공학석사 학위논문

도파로형 PIN 포토다이오드의 해석 및 LPE를 이용한 InGaAs층 성장에 관한 연구

A Study on Analysis Waveguide PIN Photodiode and InGaAs Layer Growth of using LPE System

지도교수 박 동 국

2004년 2월

한국해양대학교 대학원

전자통신공학과

유 재 환

-목 차-

Abstract

제 1 장 서 론 · 1

제 2 장 WGPD의 특성 · · · · · · · · · · · · · · · · · · 5

2.1 PIN PD의 동작원리 · · · · · · · · · · · · · · · · · 5

2.2 WGPD의 특성 · 8

제 3 장 WGPD의 설계 및 흡수층의 결정성장 · · · · · 16

3.1 WGPD의 설계 · 16

3.2 LPE 방법을 이용한 i-InGaAs/InP 결정성장 · · · 24

제 4 장 결 론 · 39

참고문헌 · 41

ABSTRACT

For a long wavelength photodiode of optical communications, p-i-n diode, MSM(Metal-Semiconductor-Metal) diode, photoconductor, APD(Avalanche Photodiode) are used. And photodiodes with high efficiency and broad bandwidth are the key devices for feature wide-band optical communication systems. This device has problems of increasing quantum efficiency and transit time according to the increase of absorption in i-layer. Transit time can be reduced using by thin absorbing layer. The light injects toward the lateral direction in the WGPD(Waveguide p-i-n Photodiode) and widen bandwidth. A conventional surface-illuminated PD requires vertical mounting of the PD chip or 90° bending of input light by optical reflection in the module assembly. These complicated assembly procedures lead to a low yield and high assembly cost. On the other hand, a well-designed WGPD is usually passively aligned to the defined position on a module board, then flip-chip mounted without wire bonding.

In this paper, the WGPD consists of two transparent InGaAsP guiding layers with refractive index of 3.39 at 1.3㎛ and a 1.5㎛ bandgap InGaAs with an index at 1.5㎛ of 3.59.

The epitaxial layers were grown by horizontal LPE(Liquid Phase Epitaxy) apparatus on a n-InP substrate. i-InGaAs epi layer was grown at 630℃ with cooling rate 0.6℃/min by horizontal LPE apparatus. The growth thickness of i-InGaAs layer was about 1.3㎛ and these conditions were not satisfied. Because of source baking

time were not enough as 6hr.

And then, we did carry out source baking during a 24hr. It is that the condition of i-InGaAs layer were steadily getting better. For a long source baking time, the source's impurity concentration was reduced. In this case, i-InGaAs epi layer was grown at 630℃ with cooling rate 0.6℃/min. The process of growth was similar previous condition and these thickness was 1.5㎛. It could be found that the characteristics of WGPD fabricated by 24hr backing time were better than by 6hr.

The fabricated device has an external quantum efficiency of 68% as well as a cut-off frequency of 4.5GHz at 1.55㎛ wavelength.

For improving operation characteristics of WGPD, we need both transit time and frequency response. It is considered that the characteristics of the width, length, and thickness of waveguide photodiode's i-InGaAs layer.

Moreover, I will suggest that a new waveguide structure and analysed using BPM(Beam Propagation Method) for increasing coupling efficiency between optical fiber and waveguide photodiode.

제 1 장 서론

최근 들어 가장 활발한 연구가 진행 중인 과학 기술 분야 중 하나가 화합물 반도체를 이용한 광소자의 연구 개발 분야이다. 이러한 연구는 현재 활발하게 연구 개발되고 있는 디스플레이 소자와 정보통신 분야와 같은 고부가가치 산업으로써 세계적으로 그 가치를 인정받고, 국내에서 또한 가장 활발하게 연구, 개발되고 있는 산업으로 자리 잡고 있는 추세이다[1].

1962년에 레이저 다이오드가 발명되었고[2]-[4], 1979년에 1.55㎛ 파장 근처에서 Rayleigh 산란 한계치인 0.2dB/㎞ 의 손실을 갖는 광섬유 제조 기술이 개발된 이후[5], 세계 각국에서 광통신에 관한 경쟁적인 연구가 시작되어 이미 2.5Gbps 동기식 광전송 시스템이 운용되고 있으며, 10Gbps급 광전송 시스템이 상용화 단계에 접어들었다. 1990년 초에 1.5㎛ 파장대의 광 증폭기인 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)의 상용화로 장거리 전송분야에서 획기적인 개가를 올리는 등 광소자 분야에서의 발전은 대용량 광전송 시스템 개발로 이어지고 있다.

광통신에 이용되는 반도체 소자는 레이저 다이오드(Laser Diode : LD)와 포토 다이오드(Photo Diode : PD)가 대표적이며, LD는 Fabry Perot, DFB(Distributed Feed Back)로 구분되고 PD는 PIN, APD(Avalanche Photodiode) 그리고 waveguide photodiode(WGPD)로 구분되어진다.

광소자를 구현하기 위해서는 실리콘 반도체보다 물질특성이 광에 적합한 화합물 반도체인 InP를 주로 사용하며, GaAs를 사용하는 경우도 있다. 현재의 광통신은 완전한 전광(All Optical)방식이 아닌, 광전 또는 전광변환에 의한 통신이며, 인터넷 등의 트래픽 증가에 따른 통신망의 고속 및 대용량화 추세에 따라, 관련 광소자 및 전자소자가 고속화되고 있다. 현재 완전히 상용화되었다고 할 수는 없지만, 40Gbps 급으로 동작하는 광소자 및 전자소자가 일반화되고 있으며, 이에 따라 통신망의 전송

용량도 Tbps 급으로 대용량화되고 있다[6], [7].

현재의 장파장대(1.3㎛~1.55㎛)의 광통신 시스템에서 사용될 수 있는 수광소자의 재료로서는 Ge와 InGaAs가 존재하는데, 이중에서 Ge은 에너지 갭이 작아서 온도의 상승에 따른 암전류의 증가율이 높고 증배 과정에서 발생되는 과잉잡음이 심하며, 또한 석영계 광섬유의 최저손실 파장인 1.55㎛대에서 재료 특성상 광흡수가 간접 천이 형태로 전환되어 양자효율이 급격히 떨어진다. 이에 반해서 InGaAs/InP는 에너지 갭이 Ge보다 크기 때문에 온도에 따른 암전류의 증가율이 낮고 전자 이동도와 흡수계수 등의 재료특성이 우수하다. 따라서, Ge APD는 1.3㎛ 파장에서 100Mbps의 경우 10^{-9} BER(Bit Error Rate) 수신감도가 40dBm인 반면 InGaAs/InP 광검출기는 Ge 수신기와 동일한 조건 하에서 -45dBm의 값을 가진다. 이러한 InGaAs/InP계의 수광소자에 대한 개발은 선진국에서 크게 PIN, InGaAs/InP PIN FET(Field-Effect Transistor)의 형태로 이루어지고 있다. 이 가운데 PIN형의 InGaAs/InP 광검출기는 많은 연구가 진행되어 현재 시중에 판매되고 있는 수준에 도달하였고 InP/InGaAs/InP SAM(Separate Abosortion and Multilplicaion) APD는 현재 Bell Lab., Fujitsu Lab. 등에서 결정성장기술, 단위공정기술, 패키징(Packaging) 기술 등의 안정화를 이룩하여 곧 상용화가 될 것으로 전망된다[8]-[10].

그리고 수신기의 대역폭 및 수신감도의 개선을 위해서 초격자 구조의 APD 및 OEIC(Opto-Electronic Integrated Circuit) 형태의 WGPD가 연구되고 있다[11]. 개별 광부품의 조립에 비해 소형, 저가격, 저전력 소모, 그리고 고속의 특징을 갖는 집적광학(Integrated Optics) 기술개발은 1969년 Bell 연구소의 밀러(S.E. Miller)에 의해 제안된 이래 OEIC 연구 등으로 활발히 이어져 왔다[12].

최근 실리콘 기판상에 광섬유와 같은 재료인 실리카로 광도파로를 형성하는 PLC(Planar Lightwave Circuit) 기술 및 발광/수광 소자들에 대한 새로운 접합기술이 제시되면서 통신분야에서 광집적기술의 실용화가

급진전되고 있다.

광모듈의 경제성 제고를 위한 구체적인 방법으로 하이브리드 광집적 기술에 의한 부품수의 감소, 수동조립방식(passive alignment)의 채택 즉, 소자를 동작시키지 않은 상태에서 조립함으로써 전체 조립시간의 단축, 그리고 광 커넥터 부분의 부품감소 등을 들 수 있다.

광송신용 LD의 경우, 지금까지 광섬유와의 결합을 위해 복잡한 렌즈계를 사용해 왔으나 빔직경이 변환된 레이저다이오드(Spot Size Converted LD : SSC-LD)를 사용하면 렌즈 없이도 광섬유와의 높은 결합효율을 유지할 뿐만 아니라, flip-chip bonding 기법을 사용한 수동조립방식이 가능해져 비용을 크게 낮추는 것이 가능하다.

한편, 광수신용 수광소자(PD)도 발광소자와 마찬가지로 PLC 플랫폼을 기반으로 한 저가격 연구가 활발히 이루어지고 있다.

광 네트웍 유닛(ONU ; Optical Network Unit)에 적용하기 위한 PD는 저가격, 고감도, 저전압 구동 등의 특성이 요구되며, 고감도 특성은 높은 결합효율, 높은 양자 변환효율에 의해 실현된다. 또한 저가격 특성의 실현을 위해서는 종래의 반도체 표면에 수직방향으로 광을 입사시키는 면형구조(surface-illuminated structure)에서 LD와 같이 반도체 표면에 수평방향으로 광을 입사시키는 WGPD가 효과적이다[13].

기존의 PIN PD는 양자효율을 높이기 위해서는 흡수층의 두께를 크게 해야하며, 따라서 전자와 정공의 천이시간이 길어져서 고속 수신용으로는 적합하지 않았다. 그러나, WGPD는 양자효율과 대역폭을 거의 개별적으로 조절할 수 있고, 흡수층의 두께를 얇게 할 수 있어서 천이시간을 줄일 수 있는 장점이 있어서 이에 관한 연구가 활발히 진행중이다[14], [15].

따라서, 본 논문에서는 광통신 시스템의 수광소자 중 하나인 WGPD를 해석을 통해서 흡수층의 두께를 고려하고, 수평형 LPE 장치를 이용하여 고순도의 InGaAs 흡수층을 성장시켰다.

본 논문의 구성은 다음과 같다.

제 2 장에서는 WGPD를 제작하기 위하여 PIN PD의 동작원리와 WGPD 제작시 고려사항 등을 검토하였다.

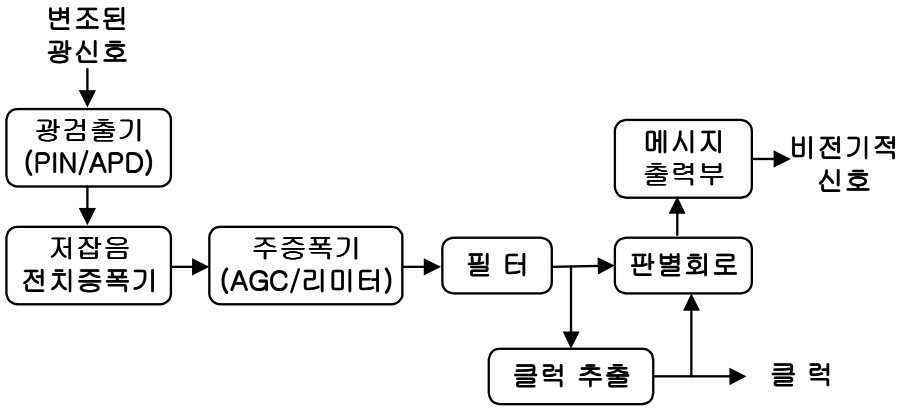
제 3 장에서는 광통신 시스템에서 수광소자의 동작에 있어서 고속동작과 높은 주파수 특성을 동시에 만족할 수 있는 WGPD의 흡수층 두께, 폭 그리고 흡수영역의 길이에 따른 커패시턴스 값과 주파수 응답특성과의 관계를 살펴봄으로써 소자가 가질 수 있는 특성을 평가하였다. 그리고, 구조적인 해석을 바탕으로 수평형 LPE 장치를 이용하여 InP 기판에 고순도 InGaAs 에피층 성장에 관해서 기술하였다.

제 4 장에서는 해석과 결정성장 된 WGPD의 흡수층의 두께와 흡수층 내의 불순물 농도에 대해서 살펴보고 결과들을 정리하였다.

제 2 장 WGPD의 특성

2.1 PIN PD의 동작원리

광 수신기의 역할은 광통신 시스템을 통하여 전송된 광신호를 다시 전기적으로 변환시켜 데이터를 복구하는 것으로써 블록 다이어그램은 <그림 2-1>과 같이 나타낼 수 있다. 수신되는 광신호는 광 검출기를 통해 전기적 신호로 변환된 다음 전치 증폭기와 주 증폭기에 의해 신호 처리하기 충분한 크기의 신호로 증폭되어진다. 아래 그림의 광통신 시스템에서 주증폭기(AGC/리미터)는 신호가 전송되는 동안 여러 가지 비선형 효과들로 왜곡된 신호를 보정하는 역할을 하며, 필터는 신호 대 잡음비 특성의 개선을 위해 사용된다[16].



<그림 2-1> 광수신기의 기본구조

<Fig. 2-1> Basic structure of optical receiver

광통신 시스템에서 광수신기의 주된 광소자는 광 검출기로서 광전효과에 의해 광 신호를 전기적 신호로 변환시키는 역할을 한다. 광 검출기는 광원과 같이 고감도, 빠른 응답속도, 저잡음, 고신뢰도, 그리고 광섬유 코

어의 직경과 동일한 직경 등을 가지는 것이 중요하다. 광검출 프로세스의 기본적인 메카니즘은 수광면을 통해 입사되는 광자의 에너지가 광 검출기의 밴드갭 에너지보다 크면 광자가 반도체에 의해 흡수될 때마다 전자-정공 쌍이 생성되어, 여기에 인가된 역 바이어스 전압에 의해 형성된 전계에 의해서 전자와 정공이 반도체를 가로질러 전극으로 이동하여 광전류가 발생하게 된다.

광다이오드에서는 신호 대 잡음비, 대역폭, 수광효율, 암전류 그리고 응답속도 등이 소자의 특성을 결정하는 주요소이며, 일반적으로 PIN PD와 APD가 이용되고 있다[17].

광통신 시스템에서 수신기의 수광감도를 높이면 레이저 다이오드의 출력을 높이는 것과 같이 전송거리가 증가되므로 광 검출기의 광자-전자 변환효율인 양자효율의 증대가 필요하다.

현재 광통신 광검출기로써 가장 많이 사용되고 있는 PIN PD는 반도체의 p층과 n층 사이에 높은 저항을 갖는 진성층을 성장시킨 단순한 구조로 진성층에서 광을 흡수하여 광에너지를 전기적으로 변환시키는 원리를 이용한다.

광다이오드의 수광효율(responsivity, R)은 A/W의 단위를 가지고, 양자효율 η의 식으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{\text{전자의발생률}}{\text{광자의발생률}} = \frac{I_P/q}{P_i/h\nu} = \frac{h\nu}{q}R \qquad (2\text{-}1)$$

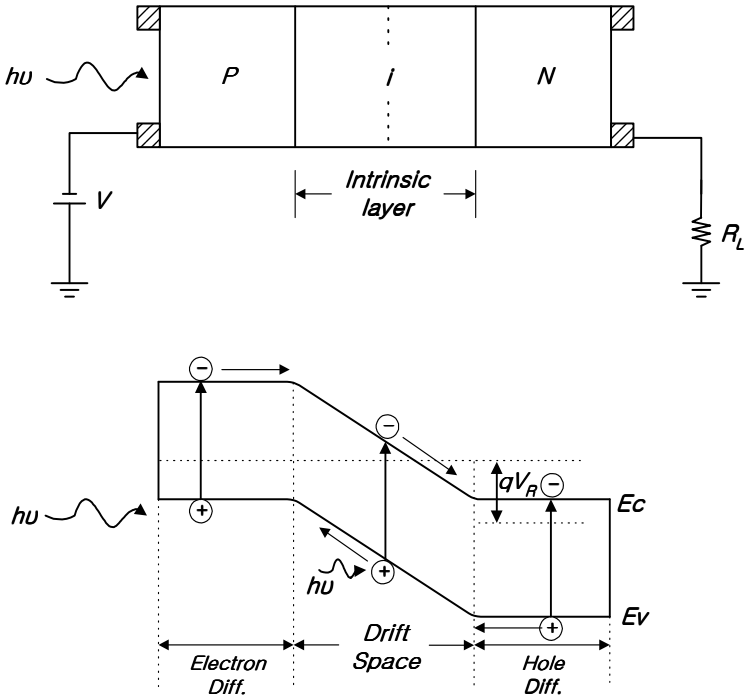
식 (2-1)을 통해서 수광효율 R은 ㎛로 표시된 파장(λ)에 대해 아래와 같은 식으로 다시 표시가 가능하다.

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} \approx \frac{\eta\lambda}{1.24} \qquad (2\text{-}2)$$

식 (2-1)과 (2-2)에서 I_P, q, P_i, 그리고 $h\nu$는 각각 PD에 의해 생성된 광전류, 전하량, 입사광의 세기 그리고 광에너지를 나타낸다. 식 (2-2)에 의하면 PD의 수광효율은 파장(λ)에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

일반적으로 PIN PD의 수광효율은 0.75~0.95 A/W 정도이며, 장파장일수록 수광효율이 높다. PIN PD의 수광효율과 대역폭은 서로 상반되는 관계를 가진다. 즉, 수광효율을 높이면 대역폭이 줄어들고 대역폭을 늘리면 수광효율이 낮아지므로 응용목적에 따라 적절하게 사용하여야 한다.

<그림 2-2>는 PIN PD의 동작원리를 에너지 다이어그램으로 나타낸 것이다.



<그림 2-2> PIN 광다이오드의 구조와 에너지 다이어그램

<Fig. 2-2> Structure and energy band diagram of PIN photodiode

<그림 2-2>에서 나타난 바와 같이 광이 입사되면 캐리어가 발생하여

인가된 역 바이어스 전압에 의해 전자-정공이 재결합되지 않고 빠른 속도로 이동하게 된다. 또한 역바이어스 전압에 의해 공핍영역이 증가하여 RC 시정수가 감소되고 응답속도가 빨라지게 된다.

진성층은 자유전하가 존재하지 않으므로 높은 저항을 나타내며, 진성층 내에 강한 전기장이 형성되어 PN 접합 반도체의 공핍층과 같은 효과를 나타낸다. 결국 진성층이 있는 PIN PD는 PN 접합 반도체에 비해 공핍층의 길이가 길어진 효과를 가지게 됨을 알 수가 있다. PIN PD로 입사된 광은 가전자대의 전자와 충돌하여 가전자대의 전자를 전도대로 여기시키게 된다. 여기된 전자는 광다이오드 내를 흐르게 되고, 이로 인해 전류가 발생하게 된다.

2.2 WGPD의 특성

WGPD의 특성을 결정짓는 요소는 양자효율, 암전류, 커패시턴스 그리고 RC 시정수 등이 있다. 여기서 양자효율은 수광면을 통해서 입사하는 광을 얼마만큼 많이 전류로 변환하는가를 측정하는 요소이며, 암전류는 잡음, 특히 Short 잡음의 원인이 되는 요소이다. 그리고, 커패시턴스는 주파수 응답을 결정짓는 요소로 수신감도에 밀접한 관계를 가진다. 마지막으로 RC 시정수는 응답시간을 결정지으며, 대역폭과 관련된 요소이다.

광다이오드의 특성을 나타내는 요소 중 양자효율(η)에 관해서 살펴보면 다음과 같다.

광원으로부터 광다이오드로 입사되는 광의 에너지는 총 3가지의 메카니즘(자유전하 흡수, 다른 대역간의 흡수, 대역과 불순물간의 흡수)을 통해서 흡수가 이루어지는데, 그 중에서 다른 대역간의 흡수가 지배적인 역할을 한다. 따라서 일반적으로 양자효율은 다른 대역간의 흡수만을 고려하며, 양자효율은 광에 의해 생성된 전하쌍의 수를 입사광의 수로 나

눈 것으로 식 (2-3)으로 나타낼 수가 있다.

$$\eta_{ex} = \left(\frac{J_{ph}}{q}\right)/\left(\frac{P_{in}}{A_{pn}h\nu}\right)$$
$$= (1-r)\{1-[\exp(-\alpha_{ab}W)]/(1+\alpha_{ab}L_{ep})\} \quad (2\text{-}3)$$

여기서 q는 전하량, $h\nu$는 광에너지, r은 반도체와 공기간의 프레넬 반사계수, P_{in}은 입사광의 세기 그리고 L은 흡수층의 길이를 나타낸다.

PIN PD 제작의 최종 목표는 100%에 가까운 양자효율을 갖도록 하는 것인데, 반도체는 일반적으로 입사광의 약 30%를 반사한다.

PD의 또 다른 중요 요소인 암전류는 다음과 같은 특성을 가진다.

PIN PD는 역바이어스 전압하에서 동작하는 소자이므로 역바이어스 전압에서 광신호가 없을 경우, 이때 흐르는 전류는 잡음으로 작용하게 되며, 이를 암전류(또는 누설전류)라고 부른다.

암전류의 생성 원인은 p층의 소수 캐리어인 전자와 n층의 소수캐리어인 정공이 공핍층으로 확산되는 확산전류와 공핍층 내에서의 열적으로 생성되는 전자-정공쌍이 전기장에 의해 분리되어 발생하는 전류, 그리고 터널링 효과, 표면 누설전류, pn 접합부내에 존재하는 결정결함에 의한 전류 등에 의해서 발생할 수가 있다[22]-[24]. 여기서, 표면 누설전류는 패시베이션을 잘 해주면 제거할 수 있고, pn 접합 내(공핍층 내부)에 존재하는 결정결함에 의한 전류는 결정성장을 완전하게 함으로써 무시할 수 있는 수준까지 낮출 수가 있다. 이러한 확산에 의한 암전류는 p 및 n 층에서 열적으로 생성된 소수 캐리어의 공핍층으로의 확산에 의한 성분으로 식 (2-4)의 Shockley 방정식으로 표현할 수가 있다.

$$I_{diff} = I_s[\exp(qV/kT) - 1] \quad (2\text{-}4)$$

여기서 k는 Boltzmann 상수, T는 접합부 온도를 나타내며 V는 인가 전압, 그리고 I_s는 포화전류를 나타낸다.

공핍층에서 캐리어의 생성 및 재결합에 의해 발생하는 암전류는 밴드 갭 중앙 부근의 트랩에서의 방출에 의한 캐리어의 순수 생성(net generation)에 기인하는 성분으로 아래의 식 (2-5)와 같이 나타낼 수가 있다[25].

$$I_{gr} = \frac{q n_i A d}{\tau_e}[\exp(qV/2kT) - 1] \quad (2\text{-}5)$$

여기서 A는 수광면적, d는 흡수층의 두께, V는 역바이어스 전압, 그리고 τ_e는 캐리어 유효수명(effective lifetime)을 나타낸다. 캐리어의 양자 터널링에 의해 발생하는 암전류 성분은 식 (2-6)과 같이 표현할 수가 있다[11].

$$I_t = \text{¥} A \exp[-2\pi\Theta m_0^{1/2} E_g^{3/2}/(ghE_m)] \quad (2\text{-}6)$$

여기서 m_0는 자유전하 질량이고 h는 Plank 상수 그리고 E_m은 공핍층의 최대 전기장을 나타낸다.

PD에서의 커패시턴스는 공핍층에서의 전자와 정공에 의해 발생되며, 이는 RC의 값에 영향을 끼쳐 PD의 대역폭을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 특히, 검파회로의 전체적인 견지에서 전체 용량을 증대시킴으로써 수신감도 R에 영향을 주게 된다.

일반적으로 커패시턴스 C 값은 PN 접합이론에서 주어진 공핍층의 두께 d에 의해서 결정되며, 식 (2-7)과 같이 주어진다.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

$$= A\left(\frac{q\varepsilon N_D 2}{(V_{bi} + V_A)} \right)^{1/2} \quad (2\text{-}7)$$

그리고 식(2-7)을 요약하면 커패시턴스 C 값은 식 (2-8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = A\sqrt{\frac{N_D}{V_A}} \quad (2\text{-}8)$$

식 (2-8)에서 A는 활성영역의 면적이고 N_D는 공핍층의 불순물 농도, V_A는 가해준 역바이어스 전압이다. 따라서, 광통신 시스템의 광대역·고속의 수광소자로 사용되기 위한 PD의 설계시 커패시턴스 C 값을 줄여야한다. 커패시턴스 C 값을 줄이기 위해서는 수광소자의 활성영역을 줄여야 한다.

접합이론에서 $N_D \gg N_A$ 인 경우에, 공핍층의 두께와 커패시턴스는 식 (2-9)와 같이 나타낼 수 있다.

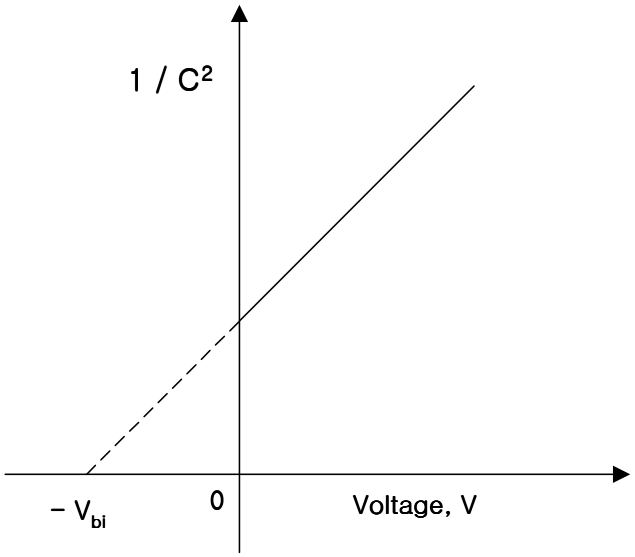
$$d = \left[2\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 \frac{(V_{bi} + V)}{q N_D} \right]^{1/2} \quad (2\text{-}9)$$

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 q N_D}{2(V_{bi} + V)} \right]^{1/2} \quad (2\text{-}10)$$

위의 식 (2-10)으로부터,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} + V)}{A^2 q \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 N_D} \qquad (2\text{-}11)$$

로 나타낼 수 있고, A는 pn junction의 면적이다.



<그림 2-3> 접합용량(C), 인가 전압(V)의 함수

<Fig. 2-3> Junction capacitance, C, as a function of applied voltage, V

<그림 2-3>에서 $1/C^2 = 0$ 인 위치는 내부전위 V_{bi}와 상관관계가 있고, 그래프를 연장시켜서 x축에 만나는 점이 내부전위 값이다. 그리고 PN 접합이론 중에서 abrupt junction은 성장된 접합 면에서 형성되는 반면에, diffusion junction은 불순물 확산에 의해서 형성되고 이는 종종 graded junction이라고 한다.

graded junction은 공간전하 분포에 대한 Poisson's equation을 푸는 것으로 계산이 가능하다. linearly-graded junction의 경우에 공간전하분포는 식 (2-12)와 같은 식으로 나타낼 수 있다[21].

$$\rho(x) = q\alpha_{grad}\, x \tag{2-12}$$

위의 식 (2-12)에서 $\alpha_{grad}\,[cm^{-4}]$는 불순물 농도 기울기이다.

$$V_{bi} = \frac{q\alpha_{grad}\, d^{3}}{12\varepsilon_s\varepsilon_0} \tag{2-13}$$

$$d = \left(\frac{12\varepsilon_s\varepsilon_0 V_{bi}}{qa}\right)^{1/3} \tag{2-14}$$

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s^{2}\varepsilon_0^{2} q\alpha_{grad}}{12(V_{bi}+V)}\right]^{1/3} = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_0}{d} \tag{2-15}$$

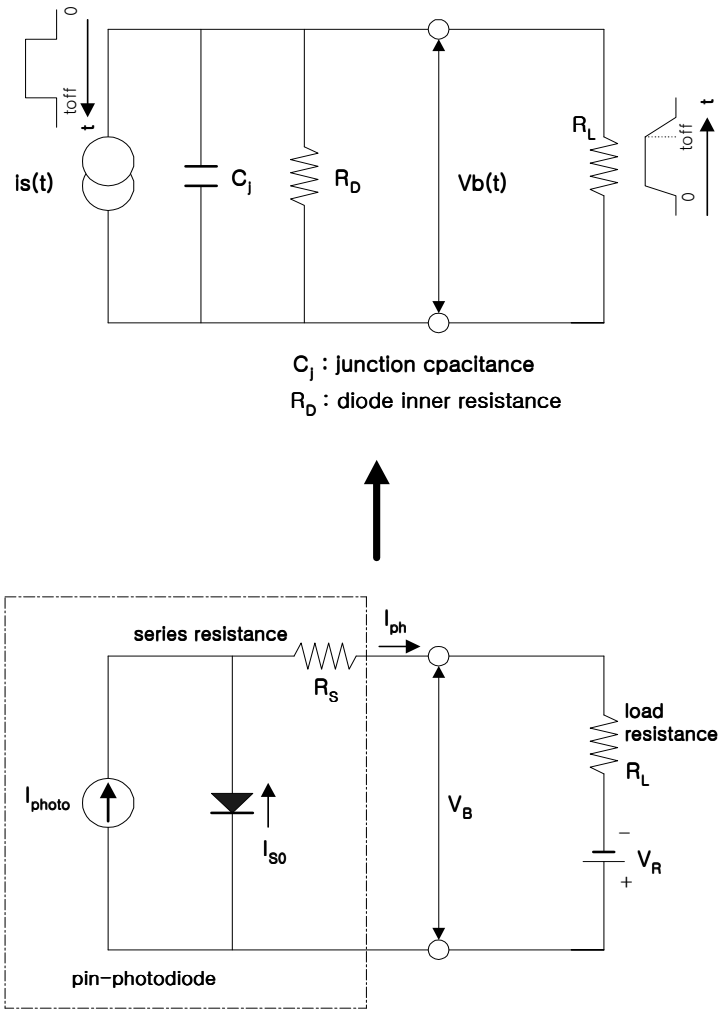
식 (2-13)~(2-15)를 통해서, 내부전위, 흡수층의 두께, 그리고 커패시턴스 값이 불순물 농도 기울기, $\alpha_{grad}\,[cm^{-4}]$ 값에 의해서 결정된다.

V_{bi}를 나타내는 식 (2-13)에서 $\varepsilon_s = \varepsilon_r\varepsilon_0$로 $\varepsilon_s = 12.6\,\varepsilon_0$ (InGaAs의 유전율은 12.6), $\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-14}\,F/cm$이고 $q = 1.6\times10^{-19}\,[C]$이다. 그러므로 α_{gra}와 d의 변화에 의해서 V_{bi} 값이 결정된다.

RC 시정수 또한 PIN PD의 주요 요소로서 다음과 같은 특성을 가진다.

RC 시정수로 인한 주파수 응답특성 제한은 WGPD만의 문제가 아닌 수광소자의 공통적인 문제이며, 이는 다음과 같은 특성을 가진다.

입사된 빛으로부터 생성된 carrier가 i-layer를 완전히 통과하기 전에 부분적으로 소멸된다. 공핍층이 커패시턴스로 작용을 하고, i-layer의 남은 일부분은 높은 전기적 저항으로 작용을 한다. 이는 i-layer의 낮은 캐리어 농도 때문에 발생한다.



<그림 2-4> PIN PD의 등가회로

<Fig. 2-4> Equivalent circuit of a PIN photodiode

<그림 2-4>는 접합용량이 포함된 높은 바이어스 전압하의 PIN PD의 등가회로를 나타내는 것이다. 이 회로는 접합 커패시터와 다이오드의 직렬 저항들로 구성되어 있다.

PIN PD의 속도를 제한하는 요소는 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 접합용량 C에 의해 발생하는 RC 시정수이고, 다른 하나는 생성

된 carrier가 흡수층을 지나는데 걸리는 시간(transit time)이 있다[26].

RC 시정수에 대한 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_l C_j} \tag{2-16}$$

$$= \frac{0.35}{t_r} \tag{2-17}$$

식 (2-16)에서 R_l은 부하저항 값이고, C_j는 접합용량 값이다. 그리고 식 (2-17)에서 $t_r = 2.19 \times R_L \times C_j$로 구체적으로 나타낼 수 있다.

그리고 앞서 언급한 PD의 특성평가 중에서 또 다른 중요한 요소로 반응시간을 들 수 있다. 반응시간은 전하가 PN접합사이에서 생성된 캐리어가 흡수층을 통과하는데 걸리는 통과시간, τ_{tr}에 의해 결정된다.

흡수층의 두께가 d이고 캐리어의 평균 드리프트 속도가 v_s이면, 통과시간은 아래의 식 (2-18)과 같이 주어진다[27].

$$\tau_{tr} = \frac{d}{v_s} \tag{2-18}$$

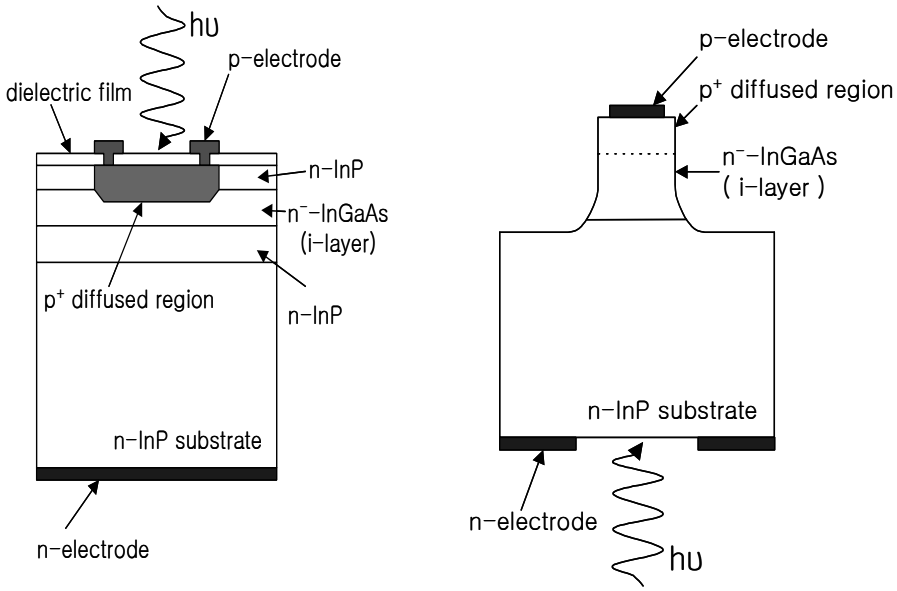
지금까지 PD의 기본 원리와 특성들을 살펴보았으며, 이를 바탕으로 비교적 높은 주파수특성과 높은 양자효율을 갖는 WGPD 소자 제작을 위해서는 WGPD의 흡수층 결정성장시 그 두께를 고려할 것이다.

제 3 장 WGPD의 설계 및 흡수층의 결정성장

3.1 WGPD의 설계

3.1.1 WGPD의 구조

기존의 표면조사 PIN PD의 구조는 <그림 3-1>과 같다.

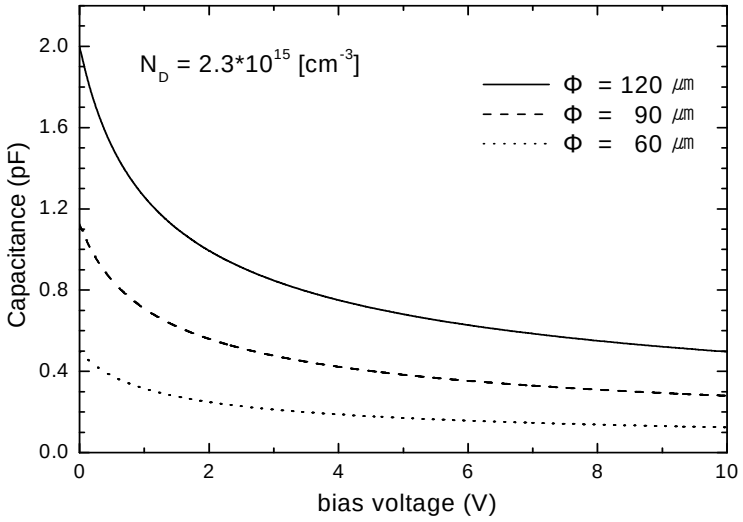


<그림 3-1> 표면조사 PIN PD

<Fig. 3-1> Surface-illuminated PIN photodiode

기존의 표면조사 PIN PD의 경우 i-layer의 두께와 불순물농도(N_D)가 각각 2.5㎛와 $2.3\times10^{15}\ cm^{-3}$으로 설정하였을 때의 capacitance(C)값이 수광 면적에 대해서 2.00pF, 1.13pF, 0.50pF으로 얻을 수 있고, 이렇게 구한 값들을 이용해서 주파수특성(f_{3dB})을 6㎓, 11㎓, 그리고 25㎓로 구할

수 있다[28].



<그림 3-2> 표면조사 PIN PD의 C-V 특성

<Fig. 3-2> C-V characteristics of surface-illuminated PIN PD

위와 같은 조건의 표면조사 PIN PD는 원하는 주파수 응답특성을 얻기 위해서 2.5㎛의 진성층의 두께를 가지고, 흡수층이 $2.3\times10^{15}\ cm^{-3}$의 농도($N_D$)로 도핑되어야 한다. 이는 비교적 두꺼운 흡수층의 두께로 접합에 의해 생성된 캐리어가 흡수층을 지나는 시간(transit time)이 증가하므로 같은 양의 불순물이 주입되고 그 두께가 보다 얇은 PIN PD보다 더 나은 주파수 응답특성을 얻기가 어렵다.

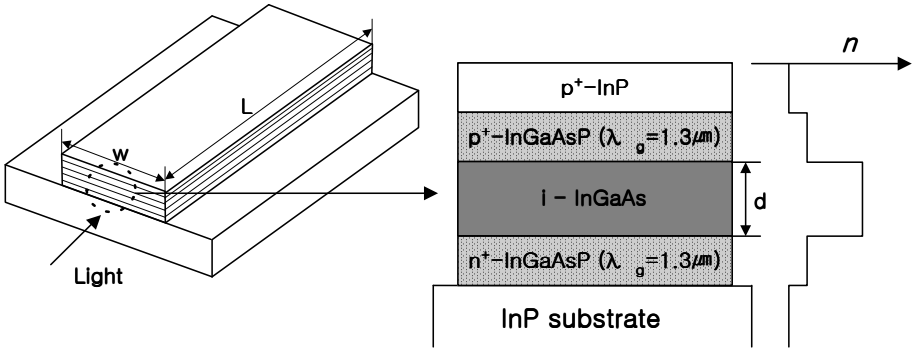
그러므로 앞서 언급한 <그림 3-1>과 같은 구조의 표면조사 PIN PD는 구조적으로 변화를 주어서 얻을 수 있는 PD의 주파수특성과 양자효율의 두 가지 요소를 모두 만족할 수 있는 소자를 얻기에는 한계가 있을 것이다.

게다가, 고속 동작의 표면 조사 PIN PD는 작은 흡수 면적을 가져야

하는데, 이는 높은 포화 출력을 얻을 수 없어서 결점으로 지적이 되고 있다[29]. 이러한 현상이 발생하는 원인은 높은 광세기에서의 광전류가 광생성 된 캐리어의 screening 효과 때문에 감소된다. 이 현상은 작은 흡수 면적을 갖는 PD에서 더 확연하다.

그러므로, WGPD는 최근에 양자효율과 밴드폭을 서로 독립적으로 고려할 수 있어서 유용하다. 그것은 광생성 된 캐리어들과 빛이 수직의 방향으로 다르게 진행하는 사실 때문이다[30]. 즉, 얇은 두께의 흡수층을 갖는다 하더라도 특정한 길이를 진행하면서 PD로 입사되는 빛의 충분한 흡수가 가능하다는 것이다.

<그림 3-3>에 WGPD의 구조와 각 층의 굴절률 분포를 나타내었다. 이는 에피층의 성장이 비교적 간단하여 제작이 용이하다는 장점을 가진다. λ = 1.5 ㎛에서 InP는 약 3.17, InGaAs는 약 3.59의 굴절률을 가진다. 광섬유로부터 입사한 빛은 굴절률이 높은 i-InGaAs 층에 의해서 도파되면서 흡수되어 전자와 정공쌍을 생성한다. 그리고 생성된 전자-정공쌍은 전계에 의해서 전류가 형성된다.



<그림 3-3> WGPD의 구조와 굴절률 분포

<Fig. 3-3> Structure and refractivity distribution of WGPD

앞서 언급한 기존의 표면조사 PIN PD와는 달리 <그림 3-3>에 나타낸 것처럼 WGPD는 구조적인 장점으로 인해서 높은 주파수 특성과 양

자효율을 얻을 수 있을 것이다. 이러한 구조에서 에피층들은 수평형 LPE 장비를 이용해 n-InP 기판 위에 성장하도록 구성하였다. i-InGaAs층을 0.6~1㎛의 두께로 비교적 얇게 구성하였고, InGaAsP(λ_g=1.3㎛)층은 i-InGaAs층을 중심으로 위, 아래에 위치하도록 구조를 설계하였다.

3.1.2 WGPD 제작 시 주의사항

WGPD의 주파수 특성은 i-InGaAs 흡수층의 두께에 의해서 결정되고, 높은 주파수 동작을 위해서 그 두께가 얇아야 한다. 예를 들어서 50㎓이상의 밴드폭을 갖기 위해서는 흡수층의 두께는 0.5㎛이하이어야 한다. 반면에, 빛(light)은 소자의 전체길이를 통과해 흡수되어야 한다. 왜냐하면 흡수층은 동시에 도파로의 코어층 역할을 하기 때문이다.

따라서, 만약 소자의 길이가 $1/\alpha$보다 넓다면, 도파로에서 완전한 빛의 흡수가 이뤄진다.

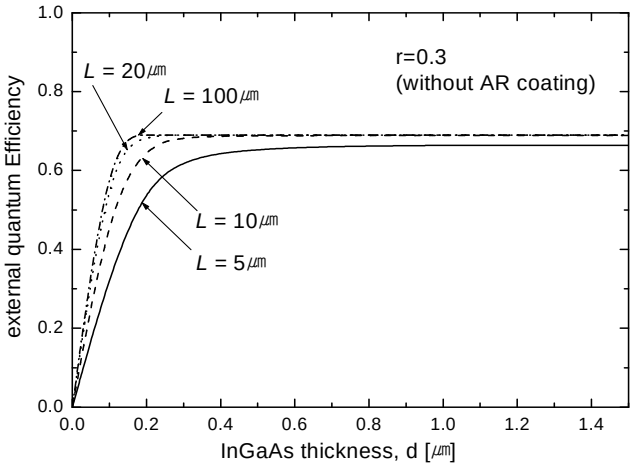
내부양자효율(η_i)를 $\eta_i = 1$로 가정하면, WGPD의 외부양자효율(η_{ex})는 식 (3-1)로 표현이 가능하다.

$$\eta_{ex(WGPD)} = (1-r)\{1-exp(-\alpha\Gamma L)\} \quad (3\text{-}1)$$

식 (3-1)에서 반사계수(r)은 단면의 상태에 따라서 달리 정해준다. 광가둠계수(Γ)는 각층의 굴절률 값에 의해서 결정된다[31].

<그림 3-4>는 WGPD의 흡수길이에 따른 외부양자효율을 나타낸 그래프이고, PD의 입사면에 아무런 코팅처리를 하지 않았을 경우 $r=0.3$으로 둘 수 있다. 그리고 흡수층이 약 0.9㎛ 정도의 두께를 가져야 설정

된 조건에서 최대의 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.



<그림 3-4> 흡수층 두께(d)에 따른 외부양자효율 η_{ex}

<Fig. 3-4> External quantum efficiency η_{ex} as absorption thickness(d)

$$I_{s(WGPD)} = e\int_0^L w\frac{d}{\Gamma}\Phi_s \alpha\Gamma \exp(-\alpha\Gamma x)dx = \frac{\omega}{\alpha\Gamma} j_s \eta_{WGPD} \quad (3\text{-}3)$$

w와 d는 흡수층의 폭과 두께이다. 그리고 j_s 포화전류밀도는 바이어스 상태와 물리적 구조에 의존해서 변화한다[32].

비교를 위해서, 같은 조건(R≈0, $\eta_i = 1$)에서의 표면조사 PIN PD의 포화 광전류는 식 (3-4)와 같다.

$$I_{s(PD)} = e\int_0^L A\Phi_s \alpha \exp(-\alpha x)dx = A j_s \quad (3\text{-}4)$$

식 (3-4)에서 흡수층의 두께를 d, detection 면적을 A로 나타낸다.

그리고 광전류를 식 (3-5)로 달리 표현 할 수 있다..

$$\Delta I = eA\int_0^L G(x)dx = eA\frac{\eta_i \alpha I_{opt}(0)(1-R)}{\hbar w}(1-exp(-\alpha L)) \quad (3\text{-}5)$$

이러한 표면조사 PIN PD에 대한 WGPD의 대역폭(Δf)은 캐리어 반응 시간과 external load resistance R_l를 갖는 RC 시정수에 의해서 결정된다.

$$\Delta f_{w.p} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(RC)^2+\tau_T^2}} \cong \frac{1}{2\pi\frac{R\varepsilon A}{d}+2.2\frac{d}{v}} \quad (3\text{-}6)$$

식 (3-6)에서 υ는 carrier 이동 속도이고, 이는 $1\times10^{17} cm/sec$로 둘 수 있다[11]. $A = wL$은 흡수층의 검출면적이다. 그리고 식 (3-6)에서 마지막 항의 근사는 PIN PD의 경우에는 유효하고, MSM WGPD의 경우 정확한 수식이 사용되어져야 한다[33].

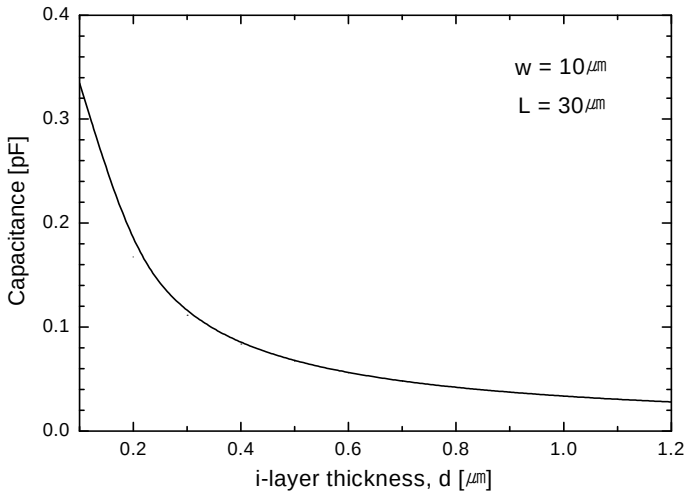
그러나, WGPD의 대역폭은 다른 구조 때문에 표면조사 PIN PD처럼 흡수층의 길이의 증가로 인해서 급격하게 감소하지는 않는다.

고속, 고출력 특성을 갖는 PD를 얻기 위해서, 주어진 I_s와 η에 대한 대역폭은 $\partial\Delta f_{w.p}/\partial d = 0$과 같이 흡수층 두께의 최적화가 되어야 얻을 수 있다.

WGPD의 흡수층 두께에 따른 정전용량을 구하고 그를 바탕으로 본 논문에서 얻고자 하는 주파수특성을 만족하는 구조를 설계해 보았다.

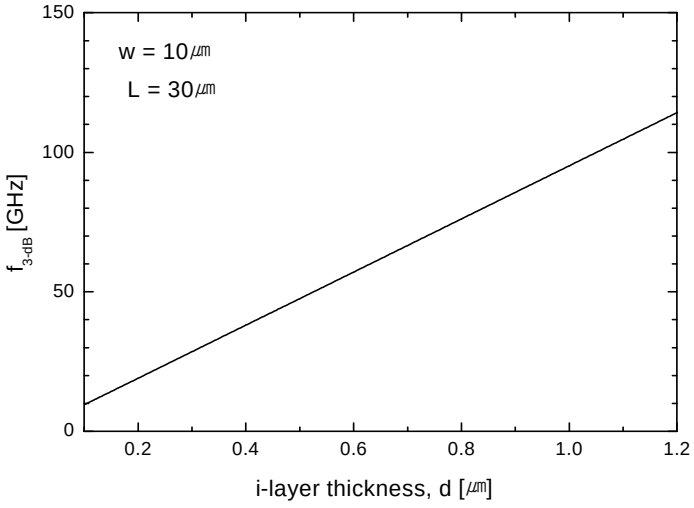
실제 WGPD의 주파수 특성을 고려하는데 있어서 중요한 사항은 불순물 농도 기울기(α_{grad})값을 적당히 조절하여 고속운용을 위한 최적의 진성층의 두께, 폭 그리고 길이를 정하고 그 값을 통해서 정전용량 값을 계산하고 최종적으로 얻고자 하는 주파수 특성값을 구하였다.

<그림 3-5>와 <그림 3-6>의 그래프는 WGPD가 10㎛의 흡수층 폭과 30㎛의 길이를 가질 때, 흡수층의 두께에 대응하는 정전용량 값과 주파수 특성 값을 나타낸 것이다.



<그림 3-5> 흡수층(i-InGaAs)의 두께에 따른 정전용량 C

<Fig. 3-5> Capacitance C with thickness of i-InGaAs layer



<그림 3-6> 흡수층(i-InGaAs)의 두께에 대한 3dB 차단주파수

<Fig. 3-6> 3dB frequency characteristics with thickness of i-InGaAs layer

이 해석 결과를 참고로 보면, 흡수층의 폭이 10㎛, 길이가 30㎛의 구조를 가지고 i-layer의 두께를 0.5㎛로 둔다면 40㎓의 주파수 특성을 얻을 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

실제 WGPD의 주파수 특성을 고려하는데 있어서 중요한 사항은 i-layer의 두께와 불순물 농도 기울기(α_{grad})값을 적당히 조절해서 고속 운용을 위한 최적의 i-layer의 두께와 정전용량 값을 계산하고, 그에 대응하는 주파수 특성값을 구해 보았다.

이렇게 PD의 주파수 특성은 흡수층의 두께와 정전용량, 부하저항 등에 의해서 결정된다[27].

3.2 LPE 방법을 이용한 i-InGaAs/InP 결정성장

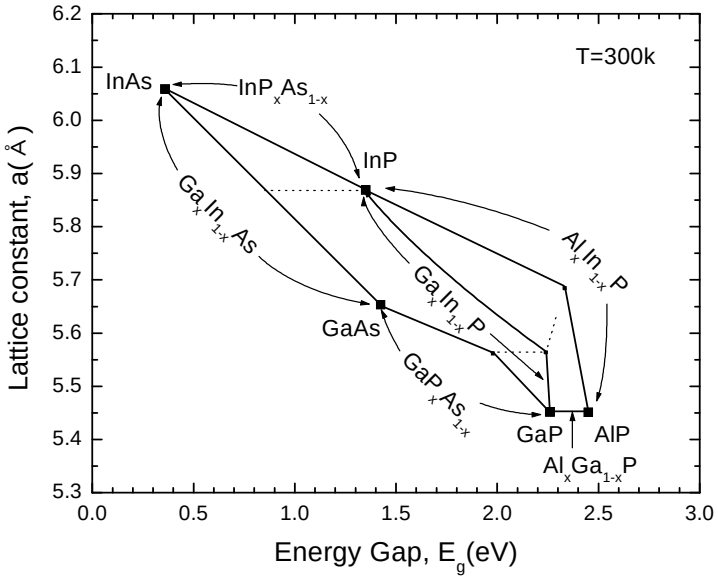
3.2.1 LPE에 의한 결정성장 이론

LPE에 의한 4원 화합물 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$의 결정성장에서는 In 용매에 필요한 용질(InP, InGa, GaAs)을 녹이고 성장온도에서 성장 용액을 기판에 접촉시킴으로써 일정한 조성비(x, y)에 따라 성장층의 격자상수 및 흡수파장 등이 결정되는데, 양질의 웨이퍼를 얻기 위해서는 기판과 성장층의 격자정합이 이루어져야 한다.

일반적으로 격자 부정합도가 0.1% 이상이 되면 표면상태(Surface Morphology)와 균일성이 나빠지고, 비발광 재결합중심으로 작용하는 결정결함 밀도(Dislocation Density)가 증가하며 조성비가 부분적으로 달라질 뿐만 아니라 깨끗한 경계면을 가진 성장층을 얻을 수 없다[34].

특히, InP 기판에 InGaAsP를 성장시킬 경우에는 격자 부정합도 $\Delta a/a$가 5×10^{-3}(0.5%)이하가 되어야만 misfit dislocation이 생기지 않는 것으로 알려져 있다[35]. 또한, 성장층의 밴드갭 에너지 E_g는 웨이퍼의 발광 및 흡수파장을 결정하며 굴절률과도 밀접한 관계를 가지게 된다[36].

<그림 3-7>은 Ⅲ-Ⅴ족 화합물의 격자상수와 밴드갭 에너지, 그리고 흡수파장의 변화를 나타낸다[37]. 그림에서 보는 바와 같이 4원 화합물 반도체의 경우 2원 화합물량의 조정에 의해 격자상수 및 밴드갭 에너지를 선택할 수 있다.



<그림 3-7> Ⅲ-Ⅴ 화합물 반도체의 격자상수와 밴드갭 에너지와의 관계

<Fig. 3-7> Lattice constant and bandgap for Ⅲ-Ⅴ compound semiconductor

먼저, InP와 격자정합되는 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$의 고체조성비 x, y의 관계는 Vegard의 법칙에 의해 다음과 같이 주어진다[38].

$$a(x,y) = xy\ a_{GaAs} + x(1-y)\ a_{GaP} + (1-x)y\ a_{InAs} + (1-x)(1-y)\ a_{InP} \quad (3\text{-}7)$$

여기서 a_{GaAs}, a_{GaP}, a_{InAs}, a_{InP}는 각각 GaAs, GaP, InAs, InP의 격자 상수이며, Nahory 등의 측정에 따르면 그 값은 다음과 같다[39].

a_{GaAs}= 5.6536 Å, a_{GaP}= 5.4512 Å

a_{InAs}= 6.0590 Å, a_{InP}= 5.8696 Å

이러한 값들을 식(3-9)에 대입하면 다음 식과 같이 주어진다.

$$a(x,y) = 5.8696 - 0.4184x + 0.1894y + 0.0130xy \quad (3\text{-}8)$$

따라서, 성장층과 InP 기판간의 격자 정합을 이루기 위해서는 성장층의 격자상수 $a(x,y)$가 a_{InP}와 같아야 하므로 격자 정합을 위한 x, y의 관계는 다음과 같다.

$$x = \frac{0.1894y}{(0.4184 - 0.0130y)} \quad (3\text{-}9)$$

실온에서 InP 기판과 격자정합하는 밴드갭 에너지 E_g는 2원 화합물의 혼정으로부터 4원 화합물로 확장시킨 다음의 식에 의해서 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} E_g = {} & (1-y)[(1-x)E_g(InP) + xE_g(GaP)] \\ & + y[(1-x)E_g(InAs) + xE_g(GaAs)] - \delta E_g \end{aligned} \quad (3\text{-}10)$$

식 (3-10)의 δE_g는 Thompson 등이 3원 화합물의 밴드갭이 조성비에 비례하여 직선적으로 변화되지 않는 항을 보정한 것으로서 Bowing Parameter라 부르며, 각 3원 화합물들의 개별 Bowing Parameter를 K라고 할 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다[40].

$$\begin{aligned} \delta E_g = {} & [K_{InGaP} + (K_{InGaAs} - K_{InGaP})y]x(1-x) \\ & + [K_{InAsP} + (K_{GaAsP} - K_{InAsP})x]y(1-y) \end{aligned} \quad (3\text{-}11)$$

이 식에서 K_{InGaP} 등과 같은 변수들은 실험적으로 구해진 것으로, 이

들 각각의 밴드갭 에너지 E_g와 Bowing Parameter를 K의 값을 <표 3-1>에 나타내었다[41], [42].

식 (3-11)과 식(3-13)을 이용한 밴드갭 에너지 $E_g(x, y)$를 구해보면 다음과 같다.

$$E_g(x,y) = 1.35 + 0.672x - 1.091y + 0.758x^2 + 0.101y^2 - 0.157xy - 0.312x^2y + 0.109xy^2 \quad (3\text{-}12)$$

<표 3-1> 밴드갭 에너지 E_g와 각 3원 화합물의 Bowing Parameter K

<Table 3-1> Bandgap energy E_g and Bowing Parameter K of ternary compound

밴드갭 에너지 E_g (eV)		Bowing Parameter K (eV)	
InP	1.35	InGaP	0.758
Gap	2.78	InGaAs	0.446
InAs	0.36	InAsP	0.101
GaAs	1.48	GaAsP	0.210

이 때, 흡수파장 λ는 다음과 같다.

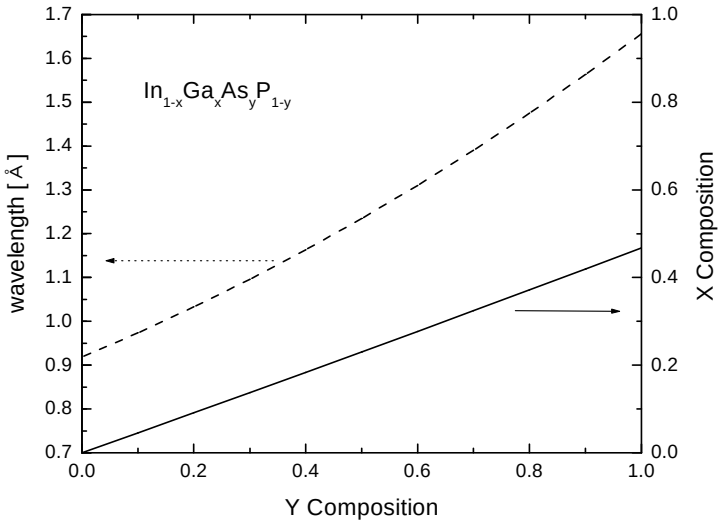
$$\lambda(\mu m) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.2398}{E_g} \quad (3\text{-}13)$$

여기서, h는 플랑크 상수이며, c는 진공 중의 광속을 나타낸다. 식 (3-7)과 식(3-12)의 x, y의 관계를 이용하면 격자정합 상태에서 원하는

파장을 얻을 수 있다. $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$가 InP 기판과 격자정합을 이루는 조건에서 y에 따른 x 및 흡수파장 λ의 변화를 <그림 3-8>에 나타내었다.

<그림 3-8>에서 격자정합을 이루기 위해서는 y의 증가에 따라 x의 값이 증가해야하며, 흡수파장은 y 또는 x의 증가에 따라 장파장쪽으로 이동된다는 것을 알 수 있다.

그리고, InP 기판위에 InP, InGaAs, InGaAsP 각각을 성장시킬 경우 각 성분에 대한 액상조성비가 <표 3-2>에 나타나 있다.



<그림 3-8> $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$에서 조성비 y에 따른 x 및 흡수파장의 변화

<Fig. 3-8> Variation of wavelength and x for $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ material system with solid composition

<표 3-2> 각 성분에 대한 액상조성비의 경험식

<Table 3-2> Empirical express of composition ratio with respective component

성장 재료	액상조성비
InP	$X_P^1 = 1.76 \times 103\ exp(-11411/T^1)$
$In_{1-x}Ga_xAs$	$X_{Ga}^1 = 1.204\ exp(-3584/T^1)$ $X_{As}^1 = 213.9\ exp(-7519/T^1)$ $= 114.9\ (X_{Ga}^1)2.098$
$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$	$X_{As}^1 = exp(-7181/T^1)[3.8451\times10^4 X_{Ga}^1 - 5.6805$ $\times10^6 X_{Ga}^1 + 5.0985\times10^8 (X_{Ga}^1)^3 - 2.6191$ $\times10^{10}(X_{Ga}^1)^4 + 7.0231\times10^{11}(X_{Ga}^1)^5 - 7.6075\times10^{12}(X_{Ga}^1)^6$ $X_{Ga}^1 = exp(-3584/T^1)$ $\times(0.7069x + 3.4624x^2 - 8.7492x^3 + 36.554x^4 - 32.878x^5)$ $X_P^1 = exp(-11411/T^1)\times10^2[13.305(1-y) - 4.7256(1-y)^2$ $+ 12.417(1-y)^3 - 3.3953(1-y)^4]$

3.2.2 LPE를 이용한 i-InGaAs/InP 결정성장

성장온도와 용액의 상태에 따라 LPE에 사용되는 결정성장 방법으로는 균일 냉각법(equilibrium-cooling), 계단 냉각법(step-cooling), 과 냉각법(super-cooling)의 세 가지 방법으로 나누어지며, 또 다른 개념으로는 2상 용액법(two-phase solution)이 있다[43]-[45].

성장방법의 선택은 원하는 에피층의 성격에 따라 결정되며, InGaAsP나 InGaAs 성장의 경우는 일반적으로 2상 용액법이 주로 사용되는데, 이는 InP의 양을 포화량보다 훨씬 많이 넣어 주게 되며, 냉각 과정 동안 과포화용액 상부에 고체상태의 InP가 상존하고 있으므로 이 InP에서도 성장이 일어나게 된다. 따라서 초기 과포화도가 줄어들기 때문에 초기 성장률을 상당히 억제할 수 있다. 과포화도를 정확히 알 수 없으므로 성

장층의 두께를 예견하기가 힘든 단점이 있긴 하지만 동시에 균일냉각법과 거의 비슷한 수준의 초기 성장률을 갖는다는 장점이 있다.

먼저 InGaAsP/InGaAs/InGaAsP/InP의 결정성장을 하기 전에 최적의 액상조성비를 구하여야 하는데 이것은 LPE 장비를 이용한 결정성장을 위하여 Kuphal씨의 상평형도를 본 실험실에서 마련한 오차보정방법을 이용하여 구한 액상조성비의 초기값을 구하여 <표 3-3>의 절차로 재료를 처리하였으며, 성장재료의 순도에 따라 다소의 차이를 두고 행하였다 [46].

<표 3-3> 성장재료의 처리과정

<Table 3-3> Cleaning process of growth materials

	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
In	**Etching**	**Rinse**	**Dry**	
	HNO_3 (2min)	D.I. Water (10회)	N_2 I.R. Lamp	
InP InAs GaAs	**Boiling**	**Etching**	**Rinse**	**Dry**
	TCE Aceton methanol (10min)	0.3% Br-CH_3OH (2min)	methanol (10회)	I.R. Lamp
InP (Sub.) InP(Cover)	**Boiling**	**Etching**	**Rinse**	**Dry**
	TCE Aceton methanol (10min)	$3H_2SO_4+H_2O_2+H_2O$ (1min) $KOH=4H_2O$ (1min)	D.I. Water (10회)	N_2 I.R. Lamp
Dopant In/Te(2.5%) In/Zn(0.1%) In/Zn (1%)	**Etching**	**Rinse**	**Dry**	
	$3HNO_3+7H_2O$ (2min)	D.I. Water (10회)	N_2 I.R. Lamp	

이렇게 준비된 In과 GaAs, InAs 및 InP를 흑연보트에 삽입하고 성장

용액의 불순물을 제거 및 성장용액의 열평형을 위하여 포화온도보다 20 ℃ 더 높은 670℃에서 6시간 동안 source baking을 행하였다.

LPE로 에피성장을 시작하기 직전에 부딪히는 문제는 InP 기판의 P성분의 높은 증기압으로 인해 생기는 P성분의 증발로 발생하는 기판의 열손상 문제이다. 열손상을 과다하게 입은 웨이퍼에서의 성장은 In-droplet 등의 발생으로 인해 국부적인 상평형이 맞지 않아 조성비의 변동뿐만 아니라 성장 후 성장용액의 wipe-off시에도 이상성장 된 부분에서의 용액이 제거되지 않게 되어 소자로 사용할 수 없게 된다. 또한 과다하게 열손상된 InP 기판은 meltback 방법을 사용하더라도 손상된 부분에서의 meltback이 비정상적으로 발생하여 버퍼층 성장자체가 깨끗하게 되지 않는다.

일반적으로 열손상을 줄이는데는 cover crystal을 쓰는 방법이 가장 일반적인 방법으로서 사용의 간편성 때문에 많이 사용되고 있다. Cover crystal 중에서는 GaAs single crystal의 거친 면을 사용하는 것이 가장 좋은 것으로 알려져 있는데, 이 경우 InP기판과 GaAs cover crystal의 상호 작용에 의해 비교적 열적 안정성이 뛰어난 얇은 InGaAsP층을 형성시키기 때문에 650℃까지는 거의 열손상이 없는 것으로 알려져 있다 [47].

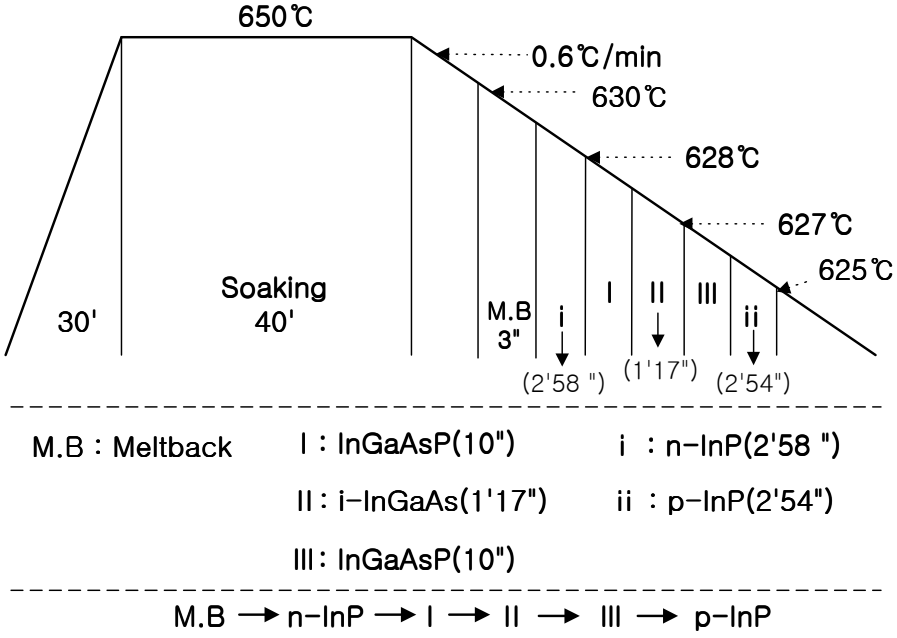
이러한 점들을 유념하여 baking이 된 성장용액에 n-InP 기판과 GaAs cover crystal을 cleaning 및 etching 과정을 거친 후 수평형 흑연 보트에 넣었다. 성장을 시작하기에 앞서서 성장용액을 균일하게 녹이면서 가능한 한 기판의 열손상을 줄이기 위해서 성장온도보다 20℃ 더 높은 650℃에서 40분간 soaking 하였으며, 이러한 경우 cover crystal을 기판 위에 둔다고 하더라도 기판의 표면이 다소의 열 손상을 입을 수 있으므로 이를 제거하기 위해서 결정성장 직전에 순수 In용액으로 InP 기판을 3초간 meltback을 하였다[48]. 그리고 이 경우 너무 심하게 In용액으로 에칭이 될 경우 LPE 성장 중에 성장 용액이 성장도중에 넘어오는 경향이 있

기 때문에 적절한 In 시간과 흑연보트와 기판 웨이퍼가 잘 밀착되어 있어야 한다.

결정은 고순도 수소 분위기에서 수평형 흑연 보트로 2상 용액법을 사용해서 성장하였다[49]-[51]. 용액의 soaking 온도는 650℃, 성장온도는 630℃이며, 냉각속도는 0.6℃/min로 설정하였다[52], [53].

<그림 3-9>는 WGPD 웨이퍼 결정 성장을 위한 온도 프로그램 및 성장 순서를 나타낸다.

0.6℃/min의 냉각속도로 InGaAsP/InP 층을 성장시킨 후 i-InGaAs의 흡수층을 628℃에서 과정 Ⅱ의 시간(1′ 17″)동안 성장시켰다. 마지막의 저항접촉층(ohmic contact layer)인 p^+-InGaAs층은 3초간 성장 시켰다. n형 불순물로는 Te/In alloy를 사용하였으며, p형 불순물은 Zn/In alloy를 사용했다.

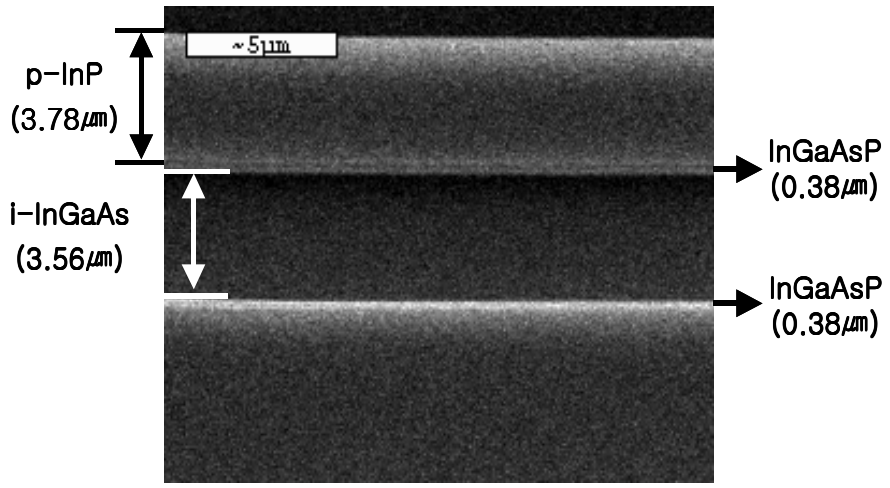


<그림 3-9> 결정 성장을 위한 온도프로그램

<Fig. 3-9> Temperature program for WGPD crystal growth

<그림 3-10>은 <그림 3-9>와 같은 과정으로 성장된 WGPD의 SEM

단면 사진을 보여주고 있다. 흡수층(i-InGaAs)은 약 3.56㎛, 이를 중심으로 위, 아래의 양쪽으로 InGaAsP층이 0.38㎛의 두께로 성장되었다. 흡수층과 p-InP층의 두께가 온도제어를 통해 비교적 두껍게 성장되었음을 알 수 있다.

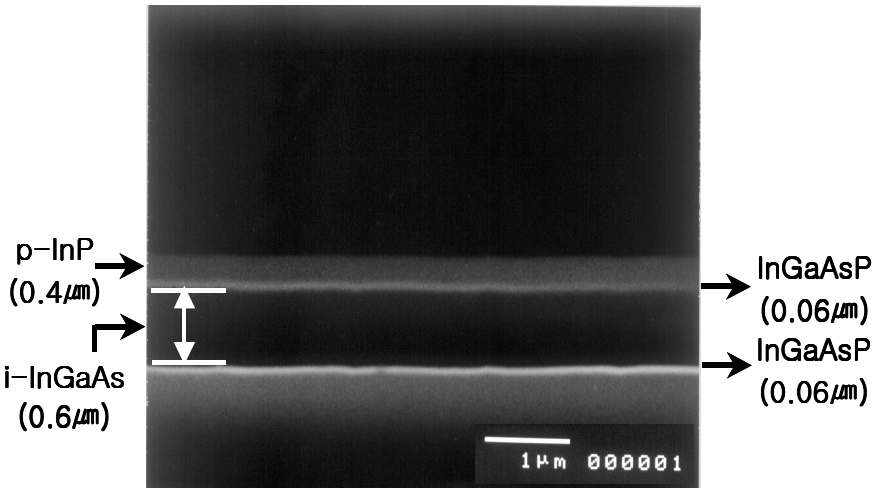


<그림 3-10> 성장된 WGPD 웨이퍼의 SEM 단면 사진(1′17″)

<Fig. 3-10> Cross sectional SEM photograph of a grown WGPD wafer(1min 17sec)

계면특성은 비교적 양호하게 나타났으며, 성장 시간을 변화 이외의 다른 조건은 그대로 두고 흡수층과 p-InP층의 두께를 이전의 실험 결과보다 얇게 성장하고자 하였다.

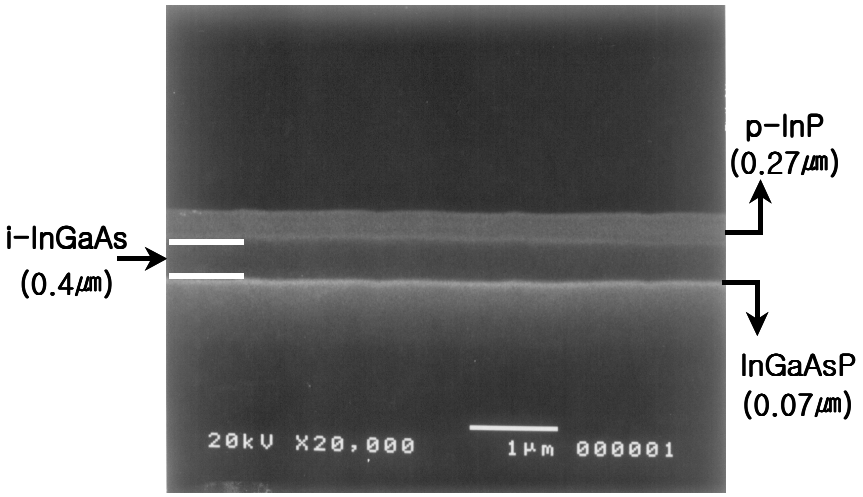
<그림 3-11>은 meltback을 3초간 행하고 흡수층과 InGaAsP층이 628℃에서 시작하여 각각 10초 동안 성장 된 웨이퍼의 SEM 단면 사진을 나타낸 것이다. 흡수층은 0.6㎛, InGaAsP층은 흡수층을 중심으로 위・아래로 0.06㎛ 성장되었다.



<그림 3-11> 성장된 WGPD 웨이퍼의 SEM 단면 사진(10″)

<Fig. 3-11> Cross sectional SEM photograph of a grown WGPD wafer(10sec)

<그림 3-12>의 SEM 단면 사진은 앞선 실험의 온도프로그램과 냉각 속도의 실험조건은 동일하며, 흡수층의 성장시간은 20초이고 p-InP층은



<그림 3-12> 성장된 WGPD 웨이퍼의 SEM 단면 사진(20″)

<Fig. 3-12> Cross sectional SEM photograph of a grown WGPD wafer(20sec)

온도제어를 통해서 2분 28초 동안 성장한 결과이다.

<그림 3-12>의 SEM 단면 사진에서 흡수층 위의 InGaAsP 층의 성장이 잘 되지 않은 것을 확인할 수 있다.

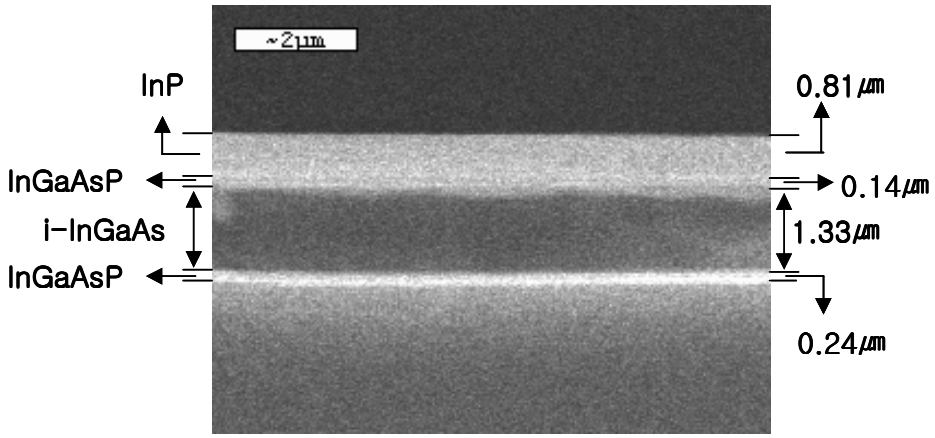
수광소자에 응용될 에피층은 흡수층이 불순물 농도가 낮은 양질의 결정이어야 한다. LPE로 성장시킨 $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$/InP는 도핑을 하지 않아도 잔류 불순물에 의해 약 10^{17} cm^{-3}의 도핑농도를 갖는 n형이 되는데, 그 원인은 용액내에서 분배계수(distribution coefficient)가 큰 Si이 결정성장에 참여하여 도펀트로 작용하기 때문인 것으로 알려져 있다[54]. 이러한 잔류 불순물을 줄이는 방법으로는 700℃ 부근의 온도 및 수소 분위기에서 장시간 baking하는 방법이 좋은 것으로 알려져 있다[55], [56].

그래서 계면상태가 좀 더 양호하고 불순물 농도가 낮은 양질의 흡수층 성장을 위해서 앞선 실험 결과들을 바탕으로 온도제어를 통해서 성장과 성장 전에 행하는 source baking시간을 6시간과 24시간의 경우로 하여 실험을 하였다.

<그림 3-9>의 온도 프로그램과 동일한 조건에서 흡수층을 성장시켰고, 성장에는 6시간과 24시간의 baking 한 각기 다른 source를 사용하였다.

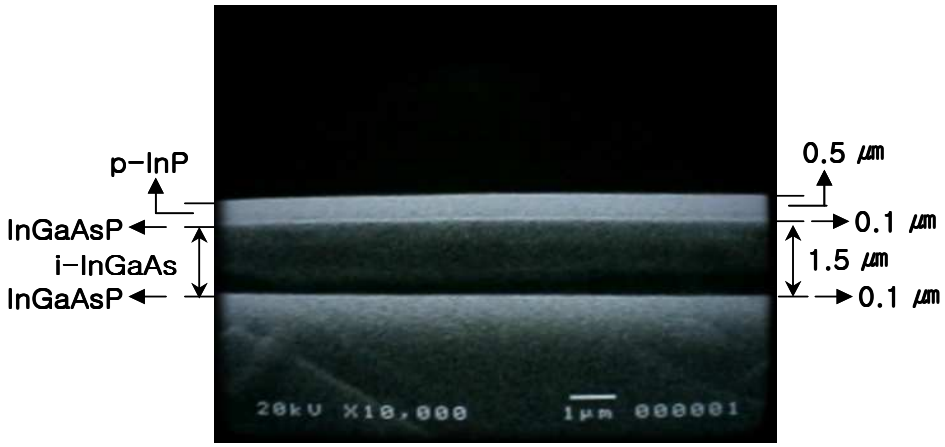
그 결과 <그림 3-13>과 <그림 3-14>의 SEM 단면 사진을 얻을 수 있었다.

아래의 <그림 3-13>의 SEM 단면 사진을 보면 i-InGaAs 층의 두께는 약 1.33㎛가 성장되었다. 이는 10초간의 성장시간을 통해서 얻어진 성장두께이며, 0.13㎛/sec의 비율로 성장이 이루어져서 비교적 두꺼운 에피층이 성장되었음을 알 수가 있다. 기판을 열손상으로부터 보호하기 위해서 meltback을 3초간 행한 뒤 InGaAsP, i-InGaAs 그리고 다시 InGaAsP 층을 10초간의 동일한 시간으로 성장을 시켰으나, 그 결과 성장두께가 0.24㎛와 0.14㎛로 균일치가 못했고, 윗층의 InGaAsP층은 잘 성장되지 못한 것을 확인 할 수 있다.



<그림 3-13> 성장된 웨이퍼의 SEM 단면 사진(10″)

<Fig. 3-13> Cross sectional SEM photograph of a grown WGPD wafer(10sec)



<그림 3-14> 성장된 웨이퍼의 SEM 단면 사진(30″)

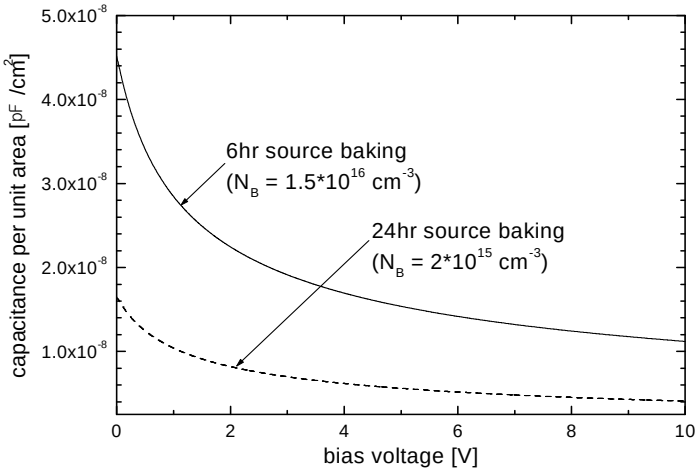
<Fig. 3-14> Cross sectional SEM photograph of a grown WGPD wafer(30sec)

위의 <그림 3-13>을 통해서 각기 다른 에피층 간의 성장상태가 그리 좋지가 못한 것을 관찰할 수가 있다. 이러한 결과의 원인으로 성장온도 설정, 성장 시간 그리고 cooling rate 등 여러 가지의 요인들이 있을 수

있으나, 그 중에서 성장을 하는데 있어서 필요한 source baking 시간을 고려해 보았다.

이에 반해 <그림 3-14>는 24시간의 baking 한 source를 이용해서 성장시킨 에피층의 SEM 단면 사진이다.

이 실험에서의 용액의 포화온도는 650℃, 성장온도는 630℃에서 성장이 이루어지고 그리고 냉각속도는 0.6℃/min로 앞선 실험과 동일한 조건하에서 이루어졌고, 차이점은 n-InP층의 성장을 4℃ cooling되는 시간동안에 성장을 하였다. 그래서 cooling 시간을 고려하면 약 7분 동안 성장을 하였고, i-InGaAs와 p-InP 층도 각각 30초(1℃)와 8분 11초(5℃) 동안 성장을 하였다. 그리고 i-InGaAs층을 중심으로 양쪽의 InGaAsP 층들은 10초간 성장하였다.



<그림 3-15> 흡수층의 불순물 농도에 따른 C-V 곡선

<Fig. 3-15> C-V characteristic as impurity concentration of absorption layer

<그림 3-13>과 <그림 3-14>의 두 SEM 단면 사진을 비교해 보면 24시간 baking을 한 source를 이용해서 성장한 결과가 6시간 baking을 한 source를 이용해서 성장한 것보다 계면상태가 양호함을 확인할 수 있었다.

그리고 6시간과 24시간으로 각기 달리 Baking 하였을 때 i-InGaAs의 불순물 농도가 $1.5\times10^{16}\,cm^{-3}$에서 $2\times10^{15}\,cm^{-3}$으로 낮아졌음을 알 수 있었다[55].

<그림 3-15>는 각기 다른 불순물 농도에 따른 C-V 그래프이며, 위의 그래프를 통해서 장시간 baking으로 흡수층의 불순물 농도가 감소하여 성장된 웨이퍼를 소자로 제작했을 때 주파수 특성이 더 양호해짐을 예측할 수 있다.

제 4 장 결 론

본 논문에서는 LPE를 이용해서 InP/InGaAsP/i-InGaAs/InGaAsP/InP Waveguide PIN photodiode(WGPD)를 제작하기 위하여 이론해석을 통하여 설계를 수행하였으며, 그 결과를 토대로 결정성장을 하였다.

한편, 1.55 ㎛ 파장의 광을 측면에서 수광하는 WGPD를 설계하였고, PD의 구조설계에 있어서 기존의 면형조사 PIN PD보다 높은 양자효율과 나은 주파수 특성을 얻기 위하여 구조적으로 다른 형태를 제안, 수평형 LPE 장비를 이용해서 흡수층을 성장하였다. 그리고 일련의 과정을 통해서 소자가 제작되었을 때 얻을 수 있는 특성을 살펴보았다.

높은 주파수특성과 양자효율을 만족할 수 있는 WGPD의 제작을 위하여 흡수층의 두께를 0.5~1㎛로 성장하고, 폭과 길이를 각각 10㎛ 그리고 30㎛로 제작한다면 40㎓의 주파수대역을 가질 수 있을 것을 알게 되었다.

수평형 LPE를 이용해서 0.5~1.5㎛의 i-InGaAs 층을 성장시킨 결과 0.6℃/min의 냉각속도에서 10초 동안 1~1.3㎛의 두께를 얻을 수가 있었다.

그리고 에피층을 성장시킬 때 source 용액내의 잔류 불순물 농도를 낮추기 위해서 24시간의 장시간 source baking을 행하였다. 이는 baking 시간이 source의 내의 분배계수가 큰 Si이 결정성장에 참여하여 dopant로 작용하기 때문이다.

baking 시간을 6시간과 24시간으로 달리하여 baking후 성장을 한 결과 InGaAs의 불순물 농도가 $1.5\times10^{16}\ cm^{-3}$과 $2\times10^{15}\ cm^{-3}$으로 24시간의 장시간 baking으로 잔류불순물 농도가 감소한 것을 확인하였다.

이렇게 성장 용액의 24시간 장시간 baking을 통해서 불순물 농도를 $2\times10^{15}\ cm^{-3}$ 정도로 낮춤으로써 정전용량도 줄일 수 있었다.

본 논문에서 성장된 웨이퍼로 제작된 소자가 가질 수 있는 동작특성을

예측해보면 기존의 PD가 가지는 한계인 동작속도와 주파수특성을 동시에 만족시키지 못하는 부분을 WGPD는 0.6~1㎛의 얇은 i-InGaAs층을 가지면서 40㎓ 정도의 높은 주파수특성을 가질 수 있다.

더 나아가 성장된 i-layer의 두께와 폭, 흡수층의 길이를 고려하여 fiber와 WGPD 소자간의 결합효율을 Beam Propagation Method(BPM)을 이용하여 해석해 본다면 좀더 정확하게 해석해 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] J. Wilson and J. F. B. Hawkes, *Optoelectronic Devices*, Printice Hall, 1983

[2] R5. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kinsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, "Coherent light emission from GaAs junctions," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 9, pp. 366-368, 1962

[3] M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr., and G. Lasher, "Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 1, pp. 62-64, 1962.

[4] T. M. Quist, R. H. Radiker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter, and H. J. Zeigler, "Semiconductor maser of GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 1, pp. 91-92, 1962.

[5] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyashita, "Ultimate low-loss single-mode fiber at 1.55㎛," *Electron. Lett.*, Vol. 15, pp. 106-108, 1979.

[6] T. Ikegami, "Survey of telecommunications applications of quantum electronics-Progress with optical fiber communications," *Proc. IEEE*, Vol. 80, pp. 411～419, 1992.

[7] S. Miura, H. Kuwatsuka, T. Mikawa, O. Wada, "Planar embedded InP/GaInAs p-i-n photodetector for very high-speed operation," *Journal of Light-wave technology*, Vol. LT-5, No. 10, Oct. 1987.

[8] 마 동성 외, *광자공학기술개발 연구보고서*, 한국전자통신연구소, 1986.

[9] S. R. Forest, *IEEE J. Quantum Electron.,* QE-17, 217, 1981.

[10] S. Yamazaki, K. Nakajima and Y. Kishi, Fujitsu Sci. *Tech. J.*,

20, 329, 1984.

[11] 문 병주, 기 민호 외, *광통신의 전개(기술정보편찬 보급팀 조사분석 자료)*, 한국전자통신연구소, 1994.

[12] OPTCOM, 2월호, pp. 24～30. 1997.

[13] Y. Kohama et al, "Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diode and Its Application to Optical Interconnection," *Technical Report of IEICE*, OPE95-38, pp. 49～54, 1995.

[14] Kato et al. *IEEE JQE.*, Vol. 28, No. 12, pp. 2728 - 2735, 1992.

[15] 여 덕호, 김 성준, "Design and Fabrication of Waveguide type Photodetector for Long-wavelength Optical Communication," *Photonics Conference 95'.*, 서울대학교 전자공학과 광전자연구실, pp. 121～122, 1995.

[16] Paul E. Green, Jr., *Fiber Optic Networks*, Prentice-Hall, Inc., pp. 263～329, 1993.

[17] Stewart E. Miller 외, *Optical Fiber Communication Ⅱ*, Academic Press, Inc., pp. 569～599, 1988.

[18] J. E. Midwinter 외, *Optoelectronics and Lightwave Technology*, John Wiley & Sons Ltd., pp. 41～96, 1992.

[19] Giok-Djan Khoe, "Coherent Multicarrier Lightwave Technology for Flexible Capacity Networks," *IEEE Communications Magazine.*, Vol. 32 No 3, pp 22～33, 1994.

[20] Hideo Kuwahara 외, *Modulation and Demodulation Techniques in Coherent Lightwave Communications*, Coherent Optical Communications and Photonic Switching., pp. 19～34, 1990.

[21] Mitsuo Fukuda, *Optical Semiconductor Devices*, NTT Opto-electronics Laboratories., Kanagawa, Japan, 1999.

[22] G. E. Stillman et al., "InGaAsP Photodiodes," *IEEE Trans.*

Electron Devices., ED-30, pp. 364, 1983.

[23] S. R. Forrest, "Performance of $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ Photodiodes with Dark Current Limited by Diffusion, Generation Recombination, and Tunneling," *IEEE J. Quant. Electron.*, QE-17, pp. 217, 1981.

[24] T. P. Pearsall et al., chapt. 2 in *Semiconductors and Semimetals.*, Vol. 22-D, Academic Press, 1985.

[25] 강민호, 이용탁, 홍창희 외, *광통신 기술개발 사업중 광자공학 기술개발*, 한국전자통신연구소, pp. 71～103, 1988.

[26] G. Lucovsky et al., "Transit-time Consideration in p-i-n Diodes," *Jounal of Applied Physics*, Vol. 35, No. 3, part1, pp. 622～628, Mar, 1964.

[27] 신상영, 김창민, 박진우 외., *초고속 광통신 기술,* 한국통신학회 정보통신기술 총서 1., 제 8장, pp. 204～206, 1996.

[28] E. Budianu et al., "Heterostructure on InP substrate for high-speed detection devices over a large spectrum range," *Microelectronic Engineering.*, 51-52, pp. 393～400, 2000.

[29] K. Kazutoshi, H. Susuma, K. Atsuo, Y. Jun-Ichi and K. Kenji, "High-Efficiency 40GHz Waveguide InGaAs p-i-n Photodiode Employing Multimode Waveguide Structure," *IEEE PHOTONICS TEHONOLOGY LETTERS*. Vol. 3, NO. 9, pp. 820～822, 1991.

[30] K. Kazutoshi, H. Susuma, K. Atsuo, Y. Jun-Ichi and K. Kenji, "High-Efficiency Waveguide InGaAs pin Photodiode with Bandwidth of over 40GHz," *IEEE PHOTONICS TEHONOLOGY LETTERS*. Vol. 3, NO. 5, pp. 473～474, 1991.

[31] DAN BOTEZ., "Effective Refractive Ingex and First-Order-Mode Cutoff Conditions in InGaAsP/InP DH Laser Structures (λ =1.2-1.6㎛)," *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. QE-18, No. 5, pp.

865～870, 1982.

[32] B. Saleh and M. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Willy & Sons Inc., pp. 41～79. 1992.

[33] K. Kenji, W. Koichi, and N. Mitsuru, "A High-Efficiency 50GHz InGaAs Multimode Waveguide Photodetector," *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. 28, No. 12, pp. 2728～2735, 1992.

[34] G. B Stringfellow, "The importance of lattice mismatch in the growth of GaInP epitaxial crystal," *J. Crystal Growth.*, Vol. 43, pp. 3455～3460, 1972.

[35] K. Oe and Y. Shinoda "Lattice deformation and misfit dislocations in GaInAsP/InP double-heterostructure layers," *Appl. Phys. Lett.,* Vol. 33, pp. 962～964. 1978.

[36] H. C. Casey and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers,* New York, Academic Press, 1978.

[37] R. A. Laudise, "Crystal growth progress in response to the needs for optical communications," *J. Crystal Growth.*, Vol. 65, pp. 3～23, 1983.

[38] R. L. Moon and L. W. James, "Bandgap and lattice constant of GaInAsP as a function if alloy composition," *J. Electron. Mat.,* Vol. 3, pp. 635～644, 1974.

[39] R. A. Nahory, M. A. Pollack, W. P. Johnston, Jr. and R. L. Barn, "Bandgap versus composition and demonstration of Vegard's law for $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ lattice matched to InP," *J. Electron. Mat.,* Vol. 33, pp. 659～661, 1978.

[40] A. G. Tompson and J. C. Woolley, "Energy-gap variation in mixed Ⅲ-Ⅴ alloys," *Canadian Journal of Physics.,* Vol. 45, pp. 255, 1967.

[41] A. Onton, M. R. Lorenz and W. Reuter, “Electronic structure and luminescence process in $In_{1-x}Ga_xP$ alloys,” *J. Appl. Phys.,* Vol. 42, pp. 3420～3432, 1971.

[42] A. Sasaki, M. Nishimura and Y. Takeda, “Energy band structure and lattice constant chart of Ⅲ-Ⅴ mixed semiconductors and AlGaSb/AlGaAsSb semiconductor lasers on GaSb substrates,” *Jpn. J. Appl. Phys.,* Vol. 19, pp. 1695～1702, 1980.

[43] J. J. Hsieh, “Thickness and surface morphology of GaAs LPE layers grown by supercooling, step-cooling, equilibrium-cooling and two-phase solution technique,” *J. Crystal. Growth*, Vol. 27, pp. 49～61, 1974.

[44] Y. C. Kao and O. Eknoyan, “Thickness of GaP liquid phase epitaxial layer grown by step-cooling, equilibrium-cooling and ramp-cooling methods,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 54, pp. 1865～1867, 1983.

[45] M. C. Yu, Y. K. Su, K. Y. Chang and C. Y. Chang, “Liquid-phase epitaxial growth of InGaP on (100) GaAs by a supercooling method,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 58, pp. 1537～1541, 1985.

[46] 조호성, “수직형 LPE장치에 의한 InGaASP/InP MQW-LD 제작에 관한 연구,” *한국해양대학교 대학원논문집*, 16권, 1994.

[47] H. Nakamaru, S. Tsuji, A. Ohishi, M. Hirao and H. Matsumura, “Gallium Arsenide and Related Compounds,” *Bristol, U.K.* Adam Hilger, p. 169, 1985.

[48] 조호성, 오종환, 홍창희, “LPE에 있어서 InP기판의 열손상 상태와 Meltback 특성,” *응용물리*, Vol. 2, pp. 278～283, 1989.

[49] A. Accard, J. Benoit and R. Vergnaud, “LPE Growth of InP thin layer from super-cooled solutions by two-phase technique,” *J. Crystal Growth.*, Vol. 54, pp. 235～238, 1982.

[50] R. F. Dazarinov, W. A. Nordland, W. R. Wagner and H. Temkin, “Near equilibrum LPE growth of $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ lattice matched to InP,” *J. Crystal Growth.*, Vol. 60, pp. 210～216. 1985.

[51] I. Ladany and F. Z. Hawrylo, “Comparison of single and two-phase LPE growth methods for InGaAsP/InP lasers and LEDs,” *J. Crystal Growth.*, Vol. 54, pp. 69～75, 1981.

[52] G. E. Stillman et al., “InGaAsP Photodiodes,” *IEEE Trans. Electron Devices,* ED-30, pp. 364. 1983.

[53] M. Feng et al., “Lattice constant, Bandgap, thickness and surface morphology of InGaAsP-InP Layers Grow by Step-cooling, Equilibrium-cooling, Supercooling and Two-phase-solution-Techniques,” *J. Electron. MaterialIs,* 9, 241, 1980.

[54] J. D. Oliver, “Electrical characterization and alloy scattering measurement of LPE $Ga_xIn_{1-x}As$/InP for high frequency device applications,” *J. Crystal Growth.*, Vol. 54, pp. 64, 1981.

[55] T. C. Penna et al., “A study of the growth of high-purity InGaAs by Conventional LPE,” *J. Crystal Growth.*, Vol. 64, pp. 27, 1984.

[56] 이용탁 외, *광통신 기술 개발 사업 중 광자공학 기술 개발*, 한국전자통신연구소, pp. 73～103, 1988.