현대광공학 개론 V : 광전자

이종창*

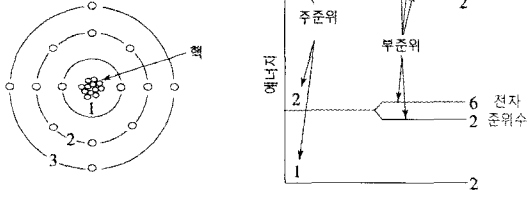
20세기 중반 정보기술혁명을 불러온 반도체 집적회로 기술은 현대 광기술에도 큰 영향을 주었다. 즉, 광통신 및 광정보처리 등에 필요한 다양한 광학장치를 경량화, 소형화, 집적화하였다. 이러한 반도체 기반 광소자는 작은 크기, 작은 구동전력, 높은 효율 외에도 전자시스템과의 결합이 용이한 점과 더불어 적외선에서 가시광선까지의 다양한 파장 영역에서의 활용으로 인해 광범위한 응용분야를 갖게 되었다. 초기에는 광통신기술에 응용되어 초고속 정보통신 시대를 개척한 반도체 광소자는 이어서 CD나 DVD 광픽업 등에 활용되어 멀티미디어 산업을 창출하였고, 오늘날에는 평판디스플레이와 반도체 백색광원을 구현하게 되는 등 그 응용분야가 점증하고 있다. 본 장에서는 이와 같이 현대 광기술 분야에 널리 응용하는 주요 광전자소자를 몇 가지로 분류하여 살펴보려 한다. 먼저 전자 에너지를 빛에너지로 바꾸어주는 반도체 발광소자에 대하여 살펴보고, 다음으로는 빛에너지를 전자에너지로 바꾸어주는 반도체 수광소자를 살펴보려 한다. 이와 아울러 광전자의 주요 응용분야인 평판디스플레이 소자 등에 대하여 살펴보려 한다. 기타 광통신에 사용되는 소자들은 다음 장에서 다룰 예정이다.

9.1 반도체의 광특성

9.1.1 직접 밴드갭 반도체와 간접 밴드갭 반도체

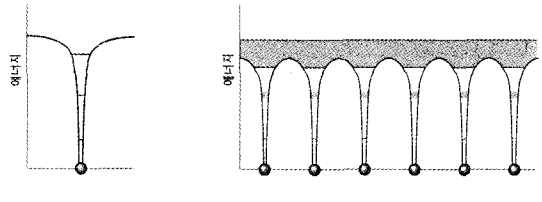
반도체는 원자가 주기적으로 배열하는 결정물질로 이루어져 있다. 단일원자의 경우와 달리 결정물질 내의 전자는 결정물질을 구성하는 각 원자의 상호작용에 의해 원자고유의 에너지준위보다 넓은 에너지 대역, 곧 에너지 밴드(energy band)를 형성한다. 그림 9.1에서 보듯이 단일원자의 경우 전자궤도에 따라 일정한 에너지준위를 갖는다. 예를 들어 원자번호 14번인 실리콘 원자(^{14}Si)의 경우 14개의 전자는 공전궤도에 따라 일정한 에너지를 갖는다. 첫 번째 궤도에 2개의 전자, 두 번째 궤도의 s 궤도와 p 궤도에 각각 2개와 6개, 세 번째 궤도의 s 궤도에 2개, p 궤도에 2개가 들어가 있다. 세 번째 궤도의 p 궤도에는 모두 6개의 전자가 들어갈 수 있는데, 2개만 들어가 있고 4개의 자리는 비어있는 채로 있다.

그러나 결정물질에서는 원자와 원자의 간격이 매우 작아 원자궤도를 순환하는 전자는 인접한 원자의 영향을 받는다. 이러한 영향으로 인해 어떤 전자는 속도가 느려지고, 어떤 전자는 탄력을 받아 속도가 증가한다. 이러한 속도의 증감은 전자의 운동에너지를 변화시켜 결국



(a) 실리콘 원자 ^{14}Si의 전자궤도 (b) 실리콘 전자궤도의 에너지준위

그림 9.1



(a) 단일원자의 에너지준위 (b) 결정의 에너지 밴드

그림 9.2

* 홍익대학교 전자전기공학부 교수

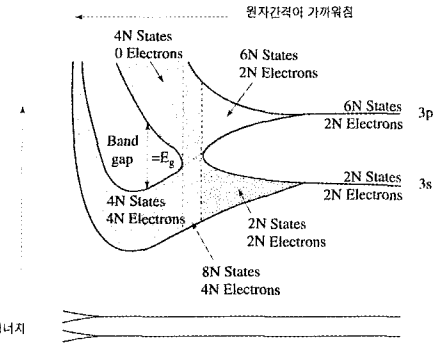


그림 9.3 실리콘 결정의 에너지 레벨

전자의 전체 에너지가 변한다. 이로 인해 결정물질에서는 그림 9.2의 오른쪽과 같이 각 궤도의 전자가 가질 수 있는 에너지 값의 범위가 넓어져서 일정한 폭을 갖게 된다. 이 경향은 에너지준위가 높을수록 넓어진다. 이러한 에너지 폭을 에너지 대역, 곧 에너지 밴드(energy band)라고 한다.

그림 9.3에서는 실리콘 결정에서 원자의 간격이 가까워짐에 따라 전자궤도의 에너지 밴드가 어떻게 넓어지는가를 보다 구체적으로 보여준다. 그런데 이렇게 넓어진 에너지 밴드가 서로 겹치게 되면 매우 특이한 현상이 일어난다. 그림 9.3에서 보듯이 3s 궤도와 3p 궤도의 에너지 밴드가 서로 겹치면, 3s 밴드의 전자 두 개와 3p 밴드의 일부가 하나의 밴드로 합쳐져서 4개의 전자가 들어가는 에너지 밴드(4N states, 4N electrons)를 형성하고, 3s 밴드의 일부는 4개의 전자가 들어갈 수 있는 비어있는 에너지 밴드(4N states, 0 electrons)를 형성하게 된다. 이와 같이 4개의 최외각전자, 즉 가전자(價電子; valence electron)로 형성된 낮은 에너지 밴드를 가전자대(valence band), 4개의 비어있는 전자궤도로 형성된 높은 에너지 밴드를 전도대(conduction band)라 한다. 그리고 이 두 에너지 밴드의 에너지 차이를 밴드갭 에너지 E_g라 한다.

여기서 에너지 밴드갭은 고속도로의 중앙분리대와 같이 전자의 진행이 허용되지 않는 에너지 영역을 일컫는다. 가전자대는 이 에너지 밴드갭보다 낮은 에너지 밴드이며, 전도대는 이보다 높은 에너지 밴드이다. 일반적으로 전자는 물이 높은 데서 낮은 곳으로 흐르듯이 에너지가 낮은 곳으로 움직인다. 따라서 가전자대는 전자가 고여서 전자로 가득 차 있고 전도대는 텅 비어있다. 결과적으로 가전자대는 전자로 빽빽하게 들어차 있어서 전자가 꼼짝달싹할 수 없다. 이 상태의 반도체는 절연체와 같은 특성을 갖는다. 만일 어떤 과정을 거쳐 가전자대에 있는 전자가 중앙분리대인 에너지 밴드갭을 뛰어 넘어서 전도대로 들어가면 상황은 달라진다. 즉 전도대는 전자가 거의 없으므로 전도대로 올라간 전자는 자유롭게 움직일 수 있으며, 가전자대에 있는 전자도 전도대로 올라간 전자에 의해 생겨난 빈 자리를 이용해 조금씩이나마 전자가 움직일 수 있게 된다. 이 상태의 반도체에 전압을 걸어주면 비로소 전류가 흐르고 도체와 같은 특성을 갖는다. 이와 같이 절연체였다가 도체가 될 수 있다는 연유에서 반도체(半導體)라는 용어가 생겨났다.

한편 결정 내에서 움직이는 전자는 자유전자와 달리 움직임에 상당한 제약을 받는다. 특히 반도체와 같이 결정의 주기성이 완벽할 경우 결정 내의 전자는 그 결정구조에 따라 일정한 운동특성을 보여주는데, 이를 가장 잘 나타내는 도표가 곧 그 결정의 E-k 다이어그램이라 하겠다. 여기서 E는 전자의 에너지이고, k는 전자파동의 파수(wave number)로서 $k=2\pi/\lambda$와 같이 전자의 파장 λ의 역수에 비례한다(주기적인 구조를 갖는 결정물질에서는 전자가 자유공간의 전자와 달리 입자의 특징보다는 파동의 특징을 더 강하게 보여준다). 한편 전자의 파수 k는 드브로이(de Broglie) 물질파 원리에 따라 다음과 같이 전자의 운동량(kinetic momentum) p로 나타낼 수 있는데, 이는 아래 식 (9.1)과 같이 속도 v에 비례한다.

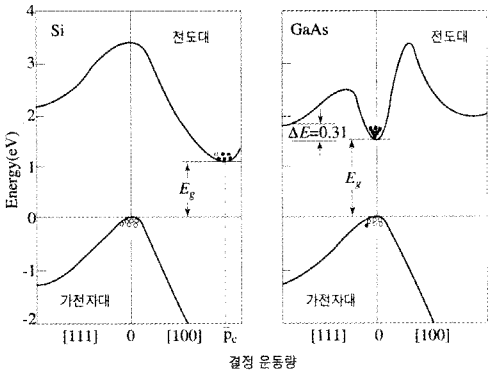
$$p = mv = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi}\frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k \qquad (9.1)$$

여기서 $\hbar = h/2\pi$이며, h는 Plank 상수, m은 전자의 질량, λ는 전자의 파장을 나타낸다. 그러므로 자유공간에서의 전자의 운동에너지는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{P^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \qquad (9.2)$$

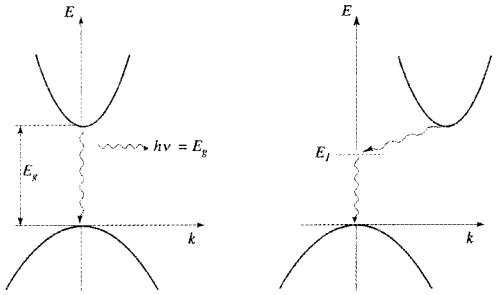
즉 전자의 에너지는 전자의 파수 k의 제곱에 비례하므로 일반적인 전자의 E-k 다이어그램은 포물선을 그리게 된다.

그러나 실제 반도체의 E-k 관계식, 즉 E-k 다이어그램



(a) Si (b) GaAs

그림 9.4 결정에서의 전자의 E - k 다이어그램



(a) (b)

그림 9.5 (a) 직접 밴드갭 구조 (b) 간접 밴드갭 구조의 다이어그램

은 그림 9.4와 같이 보다 복잡한 특성을 보여준다. 이 그림에서 $p=0$인 점은 전자의 운동량이 0인 경우, 즉 전자가 정지상태에 있을 때를 나타낸다. 여기서 p[100]축은 전자가 원자배열 방향과 평행한 방향으로 진행할 때의 평균운동량의 증가치를 나타내며, p[111]축은 전자가 원자배열 방향과 대각선 방향으로 진행할 때의 평균운동량의 증가치를 나타낸다. 그림 9.4에서 보듯이 결정 내의 전자는 전자의 운동량, 즉 $p = \hbar k$가 증가하더라도 그 에너지는 포물선 모양으로 증가하지 않고 어떤 밴드에서는 감소하고, 어떤 밴드에서는 증가하다가도 다시 감소한다. 이러한 특성을 다 이해하기 위해서는 원자 내의 수많은 전자의 상호작용을 다 이해하여야 하나 본 장에서는 그 결과 중 광소자와 밀접한 밴드구조 몇 가지만 간단히 살펴본다.

먼저 가전자대는 대부분의 반도체와 같이 Si나 GaAs 모두 운동량이 증가하게 되면 전자의 에너지가 포물선 모양으로 감소한다. 일반적으로 전자는 낮은 에너지부터 채우므로 만일 가전자대에 전자의 빈 자리가 생기면 낮은 에너지부터 채워지므로 항상 가전자대의 제일 높은 에너지 부근, 즉 $p=0$ 부근에 빈 자리가 생긴다. 한편 전도대의 경우는 이와 다른 양상을 보여주고 있다. 먼저 Si와 같은 경우에는 전자의 운동량이 늘어나면 상호작용 때문에 그 에너지는 감소한다.

그러므로 전도대에 전자가 생기면 항상 전도대의 가장 낮은 에너지 부근, 즉 $p=\overline{p_c}$ 부근에 이 전자가 모인다. 그러나 GaAs의 경우에는 전도대의 가장 낮은 에너지가 $p=0$인 영역이므로 전도대에 전자가 생기면 이 부근에 모인다. 이 부분을 보다 상세하게 나타내면 그림 9.5와 같다.

그림 9.5에서 왼쪽은 GaAs의 전도대와 전자대 E-k의 다이어그램이며 오른쪽은 Si의 경우와 같은데, 이와 같이 반도체의 E-k 다이어그램은 크게 그림 9.5(a)와 같은 직접 밴드갭 구조와 그림 9.5(b)와 같은 간접 밴드갭 구조로 나눌 수 있다. 이 중 직접 밴드갭 구조에서는 전도대의 전자가 가전자대의 빈 자리를 찾아 에너지가 떨어질 때 에너지보존법칙에 따라 그 밴드갭 에너지 E_g만큼의 에너지가 빛에너지로 변환하여 광자(photon)를 발생한다. 이때 전도대의 전자나 가전자대의 전자는 모두 그 운동량이 '0'이므로 운동량보존법칙이 저절로 만족한다. 한편 Si와 같은 간접 밴드갭 구조에서는 전도대에 있는 전자는 운동량이 '0'이 아니어서 가전자대의 빈 자리로 직접 옮겨갈 수가 없다. 운동량보존법칙을 만족시키기 위하여 전도대의 전자는 일단 운동량을 '0'으로 줄이기 위하여 중간 단계를 거쳐야만 가전자대로 옮겨갈 수 있다. 이 중간 과정을 거치게 되면 전도대의 전자가 가전자대로 떨어지더라도 원래 가지고 있던 에너지가 빛에너지로 다 변환되지 않는다. 이로 인해 이런 구조에서는 빛의 생성이 어렵다. 일반적으로 Si, Ge 같은 반도체는 간접 밴드갭 물질이며, 직접 밴드갭 물질로는 GaAs나 InP와 같은 화합물 반도체가 있다. 그러므로 일반적인 반도체 광소자는 위와 같은 직접 밴드갭 물질로 이루어진다.

9.1.2 반도체의 밴드갭 에너지와 광자의 파장

직접 밴드갭 반도체로 이루어진 광소자에서 발생하는 광자의 파장은 밴드갭 에너지에 의해 결정된다. 즉, 그림 9.5와 같이 전도대의 전자가 가전자대로 에너지가 떨어질 때 생성되는 광자의 에너지는 에너지보존법칙에 따라서 전도대와 가전자대의 에너지 차이인 밴드갭 에너지 E_g와 같다. 그러므로 광자의 에너지가 밴드갭 에너지와 같다는 조건으로부터 빛의 파장은 다음 식과 같이 결정된다.

$$E_{photon} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_g \qquad (9.3)$$

여기서 v는 빛의 진동수, h는 Planck 상수, c는 빛의 속도, λ는 빛의 파장이다. 이 조건으로부터 반도체 밴드갭에 해당하는 빛의 파장은 다음과 같은 값으로 주어진다.

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24\mu m \cdot eV}{E_g} \qquad (9.4)$$

즉 E_g가 1eV인 반도체에서 생성되는 빛은 1.24㎛인 적외선이며 E_g가 3eV인 반도체에서 생성되는 빛은 0.413㎛인 청색이다. 그림 9.6은 광소자로 널리 사용하고 있는 주요 반도체의 밴드갭 에너지를 반도체 결정의 격자간격인 격자상수별로 보여주고 있다. 이 그림에서 이탤릭체로 나타낸 반도체는 간접 밴드갭의 반도체이고, 로마체로 나타낸 것은 직접 밴드갭의 반도체이다.

그림 9.6에서 광통신에 사용하는 적외선 영역의 광원

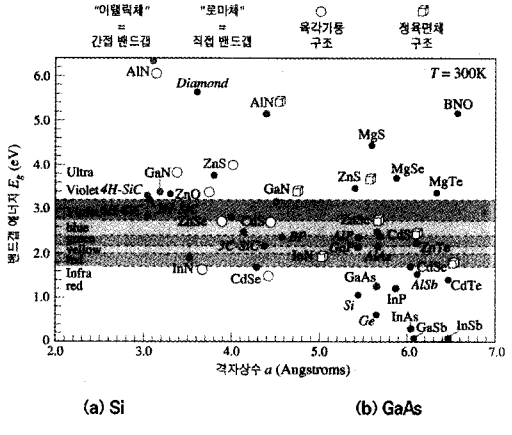


그림 9.6 주요 반도체의 격자상수별 밴드갭 에너지의 분포

물질로는 GaAs나 InP을 널리 사용하고, 가시광선 영역에서 적색광 발생이 가능한 반도체는 InN, CdSe 등이 있으며, 청색광원 반도체로는 ZnSe과 CdS 등이 있다. 그러나 실제로는 GaN와 InN의 합성물질인 In_xGa1_xN를 일반적으로 사용한다. 이와 같이 그림 9.6에 나타나 있는 반도체는 격자상수가 비슷할 경우 서로 합성이 가능하여 그 조성비율을 조정함으로써, 밴드갭 에너지를 조절하여 원하는 파장을 정확하게 얻어낼 수 있다. 그러나 격자상수가 크게 다른 반도체끼리는 내부 압력 증가로 인해 이러한 반도체의 합성에 많은 문제가 있다. 그러므로 반도체의 격자상수는 반도체 공정상 중요한 파라미터이다. 같은 반도체일 경우에도 결정구조에 따라 이 격자상수가 달라진다. 예를 들어 GaN인 경우 정육면체일 경우 격자상수는 4.5Å(1Å=10^{-8}cm)이나 육각기둥 모양일 때는 3.2Å이다. 그림 9.6에서 주사위 그림을 붙인 반도체는 정육면체 구조임을 나타내고, 원형 그림을 붙여 놓은 반도체는 육각기둥 구조임을 나타내며, 아무 그림이 없는 경우도 정육면체 구조이다.

9.1.3 반도체에서의 빛의 흡수 및 방출

반도체 내부를 광자가 진행하면 광자와 전자의 상호작용에 의해 광자가 흡수되거나 혹은 광자가 방출된다. 만일 반도체에 입사한 광자의 에너지가 반도체의 밴드갭 에너지보다 작으면 흡수가 일어나지 않고 반도체 내부를 그냥 통과한다. 만일 광자의 에너지가 반도체의 밴드갭 에너지보다 크면 가전자대의 전자가 이 빛에너지를 흡수하여 전도대로 에너지가 상승한다. 이러한 광자와 전자의 상호작용을 그림으로 나타내면 그림 9.7과 같다. 먼저 그림 9.7(a)는 광자가 반도체에 입사할 때 가전자대에 있는 전자가 광자의 빛에너지를 흡수하여 전도대로 상승하여 전도대에 전자 하나와 가전자대에 빈 자리 하나, 즉 정공(hole) 하나를 만드는 빛의 흡수(absorption)현상을 나타낸다. 이렇게 생긴 전자-정공 한쌍을 EHP (electron-hole pair)라고 일컫는다. 다음으로 그림 9.7(b)는 전도대에 있던 전자가 가전자대의 빈 자리를 메꾸면서 전자가 갖고 있던 에너지가 빛에너지로 전환하여 광자가 방출되는 자발방출(spontaneous emission)현상을 나타낸다. 이를 다른 말로는 전자-정공의 재결합(recombination)이라 하며, 결과적으로 EHP 하나가 소멸한다. 한편 전자-정공 쌍이 반도체 내를 진행하는 광자

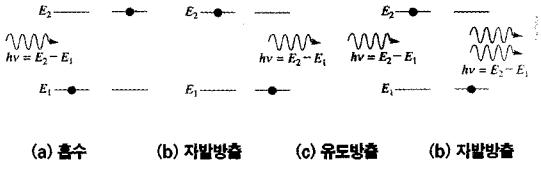


그림 9.7 전자와 광자의 상호작용

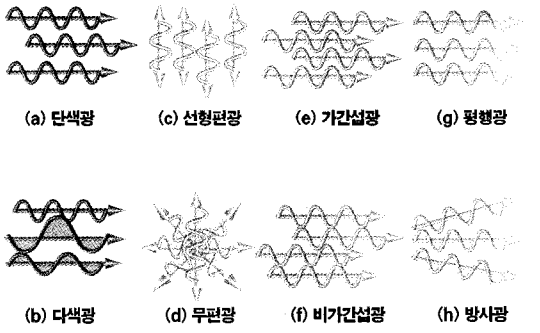


그림 9.8 빛의 분류

를 만나면 이 전자-정공 쌍에 의해 새로 생성된 광자는 진행하는 광자의 파동과 위상이 일치하여서 빛의 가간섭(coherence) 현상이 일어난다. 이럴 경우를 그림 9.7(c)와 같이 유도방출(stimulated emission)이라 일컫는다. 이러한 가간섭 상태의 발생광은 파장이 일정하고 직진성이 강하여 이상적인 광원으로 여겨지는데, 일반적인 레이저의 출력광은 이러한 유도방출에 의해 가간섭 상태의 광이 된다.

그림 9.8은 빛의 성질을 여러 관점에서 분류하였다. 먼저 빛의 색깔이 균일한 경우 이를 단색(monochromatic)광, 여러 색깔이 공존할 때 이를 다색(polychromatic)광이라 한다. 다음으로 빛의 편광이 일정한 방향일 때는 선형편광, 그렇지 못할 때는 무편광이라 한다. 한편 빛의 위상이 일정할 때를 가간섭(coherent)광이라 하며, 자연광은 이런 특성를 갖지 못한다. 다음으로 빛이 진행하면서 퍼지지 않는 빛을 평행(collimated)광이라 하며, 자연광의 경우와 같이 퍼지는 빛을 방사광이라 한다.

광통신이나 광정보처리 등에 효율적으로 활용할 수 있는 빛을 얻기 위해서는 그림 9.8에서 설명한 것처럼 단색이고 선형편광이며, 가간섭적이고 집속할 수 있는 광을 얻어야 한다. 이러한 빛은 자연방출로는 얻을 수 없고 오직 유도방출을 통해서만 얻을 수 있다. 이러한 유도방출을 얻기 위해서는 먼저 전도대에 충분히 많은 전자가 존재해야 하며 가전자대에는 충분히 많은 빈 자리, 즉 정공(hole)이 존재하여야 한다. 또한 전자와 정공의 생성속도도 자발방출로 감소하는 비율보다 커야한다. 이와 같이 전도대에 많은 전자를 주입하고 가전자대에는 많은 정공을 마련하기 위해서 반도체에서는 서로 다른 극성의 반도체로 형성한 pn 접합다이오드(junction diode)를 활용한다. 아래 그림에 pn 접합다이오드의 구조가 나타나 있다.

먼저 반도체의 한쪽 영역에 최외각전자인 가전자의 수가 반도체 구성물질의 가전자의 수보다 적은 원자를 주입하게 되면 이 반도체의 가전자대에는 인위적인 빈 자리, 즉 정공이 많이 발생한다. 이러한 반도체를 p형 반도체라 하며, 정공을 발생하는 첨가물질을 억셉터(acceptor)라 한다. 여기서 가전자대에서 전자가 비는 에너지준위를 가전자대에서의 페르미 에너지(Fermi energy level) E_{fv}라 한다. 반면에 가전자의 수가 반도체 구성물질의 가전자 수보다 많은 원자를 주입하면 이 반도체의 전도대에는 인위적인 전자가 많이 발생한다. 이러한 반도체를 n형 반도체라 하며, 전자를 공급하는 첨가물질을 도너(donor)라 한다. 여기서 전도대에 전자가 채워지는 에너지준위를 전도대의 페르미 에너지 E_{fc}라 한다. 이와 같은 p형 반도체와 n형 반도체의 접합으로 이루어진 반도체를 pn접합다이오드라 한다. 그러므로 그림 9.9와 같이 pn 접합다이오드의 p영역에 양의 전압을 인가하고 n 영역에 음의 전압을 인가하면 p형 반도체에 있던 전자의 빈 자리, 즉 정공은 반발력에 의해 n 영역으로 밀려가고 n형 반도체에 있던 전자도 반발력에 의해 p영역으로 밀려간다. 따라서 p형과 n형 반도체의 경계면에는 많은 양의 전자와 정공이 주입되어 효율적인 전자와 정공의 재결합이 일어난다. 그러므로 pn 경계영역에서 많은 전자가 정공으로 쉽게 떨어지면서 다수의 광자가 발생한다. 광자의 수가 충분히 늘어나면 유도방출이 가능하게 된다. 한편 전압을 반대극성으로 걸어주면 전자와 정공이 서로 반대방향으로 끌려가게 되어 pn 경계면에서의 광자의 발생이 소멸하여 흡수만 일어난다. 그러므로 pn 접합다이오드는 p형에서 n형 방향으로 전압을 걸었을 때는 빛의 생성이 잘 일어나지만 그 반대방향으로는 그렇지 못하다. 이와 같이 전압을 p형에서 n형으로 인가할 때를 순방향, 그 반대방향을 역방향이라 한다. 이

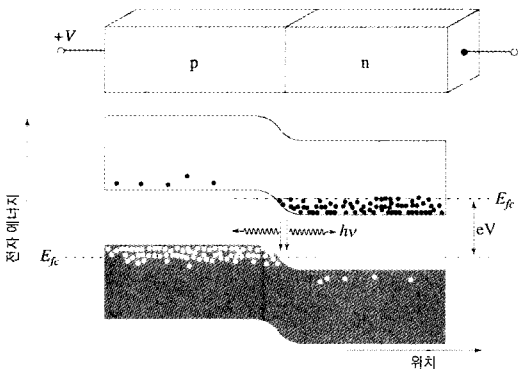


그림 9.9 반도체의 pn 접합다이오드의 구조

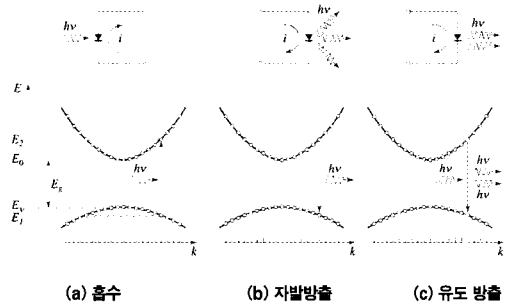


그림 9.10 pn 다이오드에서 빛의 흡수 및 방출

와 같은 연유에서 pn 다이오드를 기호로 나타낼 때는 아래 그림과 같이 p형에서 n형으로 향하는 화살표로 나타낸다.

먼저 그림 9.10(a)에서와 같이 pn 다이오드에 빛이 입사하면 pn 경계면에서 빛의 흡수에 의해 전자-정공 쌍(EHP)이 생성된다. 그러나 이 전자-정공 쌍은 pn 경계에 생성된 전압에 의해 전자는 n형 영역으로 정공은 p형 영역으로 이동하여 역방향으로 전류가 흐른다. 한편 그림 9.10(b)와 같이 순방향으로 전류를 흘려주면 pn 경계면에 전자-정공 쌍이 생성되어 광자의 자발방출이 일어나면서 전류도 순방향으로 흐른다. 한편 그림 9.10(c)에서와 같이 자발방출이 일어나고 있는 pn 다이오드에 더 많은 전류를 흘려주면 광자의 생성이 활발하여져서 유도방출로 이어진다.

9.1.4 동종접합과 이종접합

일반적인 pn 다이오드는 반도체의 한쪽에 n형 반도체, 다른 쪽에 p형 반도체로 구성된다. 이와 같이 p형 반도체와 n형 반도체의 밴드갭 에너지가 같은 경우를 동종접합(homojunction)이라 한다. 이 pn 다이오드에 순방향 전압을 인가하면 그림 9.11(b)와 같이 pn 경계면에 전자-정공 쌍이 형성되어 광자가 생성된다. 그러나 이 경우 전자와 정공이 pn 경계면에만 국한되지 않고 일부 전자가 p형 반도체로 확산되면서 p형 반도체 내부로도 들어가며, 마찬가지로 일부 정공이 n형 반도체로 확산되어 n형 반도체 내부로도 들어간다. 그림 9.11(b)에서 L_n은 전자의 확산거리를, L_p는 정공의 확산거리를 나타낸다. 그러므로 pn 경계면에서의 전자-정공의 재결합효율이 감소한다. 이런 이유로 인해 동종접합 pn 다이오드에서는 광방출효율이 상당히 작다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고안된 구조가 그림 9.11(c)와 같은 이종접합(heterojunction)을 이용한 pin 구조이다.

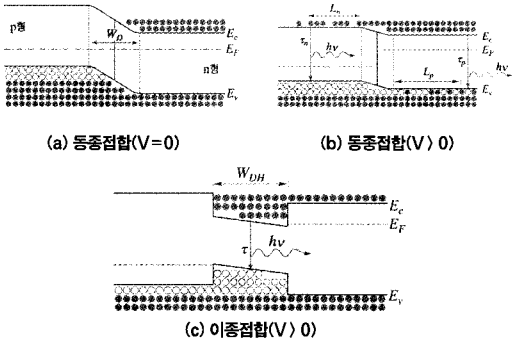
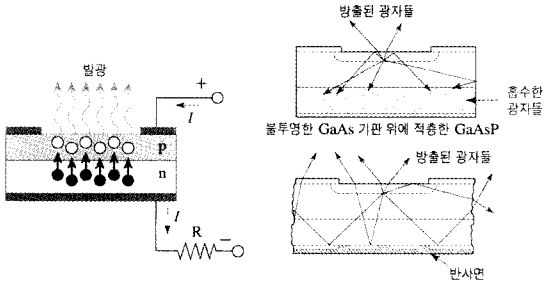


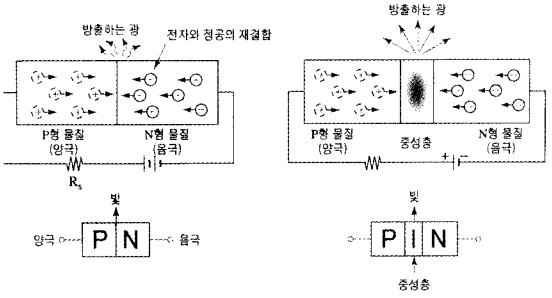
그림 9.11

이종접합이란 반도체의 밴드갭 에너지가 다른 물질끼리 경계를 이루는 접합을 말한다. 이 중 pin 다이오드는 일반적으로 pn 접합다이오드의 경계면에 밴드갭 에너지가 작은 물질에 아무런 억셉터나 도너를 첨가하지 않아 p형도 아니고 n형도 아닌 중성(intrinsic) 반도체를 삽입한 구조이다. 이에 순방향 전압을 인가하면 n형 반도체 쪽에서 밀려온 전자는 에너지준위가 낮은 중성 반도체 영역에 모인다. 아울러 p형 반도체에서 밀려온 정공도 n형으로 확산되어가는 경우는 거의 없이 대다수가 중성 영역에 모인다. 그러므로 이 중성 반도체 영역에서 전자와 정공이 재결합에 의한 광자의 생성효율이 동종접합 다이오드에 비해 월등히 향상된다. 이 경우 빛의 파장은 중성층의 밴드갭 에너지에 의해서 결정되며, 이 중성층에서 광



(a) 바이어스 회로 (b) 표면방출 구조

그림 9.12 발광 다이오드의 구조



(a) pn 다이오드 LED (b) pin 다이오드 LED

그림 9.13

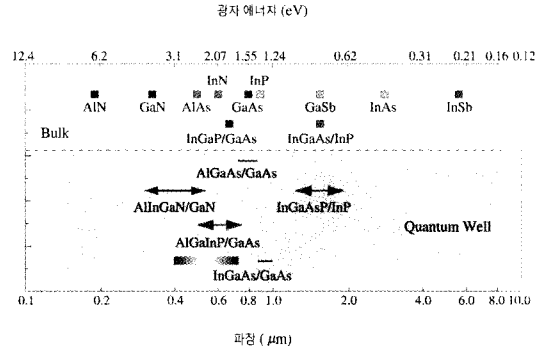


그림 9.14 LED 활성층에 따른 광출력 파장의 범위

자의 생성이 가장 활발하다. 이로 인해 이 중성층을 활성층(active layer)이라고도 일컫는다. 그러므로 현대 광소자는 성능 및 효율을 증가시키기 위하여 이와 같은 이종접합 pin 구조를 사용하는 경우가 늘어나고 있다.

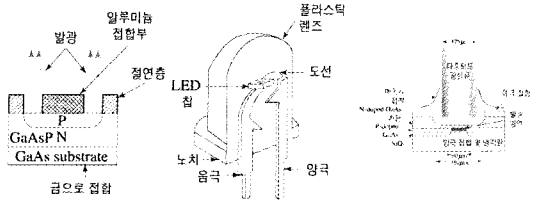
9.2 발광 다이오드

9.2.1 발광 다이오드의 구조

발광 다이오드(Light Emitting Diode, LED)는 다이오드에서 빛을 방출하는 소자를 말한다. 반도체에서 빛을 얻기 위해서는 전도대에 지속적으로 전자를 공급하고 가전자대에 있는 전자는 효율적으로 외부로 소거하여 전자가 떨어질 빈 자리, 즉 정공(hole)을 마련해 주어야 한다. 이를 위해서 그림 9.12(a)와 같이 p형 반도체에 양의 전압을 걸어주어 정공을 주입하고, n형 반도체에는 음의 전압을 인가하여 전자를 주입한다. 이렇게 주입한 전자와 정공은 pn 접합의 경계면에서 광자를 방출하며, 이러한 광자는 임의의 방향으로 방출된다. 이를 LED의 위쪽으로 효율적으로 끌어내기 위하여 아래로 향하는 빛은 흡수되거나 반사되도록 그림 9.12(b)와 같이 반도체의 아랫부분에 흡수판 또는 반사판을 부착한다. 이와 같은 구조로 인하여 대부분의 LED는 표면으로 빛을 방출한다.

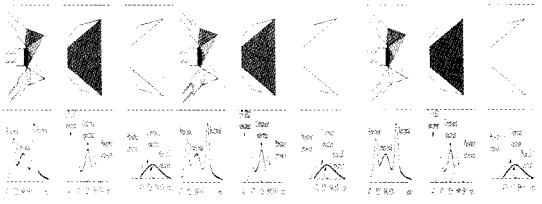
그림 9.13(a)의 아래에 그린 pn 다이오드를 확대한 것이 그림 9.13(a)의 위에 그린 그림이다. 즉, 순방향 전압을 인가하면 p형 반도체에서 전자가 왼쪽으로 옮겨가면서 이때 생기는 전자의 빈자리인 정공은 전자흐름과 반대 방향으로 움직인다. 한편 전자는 n형 반도체에 인가된 음의 전압에 의해 왼쪽으로 움직인다. 그러므로 p형 반도체와 n형 반도체가 만나는 경계면에서는 정공과 전자가 서로 만나 소멸하면서 전도대의 전자가 가진 밴드갭 에너지에 해당하는 에너지가 광에너지로 변환하여 빛을 방출한다. 한편 pn 다이오드보다 정공과 전자의 결합효율을 더 높이기 위하여 앞 절 그림 9.11(c)에서 설명한 바와 같이 pn 경계영역에 중성층(intrinsic layer)을 활성층으로 삽입한 pin 구조가 그림 9.13(b)이다.

한편 LED는 활성층의 밴드갭 에너지에 따라 발광파장이 달라진다. 디스플레이용 가시광 LED에 사용하는 반도체로는 그림 9.6에 나타낸 바와 같이 $Al_xGa_{1-x}As$, $Al_xIn_yGa1_{-x-y}P$이나 또는 $In_xGa_1{}_-{}_xN$ 등의 화합물 반도체를 사용한다. 여기서 A_xB_{1-x}는 A 물질과 B 물질을 x:1−x로 합성한 물질을 나타내며, 이 합성물질의 밴드갭 에너지는 그 격자상수가 비슷할 경우 A 물질과 B 물질의 밴드갭 에너지를 x:1−x로 평균한 값과 비슷하다. 그림 9.14에 LED 활성층 반도체의 물질의 조성비에 따른 발광파장의 범위가 나타나 있다. 이 그림에서 Bulk는 두꺼운 반도체를 사용하는 경우이며, 양자우물



(a) LED 접합구조 (b) 디스플레이용 LED의 내부 구조 (c) 광통신용 LED의 내부구조

그림 9.15



(a) 3 LED (b) 자외선 LED와 3 형광물질 (c) 1 LED + 2 형광물질

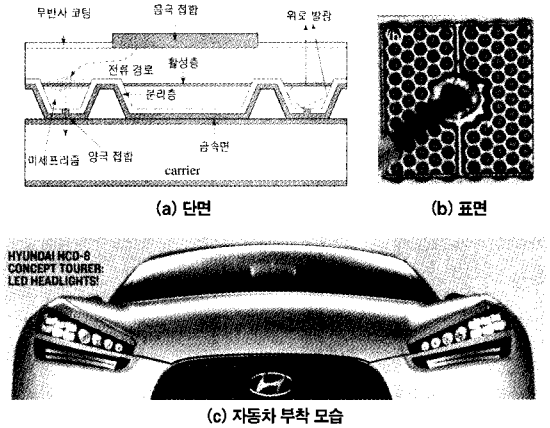
그림 9.16 백색 LED의 구조

(Quantum Well)은 100Å 이하의 얇은 반도체를 활성층으로 사용하였을 때를 나타낸다. 양자우물의 경우가 Bulk에 비하여 양자효과때문에 보다 우수한 발광 특성을 나타낸다.

그림 9.15는 LED의 내부 구조와 디스플레이용 LED, 통신용 LED 패키지를 보여주고 있다. 먼저 그림 9.15(b)와 같은 디스플레이용 LED는 빛을 반도체 외부로 효율적으로 방출할 수 있도록 LED 상부에 투명한 유리나 플라스틱으로 렌즈를 부착한다. 아울러 pn 다이오드에 전류를 주입하기 위한 양극(anode)과 음극(cathode) 전극과 외부 인입선 단자 사이는 반도체에 손상이 가지 않도록 매우 얇은 세금선(gold wire)을 순간적으로 녹여 붙인다. 그리고 외부 인입선은 인쇄회로기판(Printed Circuit Board; PCB) 등에 연결할 수 있도록 아래쪽으로 나오도록 한다. 한편 광통신용 LED는 외부로 방출하는 빛이 광섬유로 바로 입사될 수 있도록 그림 9.15(c)와 같이 LED 표면에 광섬유를 직접 부착한다.

9.2.2 백색광 LED

2000년 이전까지의 LED의 주요 활용분야는 전자표시장치용이나 통신용으로 국한되었으나, 최근에는 LED가 형광등이나 자동차의 전조등을 대체할 조명장치로 각광을 받고 있다. 이미 거리의 신호등과 적색등은 AlGaAs 반도체 LED로, 황색과 청색등은 AlGaP와 InGaN 반도체 LED로 대체하고 있다. 이렇게 빛의 삼원색 조명등을 LED로 대체하면서 이들을 합성하여 백색광을 내는 LED를 개발하였다. 이와 같은 백색광 LED의 동작원리는 그림 9.16과 같이 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 먼저 그림 9.16(a)는 빛의 3원색을 방출하는 적색, 녹색, 청색(RGB) LED 3개를 한 램프로 조립하여 백색광을 구현하는 방법을 보여준다. 이 경우 조도는 매우 높으나



(a) 단면 (b) 표면

(c) 자동차 부착 모습

그림 9.17 전조등 백색광 LED의 구조

조립이 복잡하고 크기가 커지는 단점이 있다. 그림 9.16(b)는 밴드갭 에너지가 3eV 이상인 반도체를 LED의 활성층으로 활용하여 자외선을 얻어내고, 이 자외선 LED 표면에 적녹청(RGB) 형광물질을 입혀두면 자외선에 의해 RGB 형광이 발생하여 백색광을 방출한다. 이 경우 세 개의 LED를 사용하는 경우보다 구조가 간단한 장점이 있다. 그러나 일부 잔류자외선이 유해할 수 있고, 또 에너지의 유실이라는 단점이 있다. 이를 극복하기 위하여 그림 9.16(c)와 같이 청색 LED를 만들어 그 표면에 녹색과 적색 형광물질을 입히면 청색의 일부가 형광물질에 흡수되어 녹색과 적색을 발생하고, 청색의 일부는 통과하여 전체적으로 백색광을 형성한다. 이 방법은 자외선 방출의 우려가 없고 구조가 간단하며 효율이 높은 장점이 있다.

그림 9.17(a)는 백열등으로 사용하는 LED의 단면 구조를 보여주고 있다. 반도체 바닥에 p 전극, 반도체 표면에 n 전극이 있으며 전극과 전극 사이로 빛이 방출될 수

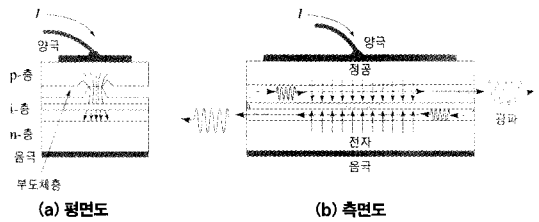


그림 9.18 레이저 다이오드의 구조

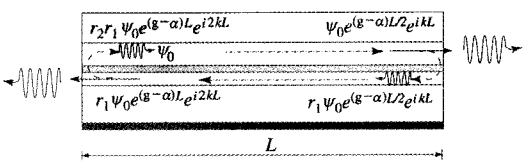


그림 9.19 레이저 다이오드 내부의 광파의 다중 반사

있는 창을 만들고 그 창에는 무반사코팅을 한다. 그리고 반도체 아랫부분에는 빛을 반사할 수 있도록 반사판을 만들면 대부분의 빛이 표면으로 효율적으로 방출된다. 그리고 그 표면에 형광물질을 입히면 백색광을 얻어 낼 수 있다. 그림 9.17(b)는 벌집 모양의 표면 n 전극과 외부 인입선을 연결해 주는 세금선을 보여주고 있다. 그림 9.17(c)는 이와 같은 백색 LED를 실제 자동차의 전조등으로 활용한 현대 HCD-8 모델 자동차의 전면 모습이다. 기존 전조등에 비해 직경이 10분의 1로 줄었으나 밝기는 더욱 향상되었고, 그동안 전조등 크기로 인해 제약을 받았던 외관 디자인도 크게 개선되었다. 이 모델은 2004년 IEEE에 의해 세계 10대 신기술 자동차 중에서 최우수모델로 선정되었다.

9.3 레이저 다이오드

9.3.1 레이저 다이오드의 구조

발광 다이오드 중 공진기 구조를 형성하여 자발방출로 생성된 빛이 유도방출 상태로 전환되도록 하여 가간섭 특성을 갖는 빛을 방출하는 소자를 레이저 다이오드(laser diode; LD)라 한다. 그러므로 레이저 다이오드는 빛이 반사되어 왕복할 수 있는 공진기 구조를 갖추어야 한다. 그림 9.18은 가장 보편적인 레이저 다이오드의 구조이다.

먼저 그림 9.18(a)에 레이저 다이오드의 단면 구조를 나타내었다. 반도체 레이저는 LED와 같이 반도체 밑바닥과 표면에 각각 양극(anode)과 음극(cathode)의 전극이 있어 수직방향으로 pin 구조를 가진 다이오드에 전류를 주입할 수 있다. 이때 주입한 전류가 반도체의 외부로 유실되지 않고 활성층에 효율적으로 공급되도록 레이저 다이오드 가장자리에 전류차단층이 있다. 그러므로 화살표와 같이 전류를 활성층의 가운데 영역으로만 주입한다. 그림 9.18(b)는 이 레이저 다이오드의 측면그림을 나타낸다. 이 그림은 활성층에 주입한 전자와 정공으로 인하여 광자가 생성되며, 이 광자는 활성층을 따라 진행하면서 유도방출을 야기하고 있음을 보여준다. 그러므로 광자의 수는 활성층이 길수록 더욱 늘어나며, 더 나아가 유도방출에 의해 가간섭 조건을 만족시키는 광파(coherent wave)를 형성한다. 이 광파가 더욱 진행하다가 활성층이 끝나는 영역에서 반도체와 공기의 경계면을 만난다. 이 경계면은 반도체 결정의 결을 따라 쪼개져서 완전한 평면을 이룬다. 그런데 반도체의 굴절률은 보통 3.5 이상이고, 공기의 굴절률은 1.0이므로, 이와 같은 큰 굴절률 차이 때문에 반사율은 상당히 큰 값이 된다. 그러므로 많은 양의 광파가 이 경계면에서 반사한다. 반사한 빛은 다시 활성층을 따라 진행하면서 더욱 증폭되다가 맞은편 경계면에서 일부는 외부로 방출되고, 일부는 다시 반사하여 되돌아온다. 이렇듯 반도체 레이저에서는 반도체와 공기의 경계면에 의한 공진기를 형성한다. 이 공진기 내부를 진행하는 빛은 한번 왕복할 때마다 활성층에서 증가된 빛의 양과 두 경계면에서 방출된 빛의 양이 같아질 때 레이저 다이오드에서 출력되는 빛의 세기가 일정해진다. 이를 수식으로 나타내면 아래와 같은 레이저 방정식으로 표현된다. 즉, 아래 그림과 같이 반도체 내부를 진행하는 빛이 반도체와 공기의 경계면에서 반사를 일으켜 반도체 내부를 공진할 때, 반도체 내부를 왕복하는 광파의 위상과 진폭은 그림 9.19와 같이 표현할 수 있다.

먼저 z=0에서 출발한 광파를 ψ_0라 하고 반도체의 길이를 L, 경계면에서의 반사계수를 r_1과 r_2라 하면 반도체 내부를 1회 왕복한 후의 광파의 위상 및 진폭은 다음과 같다.

$$\Psi(2L) = r_1 \cdot r_2 \cdot \Psi_0 \cdot \exp[(g-\alpha)L]\exp[-j2kL] \quad (9.5)$$

여기서 g는 반도체의 단위 길이당 유도방출로 늘어나는 광자의 양을 나타내는 광이득(optical gain), α는 산란이나 흡수 등으로 사라지는 광자의 양을 나타내는 광손실(optical loss), k는 전파상수(wave number)로서 아래와 같다.

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (9.6)$$

이 반도체에서 나오는 광파가 가간섭 조건을 만족하기 위해서는 1회 왕복한 후의 광파가 그 이전의 광파와 진폭 및 위상과 일치하여야 한다. 먼저 1회 왕복한 후 빛의 진폭이 같아지기 위해서는 식 (9.6)에서 보듯이 아래의 조건이 만족되어야 한다.

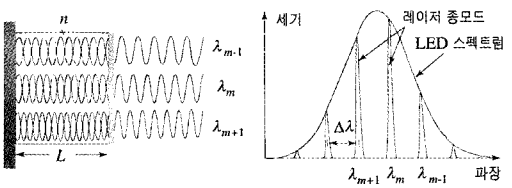
$$r_1 r_2 \cdot \exp[(g-\alpha)L] = 1 \rightarrow g_{th} = \alpha + \frac{1}{L}\ln[r_1 r_2] \quad (9.7)$$

여기서 g_{th}는 발진 조건을 얻기 위한 반도체의 임계광이득(threshold gain)이다. 반도체의 광이득은 일반적으로 반도체에 공급하는 전류에 따라 증가하며, 따라서 반도체 레이저를 동작시키기 위해서는 임계 광이득을 얻기 위한 전류를 공급하여야 하는데, 이때의 전류값을 문턱전류 I_{th}(Ith(threshold current)라 한다.

한편 가간섭 조건을 얻기 위해서는 1회 공진한 후 진폭이 일치하여야 할 뿐만 아니라 위상도 일치하여야 한다. 즉, 그림 9.19(a)와 같이 공진기 내부에서 광파의 위상이 왕복하기 전의 위상 및 왕복한 후의 위상과도 같아져야 한다. 이러한 위상 일치조건은 식 (9.5)으로부터 다음과 같이 결정된다.

$$\exp[(-j2kL] = \exp[-j2\frac{2\pi n}{\lambda}L] = 1 \rightarrow \frac{4\pi n}{\lambda}L = 2\times\pi n$$
$$\therefore \lambda = \frac{2nL}{m} \quad (9.8)$$

여기서 λ는 광파의 파장이고, n은 반도체의 굴절률이며, m은 임의의 정수이다. 따라서 반도체 레이저의 파장은 m값에 따라 특정한 파장 λ_m을 가지며, 그 값은 여러 개 나올 수 있다. 일반적으로 레이저에서 발진할 수 있는 파장의 범위는 같은 활성층을 갖는 LED에서 방출할 수 있는 스펙트럼 범위로 한정된다. 그리고 파장분포는 활성층의 밴드갭 에너지에서 나오는 파장에 근접한다. 이를 그림으로 나타내면 그림 9.20(b)와 같다. 여기서 파장들 간의 간격 $\Delta\lambda$의 크기는 파장이 밴드갭 파장 $\lambda_g = 1.24/E_g[\mu m/eV]$와 비슷하다는 가정하에 아래와 같은 값을 가진다.



(a) 종모드의 파형 (b) 종모드의 분포

그림 9.20

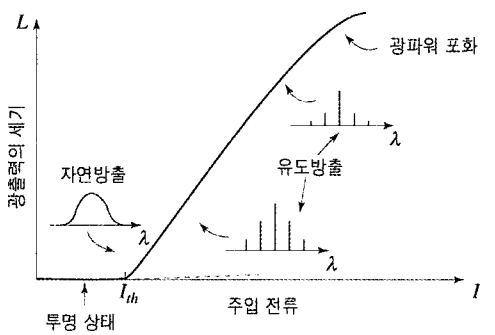


그림 9.21 반도체 레이저의 주입전류에 따른 방출광의 출력 및 파장특성

$$\Delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{2nL}{m} - \frac{2nL}{m+1} = \frac{2nL}{m(m+1)}$$
$$\cong \frac{1}{2nL} \cdot \left(\frac{2nL}{m}\right)^2 = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (9.9)$$

일반적으로 반도체 레이저의 길이는 약 0.3mm 내외이므로 $\Delta\lambda$의 크기는 약 5~10Å 정도이다. 실제로 반도체의 발광 스펙트럼은 이보다 상당히 넓으므로 반도체 레이저에는 가간섭 조건을 만족시키는 파장의 수가 여러 개 있기 때문에 여러 파장의 빛이 동시에 존재한다. 이러

한 파장들을 종모드라고 하며, 위에서 정의한 $\Delta\lambda$를 종모드간격이라고 한다.

한편 레이저 출력광의 세기가 커질수록 모드 간의 광세기의 차이가 벌어져 종모드의 수가 점점 줄어드는 경향이 있다. 그림 9.21은 반도체 레이저의 주입전류에 따른 반도체 레이저의 광출력의 세기와 스펙트럼을 보여준다. 주입전류가 문턱전류(I_{th})보다 작을때는 광출력의 크기가 작을 뿐만 아니라 광 스펙트럼도 발광 다이오드처럼 폭이 넓고 완만한 분포를 보여준다. 그 이유는 반도체 내부에서 자발방출에 의한 빛만 발생하고 아직 유도방출이 일어나지 않기 때문이다. 한편 주입전류가 문턱전류보다 커지면 광출력의 크기가 증가할 뿐만 아니라 그 스펙트럼도 레이저 특유의 종모드를 가진다. 그리고 주입전류가 증가할수록 여러 종모드에 분산된 파워가 중심파장에 있는 종모드로 집중되면서 종모드의 수가 줄어든다. 그 이유는 반도체 내부에 공급되는 전자와 정공은 출력이 가장 큰 종모드와 가장 쉽게 가간섭성 유도방출을 일으키기 때문이다. 그러므로 출력이 높은 종모드는 점점 커지고 출력이 낮은 종모드는 전자와 정공을 충분히 공급받지 못해서 점점 줄어든다. 그렇지만 일반적인 반도체 다이오드는 종모드의 수가 줄어들어 단일종모드만 나오는 경우는 거의 없고, 일반적으로 5~10개 정도의 종모드가 존재한다. 이때 가장 출력이 큰 종모드를 주모드라고 하고, 다음으로 큰 종모드들을 부모드라고 한다.

한편 레이저가 발진문턱을 넘어 본격적으로 발진하게 되면, 일반적으로 광출력의 증가치가 주입전류의 증가치에 비례한다. 그 이유는 발진이 원만히 이루어진 다음에는 반도체 내부에 주입되는 전자의 개수에 비례해서 광자가 생성되기 때문이다. 그러므로 반도체 레이저의 양자효율은 주입전류 하나당 출력되는 광자의 개수로 표시한다.

한편 반도체 레이저의 출력이 점점 증가하면 반도체 내부에 열이 발생하여 광출력이 더 이상 증가하지 못하고 포화된다. 그러므로 반도체 레이저에서 보다 높은 최대 출력을 얻기 위해서는 반도체 내부의 열이 효과적으로 방출될 수 있는 구조를 만들어야만 한다. 이런 이유로 인해 반도체 레이저는 그림 9.22와 같이 열이 발생하는 활성층의 폭을 좁혀주기 위하여 반도체 가장자리에 전류차단층(current blocking layer)을 형성한다. 이로 인해 전류는 반도체의 가운데 좁은 부분으로만 흐르게 되어 열

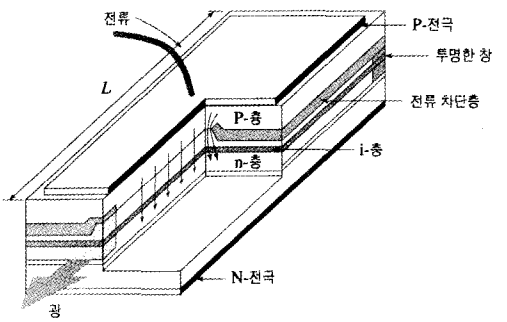


그림 9.22 도파로형 반도체 레이저의 전류차폐층

이 발생하는 영역이 작아지고, 이로 인하여 효율적인 열방출이 가능하여진다. 이와 같은 반도체를 도파로(waveguide)형 반도체 레이저라 한다. 그 구조에서는 반도체의 좁은 영역에서 발생한 광파가 좁은 활성층을 따라 길이방향으로 진행하게 되어 좁은 전류주입 영역이 마치 광도파로(optical waveguide)처럼 작용한다.

9.3.2 레이저 다이오드의 종류

이상적인 광원은 주입전류에 따라 광에너지는 변하더라도 그 파장은 변화하지 않고 단일모드를 유지하여야 한다. 그러나 실제의 반도체 레이저 다이오드에서 그 주입전류를 변조하면 그림 9.23과 같이 여러 파장이 발진된다. 이러한 특성은 특히 주입전류가 레이저가 발진하기 시작하는 문턱전류(threshold current; I_{th})에 가까울수록 심한데, 이러한 현상은 자연방출의 영향으로 생성된 부모드(side mode)가 존재하기 때문이다. 이와 반면에 주입전류가 증가하면 레이저 다이오드 내부의 온도증가나 혹은 이득포화(gain saturation) 현상 등으로 인해 레이저 다이오드의 광에너지가 주입전류의 비례치에 못 미치게 되어 선형성이 떨어진다. 일반적으로 성능이 좋은 레이저 다이오드가 되기 위해서는 부모드 억제율(side mode suppression ratio; SMSR)이 크고 높은 출력까지도 선형성이 뛰어나며 아울러서 문턱전류가 작아서 전류주입 효율이 좋아야 한다. 이러한 특성을 갖는 이상적인 레이저 다이오드를 얻기 위한 많은 연구개발이 있어 왔으나 그 대표적인 발달과정을 정리하여 보면 아래 그림 9.23과 같다. 먼저 그림 9.23(a)와 같은 구조가 가장 기본이 되는 반도체 레이저 다이오드이다. 수직방향으로는

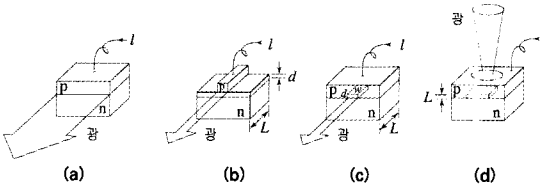


그림 9.23 레이저 다이오드의 여러 가지 구조

pn 다이오드를 이루며, 평면방향으로는 균일한 구조를 갖는다. 이 경우 pn 접합에서 레이저광이 생성되나 전자-정공의 재결합효율이 떨어지는 단점이 있다. 그림 9.23(b) 이후부터는 이러한 단점을 극복하기 위하여 수직방향으로 pin 구조의 다이오드를 생성하고, p나 n 지역을 이루는 물질의 에너지 밴드갭보다 작은 밴드갭을 갖는 물질을 i 지역에 삽입하는 이중이종접합구조(double hetero-structure; DH)를 사용한다. 이렇게 될 경우 가운데 i 영역은 굴절률이 높아 광도파로의 핵(core) 영역이 되고, p와 n 영역은 굴절률이 낮아 보완층(cladding) 영역이 되므로 활성층인 i 지역의 광집속효율이 증대된다. 뿐만 아니라 i 영역은 에너지 대역폭이 작으므로 전류전송자의 집속효율도 증가한다. 따라서 전체 레이저의 발진효율이 증가한다. 그리고 그림 9.23(b)에서 보듯이 p 영역의 단면적을 둔덕도파로(ridge waveguide) 부분으로 축소하여 줌으로써 활성층의 영역을 효과적으로 좁힐 수 있어서 전체 소모전류가 줄어들고 결과적으로 문턱전류가 줄어든다. 이로 인해 반도체 레이저 다이오드 내부에 생성되는 열을 줄일 수 있게 되므로 레이저 다이오드의 온도특성이나 내구성이 향상된다. 한편 그림 9.23(c)에서는 그림 9.23(b)에 보인 구조를 다른 반도체물질로 둘러싼다. 이런 경우의 장점은 그림 9.23(b)에서와 같이 둔덕부분이 공기에 노출되었을 때 반도체와 공기의 경계면에서 생길 수 있는 여러 가지 표면 누설전류나 표면 전하 등의 영향을 감소시킬 수 있다는 점이다. 그리고 표면이 평면화(planarization)되어 반도체 공정작업을 용이하게 하는 이점도 있다. 마지막으로 그림 9.23(d)는 레이저 출력광을 반도체 표면으로 향하도록 하는 수직공진 표면 발광 레이저 다이오드(Vertical cavity surface emitting laser; VCSEL)를 나타낸다. 이 경우는 단일기판에 여러 개의 레이저 다이오드를 행렬로 만들기 쉬우며, 그 외 문턱전류가 낮아지는 등의 장점이 있다.

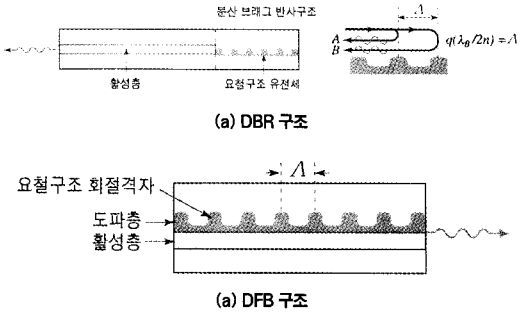


그림 9.24

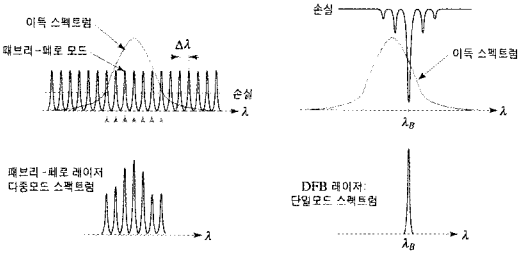


그림 9.25

한편 광통신시스템에서는 광섬유를 진행하는 빛의 속도가 파장에 따라 달라지는 분산으로 인해 광펄스가 장거리를 진행한 이후에는 펄스폭이 넓어진다. 이로 인해 펄스를 보낼 수 있는 속도가 제한되어 초고속통신의 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 광통신에 사용하는 빛의 파장을 매우 좁게 줄여야 한다. 그러나 일반적인 레이저 다이오드에서는 5~10개의 종모드에 의한 부모드로 인해 파장폭이 종모드 간격 보다 매우 넓다. 이 값은 식 (9.10)에 나타난 바와 같이 약 5~10Å 정도이다. 이와 같은 종모드를 줄이기 위하여 그림 9.24와 같은 DBR(distributed bragg reflector) 구조나 DFB(distributed feedback laser) 구조가 제안되었다. DBR 구조에서는 레이저 발진이 가능한 파장이 하나밖에 존재하지 않아서 단일종모드 발진이 가능하다. DFB 구조는 그림 9.24(b)와 같이 활성층 내부에 DBR 구조를 형성한 구조로서 DBR과 비슷한 파장 특성을 갖는다. 이와 같은 DBR 혹은 DFB 레이저 다이오드의 레이저 발진파장 스펙트럼을 기존의 FP 레이저 다이오드와 비교하면 그림 9.25(b)와 같다. 먼저 FP 레이저 다이오드는 활성층의 이득 스펙트럼 영역 안에 여러

개의 종모드가 존재한다. 실제 FP 레이저 다이오드의 출력 스펙트럼도 그림 9.25(a)와 같이 여러 개의 부모드가 존재하며, 전체 파장폭도 종모드 간격 의 4~5배에 해당한다. 그러나 DBR-DFB 레이저 다이오드는 이득 스펙트럼 영역 안에 단 하나의 브래그 파장이 존재하므로 단일종모드 발진이 가능하다. 이로 인해 레이저 다이오드의 파장폭은 종모드 간격보다 훨씬 작은 0.1~0.2 정도이다. 그러므로 현재 파장선폭면에서 가장 우수한 반도체 레이저는 수평적으로는 이러한 DBR 구조를 가지고 있다.

9.4 수광소자

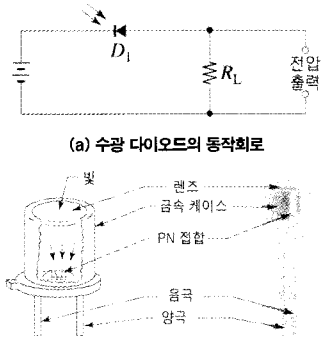
9.4.1 수광 다이오드와 광전류

수광 다이오드(photodiode)는 다이오드에 전류를 주입하여 빛이 나오는 현상의 발광 다이오드와는 반대로, 다이오드의 pn 경계면에 빛을 비추면 입사한 광자의 광 에너지때문에 가전자대의 전자가 전도대로 여기하여 전류 운반자, 즉 전자와 정공을 생성하는 소자이다. 그러므로 수광 다이오드에서 만들어진 전자와 정공을 효율적으로 검출하기 위해서는 발광 다이오드의 경우와는 반대로 p형 반도체, 즉 다이오드의 양극(anode)에는 음의 전압을 걸어주고 n형 반도체, 즉 다이오드의 음극(cathode)에는 양의 전압을 걸어주어야 한다. 이럴 경우 전자는 양의 전압이 걸린 음극으로 흘러나오고, 정공은 음의 전압이 걸린 양극으로 흘러나온다. 따라서 다이오드에는 양극에서 전류가 흘러나와서 음극으로 들어가는데, 이 전류를 광전류(photo current)라고 한다. 그림 9.26(a)에서 수광 다이오드에 빛을 입사시키지 않으면 전류가 흐르지 않으므로 저항 R_L에 전압이 걸리지 않고, 이로 인하여 저항 양단의 전압은 '0'이 된다. 하지만 빛을 입사시키면 수광 다이오드에 빛의 입사량에 비례하는 광전류 I_{ph}가 흐르고, 저항 R_L에 전압 $V=I_{ph}\times R_L$이 생긴다. 그러므로 이 전압을 측정하여 수광 다이오드에 흐르는 전류를 알면 거꾸로 수광 다이오드에 입사한 빛의 세기를 산출할 수 있다. 이렇게 광검출기능을 갖는 수광 소자는 광통신 및 광정보처리 시스템에서 매우 중요하게 활용된다. 그림 9.26(b)는 실제 수광다이오드의 패키징 예이다.

수광 다이오드가 동작하기 위해서는 이 소자에 입사된 빛을 반도체가 효율적으로 흡수해야 한다. 그러나 앞 절에서 언급한 바와 같이 반도체에 입사된 빛이 흡수되기 위해서는 입사광의 광에너지가 반도체의 밴드갭 에너지보다 커야 한다. 반도체 내부에서 빛의 흡수가 일어나면 반도체 내를 진행하는 빛의 세기는 반도체 내부 진행거리에 따라 지수적으로 감소하며, 이 지수계수를 파장에 따른 흡수계수 라 한다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$P(z) = P(0)\exp[-\alpha(\lambda)z] \qquad (9.11)$$

그림 9.27은 파장에 따른 반도체의 흡수계수 $\alpha(\lambda)$이다. 예를 들어 GaAs의 경우 에너지 밴드갭이 1.42eV이므로 파장이 1.24/1.42=0.87m보다 짧은 파장의 빛은 흡수계수가 커지지만, 이보다 긴 파장의 빛에 대해서는 흡수가 일어나지 않는다. 반면 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$의 경우 에너지



(a) 수광 다이오드의 동작회로

(a) 수광 다이오드의 동작회로

그림 9.26

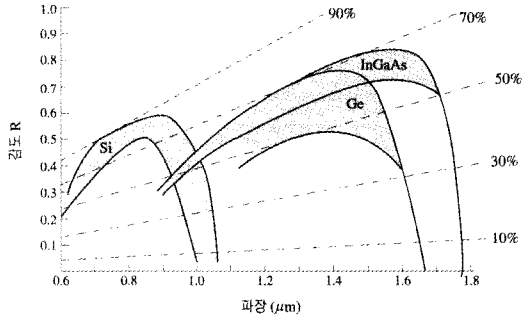
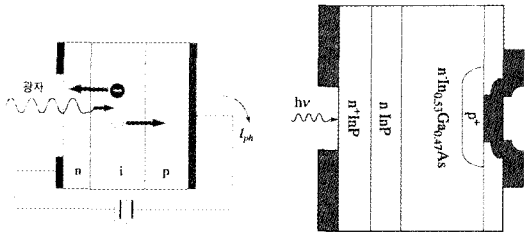
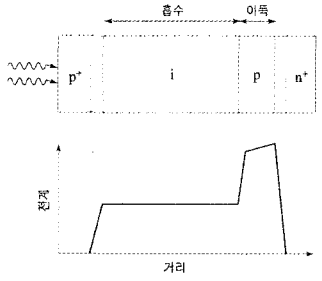


그림 9.27 여러 반도체의 광 흡수계수

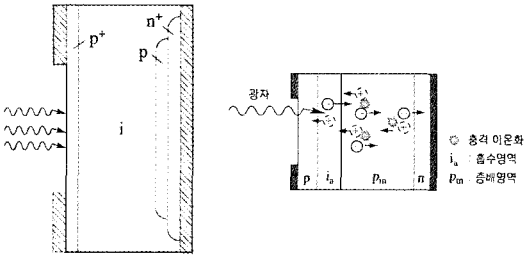


(a) pin PD의 전자-정공의 이동 (b) InGaAs pin PD의 구조

그림 9.28

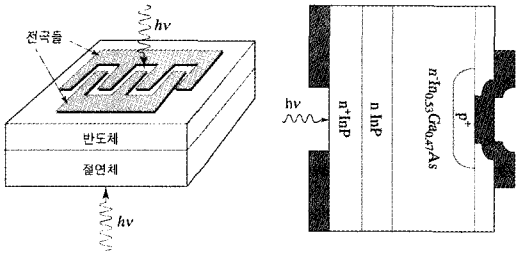


(a) APD의 전계 분포



(b) APD의 구조 (c) Avalanche multiplication

그림 9.29



(a) MSM PD의 구조 (b) MSP PD의 광전류 검출

그림 9.30

밴드갭이 0.73eV이므로 1.24/0.73=1.7m보다 짧은 파장의 빛을 흡수할 수 있으므로 광통신에 활용하는 대부분의 적외선 광을 흡수할 수 있다. 일반적으로 밴드갭 에너지가 1.1eV인 Si은 1.1m보다 짧은 파장을 흡수할 수 있으며, Ge는 밴드갭 에너지가 0.8eV이므로 1.6m보다 짧은 파장의 빛을 흡수할 수 있다.

9.4.2 광검출기

광검출기(photo detector; PD)는 수광 다이오드 중 광센서나 광통신 등에서 입사되는 빛에 담겨 있는 신호를 효과적으로 검출하여 전기적인 신호로 변환하여 준다. 이와 같은 광검출기 중에서 일반적으로 널리 사용하는 구조는 pin PD와 APD(Avalanche photodiode), 그리고 MSM(metal-semiconductor-metal) PD 등이 있다.

먼저 pin PD는 일반적으로 이종접합(heterostructure) pin 구조이다. 이 반도체는 중성 영역의 밴드갭 에너지가 일반적으로 p나 n 영역보다 작아서 입사한 빛이 p나 n 영역은 투과하고, 중성(i) 영역에서만 흡수된다. 광흡수에서 발생한 전자-정공 쌍은 그림 9.28(a)와 같이 역방향으로 인가한 전압에 의해 전자는 양의 전극으로 이동하고, 정공은 음의 정공으로 이동한다. 그림 9.28(b)는 광통신에 사용하는 InGaAs pin PD의 구조이다. 빛이 n 영역으로 입사하면 밴드갭이 큰 InP 영역을 투과하였다가 밴드갭이 작은 InGaAs 중성 영역에 이르면 이곳에서 광흡수가 일어나 전자-정공 쌍(EHP)이 발생한다. 이중 전자는 양의 전극으로 이동하고 정공은 음의 정공으로 이동하여 외부로 광전류가 흐른다. 이와 같이 pin PD는 보통의 p-i-n 층으로 구성되어 있어 구조가 간단하고 가격도 상대적으로 저렴하며, 잡음 특성도 좋아서 광검출기로 가장 널리 사용한다.

한편 APD(avalanche photodetector)는 그림 9.29(a)와 같이 p^+-i-p-n^+의 네 층으로 이루어져 있어서 외부에서 인가한 전압이 대부분 p-n^+ 경계면에 집중되며, 이로 인하여 매우 높은 전계가 생긴다. 이때 외부에서 빛이 입사되면 중성 영역에서 흡수되어 전자-정공 쌍이 생겨서 정공은 p^+쪽으로, 전자는 n^+쪽으로 이동한다. 이 전자가 전계가 매우 높은 영역을 지나면 속도가 빨라져서 반도체에 있는 원자와 충돌하여 제2의 전자-정공 쌍을 발생시킨다. 이렇게 생성된 전자와 정공은 그림 9.29(c)와 같이 또다시 반도체에 있는 원자와 충돌하여 제3, 제4의 전자-정공 쌍을 발생시켜 입사된 광자의 수보다 훨씬 많은 수의 전자-정공을 발생한다. 이러한 원리를 눈사태 이득(avalanche multiplication)현상이라 한다. 그림 9.29(b)

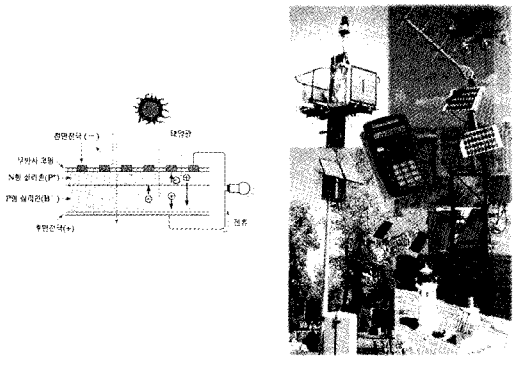
는 이러한 APD의 구조이다.

APD의 수신감도는 이 눈사태 이득계수만큼 향상되기 때문에 pin PD보다 약 10배 이상 크다. 그러므로 장거리 광통신시스템과 같이 미약한 광신호를 검출할 경우에 매우 유용한 소자이다. 그러나 이 소자의 단점은 동작특성이 잡음치가 높고 동작전압이 크며 가격이 비싸다는 점이다.

다음으로 MSM PD는 빛이 입사할 때 반도체 표면에 생성된 전자-정공을 반도체 표면에 형성한 두 금속전극을 이용하여 이끌어 내어 광전류를 검출하는 소자이다. 그림 9.30(a)에 MSM PD의 구조가 나타나 있다. 먼저 금속과 금속 사이의 간격은 좁히면서 그 길이는 늘려주기 위하여 그림 9.30(a)와 같은 교차돕니(interdigit) 형태의 전극을 활용한다. 이 전극 사이로 반도체에 입사한 빛은 반도체 표면에 전자-정공 쌍을 생성하며, 이들은 그림 9.30(b)와 같이 각각 양극과 음극으로 이동하여 금속영역 아래로 이동한다. 이 전자의 에너지가 충분히 크면 반도체와 금속 사이의 에너지 장벽을 뛰어 넘어서 외부전극으로 전자가 유출된다. 그러므로 이 소자의 속도는 전극 사이의 간격이 작을수록 동작속도가 증가하므로 미세구조 전극을 이용하여 초고속 광검출기를 제작할 수 있다. 현재 수백 GHz까지 높은 주파수의 신호를 검출할 수 있는 소자가 상용화되었다.

9.4.3 태양전지

수광소자의 응용분야 중 태양전지(solar cell)분야는 환경친화적인 면에서 일찍이 각광을 받아왔다. 태양전지는 수광 다이오드를 반도체 기판에 수많은 행렬로 조성하여 많은 광전류를 얻어내는 소자이다. 태양전지는 그림 9.31(a)와 같이 pn 다이오드로 이루어져 있고, 보다 많은 빛에너지가 반도체의 pn 경계면으로 들어갈 수 있도록 표면의 전극 영역은 최소화하거나 투명전극으로 대체하고, 그 나머지 영역은 무반사(anti-reflection)코팅을 해준다. 그리고 입사된 태양빛이 반도체를 통과하여 유실되지 않도록 뒷면에는 반사막을 형성하여 다시 흡수층으로 빛이 반사하도록 한다. 이 태양전지를 여러 개의 직렬회로로 연결하면 원하는 크기의 전압을 얻을 수 있으며, 전류의 크기는 병렬로 연결된 태양전지의 개수에 비례해서 늘어난다. 태양전지는 도서벽지 등 전력공급이 어려운 지역에서는 주에너지원으로 사용하고 기타 위성이나 원격전자시스템 등의 에너지공급원으로 사용하며, 휴대용 시계나 계산기 등의 전원으로도 활용한다.

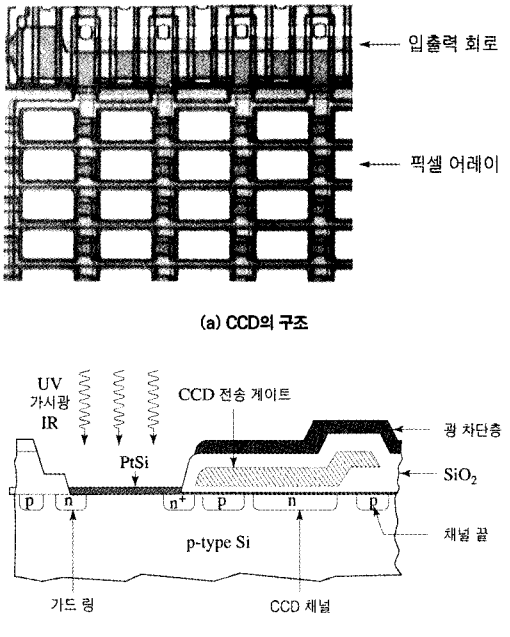


(a) 태양전지의 구조 (b) 태양전지의 응용분야

그림 9.31

9.4.4 CCD 영상장치

수광소자의 또다른 주요 응용분야는 디지털카메라나 비디오카메라와 같은 영상장치에서 활용하는 CCD 장치이다. CCD는 charge couple device의 약자로서 그림



(a) CCD의 구조

(b) CCD의 신호검출 개요도

그림 9.32

9.37과 같이 수광소자의 행렬로 이루어져 있다.

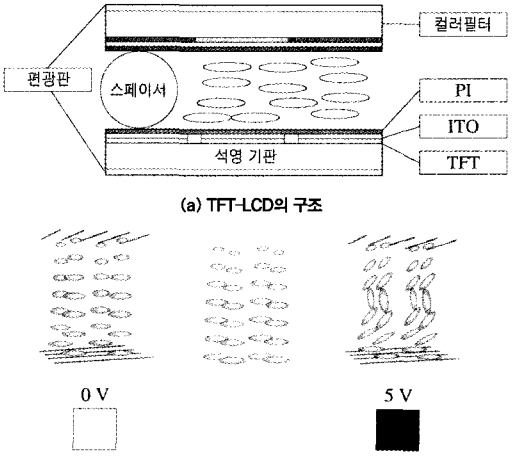
CCD는 그림 9.32(a)와 같이 가로 M개 세로 개의 PD의 행렬로 이루어져 있다. 이 행렬에 영상정보를 갖는 빛이 입사되면, 이에 비례해서 PD에 전자와 정공이 발생한다. 이 전자-정공이 재결합되어 소멸되지 않도록 음의 전압을 걸어두되 전극과 반도체 사이에는 전류가 흐르지 않도록 절연막을 삽입한다. 그러므로 PD에 생성된 전하는 PD에 가둬진다. 이때 그림 9.32(b)처럼 인접한 PD에 더 큰 양의 전압을 걸어주면 PD에 있는 전자는 인접한 PD로 이동한다. 이 전하량을 세로방향으로 번 읽어 내고 다음에는 그 옆줄을 읽어내어 M개의 줄을 모두 읽어내면, 가로 M개, 세로 N개에 저장된 2차원 영상신호를 모두 전기적인 신호로 순차적으로 검출할 수 있다. 이를 이용하여 디지털카메라나 카메라폰 등을 구현할 수 있다.

9.5 평판 디스플레이

현대가정과 사회에서는 멀티미디어 시대의 급진전에 따라 여러 종류의 영상장치를 사용하고 있다. 전자적인 영상장치의 효시는 TV나 컴퓨터모니터 등과 같은 음극선관(cathode ray tube; CRT)이었으나, 최근에는 두께가 CRT에 비해 획기적으로 줄어든 평판 디스플레이(flat panel display; FPD)를 광범위하게 사용하고 있다. 평판 디스플레이의 종류를 나열하면 표 9.1과 같다. 즉, 액정화면(liquid crystal display; LCD), 플라스마 디스플레이 패널(plasma display pael; PDP), 전계방출 디스플레이(field emission display; FED), 전자발광판(electroluminescent display; ELD), 발광 다이오드(LED) 등이 있다. 본 절에서는 이와 같은 평판 디스플레이의 동작원리와 간단한 응용분야를 살펴보고, 아울러 CRT나 프로젝션 TV 등에 사용되는 MEMS 디스플레이 소자에 대해서도 살펴본다.

9.5.1 LCD

액정 디스플레이는 그림 9.33과 같이 유리판 사이에 액정을 넣고 전압을 가하여 분자 배열상태를 변화시킴으로써, 빛을 투과 또는 차단하여 화상을 표시하는 장치이다. 그림 9.33(a)는 LCD의 한 화소(pixel)에 해당하는 구조로서 XVGA 모니터의 경우 보통 1024×800개의 화소가



(a) TFT-LCD의 구조

(b) LCD의 동작원리

그림 9.33

표 9.1 여러 평판 디스플레이의 동작원리와 응용분야

종 류	원 리	주요 용도
LCD (Liquid Crystal Display)	유리판 사이에 액정을 넣고 전압을 가하여 분자배열상태를 변화시킴으로써 빛을 투과 또는 차단하여 화상을 표시	시계, 계산기, 노트북, PC, 벽걸이 TV, 선박, 자동차, 항공기의 계기판
PDP (Plasma Display Panel)	양전극 사이에 혼합기체(Ar, Ne 등)를 넣고 전압을 가하면 플라즈마 방전이 일어나며 이때 발생하는 빛으로 화상을 표시(형광등의 원리를 응용)	벽걸이 TV, 대형정보 표시화면, 옥외 광고판
FED (Field Emission Display)	미세한 침에서 방출된 냉전자를 형광면에 충돌시켜 발생하는 빛을 이용하여 화상을 표시 (하나하나의 화소가 CRT의 역할을 수행)	비디오폰, 노트북 PC, 소형 벽걸이 TV, 군용장비 계기판
ELD (Electro Luminescent Display)	두 전극 사이에 주입된 전자와 정공의 결합때문에 생기는 발광-흡수-재발광 현상에 의해 발광하도록 하는 화상 표시장치	휴대폰, 의료, 해저, 군수 등 특수분야
LED (Light Emitting Diode)	전압을 가하면 전기에너지가 광 에너지로 직접 변환하는 반도체를 기판 위에 배열하여 구성하는 표시장치	옥외광고판

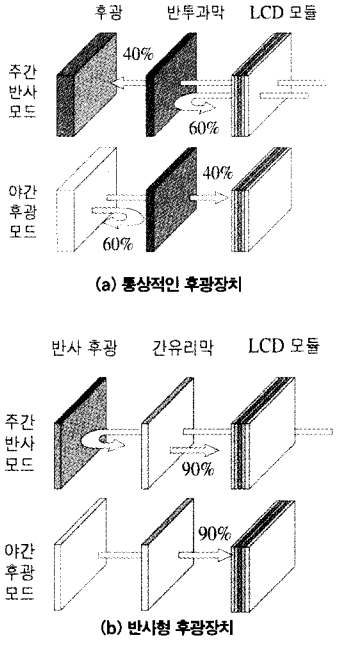


그림 9.34

하나의 석영기판에 조성된다. 각각의 화소에서 액정의 배열상태를 제어하기 위하여 구동회로를 같이 부착하는데, 이런 구조를 TFT-LCD(thin-film transistor LCD)라 한다. 이 TFT에 의해 인가된 전압에 따라 액정(liquid crystal)은 그림 9.33(b)와 같이 분자 배열이 달라진다. 이 액정물질에서는 빛이 진행할 때 분자 배열과 편광방향이 일치하면 빛이 흡수되어서 투과하지 못한다. 그런데 전압을 인가하지 않은 상태의 액정분자의 배열상태는 액정에 부착되어 있는 편광판의 편광방향과 항상 평행하고, 또 통과하는 빛의 편광과도 항상 평행하도록 되어 있어서 빛이 통과하지 못한다. 한편 이 액정에 충분히 큰 전압을 걸어주면 액정의 분자 배열이 빛의 편광과 직각이 되고, 이로 인해 빛이 잘 통과한다. 그러므로 액정의 역할은 빛의 차단과 통과를 결정하는 셔터와 같다. 이 액정에 외부조명을 비춰주면 액정의 상태에 따라 명암이 결정되어 영상의 재현이 가능하다. 그리고 이 액정의 가운데에 컬러 형광물질을 입혀두면 컬러 영상도 재현된다.

LCD는 LED와 달리 스스로 빛을 발생하지 못하고 단지 빛의 통과와 차단만을 결정하는 셔터기능만 가진다. 그러므로 LCD로 영상을 재현하기 위해서는 외부에서 적절하게 빛을 비춰주어야 한다. 그림 9.39는 LCD의 후광

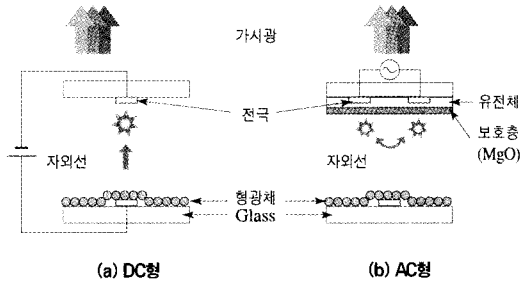


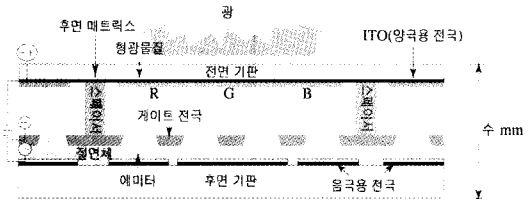
그림 9.35 PDP의 동작원리

(back light)방식에 대한 두 가지 구조이다.

먼저 그림 9.34(a)는 통상적인 후광방식으로 후광판과 LCD 모듈에 반투과막(transreflector)을 삽입하는 방식이다. 이 막은 대낮과 같이 자연조명이 충분히 밝을 때에는 빛이 LCD 모듈을 통과한 후 반사되어 나갈 수 있도록 하면서 밤과 같이 자연조명이 없을 때에는 후광장치에서 나오는 빛이 LCD 모듈로 통과할 수 있도록 해준다. 그러므로 이 반투과막의 투과율은 40% 정도이며, 이로 인하여 후광의 60% 정도가 손실되어 효율이 떨어진다. 그림 9.34(b)는 후광장치와 LCD 모듈 사이에 반투과막 대신 간유리막(diffuser)을 삽입한다. 이 막은 빛의 90% 이상이 투과할 수 있어서 빛의 흡수가 작다. 그리고 후광장치를 형광등과 같은 전통적인 조명장치가 아니라 백색 LED와 같은 반도체물질로 조성하면 백색 LED 자체가 반사막 역할을 하게 된다. 그러므로 자연광이 충분히 클 때는 이 빛이 후광판에 의해 반사되어 LCD 모듈에 빛을 비출 수 있고, 자연조명이 부족하여 후광을 켜게 되면 투명 간유리를 통해 LCD에 빛이 90% 이상 공급된다. 그러므로 후광장치의 효율을 배 이상 향상시킬 수 있다. 일반적으로 LCD는 전력소모가 작고 얇고 가벼워 휴대용모니터나 컴퓨터모니터 등으로 광범위하게 활용하나, TFT 기술의 제약으로 대형화에 어려움이 있어 현재 20~30 인치급의 디스플레이 시장만을 석권하고 있다.

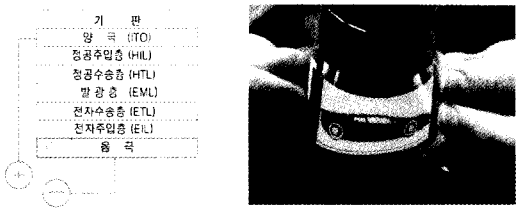
9.5.2 PDP

플라스마 디스플레이 패널(PDP)을 그림 9.35와 같이 양전극 사이에 Ar과 Ne 등의 혼합기체를 넣고 높은 전압을 가하면 플라스마 방전이 일어나며, 이때 발생하는 빛으로 화상을 표시하는 장치이다. 고전압 인가방식이 직류일 경우는 그림 9.35(a)와 같이 플라스마관의 상하에,



(a) DC형 (b) AC형

그림 9.36 FED의 구조



(a) 유기 EL의 구조 (b) 유기 EL 디스플레이

그림 9.37

교류일 경우에는 플라스마관의 표면에 전극을 형성한다. 이와 같은 구조로 인해 직류형을 후면 PDP 방식, 교류형을 전면 PDP 방식이라고도 한다. 후면 PDP 방식은 통상적으로 30~50인치급 HDTV에 많이 사용하며 전면 PDP는 40~60인치급 HDTV 등에 많이 사용하나, 기술의 추이로 보아 그 크기는 계속 증가할 것으로 예상된다. PDP는 대형 디스플레이 구현에 유리하며 별도의 후광이 필요없는 장점이 있으나, 높은 전력소모와 플라스마로 인한 전자파 발생 등이 해결하여야 할 과제로 남아있다.

9.5.3 FED

전계방출 디스플레이(field emission display; FED)는 그림 9.36에서 보듯이 미세한 침에서 방출된 냉전자를 형광면에 충돌시켜 발생하는 빛을 이용하여 화상을 표시하는 소자이다. 상판의 전극과 침 사이에 전압을 걸어주면 이 두 전극의 간격이 매우 작아 높은 전계가 걸려서 침으로부터 CRT와 같이 음극선, 즉 전자가 방출된다. 이 전자가 FED 상판에 입혀진 컬러 형광 물질에 부딪히면 형광이 발생하여 영상을 구현한다. 이와 같이 FED는 하나하나의 화소가 CRT의 역할을 수행하기 때문에 색상이 풍부하고 해상도가 매우 높다. FED 기술은 한국에서는 90년대 이후부터 개발되기 시작한, 아직은 시작단계인 기술로서 10인치 이하의 소형 디스플레이로 사용하고 있다.

9.5.4 유기 EL

전자발광(electrolumoinescence; EL) 디스플레이는 양극과 음극 사이에 주입된 전자와 정공이 재결합하여 발광한 후 이 빛이 재흡수-발광을 하면서 빛을 내는 자체 발광소자이다. LED는 주로 반도체로 이루어지지만 EL은 반도체 뿐만 아니라 비결정물질이나 유기물질에서도 나타난다. 그림 9.37(a)는 EL의 구조이다. 상판의 양극은 빛이 ITO와 같은 투명전극으로 되어 있고, 아래 전극은 얇은 금속으로 이루어져 있다. 이 사이에 전자와 정공의 주입층, 전자와 정공의 수송층이 있고 그 한 가운데 전자와 정공이 결합하여 빛을 발생하는 전자발광층이 있다. 이 방식 중에서 오늘날 크게 각광을 받고 있는 소자는 유기 EL이다. 그 이유는 그림 9.37(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 플라스틱과 같은 기판 위에도 구현할 수 있어서 휘어지기도 하는 인간친화적인 멀티미디어 장치를 만들 수 있기 때문이다. 이 장치는 비교적 쉽게 제작할 수 있고 높은 휘도를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면 구동전력소모가 크고 수명이 짧은 문제가 있기 때문에 계속 개선해야 할 여지가 있는 디스플레이 방식이다.

약 력

이종창(李鐘昌)

홍익대학교 전자전기공학부 교수
wave@hongik.ac.kr

학력 및 경력
1983 서울대학교 전자공학과 학사
1985 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
1985-1989 KIST 응용광학실 연구원
1989-1994 NSF Reserach Center for Qunatum Electronic Structure(QUEST) 연구원
1991 Science 표지 "Engineering a small world: From atomic manipulation to microfabrication"
1994 University of California, Santa Barbara, Elec. & Comp. Eng. Ph.D
1994- 현 홍익대학교 전자전기공학부 교수