

## 통신용 광검출기 소개



박찬용

한국전자통신연구원  
광전자연구실



김홍만

한국전자통신연구원  
광전자연구실

### 1. 서론

현재의 광통신은 광섬유 한가닥으로 초당 수십억개(수 giga bit) 용량의 디지털 신호를 오류 없이 수십 km 거리를 전송할 수 있어 매우 경제적인 통신수단으로 각광받고 있다. 광검출기는(Photodetector) 반도체 레이저와 더불어

광통신의 중요한 부품중 하나로 반도체레이저가 전기신호를 광신호로 바꾸는 역할을 하는 반면 광검출기는 이를 전기신호로 바꾸는 역할을 하는 소자이다. 초당 수십억개의 광신호를 재생하기 위해서 광검출기는 매우 빠른 속도의 응답특성을 가져야 하며 이를 위해서는 반도체를 재료로 사용한다. 또한 수십 km의 광섬유를 지나는 동안 광신호가  $1\mu W$  정도로 약해지기 때문에 수신감도가 좋아야 한다.

반도체 내부에 밴드갭 보다 에너지가 큰 빛을 입사시키면 가전자대(Valence Band)의 전자가 빛의 에너지를 흡수하여 전도대(Conduction Band)로 여기하고 가전자대에는 정공이 남게 된다. 이와 같이 생성된 전자-정공 쌍을 전기신호로 이용하기 위해서는 빠른 속도로 외부 회로로 이동시켜야 한다. 광통신에 사용되는 실리콘 광섬유가  $1.55\mu m$  파장에서 손실이 최소가 되기 때문에 광검출기는  $1.55\mu m$  파장을 검출할 수 있어야 하고 따라서 반도체 재료의 밴드갭 에너지가  $1.55\mu m$  빛 에너지 보다 작아야 한다. 이러한 반도체 재료중 InP 반도체와 격자상수가 일치하는  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  가 가장 우수한 특성을 보이고 있다.[1]

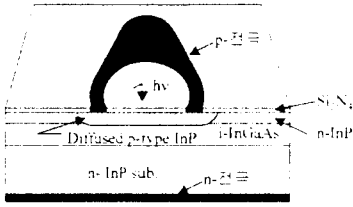
광검출기의 종류에는 MSM(Metal-Semiconductor-Metal), PIN PD, Phototransistor, APD(Avalanche Photodiode)등이 있으며 각 구조는 사용 용도에 따라 각기 장점을 갖고 있다. 수신감도

는 APD가 가장 좋으나 구조설계 및 제작이 어려우며, MSM은 HEMT(High Electron Mobility Transistor)와 비슷한 결정성장 구조를 갖기 때문에 집적구조로 많이 이용되고 있다. Phototransistor는 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)와 구조가 비슷한데 HBT의 base층 동작을 빛의 조사에 의해 이루는 구조이다. 앞에서 서술한 구조 가운데 PIN PD와 APD가 용도에 따라 가장 많이 이용되고 있고 특성이 우수하므로 본 기술 해설 논문에서는 주로 두 구조를 예를 들어 설명하고자 한다.

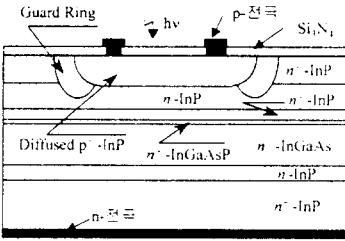
### 2. 광검출기의 구조 및 동작 특성

그림 1은 제작이 가장 간단한 전방입사 평면형 PIN PD와 APD 구조를 나타내고 있다. PN접합은 Zn나 Cd의 확산에 의해 얻을 수 있으며, 광흡수층을 포함한 여러 층은 주로 유기금속 기상 증착법(Metal-organic Chemical Vapor Deposition; MOCVD)에 의해 성장한다. 광흡수층은 I-층(intrinsic 층)으로 성장하는데 MOCVD법으로 성장할 경우 N-type으로  $10^{15} cm^{-3}$  정도의 캐리어 농도를 얻을 수 있다.

그림 2는 광검출기의 개념도를 나타낸 것으로 PIN 구조로 되어 있으며 역바이어스 전압이 가해진 구조이다. 광신호가 입사하면 I-층에서 흡수가 일어나고 전자-정공 쌍이 생성된다. 이들 전자-정공 쌍은 전기장에 의해 분리되어



(a) 평면형 PIN PD



(b) 평면형 APD

그림 1. 통신용 광검출기 구조

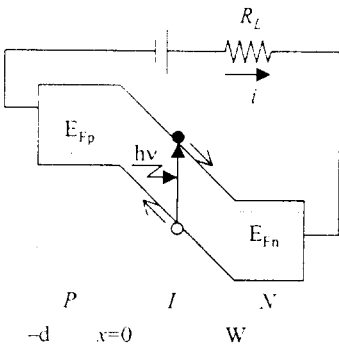


그림 2. PIN 다이오드의 밴드 구조

전자는 N-층을, 정공은 P-층을 향하여 이동하며 캐리어가 이동하는 동안 외부 회로에 전류가 흐르게 되어 전기신호로 바꾸게 된다. 광신호가 P-층에서 입사한다면, P-층에서 흡수된 광신호는 손실로 작용하는데 이를 제거하기 위해 P-층은 밴드갭이 큰 물질을 이용하여 해소할 수 있다. 광검출기의 중요한 파라미터는 양자효율, 누설전류, 동작속도 등을 들 수 있으며[1], APD의 경우 이외에도 증폭 지수 (Avalanche Gain

Factor), 잉여잡음지수 (Excess Noise Factor), 이득-대역폭 곱 (Gain-Bandwidth Product: GB) 등이 성능을 좌우하는 요소로 꼽힌다.

(1) 양자효율

반도체 내부에 빛이 입사하여 단위거리를 지나는 동안 흡수되는 비율을  $a$ 라 하면 P-층에서의 흡수를 무시할 때 양자효율은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\eta = (1 - \gamma)(1 - e^{-aW}) \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 흡수계수,  $r$ 은 반도체 표면에서의 반사율,  $W$ 는 그림 2에 나타난 바와 같이 공핍된 흡수층(Depleted Absorption Layer)의 두께를 각각 나타낸다. 양자효율을 크게 하기 위해서 반도체 표면에서의 반사를 없애야 하고, 흡수층의 두께를 증가시켜야 함을 알 수 있다. 공핍된 흡수층의 두께를 증가시키기 위해서는 낮은 역전압에서도 공핍이 잘 일어나도록 I-층의 불순물 농도를 낮추어야 한다. 표면반사를 줄이기 위해서 일반적으로 표면에 굴절률이 반도체 보다 낮은 유전체를 증착하는데, 반도체의 굴절률이 3.4~3.5 정도이므로 굴절률이  $n = \sqrt{n_a \cdot n_s} = 1.85 \sim 1.9 [n_a=1, n_s \sim 3.5]$  정도의 값을 갖는  $Si_3N_4$ 가 가장 좋다. 증착 두께는  $\lambda/4n$  이며  $n=1.85, \lambda=1550 \text{ nm}$ 를 가정하면 약  $2100 \text{ \AA}$  이다. 양자 효율은 광검출기의 중요한 성능지수 중 하나로 직접 측정할 수 있는 요소가 아니다. 따라서 양자효율을 측정할 때 responsivity (R)을 측정하여 계산하기도 하고 아예 R로 특성을 나타내기도 한다. Responsivity는 입사시킨 광전력에 대해 외부 회로에서 측정된 광전류로

정의되며 양자효율과의 관계는 다음과 같다.

$$R (\text{Amp/Watt}) = \frac{i_{ph}}{P_0} = \frac{q n_e / T}{(n_{ph} / T) \cdot h\nu} = \eta M \frac{q\lambda}{hc} \quad (2)$$

(2)식에서 T는 단위시간을 나타내고, M은 APD와 같이 증폭을 갖고 있는 경우의 캐리어 증폭률을 나타내며,  $h$ 는 플랑크 상수,  $c$ 는 광속도이다.  $n_{ph}$ 는 광자의 수,  $n_e$ 가 생성된 캐리어의 수를 나타내므로  $n_e/n_{ph}$ 가 양자효율이 된다. 양자효율은 광검출기에서 출사되는 빛을 광검출기의 수광면적에 어느 정도 입사시키는가에 의해서도 좌우되므로 광검출기의 수광면적이 넓을수록 유리하나 이 경우 정전용량에 의한 동작속도 지연이 초래되므로 최적의 설계가 필요하다.

(2) 응답 속도

PIN 접합의 정전용량과 전극 패드에 의한 기생정전용량에 의한 RC time constant와 생성된 캐리어가 공핍층 (depletion layer)을 지나는데 걸리는 시간 (transit time), avalanche 증폭을 얻는데 걸리는 시간 등이 응답속도를 제한하는 주요 파라미터이며, hetero 접합의 장벽 및 공핍되지 않은 층에서의 캐리어 확산 등도 응답속도를 제한한다. 정전용량은 PN 접합면적이 넓을수록, 공핍층의 두께가 작을수록 커지므로 면적의 최적화와 공핍층 두께의 최대화가 요구 된다. Transit time은 캐리어의 포화속도와 공핍층의 두께에 관련되는데 10Gbps 이상의 초고속 동작을 위해서는  $1 \mu\text{m}$  이내로 공핍층의 두께를 줄여야 한다. 공핍층 두께를 줄이면 정전용량이 상승하고 양자효율이 감소하므로

초고속 동작을 위해서는 이들을 복합적으로 고려하여야 한다. Avalanche build-up 시간은 애벌란치 증폭을 얻기 위해 캐리어가 운동에너지를 얻어야 하고 이를 위해 가속 구간이 필요하므로 이에 소요되는 시간이며, 이중접합의 장벽에 의한 시간지연은 그림 3에 나타난 바와 같이 밴드갭이 큰 물질과 밴드갭이 작은 물질이 접합된 계면에서 나타난다. 그림 3에서 가전자대 불연속성은  $E_b$ 로 나타내었으며 InP/InGaAs 이중접합의 경우 약 0.35 eV이다. 따라서 광신호에 의해 생성된 정공이 이 장벽에 의해 포획되었다가 시간 차이를 두고 열적 방출에 의해 전류에 기여하므로 광검출 속도를 제한하게 되는 것이다. 이 현상을 줄이기 위해서 밴드갭이 큰 물질과 작은 물질 사이에 중간 밴드갭을 갖는 여러 층을 그림 3에 보인 바와 같이 성장하면 정공을 가두어 놓을 공간이 없어지므로 광검출 동작속도를 증가시킬 수 있게 된다.

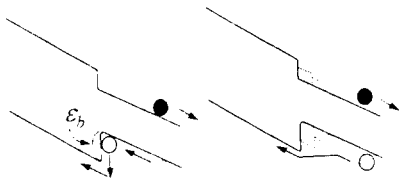


그림 3. 이중 접합 계면에서 정공 포획-방출

초고속 동작을 위해 고안된 PIN 구조의 예로 도파로형 광검출기를 들 수 있다. 그림 4는 도파로형 광검출기 구조의 한 예를 보여 준다. 밴드 불연속에 의한 캐리어의 포획-방출을 막기 위해 앞서 설명한 바와 같이 InGaAs와 InP의 중간 밴드갭을 갖는 InGaAsP를 InGaAs 광흡수층 전

후에 배치 한다. 초고속 동작을 위해 캐리어의 transit time을 줄여야 하므로 InGaAs층을 0.2~0.3 micron의 두께로 얇게 한다. 이 경우 양자효율이 매우 작을 것이므로 도파로 형태로 제작하여 빛을 측면에서 입사시키는데 도파로의 길이를 10~20  $\mu\text{m}$  으로 충분히 길게 하면 양자효율을 크게 증가시킬 수 있다. 초고속 동작을 위해서는 PN 접합 면적을 작게 하여야 하므로 I-InGaAs 층만 측면으로 더욱 예칭하고 길이도 가능하면 작게 한다. 그림 4에서 p-InP 및 p-InGaAsP를 I-InGaAs층보다 넓게 유지하는 이유는 음접촉 저항을 줄이기 위함이다. Kato 등은[2] 이 구조로 110 GHz의 초고속 동작 PIN PD를 제작하였다.

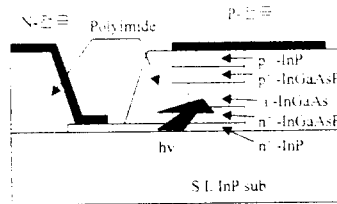


그림 4. 도파로형 광검출기

### (3) 누설전류

누설전류(leakage current)는 광신호 없이도 다이오드에 흐르는 전류를 말하는 것으로 암전류(dark current)라고도 부른다. 누설전류는 광검출시 산탄잡음(shot noise)의 원인이 되고 누설전류가 크면 소자의 수명이 짧아지므로 낮을수록 좋다. 그림 5는 PIN 구조에서 누설전류의 원인을 나타낸 것이다. 누설전류는 P(또는 N)-영역에서 열적으로 생성된 소수캐리어가 공핍층 내에서 열적으로 생성된 캐리어 쌍이 전기장

에 의해 분리되면서 발생하는 생성-재결합 전류(그림의 2),가전자대의 전자가 밴드갭을 투과하여 다른 위치의 전도대로 이동하는 터널링(그림의 3) 전류로 이루어진다. 확산전류 및 생성-재결합 전류는 InGaAs 광검출기의 경우 매우 작다. 터널링에 의한 전류는 높은 전기장을 인가할 경우 발생하며 InGaAs의 경우 200 kV/cm 이상의 전기장에서는 터널링 전류가 소자의 성능에 심각한 지장을 초래하게 된다. 그림 5의 4와 5는 깊은 준위를 형성하는 결정결함이 있을 경우 발생하는 band-defect-band 터널링을 나타내며 낮은 전기장에서도 쉽게 일어나므로 누설전류의 원인이 된다. 이와 같은 결정결함에 의한 누설전류는 소자 제작과정에서 많이 발생하므로 제작과정에 세심한 주의가 필요하다.

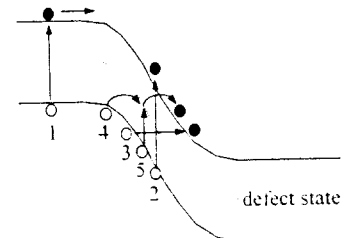


그림 5. PIN 다이오드의 누설전류

## 3. APD의 동작 특성

앞장에서 논의한 일반적인 사항은 PIN과 APD에 모두 적용된다. APD의 경우 광흡수 과정, 캐리어 분리/이동 과정, 캐리어 집합(collection) 과정 이외에 증폭과정이 있는 소자이다. 반도체 내부에 밴드갭 및 밴드 구조에 따라 차이가 있으나 100 kV~1MV/cm 정도의 높은 전기장을 인가하면 캐리어가 가속에 의해 에너지를 얻으며 가전자대의 전자와 충돌해

가전자대의 전자를 전도대로 여기시킬 수 있다. 이 현상을 avalanche impact ionization이라 부른다. 이 3체 충돌과정(3-body collision)에서 운동량과 에너지가 보존되어야 하므로 충돌-이온화 과정은 물질의 밴드 구조와 관계가 있다. 특히 전자가 단위거리를 지나는 동안 전자-정공쌍을 생성하는 횟수를  $\alpha$ , 정공이 단위거리를 지나는 동안 전자-정공쌍을 생성하는 횟수를  $\beta$ 라 부르며 이 값의 비율에 의해서 잉여잡음이 결정된다. 이 현상을 쉽게 설명하기 위해 그림 6에 나타낸 두 극단적인 증폭 구조를 살펴 보자. (편의상 전자 한 개가 증폭 영역에 입

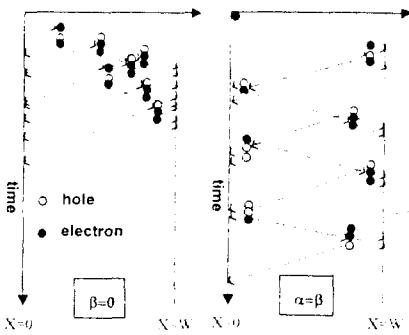


그림 6. 두 극단적인 경우의 avalanche 증폭 메카니즘

사한다고 가정) 일정한 공핍층 너비(W)에 대해 바이어스 전압을 증가시키면 전기장이 증가하는데  $\beta=0$ 인 경우에는 정공은 충돌-이온화 과정을 생성할 수 없으므로 전자만 증폭과정에 참여하고 전기장의 증가는 전자의 충돌-이온화 거리를 짧게 하며 따라서 증폭이 증가하게 된다.  $\alpha=\beta$ 인 경우에는 가속 에너지를 얻은 전자의 충돌-이온화 과정에 의해 생성된 정공이 반대 방향으로 가속되어 다시 충돌-이온화를 일으키고 이 과정

에서 생성된 전자가 다시 증폭에 참여하는 positive feedback 현상이 발생하여 증폭을 얻게 된다. 여기서 잉여잡음이 발생하는 물리적 현상을 살펴 보면 다음과 같다. 그림 6에 8배의 증폭을 나타내었는데 이는 평균증폭이 8배라는 뜻이며 항상 8배의 증폭을 유지한다는 뜻이 아니다. 캐리어의 충돌-이온화 과정은 확률적으로 일어나는데 확률은  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 함수이며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 전기장의 함수이다.  $\beta=0$ 인 경우에는 증폭 영역을 가로지르는 동안 계속해서 생성된 전자가 증폭에 참여하므로 증폭값이 평균치인 8에서 어긋날 확률이 작다. 반면에  $\alpha=\beta$ 인 경우에는 충돌-이온화 사건이 일어나지 않을 확률이 매 사건마다 있으므로 (첫번째 사건이 일어나지 않으면 증폭이 일어나지 않음) 증폭의 요동이 매우 커지게 된다. 증폭의 요동은 매 순간마다 신호의 크기를 바꾸게 되므로 잡음으로 작용한다. 부연해서 설명하면,  $\beta=0$ 인 경우에는 입사된 전자가 첫번째 사건을 일으키지 않을 확률은 매우 작다. 그 이유는 조금만 더 달리면 충돌-이온화할 확률을 1로 만들 수 있는 충분한 에너지를 얻기 때문이다. 따라서 그림 6에서 알 수 있듯이 어느 한 캐리어의 이온화율이 다른 캐리어 보다 월등히 클 때 잡음이 적은 APD를 제작할 수 있다. 또한, 증폭을 얻는데 걸리는 시간도 훨씬 작기 때문에 보다 큰 이득-대역폭 곱을 갖는 소자를 제작할 수 있게 된다. 반도체 재료중 실리콘은  $\alpha \sim 50\beta$ 이고 게르마늄은  $\alpha \sim \beta$ 이며 대부분의 III-V 반도체는  $\alpha = 2 \sim 5\beta$  또는  $\beta = 2 \sim 5\alpha$ 이다.[1] 이러한 관점에서 실리콘이 APD 재료로 가장 좋으나 광통신에 사용되는 파장을 흡수할 수 없기 때문에 앞으로 소개할 여러 가지 방

법들이 이용되고 있다.

APD 소자는 avalanche 증폭을 얻기 위해 매우 높은 전기장을 가하게 되는데, 그림 7에 나타낸 바와 같이 확산에 의해 형성된 PN 접합은 가장자리 부분에서는 곡률을 갖게 되고, 곡률을 갖는 PN 접합은 평면접합보다 전기장이 커지고 충돌-이온화할 확률이 높아져서 평면접합보다 높은 이득을 얻게 된다. 따라서 광신호가 입사되는 평면영역에서 충분한 이득을 얻을 만큼 전기장을 가할 수 없게 된다. 즉, 전기장을 증가시키면 가장자리 부분은 이득이 너무 커져 무한대의 전류가 흐르기 때문이다. 이 현상을 모서리 항복 (Edge Breakdown)이라 부르는데 S.M. Sze[3] 등의 계산에 의하면 곡률 반경과 잔류불순물 농도에 관계된다. 이 현상을 억제하기 위해서는 가장자리 부분의 전기장을 낮추어야 하며 이를 위해 가드링(Guard Ring)을 제작한다. 가드링은 곡률 반경이 크고, 캐리어 농도가 낮도

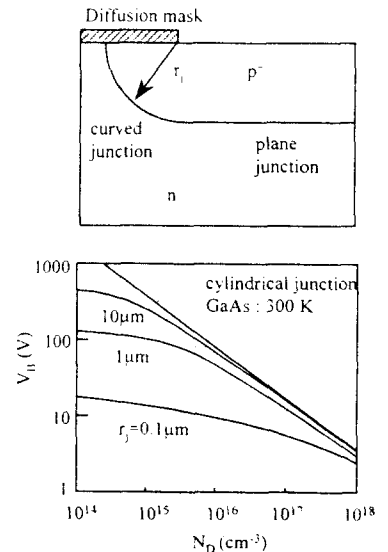
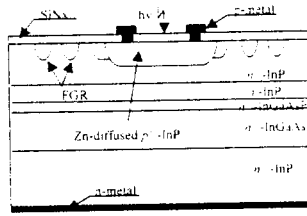


그림 7. 곡률반경에 의한 Edge Breakdown

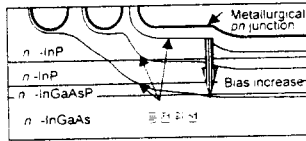
록 형성하여야 한다. 이 가드링은 APD의 실용화에서 가장 중요하다.

이온화 계수비는 APD 재료 측면에서 아주 중요하지만 증폭영역에 가해지는 전기장을 잘 설계하면 같은 물질을 이용해서도 보다 좋은 성능의 APD를 제작할 수 있다. 예를 들어 그림 1에 나타난 구조는 1980년대에 많이 연구-개발된 구조로서 증폭은 InP에서 광흡수는 InGaAs에서 분리 수행하므로 SAGM(Separated Absorption Grading and Multiplication) APD라 불리우는데 종래의 가드링 구조를 채택하고 있고 2.5 Gbps 광통신의 광검출기로 사용되고 있다. 그러나 증폭층을 그림 1에 나타난 PN 구조가 아니라 PIN 구조로[이를 HI-LO 구조라고도 부른다] 제작하면 가드링의 제작이 매우 어려우나 보다 높은 성능의 APD를 제작할 수 있다. Tarof 등은 가드링 대신 전하접시(Charge Plate)를 삽입하여 122 GHz의 매우 우수한 GB곱을 얻었으나[4] 이 구조는 결정장상을 2회화하여야 하는 약점 때문에 소자의 수명이 매우 짧아지는 단점을 갖고 있다. 신뢰성 있는 가드링 구조로서 그림 8에 나타난 FGR(Floating Guard Ring) 구조가 있다. [5] FGR은 Zn가 확산된 P-type이며 N-InP에 떠 있는 떠모양이며 전극이 연결되지 않는다. 바이어스 전압이 가해지면 PN 접합 경계에서 등전위선이 확장되는데 FGR 부분으로 확장되면 FGR을 뛰어 넘어 등전위선이 확장되므로 등전위선의 간격이 넓어지고 따라서 전기장을 낮출 수 있어 가드링으로 동작하게 된다.

그림 9는 FGR APD의 암전류 및 광전류 특성과 항복전압을 나타낸 것으로 밴드 불연속 효과에



(a) FGR APD의 단면 구조도



(b) FGR 동작 원리

그림 8. FGR APD의 구조 및 동작 원리

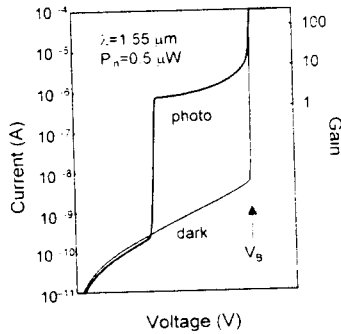


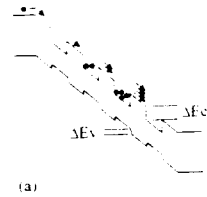
그림 9. FGR APD의 I-V 특성

의해 흡수층 공핍이 시작되는 전압에서 광전류가 크게 증가하고 그 이후에는 avalanche 증폭에 의해 서서히 증가하다가 항복 상태에 이르게 됨을 알 수 있다.

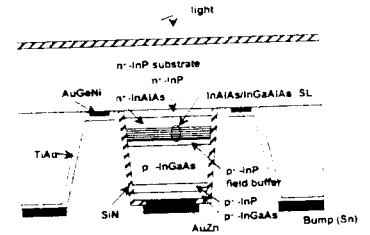
#### 4. APD 구조의 발전 방향

초고속 광통신에서 수신감도를 향상시키기 위해 잉여잡음이 적은 APD를 사용하여야 한다. 실리콘이 증폭층에 가장 좋은 물질이지만 광통신 파장의 빛을 흡수할 수 없기 때문에 여러 방법들이 시도되었는데 대표적인 예로 초격자

구조 APD를 들 수 있다. 초격자 구조 APD의 기본 개념은 그림 10에 나타난 바와 같이 전도대 불연속성이 큰 두 물질을 초격자 구조로 배치하면 전자가 장벽층을 지나 우물층에 도달했을 때 전도대 불연속 에너지 만큼이 전자의 에너지에 기여하므로 전자는 "hot electron"으로 작용하여 충돌-이온화를 쉽게 일으킬 수 있는 반면 정공은 가전자대의 불연속 에너지가 크지 않으므로 충돌-이온화 확률이 증가하지 않는다는 데에 두



(a)



(b)

그림 10. 초격자 증폭층 밴드 구조(a) 및 소자 구조(b)

고 있다. 캐리어가 전기장에 의해 가속되는 동안 끊임 없이 격자 포논과 충돌하여 에너지를 잃으므로 b값 보다 a값이 커지게 되는 것이다. NEC의 Taguchi 그룹은 InAlAs/InGaAs 초격자 구조를 구현하여 150 GHz의 이득-대역폭 곱을 얻었으며[6] 수신감도는 10 Gbps NRZ 데이터에 대해 27 ~ 29 dBm 정도로 매우 우수한 결과를 보여 주고 있다.[7] 최근에 광흡수는 InGaAs에서, 캐리어 증폭은 실리콘에서 이루기 위해

wafer bonding 기술을 활용하고 있다. Bowers 그룹은 wafer fusion 기술을 이용하여 315 GHz의 이득-대역폭 곱을 발표하였다.[8] Wafer bonding에 의한 APD 제작은 혁신적인 기술임에 틀림 없으나 암전류가 매우 크기 때문에 이를 억제하여야 한다.

### 5. 결 론

본 기술해설 논문에서는 광통신에서 가장 널리 사용되는 PIN PD와 APD를 주로 소개하였다. 이 두 소자의 변형된 구조도 무수히 있을 뿐만 아니라, MSM 및 Phototransistor 등 다른 구조의 소자도 있다. 또, 집적구조 및 용도

에 따라 변화된 구조도 많이 연구되고 있다. 그러나 이 모든 소자는 광검출기의 동작 원리를 잘 이해하면 쉽게 접근이 가능하다. 본 논문에서 소개한 내용이 통신용 광검출기의 이해에 도움이 되길 기대한다.

### 참 고 문 헌

- [1] F. Capasso, Semiconductors and Semimetals, **vol.22, part D**, Academic Press, 1985.
- [2] K. Kato, 10th Annual Meeting of Lasers and Electro-Optic Society, Extended Abstract **vol.1**, 158 (1997).
- [3] S.M.Sze and G.Gibbons, Solid State Electron., **vol.9**, 831 (1966)
- [4] L.E.Tarof et al., IEEE Photon. Tech. Lett., **vol.5**, 672 (1993)
- [5] D.E.Ackley et al., IEEE Photon. Tech. Lett., **vol.2**, 571 (1990)
- [6] I. Watanabe et al., IEEE Photon. Tech. Lett., **vol.8**, 269 (1996)
- [7] T. Y. Yun et al., IEEE Photon. Tech. Lett., **vol.8**, 1232 (1996)
- [8] W. Wu et al., 2nd Optoelectronics Communication Conference, Extended Abstract, 446 (1997)

< 정 영철 위원 >