

논문 2006-43SD-5-4

전달 행렬 방법을 이용한 Schottky 다이오드 자외선 광검출기의 물질특성 추출과 설계

(Extraction of Material Parameters and Design of Schottky Diode UV Detectors Using a Transfer Matrix Method)

김진형*, 김상배**

(Jin-Hyung Kim and Sang-Bae Kim)

요약

전달 행렬 방법과 capacitance-voltage 특성, 그리고 측정된 광응답 스펙트럼을 이용하여 Schottky 다이오드 UV-A와 B 광검출기에 사용되는 GaN, $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 등의 반도체 및 Schottky 접촉 금속 Ni의 물질특성인 흡수계수(absorption coefficient)를 추출하였다. 입사된 빛이 반도체의 공핍영역에서 흡수되는 양을 구하고, 이로부터 각 파장에서의 광응답 특성을 얻는 과정을 컴퓨터 프로그램으로 구현하였다. 그리고, 계산 값을 측정치와 비교하여 각 파장에서 GaN, $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$, Ni의 흡수계수를 얻을 수 있었다. 추출된 흡수계수를 이용하여 자외선 광검출기의 광응답을 높이는 설계 방안을 모색하였다. Ni의 흡수계수가 크기 때문에 광응답을 결정하는 주요 요소는 Ni 전극의 두께이다. 따라서 Schottky 접촉 금속 Ni의 두께를 줄이고, 공핍 영역의 크기를 늘릴 수 있다면 광응답 특성이 더욱 향상된 광검출기의 실현이 가능해질 것이다.

Abstract

We have extracted the material parameters such as absorption coefficients of GaN, $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$, and Schottky contact metal Ni of Schottky Diode UV-A and B detectors using a transfer matrix method (TMM). The ratios of the absorbed light to the total incident amount at the depletion regions of GaN and $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ have been calculated in order to obtain the spectral responsivity. Absorption coefficients of the materials have been obtained by fitting the simulated data with measured data. The depletion layer thickness has been obtained by capacitance-voltage measurement. The results pave the way for the optimum design of UV Schottky detectors. Since the absorption coefficient of the Ni electrode is very high, its thickness is a major factor that determines the responsivity. It is possible to attain improved UV detectors using thinnest possible Ni electrodes and wide depletion regions of GaN and $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$.

Keywords : UV detectors, Schottky, GaN, AlGaN

I. 서론

최근 들어 에너지갭이 큰 직접 천이형 반도체인 GaN 나 AlGaN 등의 III-V 족 화합물 반도체에 대한 연구가 활발하게 진행되어 많은 발전이 이루어졌다. GaN 또는 GaN/AlGaN는 청색 다이오드 레이저나 LED뿐만

아니라 고출력/고주파 이중접합 전계 효과 트랜지스터 (HFETs)^[1], 금속-반도체 FETs (MESFETs), 전력 정류기, 자외선 (Ultra Violet, UV) 광검출기 및 다양한 가스 센서에 사용되며, 이러한 소자들에는 Schottky 장벽 구조가 많이 사용된다^[2].

자외선에 관한 연구는 19세기 후반, 가시광선보다 짧은 파장에 대한 관심이 생기면서 시작되었으며, 최근 관심이 급증하고 있다. III-V 족 화합물 반도체를 이용한 UV 센서의 응용분야는 미사일 추적 장치 등에 쓰이는 화염 감지기, 오존 검사와 오염도 측정, 그 외 군사용, 산업용에 두루 걸쳐있다^[3]. 특히 대기 오염이 심해

* 정회원, 삼성전자 LCD 총괄
(LCD Business, Samsung Electronics)

** 정회원, 아주대학교 전자공학부
(School of Electrical and Computer Engineering,
Ajou University)

접수일자: 2006년2월13일, 수정완료일: 2006년5월9일

짐에 따라 자외선 지수를 알려주는 UV meter에 대한 일반인들의 관심이 높아지고, 그 수요가 증가하여 저가, 고효율의 UV 센서 개발이 꼭 필요하게 되었다. 자외선 중에서 UV-C (파장영역 100~280 nm)는 대기권에서 대부분 흡수되지만, UV-B (파장영역 280~315 nm) 및 UV-A (파장영역 315~400 nm)는 지표면까지 도달한다. 이에 따라 UV meter로 사용하기 위해서는 UV-A, UV-B의 검출을 위한 광검출기의 연구가 필요하다. 이렇게 역방향 전압 영역에서 암전류가 작고 빠른 응답속도를 보이는 고성능의 visible blind UV-meter의 구현을 위해서는 UV 광검출기에 사용되는 각 물질의 특성을 파악하여 좀 더 향상된 성능의 광검출기를 설계하여야 한다.

이 논문에서는 Schottky 다이오드 UV-A와 B 광검출기에 사용되는 물질의 흡수계수를 추출하여 더욱 개선된 소자의 설계를 위한 기반을 마련하였다. 먼저 고성능 Schottky UV-A와 B 광검출기의 전기적, 광학적 특성을 살펴보았다. 그리고 이 특성과 전달 행렬 방법을 이용하여 UV-A와 B 광검출기에 사용되는 GaN, Al_{0.2}Ga_{0.8}N 등의 반도체와 Schottky 접촉 금속 Ni의 물질특성인 흡수계수를 추출하는 과정을 보이고, 그 결과를 제시하였다. 또한 이를 바탕으로 성능이 더욱 개선된 자외선 광검출기의 설계를 위한 방안을 밝혔다.

II. Schottky 자외선 광검출기의 전기적, 광학적 특성

그림 1에 상온에서 측정된 UV-A 광검출기의 전기적 특성인 전류-전압 (I-V) 특성 곡선과 광학적 특성인 각 파장에서의 광응답 (spectral responsivity, R-λ) 특성 곡선을 나타내었다. 그림 1 (a)에서 역방향 전류는 thermionic emission 및 tunneling 등에 의한 것이다. 역방향 전압이 커질수록 image force lowering^[4] 또는 GaN와 금속 사이의 얇은 경계층의 생성 등에 의한 barrier lowering 현상, tunneling 등에 의해 누설 전류의 양이 급격히 증가함을 알 수 있다^[2]. 그림 1 (b)에서는 UV-A 영역인 315~375 nm 범위에서 높은 광응답을 보이고, 그 외의 파장에서의 광응답은 급격히 줄어들음을 확인할 수 있다. 그림 2에는 상온에서 측정된 UV-B 광검출기의 전류-전압 특성 곡선과 각 파장에서의 광응답 특성 곡선을 나타내었다. 그림 2 (b)에서 UV-B 영역인 280~315 nm 범위에서 우수한 광응답

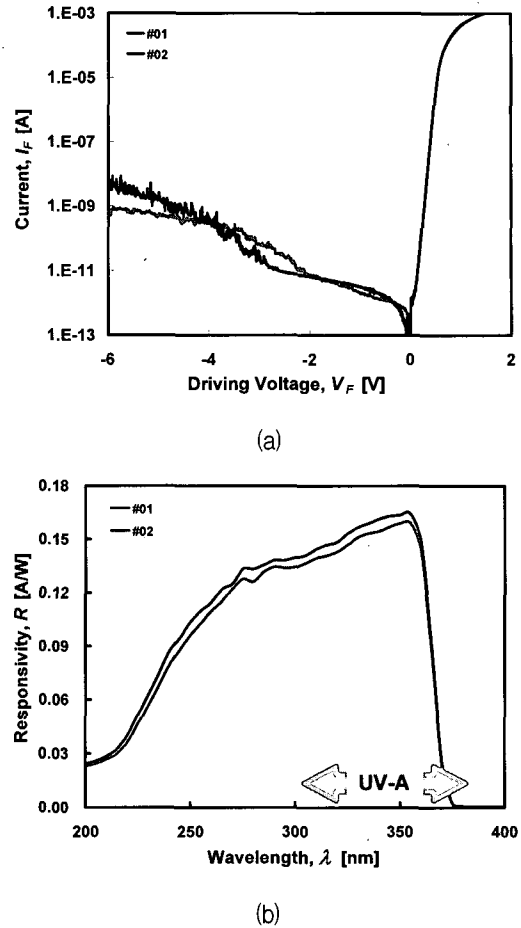


그림 1. GaN Schottky UV-A 광검출기의 (a) I-V 특성과 (b) R-λ 특성

Fig. 1. Electrical and optical characteristics of GaN Schottky UV-A detectors: (a) I-V characteristics and (b) R-λ characteristics.

특성을 보임을 확인할 수 있다.

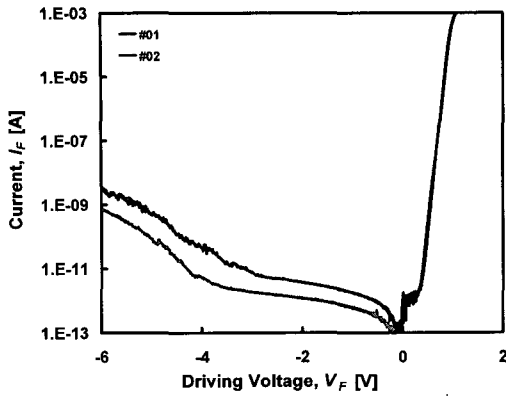
Schottky 다이오드의 일반적인 전류-전압 특성식은 다음과 같다.

$$I = I_{ST} \left[\exp\left(\frac{eV}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

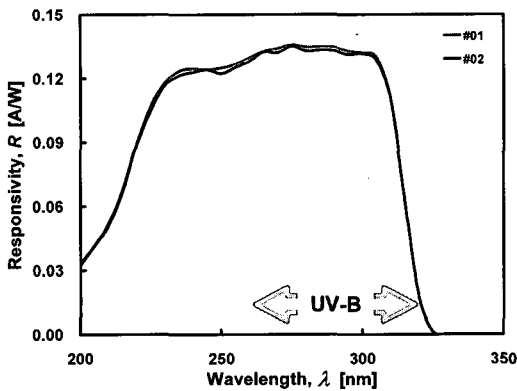
$$I_{ST} = AA^{**} T^2 \exp\left(-\frac{e}{k_B T} \phi_{Bn}\right) \quad (2)$$

위의 식에서 $A^{**} = \frac{4\pi e m_n^* k_B^2}{h^3}$ 는 GaN의 유효

Richardson 상수(GaN의 유효질량 $m_n^* = 0.222m_0$)^[5]로 k_B = Boltzmann 상수, h = Planck 상수, A = Schottky 다이오드의 면적, n = 이상 계수, ϕ_{Bn} = Schottky 장벽의 높이를 의미한다.



(a)



(b)

그림 2. GaN Schottky UV-B 광검출기의 (a) I-V 특성과 (b) R-λ 특성

Fig. 2. Electrical and optical characteristics of GaN Schottky UV-B detectors: (a) I-V characteristics and (b) R-λ characteristics.

그림 3에는 UV-A 광검출기의 0~100°C 범위에서의 온도에 따른 순방향 log I-V 특성 곡선을 나타내었다. 식 (1), (2)와 그림 3의 I-V-T 특성 곡선의 직선 영역을 이용하여 측정에 사용된 UV-A 광검출기의 Schottky 장벽의 높이 $\phi_{Bn}=1.00 [V]$ 와 이상 계수 $n=1.02$ 를 얻었다. 이를 식 (1), (2)에 대입하여 전류-전압 특성 곡선을 얻을 수 있었다. 그림 3에는 이 계산결과와 함께 실제 소자를 측정하여 얻은 온도에 따른 I-V 특성(I-V-T) 곡선을 나타내었다. 계산 값에서는 직렬 저항의 영향을 고려하지 않았기 때문에, 높은 전압 영역에서는 측정값과의 차이가 커짐을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 측정값과 계산값이 비교적 잘 일치하는 것으로 보아 식 (1), (2)에 포함되지 않은 누설 전류의 양이 크지 않음을 알 수 있다.

Si이나 GaAs 등에 비해 GaN는 dislocation 밀도가

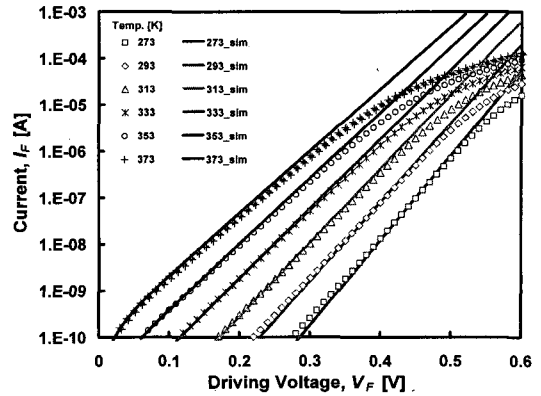


그림 3. GaN UV-A 광검출기의 순방향에서의 I-V-T 특성

Fig. 3. I-V-T characteristics in the forward bias region of GaN UV-A detectors.

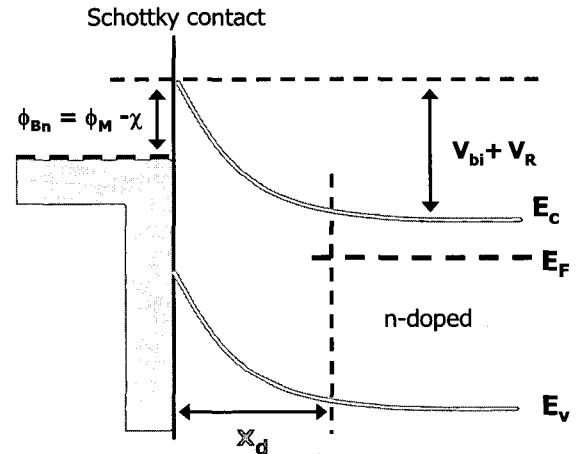


그림 4. 역방향 전압이 걸린 Schottky 접합의 에너지밴드 그림

Fig. 4. Energy band diagram of Schottky contact at reverse bias.

매우 크다는 것은 잘 알려진 사실이다. 반도체의 표면 근처에 많은 defect가 존재하면 defect-assisted tunneling에 의해 전자가 쉽게 Schottky 장벽을 넘어갈 수 있으므로 tunneling 확률이 크게 증가할 것이다^[6]. 그러면 저전류 영역에서의 누설 전류의 양도 크게 증가하게 된다. 측정에 사용된 소자의 저전류 누설 전류의 양이 크지 않은 것으로 보아 이 소자의 표면 근처에 defect가 많이 분포되어 있지 않거나, 소자의 doping 농도가 높지 않을 것으로 생각된다.

전달 행렬 방법(Transfer Matrix Method, TMM)을 이용하여 자외선 광검출기의 물질특성을 추출하기 위해서는 반도체 공핍 영역(depletion region)의 두께 x_d 를 아는 것이 필수적이다. 그림 4에는 역방향 전압이 걸렸을 때의 Schottky 접합의 에너지밴드 모습을 나타

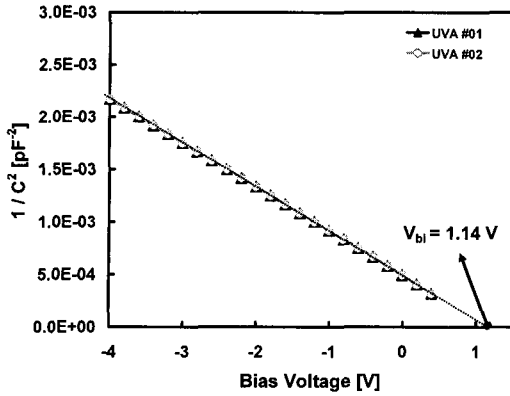


그림 5. GaN UV-A 광검출기의 $1/C^2-V$ 특성
Fig. 5. $1/C^2-V$ characteristics of GaN UV-A detectors.

내었다. 그림에 표시된 공핍 영역 (두께 = x_d)에서 흡수된 빛이 광전류에 기여하게 된다. Schottky 다이오드의 doping 농도와 공핍 영역의 두께는 전기적 특성 중의 하나인 C-V 특성 곡선에서 얻을 수 있다. 그림 5에는 GaN UV-A 광검출기의 $1/C^2-V$ 특성 곡선을 나타내었다.

built-in potential V_{bi} 는 $1/C^2-V$ 특성 곡선의 x절편으로부터 얻을 수 있으며, 1.14 V의 값을 얻었다. Schottky 다이오드의 capacitance 값 C 와 built-in potential V_{bi} 를 사용하여 doping 농도와 공핍 영역의 두께를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{x_d}, \quad x_d = \left[\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{eN_d} (V_{bi} + V_R) \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{x_d}{\epsilon_r \epsilon_0 A} \right)^2 = \frac{1}{(\epsilon_r \epsilon_0 A)^2} \frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{eN_d} (V_{bi} + V_R) \quad (4)$$

여기에서 ϵ_0 =유전율, ϵ_r =유전 상수이다. 위의 식 (3), (4)를 이용하여 doping 농도 N_d 를 구하면 다음과 같다.

$$N_d = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0 A^2} \frac{2C^2}{e} (V_{bi} + V_R) \quad (5)$$

$$= 4.40 \times 10^{16} [cm^{-3}]$$

이로써 앞의 $I-V-T$ 특성 곡선에서 살펴본 결과와 마찬가지로 doping 농도가 높지 않음을 확인할 수 있다. doping 농도로부터 Schottky 장벽의 높이를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\phi_n = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right) = 0.102 [V] \quad (6)$$

(N_c : effective density of states of conduction band)

$$\phi_{Bn} = V_{bi} + \phi_n = 1.14 + 0.102 = 1.204 [V] \quad (7)$$

$I-V$ 특성에서 구한 값보다 0.2 V 정도 더 높음을 알 수 있는데, 이는 $I-V$ 특성 측정에서는 barrier lowering 현상이 영향을 미치기 때문이다. 0 V의 전압이 걸렸을 때 공핍 영역의 두께는 다음과 같이 계산된다.

$$x_d = \left[\frac{2\epsilon_r \epsilon_0 V_{bi}}{eN_d} \right]^{1/2} = 0.16 [\mu m] \quad (8)$$

III. GaN, Al_{0.2}Ga_{0.8}N, Ni의 흡수계수 추출

실제 측정에 사용된 UV-A 및 B 광검출기에서 GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N은 유기금속 화학기상 증착법(MOCVD)

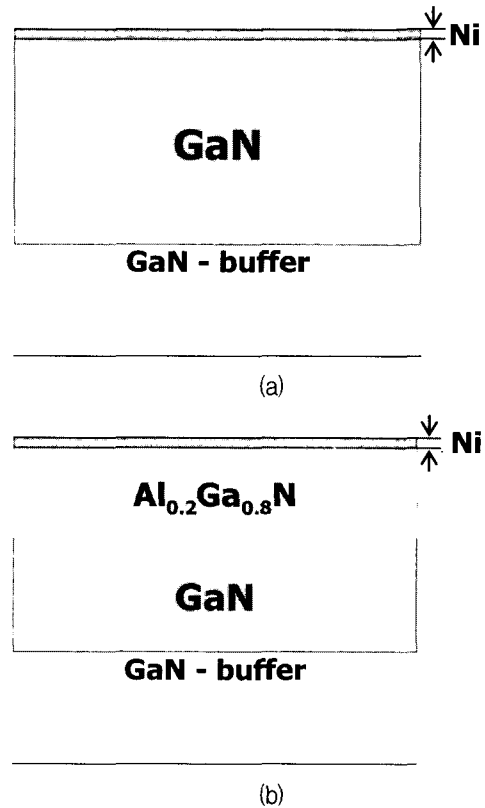


그림 6. 자외선 광검출기의 단순화된 단면도 (a) UV-A 광검출기의 단면도와 (b) UV-B 광검출기의 단면도

Fig. 6. The simplified sectional diagram of (a) UV-A and (b) UV-B detectors.

으로 사파이어 기판위에서 성장하였다. GaN 버퍼 층 (buffer layer)은 UV-A, B 광검출기에서 모두 30 nm의 두께로 성장하였다. UV-A 광검출기에서는 GaN 버퍼 층 위에 2 μm의 GaN 층을 성장하였다. UV-B 광검출기에서는 GaN 버퍼 층 위에 Al_{0.2}Ga_{0.8}N(0.2 μm)/GaN(1.2 μm)의 구조로 성장하였다. Schottky 접촉 금속 Ni의 두께는 10nm이다.

그림 6에 측정 및 시뮬레이션에 사용된 UV-A와 B 광검출기의 단순화된 단면도를 나타내었다. 공기 중에서 광검출기로 입사된 자외선 빛은 Schottky 접촉 금속 Ni층에서 투과와 반사를 거쳐 일부의 빛이 GaN 또는 Al_{0.2}Ga_{0.8}N의 흡수층 (공핍 영역)에 도달하여 흡수된다. 나머지는 흡수층 밖의 반도체 영역에 도달하거나 반사되는 과정을 반복하게 된다. 이러한 반복적인 빛의 흡수, 투과, 반사를 나타내는 데에는 전달 행렬 방법 (Transfer Matrix Method, TMM)이 매우 유용하다. 전달 행렬 방법으로 금속과 반도체 각각의 서로 다른 굴절률, 두께, 흡수계수를 사용하여 각각 층에서의 반사율과 투과율을 계산함으로써 입사된 빛 가운데에서 흡수된 빛의 비율을 찾아낼 수 있다. 이렇게 시뮬레이션하여 얻은 spectral responsivity와 측정값을 비교하면 각 물질의 흡수계수와 굴절률을 알아낼 수 있다.

1. 전달 행렬 방법

전달 행렬 방법은 굴절률이 서로 다른 다층 구조에서 각 층과 경계면에서의 광파 전파조건과 경계조건을 이용하여 순방향 진행파와 역방향 진행파 사이의 관계를 행렬 형태로 전개하여, 최종적으로 입력 광파에 대한 반사율과 투과율을 계산하는 방법이다^[7]. 그림 7에서 $E_{k,f}$ 는 k-1과 k번째 층의 경계에서 k번째 층 쪽으로 투과하는 투과파, $E_{k,f}'$ 는 k와 k+1번째 층의 경계에서 k+1번째 층으로 입사되는 입사파, $E_{k,r}$ 는 k-1과 k번째 층의 경계에서 k-1번째 층 쪽으로 입사되는 입사파이고 $E_{k,r}'$ 는 k와 k+1번째 층의 경계에서 k번째 층 쪽으로 반사되는 반사파이다. 경계조건을 이용하여 진행파와 반사파 사이의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$E_{k,f}' + E_{k,r}' = E_{k+1,f} + E_{k+1,r} \quad (9)$$

$$H_{k,f}' - H_{k,r}' = H_{k+1,f} - H_{k+1,r}$$

복소 굴절률을 \tilde{n} 으로 나타내면, $H = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \tilde{n}E$

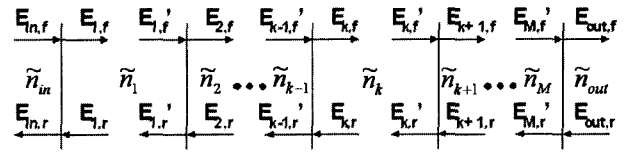


그림 7. 전달 행렬 방법의 해석 대상인 M개의 분할로 이루어진 다층 구조

Fig. 7. A multi-layered structure to be analyzed by the transfer matrix method.

이므로 위 식은 다음과 같이 된다.

$$E_{k,f}' + E_{k,r}' = E_{k+1,f} + E_{k+1,r} \quad (10)$$

$$\tilde{n}_k E_{k,f}' - \tilde{n}_k E_{k,r}' = \tilde{n}_{k+1} E_{k+1,f} - \tilde{n}_{k+1} E_{k+1,r}$$

광학적 특성이 균일한 각 층에서도 광파의 전파 조건으로부터 순방향 진행파와 역방향 진행파의 관계를 구하여 k와 k+1번째 층 경계에서의 전달 행렬로 나타낼 수 있다. 여기서 $E_{out,r} = 0$, 다시 말해 뒤쪽에서의 입사가 없다고 가정하면 반사율과 투과율은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$R = \frac{Re(E_{in,r} \times H_{in,r}^*)}{Re(E_{in,f} \times H_{in,f}^*)} \Big|_{E_{out,r}=0} \quad (11)$$

$$= \left| \frac{H_{21}}{H_{11}} \right|^2$$

$$T = \frac{Re(E_{out,r} \times H_{out,r}^*)}{Re(E_{out,f} \times H_{out,f}^*)} \Big|_{E_{out,r}=0} \quad (12)$$

$$= \frac{n_{out}}{n_{in}} \left| \frac{1}{H_{11}} \right|^2$$

이상의 전달 행렬 방법을 이용하여 다음 절에서 여러 층에서의 굴절률, 흡수계수를 고려한 내부 양자효율 (internal quantum efficiency, η_{op})을 구하고, 이로부터 각 파장에서의 광응답 값을 이끌어내는 방법을 알아보도록 한다.

2. spectral responsivity의 계산

spectral responsivity의 계산과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 전달 행렬 방법을 이용하여 광검출기의 내부 양자효율을 계산한 후, 이를 이용하여 각 파장에서의 광응답 값을 계산한다. 광검출기의 내부 양자효율은 전체 입사한 빛 중 Schottky 접합 공핍층에서 흡수된 빛의 양을 의미한다. 먼저 그림 7의 k번째 층에서 흡수

되는 빛의 양은 오른쪽에서 입사된 빛의 흡수량과 왼쪽에서 입사된 빛의 흡수량의 합으로 주어진다. 이는 k번째 층에서 흡수되는 양을 A_k , k번째 층의 광출력을 P_k 라고 하면 다음의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$A_k = A_{k,R} + A_{k,L} \tag{13}$$

$$(A_{k,R} = |P_{k,f}' - P_{k,f}|, A_{k,L} = |P_{k,r} - P_{k,r}'|)$$

이로부터 광검출기의 내부 양자효율 η_{op} 를 나타내면 다음과 같다.

$$\eta_{op} = \frac{\sum_{k=1}^M A_k}{\frac{n_{air} |E_{in,f}|^2}{2\eta_0}} \tag{14}$$

여기에서 n_{air} 는 공기의 굴절률, η_0 는 자유 공간에서의 intrinsic impedance를 의미한다. 전달 행렬 방법을 이용하여 각 파장에서의 이러한 내부 양자효율 η_{op} 를 계산한 후, 다음의 수식을 이용하여 각 파장에서의 광응답 값 R 을 계산할 수 있다.

$$R = \frac{\eta_{op} e}{h\nu} = \eta_{op} \frac{\lambda_0}{1.24} \quad (\lambda_0 \text{ in } \mu m) \tag{15}$$

λ_0 는 공기 중에서 광검출기로 입사하는 빛의 파장을 의미한다.

이로써 앞의 항에서 계산한 UV-A 광검출기 공핍 영역의 두께를 전달 행렬 방법에 적용하면 특정 파장에서의 광응답 값을 구하는 기반이 마련되었다. 다음 절에서 위의 방법으로 얻은 spectral responsivity를 실제 측정값과 비교하여 각 물질의 흡수계수 등의 물질특성변수를 추출하는 과정을 살펴보고, 그 결과를 알아본다.

3. 흡수계수의 추출

그림 8에 바이어스 전압에 따른 광응답 스펙트럼의 측정치를 앞에서 살펴본 수식과 전달 행렬 방법을 이용하여 구한 시뮬레이션 값과 비교하여 나타내었다. 역방향 바이어스 전압이 증가할수록 공핍 영역의 두께가 늘어나 광응답이 커짐을 알 수 있다.

공핍영역의 두께와 GaN의 흡수계수 및 굴절률^{[8][9]}, Schottky 금속 Ni의 굴절률^[10]을 사용하여 spectral responsivity의 측정값과의 차이를 줄여가면서 시뮬레이션 하였다. 이렇게 GaN의 흡수계수를 수정해 가면서

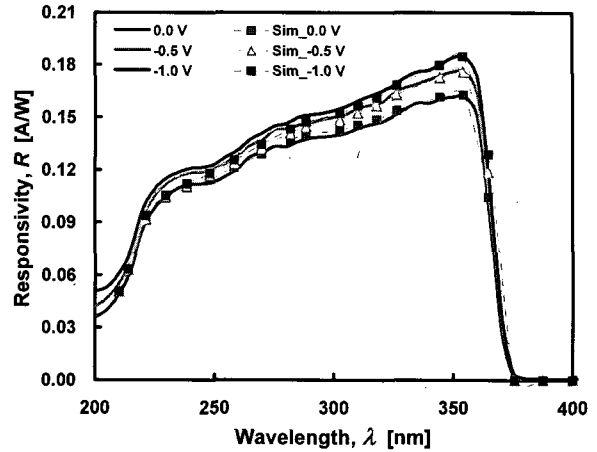


그림 8. UV-A 광검출기의 spectral responsivity의 바이어스 의존성

Fig. 8. Bias dependence of the spectral responsivity of a UV-A detector.

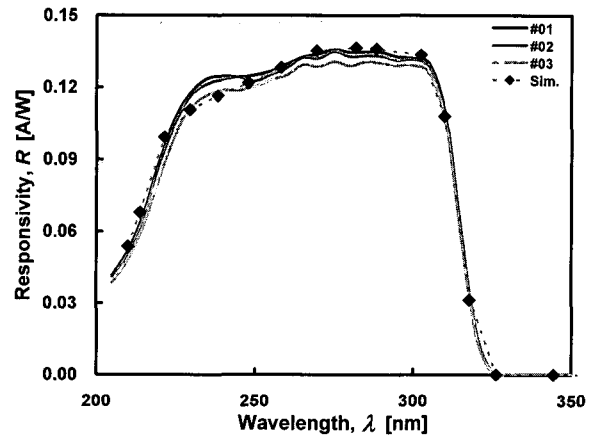


그림 9. UV-B 광검출기의 spectral responsivity 비교

Fig. 9. Comparison of spectral responsivity of UV-B detectors.

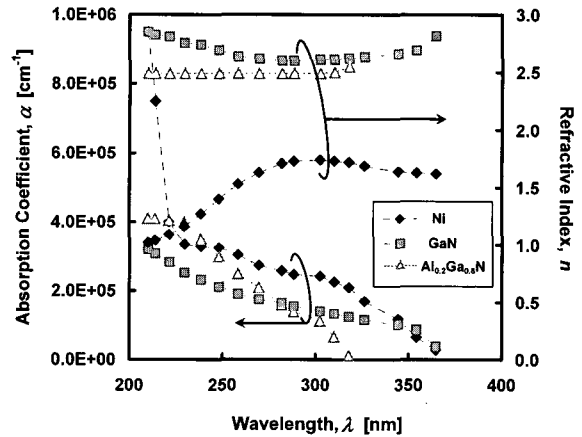


그림 10. Ni, GaN, Al_{0.2}Ga_{0.8}N의 흡수계수 및 굴절률

Fig. 10. Absorption coefficients and refractive indices of Ni, GaN, and Al_{0.2}Ga_{0.8}N.

UV 영역 각 파장에서의 Ni의 흡수계수를 추출하였다. 그림 9에는 앞에서 추출한 UV 영역 각 파장에서의 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 흡수계수를 사용하여 시뮬레이션 한 결과를 실제 GaN/ $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ UV-B 광검출기 소자들의 광응답 측정치와 함께 나타내었다. UV-B 광검출기에서는 GaN/ $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 이종구조에 의한 two-dimensional electron gas(2DEG)^[11] 때문에 바이어스 전압에 따른 $1/C^2$ 값의 변화를 측정할 수 없어, 전압이 인가되지 않은 상태에서의 capacitance $51pF$ 을 사용하여 공핍영역의 두께 $x_d=0.152 \mu m$ 를 구하였다. 이렇게 해서 구한 UV-A와 B 광검출기의 spectral responsivity에 영향을 미치는 물질 변수들을 그림 10에 보였다. 추출된 Ni 전극의 흡수계수는 타 연구 결과^[10]에 비해 상대적으로 크게 계산 되었다. 이는 Ni 박막이 GaN 및 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 등의 반도체 위에 증착되는 과정에서 성장 조건이 달라져 발생한 결과이다.

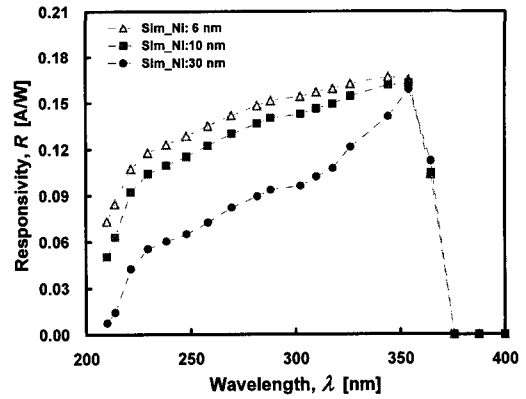
IV. UV-A와 B 광검출기의 최적 설계 방안

고효율, 고성능 광검출기의 실현을 위해서는 입사된 빛의 흡수율을 높이는 것이 관건이다. 이는 높은 광응답을 얻는 데에 필수적이다. 이 장에서는 전달 행렬 방법과 앞에서 추출한 UV-A 및 B 광검출기의 광응답에 영향을 미치는 물질변수인 자외선 파장영역에서의 GaN, $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$, Ni의 흡수계수와 굴절률 및 각 층의 두께를 이용하여 Schottky UV-A와 B 광검출기에서 광응답을 높이는 방향으로의 최적 설계 방안에 대해 알아보고, 그 실현 방법을 제시하고자 한다.

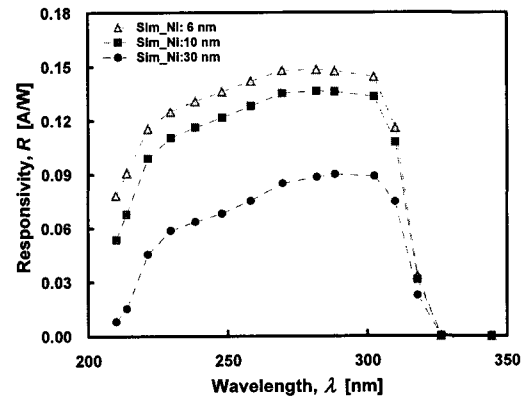
1. Schottky 접촉 금속 Ni의 두께에 따른 광응답의 변화

공기 중에서 입사된 빛은 Schottky 접촉 금속인 Ni을 통과하여 UV-A 광검출기에서는 GaN, UV-B 광검출기에서는 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 층의 공핍 영역에서 흡수된다. 이를 바탕으로 Ni 두께에 따른 반사율과 흡수율의 변화를 생각해 보기로 한다.

빛을 흡수하여 광응답을 줄이는 Ni 층의 두께를 얇게 하면 광응답 스펙트럼을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 그림 11 (a)에 Ni의 두께를 6 nm, 10 nm, 30 nm로 변화시키면서 시뮬레이션한 UV-A와 B 광검출기의 광응답 스펙트럼의 모습을 나타내었다. 350 nm 이하 파장의 빛에서는 Ni의 두께가 얇을수록 높은 광응답을 보



(a)



(b)

그림 11. Ni의 두께 변화에 따른 spectral responsivity의 변화 (a) UV-A, (b) UV-B 광검출기의 spectral responsivity

Fig. 11. Ni thickness dependence of the simulated spectral responsivity of (a) UV-A and (b) UV-B detectors.

임을 확인할 수 있다. 그러나 350 nm~365 nm 파장의 빛에서의 광응답은 Ni 두께의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 이 영역에서는 Schottky 접촉금속에서의 흡수가 비교적 적어 광응답에 직접적으로 큰 영향을 미치지 않는기 때문이다. 그림 11의 (b)를 살펴보면 UV-B 광검출기에서도 Ni의 두께가 얇을수록 큰 spectral responsivity를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 Ni의 두께에 따라 모든 UV-B 파장 영역에서 거의 동일한 차이를 보인다. 위의 사실로부터 Schottky 접촉금속 Ni의 두께를 가능한 한 얇게, 즉 광검출기의 안정성 또는 신뢰성에 영향을 미치는 않는 한에서 최대한 얇게 만드는 일이 급선무라 할 수 있다. Ni의 두께를 너무 얇게 하면 두께의 균일성이 떨어질 수 있기 때문이다. 즉 목표로 한 Ni 두께의 균일도를 높여 제작된 소자마다 동일한 성능을 보이게 하기 위해서는 금속증착 과정에서

좀 더 세심한 주의를 기울여야한다. 그리고 Ni의 두께가 너무 얇아질 경우 Schottky 장벽의 높이가 낮아질 수 있으므로 각별한 주의가 요구된다. 이상의 조건들이 만족되는 범위에서 GaN, $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 등의 반도체 위에 가장 얇은 두께의 Ni를 증착할 수 있다면 더욱 높은 광응답을 보이는 고성능의 UV-A 및 B 광검출기의 실현이 가능해질 것이다. 또한 Ni층 위에 UV에서 투과율이 높은 도체를 증착시켜 소자의 안정성을 높이는 방법을 생각해 볼 수도 있다.

2. 광응답 향상 방법 고찰

Schottky 접촉금속 Ni의 두께를 얇게 하는 일 이외에 spectral responsivity를 향상시킬 수 있는 방법으로 입사된 빛을 흡수하여 광응답에 기여하는 층인 UV-A 광검출기의 GaN, UV-B 광검출기의 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 의 공핍 영역의 두께를 넓히는 방법을 생각해볼 수 있다. 앞의 그림 8에서 UV-A 광검출기의 역방향 바이어스 전압에 따른 spectral responsivity의 변화를 살펴보았는데, 인가되는 역방향 바이어스 전압이 클수록 광응답이 증가함을 알 수 있었다. 즉 바이어스 전압이 커지면 공핍 영역의 두께가 늘어나게 되어 빛이 더 많이 흡수됨을 의미한다. 이는 앞에서 살펴본 식 (3)으로 설명할 수 있다. UV-B 광검출기의 경우에는 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 의 두께를 0.2 μm 이상으로 제작하면 crack 발생이 많아져 그 이상의 두께를 실현하기 힘들다. 그러므로 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 흡수층 밑에 reflector(perfect reflector)를 붙여 공핍 영역이 2배 이상 두꺼워진 것과 같은 효과를 나타내는 방법을 고려할 수 있다. 또한 doping 농도를 낮추는 방법도 생각해볼 수 있다.

V. 결 론

향상된 성능의 자외선 광검출기 설계를 위하여 먼저 Schottky 다이오드 UV-A와 B 광검출기의 전기적, 광학적 특성을 측정하고 전달 행렬 방법을 이용하여 GaN, $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 등의 반도체와 Schottky 접촉 금속 Ni의 흡수계수 등의 물질특성을 추출하였다. I-V 및 C-V 특성 곡선 등의 전기적 특성에서 얻은 Schottky 장벽의 높이와 doping 농도, 공핍영역의 두께를 이용하였다. 전달 행렬 방법을 이용하여 내부 양자효율을 구하고 이로부터 각 파장에서의 광응답을 구하였다. 이 시뮬레이션 결과를 실제 소자의 측정값과 비교하여 UV-A와 B 광검출기에 사용된 각 물질들의 흡수계수를 추출하였다.

이로써 UV-A와 B 광검출기의 최적 설계를 위한 기반이 마련되었으며 그 실현 방법을 제시하였다. 시뮬레이션을 통하여 Schottky 접촉금속 Ni의 두께가 spectral responsivity에 미치는 영향을 살펴보았다. 이로부터 Ni의 두께를 얇게 할수록 광응답이 커짐을 확인하였다. 또한 공핍 영역의 두께를 늘려 흡수되는 빛의 양을 늘리고 doping 농도를 낮추면 향상된 성능의 UV-A 및 B 광검출기 실현이 가능해질 것이다.

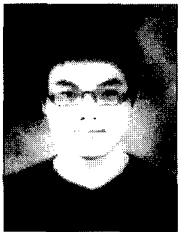
참 고 문 헌

- [1] S. Keller, Yi-Feng Wu, G. Parish, N. Ziang, Jane J. Xu, B. P. Keller, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra, "Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistors: process development and present status at UCSB", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 48 pp. 552-559, Mar. 2001.
- [2] Junji Kotani, Hideki Hasegawa and Tamotsu Hashizume, "Computer simulation of current transport in GaN and AlGaIn Schottky diodes based on thin surface barrier model", *Appl. Surface Science*, Vol. 237 pp. 213-218, Oct. 2004.
- [3] M. Razeghi and A. Rogalski "Semiconductor ultraviolet detectors", *J. Appl. Phys.* Vol. 79, pp. 7433-7473, May 1996.
- [4] D. A. Neamen, *Semiconductor physics & devices*, (McGraw-Hill, U. S., pp. 316, 1992).
- [5] E. Monroy, F. Calle, E. Muñoz, F. Omnès, "Effects of bias on the responsivity of GaN Metal-Semiconductor-Metal photodetectors", *Phys. Stat. Sol.* Vol. 176, pp. 157-161, 1999.
- [6] L. S. Yu, Q. Z. Liu, Q. J. Xing, D. J. Qiao, S. S. Lau, and J. Redwing, "The role of the tunneling component in the current-voltage characteristics of metal-GaN Schottky diodes", *J. Appl. Phys.* Vol. 84, pp. 2099-2104, Aug. 1998.
- [7] 김태용, 김상배, "Design of 850 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers by Using a Transfer Matrix Method", *전자공학회 논문지*, 제 41권, SD편, 제7호, 545-550쪽, 2004년 7월
- [8] J. F. Muth, J. H. Lee, I. K. Shmagin, R. M. Kolbas, H. C. Casey, Jr., B. P. Keller, U. K. Mishra, and S. P. DenBaars, "Absorption coefficient, energy gap, exciton binding energy, and recombination lifetime of GaN obtained from transmission measurements", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 71, pp. 2572-2574, Nov. 1997.
- [9] Aleksandra B. Djurišić and E. Herbert Li, "Dielectric function models for describing the

optical properties of hexagonal GaN”, *J. Appl. Phys.* Vol. 89, pp. 273-282, Jan. 2001.

- [10] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids Vol. 2*, (Academic Press, New York, pp. 322-323, 1985).
- [11] J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, “Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors”, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 77, pp. 250-252, Jul. 2000.

저 자 소 개



김진형(정회원)
 2004년 아주대학교 전자공학부
 공학사
 2006년 아주대학교 전자공학과
 공학 석사
 현재 삼성전자 LCD 총괄.

<주관심분야 : 광전소자, LCD 등>



김상배(정회원)
 1981년 아주대학교 전자공학과
 공학사
 1983년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 공학 석사
 1987년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 공학 박사

1990년~현재 아주대학교 전자공학부 교수.

<주관심분야 : 광통신용 반도체 레이저 및 부품,
 광전 소자 등>