



(19)대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(51) 。 Int. Cl. H01L 33/00 (2006.01)	(45) 공고일자 (11) 등록번호 (24) 등록일자	2007년07월02일 10-0734638 2007년06월26일
---	-------------------------------------	--

(21) 출원번호 (22) 출원일자 심사청구일자	10-1999-0029926 1999년07월23일 2004년07월23일	(65) 공개번호 (43) 공개일자	10-2000-0011917 2000년02월25일
----------------------------------	---	------------------------	--------------------------------

(30) 우선권주장 09/122,568 1998년07월24일 미국(US)

(73) 특허권자 필립스 루미리즈 라이팅 캄파니 엘엘씨
미국 캘리포니아주 95131-1008 산 호세 웨스트 트림블 로드 370

(72) 발명자 가드너나탄에프
미국캘리포니아주95112산호세아파트먼트140노스세컨드스트리트415

키시프레드에이
미국캘리포니아주95138산호세뉴게이트씨티5815

추이허만씨
미국캘리포니아주94087씨니베일웨스트키니커보커드라이브863

스톡만스테펜에이
미국캘리포니아주95037모간힐라마드라이브15500

카라메스마이클알
미국캘리포니아주94041마운틴뷰프론트레인550

호프러글로리아이
미국캘리포니아주94087씨니베일쿤버랜드드라이브863

코코트크리스토퍼
미국캘리포니아주94306팔로알토로마버드애비뉴622

몰니콜라스제이
미국캘리포니아주94020라혼다스타라우트2박스408

(74) 대리인 김창세
장성구

(56) 선행기술조사문헌 EP00727827 JP08213652	JP08125285
---	------------

심사관 : 홍경희

전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발광 소자

(57) 요약

발광 소자의 추출 효율은 가능한 한 얇은 흡수 소자 층을 생성함으로써 향상될 수 있다. 내부 양자 효율은 소자 층이 더 얇아짐에 따라 감소한다. 최적의 활성층 두께는 두 가지 효과의 균형을 유지시킨다. AlGaInP LED는 기판과, 제 1 전도형의 AlGaInP 하부 한정층(14A), 제 2 전도형의 AlGaInP 활성 영역(12), 및 제 2 전도형의 AlGaInP 상부 한정층(14B)을 포함하는 소자 층을 포함한다. 활성 영역의 흡광도는 발광 소자에서 총 흡광도의 적어도 1/5이다. 상기 소자는 선택적으로 한정층과 활성 영역 중 하나를 삽입하는 AlGaInP의 적어도 하나의 역전층(16)을 포함한다. p형 상부 한정층(14B)은 신뢰도를 향상시키는 산소로 도핑될 수 있다.

대표도

도 4

특허청구의 범위

청구항 1.

발광 소자(light-emitting device)에 있어서,

복수의 반도체 층을 포함하되,

상기 반도체 층은

제 1 전도 타입의 3족 인화물 하부 한정층과,

제 2 전도 타입의 3족 인화물 상부 한정층과,

상기 하부 한정층과 상기 상부 한정층 사이에 위치하는 3족 인화물 활성 영역을 포함하며,

상기 활성 영역의 흡광도는 상기 소자 내의 전체 반도체 층의 총 흡광도의 적어도 20% 이고, 상기 활성 영역의 두께는 2000Å 이하인

발광 소자.

청구항 2.

제 1 항에 있어서,

상기 하부 한정층에 가장 가까이 위치하는 상기 제 1 전도 타입의 반도체 기판과,

상기 상부 한정층에 가장 가까이 위치하는 상기 제 2 전도 타입의 반도체 윈도우 층을 더 포함하는 발광 소자.

청구항 3.

제 1 항에 있어서,

상기 활성 영역과, 상기 하부 및 상부 한정층 중 하나의 사이에 위치하는 AlGaInP 합금의 역전층(set-back layer)을 더 포함하되,

상기 역전층의 합금 합성물은 $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ (여기서, $x \geq 0.55$ 및 $0 \leq y \leq 1$)인 발광 소자.

청구항 4.

제 1 항에 있어서,

상기 상부 한정층은 10^{17} cm^{-3} 보다 크고 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 보다 작은 농도의 산소로 도핑되는 발광 소자.

청구항 5.

제 3 항에 있어서,

상기 역전층은 상기 활성 영역과 상기 상부 한정층 사이에 위치하고, 10^{15} cm^{-3} 보다 크고 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 보다 작은 농도의 산소로 도핑되는 발광 소자.

청구항 6.

제 1 항에 있어서,

상기 활성 영역은 복수의 양자 웰 층과, 두 개의 상기 양자 웰 층 사이에 위치하는 적어도 하나의 배리어층을 더 포함하는 발광 소자.

청구항 7.

삭제

청구항 8.

삭제

청구항 9.

삭제

청구항 10.

삭제

청구항 11.

삭제

청구항 12.

제 1 항에 있어서,

상기 활성 영역의 두께는 1500Å보다 작은 발광 소자.

청구항 13.

제 1 항에 있어서,

상기 활성 영역의 두께는 1000Å보다 작은 발광 소자.

청구항 14.

제 1 항에 있어서,

상기 활성 영역의 두께는 100Å보다 큰 발광 소자.

청구항 15.

삭제

청구항 16.

삭제

청구항 17.

삭제

청구항 18.

제 1 항에 있어서,

상기 활성 영역은 최고 파장이 600nm 미만의 빛을 방출하도록 구성되며, 상기 활성 영역의 두께는 1000Å 내지 2000Å 사이인 발광 소자.

청구항 19.

제 1 항에 있어서,

상기 활성 영역은 최고 파장이 600nm 내지 620nm 사이의 빛을 방출하도록 구성되며, 상기 활성 영역의 두께는 500Å 내지 2000Å 사이인 발광 소자.

청구항 20.

제 1 항에 있어서,

상기 활성 영역은 최고 파장이 620nm보다 큰 빛을 방출하도록 구성되며, 상기 활성 영역의 두께는 200Å 내지 1500Å 사이인 발광 소자.

청구항 21.

제 3 항에 있어서,

상기 역전층은 상기 활성 영역과 상기 상부 한정층 사이에 위치하며, 상기 활성 영역과 상기 역전층의 총 두께는 5000Å 내지 10000Å 사이인 발광소자.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 활성층을 형성하는 AlGaInP의 화합물 반도체 층과, 캐리어를 상기 활성층에 주입한 p-n 접합을 사용하여, 기판 위에 형성된 반도체 발광 소자에 관한 것으로, 활성층 및 다른 구성 요소 층의 두께는 발광 효율을 최적화하도록 선택된다.

발광 다이오드(LED)는 낮은 전력 소비, 소형화 및 높은 신뢰도를 요구하는 많은 응용에 널리 채택되고 있다. 가시 스펙트럼의 노란-녹색 내지 적색 영역에서 광을 방출하는 에너지-효율적 다이오드는 AlGaInP 합금으로 형성된 활성층을 포함한다. 도 1에 도시된 종래의 AlGaInP LED는 "이중 헤테로 구조체(double heterostructure)" 구성으로 모두 배치된 GaAs와 같은 반도체 기판, 하부 한정층, 활성층, 상부 한정층과, 그 이후의 선택사양적인 윈도우 층을 포함한다. 한정층은 투명 반도체로 만들어지고, 광을 재결합 및 방출하는 활성층에 전자-홀 쌍의 소부분으로 정의된 LED의 "내부 양자 효율(internal quantum efficiency)"을 향상시킨다. 또한, 투명 반도체인 윈도우 층은 활성층을 가로질러 전류의 유포를 증가시키고 다이오드의 내부 양자 효율을 향상시킨다.

AlGaInP LED의 내부 양자 효율은 다른 것들 중에서 활성층의 두께와 (방출된 광의 색을 결정하는) 그 합금 합성물 (composition) 및 한정층의 합금 합성물에 따른다. 도 2a는 활성층의 두께 변화에 따른 흡수 기판 AlGaInP LED의 내부 양자 효율을 도시한다. LED의 효율은 전자 또는 홀(어느 것이 소수 캐리어든지)이 활성층에서 방사적으로 재결합하는 정도에 따른다. 한정층의 합금 합성물 및 도핑 농도는 활성층과 한정층 사이에 잠재적 에너지 배리어를 생성하도록 선택된다. 주입된 소수 캐리어중 비교적 소량의 캐리어는 배리어를 극복하고 활성층으로부터 확산하기에 충분한 운동 에너지를 갖는다. 따라서, 활성층 두께가 소수 캐리어의 확산 길이보다 작으면, 소수 캐리어 농도는 한정층의 존재에 의해 증가된다(일정 전류가 소자에 인가될 경우). 이것은 내부 양자 효율의 증가를 야기하는데, 그 이유는 캐리어가 방사적으로 재결합하는 비율이 캐리어 밀도에 따라 증가하기 때문이다. 활성층 두께가 확산 길이보다 더 크다면, 내부 양자 효율은, 한정층이 캐리어 밀도를 증가시키지 않기 때문에 감소된다.

비록 한정층 합성물이 제한 에너지를 최대로 하도록 선택되더라도, AlGaInP 재료 시스템에서, 이러한 에너지는 캐리어가 활성층으로부터 "누설(leaking)"하는 것을 완전히 방지할 만큼 충분히 크지 않다. 한정층을 위해 사용되는 와이드-에너지-갭 합금($x > 0.55$ 인 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$)에서, 비-방사적 재결합은 높은 속도에서 발생하고, 그래서 활성층으로부터 누설되는 캐리어는 본질적으로 손실되고, LED의 내부 양자 효율은 저하된다. 누설 전류량은 활성층 및 인접층의 합금 합성물 및 그들의 에너지 갭의 결과적인 차이에 의해 결정된다. 따라서, 와이드-갭 활성층이 590-nm 광을 생성하는데 사용된다면, 캐리어 제한은 LED가 그 밖의 것이 동일할 때 활성층이 630-nm 광을 생성하는 경우보다 더 나빠진다. 당업자는 LED가 단지 하나의 파장의 광을 방출하지 않는다는 것을 인식할 것이다. LED 파장은 최대 광자 방출의 포인트에서 정의된다. 캐리어가 활성층으로부터 탈출하는 비율은 또한 활성층과 한정층 사이의 인터페이스에 위치된 캐리어의 농도와 관련된다. 상기 농도는 활성층 두께가 증가함에 따라 감소한다. 이들 두 가지 효과(누설 및 캐리어 농도)를 함께 고려해 보면, 가장 높은 내부 양자 효율을 위한 활성층 두께는 방출된 광의 색에 따라 변할 것이다. 이는 활성층 두께의 함수로서, 더 짧은 파장에서 방출하는 제 2 AlGaInP LED의 효율을 도시하는 도 2에 의해 도시되어 있다. 제한 에너지가 더 작기 때문에, 최적 활성층은 더 두껍다.

Sugawara 등에 의한 미국 특허 제 5,153,889 호에서는, 흡수 기판 AlGaInP LED의 활성층이 주입된 소수 캐리어의 확산 길이보다 더 두껍다면, 이중 헤테로 구조체는 활성층에서 전자 및 홀의 추가적 제한을 제공하지 않는다는 것을 보여준다. 다른 한편으로, 활성층이 너무 얇다면(저자에 따르면, $< 1500\text{\AA}$), 활성층 내의 캐리어 밀도는 너무 높아, 캐리어의 실질적 소부분은 한정층 내로 탈출한다. 약 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 의 순 홀 농도를 갖는 p형 활성층과, 약 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 의 순 홀 농도를 갖는

상부 한정층 화합물 ($\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.5}\text{P}$)에 대해, 최적 활성층 두께는 1500Å과 7500Å 사이로 규정된다. Okagawa 등에 의한 미국 특허 제 5,710,440 호에서는, 약 $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 의 순 홀 농도를 갖는 ($\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.5}\text{P}$) 상부 한정층에 대해, 최적 활성층 두께는 흡수 기관 LED에 대해 1.1μm와 1.3μm 사이의 범위이다.

특히 단파장 방출 LED에 대해 내부 양자 효율을 개선시킬 수 있는 다른 방법은 다중-양자-웰(multi-quantum-well; MQW) 구조를 갖게 하는 것이다. 이들 소자에서, 광 방출은 가시 광에 투광성인 AlGaInP의 다른 합금 합성물의 다수 "배리어"층 사이에서 발광 AlGaInP의 다수(일반적으로 5 또는 그 이상)의 얇은 양자 웰 활성층(또한 "웰"이라고 함)에서 발생한다. 활성 영역은 하나 이상의 발광층으로 구성된다. MQW 구조에 대해, 광학적으로 투명한 보다 높은 밴드갭 배리어층은 활성층을 분리시킨다. 총 활성 영역 두께는 모든 활성층(웰)과 배리어의 두께의 합이다. 총 활성층 두께는 모든 개개의 발광 활성층(웰)의 두께의 합이다. 단일 발광층 소자에 대해, 활성층 및 활성 영역 두께는 동일하다. 양자 웰(여기에서 캐리어는 양자 크기 효과를 나타낸다)을 형성하기 위하여, 웰의 두께는 200Å 미만이어야 하며, 이것은 효과적인 질량 근사치로 대략 AlGaInP에서 열전자의 파장 함수의 길이이다. 정확한 두께는 양자 웰 및 배리어의 합금 합성물에 따른다. 얇은 양자 웰에서 누설되는 캐리어가 제 2 또는 제 3, 또는 제 4 웰 등에서 재결합할 수 있다면, LED의 내부 양자 효율은 개선된다. 상기와 같은 이유로, 양자-웰 LED는 전형적으로 활성 영역에 수십 개의 웰을 가지고 있다. 더욱이, 웰의 총 두께는 활성층 두께로 기술되는데, 그 이유는 배리어로부터 광이 방출되지 않기 때문이다. Sugawara 등은 미국 특허 제 5,410,159 호에, 높은 효율의 흡수 기관 LED를 생산하기 위하여 웰 두께와 웰의 수의 최적 조합을 결정하는 방법을 기술한다. 합금 합성물 ($\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.5}\text{P}$)를 갖는 (2000Å의 총 활성층 두께에 대해) 40개의 50Å 두께의 웰을 사용하여, 발명자는 20mA의 구동 전류 및 575 nm의 방출 파장에서 ~2.7% 외부 양자 효율을 얻었다. 비록 발명자가 획득했던 외부 양자 효율을 상세히 설명하지 않더라도, Huang 등은 또한 미국 특허 제 5,661,742 호에 MQW 활성 영역의 용도를 기술한다.

내부 양자 효율은 LED의 "외부 양자 효율"을 결정하는 하나의 인자이고, 외부 양자 효율은 점점을 통해 들어가는 전자의 수에 대한 LED에서 빠져나가는 광자 수의 비율로 정의된다. 다른 인자는 "추출 효율(extraction efficiency)"인데, 추출 효율은 LED의 반도체 표면으로부터 탈출하고 주변 재료에 들어가는 활성층에서 발생하는 광자의 비율로서 정의된다. 선택적인 윈도우 층은 더 많은 광으로 하여금 반도체 재료에서 빠져나가게 허용함으로써 추출 효율을 증진시킨다. LED의 추출 효율은 흡수층보다는 오히려 투명 기관(transparent substrate; TS) 상의 하부 한정층을 성장시키거나 기계적으로 접합시킴으로써 훨씬 개선될 수 있다. TS AlGaInP LED의 추출 효율은 대략 2개의 인자 중 하나의 인자만큼 LED의 외부 양자 효율을 향상시키는, AS AlGaInP LED의 효율보다 대략 2배 높을 수 있다.

투명 기관 LED(TS-LED)의 추출 효율은 발광층의 것과 같거나 더 적은 에너지 갭을 갖는 LED내의 임의의 층의 존재에 의해 감소된다. 이것은 활성층에 의해 방출되는 광의 일부가 LED를 빠져나가기 전에 흡수층을 통과하기 때문이다. 모든 흡수층은 아니지만 전형적인 흡수층은 ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (여기서 $x < 0.55$) 또는 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 의 합금, 및 이와 관련된 합금으로 형성된다. 이들 층은 활성층과 윈도우 층의 사이, 및 하부 한정층과 기관 사이에 위치될 수 있다. 이들 흡수층은 활성층에 잘못 선정된 위치의 수 또는 다른 결점을 줄이거나, LED 제조 공정을 단순화시키기 위해 사용되기 때문에 포함된다. 다른 효과는 헤테로 인터페이스에서 밴드 오프셋을 감소시키는 것이며, 이것은 다이오드를 통해 특정 전류를 강제로 흐르게 하기 위하여 점점에 인가되어야 하는 전압을 더 낮춘다. 흡수층이 장파장 광보다 더 효과적으로 단파장 광을 흡수하는 경향이 있기 때문에, 590nm로 방출하는 LED는 640nm로 방출하는 LED보다 이들 층의 존재로 인해 성능면에서 보다 더 불리해진다.

또한, 활성 영역에서의 흡수는 추출 효율을 감소시킨다. 도 3은 투명 기관 AlGaInP LED를 통과하는 광을 도시한 도면이다. 화살표는 전류가 LED의 점점을 통해 p-n 접합에 주입될 때, 활성층에 의해 방출되는 광을 나타낸다. 이 광선은 소자의 바닥을 향해 방사되고, 뒤쪽 점점을 벗어나 반사하고, 또다시 기관, 하부 한정층 및 활성층을 통과한다. 활성층은 광선을 나타내는 얇은 선으로 표시된 바와 같이, 광선이 통과함에 따라 상기 광선의 일부를 재 흡수한다. 활성층의 흡수 계수는 전형적으로 LED의 좁은 갭 층의 흡수 계수만큼 크지는 않다. 그러나, 광선은 탈출하기 전에 LED의 내부 표면을 벗어나 수 차례 반사(활성층을 수 차례 통과한다)하기 때문에, 많은 양의 방출된 광이 활성층에 흡수될 수 있다. 반대로, 흡수하는 기관 LED의 활성층에 의해 방출되는 광은 오직 활성층을 한번 통과하는데, 그 이유는 내부 표면을 벗어나 반사하는 광은 일반적으로 기관에 의해 완전히 흡수되기 때문이다. 그러므로, 활성층에서의 흡수는 AS LED의 외부 양자 효율에 거의 영향을 미치지 않는다.

광이 활성층(단일층 또는 다수-웰 구성으로 배열된 복수의 층)에 의해 흡수될 때, 방사적으로 또는 비-방사적으로 재결합할 수 있는 전자 및 홀 쌍이 형성된다. AlGaInP 활성층에서, 흡수된 소수의 광자만이 재방출된다. 이 소수는 활성층의 내부 양자 효율과 증가이고, 활성층의 합금 합성물(즉, LED의 방출 파장) 및 결정체 결점 또는 불순물을 통해 비-방사적으로 재

결합하는 전자-홀 쌍의 편애(predilection)에 의해 결정된다. 전형적으로, 590nm LED의 경우, 흡수된 광자의 5 내지 50%만이 활성층에 의해 재방출될 것이다. 따라서, 활성층에 의해 처음으로 방출되고 이어서 흡수되는 광의 95 내지 50%은 회복할 수 없게 손실되어, 소자의 추출 효율 및 외부 양자 효율의 감소를 야기시킨다.

중래 기술에서, AlGaInP LED의 효율을 향상시키기 위한 기술은 가장 높은 내부 양자 효율을 야기하는 활성층 두께를 결정하고, 흡수 기관을 제거함으로써 LED의 추출 효율을 증가시키는데 초점이 맞추어져 있었다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

TS-LED의 추출 효율은 활성층을 포함하는 흡수층 모두를 가능한 한 얇게 제조함으로써 더 개선될 수 있다. 그러나, AlGaInP LED에서, 극도로 얇은 활성층은 LED의 내부 양자 효율의 감소를 야기한다. 최적의 활성층 두께는 추출 효율을 증가시키고 내부 양자 효율을 감소시키는 효과가 평형을 이루게 할 것이다. 따라서, TS-LED는 그 외부 양자 효율이 최대로 될 때, 최적의 추출 효율도 최적의 내부 양자 효율도 가질 수 없다.

본 발명은 투명 기관 LED에서 더 우수한 외부 양자 효율을 제공하고, $n_{\text{내부}}$ (내부 양자 효율)와 $n_{\text{추출}}$ (추출 효율) 사이의 절충을 고려하는 활성층 두께를 갖는 AlGaInP 활성 영역을 포함하는 LED에 관한 것이다. $n_{\text{내부}}$ 은 많은 성질, 특히 활성 영역과 한정층의 합성물의 함수이기 때문에, 최적의 두께는 특정 AlGaInP LED 설계에 특유한 것이다. 활성 영역의 층의 두께 및 수는 더 우수한 외부 양자 효율을 제공하도록 특정된다. 더욱이, LED의 외부 양자 효율은 연장된 동작으로 실질적으로 변화되지 않는다. 활성층의 두께, 한정층의 두께, 및 구성 요소의 다른 조건에 대한 특정 범위는 외부 양자 효율 및 제조 능력을 증가시킨다.

LED는 제 1 전도형의 기관 상에 형성된 소자층을 포함한다. 소자층은 총 흡광도를 갖는다. 이들 층은 제 1 전도형의 AlGaInP 합금인 하부 한정층, 제 2 전도형의 AlGaInP 인 활성 영역, 및 제 2 전도형의 AlGaInP 합금인 상부 한정층을 포함한다. 활성 영역의 흡광도는 총 흡광도의 적어도 1/5이고, 활성 영역의 흡광도는 0.2 미만이다. 신뢰도와 제조 능력을 향상시키기 위하여, LED는 선택적으로 AlGaInP의 1개 또는 2개 역전층을 포함할 수 있는데, 상기 역전층에는 한정층과 활성 영역 중 하나가 삽입된다. 역전층은 도펀트 원자가 고온 처리과정 동안 이동하는 동시에, 최종 LED에 동일한 위치에서 p-n 접합을 유지하는 영역을 제공한다. 게다가, 역전층은 내부 양자 효율의 감도를 감소시켜서, LED의 온도에서 변화할 수 있다. p형 상부 한정층은 LED의 신뢰도를 향상시키기 위하여 산소로 도핑될 수 있다.

발명의 구성

도 4는 AlGaInP 투명 기관 발광 다이오드(TS-LED)에 대한 활성층의 두께에 따른 내부 양자 효율, 추출 효율 및 외부 양자 효율을 도시한다. 외부 양자 효율은 내부 양자 효율과 추출 효율의 곱, 즉

$$\eta_{\text{외부}} = \eta_{\text{내부}} \times \eta_{\text{추출}}$$

이다. 도 4에 도시된 활성층 두께의 한 범위에 대해, 외부 양자 효율은 내부 양자 효율에 의해 제한되고, 더 두꺼운 활성층의 다른 범위에서는, 외부 양자 효율은 추출 효율에 의해 제한된다. 최적의 외부 양자 효율을 갖는 TS-LED는 점(A)으로 도시된 내부 양자 효율과 추출 효율의 영향이 균형을 이루도록 선택되는 활성층 두께를 갖는다. 반대로, 최적의 외부 양자 효율을 갖는 AS-LED는 또한 최적의 내부 양자 효율을 갖고, 활성층 두께는 점(B)에 도시된 상기 효율을 최대로 하도록 선택된다. LED의 내부 양자 효율은 많은 층의 특정 성질, 예컨대 소자층의 합성물 및 도핑에 따르기 때문에, 최대 외부 양자 효율에 대한 활성층 두께는 변할 것이다. 일부 특정한 독립요소가 아래에 상세하게 기술될 것이다.

추출 효율은 상기 영역의 흡수가 LED의 총 흡수보다 상당히 미소한 경우에도 활성층 두께에 따른다. 한 극단적 예로, 활성층은 LED, 예컨대 투명-기관 LED의 유일한 흡수층이고, 활성층의 두께를 변화시키는 것이 추출 효율에 큰 영향을 미친다. 다른 극단적 예, 예를 들면, 얇은(< 2000 Å) 활성층을 갖는 흡수-기관 LED에서, 활성층은 소자의 총 흡수에 거의 기여를 하지 못하고, 활성층의 두께를 감소시키는 것이 추출 효율을 많이 개선시키지는 못한다.

특정 층이 광을 흡수하는 정도는 층에 대한 흡광도를 다음의 수학식에 따라 정의함으로써 정해될 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} &\text{수학식 1} \\ &\text{흡광도} = 1 - \exp[-\alpha(\lambda_{\text{peak}}) \cdot L] \end{aligned}$$

여기서, α 는 LED 방출 스펙트럼의 피크 파장에서 층의 흡수 계수이며, L 은 동일한 층의 두께이다. 흡광도를 정의할 때, 광은 수직 입사로 층을 통과한다고 가정한다. 경사각으로 층을 통과하는 광은 L 보다 더 큰 평균 층 두께를 지나갈 것이며, 그래서 수학식 1은 활성층이 가질 수 있는 최소 흡광도를 나타낸다. 반도체 층이 활성층을 부분적으로 덮고 있는 경우, 흡광도는 LED의 영역에 대한 반도체 층의 영역의 비율에 따라 계산되어야 한다는 것이 당업자에게는 자명할 것이다.

수학식 1에 따라서, 높은 흡수 계수 또는 큰 두께를 갖는 층은 낮은 흡수 계수를 갖는 층 또는 얇은 층보다 광을 더 많이 흡수할 것이다. 도 5는 다이렉트-갭(direct gap)의 발광 AlGaInP 에 대한 광자 에너지의 함수로서 cm^{-1} 단위로 표현된 흡수 계수를 나타낸다. 에너지는 입사 광자 에너지와 AlGaInP 층이 방출하는 광자 에너지의 차로 표현된다. 일반적으로 LED에 수 개의 흡수층이 있고, 소자층(기판을 제외한 LED의 모든 층)의 총 흡광도는 다음의 합으로 결정된다. 즉,

수학식 2

$$\text{총 흡광도} = 1 - \exp \left[- \sum_i \alpha^i(\lambda_{peak}) \cdot L^i \right]$$

여기서, 활성층 그 자체(또는 하나 이상이 있다면, 활성층들)를 포함하고 (또다시 광을 상기 층에 수직으로 입사한다고 가정하면) 기판을 배제한, 활성층에 의해 방출된 광을 흡수하는 소자에 i 반도체 층이 있다. 활성층 두께를 감소시키는 이익을 최대화 하기 위하여, 활성층과 "기생(parasitic)" 흡수층의 바람직한 상대 흡수는 활성 영역의 흡광도를 소자층의 총 흡광도와 비교함으로써 수학적으로 표현될 수 있다. 활성 영역의 흡광도는 다음의 합에 의해 결정된다. 즉,

수학식 3

$$\text{활성 영역 흡광도} = 1 - \exp \left[- \sum_j \alpha_{AL}^j(\lambda_{peak}) \cdot L_{AL}^j \right]$$

여기서, 아래첨자 AL 은 LED의 활성 영역의 j 발광 활성층이라 한다. "활성층 두께"는 j 발광 활성층 두께의 합계이다. 최적 소자의 경우, 활성 영역 흡광도는 다음의 수학식 4에 의거하여 총 흡광도와 관련된다. 즉,

수학식 4

$$(\text{활성 영역 흡광도}) \geq \frac{1}{5} (\text{총 흡광도})$$

수학식 4는 활성 영역의 흡광도가 반도체 소자층의 총 흡광도의 적어도 1/5일 것을 요구한다.

LED에서 기생 흡수층의 두께는 Itaya 등의 "Circuit-voltage characteristics of p-p isotype InGaAlP/GaAs heterojunction with a large valence-band discontinuity," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 32, pp. 1919-1922, 1993에 기술된 바와 같이 일반적으로 100-1000 Å 정도이다. 두께는 금속-유기질 화학 증착(OMVPE; metal-organic chemical vapor deposition) 또는 분자 빔 에피택시(MBE; molecular beam epitaxy)에 의해 큰 부피로 제작할 때 재생하기에 충분할 정도로 두꺼운 층을 성장시켜 원하는 효과를 나타낼 필요성 때문에 하단부에 대하여 제한되고, 또한 특히 층이 LED의 활성 영역과 윈도우 층의 사이에 위치되는 경우, 기생 손실을 최소화시킬 필요성에 의해 상단부에 대하여 제한된다. 만약 기생층이 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 합금의 경우 최악의 흡수 계수를 갖는 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된다면, 상기 두께는 (다이렉트-갭 AlGaInP에서 나오는 가장 짧은 방출 파장인 555 nm에 대해) 0.04 내지 0.34의 흡광도 범위에 상응한다. 수학식 4는 최소 활성 영역 흡광도가 0.01 내지 0.085의 범위 있을 것을 요구한다.

수학식 4가 만족될 때, 활성층의 두께를 변화시키면, LED의 추출 효율에 많은 영향을 미칠 것이다. 예를 들면, LED에서 활성층의 흡광도가 총 흡광도의 1/5보다 약간 더 작을 경우, 활성층 두께를 인자 2만큼 줄이면 소자의 총 흡광도를 ~10% 만큼 감소시킨다. 추출 효율은 소자 내에서 반사 손실 때문에 더 작은 양만큼 증가할 것이다. 그러나, 소자 성능의 상기 개선 크기는 외부 양자 효율의 실험 계측에서의 잡음과 반복적으로 구별될 수는 없다. 그러므로, 활성층 흡광도는 외부 양자 효율에 더 큰 영향을 미쳐야 하고, 수학식 4는 상기 요구사항을 만족시킨다.

최적 LED의 최대 활성 영역 흡광도는 활성 영역의 내부 양자 효율에 따른다. 590 nm 방출 LED의 경우, 내부 양자 효율은 5% 정도로 낮을 수 있다. 활성 영역의 흡광도가 (종래 기술에 일반적으로 사용되는, 7500 Å의 활성층 두께에 상응하는) 0.45이면, 광선이 활성층을 통해 각각 통과한 후, 광선은 원래 세기의 0.57배이다. 최적 활성 영역에서는 광선의 단일-통과 세기가 최소한으로 영향을 받게 되고, 원래 세기의 적어도 0.8배로 정의되는 결과를 가져올 것이다. 단일-통과 세기에 대한 이러한 조건은 연구된 투명-기판 AlGaInP LED 모두에 의해 만족되고, 이 LED의 외부 양자 효율을 개선하는 결과를

가져온다. 내부 양자 효율이 5%인 AlGaInP LED의 경우, 이것은 3800Å의 활성층 두께 및 0.26의 흡광도에 상응한다. 일부 AlGaInP LED, 특히 녹색으로 방출하는 AlGaInP LED는 5%보다 낮은 내부 양자 효율을 갖는다. ≪ 5%(거의 0)인 내부 양자 효율을 갖는 활성층을 수용하기 위하여, 활성 영역 흡광도에 대한 상한은 2800Å의 활성층 두께에 상응하는 0.2로 정해질 수 있다. 더 높은 내부 양자 효율을 갖는 LED의 경우, 활성 영역 흡광도는 0.2보다 더 큰 동시에 0.8 x 단일-통과 투과율을 유지할 수 있다. 그러나, 더 얇은 활성층은 더 우수한 추출 효율을 가질 것이며, 더 바람직하다. 따라서, 추출 효율을 최적화하기 위하여, 도 4의 요구사항을 제외하고, 활성 영역의 흡광도에 대한 하한 값은 없다.

도 6은 활성층의 두께가 각각 다른 몇 개의 TS AlGaInP LED 웨이퍼를 통과하는 광의 투과 퍼센트를 도시한다. 이 도면은 최소 흡수성을 갖는 활성층을 통과하기 위해 광의 능력에 대한 활성층 두께의 효과를 도시한다. 이들 LED에 존재하는 추가적 층으로 인한 흡수성이 또한 도시된다. 590nm 방출 AlGaInP TS LED의 일 실시예에서, 활성층의 흡광도는 0.15이고, 기생층의 흡광도는 0.15이다. 이 LED는 0.45의 활성층 흡광도를 갖는 종래 기술인 LED보다 28% 더 큰 외부 양자 효율을 가지며, 그 밖의 것은 동일하다.

최적의 활성층 두께를 결정하는 또 다른 파라미터는 (이것은 LED가 방출하는 광의 색을 결정하는) 활성층의 합금 합성물이다. 도 7은 투명 기관, 상기 기관 상에 형성된 $Al_{0.5}In_{0.5}P$ 의 하부 한정층, 하부 한정층 상에 형성되는 가변적 두께의 (590 nm로 방출하는) $(Al_{0.3}Ga_{0.7})_{0.5}In_{0.5}P$ 의 활성층, 활성층 상에 형성된 $Al_{0.5}In_{0.5}P$ 의 상부 한정층, 및 윈도우 층을 포함하는 LED에 대해, 활성층 두께 변화에 따른 상대적인 외부 양자 효율을 도시한다. 외부 양자 효율은 활성층 두께가 100Å에서 2000Å로 증가함에 따라 증가한다. 상기 효율은 활성층 두께가 7500Å로 증가됨에 따라 감소한다. 외부 효율이 2000Å에서 7500Å로 감소되는 것은 더 두꺼운 활성층에서 더 낮은 추출 효율 및 더 낮은 캐리어 밀도의 결과이며, 이것은 방사 재결합 속도를 줄인다. 활성층 두께가 1000Å 이하로 감소됨에 따라, 활성층으로부터 소수 캐리어의 누설 속도는 높아져서, 소자 효율은 이 범위에 걸쳐서 감소한다. LED에서 구성층의 성질은 완벽하게 제어될 수 없기 때문에, 활성층의 최적 두께는 0.08-0.18의 흡광도에 상응하는 1000-2500Å의 범위에 걸쳐서 변할 것이다. 600 nm 미만에서 방출하는 LED는 또한 활성층 흡광도의 이 범위에 걸쳐서 개선된 성능을 증명하고 있다.

도 7과 비교해 볼 때, 도 8은 투명 기관, 기관 상에 형성된 $Al_{0.5}In_{0.5}P$ 의 하부 한정층, 하부 한정층 상에 형성되는 가변적 두께의 (630 nm로 방출하는) $(Al_{0.1}Ga_{0.9})_{0.5}In_{0.5}P$ 의 활성층, 활성층 상에 형성된 $Al_{0.5}In_{0.5}P$ 의 상부 한정층, 및 윈도우 층을 포함하는 LED에 대해, 활성층 두께 변화에 따른 상대 외부 양자 효율을 도시한다. 외부 양자 효율은 활성층 두께가 100Å에서 7500Å로 증가됨에 따라 감소한다. 최대 외부 양자 효율은 (0.04의 흡광도에 상응하는) 500Å 미만의 활성층 두께에 대해 달성된다. 위에서 기술된 효과에 따라, 내부 양자 효율은 활성층 두께가 100Å 이하의 일부 포인트를 넘어 감소됨에 따라 감소할 것이다. 적색 LED에서 활성층의 에너지 갭은 호박색 LED에서의 것보다 더 작고, 한정층의 합금 합성물은 두 LED에 대해서 동일하기 때문에, 적색 LED에서의 캐리어 제한이 더 우수하다. 결국, 적색 소자에서, 활성층으로부터의 캐리어 누설의 효과는 훨씬 더 얇은 활성층을 갖는 경우에만 중요하고, 최적 활성층은 훨씬 더 얇다. 620 nm 이상에서 방출하는 LED는 200Å 내지 1500Å의 활성층 두께의 범위에 걸쳐서 개선된 성능을 증명하고 있다. 유사하게, 600-620 nm의 파장 범위에서 방출하는 LED는 활성층 두께가 500-2500Å의 범위에 있을 때 최적의 외부 양자 효율을 가짐을 증명하는 데이터가 존재한다.

더 얇은 활성층이 갖는 하나의 문제는 내부 양자 효율이 한정층에서의 도핑 레벨의 변화에 더 민감하게 된다는 것이며, 이것은 제조 수율을 감소시키고, 따라서 LED의 비용을 증가시킨다. AlGaInP LED의 일 실시예에서, 상부 한정층은 성장 동안 Zn 또는 Mg와 같은 p형 도펀트로 도핑된다. 웨이퍼가 후속 고온 처리 단계를 겪음에 따라, p형 도펀트는 상부 한정층으로부터 확산한다. 내부 양자 효율은 p-n 접합이 활성층과 n형 하부 한정층 사이의 인터페이스에 정밀하게 위치될 때 가장 높는데, 그 이유는 헤테로 접합은 p-n 접합이 p형 활성층 내로 주입할 전자의 수를 증가시키기 때문이다. 성장 및 후속 처리 동안 도펀트의 재분배는 p-n 접합이 최적의 위치로 되지 못하게 할 수 있다.

활성층이 얇고, 인접한 한정층이 도핑될 때, 한정층에서 초기 도펀트 농도의 작은 변화 때문에 p-n 접합은 잘못 배치될 가능성이 더 많다. 예를 들면, 상부 한정층에서 도펀트 원자 농도의 20% 변화량에 응답하여, 1000Å 두꺼운 활성층을 갖는 LED의 외부 양자 효율의 변화량의 7배가 관찰되었다. 상기 감도는 역전층의 사용에 의해 감소된다. 이들은 활성층과 한정층에 삽입되는 비의도적으로 도핑된 층이며, 성장 또는 처리 동안 한정층으로부터 도펀트 원자가 그 안으로 확산한다. 이들 층의 두께는 전체 소자 제조 공정의 끝에서 하부-한정층/활성층 헤테로 접합에 상부 역전층만을 갖는 소자의 경우에 대해 p-n 접합이 위치되도록 선택된다. 하부 역전층을 갖는 소자의 경우에 대해, p-n 접합의 최적 위치는 하부-역전층/활성층 헤테로 접합부와 하부 한정층/하부 역전층 헤테로 접합부 사이이다. 공정 단계의 온도 및 내구성은 물론 소자의 다른 층

을 통한 도펀트의 확산 계수는 역전층의 필요한 두께를 결정할 것이다. 더욱이, 역전층은 활성층에 의해 방출된 광에 투광성인 다른 반도체 합금 또는 화합물의 복수 층으로 형성될 수 있다. 역전층은 또한 합금의 화합물이 공간에 따라 변할 수 있는데, 예컨대 선형적으로 기울어지거나 포물선으로 기울어진다.

도 9a는 얇은 활성층(12)과 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 한정층(14A, 14B)을 갖는 LED(10A)의 구조를 도시한다. 이 소자에서, 상부 한정층(14B)에 너무 많은 p형 도펀트가 존재한다면, 그것은 n형 하부 한정층으로 확산하여, p-n 접합의 위치가 잘못 배치될 것이다. 도 9b는 얇은 활성층(12), AlGaInP 상부 역전층(16) 및 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 한정층(14A, 14B)을 갖는 LED(10B)를 도시한다. 상부 역전층(16)은 도핑되지 않았다. 윈도우 층(18)의 성장 동안, p형 도펀트가 상부 한정층(14B), 상부 역전층(16) 및 활성층(12)을 통해 확산한다. 상부 역전층(16) 또는 선택적 하부 역전층의 두께는 모든 고온 처리 단계가 완료된 후, p-n 접합이 적절하게 위치될 가능성을 최대화하도록 선택된다. 비록 이들 도면이 하부 역전층을 명확하게 도시하지는 못하지만, 메모리 효과 또는 n형 도펀트의 확산을 수용하는데 사용될 수 있다.

일실시예에서, LED가 겪고 있는 고온 처리 단계는 p형 도펀트로 하여금 p형 상부 한정층으로부터 5000\AA 내지 $10,000\text{\AA}$ 사이에서 확산하게 한다. 결국, 얇은 확산층 LED는 최적으로 5000\AA 내지 $10,000\text{\AA}$ 사이, 바람직하게는 7500\AA 의 활성층 및 상부 역전층의 총 두께를 가질 수 있다. 2000\AA 두꺼운 활성층과 5500\AA 두꺼운 상부 역전층을 갖는 590 nm 방출 LED는 우수한 성능을 제공하는 것이 알려졌다. 630nm LED에 대해, 최적의 소자는 7000\AA 두꺼운 역전층을 갖는 500\AA 두꺼운 활성층을 가질 수 있다. 이들 소자의 외부 양자 효율은 상부 한정층의 도핑 레벨의 20% 변화에 응답하여, 5% 이상 변하는 것이 관찰되지 않았다. 이것은 제조 공정의 수율을 개선하는 역전층의 효율성을 나타낸다.

역전층이 LED에 사용될 때, 이러한 층의 합성물은 활성 영역에 인접하기 때문에, 내부 양자 효율에 영향을 미칠 것이다. 투명 기판, 기판 상에 형성된 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 하부 한정층, 하부 한정층에 형성된 $(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 2000\AA 두꺼운 활성층, 활성층에 형성된 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 5500\AA 두꺼운 상부 역전층, 상부 역전층에 형성된 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 상부 한정층, 및 윈도우 층을 포함하는 바람직한 LED의 외부 양자 효율은 5mA 에서 18.4%의 외부 양자 효율을 갖는다. 하부의 LED는 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층을 포함하고, 그 밖의 것은 동일하다. 이 LED의 외부 양자 효율은 5mA 에서 16.7% 이고, 이것은 바람직한 LED의 것보다 10% 더 낮다. 게다가, 측정이 LED 상에서 이루어졌는데, 상부 역전층은 $(\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 및 $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된다. 이들 경우 중 어느 것도, LED의 외부 양자 효율이 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층을 갖는 LED의 효율보다 더 큰 경우는 없다. 따라서, 바람직한 LED는 AlGaInP 의 특정 합성물로 형성된 상부 역전층을 갖는다. 역전층의 합성물은 소자의 내부 양자 효율을 개선시키는데, 그 이유는 활성층으로부터 누설 전류의 양을 감소시키기 때문이다. 이러한 누설 전류 감소는 역전층에서 비-방사 재결합의 낮은 비율에 의해 부분적으로 발생된다.

누설 전류에 영향을 미치는 또 다른 인자는 활성 영역 및 상부 역전층의 상대적인 도핑 레벨이다. 누설 전류는 상부 역전층이 보다 대량으로 도핑되는 경우 적어질 것이다. $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층을 갖는 LED에 있어서, 상부 역전층의 도핑 레벨은 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층보다 더 낮다. 이것은 역전층으로부터 활성층으로, 고온 처리 단계 동안, p형 도펀트의 확산 및 축적에 의해 발생된다. $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 에너지 갭은 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 에너지 갭보다 작으며, 이것은 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 역전에서 더 높은 도핑 레벨을 초래한다. 그러므로, $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 는 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 역전보다 더 바람직하다.

$(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층을 갖는 LED의 우수한 캐리어 제한은 또한 그 온도가 변할 때 그 내부 양자 효율을 유지하도록 LED의 능력을 향상시킨다. 590nm 을 방출하는 전형적인 AlGaInP LED에서, 내부 양자 효율은 LED의 온도에서 증가하는 섭씨 온도 당 대략 1-2%를 감소시킨다. 효율이 감소하는 비율은 활성층 합금 합성물에 의존하고, 그 비율은 더 긴 파장 LED에 대해 감소한다. $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층을 포함하는 AlGaInP LED의 내부 양자 효율은 더 높은 Al 몰 분율(mole fraction)을 갖는 합금으로 형성된 역전의 LED와 비교해 볼 때, 온도가 급속히 증가함에 따라 감소하지 않는다. $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 하부 한정층, 상기 하부 한정층 상의 $(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 2000\AA 두꺼운 활성층, 및 활성층 상의 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층을 갖는, 투명 기판 상에 형성된 LED는 $-1.3\%/^{\circ}\text{C}$ 의 내부 양자 효율의 감소를 나타내고, $(\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층을 제외하고는, $-1.4\%/^{\circ}\text{C}$ 의 감소를 나타냈다.

Nisitani 등에 의한, 미국 특허 제 5,732,098 호에서, 활성층과 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 한정층에 삽입되는 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 층을 갖는 AlGaInP LED를 개시하는데, 삽입층의 에너지-갭은 한정층의 에너지 갭보다 더 작거나, 삽입층의 알루미늄 몰 분율이 더 작다. 그러나, 활성층에서의 전자 제한 또는 소자의 다른 성능 특성을 향상시킬 목적을 위해, 역전층에서의 AlGaInP 합성물은 한정층 또는 활성층에 비-격자 부합(non-lattice-matched)되도록 선택되고, 한정층보다 더 넓은 에너지 갭을 갖거나 상부 한정층보다 더 높은 Al 몰 분율을 가질 수 있다. $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 하부 한정층, 하부 한정층 상에 형성된

$(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 2000Å 두꺼운 활성층, 활성층 상에 형성된 $\text{Al}_{0.615}\text{In}_{0.385}\text{P}$ 의 500Å 두꺼운 제 1 역전층, 제 1 역전층 상의 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 5000Å 제 2 역전층, 및 제 2 역전층 상의 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 한정층을 갖는 투명 기판 AlGaInP LED는 LED보다 10% 더 큰 외부 양자 효율을 갖는데, 제 1 역전층은 존재하지 않고, 제 2 역전층은 5500Å의 두께를 가지며, 그 밖의 것은 동일하다. $\text{Al}_{0.615}\text{In}_{0.385}\text{P}$ 로 형성된 제 1 역전층은 내부 양자 효율이 더 높아지도록 하는데, 그 이유는 상부 한정층 및 제 2 역전층보다 더 넓은 밴드-갭을 가져서, 활성층으로부터 더 적은 누설 전류를 초래하기 때문이다.

활성층의 내부 양자 효율에 영향을 미치는 다른 파라미터는 도핑 레벨이다. 방사 재결합 비율은 전자 및 홀 밀도의 곱에 비례한다. 한정층은 전자 및 홀 밀도를 활성층에서 증가시킴으로써 LED의 효율을 증가시킨다. 또한, 밀도는 활성층에 보다 많은 도펀트 원자를 결합시킴으로써 증가된다. 도 10은 활성층에서의 p형 도핑 레벨이 변화됨에 따라, 2000Å-두꺼운 활성층과 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 상부 역전층을 갖는 590nm LED의 외부 양자 효율을 도시한다. 이 도면은, 도핑 레벨이

10^{17} cm^{-3} 을 초과할 때 외부 양자 효율이 개선되고, 도핑 레벨이 증가함에 따라 증가하는 경향을 도시한다. 어떤 농도(도펀트 원자에 따라, 대략 10^{19} cm^{-3}) 이상에서, 도펀트 원자의 큰 농도는 LED의 내부 양자 효율을 감소시키는 위치 어긋남 또는 다른 결점을 발생시킨다. 그러므로, 바람직한 LED는 10^{17} cm^{-3} 보다 크고 10^{19} cm^{-3} 보다 작은 농도로 도핑된 활성층을 갖는다.

특히, 단파장 LED에 대한 내부 양자 효율은 활성층을, 투명 AlGaInP 합금의 다수층 사이에 AlGaInP의 다수(>5)의 얇은 층을 사용함으로써 형성된 다중-양자-웰 활성 영역으로 대체함으로써 개선될 수 있다. 양자 웰을 형성하기 위하여, AlGaInP 활성층의 두께는 AlGaInP에 전자와 함수의 파장(대략 200Å)보다 더 적어야만 한다. 높은-볼륨 제조 환경에서 다수 양자 웰 활성층에 대한 균일한 합성물 및 두께를 유지하기가 어렵기 때문에, 더 두꺼운 웰의 사용이 바람직하다. 더 두꺼운 웰은 감소된 방출 파장과 같은 양자 제한 효과를 나타내지 못한다. 다수의 더 두꺼운 웰의 사용은 더 큰 두께의 단일 활성층과 비교해 볼 때, 활성 영역의 내부 양자 효율을 증가시키는데, 그 이유는 웰의 캐리어 밀도가 더 높아서, 더 높은 방사 재결합 비율을 초래하기 때문이다. 동시에, (수학적 3에 의해 계산된) 활성 영역의 흡광도는 0.2 미만의 요건을 만족시켜야 한다.

도 11은 LED내 다수-웰 활성 영역을 개략적으로 도시한다. 이 도면은 활성 영역, $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 상부 역전층, 및 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 한정층을 갖는 LED를 도시한다. 활성 영역에서의 활성층들 사이에 위치되는 배리어층은 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성되는데, 여기서 x는 0.55-1.0 이다. 배리어층은 격자가 부합하거나 또한 격자가 부합되지 않은 AlGaInP 또는 AlGaAs와 같은, 활성층에 의해 방출되는 광에 대해 투광성인 임의의 반도체 재료로 형성될 수 있다. 층(웰 및 배리어)의 합성물 및 두께는 LED에 대한 외부 양자 효율을 최대화하도록 선택되고, 최적값이 웰의 다른 합금 합성물(및 따라서 방출 파장)에 대해 상이한 것으로 기대된다. 도 12는 3개의 상이한 LED의 외부 양자 효율을 전류의 함수로서 도시한다(L-I 곡선). 곡선(a)은 7500Å 두꺼운 활성층 및 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 한정층을 갖는 590 nm LED에 대한 L-I 곡선이다. 곡선(b)은 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 2000Å 및 5500Å 두꺼운 상부 역전층인 활성층과 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 로 형성된 한정층을 갖는 또 다른 590 nm LED에 대한 L-I 곡선이다. 곡선(c)은 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 500Å 배리어층이 있는 각각의 활성층 사이에 삽입되고, 4개의 500Å-두꺼운 활성층을 포함하는 활성 영역을 갖는 590 nm LED에 대한 L-I 곡선이다. LED는 또한 4000Å-두꺼운 $(\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 상부 역전층 및 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 한정층을 포함한다. LED가 20 mA에서 구동될 때, 곡선(a)에 해당하는 소자는 4.5%의 외부 양자 효율을 갖고, 곡선(b)에 해당하는 소자는 5.8%의 외부 양자 효율을 갖고, 곡선(c)에 해당하는 소자는 7.8%의 외부 양자 효율을 갖는다. MW 활성층의 "웰"은 양자-제한 효과(확대된 유효 에너지 갭과 같은)를 야기할 만큼 얇지는 않기 때문에, 이들 LED 모두의 방출 파장은 유사하다. 이전에 기술되고 도 7 및 도 8에 도시된 바와 같이, 상이한 파장에 대한 활성층 두께를 갖는 외부 양자 효율에 대해 동일한 경향이 관찰된다. MQW 구조는 몇 개의 발광층을 포함하기 때문에, 활성층 두께는 다수 웰 경우에 발광층 모두의 두께의 합이다. 광학적으로 투명한 배리어의 두께는 이러한 총 합계에 포함되지 않는다.

내부 양자 효율은 웰에서 p형 도펀트 원자의 증진된 결합으로 인해 부분적으로 개선된다. 이것은 웰에서 홀 농도를 증가시키고, 따라서 방사 재결합 비율을 증가시키고, 이것은 내부 양자 효율을 증가시킨다. 웰에 도펀트 농도의 3배 증가는 곡선(c)에 해당하는 소자의 2차 이온 질량 분석기에 의해 관찰되었다. LED가 고온 처리 단계를 겪을 때, 도펀트 원자는 배리어로부터 웰로 확산한다. 도펀트 원자는 웰에 모이는데, 그 이유는 원자는 배리어를 형성하는 넓은-갭 AlGaInP 합금에서보다 웰을 형성하는 좁은-갭 AlGaInP 합금에서 더 잘 용해되기 때문이다. 개선된 내부 양자 효율에 대한 다른 이유는 다수 전하 캐리어(전자 또는 홀)가 넓은-에너지-갭 배리어층으로부터 좁은-갭 웰로 확산하는 경향이 있다. 이것은 방사 재결합 비율을 더 증가시킨다.

동작 동안 외부 양자 효율을 유지하는 LED의 능력은 중요한 성능 파라미터이다. 상부 역전층의 합성물은 LED의 신뢰성에 영향을 미친다. 도 13은 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 의 여러 합성물로 형성된 2000Å 두꺼운 활성층 및 5500Å 두꺼운 상부 역전층을 갖는 590nm 방출 LED에 대한 동작 동안 외부 양자 효율의 저하를 도시한다. 이 도면은 상부 역전층이 하부-Al-함량 AlGaInP로 형성될 때, 외부 양자 효율은 시간에 따라 덜 저하하는 것을 도시한다. $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P$ 상부 역전층을 갖는 LED의 신뢰도는 $(Al_{0.65}Ga_{0.35})_{0.5}In_{0.5}P$ 상부 역전층의 신뢰도보다 더 우수하지만, 상부 역전층이 $(Al_{0.65}Ga_{0.35})_{0.5}In_{0.5}P$ 로 형성될 때 외부 양자 효율의 상술한 장점 때문에, 이 합성물이 선호된다. 바꾸어 말하면, 연장된 동작 이후, $(Al_{0.65}Ga_{0.35})_{0.5}In_{0.5}P$ 역전층을 갖는 LED의 나머지 외부 양자 효율은 $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P$ 역전층을 갖는 LED의 외부 양자 효율보다 더 높다.

AlGaInP LED의 신뢰도를 개선시키기 위한 다른 기술은 Stockman 등에 의해 영국 특허 출원 2,301,934A에 기술된 바와 같이, 활성 영역에 인접한 층들에 산소를 도핑하는 것이다. Stockman 등은 산소 또는 다른 불순물이 전자 및 홀의 수명을 감소시키는 결합의 형성 또는 전달을 방지함으로써 LED의 신뢰도를 향상시키는 것으로 개시하고 있다. 활성층에 인접한 층들은 산소로 도핑되어야 하는데, 그 이유는 누설 전류가 이들 층에서 가장 높고, 이들 층에서의 결합의 형성이 누설 전류를 증가시키기 때문이다. 활성층의 말단에 위치된 층들은 더 적은 누설 전류를 가져서, 이들 층에의 산소 도핑은 LED의 신뢰도를 향상시키는 것이 기대되지 않았다.

도 14는 2000Å 두꺼운 활성층 및 5500Å 두꺼운 $(Al_{0.65}Ga_{0.35})_{0.5}In_{0.5}P$ 상부 역전층을 갖는 590nm 방출 LED에 대해 연장된 동작 이후 외부 양자 효율의 저하를 도시한다. 곡선(a)은 임의의 산소 도펀트를 함유하지 않는 소자를 도시한다. 곡선(b)은 상부 한정층에만 산소를 함유한 소자를 도시한다. 곡선(c)은 상부 한정층 및 삽입 상부 역전층 모두에 산소를 함유한 소자를 도시한다. 연장된 동작 이후, LED의 나머지 외부 양자 효율은 가장 가까운 상부 역전층이 산소로 도핑이 되었던지의 여부에 관계없이, 산소가 말단 상부 한정층에 존재할 때 가장 높다. 역전층이 상이한 반도체 재료의 복수 층으로 형성된다면, 활성층의 이들 말단 층의 어느 것이나 산소로 도핑될 것이며, LED의 신뢰도가 향상될 것이라는 것은 당업자에게 자명하다.

이들 소자의 외부 양자 효율을 비교해 볼 때, (스트레스 이전의) 효율은 어떠한 산소도 사용되지 않았을 때 가장 높고, 상부 한정층 및 상부 역전층 모두에 산소가 존재할 때 가장 낮다는 것이 알려졌다. 게다가, 상부 한정층에 상이한 레벨의 산소 도핑의 효과를 측정하면서, (제 2차 이온 질량 분석기에 의해 측정된) 산소 농도가 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 미만일 때, LED의 신뢰도는 불량했다는 것이 알려졌다. 산소 농도가 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 를 초과했을 때, LED의 내부 양자 효율은 불량했다. 그러므로, 상부 한정층에서의 산소 도펀트 농도의 바람직한 범위는 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 내지 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이다.

당업자라면, 이들 원리 및 개시 내용이 다른 재료 시스템(예컨대 AlGaAs 또는 InGaN)으로 제조되는 LED 뿐만 아니라, 활성 영역과 기판 사이에 삽입하는 미러층을 갖는 흡수 기관 LED를 포함하는 많은 LED 소자 구조로 확장될 수 있음을 인식할 것이다.

발명의 효과

본 발명의 발광 소자에 의하면, 가능한 한 얇은 흡수 소자 층을 생성함으로써 발광 소자의 추출 효율이 향상되고, 내부 양자 효율이 향상된다.

도면의 간단한 설명

도 1은 종래 기술의 투명 기관 발광 소자를 도시한 도면,

도 2는 두 개의 AS-LED의 내부 양자 효율을 도시한 도면,

도 3은 도 1에 도시된 소자를 통과하는 광을 도시한 도면,

도 4는 TS LED에 대한 활성층 두께에 대한 양자 효율을 도시한 도면,

도 5는 AlGaInP 합금의 흡수 계수를 광자 에너지의 함수로 도시한 도면,

도 6은 몇 가지 상이한 TS LED 웨이퍼를 통해 전달되는 광의 퍼센트를 도시한 도면,

도 7은 두께가 상이한 활성층을 갖는 590nm TS-LED의 상대적인 외부 양자 효율을 도시한 도면,

도 8은 두께가 상이한 활성층을 갖는 630nm TS-LED의 상대적인 외부 양자 효율을 도시한 도면,

도 9a 및 도 9b는 얇은 활성층과 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 의 한정층을 갖는 LED와, 역전층을 갖는 LED를 개략적으로 도시한 도면,

도 10은 590nm 광을 방출하는 얇은 활성층과, 역전층과, 활성층에서 가변 p형 도핑 레벨을 갖는 외부 양자 효율 LED를 도시한 도면,

도 11은 다중 웰 활성 영역 소자(multiple well active region device)의 특정한 실시예를 개략적으로 표시한 도면,

도 12는 3개의 LED의 외부 양자 효율을 전류 A의 함수로서 도시하는데, 즉 곡선(a)은 종래 기술의 LED에 대응하고, 곡선(b)은 2000Å의 두꺼운 활성층을 갖는 LED에 대응하고, 곡선(c)은 4개의 500Å의 발광층으로 구성된 다중 웰 활성층을 갖는 LED에 대응하는 외부 양자 효율을 도시한 도면,

도 13은 연장된 동작 이후, 3개의 상이한 590nm LED의 외부 양자 효율의 저하를 도시한 도면,

도 14는 연장된 동작 이후, 얇은 활성층 및 역전층을 포함하는 LED의 외부 양자 효율의 저하를 도시한 도면.

도면의 주요 부분에 대한 부호의 설명

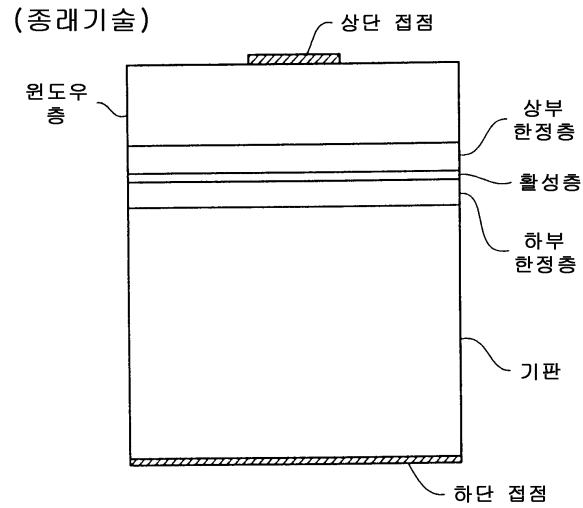
12 : 활성 영역 16 : 역전층

14A : 하부 한정층 14B : 상부 한정층

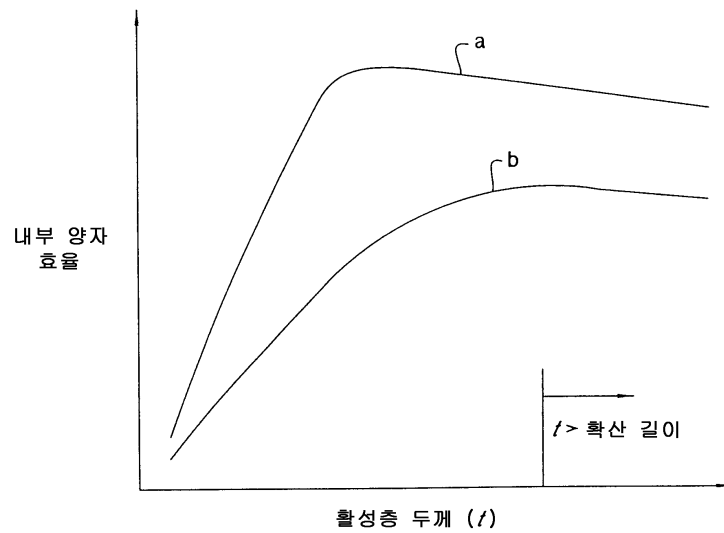
18 : 윈도우 층

도면

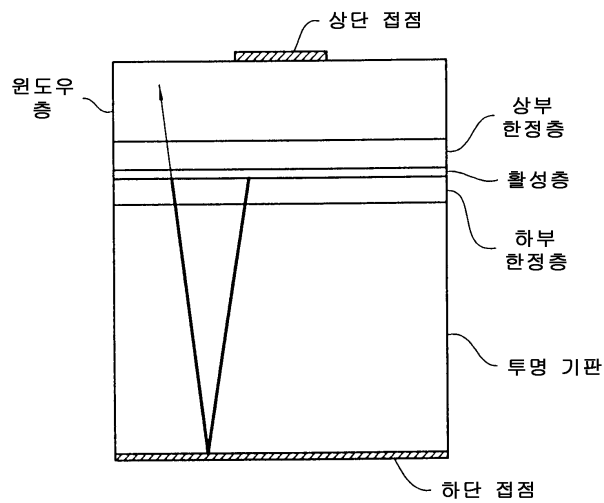
도면1



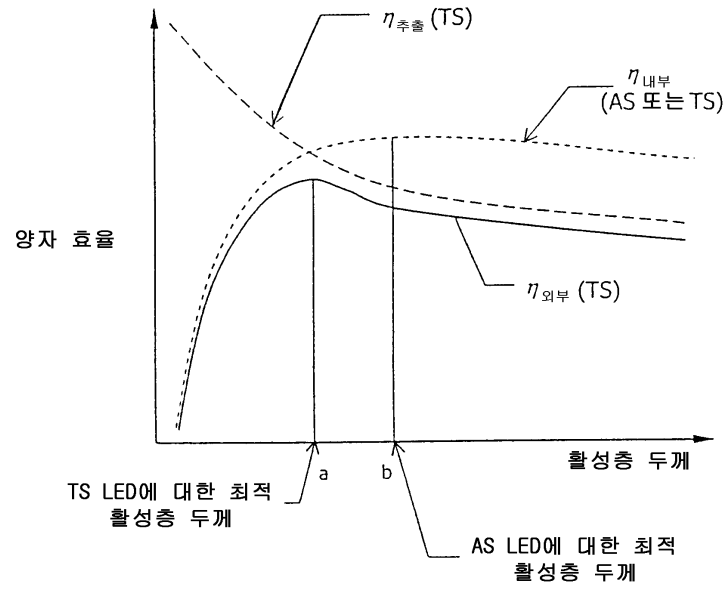
도면2



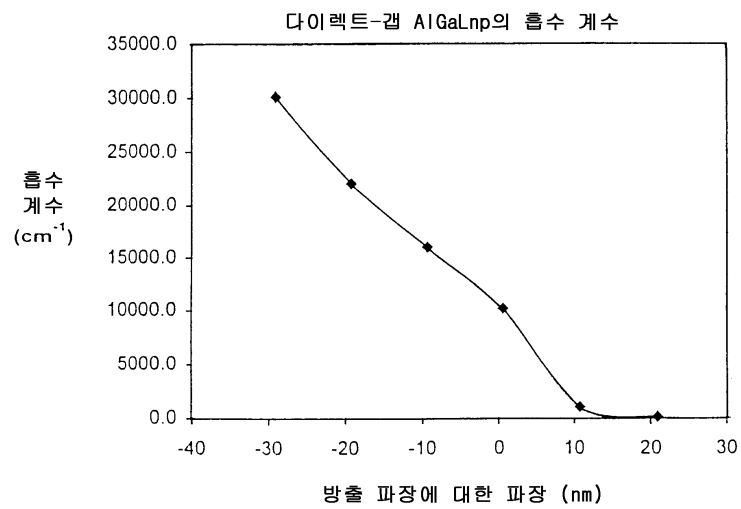
도면3



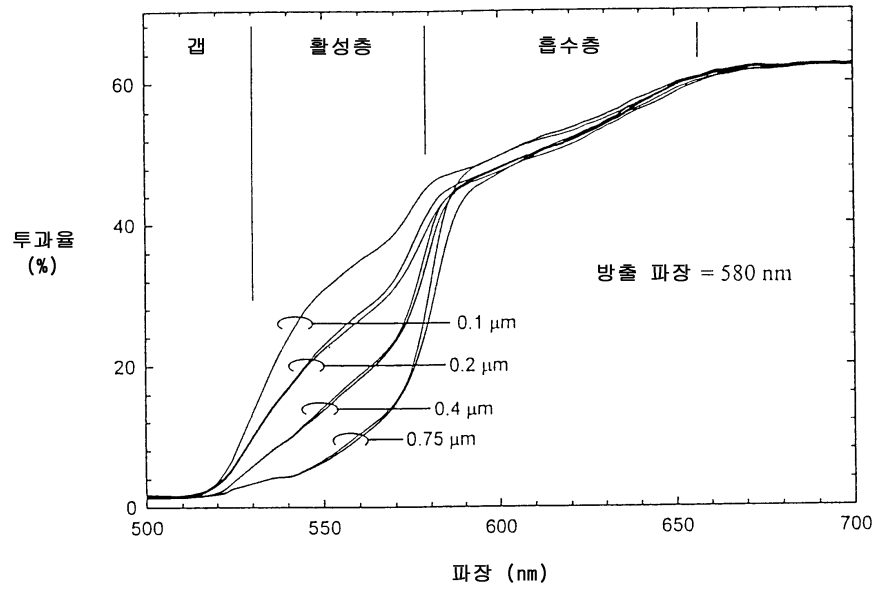
도면4



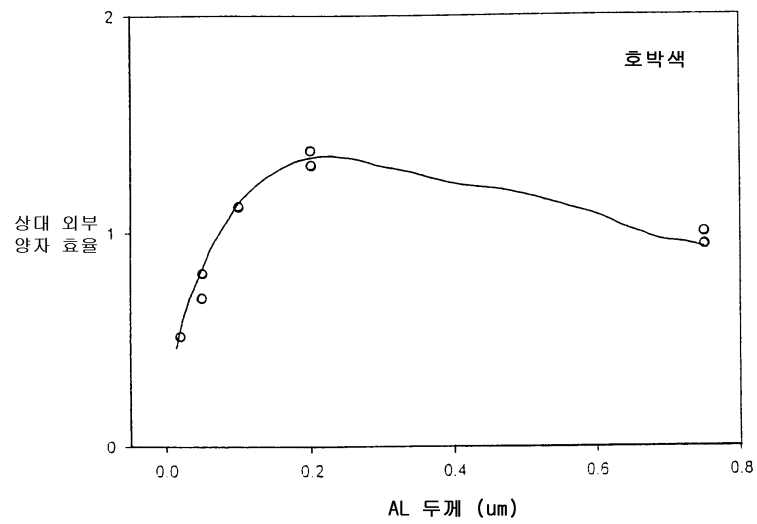
도면5



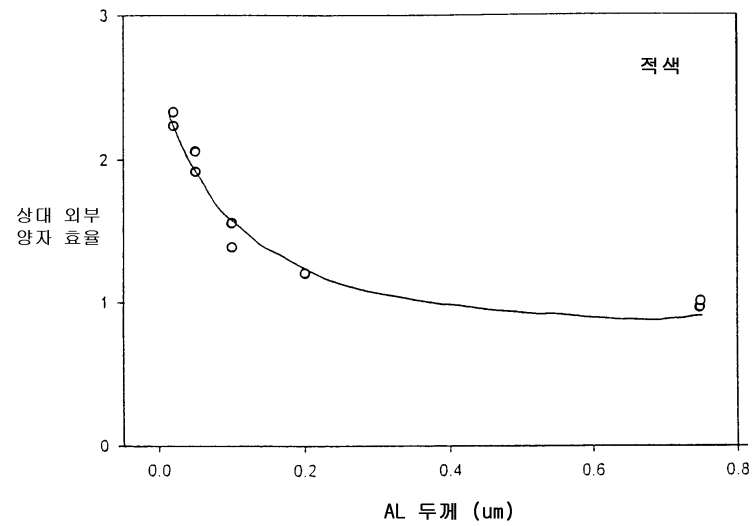
도면6



도면7

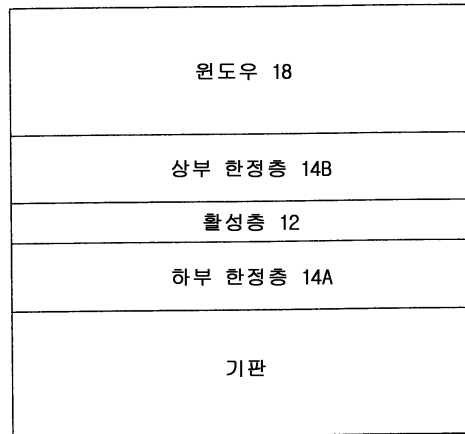


도면8



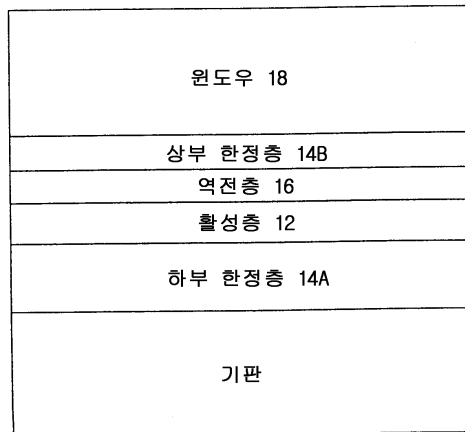
도면9a

10A

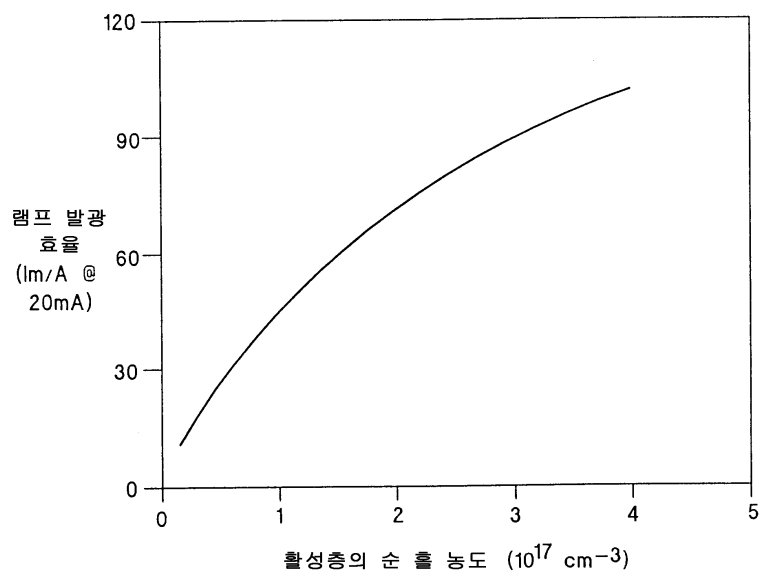


도면9b

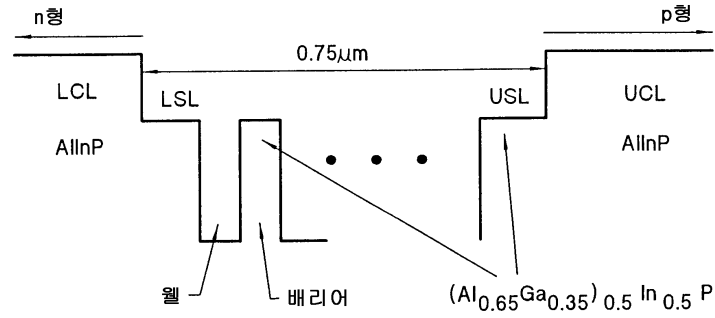
10B



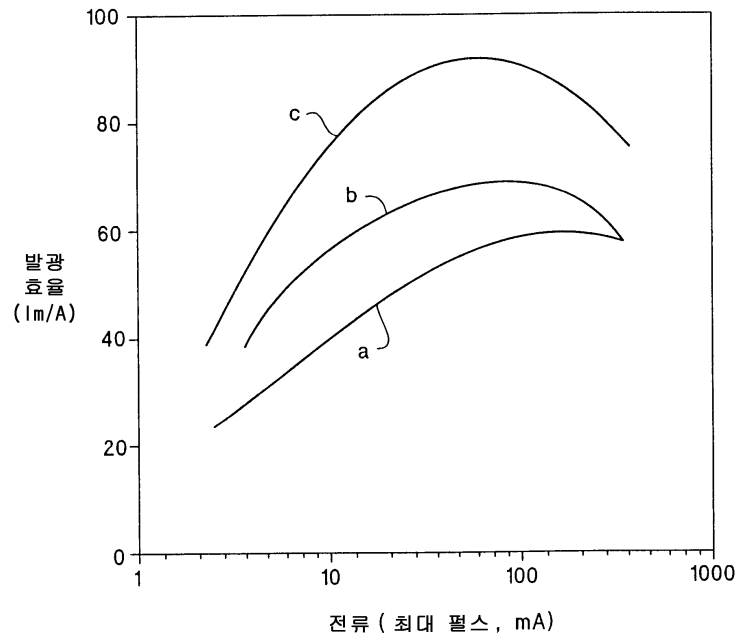
도면10



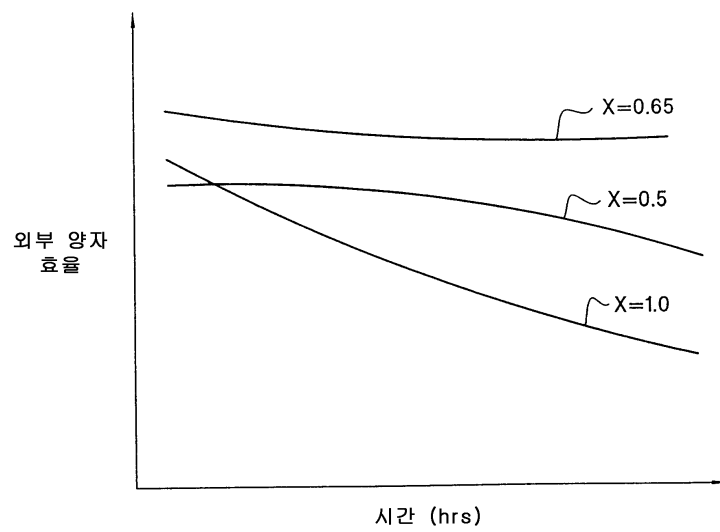
도면11



도면12



도면13



도면14

