

에미터 구조변화에 따른 AlGaAs/GaAs HBT의 고주파 특성

김일호

충주대학교 재료공학과
(2000년 1월 24일 접수)

Emitter structure dependence of the high frequency performance of AlGaAs/GaAs HBTs

Il-Ho Kim

Dept. of Mat. Sci. and Eng., Chungju National University, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea
(Received January 24, 2000)

요 약 - AlGaAs/GaAs HBT의 동작특성에 미치는 에미터 구조의 영향을 조사하였다. 에미터의 크기 변화에 의해 차단주파수와 최대공진주파수가 변화하였으며, 이는 에미터 구조에 따라 저항과 접합용량이 변하기 때문이다. 또한 에미터의 주변길이와 접합면적도 HBT의 고주파 특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Abstract - Emitter structure effects on the characteristics of AlGaAs/GaAs HBTs have been investigated. Cut-off frequency and maximum oscillation frequency were changed with emitter dimension, and it was attributed to the variation of resistance and junction capacitance with emitter structure. Emitter perimeter and junction area also affected the high frequency performance of HBTs.

1. 서 론

고도의 정보통신 사회를 실현하기 위하여, 원격 다자간 화상회의, 인터넷 폰, 온라인 통신 게임, 다채널 주문형 비디오 서비스 등 대용량의 멀티미디어 정보를 초고속으로 전달할 필요성이 최근 급속히 증대되고 있으며, 이와 관련하여 초고속 광대역 종합정보통신망(B-ISDN: broadband-integrated services digital network)을 구현하기 위한 많은 연구와 투자가 이루어지고 있다 [1-3]. 초고속 대용량 광통신 시스템의 선도적인 개발을 위해서는 시스템을 구성하는 핵심 초고속 전자소자의 개발이 매우 중요하다. 이를 위해 다양한 소자가 응용되고 있지만, 에미터와 베이스간의 에너지 밴드 차이를 이용하여 운반자의 주입효과를 높이고자 개발된 HBT(heterojunction bipolar transistor)는 실리콘 BJT(bipolar junction transistor)와 비교하여 우수한 고속·고주파 특성, 대전류 구동력, 큰 파괴전압 및 균일한 구동전압 등의 장점을 갖고 있어 초고속 광통신을 비롯한 각종 통신분야에 활발히 응용되고 있다. 또한

MESFET(metalsemiconductor field effect transistor)이나 HEMT(high electron mobility transistor)같은 수평구조의 화합물 반도체 소자가 수직구조인 HBT와 동등한 고주파 특성을 갖기 위해서는 0.1~0.15 μm 정도의 게이트 길이를 구현해야 하지만, HBT는 1~2 μm 정도의 에미터 폭으로도 우수한 특성을 기대할 수 있기 때문에, 포토리소그래피(photolithography) 공정에 대한 의존성이 적다. HBT는 이종접합의 종류에 따라 Si/SiGe, AlGaAs/GaAs, InGaP/GaAs, InAlAs/InGaAs, InP/InGaAs 등으로 분류되고, 이 중 AlGaAs/GaAs HBT는 가장 성숙된 에피성장과 공정기술이 확보되어 있어 초고주파 광통신용 고속 IC로서 가장 많이 이용되고 있다 [4-6].

트랜지스터의 고주파 특성을 나타내는 대표적인 특성 변수는 차단주파수(cutoff frequency, f_T)와 최대공진주파수(maximum oscillation frequency, f_{max})로서 이를 좌우하는 성분은 저항, 접합용량(junction capacitance) 및 이와 관련된 에미터-컬렉터 통과시간이다. HBT의 고주파 특성을 향상시키기 위해 에피층의 두께 및

도핑농도 조절에 의한 에피 구조의 최적화와 더불어 에미터 크기 변화, 에미터-베이스 간격, 기생저항과 접합 용량, 표면 재결합 면적 등을 최소화하려는 많은 연구가 진행 중이다. M. E. Kim 등 [7]과 G. B. Gao 등 [8]은 에미터-베이스 간격이 일정하고 에미터의 폭이 감소하면 컬렉터-베이스 접합용량의 감소로 최대공진주파수가 향상된다고 발표하였고, K. Nagata 등 [9]은 에미터의 폭이 일정하고 길이가 증가할수록, 즉 주변길이에 대한 면적의 비가 클수록 최대공진주파수의 향상에 비해 차단주파수의 향상이 더욱 크다고 발표한 바 있다. 그러나 이와 같은 HBT의 고주파 특성에 미치는 소자 구조의 영향에 관한 정량적인 연구가 많지 않기 때문에, 본 연구에서는 에미터 구조가 AlGaAs/GaAs HBT의 고주파 특성에 미치는 영향을 조사하고자, 에미터의 폭과 길이, 에미터 면적과 주변길이의 비, 에미터 면적과 컬렉터 면적의 비에 따른 고주파 특성의 변화를 측정·분석하였다.

2. AlGaAs/GaAs HBT의 제작

AlGaAs/GaAs HBT를 제작하기 위한 에피층 구조를 표 1에 나타내었다. 직경 3" 반질연성 GaAs 웨이퍼에 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition) 방법으로 에피층을 성장시켰다. 에미터 저항을 낮추기 위하여 실리콘이 고농도로 도핑된 InGaAs 에미터 캡층을 이용하였으며, 소자의 고속 특성에 가장 영향이 큰 베이스는 GaAs층을 700 Å 두께로 성장하고 탄소를 $3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 의 농도로 도핑하였다.

그림 1은 AlGaAs/GaAs HBT를 제작하기 위한 전체 공정 흐름도를 나타낸 것이다. HBT를 제작하는 공

표 1. Epitaxial layer structure of AlGaAs/GaAs HBT

epitaxial layer	material	Al or In	thickness (Å)	dopant (cm ⁻³)
cap III	n ⁺ -InGaAs	0.5	400	1×10^{19} Si
cap II	n ⁺ -InGaAs	0.5→0	400	1×10^{19} Si
cap I	n ⁺ -GaAs	0	1000	3.7×10^{18} Si
emitter II	n-AlGaAs	0→0.3	500	5×10^{17} Si
emitter I	n-AlGaAs	0.3	1500	2×10^{17} Si
base	p ⁺ -GaAs	0	700	3×10^{19} Si
collector	n-GaAs	0	4000	2×10^{16} Si
subcollector	n ⁺ -GaAs	0	5000	4×10^{18} Si
buffer II	i-AlGaAs	0.3	3000	undoped
buffer I	i-GaAs	0	3000	undoped
substrate	s.i.-GaAs	0	6×10^6	undoped

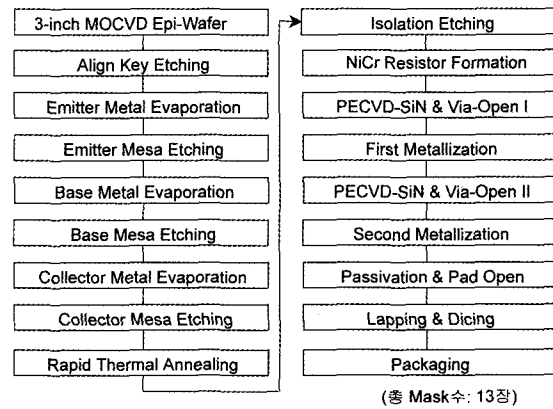


그림 1. Experimental flow chart for the fabrication of AlGaAs/GaAs HBTs.

정 중 포토리소그라피 공정은 0.1 μm 이내의 정렬오차를 갖는 i-line stepper를 사용하였으며, 에미터 메사식각(mesa etching)을 위해 H₃PO₄:H₂O₂:H₂O = 4:1:90과

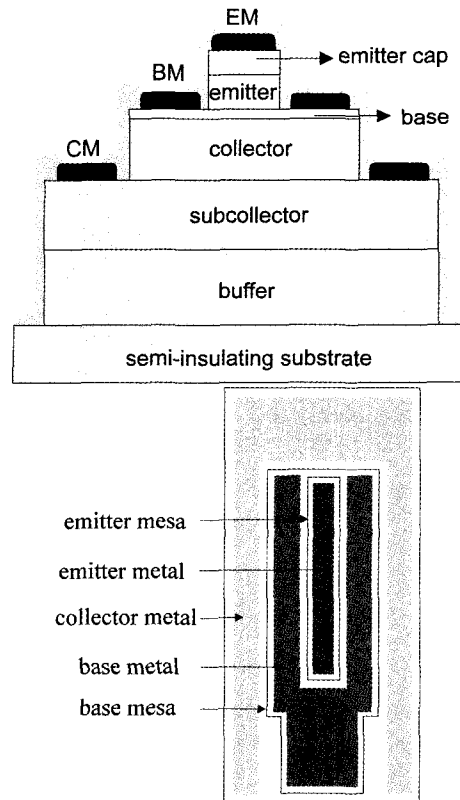


그림 2. Schematic cross-sectional and top views of AlGaAs/GaAs HBT.

NH₄OH:H₂O₂:H₂O = 20:7:973 용액을 사용하였고, 베이스 mesa식각과 소자 분리식각(isolation etching)을 위해 H₃PO₄:H₂O₂:H₂O = 4:1:50 용액을 이용하였다. 에미터와 베이스 전극은 전자빔증착기로 형성한 Ti/Pt/Au 이었고, 컬렉터 전극은 열증착기로 형성한 Ni/Ge/Au/Ti/Au이었다. 오믹 전극의 형성을 위해 350°C, H₂/N₂ 혼합가스 분위기에서 10초 동안 급속 열처리를 하였다. 소자의 보호 및 전기적 절연을 위해 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)로 SiN 막을 250°C에서 5000 Å의 두께로 웨이퍼 전면에 도포하였고, 공정조건으로서 RF 전원 50 W, 압력 700 mTorr, 가스유량 SiH₄/NH₃/He/Ne = 70/4/700/300SCCM을 사용하였다. 비아(via) 형성을 위해 C₂F₆ 플라즈마를 사용한 MERIE(magnetically enhanced reactive ion etching)로 SiN 절연층을 식각하였고, 전자빔증착기로 Ti(500 Å)/Au(4500 Å)를 패드(pad) 급속으로 사용하였다. 최종적으로 passivation을 위하여 SiN막을 250°C에 5000 Å의 두께로 웨이퍼 전면에 도포하고 전식식각에 의해 패드를 오픈하였다. 이와 같이 제작된 AlGaAs/GaAs HBT의 수직 단면도와 평면도를 그림 2에 나타내었다.

3. 에미터 구조 변화에 따른 HBT의 특성

표 2와 같이 에미터의 폭과 길이 및 컬렉터 접촉 면적을 달리 하여 제작한 AlGaAs/GaAs HBT에 대해 Cascade Microtech Probe Station과 HP8510B Network Analyzer를 이용하여 차단주파수(f_T)와 최대공진주파수(f_{max})를 측정하였다. 차단주파수는 전류이득(current gain)이 1이 되는 주파수로서 식 1과 같이 표현되며,

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_e C_{bc} + \tau_b + \tau_c + (r_e + R_e + R_c)C_{bc}} \quad (1)$$

여기서 τ_{ec} 는 에미터-컬렉터 통과시간으로서, 에미터 고유미분저항(r_e), 에미터-베이스 접합용량(C_{bc}), 베이스 통과시간(τ_b), 컬렉터 충전시간(τ_c), 에미터 저항

(R_e), 컬렉터 저항(R_c) 및 베이스-컬렉터 접합용량(C_{bc})과 복합적인 관계가 있다. 한편, 최대공진주파수는 전력이득(power gain)이 1이 되는 주파수로서 식 2와 같이 표현되며,

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_b C_{bc}}} \quad (2)$$

여기서 R_b 는 베이스 저항을 나타낸다.

에미터의 구조(크기)가 변하면 에미터 저항(에미터 크기에 반비례)은 물론이고, 에미터-베이스 접합용량(에미터 크기에 비례)도 함께 변하기 때문에 HBT의 고주파 특성에도 영향을 미친다. 또한 소자의 집적도 측면에서 에미터 크기가 변하면 베이스와 컬렉터의 자체 면적변화에 따른 저항변화와, 접촉면적 변화에 따른 접합용량의 변화도 기대할 수 있다. 식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 차단주파수는 각 저항 및 접합용량과 관련이 있고, 최대공진주파수는 차단주파수와도 관련이 있기 때문에, 고주파 특성을 향상시키기 위해서는 소자의 저항과 접합용량을 감소시켜야 한다.

그림 3은 에미터-컬렉터 전압(V_{ce})이 1.5 V일 때, 컬렉터 전류(I_c) 변화에 따른 차단주파수와 최대공진주파수의 변화를 측정된 것이다. 컬렉터 전류가 증가함에 따라 차단주파수와 최대공진주파수 모두 증가하였으며, 컬렉터 전류가 더욱 증가하면 HBT의 주파수가 감소하였다. 또한 에미터 폭의 변화에 따른 고주파 특성, 에미터 길이와 컬렉터 접촉면적에 따른 고주파 특성을 조사함에 의해, 에미터의 크기가 HBT의 고주파 특성에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

본 실험에서 제작한 모든 HBT의 차단주파수와 최대공진주파수가 최대값에 도달하지 않는 범위에서, 컬렉터 전류가 4 mA로 일정할 때 에미터의 폭(W_c) 변화에 따른 차단주파수와 최대공진주파수를 측정된 결과, 에미터의 폭이 감소할수록 어느 최대값에 도달한 후 약간 감소하는 경향을 보였다(그림 4). 에미터의 폭이 20 μ m에서 3 μ m로 감소할수록 차단주파수와 최대공진주파수가

표 2. Dimensions of AlGaAs/GaAs HBTs

Device name	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Emitter width W_e (μ m)	1.9	1.6	1.4	2.4	1.9	1.6	1.4	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Emitter length L_e (μ m)	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	12.9	7.4	5.4	10.4	10.4
Emitter junction area A_e (mm ²)	19.8	16.6	14.6	25.0	19.8	16.6	14.6	20.6	11.8	8.6	16.6	16.6
Emitter perimeter P_e (μ m)	24.6	24.0	23.6	25.6	24.6	24.0	23.6	29.0	18.0	14.0	24.0	24.0
Collector junction area A_c (mm ²)	120.0	101.6	89.0	169.5	108.3	93.2	89.7	118.2	84.8	73.6	83.4	73.0

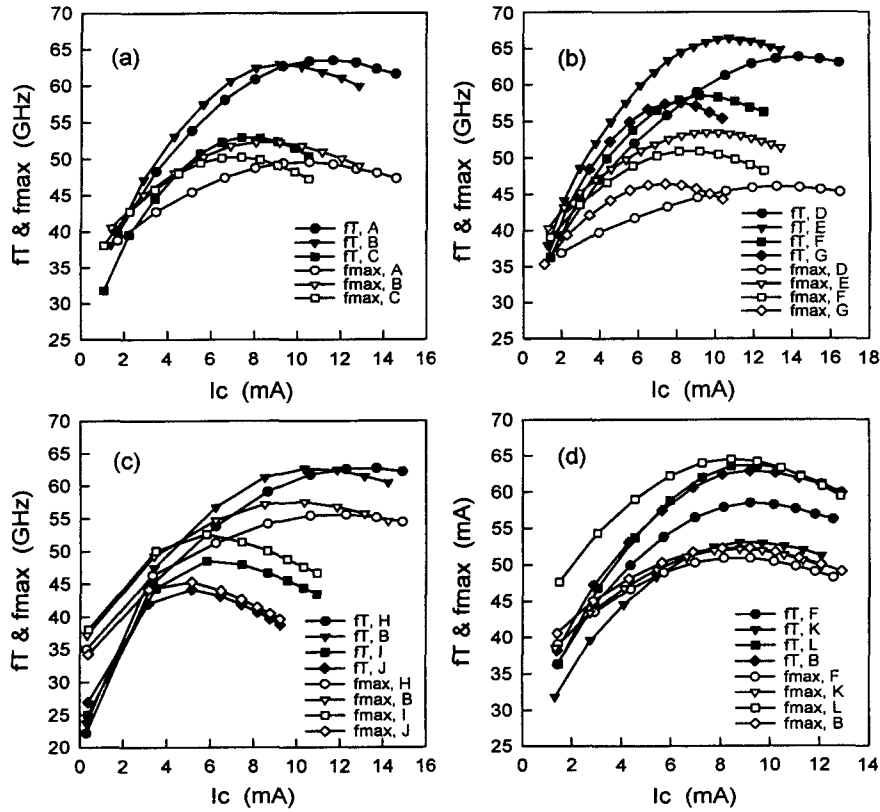


그림 3. Variation of cutoff and maximum oscillation frequencies with collector current ($V_{ce} = 1.5$ V): (a), (b) W_c variation, (c) L_c variation, and (d) A_e/A_c variation.

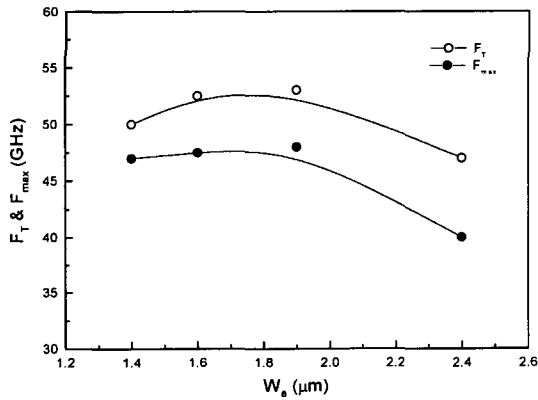


그림 4. Variation of cutoff and maximum oscillation frequencies with emitter width ($V_{ce} = 1.5$ V, $I_c = 4$ mA, $L_c = 10.4$ μ m).

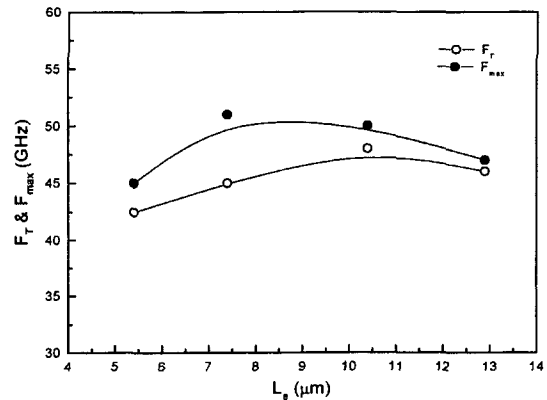


그림 5. Variation of cutoff and maximum oscillation frequencies with emitter length ($V_{ce} = 1.5$ V, $I_c = 4$ mA, $W_c = 1.6$ μ m).

증가한다고 보고한 박 등 [10]의 연구결과와 비교하면, 그림 4에서 에미터의 폭이 1.6 μ m 이하로 감소하여도 차단주파수와 최대공진주파수가 더욱 증가할 것이라 기대되나, 오히려 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 면

적에 대한 주변길이의 증가로 인한 기생성분의 증가가 고주파 특성의 저하에 큰 기여를 하였는지, 또는 i-line stepper의 정렬오차에 따른 제조 공정상의 문제 때문으로 판단된다.

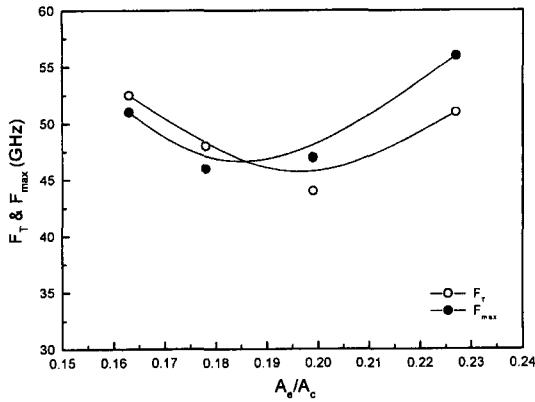


그림 6. Variation of cutoff and maximum oscillation frequencies with the ratio of emitter-base junction area to collector-base junction area ($V_{ce} = 1.5$ V, $I_c = 4$ mA).

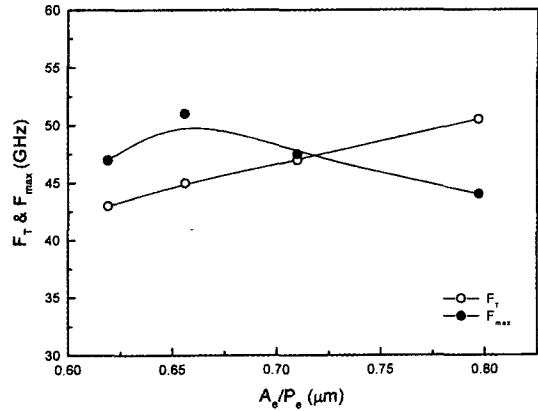


그림 7. Variation of cutoff and maximum oscillation frequencies with the ratio of emitter area to emitter perimeter ($V_{ce} = 1.5$ V, $I_c = 4$ mA).

한편 에미터의 길이가 증가함에 따라 차단주파수는 증가하여 포화되고, 최대공진주파수는 증가 후 감소하는 경향을 나타내었다(그림 5). 이는 에미터의 면적이 증가함에 따라 저항의 감소와 접합용량의 증가가 서로 복합적으로 작용하기 때문이다. 이러한 양상은 에미터-베이스 접합면적(A_e)을 일정하게 하고 컬렉터-베이스 접합면적(A_c)을 변화시킨 경우에서도 나타났다(그림 6). 이는 HBT의 고주파 특성이 에미터-베이스의 접합용량 뿐만 아니라 컬렉터-베이스의 접합용량에도 크게 좌우된다는 것을 의미한다.

그림 7은 에미터 주변길이(P_e)에 대한 면적의 비를 변화시킨 경우로, 에미터의 면적이 일정할 때 주변길이가 작을수록, 즉 A_e/P_e 가 증가할수록 차단주파수는 증가하지만, 최대공진주파수는 증가 후 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 면적 효과 외에 주변길이의 효과에 의한 기생성분이 큰 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

에미터의 구조변화가 HBT의 특성에 미치는 영향을 조사한 결과, 에미터의 폭이 감소할수록 또한 에미터의 길이가 증가할수록 저항의 변화와 접합 용량의 변화가 상호 작용하여 차단주파수와 최대공진주파수가 어떤 최대값에 도달한 후 감소하는 경향을 보였다. 또한 에미터의 주변길이와 컬렉터-베이스 접합면적도 HBT의 고주파 특성에 큰 영향을 미쳤다. 따라서 HBT 설계시

에미터의 면적뿐만 아니라 주변길이 및 접합면적도 함께 고려하여야 한다.

참고문헌

- [1] H. Onaka, H. Miyata, G. Ishikawa, K. Otsuka, H. Ooi, Y. Kai, S. Kinoshita, M. Seino, H. Nishimoto and T. Chikama, OFC PD19 (1996).
- [2] J. Akagi, Y. Kuriyama, M. Asaka, T. Sugiyama, N. Iizuka, K. Tsuda and M. Obara, IEEE-ISSCC, Digest of Technical Papers, TP10.1 168 (1994).
- [3] M. Nakamura, Y. Imai, E. Sano, Y. Yamaguchi and O. Nakajima, IEEE Solid-State Circuits **27**, 1421 (1992).
- [4] K. Hohkawa, S. Matsuoka, K. Hagimoto and K. Nakagawa, IEICE Trans. Electron. **E76-C**, 68 (1993).
- [5] N. Nagano, T. Suzuki, M. Soda, K. Kasahara and K. Honjo, IEICE Trans. Electron. **E76-C**, 883 (1993).
- [6] K. Runge, D. Daniel, R. D. Standley, J. L. Gimlett, R. B. Nubling, R. L. Pierson, S. M. Beccue, K. C. Wang, N. H. Sheng, M. C. F. Chang, D. M. Chen and P. M. Asbeck, IEEE Solid-State Circuits **27**, 1332 (1992).
- [7] M. E. Kim, J. B. Camou, G. M. Gorman, A. K. Oki and D. K. Umemoto, IEEE Trans. Microwave Theory & Techniques **37**, 1286 (1989).
- [8] G.-B. Gao, D. J. Roulston and H. Morkoel, IEEE Trans. Electron Devices **37**, 1199 (1990).
- [9] K. Nagata, O. Nakajima, T. Nittono and Y. Yamaguchi, IEEE Trans. Electron. Devices **39**, 1786 (1992).
- [10] 박성호, 최인훈, 최성우, 박문평, 김영석, 이재진, 박철순, 박형무, 전자공학회논문지 **32**, A2 57 (1995).