

Al_xGa_{1-x}As-GaAs 이중접합에서 deep donor level 이 interface electron density 에 미치는 영향

○ 남 승 현, 정 학 기, 이 문 기, 김 봉 열
연 세 대 학 교 전 자 공 학 과

Effect of the Deep Donor Level on the Interface Electron Density

Seoung Hyun Nam, Hak Kee Jung, Moon Key Lee, Bong Ryul Kim

Dept. of Electronic Engineering, Yonsei University

ABSTRACT

This paper describes a model to calculate the equilibrium electron density of MODFET at the interface that takes into account the simultaneous shallow and deep level in the Al-GaAs layer.

In the present study we have made an investigation of the interface electron density with different values of the AlGaAs doping density and spacer layer thickness, considering simultaneously two donor levels. In this case, the ratio of the shallow to the deep donor concentration is considered. From the comparison with early experimental results we could find the deep level and that the deep donor concentration is about 50x with the Al mole fraction $X \sim 0.3$, activation energy $E_d = 65\text{meV}$, temperature 77°K and spacer thickness range $50\text{\AA} \sim 100\text{\AA}$. Also we have investigated the effect of the temperature. As temperature increase, at critical mole fraction X the nature of the donor concentration changes from Γ to L and X .

1. 서 론

초고속 회로에 적합한 device로 High-electron mobility transistor (HEMT. 다른 이름으로 MODFET, TEGFET)는 많은 연구가 활발히 진행중이다.[1], [2]

AlGaAs-GaAs 이중접합 interface에서 형성되는 2DEG (two dimensional electron gas)의 정확한 계산은 Modulation-doped FET(MODFET)를 디자인하고 분석하는데 근본적인 문제가 된다. 가장 정확한 접근방법은 Schrödinger와 Poisson 방정식을 Self-consistently하게 해석하는 것이다. 종래 이런 접근 방법은 AlGaAs layer에서 depletion Approximation 과 GaAs layer에서 triangular potential well approximation을 사용함으로써 I-V 특성 곡선에서 trans-conductance의 감소를 설명할수 없었다.[3]이를 설명할수 있는 deep center (DX center)의 존재를 최근 발견하

여 연구와 검토가 활발하게 진행되고 있다.[4],[5] 본 논문에서 doping density, spacer 층의 두께, Shallow level과 deep level의 donor concentration 비율에 따른 interface에서의 electron density 값을 수치해석적 방법으로 구하고 비교, 고찰하였다.

2. 본 론

1. Deep level의 특성

MODFET에서 I-V특성은 AlGaAs layer에서의 doping concentration과 AlGaAs-GaAs interface에서의 electron density에 크게 영향을 받는다.[6]

종래에는 AlGaAs layer의 모든 dopant가 shallow donor level에 존재하고 모든 Al mole fraction에 대하여 친화력에 의한 전자의 이동에 따라 depletion 영역의 모든 도너는 온도에 관계없이 이온화 한다고 알려져 왔다.[7] 그러나 deep level의 존재가 밝혀지고 온도, Al mole fraction, doping density에 따라 deep level donor concentration이 변화한다. Al mole fraction의 변화에 따른 activation energy E_d 는 multi-valley effective mass 모델로서 이론적 값을 얻을 수 있다.[8]

Al mole fraction x 에 따라 shallow와 deep level의 activation energy E_d 는 변화한다. [8][9]

$x > 0.2$ 경우 activation energy E_d 는 날카롭게 증가하고 deep level의 영향이 커지게 된다. $0.2 < x < 0.4$ 범위에서 deep donor concentration N_{dd} 는 x 에 따라 증가하며 동시에 shallow와 deep donor concentration의 비율은 연속적으로 값이 변화한다. 이러한 현상은 x 값에 따라 conduction band minima Γ, L, X 의 donor concentration이 변화함으로써 생긴다. Γ minima는 shallow level, deep level은 L과 X minima와 관련된다고 볼 수 있다. $x > 0.2$ 경우 L minima가 conduction과정에서 영향이 우세하며 x 가 증가함에 따라 X minima의 영향 때문에 donor level은 L minima와 X minima의 영향을 동시에 받는다. x 가 증가함에 따라

X valley 내의 concentration이 증가하고 Γ valley의 concentration은 줄어들므로써 deep donor concentration은 증가한다. spacer 두께에 따른 interface electron density는 spacer 두께가 증가함으로써 coulomb scattering이 줄어들어 mobility는 증가하지만 electron density는 감소한다.[10]

온도에 따른 영향은 다음과 같다.

0.2 < x < 0.6 에서 electron은 3개의 valley 모두에 존재한다. 온도가 낮아짐에 따라 L valley에 존재하는 electron은 감소하고 반면 x valley에 있는 전자는 mole fraction x값이 증가함에 따라 증가하며 L valley는 감소하나 전체적으로 온도의 감소에 따라 전자는 증가한다.[11]

즉 온도가 증가하면 Γ 와 X valley에 의한 deep level의 영향은 커지게 된다.

2. 계산과정

AlGaAs layer에서의 deep level을 고려하여 interface electron density를 구하기 위해 schrödinger와 poisson 방정식을 이용하여 값을 구하였으며 방법은 이미 발표한 논문에 언급하였다.[12]

여기서 Fermi-Dirac distribution을 사용하였다.

$$n_{dd}(x) = \frac{N_{dd}(x)}{(1 + (1/g_{dd}) \exp(V(x) - E_{dd})/KT)}$$

$n_{dd}(x)$ 는 Ionized deep level concentration

$N_{dd}(x)$ 는 deep level concentration

g_{dd} 는 deep level에서의 degeneracy ($g_{dd} = 2$)

$V(x)$ 는 GaAs layer에서의 potential이며

E_{dd} 는 activation energy이다.

각 conduction band minima는 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$E_d\Gamma = 6\text{meV}, E_{dx} = 65\text{meV}, E_{dL} = 135\text{meV}[11]$$

3. 계산결과 및 고찰

위의 계산과정을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

Al mole fraction $x \sim 0.3$, deep donor의 activation energy E_{dx} 는 65meV, doping density N_d 는 $7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$, AlGaAs layer의 두께 d_l 은 1000Å, 온도 77K, AlGaAs-GaAs interface에서 conduction band discontinuity $\Delta E_c = 0.65 \Delta E_g$ 를[13] 사용하였으며 계산결과는 아래 그림 1과 같다.

그림 1, 2는 interface electron density를 undoped된 AlGaAs 층의 두께 d_l 의 함수로 표시했다. deep donor concentration N_{dd} , shallow donor concentration N_{sd} 라고 할때 deep level과 shallow level의 concentration 비율 K_d 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K_d = N_{dd}/(N_{dd} + N_{sd})$$

그림 1에서 curve A는 $K_d=0$ 즉 모든 도너가 shallow level에 존재하는 경우의 값이며 curve B는 $K_d=0.5$, 즉 shallow level과 deep level의 donor concentration이 각각 50%

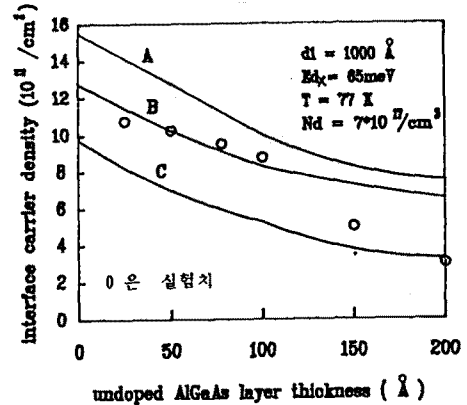


그림 1) 그림 77K에서 spacer layer thickness 변화에 따른 interface carrier density

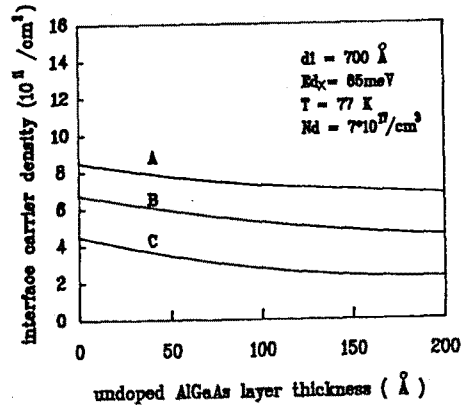


그림 2) 각 donor level capture percentage의 변화에 따른 interface carrier density

차지할 때의 결과이다.

Curve C는 $K_d=1$, 즉 극단의 경우로서 모든 donor가 deep level에 존재할 때의 결과값을 나타낸다. 그림 1에서 이미 발표된 논문의 실험결과와[14] 계산결과를 비교하였다.

그림 1에서 spacer 두께가 50 ~ 100Å 까지 curve B, 즉 deep level의 concentration이 donor concentration의 50% 값을 차지하는 경우의 값과 일치함을 알 수 있다. 100Å 이상에서는 실험치가 curve C에 접근함을 알 수 있다. 이는 d_l 가 증가함에 따라 deep level의 영향이 커짐을 알 수 있다. 그림 2에서 AlGaAs 층의 두께 d_l 이 증가함으로써 interface electron density가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 3은 doping density $6 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ (curve E ~ A) 77° K에서 deep level의 donor concentration이 100% 일때 결과이며 그림 4는 0% 일때 결과이다.

그림 3, 4를 비교하였을때 interface electron density에 끼치는 deep level의 영향이 크다는 것을 볼 수 있다. 그림 3에서 curve A~E 사이의 간격이 그림 4와는 달리 spacer 두께 100Å ~에서 좁혀짐으로서 deep level에 의한 영향은 spacer 층의 두께가 증가하면 감소함을 볼 수 있다.

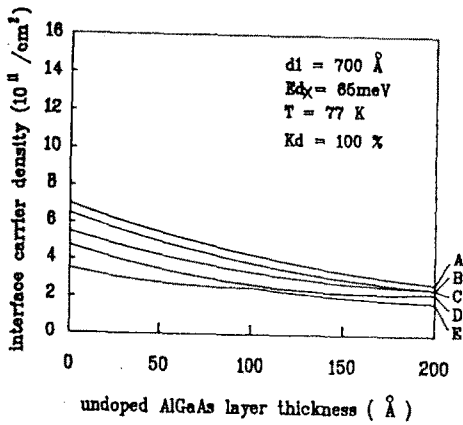


그림3) K_d = 100% 일때 doping concentration의 변화에 따른 interface carrier density

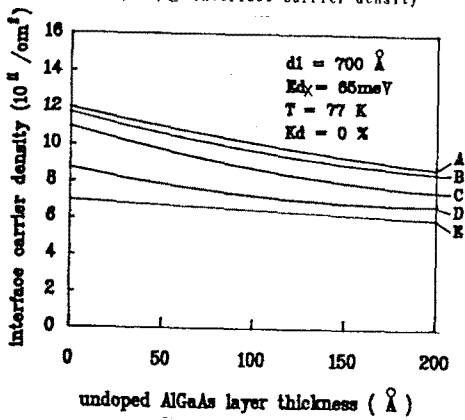


그림4) K_d = 0% 일때 doping concentration의 변화에 따른 interface carrier density

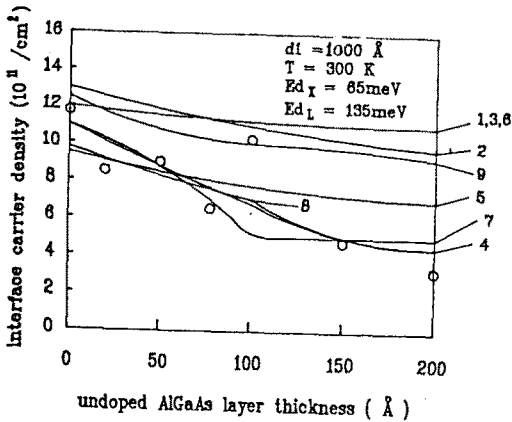


그림5) 300K에서 Ed_r, Ed_x, Ed_L 을 고려한 interface carrier density

표 1은 각 donor level에서 donor concentration의 퍼센트를 표시한 것이다. 그림 5는 $N_d = 7 \times 10^{17} / \text{cm}^3$, 온도 300° K 일때 결과이다. Ed_L 은 온도가 증가함으로써 L valley 에

units : (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ed _r	45	60	55	0	0	50	20	10	30
Ed _L	40	30	35	40	50	40	20	30	30
Ed _x	15	10	10	60	50	10	60	60	40

표 1. 각 donor level에서 donor concentration의 퍼센트

의한 deep level의 영향을 고려한 값이며 Ed_L = 135meV를 사용하였다. 그림 5에서 실험치와 curve 4, 7, 8이 거의 일치함을 알 수 있다. 즉, 온도가 증가함으로써 X와 L valley의 영향이 커짐을 알 수 있다.

그림 5에서 curve 5와 7을 비교하였을때 X valley에 민감함을 알 수 있다. 즉 온도가 올라감으로써 deep level의 영향은 커지게 된다. 또한 그림 1과 그림 5를 비교하였을때 온도가 증가함으로써 300° K 일때 77° K에 비해 interface electron density가 감소함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구로부터 얻은 결과는 AlGaAs layer에서 밀접하게 판계하는 2개의 donor level, 즉 shallow donor와 deep donor level이 존재함을 간접적으로 확인할 수 있었으며 이 두 donor level의 concentration이 $x \sim 0.3$, 77° K에서 약 50% 씩 각각 차지하고 있음을 발견하였다.

또한 doping density가 증가함에 따라 deep level의 영향이 감소함을 보였다. 마지막으로 온도의 영향을 고찰한 결과, 온도가 증가함에 따라 두 deep level의 concentration에 따라 interface electron density가 민감하게 변함을 보였다. 즉 300° K 일때는 77° K 일때보다 X valley와 L valley의 deep donor level에 의한 영향이 증가하여 interface electron density가 감소하였다.

이 연구에서 보듯이 deep-level에 의한 interface electron density의 영향을 상당히 크므로 이에 대한 연구가 좀더 자세히 진행될 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] PAUL M. Solomon and HADIS MORKOC
"Modulation-Doped GaAs/AlGaAs Heterojunction Field Effect Transistor [MODFET], Ultrahigh-Speed Device for Supercomputers"
IEEE Trans. elect. Device, Vol. ED-31, ND-8, August 1984, pp. 1015~1027.
- [2] S. S. Pei, N. J. Shah, R. H. Hendel, C. W. Tu, and R. Dingle "Ultrahigh speed intergrated circuits with selectively doped hetero structure transistors"
IEEE GaAs. IC symp, Oct. 1984.

- [3] R. Fischer, T. J. Drummond, J. Klem, W. Kopp, T. S. Henderson, D. Perrachione, and H. Morkoc, IEEE Trans, Electron Devices ED-31, p. 1028(1984)
- [4] Miyoko oku Watanabe "Doner levels in Si-doped AlGa As Grown by MBE" Japan. Jourual of App. phys. Vol 23, No. 2 Feb 1984 pp. L103~L105.
- [5] D. V. Lang, R. A. Logan and M. Jaros: phys. Rev. B19, 1979, p. 1015.
- [6] Margaret H. Weicer "DC and micro-wave models for AlGaAs/GaAs High Electron Mobility Transistors " IEEE Tran. Elect. Dev, Vol. ED-31, No-12 Dec. 1984 pp. 1854 ~ 1860
- [7] T. J. Drummond, W. Kopp, H. Morkor, and M. Keever. "Transport in modulation doped structur(AlGaAs/ GaAs) and correlations with Monte Carlo calculation " Appl. phys, Lett, Vol 41, pp. 277~279. 1982.
- [8] E. F. schubert and K. Ploog "Shallow and deep donors in direct gap n-type AlGaAs: Si grown by molecular-beam epitaxy " phys. rev. B Vol. 30, No-12, Dec. pp. 7021 ~ 7029.
- [9] J. Yang, L. A. Moudy, and W. I. simpson, Appl. phys. Lett. Vol. 40, p. 244(1982).
- [10] H. L. Storner, A. Pinczuk, A. C. Gossard, and W. Wiegmann "influence of an undoped(AlGa)As spacer on mobility enhancement in GaAs-Al(GaAs) supper lattice's," Appl. phys. lett, Vol 38(9), pp. 691 ~ 693. May 1981.
- [11] Naresh chand, Tim Henderson, W. Ted Masselink, and Russ Fischer "comprehensive analysis of Si-doped AlGaAs(x=0 to 1): theory and experiments " physical review B vol 30, Number 8, Oct. pp. 4481 ~ 4492, 1984.
- [12] 염기수, 정학기, 이문기, 김봉열 "수치해석을 이용한 AlGaAs/GaAs 이중접합에서 전자밀도분석" 전기재료 반도체 및 CAD 학술대회 논문집 1987. 5월 pp.118 ~ 121.
- [13] H. Okumura et. al., "Determination of the conduction-band discontinuities of GaAs/Al_xGa_{1-x}As interfaces by capacitance-voltage measurements", Appl. Phys. Lett. 46, 15 Feb, 1985.
- [14] T. J. Drummond et al. "Electron mobility in single and multiple period modulation-doped (Al, Ga) As /GaAs heterostructures " , J. Appl. Phys, Vol. 53, no. 2, pp. 1023~1027, 1982.