급속 열처리에 의해 오믹 접촉 저항이 더욱 낮아진 이유는 barrier height의 감소에 의한 것이 아니라, Ge이 InGaAs 표면으로 확산하여 표면 도핑 농도를 증가시킴으로써 barrier width가 감소하여 터널링에 의한 것으로 판단된다. 따라서 초기 Pd과 InGaAs의 반응으로 인한 준안정상은 발견할 수 없었지만, PdGe 및 Pd₂Ge 상이 생성되고 접촉 비저항이 감소한 것으로 미루어 InGaAs의 경우도 Pd/Ge계 SPR 과정에 의한 오믹 접촉이 가능하다고 생각한다. 한편, 오믹 특성에 악영향을 미치는 Pd-Ga계 및 Pd-In계 화합물이 450°C에서의 RTA 후에도 발견되지 않았고, 따라서 Pd/Ge/Ti/Pt 오믹 접촉은 고온 안정성이 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 Pd/Ge/Ti/Pt 오믹 접촉에 대하여 RTA에 의한 구성 원자의 재분포를 AES 깊이 분석으로 측정한 결과이다. 350°C/10초의 RTA에 의해 Pd층과 Ge층이 상호 확산되었으나, 아직 불균질한 분포를 하고 있다. 그러나 열처리 온도를 상승함에 따라 Pd층과 Ge층이 완전히 혼합되어 균질한 분포를 보이고 있다. 한편 Ti/Pt층은 450°C/10초까지의 열처리 조건에서도 특별한 변화가 없었으며, 이는 확산 방지층으로서 충분히 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 InGaAs와 Pd/Ge/Ti/Pt 오믹 접촉의 계면을 XTEM으로 관찰한 것으로, 열처리 후에도 평탄한 계면을 유지하였다. RTA에 의해 Pd-Ge계 화합물의 형성을 확인하였고, Ti/Pt층의 변화는 관찰되지 않았다. 350°C/10초의 RTA에 의해 Pd과 Ge이 일부 반응하여 Pd-Ge계 화합물이 형성된 것을 관찰하였고, 400°C 이상의 열처리에 의해 Pd과 Ge이 완전히 반응한 것을 알 수 있었다. 전반적인 측정·분석결과에 의하면 n형 InGaAs에 대한 Pd/Ge/Ti/Pt 오믹 접촉은 비교적 낮은 접촉저항을 고온까지 유지하는 것이 가능하여 InGaAs층이 필요한

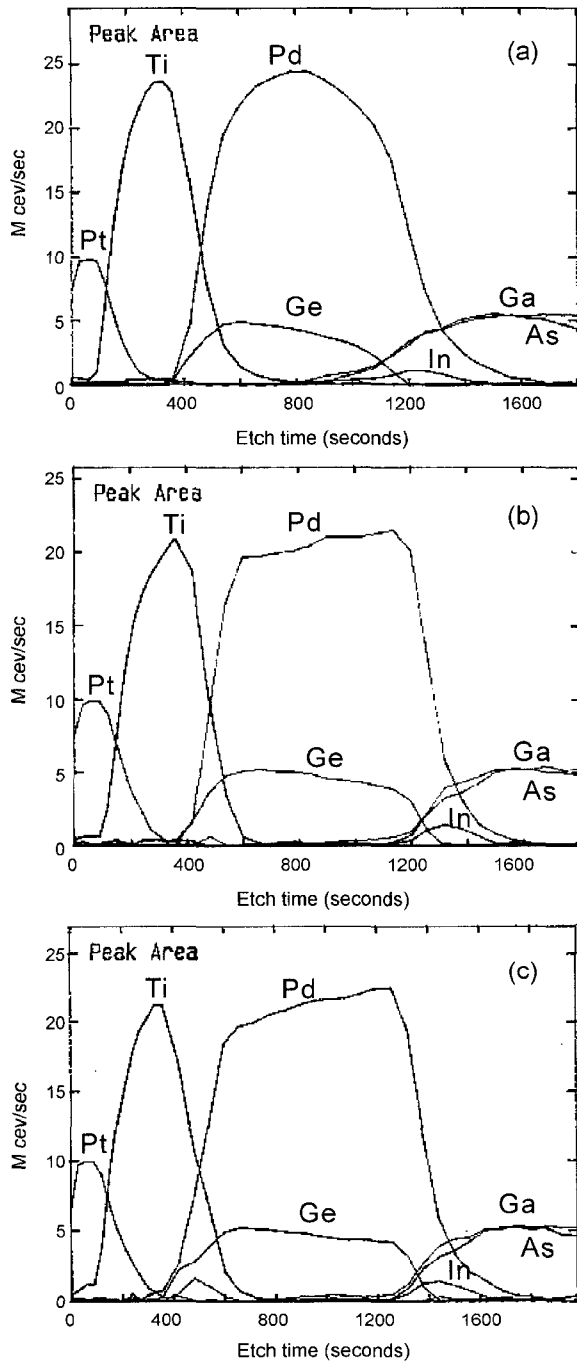


Fig. 5. AES depth profiles of the Pd/Ge/Ti/Pt contacts to n-InGaAs. (a) 350°C/10sec (b) 400°C/10sec (c) 450°C/10sec

HBT, HEMT 등과 같은 초고속 화합물 반도체 소자의 응용전망이 밝은 것으로 사료된다.

3.2. Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉

Fig. 7은 RTA 조건에 따른 Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉 비저항의 변화를 나타낸 것이다. Pd/Ge/Ti/Pt 오믹 접촉의 경우와 마찬가지로 열처리 전에도 비교적 낮은 저항값($\text{mid-}10^{-6} \Omega\text{cm}^2$)을 보였다. 400°C에서 열처리하였을 때 $1.1 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$ 로 최저 저항을 나타내었으며, 425°C에서의 열처리에 의해 접촉 저항이 약간 증가하다가 450°C에

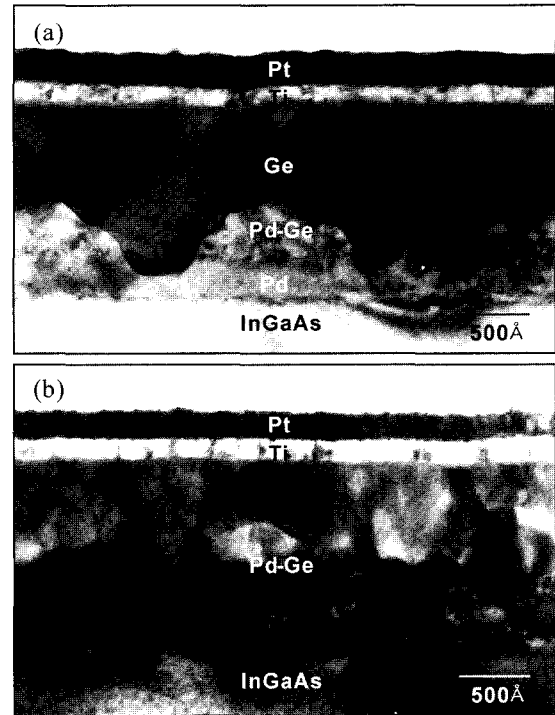


Fig. 6. Cross-sectional views of the Pd/Ge/Ti/Pt contacts to n-InGaAs. (a) 350°C/10sec (b) 400°C/10sec

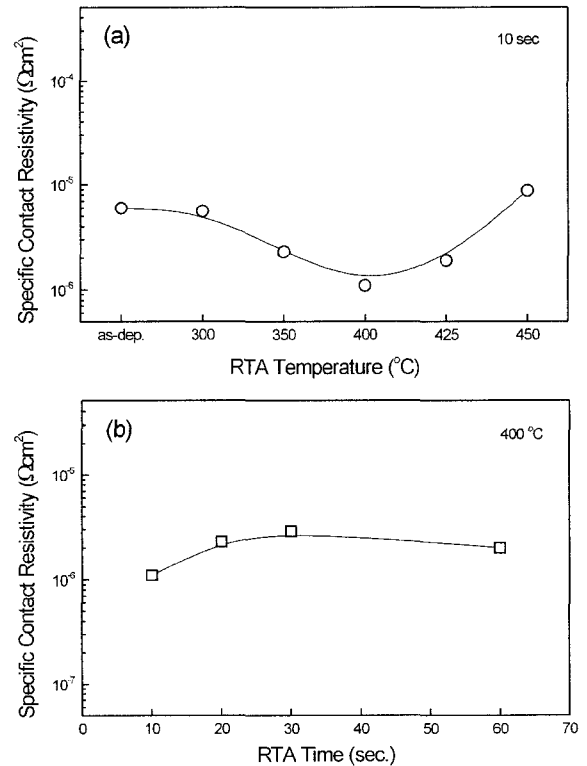


Fig. 7. Variation of the specific contact resistivity of the Pd/Ge/Pd/Ti/Au contacts to n-InGaAs with RTA (a) temperature and (b) time.

서의 열처리에 의해 더욱 증가하였다. Fig. 7(b)는 400°C에서 시간을 달리 하여 열처리한 후 오믹 접촉 비

저항을 측정한 결과로서, RTA 시간을 60초까지 증가시켜도 오믹 접촉 비저항의 변화는 크지 않았다.

Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉에 대하여 RTA 조건에 따른 상변태에 관한 XRD 분석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 급속 열처리에 의해 Pd과 Ge이 반응하여 Pd-Ge계 화합물(PdGe, Pd₂Ge)이 생성되는 것을 확인하였다. 전술한 바와 같이 열처리 전에 이미 metal/InGaAs 접촉의 barrier height가 오믹 접촉을 나타낼 만큼 낮은 상태이기 때문에, RTA에 의해 오믹 접촉 저항이 더욱 낮아진 이유는 Ge의 내부 확산에 의해 InGaAs 표면 도핑 농도가 증가하여 barrier width가 감소하였기 때문으로 판단된다. 따라서 초기 Pd와 InGaAs의 반응으로 인한 준안정상은 발견할 수 없었지만(Pd/GaAs 접촉계에서 준안정상인 Pd₃GaAs의 경우 175°C 이상에서 분해됨),^{4,5)} Pd-Ge계 화합물이 생성되고 접촉 비저항이 감소한 것으로 미루어 InGaAs의 경우도 SPR 과정에 의한 오믹 접촉이 가능하다고 생각한다.

한편 425°C 이상의 온도에서 RTA 후에 접촉 비저항이 증가하는 이유는 오믹 접촉 재료와 InGaAs가 반응하여 Pd₃Ga₂ 상이 형성된 것과 관련이 있으며, 그 결과 InGaAs 표면의 화학량론적 조성이 파괴되어 barrier height가 증가한 것에 기인한다. 고온에서 Pd/Ge계 오믹 접촉 특성이 나빠지는 이유는 크게 두 가지로 설명된다. 첫째, Pd-Ge 화합물이 기판과 반응하여 n⁺로 도핑된 표면층을 소모하고, 이로 인해 계면 저항이 높은 영역을 형성하기 때문이다.¹⁸⁾ 둘째, Ge은 양향성(amphoteric) 도펀트이기 때문에, 재확산된 Ge이 전하 보상된 물질을 형성(때로는 p형 물질도 형성)하기 때문이다.¹⁹⁾ 오믹 특성 열화(degradation)가 오믹 재료의 형성과 열처리 과정에 모두 의존하기 때문에, 열화 기구는 아직까지 명확하지 않지만, 본 논문의 경우 Fig. 7에서와 같이 425°C 이상의 온도에서 RTA에 의해 접촉 비저항이 증가하는 이유는 Pd이 InGaAs와 반응하여 Pd₃Ga₂ 상과 같은 원하지

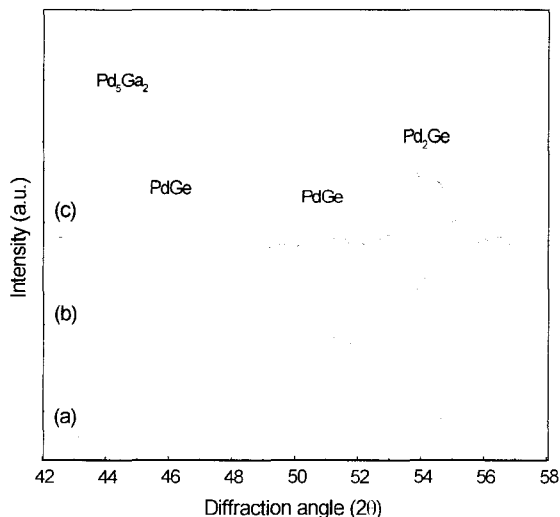


Fig. 8. XRD patterns of the Pd/Ge/Pd/Ti/Au contacts to n-InGaAs. (a) 350°C/10sec (b) 400°C/10sec (c) 450°C/10sec

않는 상이 형성되기 때문이다. 즉, Pd/InGaAs 계면 반응으로 인한 n⁺-InGaAs 표면층이 소모(파괴)되었기 때문이다. 그러나 450°C의 열처리에서도 Au를 함유한 오믹 접촉에서 흔히 발견되는 Au-In계 및 Au-Ga계 화합물은 발견되지 않았다.

Fig. 9는 Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉에 대하여 RTA에 의한 구성 원자의 재분포를 AES 깊이 분석으로 측정한 결과이다. RTA에 의해 Pd과 Ge의 상호 확산이 활발하게 진행되어 상하 Pd 층간의 구분이 사라졌고, Ge이 InGaAs 표면까지 도달하였다. 한편, 여타 원소들의 주목할만한 이동은 나타나지 않았다. 450°C까지 열처리된 시편의 경우에도 Au의 확산 저지층으로서 Ti층이 적절히 작용함으로써 Au와 In 및 Ga의 반응이 원천적으로 차단되어 In, Ga 및 As의 외부 확산이 관찰되지 않았다.

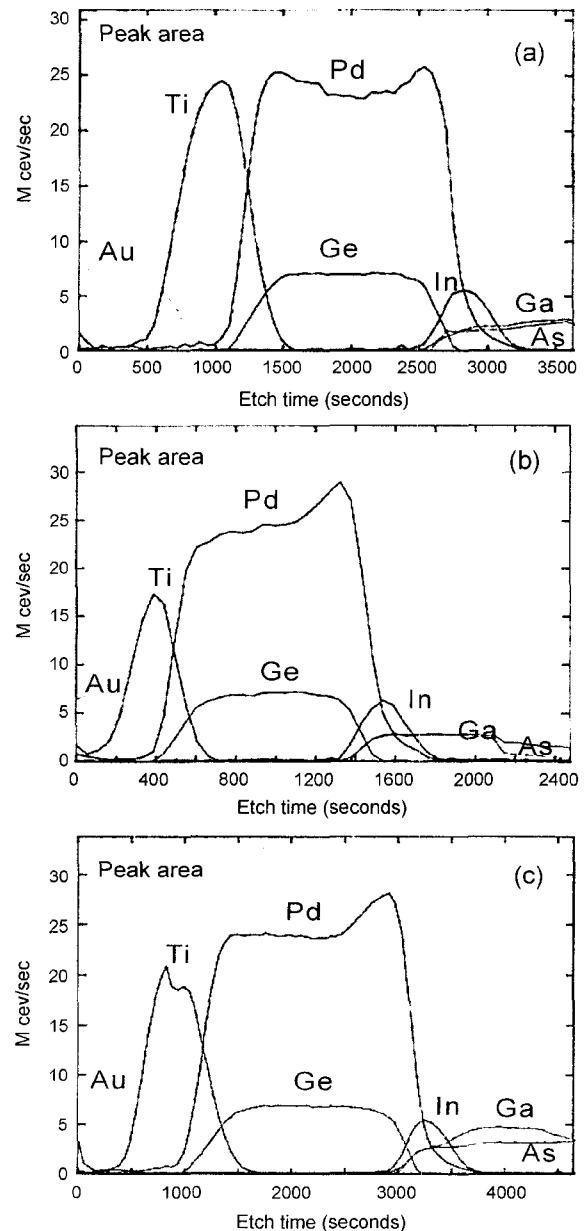


Fig. 9. AES depth profiles of the Pd/Ge/Pd/Ti/Au contacts to n-InGaAs. (a) 350°C/10sec (b) 400°C/10sec (c) 450°C/10sec

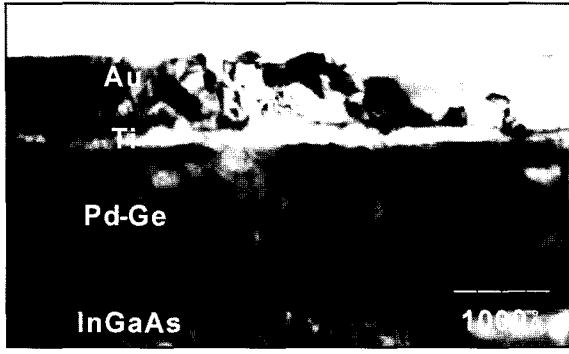


Fig. 10. Cross-sectional view of the Pd/Ge/Pd/Ti/Au contacts to n-InGaAs annealed at 450°C/10sec.

Fig. 10은 InGaAs와 Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉의 계면을 XTEM으로 관찰한 것으로, 450°C에서 RTA 후에도 평탄한 계면을 유지하였다. 보다 정량적이고 깊이 있는 분석이 요구되지만, RTA에 의해 Pd-Ge계 화합물의 형성을 확인하였고, Ti층에 의해 Au의 내부확산이 저지되었음을 확인하였다. 따라서 Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉 시스템 또한 열적 안정성이 우수하여, InGaAs층이 활성층(active layer)으로 사용되는 초고속 화합물 반도체 소

자에 충분히 응용 가능하다.

3.3. AlGaAs/GaAs HBT 소자의 RF 특성

Fig. 11은 Pd/Ge계를 에미터 오믹 접촉으로 이용하여 제작한 AlGaAs/GaAs HBT의 주파수 응답특성을 측정 한 것으로, 에미터 크기가 $1.5 \times 10 \mu\text{m}^2$ 인 소자에 대한 특정 바이어스 조건에서의 교류 전류이득(h_{21})과 전력이득(MAG)을 나타낸 것이다. 에미터-컬렉터 전압(V_{ce})은 1.5 V이었으며, 데이터 곡선에서 -20 dB/dec. 기울기의 직선과 x축(주파수)과의 절편으로부터 차단 주파수(F_t)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/Ge/Ti/Pt를 이용한 경우, $F_t = 63.5 \text{ GHz}$ ($I_c @ F_t = 10.3 \text{ mA}$)와 $F_{max} = 50.5 \text{ GHz}$ ($I_c @ F_{max} = 10.3 \text{ mA}$)의 특성을 나타내었고, Pd/Ge/Pd/Ti/Au를 사용한 경우, $F_t = 65.0 \text{ GHz}$ ($I_c @ F_t = 10.9 \text{ mA}$)와 $F_{max} = 51.3 \text{ GHz}$ ($I_c @ F_{max} = 9.5 \text{ mA}$)의 우수한 고주파 특성을 보였다.

Fig. 12는 컬렉터 전류(I_c)에 따른 F_t 와 F_{max} 의 변화를 측정 한 것이다. 컬렉터 전류가 증가함에 따라 F_t 와 F_{max} 가 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며, 이는 전형적

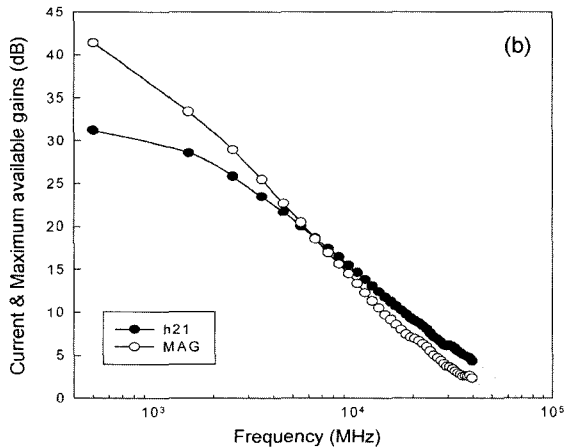
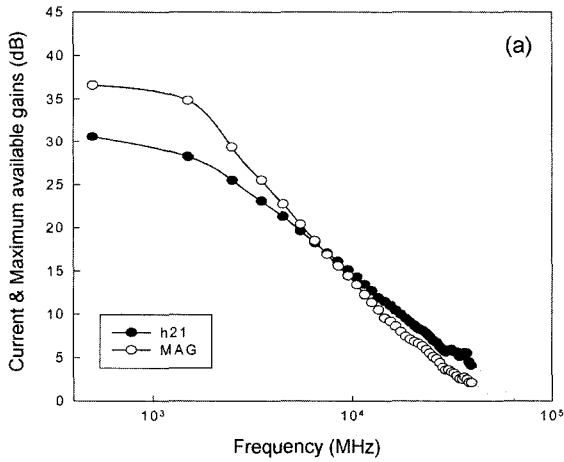


Fig. 11. Current and maximum available gains of AlGaAs/GaAs HBTs employing (a) Pd/Ge/Ti/Pt and (b) Pd/Ge/Pd/Ti/Au emitter ohmic contacts ($V_{ce} = 1.5 \text{ V}$).

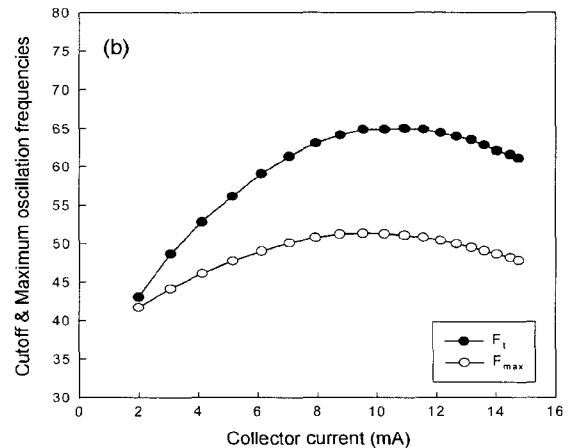
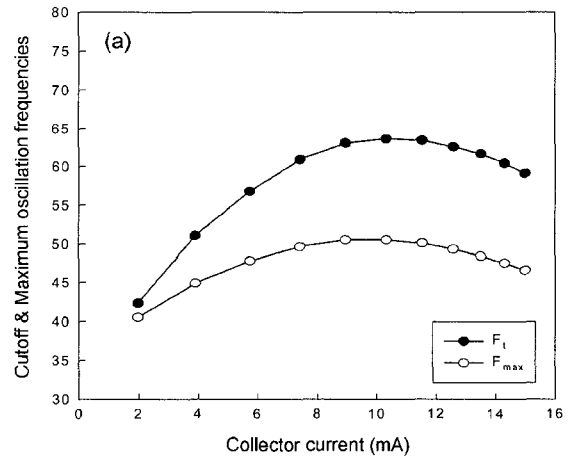


Fig. 12. Cutoff and maximum oscillation frequencies of AlGaAs/GaAs HBTs employing (a) Pd/Ge/Ti/Pt and (b) Pd/Ge/Pd/Ti/Au emitter ohmic contacts.

인 Kirk 효과²⁰⁾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_1 와 F_{max} 가 감소하게 된다.

4. 결 론

AlGaAs/GaAs HBT의 에미터 오믹 전극으로의 응용을 목표로 n형 InGaAs에 대한 Pd/Ge/Ti/Pt 및 Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉 특성을 조사하였고, 급속 열처리에 따른 미세구조, 원자 재분포 및 상변화 분석을 병행하였다. 두 오믹 접촉 모두 급속 열처리에 의해 450°C까지 우수한 오믹 특성을 나타내었다. 이는 Pd-Ge계 화합물의 형성과 밀접한 관계가 있었다. 또한 열처리 후에도 오믹 접촉 재료와 InGaAs 계면 및 표면이 매우 평탄하였고, Ti 층 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/Ge/Ti/Pt 및 Pd/Ge/Pd/Ti/Au 오믹 접촉 시스템은 고온 안정성이 우수하고 접촉저항이 만족할 정도로 낮기 때문에 n형 InGaAs층이 필요한 초고속 화합물 반도체 소자에의 응용 전망이 매우 밝다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. F. Ali and A. Gupta, "HEMTs and HBTs: Devices,

- Fabrication, and Circuits", ch.1, Arden House, Boston (1991).
2. M. W. Cole, W. Y. Han, L. M. Casas, D. W. Eckart and K. A. Jones, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A12**, 1904 (1994).
 3. I.-H. Kim, S. H. Park, T.-W. Lee and M.-P. Park, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1854 (1997).
 4. P. H. Hao, L. C. Wang, Fei Deng, S. S. Lau and J. Y. Cheng, *J. Appl. Phys.*, **79**, 4211 (1996).
 5. E. D. Marshall, W. X. Chen, C. S. Wu, S. S. Lau and T. F. Keuch, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 535 (1985).
 6. I.-H. Kim, *Mater. Lett.*, **54**, 323 (2002).
 7. I.-H. Kim, *Mater. Lett.*, **56**, 775 (2002).
 8. J. Tersoff, *Phys. Rev.*, **B32**, 6968 (1985).
 9. K. Kajiyama, Y. Mizushima and S. Sakata, *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 458 (1973).
 10. H. H. Berger, *Solid State Electron.*, **15**, 145 (1972).
 11. L. C. Wang, T. Z. Li, M. Kappes, S. S. Lau, D. M. Hwang, S. A. Schwarz and T. Sands, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 3016 (1992).
 12. R. Bruce, D. Clark and S. Eicher, *J. Electron. Mater.*, **19**, 225 (1990).
 13. L. C. Wang, X. Z. Wang, S. N. Hsu, S. S. Lau, P. S. D. Lin, T. Sands, S. A. Schwarz, D. L. Plumton and T. F. Keuch, *J. Appl. Phys.*, **68**, 4364 (1991).
 14. L. R. Zheng, S. A. Wilson, D. J. Lawrence, S. I. Rudolph, S. Chen and G. Braunstein, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 877 (1992).
 15. L. C. Wang, M.-H. Park, H. A. Jorge, I. H. Tan and F. Kish, *Electron. Lett.*, **32**, 409 (1996).
 16. W. X. Chen, S. C. Hsueh, P. K. L. Yu and S. S. Lau, *IEEE Electron Device Lett.*, **7**, 471 (1986).
 17. P. H. Hao, L. C. Wang, J. C. P. Chang, H. C. Kuo and J. M. Kuo, *J. Appl. Phys.*, **79**, 3640 (1996).
 18. E. D. Marshall, B. Zhang, L. C. Wang, P. F. Jiao, W. X. Chen, T. Sawada, S. S. Lau, K. L. Kavanagh and T. F. Fuch, *J. Appl. Phys.*, **62**, 942 (1987).
 19. C. J. Palmstr m, S. A. Schwarz, E. Yablonovitch, J. P. Harbison, C. L. Schwarz, L. T. Florez, T. J. Gmitter, E. D. Marshall and S. S. Lau, *J. Appl. Phys.*, **67**, 334 (1990).
 20. F. Ali and A. Gupta, "HEMTs and HBTs: Devices, Fabrication, and Circuits", ch.4, Arden House, Boston (1991).