

Pt/AlGa_xN 쇼트키 다이오드의 수광특성 모델링

김 종 환, 이 헌 복, 박 성 중, 이 정 희, 함 성 호
경북대학교 전자공학과
전화 : 053-940-8572 / 핸드폰 : 018-506-8207

Modeling for UV Photo-detector with Pt/AlGa_xN Schottky diode

Jong-Hwan Kim, Heon-Bok Lee, Sung-Jong Park, Jung-Hee Lee, Sung-Ho Hahm
Dept. of School of Electrical Engineering , Kyungpook National University
E-mail : pico702@freechal.com

Abstract

A Pt/Al_xGa_{1-x}N Schottky type Ultra-violet photodetector was modeled and simulated using the commercial SILVACO software program. In the carrier transport, we applied field model and other analytic model to determine the electron saturation velocity and low field mobility for GaN and Al_xGa_{1-x}N. A C-Interpreter function was defined to described the mole-fraction for the ternary compound semiconductor such as Al_xGa_{1-x}N. As comparing the simulated and experimental results, we found that the simulated result for type-1 has 15.9 nA/cm² of leakage current at 5V. We confirmed a good agreement of photo-current in the UV Photo-detector, while applying the absorption coefficient and reflective index of active Al_xGa_{1-x}N and other layers. There had been an intensive search for the proper refractive indices of the layers.

I. 서론

최근 정보화 사회와 더불어 초고속, 대용량의 신호 전송을 위한 통신기술의 급격한 발달되고 있다. 지금

까지 사용되고 있는 전자소자의 재료로 Si, GaAs 물질이 주로 이용되었으나 기후와 환경의 변화에 따른 한계가 있으므로 이를 극복하기 위해서 차세대 고주파, 고출력용 전자소자 재료로 III-Nitrides 화합물 반도체인 GaN, InN, AlN 및 이들의 3원계 화합물 반도체 물질이 주목을 받고 있다.[1] 이러한 질화물 반도체는 에너지 갭이 크고, 열적·화학적으로 매우 안정하며, 높은 전자포화속도 (~ 3x10⁷cm/sec)의 뛰어난 물성을 가지고 있으며 특히 Al_xGa_{1-x}N의 3원계 화합물 반도체는 Al mole-fraction의 변화에 따라서 3.4 ~ 6.2 eV까지 에너지 갭의 조절이 가능하여 170 ~ 360 nm까지 차단 파장의 조절이 가능하여 [2] UV Photodetector뿐만 아니라 HFET과 같은 고출력 고주파 전자소자 등에도 활발한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 세 가지 구조의 수광소자를 SILVACO 소프트웨어 프로그램을 사용하여 모델링 하였으며, 광전류와 낮은 누설전류를 가지는 자외선 수광소자를 비교·분석하였다. 먼저 Devedit 프로그램에서 소자의 크기, 불순물 농도, 전극을 실제소자 크기와 같은 상태로 설계한 후, Atlas 프로그램을 사용하여 Pt, Al, Air, GaN 그리고 Al_xGa_{1-x}N의 물리적 특성을 정의한 후 시뮬레이션 결과를 활용하여 쇼트키 다이오드의 전기적 특성을 확인하였다. 또한 수광특성을 확인하기 위하여 광원(optical beam)을 사용하여 Pt와

AlGaN 활성층의 흡수율과 반사율을 다양한 연구논문 및 이론값을 조사하여 본 프로그램에 적용하여 파장에 따른 광전류를 확인할 수 있었다.

II. 쇼트키 다이오드의 모델링

2.1 쇼트키 다이오드 설계

SILVACO 프로그램에서 물질을 정의하고 특히 Al 조성비에 따른 $Al_xGa_{1-x}N$ 의 에너지 갭, 친화도, 상태밀도, 허용도, band edge, carrier의 생성과 재결합, 이동도와 속도 정의를 하였다. 그림1은 Devedit에서 설계한 세 가지 종류의 쇼트키 포토다이오드이다.

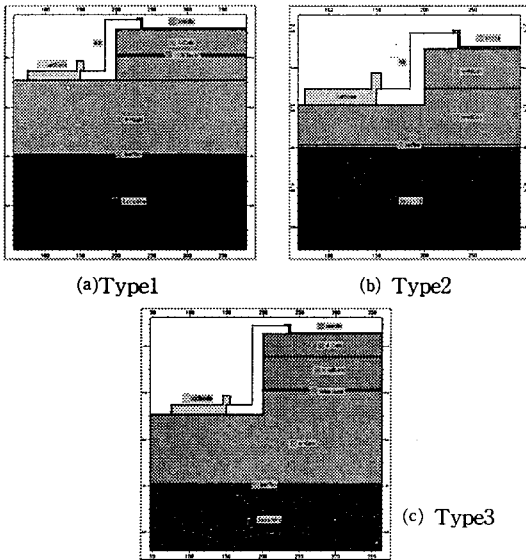


그림 1. Devedit에서 쇼트키 포토다이오드의 Design

Fig 1. Design of Schottky Ptdiode in Devedit.

먼저 Sapphire (0001) 기판위에

[type1] i- $Al_{0.37}Ga_{0.63}N(0.5 \mu m)$ /AlGaN-interlayer (300 Å)/ n^+ -GaN(2 μm)/GaN buffer(330 Å)

[type2] i- $Al_{0.32}Ga_{0.68}N(0.5 \mu m)$ / n^+ -AlGaN(0.7 μm)/GaN buffer(330 Å)

[type3]i- $Al_{0.32}Ga_{0.68}N(0.5 \mu m)$ / n^+ AlGaN(0.7 μm)/AlGaN interlayer (300 Å)/ n^+ -GaN(2 μm)/GaN buffer (330 Å)의 구조를 설계하였다.

격자상수(lattice constant)와 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)의 차이로 인하여 격자결합을 감소시키기 위하여 n^+ -GaN과 i-AlGaN 사이에 AlGaN

interlayer(300 Å)를 도입하였으며, 쇼트키 장벽을 높여 누설전류를 최소화하기 위하여 일함수가 큰 백금(Pt)을 사용하였다. 그리고 접촉저항을 줄여 낮은 전력손실과 소자의 수명을 향상시키기 위하여 오믹금속으로 Au/Ni/Al/Ti (500/400/2000/350 Å)을 사용하였으며, n^+ -GaN층과 오믹금속의 우수한 tunneling효과를 얻기 위해 불순물농도를 10^{18} cm^{-3} 으로 하였으며, 접촉저항은 $3.4 \times 10^{-4} \Omega$ 으로 하였다. 또한 누설전류 방지와 단락 현상을 방지하기 위하여 2000 Å 두께의 절연층(Air)을 형성하였다.

2.2 쇼트키 다이오드의 모델

쇼트키 다이오드의 전류밀도방정식은 drift-diffusion 전송 모델과 heat-flow모델을 적용한 Boltzmann 방정식을 적용하였다 [3].

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E}_n + qD_n \nabla n - qn\mu_n p_n \nabla T \quad \text{---- (1)}$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E}_p + qD_p \nabla p - qp\mu_p p_p \nabla T \quad \text{---- (2)}$$

전자와 정공의 열전계수(thermoelectric power) 계수는 P_n 과 P_p 는 이며 T 는 격자온도이다.

3원자 화합물인 $Al_xGa_{1-x}N$ 의 에너지 갭은 Al 조성비에 따른 변화를 적용하였으며 아래와 같다.

$$E_g(x) = xE_g(AlN) + (1-x)E_g(GaN) - bx(1-x) \quad \text{---(3)}$$

여기서 x 는 Al 조성비이며 b 는 bowing parameter이다 [4].

n^+ -GaN층과 $Al_xGa_{1-x}N$ 층의 불순물 농도와 온도에 따른 이동도변화를 확인하기위해 해석적 모델을 사용하였으며 nitride물질에 맞는 적절한 값을 적용하였다 [5].

$$\mu(N, T) = \mu_1 \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha + \frac{\mu_2 \left(\frac{T}{300} \right)^\beta - \mu_1}{1 + \left(\frac{T}{300} \right)^\gamma \left(\frac{N}{N_{crit}} \right)^\delta} \quad \text{---(4)}$$

여기서 $\mu_1, \mu_2, \alpha, \beta, \gamma, \delta, N_{crit}$ 는 전자와 정공에 맞는 적절한 값으로 수정을 하였다.

전자 : $\mu_1 = 15 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_2 = 1800 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \alpha=0, \beta = -3.04, \gamma=-2.55, \delta=0.66, N_{crit}=8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

정공 : $\mu_1 = 0.14 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_2 = 880 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \alpha=0, \beta = -1.5, \gamma=-0, \delta=0.67, N_{crit}=5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. ---- [3]

Fig 1은 온도와 불순물농도의 변화에 따른 GaN의 이동도 변화를 확인하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 실온에서 10^{18} cm^{-3} 으로 도핑하였을때 298 cm^2/Vs 전자의 이동도를 나타내고 있다

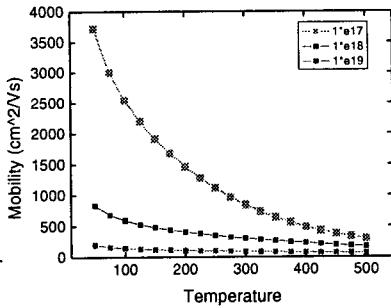


그림 2. 온도 변화에 따른 전자 이동도

Fig2. Electron mobility versus variation temperature.

높은 역방향 bias가 걸린 공간전하영역에서의 전계에 의해서 자유 carrier는 가속이 되어 결정내의 원자와 충돌을 하여 더 많은 자유 carrier를 생성하게 되는데 전계에 의해서 carrier속도는 포화가 된다. GaN의 포화속도의 변화를 적용하기위해 전계모델을 사용하였다.

$$V_{Sat} = \frac{\alpha_f}{1 + \theta_f \exp\left(\frac{T_L}{T_f}\right)} \quad \text{-----(5)}$$

여기서 $\alpha_f = 2.4 \times 10^7$ cm/sec, $\theta_f = 0.8$, $T_f = 600$ K, $T_L =$ 격자 온도 이다.

그리고 carrier의 생성과 재결합효과를 적용하기 위하여 쇼클리 리드 홀(Schockly-Read-Hall)모델과 impact ionization 모델(6)을 적용하였다.

$$G = \alpha_n J_n + \alpha_p J_p \quad \text{-----(6)}$$

여기서, ionization coefficient (α_n , α_p) 이다 [6].

$$\alpha_n(E, T) = A_n \exp\left(-\left(\frac{B_n}{E}\right)^\beta\right) \left(1 + A_T \left(\left(\frac{T}{300}\right)^M - 1\right)\right) \quad \text{---(7)}$$

$$\alpha_p(E, T) = A_p \exp\left(-\left(\frac{B_p}{E}\right)^\beta\right) \left(1 + A_T \left(\left(\frac{T}{300}\right)^M - 1\right)\right) \quad \text{-- (8)}$$

여기에서 E는 전계, A_n , A_p , B_n , B_p 은 impact ionization모델의 격자온도의 함수이며, 임계전계 (B_n , B_p)는 break-down junction에서 위치하며 온도에 의존하는 변수로 정의하였다.

$$B_{n,p}(T) = B_0 \exp\left(1 + B_T \left(\left(\frac{T}{300}\right)^M - 1\right)\right) \quad \text{---(9)}$$

전자: $A_n = 4.55 \times 10^6$ cm⁻¹, $B_0 = 1.19 \times 10^7$ V/cm, $\beta = 1$

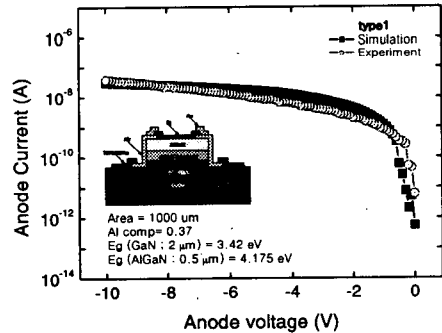
정공: $A_p = 1.48 \times 10^6$ cm⁻¹, $B_0 = 8.95 \times 10^6$ V/cm, $\beta = 1$

이며 A=0.588, B=0.248, M=1의 값은 실리콘 값을 이용했다.

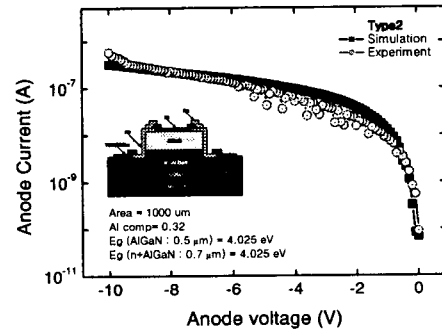
III. 시뮬레이션 결과

그림3은 Pt/Al_xGa_{1-x}N 자외선 수광소자의 전류-전압 특성을 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 앞서 그림1에서 Type1, Type2 와 Type3의 결과는 -5 V에서의 누설전류는 각각 1.59×10^{-8} A, 1.24×10^{-7} A, 1.38×10^{-5} A였다.

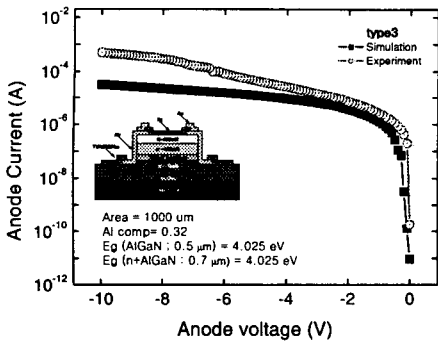
이 결과 Type 1이 가장 낮은 누설전류를 확인할 수 있었다. 이는 Interlayer층에 의한 Al_xGa_{1-x}N 활성층의 표면 갈라짐 현상이 감소하여 누설전류의 감소와 전계의 상승으로 인하여 carrier의 tunneling효과의 증가로 인하여 전도도에 기여하는 확률이 증가한 것으로 판단된다. 이는 자외선 감지기로서 가장 높은 선택도와 민감도를 갖기 위해서 AlGaN interlayer가 중요함을 확인할 수 있다. 모델링에서 낮은 전자의 수를 갖고 Interlayer층 정의 하기위하여 상태밀도를 10^3 으로 정의하였으며 이 경우 가장 실험결과값과 비슷한 경향성을 확인하였다.



(a) type1



(b) type2



(c) type3

그림3. 쇼트키 포토다이오드의 전류-전압 특성 [7].

Fig3. I-V characteristics of Schottky Photo-diodes [7].

그림 3.7은 광원입사에 대한 광응답 특성을 알아보기 위해 1 watt를 사용하여 광전류의 결과를 보여주었고 있다. $Al_xGa_{1-x}N$ 활성층의 Al 함유량을 37%로 하여 두께를 0.5 μm , 2.5 μm , 4.5 μm 로 변화하여 광전류의 변화를 확인하였다. 파장이 236 nm일때 광전류는 4.95×10^{-8} A, 5.73×10^{-8} A, 6.91×10^{-8} A의 흐름을 확인하였다.

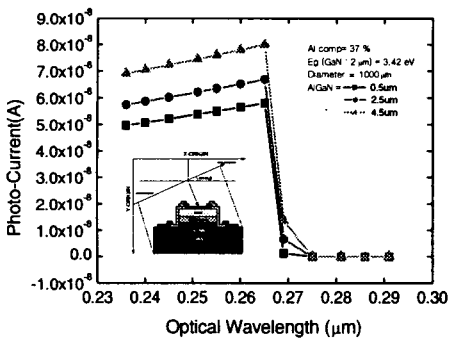


그림4. 파장의 변화에 따른 광전류

Fig4. Photo-current according to the optical wavelength.

IV. 결론

본 논문은 고효율 자외선 센서 (UV sensor) 와 자외선 불꽃 감지기로서의 응용 가능성을 확인하기 위해 세 가지 종류의 Pt/ $Al_xGa_{1-x}N$ 쇼트키형 포토다이오드의 특성을 SILVACO software program을 이용하여 시뮬레이션 하였다. $Al_xGa_{1-x}N$ 층과 n⁺-GaN층 물질간의 격자상수와 열팽창계수차이로 인하여 증가된 누설

전류를 감소시키는 방법으로 저온에서 330 Å 정도의 얇은 AlGaIn 중간버퍼층을 본 프로그램 상에서 정의하기 위해서는 상태밀도를 10^3 으로 낮추었을 때 실제 소자의 결과와 가장 비슷한 결과를 얻을 수 있다는 사실을 확인했다. 이러한 변수들을 적용한 결과 -5 V에서 수광직경이 500 μm , 700 μm , 1000 μm 일때 누설전류는 각각 2.55×10^{-10} A, 1.93×10^{-9} A, 1.54×10^{-8} A로 변화하는 것을 관찰하였다. 이러한 결과에서 보여 주듯이 수광부 직경이 클수록 금속과 반도체 계면에 접촉 저항률은 감소하게 되고 누설전류는 증가함을 알 수 있다.

또한 수광소자의 특성을 확인하기 위하여 광원을 사용하여 Pt와 $Al_xGa_{1-x}N$ 물질의 흡수율과 투과율을 데이터 파일을 사용하여 파장에 따른 광전류를 확인하였다.

이상과 같이 시뮬레이션을 통하여 소자의 전기적 특성 및 수광특성을 확인해 보았고 실제 실험의 결과값과 일관된 경향성을 확인하였다. 나아가 소자 제작에 있어 최적의 소자구조를 미리 확인하여 우수한 결과를 얻을 수 있을 것이라 기대한다.

참고문헌

- [1] Hadis Morkoc, "Nitride Semiconductors and Devices," Springer Series in MATERIALS SCIENCE (1999).
- [2] E. Monroy, F. Calle, J. L. Pau, E. Munoz. F. Omnes, B. Beaumont, P. Gibart, "AlGaIn-based UV photodetectors", J. Crystal Growth, Vol. 230, pp 537-543, (2001)
- [3] Atlas User's Manual I,II (Device simulation software), Silvaco Inc
- [4] GENERATION RECOMBINATION NOISE IN GaN PHOTOCONDUCTING DETECTORS, MRS Internat J. Nitride Semic. Res. 1,46(1996)
- [5] Gabriela E. Bunea, * S.T. Dunham** and T.D.Moustakas, "MODELING OF A GaN BASED STATIC INDUCTION TRANSISTOR" (2002)
- [6] Ismail H Oguzman, Enrico Bellotti, Kevin F. Brennan, an Kolnik, Rongping Wang, and P.Paul Ruden, J.Appl.Phys.81, 7827
- [7] 정영로 "AlGaIn를 이용한 쇼트키형 Solar-blind 자외선 수광소자의 설계 및 제작" 경북대학교 센서 공학과 졸업논문, 2003