



# 광역 밴드갭을 이용한 자외선 수광 센서

최 원 국

한국과학기술연구원 박막기술연구센터

본 고의 경우 자외선 수광센서 기술에 대한 개괄적 소개로 수광소자의 분류 및 일반적으로 요구되는 사항, 그리고 최근의 수광소자 재료 및 소자에 대한 소개 등을 위해 광기전력형(photovoltaic), 광전도성(photoconductive) 소자에 대한 간단한 원리를 설명하였다. 이와 더불어 현 자외선 수광소자 제작 기술을 Si, SiC, 그리고 GaN III-nitride에 대하여는 M. Razeghi와 A. Rogalski<sup>1)</sup>의 review paper를 중심으로 재구성하였으며, 최근 새롭게 대두되는 II-VI ZnO-based 수광소자 등에 대한 요약을 덧붙였다. Aerospace, automotive, petroleum 등과 연관된 산업분야에서 UV 수광소자의 고온 및 극한 상황에서의 내구성을 더욱 강력히 요구하고 있으며, O<sub>3</sub> 층의 파괴로 인한 생태계 및 피부질환, 화재경보, underwater communication 과 관련한 산업, 군사적 측면에서 그 용도가 매우 중요시 여겨지고 있다. 일반적으로 UV는 파장에 따라 일반적으로 NUV (near uv:400-300 nm), MUV (mid uv:300-200 nm), FUV (far uv:200-100 nm), 그리고 EUV (extreme uv:100-10 nm)등으로 분리되며, VUV (vacuum uv:200-10 nm)와 DUV (deep uv: 350-190 nm) 또는 UV-A (400-320 nm)와 UV-B (320-280 nm)등으로 분류되기도 한다. 지구 대기의 주요 구성원들은 300 nm 미만의 짧은 파장을 강력히 흡수한다. 200-300 nm 영역의 MUV는 대부분 ozone에 의해 흡수되며 110-250 nm의 FUV는 O<sub>2</sub> 분자에 의해 흡수된다. 따라서 200 nm 미만의 UV를 사용하기 위해서는 진공 내에서만 사용이 가능하다. 110 nm미만의 파장은 대부분 가스 원자나 분자들에 의해 강력히 흡수된다. UV detector는 일반적으로

photoelectric과 photographic하게 대분류되며, 이중 photoelectric의 경우 photoconductive, photovoltaic, photoemissive하게 분류된다. Photographic의 경우 대량의 이미지 저장 능력이 매우 우수하나 검출능력이 낮고 특정 파장에 대한 비선형적 반응성을 가지는 단점이 있다. 이에 비하여 photoelectric detector의 경우 검출능력이 우수하고 응답 안정성 및 선형성이 매우 높은 특징을 가지고 있어서 이중 특히 CCD (charge coupled device)와 같은 photovoltaic, MCPs (micro channel array plates) 등의 photoemissive detector 분야에서 큰 발전을 보여왔다. 여러 가지 형태중 일반적으로 UV photodetector는 photoconductive, photodiode p-n junction, 그리고 Schottky barrier detector의 세 가지 기본 형태로 개발되어왔고 이에 대한 특성을 간략히 알아보면 다음과 같다.

## 1. Photoconductive detectors

Photoconductor 라고 불리며, 밴드갭 ( $E_g$ )보다 큰 광자 에너지 ( $h\nu$ ) 가 흡수되면 전자-정공쌍을 발생시키며 반도체의 전기전도도 변화로 광을 감지하는 radiation에 매우 민감한 소자형태이다. 낮은 저항을 가지는 소자의 경우 Fig. 1에서와 같이 정전류 회로에서 작동하며, 저항이 더 큰 부하 저항의 전압변화를 신호로 사용한다. 높은 저항을 가지는 경우는 정전압 mode에서 작동한다. 내부 양자효율( $\eta_0$ )은 거의 1에 가까우나 slab형태(Fig. 1)의 경우 표면 및 밑면에서의 반사율( $r$ )을 고려하면 양자효율이  $\eta \sim \eta_0(1-r) \sim (1-r)$ 로 표현되며 anti-reflection

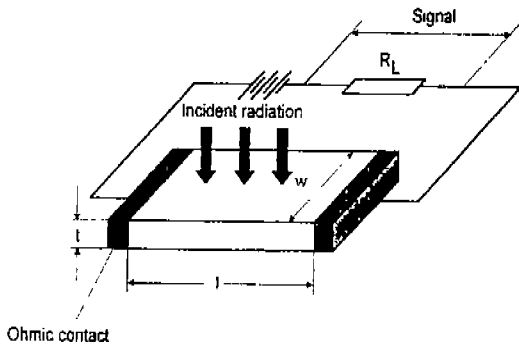


Fig. 1.

coating을 이용하여 양자효율을 0.9 정도까지 보이는 소자를 제작할 수 있다.

## 2. p-n junction photodiode

Built-in 전위 장벽을 가지는 반도체 구조에서 발생하는 photoeffect는 근본적으로 photovoltaic 효과이며 광에 의해 과잉 캐리어들이 장벽 주위로 주입되는 결과를 보인다. Built-in 전기장은 반대 부호를 가지는 전하들을 다른 방향으로 움직이게 하는 역할을 하게 된다. 이에

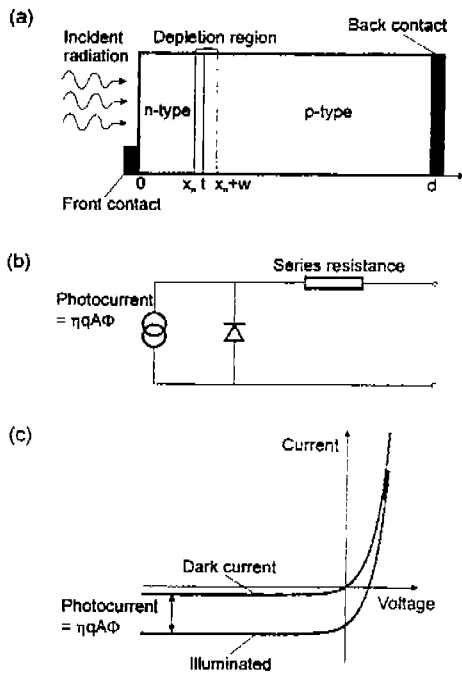


Fig. 2.

p-n junction, heterojunction, Schottky barrier, metal-insulator-semiconductor(MIS)등이 있고 각기 그 특성을 지니고 있다. 이중 가장 일반적인 p-n 접합 수광소자의 경우 일반적으로는 광다이오드 (photodiode)로 알려져 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 에너지 밴드 갭보다 큰 광이 입사되면 접합의 양쪽에 전자-정공쌍을 생성한다. 확산 과정을 통해 확산거리 내에서 생성된 전자, 정공은 공간 전하층으로 향하게되며 강한 전기장에 의해 분리된다. 소수 캐리어들은 양쪽 다수 캐리어로 가속되게되고, 부의 방향(역전류)으로 전압-전류의 특성 곡선의 변화를 가져온다.(Fig. 2(c))

## 3. Schottky barrier photodiode

Schottky 장벽 수광소자는 제작의 용이성, 고온 확산 과정의 불필요, 및 고속 응답 속도등 p-n 접합 소자에 대한 우월성을 가지고 있어서 많은 연구가 이루어졌다. 본 소자는 Schottky-Mott모델에 근거한 금속의 일함수( $\phi_m$ )와 반도체의 일함수( $\phi_s$ ) 사이의 차이에 의해 형성되는 정전 전위장벽에 의한 정류(rectifying) 특성을 이용하는 것으로, n형 반도체의 경우는  $\phi_m$  이 크고 p형 반도체의 경우는 작아야한다. p-n 접합 수광소자에 비하여 본 소자는 전류 수송이 다수 캐리어에 의하여 이루어진다. 순방향의 전압이 연결된 경우 Fig. 3에서 나타난 것과 같이 4가지 과정으로 이루어진다.

- (a) 전위 장벽 상층부에서 반도체로부터 금속으로의 전자 방출
- (b) 전위 장벽을 통한 양자역학적 터널 효과에 의한

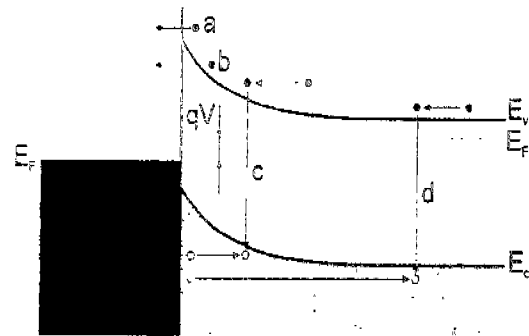


Fig. 3.

- 전자 이동
- (c) 공간 전하층 내에서 재결합
- (d) 중성층 내에서의 재결합(금속으로부터 반도체내로의 정공 주입)

#### 4. UV detector용 반도체 재료 및 detector

높은 양자효율을 가지는 반도체 수광소자의 제작은 강한 흡수 현상 및 방사에 의해 야기되는 노화 효과(aging effect)가 가장 큰 난점이었다. 이중 기존에 많은 공정이 개발된 Si-technology를 이용한 Si 소자가 가장 광범위하게 개발되었다. Si 소자의 경우 침투깊이는 NMU, MUV의 경우 10 nm, 10 keV x 선의 경우 100  $\mu\text{m}$  정도이다<sup>2)</sup>. Si, GaAs, GaP, SiO<sub>2</sub>, Au (250 eV 이상에서는 가장 흔한 photoemissive 수광소자) 의 경우 30 eV 에서 6 keV 에너지 영역(파장은 40 nm 에서 0.1 nm에 해당)에서는 0.01  $\mu\text{m}$  에서 50  $\mu\text{m}$  까지이다. 특히 700 eV 정도 까지는 침투깊이가 수백  $\mu\text{m}$ 에 해당하지만 높은 에너지의 경우 수십  $\mu\text{m}$ 에 해당하는 침투깊이를 피하기 위해 소자의 두께가 매우 두꺼워져야만 한다. 연소탐지, 위성탐재 미사일 plume 탐지 용 UV detector는 견고성을 요구하게 되었고, 공기 오염 · 가스정보 · 개인휴대용 자외선 노출감지등의 분야에 있어서 요구되는 광역 밴드갭 반도체의 감도 향상에 많은 투자가 이루어졌다. Aerospace · 자동차 · 석유 화학등의 분야 응용에서는 높은 온도와 극한 환경에 대해 견딜 수 있는 내구성 물질들을 요구하게 되었다. 이에 고온 · 고출력 전자 소자에 뿐만 아니라 자외선 수광 소자 분야에서 SiC 재료가 각광을 받게되었다. 그 이후 III-V 광역 밴드갭 반도체 재료에 대한 연구가 집중되었고 E<sub>g</sub>=3.4 eV (cutoff 파장:365 nm)인 적외선 · 가시광선 영역에 반응을 하지 않는 GaN를 이용한 자외선 수광 재료의 개발이 활발히 이루어졌다. 이에 InN (E<sub>g</sub>=1.9 eV), AlN (E<sub>g</sub>=6.2 eV)의 넓은 밴드갭을 가지는 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N alloy를 이용한 solar blind 자외선 수광소자의 개발이 가능하게되었다. 또한 다이아몬드는 견고하며 solar blind 소자로 알려져 있으나 기술적 문제로 인하여 아직 많은 문제를 해결해야한다. 한편 최근 II-VI ZnO 물질이 상온에서 3.37 eV의 밴드갭을 가

지는 직접천이형 밴드갭을 가지고 있어서 새로운 자외선 수광소자로 대두되고 있다. Table 1 은 여러 가지 UV 소자용 재료의 물리적 특성을 나타내고 있다.

##### 4-1. Si UV detector

초기에는 주로 가시광선을 감지하기 위해 제작된 Si 수광 소자는 자외선 영역에서 높은 양자효율을 높이는 것이 최대의 관건이었다. Si 다이오드의 경우 가시광선과 적외선에도 민감하여 필터 등을 이용한 대역조절 여과장치를 부착하게 됨으로 검출소자의 부피가 크고, 그 구성이 복잡하다. 또한 실리콘은 밴드갭이 작으므로 열적 안정성에 문제가 있고, 열악한 환경 하에서 화학적으로 안정하지 못하다는 단점이 있다. 주로 ① Diffused photodiode, ② Schottky barrier photodiode 형태로 제작되어 아직까지 많이 사용되고 있으나 본 해설에서는 생략하기로 하고 이에 관한 주요 참고 문헌만을 제시하였다<sup>3-6)</sup>.

##### 4-2. SiC UV detector

SiC 작은 drift region을 허용할 수 있는 높은 붕괴전압과 우수한 열방출이 가능한 열적 안정성을 가지며, 큰 에너지 밴드갭(E<sub>g</sub>=2.9 eV)을 가지는 Si에 비하여 우수한 특성을 가진다.

###### 4-2-1. p-n junction photodiode

N이온 주입을 통하여 0.05  $\mu\text{m}$ 의 n<sup>+</sup>-p를 형성하여 -10 V 역전압 dark-current가 10<sup>-5</sup>A/cm<sup>2</sup>이고 양자효율이 280 nm에서 75%를 보이는 소자가 개발되었다<sup>7)</sup>. 또한 p-type 단결정 위에 5-8×10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup>의 농도를 가지는 p-type 층을 증착하고 그 위에 5-10×10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup> n<sup>+</sup>층을 증착하여 구조화한 p-n접합 6H-SiC 소자를 제작하였고, 270 nm 파장에서 150-175 mA/W의 반응성과 75-80% 정도의 양자효율을 보였다<sup>8)</sup>. 최근 3C-SiC를 소재로한 상압 화학기상법에 의해 제작되어 250 nm에서 72 mA/W의 반응성, 36%의 양자효율을 보이는 소자도 개발되었다<sup>9)</sup>.

###### 4-2-2. Schottky barrier photodiode

Ti/p-type SiC는 역전압 leak 전류가 -10 V에서 1 pA 미만 그리고 -70 V에서 500 pA 미만으로 유지되었다<sup>10)</sup>.

Au/6H-SiC(n-type:  $5 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$ ), 전위장벽은 1.4-1.63 eV 이고 상온에서 100-170 V의 붕괴전압에서 leak 전류가  $10^{-10}$  A 정도의 작은 값을 보였으며, 215 nm 파장에서 0.15 A/W의 반응성, 80% 양자 효율을 보였다.<sup>11)</sup>

### 4-3. III-V nitride UV detector

#### 4-3-1. Physical properties

III-V 반도체는 240-280 nm 영역 (~4.75 eV) 까지 검지할 수 있는 광대역 밴드갭과 우수한 radiation hardness를 보여 Si 등에 비하여 매우 우수한 특성을 가진 재료이다. 하지만  $10^7$ - $10^{10}/\text{cm}^2$ 의 dislocation density를 가지므로 적은 밀도를 가지는 양질의 박막을 얻는데 상당히 어려웠다.

현재까지 p-type GaN의 형성이 알려진 이래로 MOCVD에 의해 Mg-doped GaN<sup>14)</sup> 및 MOMBE<sup>15)</sup>에 의해 제작이 가능해졌다.

Doping을 하지 않은 경우  $4 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  정도의 농도를 가지며 이동도가 상온에서  $600\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  정도를 가지는 양질의 박막을 MOCVD<sup>12)</sup>에 의해 제작 가능하다. Self-compensation에 의해 p-type doping이 힘들었으나 저에너지 전자 빔 충돌(low-energy electron beam irradiation: LEEBI)<sup>13)</sup>에 의해 최초로 실현되었다.

#### 4-3-2. Ohmic contact

GaN의 일함수는 4.1 eV로 알려져 있다. 따라서 Al (4.08 eV)은 n-type GaN, Au (4.82 eV)는 p-type GaN의

ohmic물질로 알려지게 되었고, Au의 경우 diffusion방지를 위한 Ti, Cr등의 얇은 interlayer가 필요하다. 이에 대한 자세한 결과는 Lin등의 결과를 참조하기 바란다.<sup>16)</sup>

#### 4-3-3. Etching

GaN의 defect와 그 밀도를 알아보기 위해 습식 etching이 필요하지만 기존의 IC공정을 이용한 재현 가능한 소자를 구현하기 위해서는 손상을 주지 않기 위해 낮은 DC 인가 전압 하에서의 etching이 가능한 건식 식각 공정이 필요하다. Aswsida등에 의해 SiCl<sub>4</sub>를 이용한 50 nm/min(@400 V)의 식각공정이 보고되었고,<sup>17)</sup> CH<sub>4</sub>(Cl<sub>2</sub>)/H<sub>2</sub>, BCl<sub>3</sub>/Ar을 이용한 ECR plasma etching등이 보고되었다.<sup>18,19)</sup> 또한 HI(HBr)/H<sub>2</sub>/Ar 등의 혼합가스를 이용하면 더욱 빠른 식각율을 보임을 알게 되었다.<sup>20)</sup>

#### 4-3-4. AlGaN UV detector

- Photoconductive detector

Khan<sup>21)</sup>등에 의해 제작된 GaN photoconductive detector는 365 nm에서 200 nm 까지 일정한 1000 A/W, gain/QE(양자효율)이  $4.8 \times 10^3$  정도의 값을 보여 주었다. 한편 MBE에 의해 제작된 GaN를 이용하고 Ti/Al 오믹 접촉과 20 μm IDT 간격 μm으로 제작된 소자의 경우 254 nm에서 gain/QE가 600, 이동도  $9.5 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , 125 A/W의 반응도를 가지는 것으로 보고했다.<sup>22)</sup>

- Photovoltaic detector

Khan등은 MOCVD를 이용하여 Schottky barrier detec-

Table 1. Table1. Si, GaAs, GaP, SiC, GaN, diamond, ZnO 물질의 비교

Parameter	Si	GaAs	GaP	3C-SiC (6H-SiC)	GaN	Diamond	ZnO
Lattice constant(Å)	a=5.4301	a=5.6533		a=4.36 (a=3.08)	a=3.189 c=5.185		a=3.250 c=5.207
Band gap (eV, @RT)	1.1	1.4	2.3	2.2 (2.9)	3.39	5.5	3.37
e-mobility	1400	8500	350	1000 (600)	900	2200	
h-mobility	600	400	100	40	150(?)	1600	
physical stability	good	fair	fair	excellent	good	very good	good

tor를 제작 보고하였는데, 잔여 전자농도가  $10^{17}/\text{cm}^3$ 의 n-type GaN를  $\text{N}_2$ 분위기에서 열처리하여  $7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 을 가지는 p-type GaN를 제작하였고 1500 Å Ti/Au 오믹접촉을 통하여 320 nm에서 0.13 A/W의 반응도를 가지는 Schottky detector를 제작하였다.<sup>23)</sup> 그 이외에 p-n 접합 소자의 경우 Zhang<sup>24)</sup>과 Chen<sup>25)</sup>등에 의해 제작되었는데, Chen의 경우 p-type ohmic contact으로 Ni/Au를 사용하였으며 0.09 A/W, 반응속도가 0.4 ms정도인 소자를 제작하였다. 한편 Khan<sup>26)</sup>등은 GaN/AlGaIn 이형접합형 전계효과 트랜지스터(heterostructure field-effect transistor:HFET)(Fig. 3)를 제작하여 밀면에서 빛이 입사되면 i-GaN buffer층과 active n-GaN층에서 전자-정공 쌍이 생성된다. 과에 의해 생성된 정공은 i-GaN/사파이어 계면으로 이동하고, 전자의 경우는 높은 채널장에 의해 drain쪽으로 움직이게 된다. 최대 측정된 반응도는 gate전압 1V에서 3000 A/W 로 매우 높은 값을 보이고 있다.

#### 4-4. Diamond detector

재료적인 면에서 다이아몬드는 높은 열전도도, 작은 유전상수( $\epsilon=5.5$ ), 그리고 큰 밴드갭( $E_g=5.4$  eV)를 가지고 있어서 특히 고온에서 작동하는 전자, 광소자에 매우 적합한 물질로 알려져 있다. 그러나 현재 이러한 물질의 합성은 이루어지고 있으나 이를 응용하는 가공 공정등의 미미로 많은 연구가 진행되어야 한다. 최근 Zhao<sup>6)</sup>등에 의해, B 도우핑된 hot-filament CVD에 의한 다이아몬드에서 Al의 반투명 금속막을 이용하여 제작된 Schottky diode가 보고되었다. 표면에서의 반사를 고려하지 않고, 전압을 가하지 않은 경우 5-10%정도의 양자 효율을 보이며 1V의 역전압 인가시 양자 효율이 30%까지 향상된다고 보고하고 있다. 이 때 Al과 p-type 다결정 다이아몬드사이의 Schottky 전위 장벽은 1.15 eV로 측정되었다. 하지만 이 photodiode의 경우 solar-blind의 특성을 보이지 못하고 가시광선과 근자외선 영역에 반응을 보이는데, 이는 금속과 반도체 사이의 광전자 방출, 불순물에 의한 extrinsic photoexcitation, 그리고 결정의 결함 등의 기구에 의해 발생하는 것으로 예상된다. 또한 Schottky barrier는 금속간의 일함수 차이 보다는 결정

의 높은 결함 밀도에 의존하며, 가전자대로 부터 0.2  $E_g$  정도 pinning이 일어남을 밝혀졌고 이러한 pinning현상은 결정 성장시의 damage에서 유발되는 것으로 예상되고 있다. 최근 n-type 다이아몬드를 제작하는 기술이 가능해짐으로써 p-n 접합과 같은 photovoltaic diode의 제작이 기대되고 있다.

#### 4-5. II-VI ZnO UV detector

III-V 반도체를 이용한 자외선 수광소자 이외에 최근 II-VI ZnO 박막을 이용한 새로운 uv, blue LED 소자 개발과 더불어, UV 수광소자에 대한 연구도 새로운 연구 결과들이 보고되고 있다. ZnO-based uv detector에 대한 연구는 1987년 glass위에 polycrystalline ZnO박막을 증착하여 Schottky type UV detector를 제작하여 uv 특성을 조사한 것이 가장 최초의 연구였고, p-type ZnO 박막의 성장이 개발되지 않아 Schottky, metal-semiconductor-metal(MSM) 구조에 대한 것만이 가능하였고 따라서 n-type 또는 undoped ZnO 박막의 carrier concentration에 따른 Schottky barrier 금속에 대한 연구가 이루어져야만 했다. 이와 관련하여 UV detector의 개발과는 무관하게, ZnO bulk, film의 deep-level defect연구를 위하여 DLTS (deep-level transient spectroscopy) 측정을 위하여 Schottky contact에 대한 연구가 되었다.

최초의 UV detector 구조는<sup>27)</sup> glass 위에 adhesive layer로 Cr을 증착하고 그 위에 Mn을 툴 metal ohmic contact 물질로 사용하였다. 이때 In, Zn등을 또 다른 metal contact 물질로 사용하였으나 좋지 않은 결과를 보였다. n-type ZnO에 일함수가 큰 Au (0.7 eV)-contact을 이용하여 Schottky photodiode를 제작 그 특성을 조사하였다. I-V 특성 곡선에서,

$$I_0 = I[\exp(eV/nkt) - 1],$$

의 관계식에서  $I_0=40$  nA/mm<sup>2</sup>의 값을 보였고, n은 2.7-3.5 사이에서 변화하였다. UV cutoff 파장은 400 nm, 정도로 그 사이에서는 반응하지 않는 UV의 기본적 특성은 잘 보여주었으나, 양자효율(quantum efficiency)가 1% 미만의 저효율 수광 소자였다. 한편 DLTS 측정을

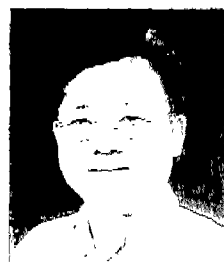
위하여, Schottky contact이 가능하였던 ZnO 시료의 전자 농도는 C-V에 의해 측정된 결과  $2.0 \sim 8.0 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  정도였다.<sup>28)</sup>

최근 R-plane (012) 사파이어 위에 MOCVD를 사용하여 제작된 n-type ZnO(110) 을 이용한 MSM구조의 Schottky detector의 개발이 보고되었다. 이때 사용한 Schottky 물질로는 Ag가 사용되었고 ohmic 물질로는 Al가 사용되었다. 위의 식에서와 같이 본 연구에서 보고된  $I_0 = 2.4 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ,  $n = 1.5$  였고, barrier height는 0.84 eV 정도로 측정되었으며, 5 V bias 전압에서 leak current는 1 nA 정도 였다. 한편 파장 응답성으로는 370 nm 근처에서 sharp한 cutoff 특성을 보였다.<sup>29)</sup>

### 참고 문헌

1. M. Razeghi and A. Rogalski, *J. Appl. Phys.* **79**, 7433 (1996).
2. G.R. Carruthers, *Electro-Optics Handbook*, ed. by R.W. Waynant and M.N. Ediger Chap. 15.(McGraw-Hill, New York, 1994).
3. T.E. Hansen, *Phys. Scr.* **18**, 471 (1978).
4. R. Korde and J. Geist, *Appl. Opt.* **26**, 5284 (1987).
5. R.D. Baertsch and J.R. Richardson, *J. Appl. Phys.* **40**, 229 (1969).
6. G. Zhao, T.Stacy E.M. Charlson, E.J. Charlson, M. Hajsaid, R. Roychoudhury, A.H. Khan, J.M. Meese, Z. He, and M. Prelas, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **339**, 191 (1994).
7. P. Glasow, G. Ziegler, W. Suttrop, G. Pensl and R. Helbig, *Proc. SPIE* **868**, 40 (1987).
8. D.M. Brown, E.T. Downey, M. Ghezzi, J.W. Kreichmer, R.J. Saia, Y.S. Liu, J.A. Edmond, G. Gati, J.M. Pimbley and W.W. Schneider, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-40**, 292 (1993).
9. Y. Hirabayashi, S. Karasawa, K. Kobayashi, S. Misawa, and S. Yoshida, *Sensors and Actuators A***43**, 164 (1994).
10. C.Frojd, G. Thungstrom, H.E. Nilsson, and C.S. Petersson, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **339**, 215 (1994).
11. M.M. Anikin, A.N. Andreev, S.N. Pyatko, N.S. Savkina, A.M. Strelchuk, A.L. Syrkin and V.E. Chelnokov, *Sensors and Actuators*, **A33**, 91 (1992).
12. I. Akasaki and H. Amano, *J. Electrochem. Soc.* **141**, 2266(1994).
13. H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki,

- Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 1256 (1989).
14. S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh and T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 1258 (1992).
15. M.E. Lin, G. Xue, G.L. Zhu, J.E. Greene, and H. Markoc, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 932 (1993).
16. M.E. Lin, Z. Ma, F.Y. Huang, Z.F. fan, L.H. Allen and H. Markoc, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1003 (1994).
17. I. Adesida, A. Mahajan, E. Andideh, M.A. Khan, D.T. Olsen and J.N. Kuznia, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2777 (1993).
18. M.E. Lin, Z.F. Fan, Z. Ma, L.H. Allen and H. Morkoc, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 887 (1994).
19. S.J. Pearton, C.R. Abernathy and F. Ren, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2294 (1994).
20. S.J. Pearton, C.R. Abernathy and C.B. Vartuli, *Electron. Lett.* **30**, 1985. (1994)
21. M.A. Khan, J.N. Kuznia, D.T. Olson, J.M. Van Hove, M. Blasingame and I.F. Reitz, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2917 (1992).
22. M. Misra, T.D. Moustakas, R.P. Vaudo, R. Singh and K.S. Shah, *Proc. SPIE* **2519**, 78 (1995).
23. M.A. Khan, J.N. Kuznia, D.T. Olson, M. Blasingame, and A.R. Bhattarai, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2455 (1993).
24. X. Zhang, P.Kung, D. Walker, J. Piotrowski, A. Rogalski, A. Saxler and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2028 (1995).
25. Q. Chen, M.A. Khan, C.J. Sun and J.W. Yang, *Electron. Lett.* **31**, 1781 (1995).
26. M.S. Shur and M.A. Khan, *Proc. SPIE* **2397**, 294 (1995).
27. H. Fabricius, T. Skettrup and P. Bisgaard, *Appl. Opt.* **25**, 2764 (1986).
28. J.C. Simpson and J.F. Cordaro, *J. Appl. Phys.* **63**, 1781 (1988).
29. S. Liang, H. Sheng, Y. Liu, Z. Huo, Y. Lu and H. Shen, *J. Cryst. Growth* **225**, 110 (2001).



### 최원국

- 1993. 2 연세대학교 물리학과 이학박사
- 1993-1994 University of Oregon, post-doc
- 1994-현재 한국과학기술연구원 막막기술연구센터 책임연구원