

論文98-35D-7-12

AlGaAs/GaAs HBT의 열화 분석과 InGaP ledge 에미터에 의한 신뢰도 개선

(Degradation Analysis of AlGaAs/GaAs HBTs and Improvement of Reliability by using InGaP Ledge Emitter)

崔 繁 在 * , 金 得 永 ** , 宋 政 根 **

(Pun-Jae Choi, Duk-Young Kim, and Chung-Kun Song)

요 약

자기정렬 공정으로 제작된 AlGaAs/GaAs HBT에서는 외부 베이스 표면과 이를 포함하고 있는 질화막 사이의 표면 재결합 상태의 불안정이 dc 특성 열화의 중요한 원인이 되고 있다. 본 논문에서는 AlGaAs/GaAs HBT의 열화 메커니즘을 분석하였고, 비자기정렬 공정으로 제작된 InGaP ledge 에미터로 베이스 표면을 포장하여 표면 재결합 상태를 감소시킴으로써 신뢰도를 개선하였다. 가속수명 실험 결과, 비자기정렬 공정으로 제작된 InGaP/GaAs HBT의 경우 자기정렬 공정으로 제작된 AlGaAs/GaAs HBT에 비해 dc 특성이 매우 안정하였으며, 활성화 에너지는 1.97eV, 평균실패시간은 140℃에서 4.8×10^8 시간으로서 MILS를 만족하였다.

Abstract

For the self-aligned AlGaAs/GaAs HBTs, the surface states at the interface between the extrinsic base surface and the passivation nitride is a major cause of degradation of dc characteristics. In this paper the degradation mechanisms of self-aligned AlGaAs/GaAs HBT were analyzed, and GaAs HBTs, which employed an InGaP ledge emitter structure formed by the nonself-aligned process to cover the surface of the extrinsic base and reduce the surface states, produced high reliability. According to the acceleration lifetime test, the nonself-aligned InGaP/GaAs HBTs produced very reliable dc characteristics comparing with the self-aligned AlGaAs/GaAs HBTs. The activation energy was 1.97 eV and MTTF 4.8×10^8 hrs at 140 °C, which satisfied the MIL standard.

I. 서 론

HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)는 높은 주파수 특성과 큰 전류이득, 그리고 고전력 처리능력, 저잡음, 높은 선형성 등으로 인해 초고주파 통신 시스템의 저잡음 증폭기, 발진기, 전력 증폭기 등 초고주파 집

적회로의 능동소자로서 그 활용범위가 더욱 넓어지고 있다.

AlGaAs/GaAs 반도체는 적층기술이 다른 화합물에 비해 비교적 안정되었기 때문에 HBT 개발 초기부터 많은 연구 대상이 되었으며, 최근 정보통신 산업의 발달로 인해 상용화를 위한 개발이 활기를 띠고 있다. 그러나, 상용화 이전에 반드시 확보되어야 할 신뢰도 측면에서 아직 해결하지 못한 문제점들이 남아 있다.

HBT는 여러 가지 열화형태를 나타내며, 주된 원인

* 學生會員, ** 正會員, 東亞大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering Dong-A University)

接受日字:1998年3月3日, 수정완료일:1998年5月25日

으로 이중접합의 불안정성에 의한 열화^[1], 소자의 표면 및 주변둘레의 열화^[2], 에피층 물성의 변화에 의한 열화^[3], 배선 및 전극의 열화^[4] 등을 들 수 있다. 이중접합의 불안정성에 의한 열화는 베이스 도펀트의 확산과 계면 전하 상태의 변화에 의해 발생한다. 도펀트의 확산에 의한 열화는 베이스 도펀트로 주로 사용하던 Be 대신 확산계수가 작은 C를 사용함으로써^[5], 계면 전하 상태의 변화는 적층기술의 발달로 인해 안정적인 계면 전하 상태를 제작할 수 있으므로 상당히 개선되었다. 에피층 물성 변화에 의한 열화는 베이스에서 재결합을 통해 방출하는 에너지가 주된 원인이며, 이는 베이스 폭을 줄여서 재결합 전류를 감소시키든지, DX 센터와 같은 재결합 상태가 적은 새로운 반도체로 대체시킴으로써 개선되고 있다. 그리고, mesa 구조로 제작된 HBT에서 소자 표면을 주로 실리콘 질화막(Si₃N₄)으로 포장하기 때문에 외부 베이스 표면과 실리콘 질화막 사이에 계면 상태가 형성되며, 이로 인한 열화로 인해 베이스 전류가 증가하게 되어 전류이득이 감소하게 된다^[6]. 이는 외부 베이스 표면에 에미터의 일부를 남겨 포장하는 ledge 구조로써 개선할 수 있는데^[7], AlGaAs/GaAs HBT의 경우 에미터 ledge 제작에 있어서 AlGaAs와 GaAs를 선택적으로 식각하는 식각용액이 아직 개발되지 않아, 이미 조사되어진 식각액을 바탕으로 시간적으로 제어할 수밖에 없으므로 공정상의 불편함은 물론 제작된 소자에 있어서도 그 균일성을 확보하기가 어려운 상태이다.

InGaP/GaAs HBT는 에미터 재료인 InGaP와 베이스 재료 GaAs사이의 에너지 갭 차이의 대부분이 가전자대에 나타나므로, 온도 상승에 따른 베이스로부터 에미터로의 캐리어 역주입을 효과적으로 방지할 수 있어, AlGaAs/GaAs HBT에서와 같이 온도 상승에 따른 전류이득 감소와 특성저하를 개선할 수 있다. 또한, AlGaAs/GaAs HBT의 전도대에 나타나던 에너지 불연속 차이(spike)로 인한 주입효율 감소를 막기 위해 에미터와 베이스 사이의 조성경사(grading) 공정을 추가할 필요가 없다. 따라서 전류이득이 높고, 온도에 대한 전류특성이 비교적 안정적이다^[8]. 또한 DX 센터의 영향을 무시할 수 있어 잡음 특성이 우수하고^[9], 낮은 전류 영역에서도 에미터-베이스 공간전하영역 재결합 전류가 매우 작아 전류이득이 AlGaAs/GaAs HBT보다 높고^[10], AlGaAs에 나타나는 Al에 의한 산화도 없다.

이러한 많은 장점이 있지만, 신뢰도 측면에서 무엇보다

큰 장점은 에미터 재료인 InGaP와 GaAs를 선택적으로 식각할 수 있다는 것이다. 따라서 InGaP/GaAs HBT는 외부 베이스 표면에 에미터 ledge를 쉽게 제작할 수 있고, 이로 인해 외부 베이스 표면을 안정적으로 포장하여 소자의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 현재 선진국 일부 기업에서 상품으로 내놓고 있는 HBT와 유사한 구조의 AlGaAs/GaAs HBT의 정전류 가속수명실험 결과 나타나는 열화의 메커니즘을 분석하였고, InGaP ledge 에미터를 사용하여 신뢰도가 현저히 개선됨(MTTF=4.8×10⁸hrs)을 보여주고 있다.

II. 온도 및 정전류 스트레스에 의한 가속 수명 실험

실험에 앞서 유사한 열화형태를 나타내는 온도범위 내에서 InGaP/GaAs HBT의 열화시간을 대략적으로 관찰한 후, 가장 적절한 기판온도인 513K(240°C), 533K(260°C), 553K(280°C)에서 정전류 밀도 2×10⁴A/cm²(I_c=24mA)로 장시간 스트레스를 인가하였다. 스트레스를 인가하는 동안 V_{ce}를 5V로 일정하게 유지하기 위한 burn-in test를 수행하여 일정한 값으로 I_b(~60μA)와 V_{BE}(~1.3V)를 고정하였다. 실험은 스트레스를 인가하기 전의 컬렉터 전류 24mA일 때 전류이득을 기준으로 전류이득의 감소를 관찰해가며, 513K(240°C)에서 456시간동안, 533K(260°C)에서 384시간동안, 553K(280°C)에서 168시간동안 스트레스를 인가하였다. 처음 24시간 동안은 세밀한 관찰을 위해 1시간 단위로, 24시간부터 72시간 동안은 12시간 단위로, 스트레스를 인가한 지 72시간 이후로는 24시간 단위로 dc 파라미터(Gummel 도표, 전류이득, I-V 특성, 에미터-베이스 접합의 I-V 특성, I_c-V_{CE} 출력 특성)를 측정하였다. 스트레스 인가와 dc 파라미터 측정은 HP4155A로 수행하였으며, 실험의 정확성과 편리성을 도모하기 위해 모든 과정을 컴퓨터로 프로그래밍하여 자동 제어하였다.

III. AlGaAs/GaAs HBT의 신뢰도 평가

사용된 AlGaAs/GaAs HBT는 (100) 절연 GaAs 기판 위에 MOCVD로 에피층을 성장시킨 다음, mesa 식각 공정과 자기정렬 공정으로 제작한 단일 에미터 소자이다. 에미터 cap층인 n-InGaAs는 H₃PO₄:H₂O₂:H₂O

로 습식 식각하였고, n-GaAs는 CCl_2F_2 를 사용하여 RIE로 식각하였다. CCl_2F_2 를 사용한 RIE는 n-GaAs만 식각하고, 에미터인 AlGaAs는 식각하지 않는다. AlGaAs 에미터는 NH_4OH 로 식각하며, RIE에 의해 생긴 방향성으로 언더컷이 생긴다. 에미터 언더컷을 이용하여 베이스 금속을 자기정렬 공정으로 제작할 수 있었고, 외부 표면을 질화막으로 포장하였다.

그림 1은 이렇게 제작한 AlGaAs/GaAs HBT 소자를 $T=400K(127^\circ C)$ 에서 콜렉터 전류 1mA로 20시간동안 스트레스를 인가한 후의 Gummel 도표를 나타낸 것이다. 실험 결과 베이스 전류가 스트레스를 인가함에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 전류이득 열화의 활성화 에너지는 $E_A=0.15eV$ 와 $140^\circ C$ 에서의 평균실패시간 30시간으로 아주 작은 값을 나타냈다.

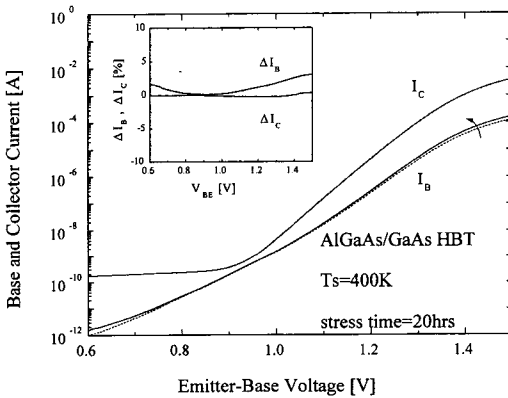


그림 1. AlGaAs/GaAs HBT의 스트레스 인가전(점선)과 후(실선)의 Gummel 도표

Fig. 1. The Gummel plots for pre-stress (dash line) and post-stress (straight line) of AlGaAs/GaAs HBT.

베이스 전류 증가의 원인으로는 이상계수가 '1'에 가까워지는 것과 에미터 둘레 길이가 증가할수록 전류 변화가 큰 것으로부터 외부 베이스 표면과 이를 포장하고 있는 실리콘 질화막 사이의 재결합 상태에 의한 재결합 전류의 증가 때문으로 추정되며^[6], 이는 그림 2의 MEDICI 시뮬레이션 결과와도 일치한다. 자기정렬 AlGaAs/GaAs HBT의 가속수명 실험의 자세한 결과는 참고문헌 [6]을 참고바란다.

이러한 문제점의 개선방안으로 Wu와 Lee는 외부 베이스 표면에 큰 에너지 갭을 갖는 에미터 ledge를 포장하는 방안을 제시하였으며^[7], 에미터 ledge 제작을 위해 AlGaAs 에미터를 에칭할 때 AlGaAs(두께 1800Å)

의 일부를 남기고, 질화막으로 포장한 후 제작해야될 ledge 길이(0.2 μm 이상)만큼 질화막을 에칭한 다음, 베이스 금속이 들어갈 부분을 자기정렬 방식으로 에칭하였다. 이렇게 외부 베이스 표면을 AlGaAs 에미터로 포장하는 방식의 자기정렬 ledge 공정으로 제작하였으나, AlGaAs와 GaAs를 선택적으로 식각하는 식각용액이 아직 개발되지 않아 ledge의 두께와 길이를 조절하기 위해 이미 조사되어진 식각율을 바탕으로 시간적으로 제어할 수밖에 없어, 공정상의 불편함은 물론 제작된 소자에 있어서도 균일성을 확보하기 어려운 상태이다. 따라서, 본 논문에서는 GaAs 베이스와 선택적 식각이 가능한 InGaP를 에미터 재료로 사용하여 신뢰도 검사를 수행하였다.

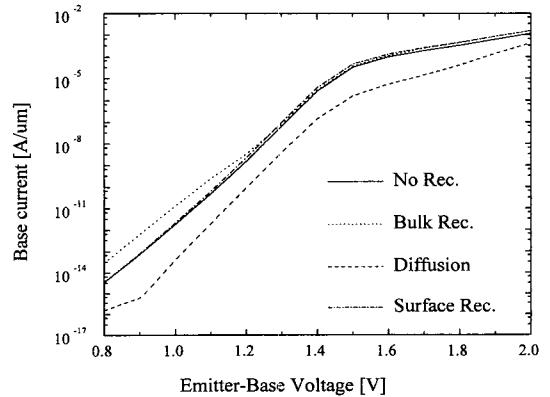


그림 2. 재결합과 베이스 도펀트의 확산이 베이스 전류에 미치는 영향을 시뮬레이션한 결과

Fig. 2. The MEDICI simulation result of IB vs IBE with respect to the various de-gradation origins.

IV. InGaP/GaAs HBT의 신뢰도 개선

실험에 사용된 InGaP/GaAs HBT는 (100) 절연 GaAs 기판 위에 그림 3과 같이 MOCVD로 에피층을 성장시켜, 메사 식각과 비자기정렬 공정으로 제작하였다. n-InGaAs 에미터 캡층은 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ 로 습식 식각하였고, n-GaAs는 CCl_2F_2 를 사용하여 RIE로 식각하였다. 비자기정렬 공정을 거쳐 InGaP 에미터를 선택적 식각이 가능한 식각용액인 HCl로 식각함으로써 에미터 ledge를 제작하였고, 제작된 ledge의 길이와 폭은 각각 1.5 μm 와 500Å이다. 에미터 면적은 $6 \times 20 \mu m^2$ 이다.

그림 4는 ledge 구조로 제작된 InGaP/GaAs HBT를 $T=553K$ 에서 콜렉터 전류 24mA로 168시간동안 스트레

스를 인가한 후의 Gummel 도표 변화를 보인 것으로, 비교적 고온에서 오랜 시간동안 스트레스를 인가했음에도 불구하고 $V_{BE}=0.8V$ 에서 $1.2V$ 사이에서의 전류변화가 거의 없으며, 주로 낮은 전압과 높은 전압에서 전류변화가 나타남을 알 수 있다.

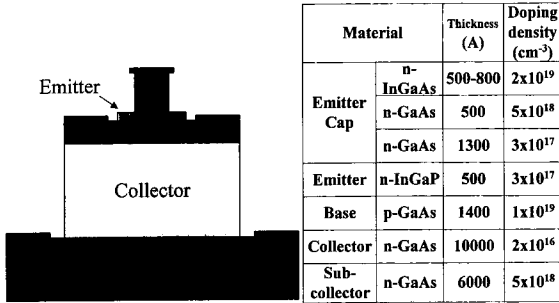


그림 3. 비자기정렬 공정으로 제작된 InGaP/GaAs ledge HBT의 구조
Fig. 3. The cross section of the nonself-aligned InGaP/GaAs ledge HBT.

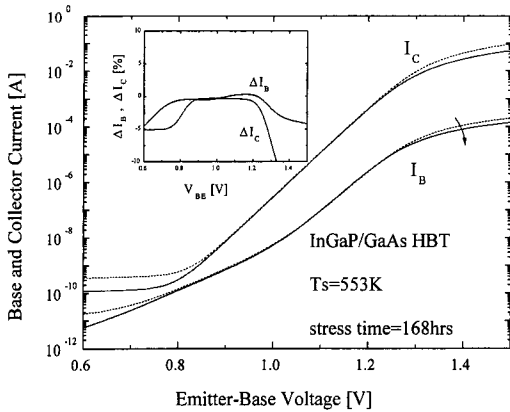


그림 4. InGaP/GaAs HBT의 스트레스 인가전(점선)과 후(실선)의 Gummel 도표
Fig. 4. The Gummel plots for pre-stress (dash lines) and post-stress (straight lines) of InGaP/GaAs HBT.

그림 1의 AlGaAs/GaAs HBT와 그림 4의 InGaP/GaAs HBT의 열화형태를 비교해 볼 때 가장 큰 차이 점은 AlGaAs/GaAs HBT의 경우 스트레스를 인가함에 따라 베이스 전류가 증가하는 반면, InGaP/GaAs HBT의 경우 베이스 전류가 감소한다는 것이다. 이러한 열화 경향은 그림 2의 MEDICI 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 GaAs 베이스 도펀트인 C가 에미터로 확산된 것으로 추정되며, 확산된 C로 인해 비교적 큰 에

너지 갭을 가지는 에미터에서 pn 접합이 형성되고, 내부전위가 증가하여 베이스와 콜렉터 전류가 감소하게 된다^[13]. 또한 낮은 전압에서는 에미터의 에너지 갭이 크기 때문에 에미터 내부에 형성되는 공간전하영역으로 정공의 주입이 감소하므로 공간전하영역 내부의 재결합 전류는 감소하게 되어 이상계수는 553K의 경우 5.4에서 2.7로 감소하였다. 이러한 결과는 Zhang *et al.*의 시뮬레이션 결과와도 일치한다^[15]. 그리고 그림 5에서 보는 바와 같이 I_C-V_{CE} 출력 특성에서 나타나는 offset 전압은 $V_{off}=0.085V$ 로서 스트레스에 대하여 변화가 거의 없어 에미터와 베이스간의 이종접합의 경계면이 매우 안정하다는 것을 알 수 있다^[16].

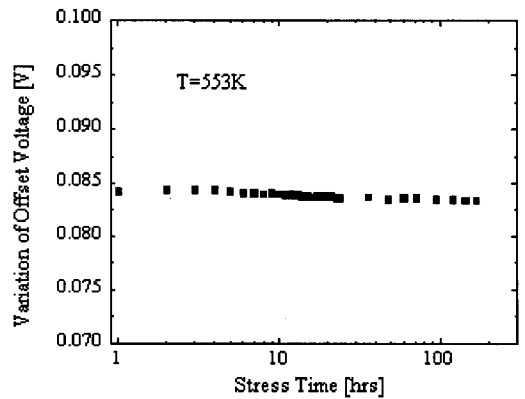
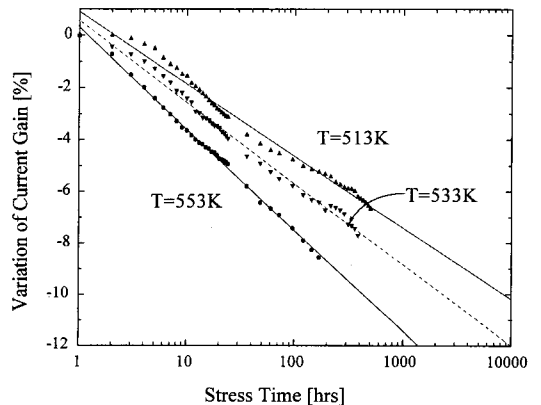


그림 5. I_C-V_{CE} 특성 곡선에서의 offset 전압
Fig. 5. The variation of offset voltage in I_C-V_{CE} characteristics.

그림 6a는 513K, 533K, 553K에서 스트레스 인가 시간에 따른 전류이득의 변화를 나타낸 것이다.



(a)

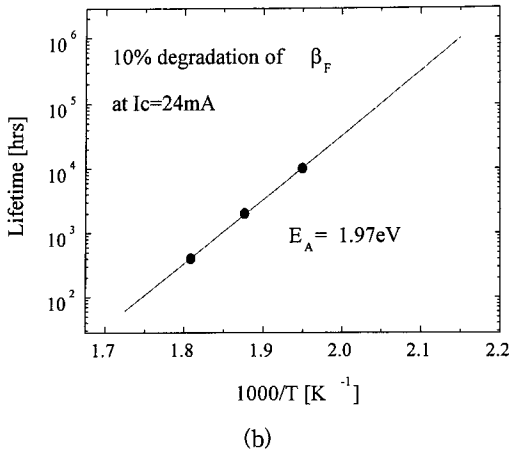


그림 6. (a) 전류이득의 열화 (b) Arrhenius 도표

Fig. 6. (a) The variation of $\Delta \beta_F$ at $I_C=24\text{mA}$ with respect to the stress time and (b) Arrhenius plot.

인가한 콜렉터 전류는 24mA이고, 513K에서는 456시간, 533K에서는 384시간, 553K에서는 168시간동안 측정하였고, 스트레스를 인가하기 전의 전류이득에 비해 각각 6%, 8%, 10%가 감소하였다. 전류이득이 10% 감소하는 스트레스 시간을 추출하여 그림 6b와 같이 Arrhenius 도표로부터 활성화 에너지 1.97eV를 얻을 수 있었으며, 140°C에서 평균실패시간(MTTF) 4.8×10^8 시간을 구할 수 있었다. 이 값은 MILS인 140°C에서 10^6 시간을 충분히 만족한다. 또한, 본 실험에서 측정된 활성화 에너지 1.97eV는 AlGaAs/GaAs HBT의 0.45eV ~ 0.89eV^[11,12]와 Bahl *et al.*의 0.64eV^[13]에 비해 매우 큰 값이며, Takahashi *et al.*이 측정한 $2.0 \pm 0.2\text{eV}$ 와 거의 일치하는 값이다^[14].

이러한 신뢰도 개선의 이유로는 외부 베이스 표면을 InGaP 에미터로 포장함으로써, mesa 구조 AlGaAs/GaAs HBT에서의 주된 열화 원인이었던 외부 베이스 표면에서의 표면 재결합 전류의 영향을 크게 줄일 수 있었기 때문이다.

V. 결론

mesa 구조를 가진 AlGaAs/GaAs HBT의 열화 메커니즘은 외부 베이스 표면과 이를 둘러싸고 있는 질화막 사이의 표면상태에 의한 표면 재결합 전류의 증가가 그 원인으로 나타났으며, 이를 개선하기 위해 에미터 ledge 구조로 소자를 제작하였으나, AlGaAs와 GaAs를 선택적으로 식각할 수 없어 소자의 균일성 확

보가 어려웠다.

선택적 식각은 물론 여러 가지 장점을 지닌 InGaP을 에미터로 사용하여 비자기정렬 ledge 공정으로 InGaP/GaAs HBT를 제작하였고, 513K, 533K, 553K에서 콜렉터 전류 24mA로 스트레스를 인가하여 전류이득이 10% 감소하는 시간을 각각 400시간, 2000시간, 10000시간을 구하였다. 이를 이용하여 Arrhenius 도표로부터 활성화 에너지 $E_A=1.97\text{eV}$, 140°C에서 평균실패시간 $MTTF=4.8 \times 10^8$ 시간을 얻을 수 있었다.

이러한 신뢰도 개선은 InGaP ledge 에미터를 사용하여 베이스 표면 재결합 상태를 현저히 감소시킨 것과 HCl계 식각용액을 이용하여 InGaP 에미터 ledge를 안정적으로 제작할 수 있었기 때문이다.

참고 문헌

- [1] O. Nakajima, H. Ito and K. Nagata, "Current induced degradation of Be-doped AlGaAs/GaAs HBT's and its suppression by Zn diffusion into extrinsic base layer," 1990 Tech. Dig. IEDM, p. 673, 1990.
- [2] Paul E. Dodd, Theresa B. Stellwag, Michael R. Melloch and Mark S. Lundstrom, "Surface and perimeter recombination in GaAs diodes: and experimental and theoretical investigation," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 38, no. 6, p. 1253, 1991.
- [3] S. Adachi and S. Yamahata, "Thermal conversion of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers grown by molecular beam epitaxy," Appl. Phys. Lett., vol. 51, p. 1265, 1987.
- [4] C. Canali, F. Castaldo, f. Fantini, D. Ogliari, L. Umena and E. Zanoni, "Gate mentalization "sinking" into the active channel in Ti/W/Au metalized power MESFET's," IEEE Electron Device Letters, vol. ELD-7, p. 185, 1996.
- [5] G. W. Wang, R. L. Pierson, P. M. Asbeck, K. C. Wang, N. L. Wang, R. Nubling, M. F. Chang, S. K. Shastry, D. S. Hill and J. P. Salerno, "High-performance MOCVD grown AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors with carbon-doped base," IEEE Electron Device Letters, vol. 12, p.

- 347, 1991.
- [6] Duk-Young Kim, Jea-Hong Park and Chung-Kun Song, "Degradation of AlGaAs/GaAs HBT due to the constant current stress," 제4회 한국 반도체 학술대회, p. 95-96, 1997
- [7] Chung-Cheng Wu and Si-Chen Lee, "Emitter composition and geometry related surface recombination current of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors," J. Appl. Phys., vol. 72, no. 11, pp. 5483-5488, 1992.
- [8] William Liu, S.-K. Fan, T. Henderson and D. Davito, "Temperature dependences of current gains in GaInP/GaAs and AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistor," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 40, no. 7, p. 1351-1352, 1993.
- [9] William Liu, E. Beam, T. Henerson, S.-K. Fan, "Extrinsic Base Surface Passivation in GaInP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors," IEEE Electron Device Letters, vol. 14, no. 6, p. 301-303, 1993.
- [10] William Liu, S.-K. Fan, "Near-Ideal I-V Characteristics of GaInP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors," IEEE Electron Device Letters, vol. 13, no. 10, p. 510-512, 1992.
- [11] K. Mochizuki, K. Hirata and H. Uchiyama, "Reliability study of C-doped AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors with half- micron-wide emitters," Jpn. J. Appl. Phys, vol. 35, part1, no. 10, pp. 5242-5245, 1996.
- [12] O. Ueda, A. Kawano. T. Takahashi, T. Tomioka, T. Fujii and S. Sasa, "Current status of Reliability of InGaP/GaAs HBTs," Solid-State Electronics, vol. 41, no. 10, pp. 1605-1610, 1997.
- [13] Sandeep R. Bahl, Lovell H. Camnitz, Denny Houg and Marek Mierzwinski, "Reliability investigation of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors," IEEE Electron Device Letters, vol. 17, no. 9, pp. 446-448, 1996.
- [14] T. Takahashi, S. Sasa, A. Kawano. T. Iwai and T. Fujii, "High-reliability InGaP/GaAs HBTs fabricated by self-aligned process," IEDM 94, pp. 191-194, 1994.
- [15] Q. M. Zhang, Gen-Lin Tan, W. T. Moore and J. M. Zu, "Effects of displaced p-n junction of heterojunction bipolar transistors," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 39, no. 11, pp. 2430-2437, 1992.
- [16] S. Mohaherzadeh, C. R. Selvakumar, J. P. Noel and D. C. Houghton, "Early-voltage degradation in heterostructure bipolar transistors due to interface states," Solid-State Electronics, vol. 38, no. 1, pp. 131-133, 1995.

저 자 소 개



崔 繁 在(學生會員)

1973년 2월 12일생. 1998년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 ~ 현재 동아대학교 전자공학과 대학원 석사과정

宋 政 根(正會員) 第 35卷 D編 第 3號 參照

1957년 10월 14일생. 1980년 3월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1984년 2월 서울대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1992년 2월 University of Cincinnati Electrical & Engineering 졸업(공학박사). 1992년 ~ 현재 동아대학교 공과대학 전자공학과 조교수. 주관심분야는 고속소자, 하드웨어 신경망구현, 유기물 반도체소자 등임

金 得 永(正會員) 第 33卷 D編 第 3號 參照