

## 受光素子

南銀洙·吳光龍·朴贊勇·朴景鉉

### I. 서론

광통신에서 광섬유가 최저손실을 보이는 파장대가 1.0~1.6 $\mu\text{m}$ 로 이동됨에 따라 이러한 장파장대에서 활용할 수 있는 광원과 수광소자의 개발이 불가피하게 되었다.

1.0~1.6 $\mu\text{m}$  파장대의 빛을 수광할 수 있는 물질로서는 InGaAsP, InGaAs, Ge, AlGaAsSb 등을 들 수 있는데 이 중에서 특히 InGaAsP, InGaAs를 이용한 수광소자는 높은 양자효율, 낮은 암전류, 높은 이득 때문에 현재 많이 연구되고 있다. 현재 광섬유의 최저손실이 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서~0.2dB/km 정도 이므로 광섬유 통신 시스템에서 1.55 $\mu\text{m}$  대의 광소자가 상당히 중요하게 부각되고 있다.

이러한 측면에서 특히  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 는 energy gap이 0.75eV 이어서 1.67 $\mu\text{m}$ 대까지의 파장을 수광할 수 있을 뿐 아니라 mobility, 유효

질량의 측면에서 Ge 등 다른 물질 보다 좋은 특성을 가지고, 있어서 광통신에 사용될 수 있는 detector의 재료로서는 가장 유망하다. 특히 InGaAs/InP 계는 다른 장파장 photodetector에 비해서 epitaxy 기술을 이용한 제작이 용이하고, 또한 이중접합 구조를 잘 설계하면 잡음이 적고 증배효율이 뛰어난 장점을 가질 수 있다. 수광특성면에 있어서 수광특성의 기준이 되는 신호대 잡음비가 다른 장파장 수광소자에 비해서 우수한 특성을 보이고 있다. 특히 APD의 경우 InGaAs/InP 계는 <111>면의 wafer를 사용했을 때 전자와 정공의 이온화 계수가 크게 달라서 S/N비가 우수한 특성을 보이기 때문에 현재 많이 연구되고 있다.

현재 본 연구소에서는 LPE 결정성장법으로 장파장 광통신용  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As/InP}$  계의 PIN 구조 수광소자 및 SAM APD 제작과

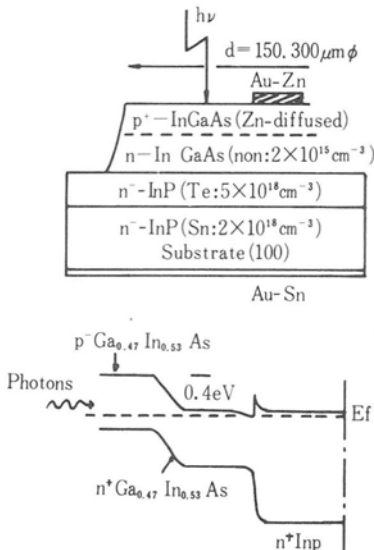
그 특성에 대해서 연구하고 있다.

## II. 수광소자의 구조 및 특성

In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 계의 수광소자는 크게 homojunction에 PN접합을 형성한 경우와 heterojunction을 형성해서 band gap이 큰 물질에 PN 접합을 형성한 것으로 분류할 수 있다.

Homojunction APD는 <그림 1>과 같이 InGaAs에 p-type impurity를 확산시켜서 PN junction을 형성시킨 구조로서 제작은 용이하나 InGaAs의 band gap이 작아서 높은 전장이 인가 되었을 때 상당히 큰 확산전류, 생성-재결합 전류가 생기고, 또한 전자가 valence band에서 conduction band로 tunneling되는 현상이 일어난다.

특히 InGaAs의 경우 전자의 유효 질량은 0.04m<sub>0</sub> 정도로 매우 작아서 tunneling 확률이 매우 높아져 주된 잡음의 원인이 된다. 여기서 m<sub>0</sub>는 진공중에서의 전자질량이다.



<그림 1> Homojunction APD의 구조 및 Energy Band Diagram

이러한 homojunction 구조에서의 tunneling current density는 아래와 같이 주어진다.

$$J_t = \sqrt{(2m^*/Eg)} \left( \frac{q^3 F^2 W}{2\pi\hbar} \right) \exp\left( \frac{-\pi^2 \sqrt{2m^* E^3 g}}{2q\hbar F} \right)$$

여기서

$E_g$  = band gap

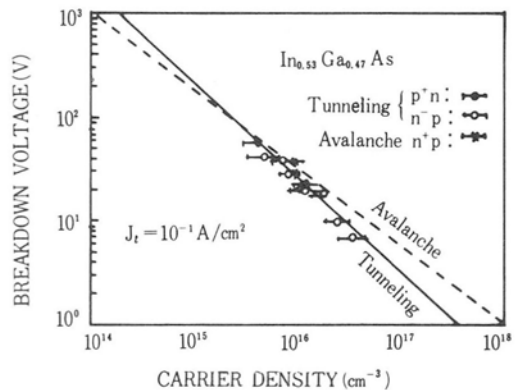
$m^*$  = 전자의 유효질량

$F$  = electric field strength

$W$  = tunneling region 두께

$\hbar$  = Planck constant이다.

Tunneling current에 의해서 breakdown이 일어나는 Zener breakdown과 impact ionization 효과에 의해서 일어나는 avalanche breakdown의 관계를 carrier 농도의 함수로서 나타내면 <그림 2>와 같다.



<그림 2> Carrier 농도와 Breakdown 전압의 상관관계

<그림 2>에서 carrier 농도가  $\sim 2 \times 10^{15}$  이상에서는 tunneling에 의한 breakdown 전압이 avalanche breakdown 전압보다 낮음을 알 수 있고 실험적으로 구한 avalanche breakdown 전압은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$V = 60 \sqrt[3]{\frac{E_g}{1.1} \left( \frac{N}{10^{16}} \right)^{-\frac{3}{4}}}$$

여기서  $N$ 은 carrier 농도,  $E_g$ 는 band gap이다.

이와같이 homojunction을 이용한 수광소자는 여러가지의 잡음요소를 많이 가지고 있기

때문에 <그림 3>과 같이 광을 흡수하는 층과 증폭시키는 층을 분리한 SAM-APD (Separated Absorption and Multiplication Region) 의 형태로 만들어서 잡음의 요소를 줄이고 있다. InGaAs/InP 계를 이용한 SAM APD는 <그림 3>과 같다.

<그림 3>에서와 같이 band gap이 작은 InGaAs 층에서 빛을 흡수하고 band gap이 큰 InP 층에 P<sup>+</sup>N junction을 형성해서 multiplication 시킴으로써 homojunction APD에서 문제가 되는 tunneling 전류를 줄여주고, 또한 InP 층의 두께 및 junction을 형성하는 carrier 농도를 조절하면 낮은 암전류 및 높은 multiplication 특성을 얻기가 용이하다. 그러나 InGaAs 위에 InP를 epitaxy 할 경우 meltback 문제가 발생하여서 많은 문제를 갖고있기 때문에 파장이 약 1.3μm대의 InGaAsP 4 원층을 InGaAs 위에 epitaxy 하여 InGaAs와 InP의 energy gap 차이로 인해서 경계면에 전하

가 쌓이는 현상을 줄여주고 또한 응답속도를 빨리하여 준다.

특히 planar type SAM APD는 표면보호가 용이하고 높은 breakdown 전압을 얻기 위한 guardring 구조를 쉽게 만들 수 있어서 지속성과 안정성이 특히 중요시되는 광통신 시스템의 소자로 적합하다. 또한 InGaAs/InP 계의 APD에서는 결정방향이 잡음과 multiplication 특성에 크게 영향을 미친다.

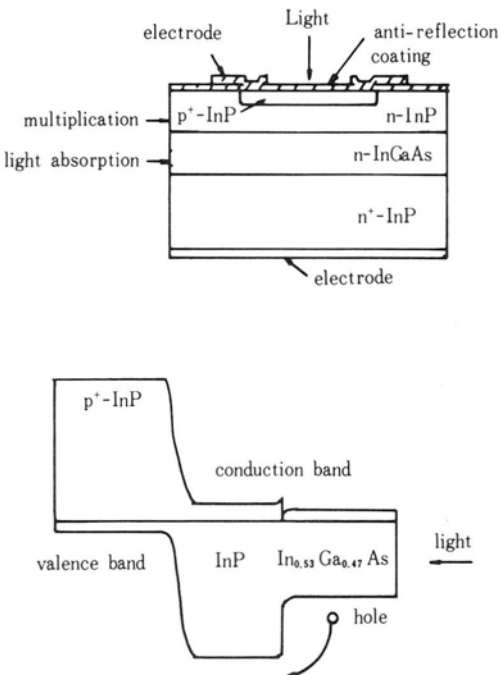
APD에서의 multiplication mechanism인 impact ionization은 반도체의 energy band 구조에 따라 밀접한 관계를 가지고 있어서 전자와 정공의 이온화계수 비율인 "K" 값이 작은 방향을 선택해야 한다. InP의 경우 <111> 방향이 <100> 방향보다 "K" 값이 작으므로 multiplication에 의한 noise가 작아서 SAM APD의 wafer로서 적합하다.

### III. 수광소자의 제작

일반적으로 InGaAs/InP 계의 수광소자 제작을 위한 결정성장 방법은 LPE, MOCVD, VPE, MBE 등의 결정성장 방법을 들 수 있다.

현재 본 연구소에서 사용하고 있는 LPE 방법의 경우 LD epitaxy용 LPE 장비를 공동으로 사용하고 있으며 결정성장 과정은 multi-bin graphite boat를 이용해서 InP 위에 In buffer layer를 성장시키고 In에 GaAs, InAs 결정을 상평형도에 따라서 적정량을 용해시켜 600°C ~ 650°C에서 결정을 성장시킨다. 이러한 온도의 설정은 LPE의 경우 600°C 이하에서는 P성분의 용해에 문제가 있어서 부적당하고 670°C 이상에서는 InP wafer의 thermal etching이 심각해져서 문제가 되기 때문이다.

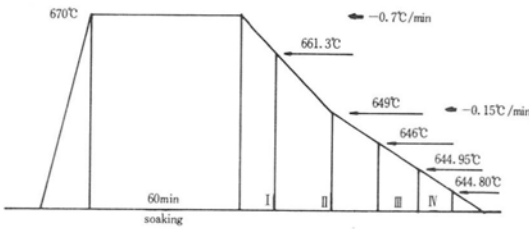
이외의 LPE 성장방법에 관한 자세한 내용은 발광소자 제작과정에서 열거 하였으므로 여기에서는 생략한다. <表 1>과 <그림 5>는 InP wafer 위에 650°C에서 성장시킨 InGaAs를 나타낸다.



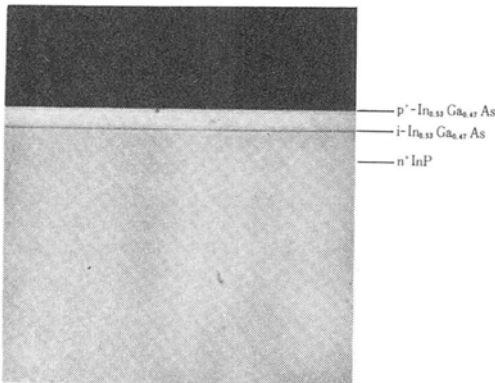
<그림 3> SAM APD의 구조 및 Energy Band Diagram

〈表 1〉 각 성장층의 재료량

성장 재료	I	II	III	IV
In (g)	5	5	5.07	5.19
InP (mg)		50		
GaAs (mg)			182.1	186
InAs (mg)			346.0	353.6
Sn		50		
Zn				0.2
온도	661.3°C	661	646	644.95
시간	30sec	2220sec	420sec	60sec



〈그림 4〉 성장온도 Program

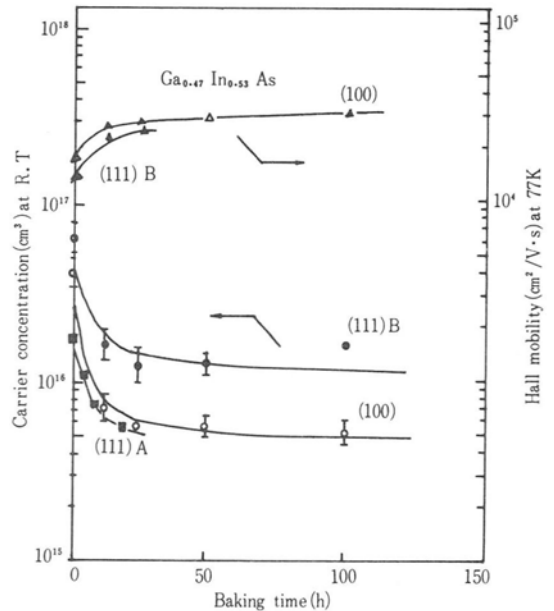


〈그림 5〉 InGaAs/InP 성장층의 단면

수광소자의 경우 InGaAs층의 전하 농도는  $\sim 10^{15}$  이하가 되어야 우수한 특성을 보일 수 있기 때문에 높은 순도의 InGaAs층 성장이 가장 문제가 된다. 이러한 고순도의 InGaAs층의 성장을 위해서는 높은 온도의 수소분위기에서 장시간 baking이 큰 효과가 있는 것

으로 알려져 있다. 이는 In의 불순물 근원인 Si의 농도가 석영관과  $H_2$  반응에서 낮아지기 때문으로 알려져 있다. 효과적인 baking 온도와 시간은 약  $700^\circ C$ 에서 10시간 정도가 가장 효과적인 것으로 알려져 있다.

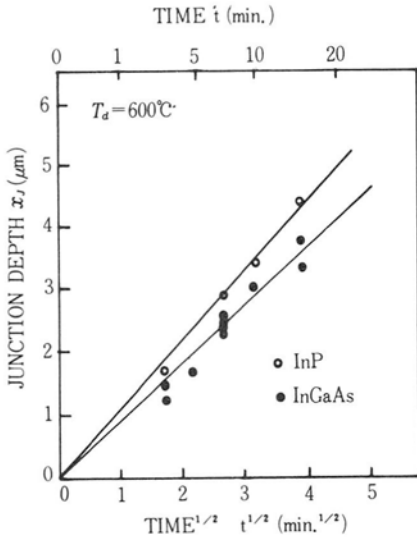
〈그림 6〉은  $670^\circ C$ 에서 baking 시간에 따른 각 방향의 carrier 농도를 나타내고 있다. 〈그림 6〉에서 〈111〉 B면이 〈111〉 A면보다 2배 정도의 높은 carrier 농도를 갖고 있는 것을 알 수 있다.



〈그림 6〉 Baking 시간이 Carrier 농도에 미치는 효과

III-V족 반도체의 PN junction 형성을 위해서는 확산공정을 주로 사용한다. P-type 확산 source로서는  $Zn_3P_2$ ,  $ZnAs_2$  등이며 확산 방법은 보통 wafer와 확산 source를 함께 석영관 속에 넣어서  $\sim 10^{-6}$ Torr의 진공속의 고온에서 한다. 이 때 발생하는 phosphorus

vapor는 높은 온도에서 InP wafer 표면이 받는 열손상을 방지하여 준다. Zn를 600°C 에서 InP와 InGaAs에 확산하였을 경우 시간에 따른 junction깊이는 <그림 7>과 같다.



<그림 7> 확산시간에 따른 확산깊이

수광소자 제작의 마지막 공정으로서 전극 형성과 보호막 증착은 보통 p-type 전극으로서는 Au/Zn 합금이 사용되고 n-type 전극으로서는 Au/Ge/Ni이 사용된다. 보호막은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 plasma CVD로 1,500~2,000 Å 정도로 증착하여서 표면 누설전류를 줄여주고 양자효율을 높여준다.

결론적으로 InGaAs는 최저손실을 갖는 장

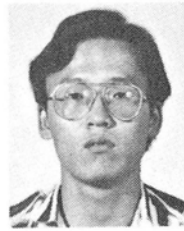
파장 광통신 시스템에서 수 GHz 대역까지 수광할 수 있는 전하이동도 또한 1.55 μm 파장을 수광할 수 있는 energy gap, 큰 S/N비, 그리고 설계가변성 때문에 앞으로 통신용 수광소자로서의 사용이 커질 것으로 기대된다.

<參 考 文 獻>

1. T. P. Peardall, "Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As : A Ternary Semiconductor for Photodetector Applications," IEEE J. Quantum Electron. Vol. QE-16 pp. 709~720, July, 1980.
2. S. Yamazaki, K. Nakajime, and Y. Kishi, "LPE Growth for (111)A InP/InGaAs Heterostructure Avalanche Photodiode," Fujitsu Sci. Tech. J., pp. 329~383, Sep. 1984.
3. Y. Suematsu, Optical Devices and Fibers. OHM, North-Holland.
4. Y. Matsushima, K. Sakai, S. Akiba, and T. Yamamoto, "Zn Diffused In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP APD," Appl. Phys. Lett., Vol. 35, pp. 466~468, Sep. 1979.
5. R. F. Leheny, R. E. Nahory, M. Pollack, E. D. Beebe, and J. C Dewinter. "Characterization of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As Photodiodes Exhibiting Low. Dark Current and Low Junction Capacitance." IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-17, pp. 227~231, Feb. 1981.



南 銀 洙 (Nam, Eun Soo)  
 1960년 10월 28일생  
 1983. 2 : 경북대학교 자연과학  
 대학 물리학과 학사  
 1985. 2 : 영남대학교 이과대학  
 물리학과 석사  
 1985. 2~현재 : 한국전자통신 연구소  
 광소자 연구실연구원



吳 光 龍 (Oh, Kwang Ryong)  
 1959년 1월 19일생  
 1982. 2 : 서강대학교 이공대학  
 물리학과 학사  
 1985. 2 : 한국과학기술원 물리  
 학과 석사  
 1985. 2~현재 : 한국전자통신연구소  
 광소자연구실 연구원



朴贊勇(Park, Chan Yong)  
 1959년 7월 21일생  
 1982. 2 : 서울대학교 자연과학  
 대학 물리학과 학사  
 1986. 2 : 한국과학기술원 물리  
 학과 석사  
 1986. 2~현재 : 한국전자통신연구소  
 광소자연구실 연구원



朴景鉉(Park, Kyung Hyun)  
 1960년 6월 11일생  
 1983. 2 : 경북대학교 사범 대학  
 물리학과 학사  
 1985. 2 : 한국과학기술원 물리  
 학과 석사  
 1985. 2~현재 : 한국 전자통신 연구소  
 광소자연구실 연구원