

〈主 題〉

# 광통신 부품(능동소자)

## 원 용 협

(한국전자통신연구소)

□차 례□

- I. 서 론
- II. 광통신용 광원소자
- III. 광통신용 광검출소자
- IV. 광변조 기술 및 소자
- V. 반도체 광증폭기
- VI. 맺는 말

### I. 서 론

광통신의 역사는 인류가 태동하여 자연광(햇빛)과 거울을 이용하여 서로 통신하던 원시시대로 거슬러 올라갈 수 있다. 이때는 이러한 통신수단이 매우 효과적이라는 것을 알았지만 너무 단순한 방법인데다 서로 통신할 수 있는 정보량이 극히 미미하다는 것을 곧 알게 되었다. 그 이후 배터리가 달린 램프가 등장하여 바다를 향해하던 선박들 사이에 이러한 램프를 깜박거리며 모르는 신호로 서로 교신하게 되었고 이러한 통신 수단은 현재의 디지털 광통신 방법에 매우 근접한 방법이었다. 그러나 진정한 광통신 역사의 시작은 레이저가 발명된 이후로 보아야 할 것이다. 레이저는 초고주파 발진증폭기의 개념에서 출발한 것으로서 우리가 보통 생각하는 빛의 개념을 바꾸어 놓은 것이다. 즉 레이저는 매우 좁은 선풍을 갖는 코히어런트한 광선을 발진한다. 특히 반도체 레이저는 크기가 작고 장파장에서 동작이 가능하여 광섬유특성과 잘 결합하므로 광통신 분야에서 필수적인 소자이다. 앞으로 광통신기술은 광대역 종합정보 통신망에서 중추적인 기술이 될 것이며 그 기술의 진보와 활성화가 기대되기 위해서는 무엇보다도 광통신 부품, 특히 광 능동소자기술의 진보가 선행되어야 한다. 광통신 소자 중에서 광섬유를 이용한 광 수동소자, 레이저 다이오드 등의 기술은 상대적으로 신뢰할 만한 수준에

와 있으나 다른 몇몇 광소자들은 아직 기술적 난제를 안고 있다. 본 고에서는 주로 반도체를 이용한 광통신용 능동소자의 개괄적인 특성을 기술하여 관심있는 일반독자들의 이 분야에 대한 이해를 돕고자 한다.

### II. 광통신용 광원소자

광통신 시스템에서 정보전달의 매체인 광은 광원소자에 의하여 생성된다. 광통신용 광원소자로는 발광 다이오드 (Light Emitting Diode : LED)와 레이저 다이오드 (Laser Diode : LD)가 있다. LED는 근거리 통신망, 즉 500Mbps 이하의 전송속도와 5Km 이하의 전송거리를 갖는 내부 데이터 링크용 등의 광원으로 주로 사용되고, LD는 고속의 장거리 통신망에 많이 이용되고 있다. 본 절에서는 LED와 LD의 기본 동작 원리와 특성에 대해 기술하였다.

#### 1. 발광 다이오드 (LED)

LED는 pn접합으로 이루어진 반도체 소자로서 순

〈표 1〉 반도체 발광재료

재료	파장범위 ( $\mu\text{m}$ )	밴드갭 (eV)
GaAs	0.9	1.4
AlGaAs	0.8~0.9	1.4~1.55
InGaAs	1.0~1.3	0.95~1.24
InGaAsP	0.9~1.7	0.73~1.35

방향 전압이 인가될 때 광이 방출된다. 표1에 대표적인 화합물 반도체 재료와 그에 따른 광파장 범위를 나타냈다.

상기 재료들은 모두 직접천이의 밴드갭 (direct bandgap) 구조를 가지고 있고, 실리콘과 같은 간접천이 형태의 밴드갭 (indirect bandgap) 구조를 갖는 재료는 LED의 재료로 적합하지 않다. 따라서 LED의 활성층은 캐리어 주입을 위해 pn접합으로 이루어져 있고, 필요한 파장에 해당하는 에너지 밴드갭의 범위에서 활성층의 재료가 선정된다. 그러나 보다 효율적으로 캐리어를 주입하고 활성층 내에 가두어 두기 위해 이중이종접합구조(double heterojunction)가 사용된다. 그림 2.1(A)는 이중이종접합구조로 이루어진 1.3 $\mu$ m의 LED 에너지 레벨의 다이어그램을 보여준다. 전자와 정공이 각각 n측과 p측으로부터 활성영역으로 주입되고 주입된 전자와 정공이 활성영역의 양쪽 에너지 장벽에 의해 각각 차단되어 구속되고 그 속에서만 전자와 정공의 재결합(recombination)이 일어난다. 이때 재결합에 따른 방출 파장은 활성층의 에너지 밴드갭에 의하여 결정된다. LED의 구조는 기본적으로 표면발광형 LED (Surface-emitting LED : SLED)와 단면발광형 LED (Edge-emitting LED : ELED)로 구분된다. 과거에는 주로 GaAs/AlGaAs 재료를 사용한 단파장 LED를 단거리 광통신 링크에 사용해 왔다.

최근에는 1.55 $\mu$ m 장파장의 InGaAsP/InP 재료를 사용하여 중장거리 전송에 용이한 표면발광형 및 단면발광형 LED가 실용화되었다.

표면발광형 LED 구조는 그림 2.1(B)와 같이 소자의 수직방향으로 캐리어를 구속하기 위해서 활성층을 중심으로 위아래로 pn접합을 이루는 이중접합구조를 가지고 있다. 소자의 활성층에서 전자와 정공의 재결합이 일어나는 비율은 캐리어의 밀도에 비례한다. 따라서 주입전류를 크게 증가시키지 않고 활성층 내의 캐리어 밀도를 증가시키기 위해서는 광이 방출되는 표면적을 아주 작게 하여야 한다.

그림 2.1(C)는 InGaAs/InP 단면발광형 LED 구조로서 stripe형의 LD 구조와 흡사하나 광궤환(optical feedback)이 억제되어 레이저 효과가 일어나지 않는다는 점이 다르다. 표면발광형에서는 수직으로 광이 방출되기 때문에 광도파로 효과가 없는 반면 단면발광형에서는 활성층 내에서 stripe 모양의 도파로를 따라 광이 유도되어 단면을 통하여 방출된다. 따라서 단면으로 방출되는 광방출 각도가 작으므로 광섬유와

의 결합이 보다 효율적으로 이루어진다. 또한 두 LED 구조의 차이 때문에 단면발광형이 표면발광형에 비해 온도변화에 더욱 민감하고 제조 공정이 복잡하지만 광선의 선폭이 좁고 결합효율이 뛰어나며 열 손실이 작기 때문에 통신용으로 많이 이용되고 있다.

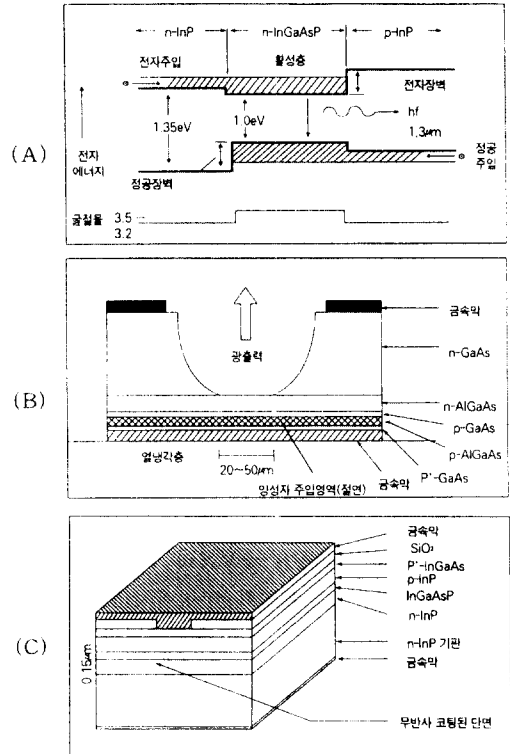


그림 2.1 (A)이종접합구조 LED의 에너지 준위 (B)GaAs/AlGaAs 표면발광 LED구조 (C) InGaAsP / InP 단면발광 LED구조

## 2. 레이저 다이오드 (LD)

### 2.1 기본 특성

LD는 LED 보다 선폭이 좁고 광출력이 큰 pn접합 반도체이다. LD와 LED의 차이점은 LED에서는 전자와 정공의 재결합에 의한 자연방출(spontaneous emission) 과정에 의해 다양한 파장의 광이 방출되므로 출력이득이 낮으나, LD에서는 유도방출(stimulated emission) 과정에 의해 방출된 광자(photon)가 반도체 내에 형성된 광공진기(optical cavity)내에서 증폭되므로 균일 파장의 고출력 광이 방출될 수 있다. 따라서 LD는 출력이득이 높고 스펙트럼 폭이 좁아 광섬유나 광도파로 내에서 분산이 적고 짧은 펄스파를 유도할 수 있다. 그림 2.2는 여러

가지 LD 구조의 모양을 보여준다. 동종접합 구조의 LD (그림 2.2A)는 에너지 밴드갭이 동일한 매질에서 서로 다른 불순물 농도를 도핑한 두개의 결정층을 접합한 구조이다. 이 구조에서는 도핑에 의해 에너지 준위가 변하여도 밴드갭은 항상 일정하게 유지되므로 높은 문턱 전류가 요구된다. 이종이종접합구조 (그림 2.2B 및 C)의 LD는 밴드갭이 서로 다른 세 가지의 매질이 이종으로 접합되어 있는 구조이며 활성영역은 slab(그림 2.2B)이나 strip(그림 2.2C)모양을 가지고 있다. 광섬유에서와 같이 활성영역의 굴절률을 클래딩보다 높게 하여 빛이 활성영역내에서 유도되게 한다. 결국 LD 내에서 광의 구속은 y-방향 (transverse)으로는 이종이종접합에 의해 이루어지고 x-방향 (lateral)으로는 slab이나 strip으로, 또한 z-방향 (longitudinal)으로는 양단면의 공기진에 의해 광을 가두어 증폭한다. 실온에서 광의 출력을 연속적으로 유지하기 위해서는 문턱전류 값이 매우 낮아야 한다. 이는 slab이나 strip 형태로 광을 lateral 방향으로 구속함으로써 가능하다. 더욱 효과적인 방법으로 이종이종접합구조를 이용하여 gain guiding 또는 index guiding 방식으로 활성영역내에서 광을 집중하게 함으로써 광의 연속적인 출력을 얻을 수 있다. 여기서 gain guiding은 이종이종접합의 장벽을 이용하여 전자와 정공을 좁은 활성영역 속에 구속시켜 전류를 강제로 주입함으로써 굴절률을 증가시키는 효과를 얻어 광을 구속시키는 방식이며, index guiding은 구조적으로 활성영역의 굴절률을 클래딩보다 높게 만들어 광을 집중시키는 방식을 의미한다. 과거에는 주로 단파장 (0.85 $\mu\text{m}$ ) LD가 단거리 통신에 이용되어 왔으나, 저 손실 광섬유와 물질의 개발에 힘입어 이제는 광통신용 장파장 (1.3 $\mu\text{m}$ 과 1.55 $\mu\text{m}$ ) LD가 상용화되었다. 그러나 응용범위가 확대됨에 따라 LD의 성능은 더욱

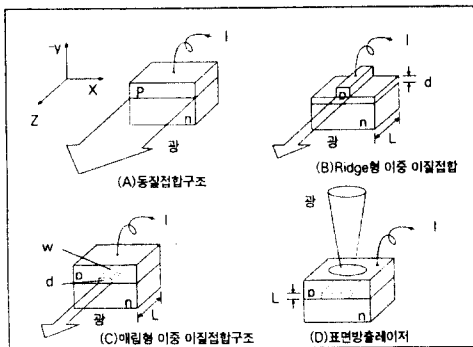


그림 2.2 레이저 다이오드의 종류

고도화 할 필요성이 제기 되었다. 예를 들어 코히어런트 광통신 시스템에 필요한 LD는 특성이 안정해야 할뿐만 아니라 단일모드(단일 longitudinal 모드)와 함께 파장가변이어야 한다.

2.2 횡(lateral) 모드 레이저 다이오드

다중횡모드 LD의 가장 간단한 형태는 gain guiding LD이다. 이 LD에서는 접촉부분의 폭이 5~20 $\mu\text{m}$ 이고 길이가 150~300 $\mu\text{m}$ 인 stripe 아래의 활성영역에 전류가 주입된다. 결국 stripe가 접촉해 있는 활성영역내에서는 이득이 발생하고, 이득이 있는 곳에 굴절률이 증가하게 되므로 횡방향으로 도파효과가 일어난다. 그림 2.3(A)는 이러한 gain guiding 구조를 갖는 LD를 보여주고 있다. stripe의 구조를 형성하기 위한 방법으로 oxide를 이용하거나 양성자 주입, V자 홈 등을 이용할 수 있다. stripe층 아래의 활성층에는 표면적이 넓어 여러 개의 lateral 모드가 진동하기 때문에 출력된 광은 다중모드가 된다. 그러나 stripe의 접촉면적을 작게 제한하더라도 실제로 캐리어가 주입되면

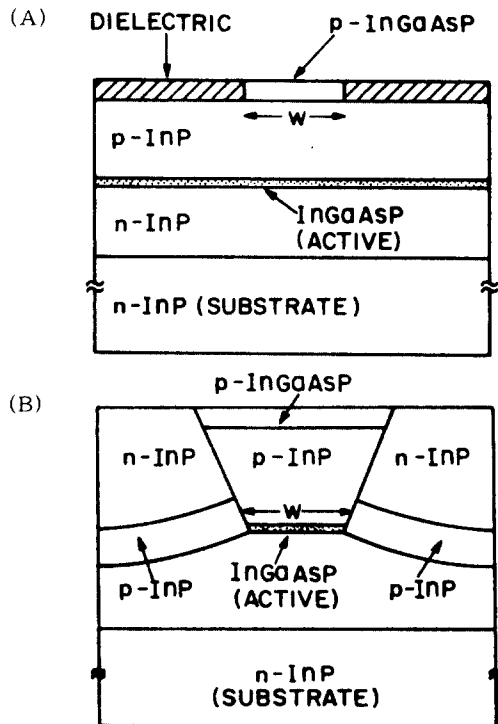


그림 2.3 (A)Gain guiding 및 (B)Index guiding 레이저 구조

활성층뿐만 아니라 주변의 p형 반도체의 클래딩층 내부까지 전류가 확산되므로 캐리어 분포도가 상당히 넓게 확장되어 이 또한 다중모드의 원인이 되게 한다. Gain guiding LD와 반대로 index guiding LD는 횡방향으로 이득과 손실을 일치시키기 위하여 충분히 넓은 유전체를 삽입한 구조를 갖고 있다.(그림 2.3B) 이는 활성층의 폭을 조절함으로써 안정된 단일 횡모드의 광을 얻을 수 있다. 일반적으로 index guiding LD가 gain guiding 보다 문턱전류가 낮고 횡모드의 안정도가 높으며 모드 선택도가 뛰어나다.

### 2.3 단일모드 레이저 다이오드

단일모드 LD라 함은 축 (longitudinal) 방향과 종 (transversal) 방향에서 모두 안정된 단일모드로 공진하는 LD를 말한다. 단일모드 LD에 반해 다중모드LD는 다른 모드간에 random한 모드교환이 일어나므로 광출력상에 항상 큰 상대적인 세기 잡음 (Relative Intensity Noise : RIN)이 발생한다. 이러한 잡음은 광 전송 품질을 심각하게 저하시킨다. 한편 단일모드 광섬유 통신 시스템에서는 좁은 스펙트럼 폭을 갖는 안정된 단일모드 LD 광원을 사용하는 것이 장거리 통신 시스템에서는 필수적이다. 단일모드 LD를 유지하기 위해서는 기본적인 이종접합 LD구조에 아래와 같은 수단이 필요하다.

- 공진기의 길이를 짧게 한다.
- 공진기의 구조를 복합적으로 구성하여 모드를 선택 한다.
- 레이저 공진기 내외에 격자주름 (grating)을 만들어 광캐환을 유도한다.

인정된 스펙트럼 폭을 갖는 이득분포에서 축모드의 수는 Fabry-Perot 공진기 길이의 역수에 비례하므로 공진기의 길이를 줄임으로써 단일모드 동작특성을 얻을 수 있다. 축모드를 더욱 안정화하기 위해서 공진기의 구조를 복합적인 모양으로 구성할 수 있다.

한가지 방법으로 레이저 한쪽 단면 가까이 외부 거울을 부착하여 복수공진기 (multicavity)의 효과를 얻을 수 있고, 또는 짧은 공진기와 외부 거울을 결합한 구조로써 안정된 단일모드 광출력을 얻을 수도 있다. 단일모드 LD는 또한 파장선택 격자주름을 활성층에 첨가하여 만들 수 있다. DFB (distributed feedback) LD와 DBR (distributed Bragg reflector) LD가 그 대표적인 예이다. DFB LD는 공진기 내에 격자주름을 가지고 있고, DBR LD는 공진기 외부에 격자주름을 두어 반사경 역할을 하게 만든다. Bragg

조건에 따라 격자주름 내의 진행파의 공진 조건은 격자주기 =  $\lambda/2n$  이다. 즉 굴절률이 n인 매질을 지나는 진행파의 파장  $\lambda/n$ 은 격자 피치의 2배와 같다. DFB와 DBR LD의 구조가 그림 2.4의 a와 b에 각각 나타나 있다. DBR LD는 공진기와 외부격자와의 결합이 약하기 때문에 DFB LD보다 문턱전류가 더 높을 뿐만 아니라, 캐리어 유도 굴절을 변화에 기인한 변조파의 스펙트럼 폭의 퍼짐 현상도 DFB LD 보다 더 크다. 이러한 이유로 DFB LD가 현재 더 많이 사용되고 있다.

### 2.4 양자우물, 양자선 및 양자점 레이저 다이오드

이제까지 설명한 stripe형태와 이중이종접합과 같은 외형적인 캐리어의 구속방법 외에 또 다른 유용한 캐리어 구속방법이 있다. 기존 이종접합구조에서는 전도대와 가전자대의 에너지 분포가 연속적이었으나 활성영역을 아주 얇은 박막상태로 만들어 주면 에너지 분포는 불연속적인(discrete) 여러 개의 에너지 준위로 나누어진다. 이때 각 에너지 준위는 박막 활성영역내에서 서로 다른 양자상태 (quantum state)의 캐리어를 구속하게 된다. 이러한 것을 양자구속 (quantum confinement)이라 하고, 이를 이용한 LD는 기존 LD에 비해 문턱전류가 낮아지고 스펙트럼 상의 선폭을 줄일 수 있고 이득을 높일 수 있을 뿐만 아니라 온도 의존성이 낮아지는 장점을 지니게 된다. 양자구속을 이용한 LD에는 단일양자우물 (single quantum well : QW)구조, 다중양자우물 (multiple QW : MQW)구조, 양자선 (quantum wire)구조 및 양자점 (quantum dot 또는 quantum box)구조 등이 있다. 단일양자우물을 구성하기 위해 활성영역의 두께를 줄이면 활성영역의 구속력이 낮아져 이득이 떨어진다. 이를 해결하기 위해 여러 개의 양자우물을 겹쳐 사용하는 다중양자우물구조가 바람직하다. 양자우물구조를 이용한 LD에서 양자선 구조(그림 2.5C)와 양자점 구조(그림 2.5D)로 갈수록 양자 구속력이 좋아 양자우물구조에서 얻을 수 있는 여러 가지 장점들이 더욱 커지게 된다. 양자선 구조와 양자점 구조에서는 그림 2.5에서 보는 바와 같이 각각 두 개의 방향 및 세 개의 방향에서 전자를 양자 구속시킨다. 양자우물에서처럼 한 개의 방향은 고도의 결정성장 방법에 의해 박막의 성장이 가능하지만 또 다른 방향으로 동시에 전자를 양자 구속시키는 물리적 구조를 구현하는 것은 쉽지 않다.

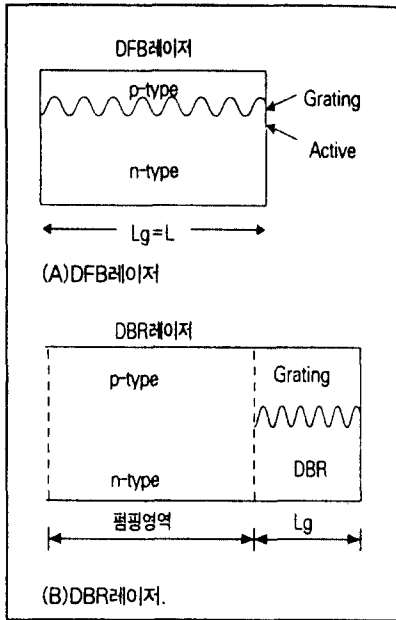


그림 2.4 격자주름을 이용한 단일모드 레이저

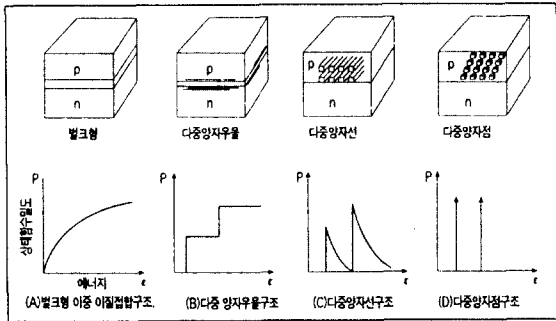


그림 2.5 벌크 레이저 구조 및 양자구속 레이저

2.5 표면방출 레이저 다이오드

그림 2.2(D)에 도시된 수직 공진기형 표면방출 레이저 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser : VCSEL)는 단면방출 LD에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 첫째, 공진 길이가 매우 짧으므로 단일 모드의 광을 방출한다. 둘째, 제도가 상대적으로 쉽다. 셋째, 광을 방출하는 표면적의 크기 조절이 쉬워 광섬유의 개구수에 쉽게 정합될 수 있다. 넷째, 표면에서 수직으로 광이 방출되므로 고집적화가 용이하다는 등이다. 표면방출 LD는 이종접합 LED와 매우 흡사한 모양을 가지고 있다. 전류는 바닥에 위치한 p층 전극에서 상부의 n층 전극으로 흐른다. 여기서 p층

전극은 전극뿐만 아니라 광을 반사시키는 거울로서도 작용하는 반면 n층에서는 링 모양의 전극 중앙에 별도의 광 반사기를 두고 있다. 위의 구조에서는 캐리어 구속이 좋지 않아 문턱전류가 높게 나타난다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 기판을 에칭하여 구멍을 파서 더 많은 광이 방출될 수 있도록 할뿐만 아니라 더 많은 전류를 구속시키는 방법이 사용되었다. 또한 다중 Bragg반사기와 다중양자우물구조를 이용하여 낮은 문턱전류에서 연속 발진된 광출력이 성공적으로 얻어졌다.

III. 광통신용 광검출소자

장거리용 광통신 시스템에서의 광검출소자는 1.0~1.6 $\mu\text{m}$  영역에서 동작하도록 하는 것이 필수적이다.

이러한 장파장 영역에서 광검출소자에 쓰이는 재료는 주로 InP계가 사용된다. 또한 게르마늄(Ge)도 이 파장영역에서 흡수특성이 균일하므로 게르마늄 광다이오드 및 게르마늄 애벌랜치 광다이오드(APD)가 광검출소자로 이용되어왔다. 한편 0.8~0.9 $\mu\text{m}$ 의 단파장대에서의 광검출소자로는 실리콘이 아직도 널리 이용되고 있다. 이는 실리콘의 제작공정기술이 이미 성숙되어 있고 저잡음, 고감도의 광검출을 유도할 수 있기 때문이다. 본 절에서는 PIN, APD 광검출기의 동작원리와 주요 특성에 대해 살펴보았다.

1. PIN 광다이오드

가시광선이나 적외선 영역에서 동작하는 실리콘 광검출소자는 상업용으로 개발되어 오랫동안 이용되어 왔으며, 화합물반도체의 결정성장 기술이 발달함에 따라 이종접합 (heterojunction) 광검출소자의 구현이 가능하게 되었다. 종래의 동종접합(homojunction) 광검출소자에 비해 이종접합구조에서는 캐패시턴스가 낮고, 양자효율이 큰 광검출소자의 구현이 가능하다. 동종접합구조는 실리콘이나 게르마늄을 사용하지만 이종접합 PIN 광다이오드는 단파장에서 GaAs/AlGaAs 재료를, 장파장에서는 InGaAs/InP 재료를 사용한다. pn접합 광다이오드와 PIN 광다이오드는 모두 역방향 바이어스 하에서 동작한다. 그림 3.1은 역방향 바이어스 PIN 다이오드의 구조를 보여준다. 입사된 광에 의해 전자-정공쌍이 발생하고 이들은 접합부분에 형성된 강한 전기장에 의해 전자와 정공으로 분리되어 외부 회로에 광유도된 전류를 공급한다. 역바이어스 상태에서 I-영역(폭  $W_i$ )이 완전히 공핍된(depleted) 상

태를 형성하고, p형 반도체와 n형 반도체 영역으로 공핍된 영역의 폭을 각각  $W_p$ 와  $W_n$ 이라 하면 전체적으로 공핍된 폭  $W$ 는  $W_i$ ,  $W_p$ ,  $W_n$ 의 합과 같다. 이러한 공핍층내에서 생성된 전자-정공쌍은 전기장에 의하여 분리되어 광전류를 제공하지만 생성된 일부 캐리어 쌍들은 공핍층 바깥에서 재결합한다. 그러나 공핍층 경계선 외곽에서 생성된 소수 캐리어들이 결집하여 전기장에 의해 이끌려 공핍층 내로 유입되고, 이들이 또한 광전류를 형성한다. PIN 다이오드의 특성을 결정짓는 주요 요소로는 응답도, 역방향 누화전류, 캐패시턴스, 속도 등이 있다. 이러한 요소들을 간략히 살펴보기로 한다.

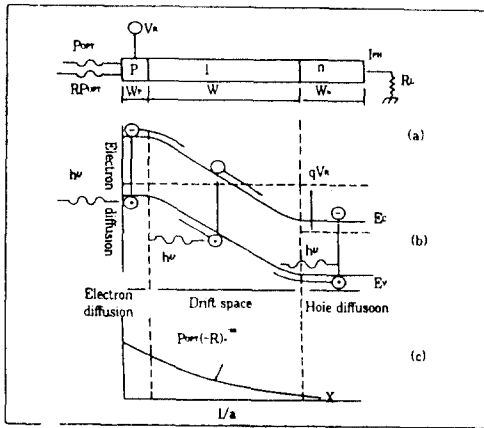


그림 3.1 광다이오드의 동작 원리 (a)PIN다이오드의 단면도 (b)역바이어스 하에서의 에너지 밴드 다이어그램 (c)캐리어 생성 특성

### 1.1 응답도 (responsivity)

응답도  $R$ 은 광다이오드의 주요 요소중의 하나이다. 이는 단위 입사광 전력당 생성된 광전류의 양으로 정의되며 아래 식으로 표현된다.

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} [A/W]$$

여기서  $h\nu$ 는 광자의 에너지,  $e$ 는 전하량, 그리고  $\eta$ 는 양자효율을 나타낸다. 공핍층의 흡수계수를  $a_1$ 이라 하면 역방향 바이어스에서  $[1 - \exp(-a_1W)]$ 만큼의 입사광이 광다이오드 내에 흡수된다. 입사광의 표면 반사율을  $r$ 이라 하고 접촉면과 공핍층 사이의 물질(두께  $d$ )에서의 흡수율을  $a_2$ 라고 가정하면 양자효율은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\eta = (1-r)e^{a_2d}(1-e^{-a_1W})$$

일반적인 실리콘 광검출소자 ( $a_1 = a_2$ )인 경우 10V 역전압 바이어스에서 공핍층 두께  $W$ 는  $10\mu m$ 이 되고, 따라서  $0.8 \sim 0.9\mu m$ 의 파장에서 응답도는 0.5에서  $0.6A/W$ 의 범위를 갖는다. GaAs/AlGaAs와 InGaAs/InP 등과 같은 이종접합 광검출소자인 경우 각각  $0.8 \sim 0.9\mu m$ 과  $1.0 \sim 1.6\mu m$  파장에서 사용할 때 접촉층 물질은 입사광의 파장에 투명한 것(즉  $a_2 = 0$ )으로 선택하고, 공핍층은 입사광의 대부분이 흡수되는 물질을 선택한다.

### 1.2 역방향 누화전류

역방향 누화전류(암전류: dark current)는 입사광이 없을 때에도 소자내부에 흐르는 전류를 말한다. 이 전류는 주로 공핍층내에서의 생성-재결합전류 및 표면 누화전류로 구분된다. 실리콘 광검출소자의 표면 누화전류를 줄이기 위해서는 표면에  $SiO_2$  층을 증착시키는 방법을 사용할 수 있다. InGaAs는 에너지 밴드갭이 작기 때문에 내부 및 표면 누화전류가 실리콘에 비해 수 order 이상 더 크다. 그러나 InGaAs에서는 표면에 존재하는 자연산화물이 전도성을 가지고 있어 표면처리 공정이 쉽지 않다. 누화전류는 산탄잡음(shot noise)  $[(i)^2] = 2q I_d B$ ,  $I_d$ 는 암전류,  $B$ 는 수신기의 대역폭]의 원인이 되므로 가능한 줄여야 한다. 또한 누화전류는 온도에 따라 증가하며, 그 의존성은 구조, 재료의 순도 및 공정변수 등에 따라 달라진다. 실리콘 광다이오드의 경우  $70^\circ C$ 에서 암전류는  $25^\circ C$ 에 비해 10배 가량 크고, InGaAs/InP 광다이오드의 경우 약 20배 가량 크다.

### 1.3 캐패시턴스

광다이오드의 캐패시턴스  $C$ 는 크기는 작지만 무시할 수 없는 변수로서 부하저항  $R$ 과 함께  $RC$  시간상수의 제어에 영향을 준다. 광다이오드의 캐패시턴스는 주로 공핍층의 접합부분에 형성된 캐패시턴스와 접촉패드와 패키징에 관련된 기생 캐패시턴스 등으로 구성된다. 접합 캐패시턴스를 줄이기 위해서는 광다이오드의 면적을 줄이거나 또는 공핍층의 폭을 늘려야 한다. 그러나 광다이오드의 면적을 줄이면 광섬유와 소자의 광결합효율을 낮추는 단점이 있다. 또한 공핍층의 폭을 계속 증가시키면 양자효율이 저하하고 캐리어 통과시간도 길어진다. 따라서 이러한 변수사이에는 상호조절이 필요한 trade-off가 있다. 일반적인 InGaAs/InP PIN 광다이오드에서 접합직경이  $55\mu m$ 이고 공핍층의 폭이  $3\mu m$ 인 경우 캐패시턴스는 0.2에서

0.3pF가 된다.

1.4 속도

광다이오드의 속도는 캐패시턴스, 공핍층을 지나서 캐리어의 통과시간 그리고 캐리어의 확산 등에 따라 좌우된다. 완전히 공핍된 PIN 광다이오드에서 공핍층의 폭  $W$ 는 대략 비도핑층 (intrinsic layer)의 폭과 같아진다. 역바이어스에 의한 전기장의 강도가 낮을 때  $[E(10^4 \text{ V/cm})$  비도핑층을 통과하는 캐리어의 속도는 전기장 크기에 선형적으로 비례하지만 강한 전기장 영역에서는 전자와 정공이 포화속도 ( $V_{sat}$  : 약  $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ )에 도달하게 된다. 따라서 캐리어의 비도핑층 통과시간은  $t_{trans} = W/V_{sat}$ 으로 구하여진다. 실리콘 검출소자의 경우  $-50\text{V}$ 의 역바이어스에서  $W=50\mu\text{m}$ 일 때 캐리어 통과시간은  $0.5\text{ns}$ 가 된다. 일반적인 InGaAs 검출소자의 경우 약  $5\text{V}$ 의 낮은 전압에서도 완전히 공핍될 수 있고 폭도  $3\mu\text{m}$  정도로 작다. 따라서 캐리어의 통과시간은  $30\text{ps}$  이하로 매우 짧아질 수 있다. 즉 캐리어의 높은 속도를 얻기 위해서는 공핍층의 폭을 줄여야 한다. 그러나 공핍층 폭의 감소는 캐패시턴스 증가를 초래하고 이는 RC 시간상수의 증가를 가져온다. 결국 소자의 활성영역 두께를 조절할 때 캐리어의 통과시간을 빠르게 해야 하는 것과 높은 양자효율 및 낮은 캐패시턴스를 유도하는 것 사이에 trade-off가 존재한다.

2. 애벌런치 광다이오드(APD)

APD는 생성된 캐리어가 강한 전기장 영역에서 애벌런치 증폭특성을 나타내는 소자이다. 광증폭원리는 충돌 이온화 (impact ionization) 효과에 따른 것으로써 광흡수에 의하여 형성된 자유 캐리어들이 강한 전기장에 가속화되어 충분한 에너지를 얻게 되고 이들은 다른 원자들과 충돌하여 더 많은 전자-정공쌍을 만들어내는 효과를 말한다. APD는 강한 전기장을 유지해야 하기 때문에 PIN 다이오드보다 더 큰 바이어스 전압이 필요하다. 내부전류 이득은 인가된 전압에 선형적으로 비례하지 않을 뿐만 아니라 온도에도 민감하다. 또한 애벌런치 과정에서 전류증폭이 일어난다므로 산탄잡음 외에 또 다른 잡음이 발생한다.

이는 재료의 특성, 소자의 구조, 이득 및 입사광의 상태에 따라 변하고 이득을 제한하는 결정적인 역할을 한다.

2.1 구조

그림 3.2는 일반적인 APD의 구조를 나타낸 것으로  $p^+ \pi n^+$ 의 구조를 가진다. 여기서  $\pi$ 는 매우 낮은 농도의 p타입 불순물로 도핑된 영역을 의미한다. 소자에 역바이어스 전압이 인가되었을 때 대부분의 전압이  $n^+$ 의 공핍층에 걸리게 된다. 바이어스 전압이 증가하면 공핍층의 영역이  $\pi$  영역 속으로 확장해 가고 결국  $n^+$ 에서 p'에 이르기까지  $\pi$  영역을 완전히 공핍된 영역으로 채우게 된다. 이러한 현상으로 인해 공핍된 영역과 전기장이  $n^+$ 에서 p'에 이르기까지 채워진다 (reach through)하여 이 소자를 RAPD라 부르기도 한다.  $\pi$  영역을 통과하는 캐리어의 포화속도와  $n^+$ 접합에서 증폭도가 결정되도록 소자의 인가전압을 설계하여야 한다. 소자의 동작원리는 빛이 검출소자에 입사되었을 때 매우 큰 부피의  $\pi$  영역 속으로 흡수된다. 흡수된 광은 캐리어를 형성하고 바이어스 하에서 이들은 분리되어 정공은 p'로 가고 순수한 전자만이  $n^+$ 접합으로 이동한다. 이때 인가된 전기장의 세기가 충분히 크면  $n^+$ 접합에서 전류증폭이 일어난다. PIN 다이오드는 공핍영역의 경계선에 생긴 확산 영역으로 부터 흡수된 캐리어의 속도가 느리기 때문에 고속소자의 동작에 문제가 되어 왔다. 그러나 RAPD는 완전히 공핍된 영역만 가지고 있어 이러한 확산 캐리어가 없고 오히려 넓은 공핍영역에 흡수된 모든 캐리어들이 고속으로 이동함으로써 PIN 다이오드에 비해 효율이 매우 높다. 또한 넓은 공핍영역으로 인하여 소자의 기생 캐패시턴스가 작은 장점이 있다.  $1.0 \sim 1.6\mu\text{m}$  장파장 대역에서는 InP 기판에 적자정

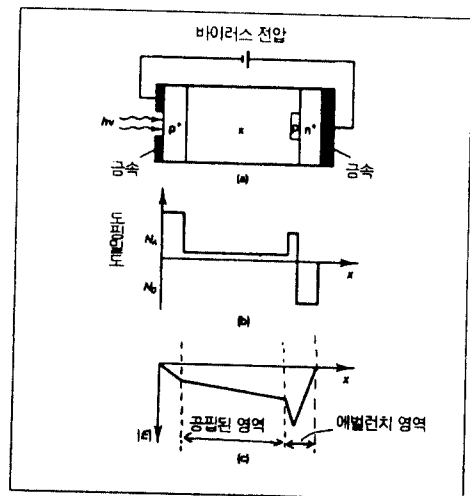


그림 3.2 Reach-through APD (a)구조 (b)도핑밀도 분포 (c)전기장 분포

합된 재료 (InGaAs와 InGaAsP)가 이용되며, 이를 이용한 두 가지 구조의 APD가 그림 3.3에 나타나 있다. 이들 구조는 입사광이 InGaAs 층에만 흡수되고 증폭층에는 흡수되지 않기 때문에 이러한 구조를 SAM (separate absorption and multiplication) APD로 불려진다. 결국 RAPD도 SAM APD의 개념을 간직하고 있다고 볼 수 있다.

2.2 주요특성

역방향 바이어스 전압이 증가하여 애벌런치 브레이크다운(breakdown) 영역에 접근함에 따라 누화전류는 바이어스 전압에 지수적으로 급격히 증가한다.

이러한 과도한 누화전류가 발생하는 이유는 역바이어스가 증가할 때 발생하는 터널링 효과 때문이다.

실리콘 APD에서는 큰 에너지 밴드갭 때문에 터널링전류가 작지만 게르마늄이나 InGaAs의 경우에는 밴드갭이 작아 누화전류가 크게 나타난다. 이러한 터널링전류를 줄이기 위해서 그림 3.3의 SAM APD와 같은 구조가 이용된다. 이 구조에서는 밴드갭이 작은 재료부분에서 광흡수가 일어나고, 밴드갭이 큰 재료에서는 증폭이 발생되도록 분리되어 있다. InP층에는 애벌런치 이득을 얻을 수 있을 만큼 큰 전기장을 형성할 수 있고, InGaAs 혹은 InGaAsP 층에는 터널링효과를 피할 수 있도록 전기장의 세기가 낮은 값을 갖도록 한다. APD에서의 접합 캐패시턴스도 PIN 다이오드에서와 마찬가지로 공핍층의 넓이와 두께에 의하여 결정된다. 이 소자의 동작특성상 역바이어스 전압이 비도핑층에 완전히 공핍되도록 인가되므로 접합 캐패시턴스는 최소가 된다. APD소자의 속도를 결정하는 요소는 PIN 다이오드와 같이 공핍층의 통과시간, RC 시간상수, 그리고 비공핍층에서의 확산시간 등이다. 또한 APD의 속도는 애벌런치 누적시간에 의해서도 좌우될 수 있다. 애벌런치 누적시간은 소자내의 증폭과정에서 캐리어의 충돌과정 등으로 인하여 모든 캐리어가 동시에 증폭과정에 참여하지 못하는 것에 비롯된다. 고속으로 동작하는 APD 소자를 설계하기 위해서는 소자의 면적을 최소화하여 공핍층 캐패시턴스를 줄여야하고, 오음접촉 저항을 줄여야 한다. PIN 다이오드에서와 같이 캐리어 통과시간과 캐패시턴스가 공핍층의 폭과 관계가 있으므로 결국 속도와 양자효율 사이에는 trade-off의 관계가 성립한다.

3. PIN 다이오드와 APD의 비교

PIN 다이오드와 APD의 비교는 일반적으로 다음과

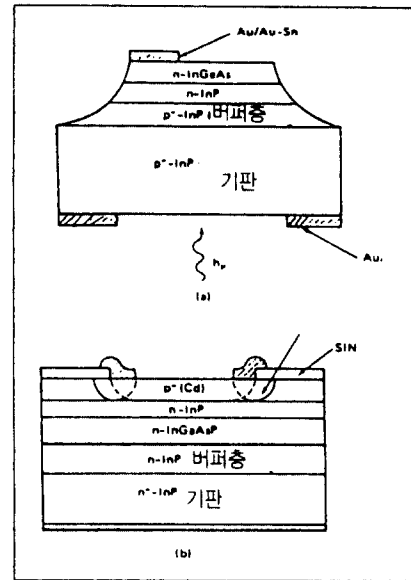


그림 3.3 InGaAs/InP APD구조 (a)mesa구조 (b)평면구조

같이 요약될 수 있다.

- 동일한 물질을 고려할 때 APD 수신기가 PIN 수신기 보다 훨씬 수신감도가 좋다. 따라서 전송률이 높은 장거리 광섬유 통신시스템에서 수신신호가 미약한 경우에는 APD가 유리하다.
- PIN 다이오드는 제작이 용이하므로 어레이소자 제작 등에서 경제성이 좋다.
- PIN 다이오드는 집적화가 용이하므로 PIN-FET 소자를 구성하여 APD보다 열세인 수신감도를 만회할 수 있다.
- APD 소자의 경우 누화전류나 증폭도에 있어서 온도에 민감하기 때문에 안정화회로가 필요하다.
- APD 소자는 수십 또는 수백 볼트 이상의 높은 전압이 요구된다.

위와같이 광검출소자를 선택할 때에는 가격, 성능, 공정 그리고 신뢰도 등과 같은 요소들을 종합적으로 검토하여 결정해야 한다.

IV. 광변조 기술 및 소자

광섬유 통신에서 변조(modulation)는 광섬유에 전달되는 광캐리어에 광정보를 실어보내는 수단을 의미한다. 정보를 담은 변조된 광캐리어는 광섬유를 통하여 수신 측에 전달되고, 수신 측의 광검출기에서 광펄스가 전기적 펄스로 변환되어 복조기를 거친 후 원



래 정보가 추출된다. 대부분의 광통신 시스템에서는 디지털 변조 방식을 사용하고 있다. 2진 데이터를 하나의 파형으로 변환하는 것을 코딩이라 하고, 코드화된 정보를 광에너지로 변환하는 것을 변조라 한다. 본 절에서는 변조의 형태와 방법 그리고 사용되는 변조기의 동작원리에 대해 기술하였다.

1. 변조의 형태

1.1 아날로그 변조 및 디지털 변조

광원으로부터 방사되는 빛을 특성화하여 정보를 실어 나를 수 있는 파라미터에는 진폭(또는 전력), 주파수, 위상 그리고 편향 등이 있다. 이 중에서 처음 세 가지를 포함하는 변조형태는 그림 4.1과 같이 나타낼 수 있다. 아날로그 변조방식에는 진폭변조(AM), 주파수 변조(FM), 위상변조(PM) 등이 있고, 변조방식을 나타내는 단어에 변조를 뜻하는 'M'자가 붙어 다닌다. 디지털 변조방식에서는 ASK (amplitude shift keying), FSK (frequency shift keying), PSK (phase shift keying) 등과 같이 'SK'가 첨가된다. ASK의 경우는 광신호 진폭의 개별적인 레벨 사이에 일어나는 교환을 나타낸다. 이러한 진폭레벨은 보통 두 개인 경우가 많은데 하나는 낮은 레벨이고, 다른 하나는 높은 레벨을 갖는다. 이러한 레벨은 'on'상태와 'off'상태 사이의 교환을 의미한다. FSK는 특정한 주파수를 코드화한 값 사이에 일어나는 교환을 의미한다. 두 개의 레벨을 나타내는 2진 코드는 두 개의 주파수의 개별 값으로 표시된다. 통상 한 주파수가 '1'을 나타내면 다른 주파수는 '0'을 나타낸다. '1'과 '0'이 계속 반복되는 비트 스트림을 생각해 보면, FSK 신

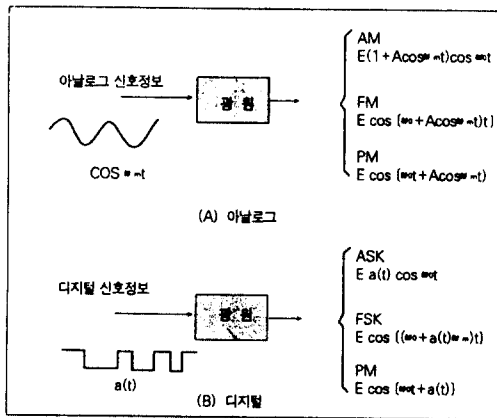


그림 4.1 기본적인 변조형태

(A)아날로그 광원인 경우, (B)디지털 광원인 경우

호는 두 주파수 사이를 오가는 정현파가 된다. 이것은 단순히 두 개의 ASK 신호의 스펙트럼이 결합된 형태로 간주될 수 있다. ASK는 다른 변조방법 보다 광시스템에서 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있지만 수신률이 FSK, PSK에 비해 현저히 떨어지는 단점이 있다.

1.2 직접변조와 외부변조

직접변조는 LD의 주입전류가 신호 파형에 맞추어 직접 변화하여 출력광을 변조하는 것을 말한다. 이는 FM이나 ASK를 수행하는 방법으로 간단하면서도 효과적이다. 그러나 AM이나 ASK를 수행할 때는 전류의 변화가 훨씬 더 크고 chirping 효과도 일어난다. 그림 4.2(a)는 소멸비(r: '0'비트와 '1'비트출력비) r>0인 LD의 바이어스 전류로 구형파 ASK 신호를 출력하는 과정을 보여준다. r=0인 경우는 그림 4.2(b)에 나타나 있다. r을 '0'으로 감소시킬 경우 변조영역이 문턱전류(I<sub>th</sub>) 이하로 떨어지는 경우가 생기고 그 결과 chirping이 발생한다. 두 경우를 비교해 보면 chirping을 피하고 P-I커브의 선형영역에서 소멸비를 '0'으로 하지 않도록 하는 노력이 필요하다는 것을 알 수 있다. 만일 '0'비트 구간에서 광원의 전원을 끄는 수단으로 r을 감소시키려고 한다면 문제가 발생한다. 요구전류를 심하게 낮추는 것은 심각한 주파수 변화를 초래한다. 주입전류를 거의 '0'지점으로 보내어 몇 나노초(10-9초) 동안 광출력을 끊어 버리면 다음 '1'이 왔을 때 광출력이 다시 나타날 때까지는

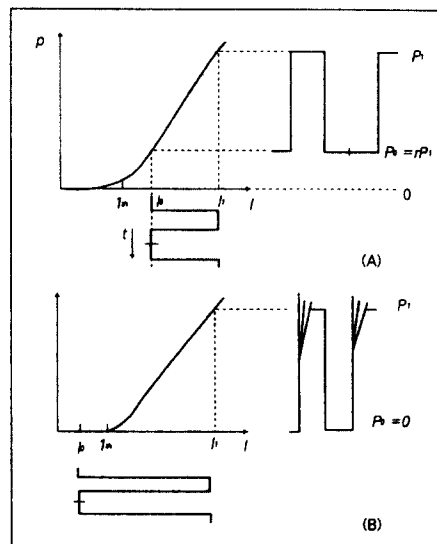


그림 4.2 직접 ASK 변조방식

수나노초의 turn-on-delay가 발생한다. 이러한 chirping 효과는 한 채널의 에너지를 소멸시키고 채널 간의 누화현상(cross-talk)을 발생시킨다. Chirping 영향을 제거하기 위한 방법으로 광생성 부분과 변조과정을 완전히 분리할 수 있다. LD는 연속 광출력(CW)을 발생하도록 하고 변조기는 LD 다음 단계 부착하여 출력광을 제어한다.

변조기로부터의 광반사가 충분히 작다면 LD의 선폭은 필요이상으로 증가하지는 않을 것이다. 그러나 많은 경우 변조기로부터 LD 쪽으로 광이 반사되지 못하도록 광 isolator를 사용한다. 거의 대부분의 코히어런트 시스템에서는 좁은 송신기의 선폭을 유지하기 위하여 외부변조기를 사용하여야 한다.

2. 외부 광변조기

현재 사용중인 두 가지 대표적인 광변조기는 음향광학 변조기와 전기광학 변조기를 들 수 있다. 이러한 변조기의 핵심 특성들을 살펴보기로 한다.

2.1 음향광학 (acoustooptic) 변조기

음향광학 변조기는 Bragg 회절원리를 바탕으로 동작한다. 한가지 대표적인 경우로서 유리막대 끝에 결합된 압전 전기 변환기로 구성된 것이 있다. 이 변환기는 음향파를 생성하여 물질의 굴절률을 변화시키고, 결국 이 물질을 통과하는 빛을 회절시켜 변조과정을 얻게 된다. 이러한 소자들은 전기광학 변조기 보다 높은 레이저 출력을 변조할 수 있지만 내부손실이 크고 높은 구동전력이 요구되는 단점이 있다. 이러한 변조기는 메가 비트급 광전송 시스템에 가장 유용하게 쓰일 수 있다.

2.2 광도파로 위상 변조기

전기광학 변조기는 전기광학 Pockel 효과를 이용한다. 어떤 결정체에서 Pockel 효과는 결정체에 부착된 전극에 가해진 구동전압과 결정 내에서 빛이 진행함에 따라 유도되는 위상전이(phase shift)와의 사이에 존재하는 선형적인 관계의 결과로 나타난다.

그림 4.3은 LiNbO<sub>3</sub> 결정체에 Ti로 도파로를 형성하여 만든 외부 위상 변조기를 보여주고 있다. 광도파로의 채널은 Ti를 소자의 전극 사이로 띠 형태로 확산시켜 형성한다. 전극에 가해진 전압은 도파로의 굴절률을 변화시킨다. 구동전압이 변화하면 도파로를 따라 진행되는 빛의 속도가 변화하여, 결국 위상 변조가 발생한다.

2.3 광도파로 진폭 변조기

광도파로 진폭 변조기의 형태는 그림 4.4에 보여진 바와 같이 방향성 결합기(directional coupler)와 Mach Zehnder형 진폭 변조기로 분류된다. 방향성 결합기 변조기는 두 개의 도파로를 근접시키고 양쪽 도파로 가까이 전극을 두어 도파로를 진행하는 광파의 결합을 유도하는 구조를 가지고 있다. 따라서 전극에 가해진 전압을 조정하여 결합영역의 양쪽 도파부분에 전압 가변 위상전이가 유도된다. 입력광 중에서 출력 1로 전달되는 양은 결합길이 Z에 따라 달라진다. 또한 결합길이를 고정시켰다면 전압에 따라 입력광 모두가 출력 2로 전달되기도 하고 모두 출력 1로 전달되기도 한다. 따라서 이러한 두 값 사이에서 변조전압을 변화시키면 ASK 변조를 얻을 수 있다. Mach Zehnder형 진폭 변조기는 두 개의 도파로로 구성된 일종의 위상간섭계이다. 한쪽 도파로에 전극을 두어 가해진 전압으로 도파로 굴절률을 변화시켜, 도파로를 진행하는 신호파의 위상을 변화시키면 두 개의 도파로에서 위상 차가 생긴다. 이론적으로 두 도파로를 지나는 진행파의 위상차이가 0°이나 2π° 정수배 일 때 출력 1에 광출력이 모두 나타나고 출력 2에서는 나타나지 않는다. 그러나 길이의 차이가 π° 만큼 변하면 출력 1에는 광출력이 사라지고 모든 광은 출력 2로 옮겨간다. 일반적으로 Mach Zehnder 광변조기는 방향성 결합기형 보다 신호 소멸비가 더 좋다. 이는 위상제거 조절이 Mach Zehnder 광변조기에서 훨씬 더 정확하게 이루어질 수 있기 때문이다.

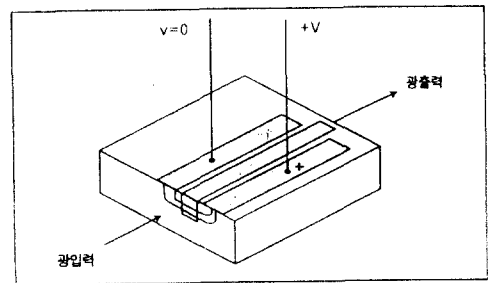


그림 4.3 외부 위상 변조기의 구조

2.4 음향광학 변조기와 전기광학 변조기의 비교

음향광학 변조기의 광학적 및 전기적 특성은 전기광학 변조기에 비해 현저하지 않다. 음향광학 변조기는 메가 비트(mega=10<sup>6</sup>)급 광섬유 시스템에는 유용하게 쓰일 수 있지만 대역폭이 좁기 때문에 기가 비트(giga=10<sup>9</sup>)급 코히어런트 광섬유 링크에 적용하기

힘들다. 그러나 전기광학 변조기는 넓은 대역폭을 지니기 때문에 기가 비트급 광섬유 시스템에 사용되고 있다. 광도파로 변조기는 보통 수 기가Hz의 대역폭을 가지고 있다. 또한 광손실이 음향광학 변조기보다 작기 때문에 대역폭당 전력소모가 작다. 그러나 광도파로 변조기는 내부손실이나 Chirping 등의 문제를 여전히 안고 있다.

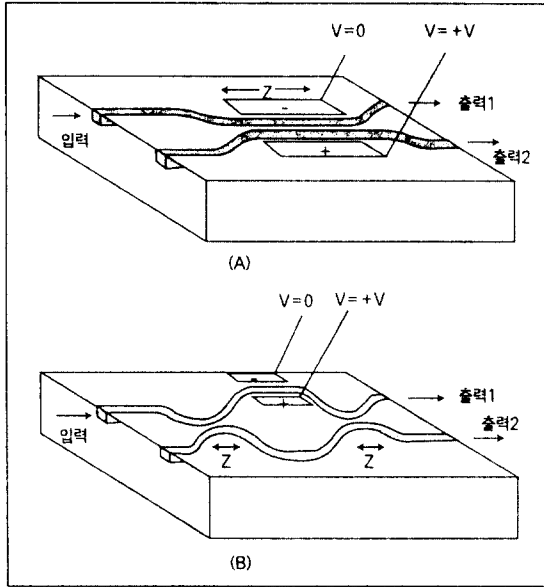


그림 4.4 집적화된 두 가지 형태의 외부 ASK 변조기  
(A)방향성 결합기 구조, (B)Mach-Zehnder구조

### V. 반도체 광증폭기

근래에 들어 분산천이 광섬유의 등장 등, 광섬유에서의 광분산이 더 이상 광통신 시스템의 용량을 제한하는 요인이 되지 않으면서 분산을 제거하고 광신호를 재생해주는 지금까지의 복잡하고 값비싼 재생기 대신 감쇄된 광신호를 직접 증폭해주는 광증폭기가 도입되었고, 이로 인해 고속 무중계 장거리 광통신의 혁신적인 새로운 장이 열리게 되었다. 이에 대한 실현으로 주로 1.55 $\mu\text{m}$  파장 대역에서의 광손실을 보상해주는 어븀첨가 광섬유 증폭기(EDFA)를 이용한 장거리 전송 시스템이 매우 심도 있게 선진 각국에서 연구되어 오고 있다. 또한 EDFA에 비해 상대적으로 이득 증폭이 떨어지지만 그 구성이 무척 간단하며, 1.55 $\mu\text{m}$  파장 대역에 국한되어 있는 EDFA에 비해 여러 가지 파장 대역에서도 작동하고 다른 광소자와의 집

적이 가능한 반도체 광증폭기에 대해서도 많은 연구가 이루어져 왔다. 본 절에서는 반도체 광증폭기의 기본 동작 특성을 소개하고 그 응용분야에 대해 기술하고자 한다.

#### 1. 반도체 광증폭기의 특성

반도체 광증폭기는 LD에서의 동작 기구와 같이 입사되어 들어온 빛을 강제발진 (stimulated emission)을 통해 증폭한다. 반도체 광증폭기의 이득은 증폭기내에서 광펌핑 또는 전기적 펌핑에 의해 밀도반전 (population inversion)이 일어남으로써 얻어진다. 반도체 광증폭기는 AR코팅 정도에 따라 그 성능이 크게 좌우되며 이에 따라 종류가 나뉘어 진다. 단일통과 이득이  $G_S$ 이고 LD의 반사율이  $R$ 일 때  $G_S R$  값이 0.17 보다 작으면 TW(Traveling Wave) SOA, 0.17보다 크면 FP SOA로 분류된다.

좀 더 세밀하게 분류하면 TW SOA는 이득 스펙트럼 상에서의 이득 리플 (ripple)이 1dB 이하이면 TW SOA, 3~4dB 이면 NTW SOA, 그 이상이면 FP SOA로 분류된다. 이득 리플이 1dB 이하가 되려면  $G_S R$  값이 0.06보다 작아야함을 의미한다.  $R$ 이 작을수록, 즉 이상적인 TW SOA일 수록 증폭기의 대역폭이 늘어나며 (반사율이 0.04% 일 때 약 70nm의 대역폭) 증폭기의 전송특성이 인가전류의 미세한 진동, 온도, 입력광의 편광 등에 덜 영향을 받는다. 반도체 증폭기의 특성은 이득 스펙트럼, 반사방지 코팅, 편광 감도, 잡음, 이득포화에 의해 결정되는데 각각의 특성은 다음과 같다.

##### 1.1 이득 스펙트럼

파장에 대한 이득 스펙트럼으로부터 반도체 광증폭기를 분류할 수 있다. 그림 5.1에 FP-SOA와 TW-SOA의 이득 스펙트럼이 LD칩 구조와 함께 나타나 있다. AR 코팅이 잘된 TW-SOA의 경우 수십 THz의 대역폭을 갖는다. 증폭기에 본래의 임계전류의 5~6배에 해당하는 동작전류를 가해주면 AR코팅이 잘되어 반사율이 작은 증폭기라 할 지라도 리플을 보이기 시작한다. 이때 AR코팅은 특정한 파장에 대해 최적으로 이루어지기 때문에 파장에 따라 리플의 정도가 다르게 나타나 있다. 그림 5.2에 이와 같은 현상이 나타나 있다. 따라서 증폭기가 전치 증폭기와 같이 최소한의 잡음을 요하는 응용분야에서는 이점을 고려하여 이용파장을 선택해야 한다. 또한 리플은 증폭기 이득에 비례해서 커지므로 반도체 광증폭기를 시스템

에 응용시 리플을 고려한 이득의 적정 값을 선택해야 한다.

1.2 AR (anti-reflection) 코팅

일반적인 LD 구조를 갖는 반도체 광증폭기의 양면 반사율은 보통 LD의 반사율( $R_1=R_2=0.3$ ) 보다 훨씬 작게 해 줌으로써 LD 칩의 양단면 반사율이 거의 없게 해준다. AR 코팅이 잘될수록 증폭기의 대역폭이 넓어지고 특성이 좋아진다. 그러나 반사율이 작아지면 증폭기의 파장이 낮은 쪽으로 이동하게 되므로 이를 고려해서 LD칩을 선정해야 한다. III-V 족의 반도체 소자에 AR 코팅을 하는 물질에는  $AlO_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$  등이 널리 쓰이고 있다.

1.3 편광감도 (polarization sensitivity)

반도체 광증폭기의 주 단점 가운데 하나는 증폭기의 이득이 입력 광신호의 편광상태에 따라 달라진다는 것이다. 이러한 증폭기의 편광 의존성은 첫째로, LD 활성층의 구조가 비대칭이어서 TE, TM 성분의 제한계수가 서로 달라서 발생하고, 둘째로 TE와 TM 성분간의 모드 굴절률 차이로 AR코팅에 의한 반사율

이 서로 일치하지 않기 때문이다. 최근 이와 같은 편광의존 문제를 최소화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 두 개의 별도의 증폭기를 병렬로 혹은 직렬로 연결하는 구조, 혹은 하나의 증폭기에 빛이 두 번 지나가게 하는 더블패스 구조 등이 편광감도를 줄이는 구조로 제시되었다. 그러나 실제적인 관점에서 볼 때, 이처럼 기존의 편광의존성 증폭기를 이용해 편광의존 문제를 해결하기보다는 증폭기 자체를 편광에 무관하게 만드는 것이 바람직하다. 이러한 것들로는 묻힌 단면 (buried facet) 구조, 다중양자우물구조, 혹은 벌크-릿지 (bulk ridge) 구조 등의 증폭기가 발표되고 있다. 이러한 구조를 갖는 증폭기의 TE와 TM 성분의 이득차이는 1dB 미만이다.

1.4 잡음(Noise): SNR의 감쇄

반도체 광증폭기에서의 잡음은 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio: SNR)의 감쇄로 해석되는데 이러한 잡음은 주로 이득물질에서의 자연방출에 기인한다. SNR의 감쇄는 잡음지수(Noise Figure : NF)로 다음과 같이 나타나 진다.  $NF = (SNR)_{in} / (SNR)_{out}$  여기서 NF는 광검출기와 관련된 산탄잡음 (shot noise)과 열 잡음 등과 같은 검출기 파라미터에 좌우된다. SNR을 감쇄 시키는 성분은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 자연방출에 의한 잡음
- 산탄잡음 (shot noise)
- 신호 대 자연방출 비트 잡음
- 자연방출 대 자연방출 비트 잡음
- 열 잡음 (thermal noise)

이 가운데 자연방출 대 자연방출 비트 잡음과 열 잡음은 상대적으로 기여도가 작으며, 주요 잡음의 요인으로는 산탄잡음과 신호 대 자연방출 비트 잡음에 의한 것으로 자연방출과 기인한 잡음이다. 결론적으로 증폭기의 NF는 다음과 같이 표현된다.

$$NF = 2n_{sp}(a-1)/a \approx 2n_{sp}$$

이 식이 의미하는 것은 밀도반전 지수가 1인 이상적인 증폭기라 할지라도 자연방출에 의한 잡음으로 인해 증폭된 신호의 SNR 값이 2배 즉, 3dB 떨어짐을 의미한다. 대부분의 증폭기의 NF 값은 3dB 이상이며

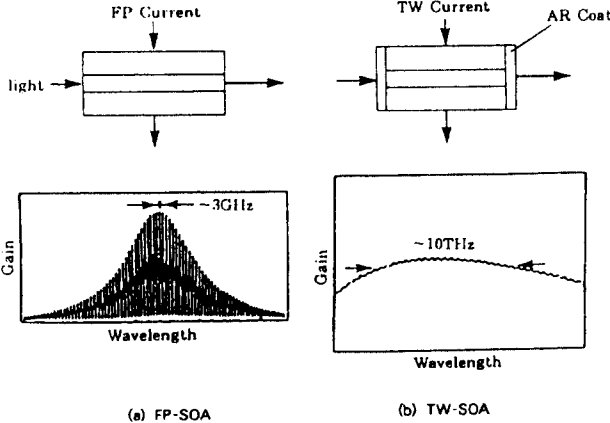


그림 5.1 반도체 광증폭기의 이득 스펙트럼

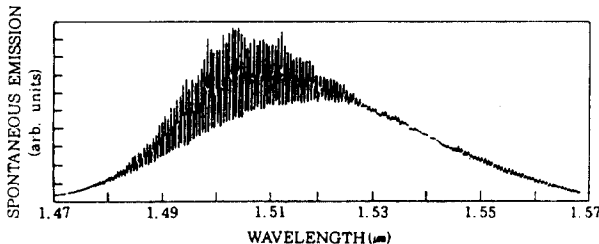


그림 5.2 파장에 따라 리플정도가 다르게 나타나는 반도체 광증폭기의 이득 스펙트럼

6~8dB 가량 되기도 한다. 따라서 광통신 시스템에서 이용되는 반도체 광증폭기는 가능한 한 최소의 NF 값을 가져야 한다.

1.5 이득포화 (gain saturation)

반도체 광증폭기의 출력은 증폭기의 이득포화에 의해 제한을 받는다. 즉, 반도체 광증폭기가 낼 수 있는 출력은 증폭기의 단일통과 이득이 3dB 떨어질 때의 출력에 해당한다. 증폭기의 출력은 아래 식으로 표현된다.

$$P_{\infty} = \frac{wdE}{\Gamma\tau a} \ln 2$$

여기서 w는 활성층 두께, d는 공진기 길이, E는 광자에너지,  $\Gamma$ 는 제한상수,  $\tau$ 는 반송자 수명, a는 이득상수 등이다. 포화출력,  $P_{\infty}$ 가 클수록 증폭기의 동작 영역이 넓어지고 후치증폭기로의 응용에 있어 가장 중요한 파라미터가 된다. 포화출력을 크게 하기 위해서는 활성층의 제한상수나 반송자 수명을 줄일 수 있다. 최근에는 다중양자우물 구조의 활성층으로 된 반도체 광증폭기로부터 매우 큰 포화출력을 얻을 수 있음이 발표되고 있다.

2. 반도체 광증폭기의 응용

반도체 광증폭기의 장점중 EDFA와 비교해 두드러지는 것은 EDFA가 주로 광전송 상에서 중계기로서 이용되는 것에 반해 반도체 광증폭기는 중계기로서의 역할뿐만 아니라 아래와 같은 여러 분야에서 응용될 수 있다는 것이다.

1) 광통신 시스템에서의 세 가지 주 응용분야

- 후치증폭기(post-power-amplifier): LD는 적은 양의 전류로 변조시켜 처핑 등을 극소화하고 LD의 출력신호를 증폭하는 용도이다.

- 선로 증폭기(in-line-amplifier): 송신기와 수신기 사이의 허용 가능한 광손실을 늘려주기 위한 중계기

- 전치 증폭기(pre-amplifier): 수신기의 수신감도 향상을 목적으로 미약해진 광신호를 검출기 전단에서 증폭해 주는 용도이다.

2) 근거리 통신망의 가입자 수 확장에 사용된다.

3) 반도체 광증폭기의 이득포화, 4파혼합 등의 특성을 이용해 파장변환기로서의 응용이 가능하다.

4) 반도체 광증폭기를 게이트(gate)로 이용한 광스위치로의 응용이 가능하다.

VI. 맺는 말

지금까지 주로 반도체를 이용한 광 능동소자의 일반적인 특성을 살펴 보았다. 화합물 반도체의 에피성장 기술이 발전함에 따라 양자우물 구조를 이용한 레이저 다이오드가 가능하게 되었고, 이는 기존 레이저 다이오드의 특성을 현저히 향상시킬 뿐만 아니라 표면방출 레이저 다이오드 등과 같은 새로운 개념의 레이저 다이오드의 출현을 가능하게 하였다. 반도체 증폭기도 광섬유증폭기에 비해 이득특성에서 불리한 입장에 있었으나 최근에는 광신호 게이팅 특성을 이용하여 파장가변소자로 이용될 수 있게 되는 등 그 응용범위가 점차 확대되고 있다. 이와같이 최근 광 능동소자의 기술이 급격히 발전하고 있어 무척 고무적인 일이 아닐 수 없다.

본 고의 서두에서도 밝힌 바와같이 향후의 광통신 시스템에서 가장 중요한 광 능동소자의 기술진보는 가장 먼저 선행되어야 할 과제이다. 아직 해결해야 할 난제도 무척 많으며, 소자의 성능 뿐만 아니라 경제성까지도 고려된 연구개발이 절실하다.

참 고 문 헌

[1] T.Tamir, Guided-Wave Optoelectronics, 2nd ED., Springe-Verlag, 1990.  
 [2] D.Wood, Optoelectronic Semiconductor Devices, Prentive Hall, 1994.  
 [3] M.J. Adams, An introduction to Optical Waveguide, John Wiley & Sons Ltd., 1981.  
 [4] G.P.Agrawal, Semiconductor Lasers, AIP press, 1995.  
 [5] G.P.Agrawal, N.K.Dutta, Semiconductor Lasers, 2nd ED., VNR, 1993.  
 [6] B.E.A. Saleh, M.C.Teich, Fundamentals of Photonics, Wiley Interscience, 1994.  
 [7] J.E. Midwinter et.al, Optoelectronics and Lightwave Technology, John Wiley & Sons, 1992.  
 [8] 광통신의 전개, 한국전자통신연구소, 1994.



민 용 협

- 1978년 3월 : 울산공과대학 전자공학과(학사)
- 1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과(석사)
- 1990년 2월 : Cornell Univ. 전기공학과(박사)
- 1981년12월~1985년12월 : 한국전자통신연구소 광통신연구실
- 1986년 1월~1990년10월 : Cornell Univ. Reserach Assistant
- 1990년10월~1992년 7월 : 한국전자통신연구소 기초기술연구부
- 1992년 7월~현재 : 한국전자통신연구소 교환기술연구단 책임연구원 광교환연구실 실장
- 주관심분야 : Photonic Switching, Nonlinear Optical Devices, Quantum Well Structures, Optical Interconnection.