



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0063221
(43) 공개일자 2020년06월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 33/06 (2010.01) H01L 33/28 (2010.01)
H01L 51/50 (2006.01) B82Y 20/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
H01L 33/06 (2013.01)
H01L 33/28 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-7013148
(22) 출원일자(국제) 2018년10월15일
심사청구일자 없음
(85) 번역문제출일자 2020년05월07일
(86) 국제출원번호 PCT/CA2018/051297
(87) 국제공개번호 WO 2019/071362
국제공개일자 2019년04월18일
(30) 우선권주장
62/572,056 2017년10월13일 미국(US)

(71) 출원인
10644137 캐나다 인코포레이티드
캐나다, 알베르타 티3엠 0제이6, 캘거리, 30 어텀
서클 에스이
(72) 발명자
라마티 모하마드
캐나다, 알베르타 티2지 4에이4, 캘거리,
4240-118 애비뉴 에스이 내
파레바니 마지드 (본명: 마지드 파레바나인자드)
캐나다, 알베르타 티3지 5제트7, 캘거리, 177 록
키스프링 티씨 엔더블유
서비스 샘
캐나다, 알베르타 티3엠 0제이6, 캘거리, 30 어텀
서클 에스이
(74) 대리인
특허법인한얼

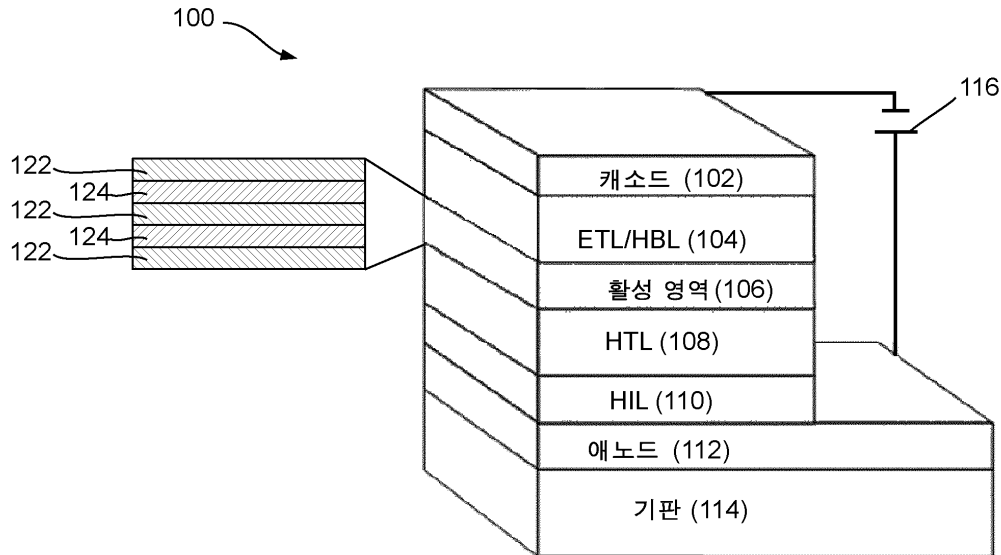
전체 청구항 수 : 총 36 항

(54) 발명의 명칭 다층 양자점 LED 및 이를 제조하는 방법

(57) 요약

양자점(QD) 발광 다이오드(QLED) 디바이스는 다층 활성 방출 영역을 갖는다. 다층 활성 방출 영역은 $(n - 1)$ 개의 QB 층들과 인터리브된 n 개의 QD 층들을 가지며, 여기에서 n 은 1보다 큰 양의 정수이고 그 결과 각각의 QB 층은 2개의 인접한 QD 층들 사이에 샌드위치된다.

대표도 - 도2b



(52) CPC특허분류

H01L 51/502 (2013.01)

B82Y 20/00 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

양자점(quantum-dot; QD) 발광 다이오드(QLED) 디바이스로서,

활성 방출 영역을 포함하며, 상기 활성 방출 영역은 $(n - 1)$ 개의 양자-장벽(quantum-barrier; QB) 층들과 인터리브(interleave)된 n 개의 QD 층들을 포함하고, n 은 1보다 큰 양의 정수이며 그 결과 각각의 QB 층은 2개의 인접한 QD 층들 사이에 샌드위치되는, QLED 디바이스.

청구항 2

청구항 1에 있어서, 각각의 QD 층은 카드뮴 셀레나이드/아연 설파이드(CdSe/ZnS)를 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 3

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 각각의 QB 층은 폴리(메틸 메타크릴레이트)(PMMA)를 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 4

청구항 1 내지 청구항 3 중 어느 한 항에 있어서, $n = 3$ 인, QLED 디바이스.

청구항 5

청구항 1 내지 청구항 3 중 어느 한 항에 있어서, $n = 5$ 인, QLED 디바이스.

청구항 6

청구항 1 내지 청구항 3 중 어느 한 항에 있어서, $2 \leq n \leq 6$ 인, QLED 디바이스.

청구항 7

청구항 1 내지 청구항 6 중 어느 한 항에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 각각의 QB 층의 두께의 약 8 배인, QLED 디바이스.

청구항 8

청구항 1 내지 청구항 6 중 어느 한 항에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 약 15 nm 내지 35 nm이며, 각각의 QB 층의 두께는 약 1 nm 내지 5 nm인, QLED 디바이스.

청구항 9

청구항 1 내지 청구항 6 중 어느 한 항에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 약 15 nm 내지 35 nm이며, 각각의 QB 층의 두께는 약 2 nm 내지 4 nm인, QLED 디바이스.

청구항 10

청구항 1 내지 청구항 9 중 어느 한 항에 있어서,

전자-수송 층(electron-transport layer; ETL); 및

홀-주입 층(hole-injection layer; HIL)을 더 포함하며,

상기 ETL 및 HIL은 그들 사이에 상기 활성 방출 영역을 샌드위치하는, QLED 디바이스.

청구항 11

청구항 10에 있어서, 상기 ETL는 합성 ZnO 나노결정들을 포함하며, 상기 HIL는 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜)

폴리스티렌 설포네이트(PEDOT:PSS)를 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 12

청구항 10 또는 청구항 11에 있어서,

상기 활성 방출 영역과 상기 HIL 사이에 샌드위치되는 홀-수송 층(hole-transport layer; HTL)을 더 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 13

청구항 12에 있어서, 상기 HTL은 폴리(9- 비닐카바졸)(PVK)을 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 14

청구항 11 내지 청구항 13 중 어느 한 항에 있어서,

상기 ETL에 결합된 캐소드 층;

상기 HIL에 결합된 애노드 층; 및

상기 애노드 층에 결합된 투명 기판을 더 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 15

청구항 14에 있어서, 상기 캐소드 층은 은을 포함하며, 상기 애노드 층은 인듐 주석 산화물(ITO)을 포함하는 투명 층인, QLED 디바이스.

청구항 16

청구항 1 내지 청구항 15 중 어느 한 항에 있어서, 각각의 QB 층은 각각의 QD 층보다 더 높은 전도성 밴드를 갖는, QLED 디바이스.

청구항 17

청구항 16에 있어서, 각각의 QB 층의 원자가 밴드에서의 에너지는 각각의 QD 층의 원자가 밴드에서의 에너지보다 더 높은, QLED 디바이스.

청구항 18

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 각각의 QB 층은 PVK, 4,4'-사이클로헥실리덴비스[N,N-비스(4-메틸페닐)벤젠아민](TAPC) 또는 폴리[N,N'-비스(4-부틸페닐)-N,N'-비스페닐벤지딘](폴리-TPD)을 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 19

함께 순차적으로 결합된 복수의 층들을 포함하는 양자점 발광 다이오드(QLED) 디바이스로서, 상기 복수의 층들은 제 1 측면으로부터 제 2 측면까지,

캐소드 층;

전자-수송 층(ETL);

활성 방출 영역;

홀-주입 층(HIL); 및

애노드 층을 포함하고,

상기 활성 방출 영역은 $(n - 1)$ 개의 양자-장벽(QB) 층들과 인터리브된 n 개의 양자점(QD) 층들을 포함하며, n 은 1보다 큰 양의 정수이고 그 결과 각각의 QB 층은 2개의 인접한 QD 층들 사이에 샌드위치되는, QLED 디바이스.

청구항 20

청구항 19에 있어서, 각각의 QD 층은 카드뮴 셀레나이드/아연 셀파이드(CdSe/ZnS)를 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 21

청구항 19 또는 청구항 20에 있어서, 각각의 QB 층은 폴리(메틸 메타크릴레이트)(PMMA)를 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 22

청구항 19 내지 청구항 21 중 어느 한 항에 있어서, $n = 3$ 인, QLED 디바이스.

청구항 23

청구항 19 내지 청구항 21 중 어느 한 항에 있어서, $n = 5$ 인, QLED 디바이스.

청구항 24

청구항 19 내지 청구항 21 중 어느 한 항에 있어서, $2 \leq n \leq 6$ 인, QLED 디바이스.

청구항 25

청구항 19 내지 청구항 24 중 어느 한 항에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 각각의 QB 층의 두께의 약 8 배인, QLED 디바이스.

청구항 26

청구항 19 내지 청구항 24 중 어느 한 항에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 약 15 nm 내지 35 nm이며, 각각의 QB 층의 두께는 약 1 nm 내지 5 nm인, QLED 디바이스.

청구항 27

청구항 19 내지 청구항 24 중 어느 한 항에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 약 15 nm 내지 35 nm이며, 각각의 QB 층의 두께는 약 2 nm 내지 4 nm인, QLED 디바이스.

청구항 28

청구항 19 내지 청구항 27 중 어느 한 항에 있어서, 상기 캐소드 층은 은을 포함하며, 상기 애노드 층은 인듐 주석 산화물(ITO)을 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 29

청구항 19 내지 청구항 28 중 어느 한 항에 있어서, 상기 ETL는 합성 ZnO 나노결정들을 포함하며, 상기 HIL는 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜) 폴리스티렌 설포네이트(PEDOT:PSS)를 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 30

청구항 19 내지 청구항 29 중 어느 한 항에 있어서,
상기 활성 방출 영역과 상기 HIL 사이에 샌드위치되는 홀-수송 층(HTL)을 더 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 31

청구항 30에 있어서, 상기 HTL은 폴리(9-비닐카바졸)(PVK)을 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 32

청구항 19 내지 청구항 31 중 어느 한 항에 있어서,
상기 제 2 측면 상의 상기 애노드에 결합된 투명 기판을 더 포함하는, QLED 디바이스.

청구항 33

청구항 31에 있어서, 상기 애노드 층은 상기 기판 상에 코팅된 투명 층이며, 상기 QLED 디바이스의 상기 애노드와 캐소드 사이에 전압이 인가될 때, 상기 QLED 디바이스는 상기 제 2 측면으로부터 광을 방출하는, QLED 디바이스.

이스.

청구항 34

청구항 19 내지 청구항 33 중 어느 한 항에 있어서, 각각의 QB 층은 각각의 QD 층보다 더 높은 전도성 밴드를 갖는, QLED 디바이스.

청구항 35

청구항 34에 있어서, 각각의 QB 층의 원자가 밴드에서의 에너지는 각각의 QD 층의 원자가 밴드에서의 에너지보다 더 높은, QLED 디바이스.

청구항 36

청구항 19 또는 청구항 20에 있어서, 각각의 QB 층은 PVK, 4,4'-사이클로헥실리덴비스[N,N'-비스(4-메틸페닐)벤젠아민](TAPC) 또는 폴리[N,N'-비스(4-부틸페닐)-N,N'-비스페닐벤지딘](폴리-TPD)을 포함하는, QLED 디바이스.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 관련 출원들에 대한 상호 참조

[0002] 본 출원은 2017년 10월 13일자로 출원된 미국 가특허 출원 일련번호 제62/572,056호의 이익을 주장하며, 이러한 출원의 개시내용은 그 전체가 본원에 참조로서 통합된다.

[0003] 기술분야

[0004] 본 개시는 전반적으로 양자점 발광 다이오드에 관한 것으로서, 더 구체적으로는, 복수의 인터리브(interleave)된 양자점 층들 및 양자-장벽 층들에 의해 형성된 높은 외부 양자 효율을 갖는 활성 방출 영역을 갖는 발광 다이오드 및 이를 제조하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0005] 반도체 나노입자들의 일 유형인 양자점(quantum dot; QD)들은 최근의 과학적 연구들의 대상이었다. QD들은 약 2 내지 10 나노미터(nm)들의 전형적인 직경들을 갖는 극도로 작은 나노결정 반도체 재료들이다. 벌크(bulk) 재료들과 비교하여, QD들은 높은 색 포화, 좁은 스펙트럼, 조정가능 방출 파장들, 내구성 및 간단한 제조 프로세스(참조문헌 [1] 내지 [10] 참조)와 같은 고유한 특성들을 가질 수 있으며, 그럼으로써 QD들을 디스플레이 디바이스들, 레이저들, 디지털 사이지니, 조명 또는 발광 디바이스들, 및 유사한 것과 같은 다양한 애플리케이션에 적절한 발광 다이오드(light-emitting diode; LED)들을 만들기 위한 유망한 재료로 만들 수 있다. 양자점 LED(Quantum-dot LED; QLED)들은 효율적인 전하 주입을 위해 설계된 그들의 디바이스 구조 및 전계 발광에 대한 그들의 높은 양자 수율에 기인하여 더 양호한 에너지 효율을 가질 수 있다. QLED들은 일반적으로 백열 전구들, 형광 전구들, 및 유기 LED들(organic LED; OLED)들과 같은 다른 유형들의 조명 디바이스들에 비하여 훨씬 더 긴 수명을 갖는다. 또한, 그것의 대량 생산이 이용가능하게 되면서 QLED의 비용이 또한 감소되었다.

[0006] QD들은 반도체들 내에서 양자 구속 효과들을 활용한다. 양자 구속 효과들은, 입자의 크기가, 엑시톤(exciton) 보어 반경으로도 알려진 전자-홀 쌍의 전자-홀 거리의 스케일에 있을 때 발생한다. QD에서, 결정들의 크기들은 엑시톤 보어 반경과 동일한 차수이다. 이러한 작은 크기들은, 결정들이, ("박스-내-입자(particle-in-a-box)" 상태로도 알려진) 무한 전위 우물 내의 입자의 에너지에 의해 설명될 수 있는 이산 에너지 레벨들에 있다는 것을 의미한다. QD의 에너지 레벨과 그것의 크기의 관계는, (3개의 치수들 모두에서 동일한 길이인) 구형 박스에 대한 밴드 갭 에너지인 식 (1)에서 설명될 수 있다.

$$E_p = \frac{p^2 \times h^2}{8 \times m \times L^2} = h\nu \quad (1)$$

[0008] 여기에서 $p = 1, 2, \dots$ 는 에너지 레벨 인덱스이며, E_p 는 p -번째 레벨에서의 에너지이고, h 는 플랑크 상수이며, m 은 포인트 전하의 유효 질량이고, L 은 입자의 반경이다. 식 (1)은, QD들 내의 여기(excitation)가 "박스-내입자"와 같이 거동하기 때문에 에너지 E_p 가 QD들의 크기 변동(즉, L 의 변동)에 따라 변화한다는 것을 보여준다.

또한, 식 (1)은, 광의 입자, 즉, 광자의 에너지가 플랑크 상수 h 의 계수와 함께 그것의 주파수 ν 에 비례한다는 것을 나타낸다. 따라서, QD들의 크기를 변화시키는 것은 상이한 파장들 및 결과적으로 상이한 색들을 생성할 수 있다.

- [0009] QD 솔루션들의 방출 스펙트럼들은, QD의 콜로이드성 합성 동안 달성되는 단분산성(monodispersity)의 정도에 따라 30 nm 내지 40 nm의 반치전폭(full width at half maximum; FWHM)을 보여준다. 더 작은 FWHM은 더 높은 색 순도를 야기하며, 이는 발광 애플리케이션들에서 중요하다. 또한, QD들은 백색 조명을 위해 사용될 수 있으며, 이는 그것의 색 온도 및 연색 평가 지수(color rendering index; CRI)에 의해 평가될 수 있다.
- [0010] 코어-셸 유형 복합 양자점들은 광 방출기들에 대해 매력적인 속성들을 나타낸다. 더 높은 밴드-갭 무기 재료들을 갖는 오버-코팅 나노결정자들(nanocrystallites)은 비-방사성 재결합 사이트들을 패시베이팅함으로써 광 발광 양자 수율들을 개선한다는 것이 보여 졌다. 카드뮴 셀레나이드/아연 설파이드(Cadmium Selenide/Zinc Sulfide; CdSe/ZnS) 양자점 구조체들은 높은 양자 수율(40% 내지 60%)을 나타내며, 이는 이것을 QLED들 내의 방출기들로서 좋은 후보로 만든다. 높은 양자 수율에 더하여, 코어-셸 CdSe/ZnS 입자들은 좁은 밴드 에지 발광을 가지며, 이는 가시 스펙트럼(470 내지 625 nm)의 대부분에 걸치는 것을 야기한다. ZnS 오버-코팅된 입자들은 유기적으로 패시베이팅된 점(dot)들보다 더 강건하며, 잠재적으로 광전자 디바이스 구조체들에 대하여 더 유용하다. QLED들과 같은 전계발광 디바이스들은 발광 디바이스들 내로 CdSe/ZnS 점들을 통합할 수 있다. 이는 제조 프로세스 동안 더 큰 안정성을 보여줄 수 있다.
- [0011] 이에 더하여, CdSe/ZnS는 표면 패시베이션에 기인하여 베어(bare) CdSe 양자점들에 비하여 훨씬 더 긴 수명을 갖는다. 요약하면, CdSe/ZnS는 그들의 높은 양자 수율에 기인하여 더 양호한 에너지 효율을 갖는다. 그들의 코어-셸 구조체는 더 긴 수명과 함께 효율적인 전하-주입을 위해 사용될 수 있다.
- [0012] 도 1은 전형적인 종래 기술의 QLED(10)의 구조체를 도시하는 개략도이다. 도시된 바와 같이, QLED(10)는 유리나 같은 기판(12), 인듐 주석 산화물(ITO)의 애노드(14), 약 50 nm의 두께를 갖는 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜) 폴리스티렌 설포네이트(즉, PEDOT:PSS)의 홀-주입 층(hole-injection layer; HIL)(16), 약 50 nm의 두께를 갖는 폴리(9-비닐카바졸(vinylcarbazole))(즉, PVK)의 홀-수송 층(hole-transport layer; HTL)(18), 활성 방출 영역(20), 약 45 내지 100 nm의 두께를 갖는 아연 산화물(ZnO)의 전자-수송 층/홀-차단 층(electron-transport layer/hole-blocking layer; ETL/HBL)(22), 및 약 100 nm의 두께를 갖는 은(Ag)의 캐소드(24)를 포함한다.
- [0013] 활성 방출 영역(20)은 하나의 두꺼운 QD 층과 동등한 하나 이상의 CdSe/ZnS 코어-셸 QD 층들을 포함한다. 예를 들어, 활성 방출 영역(20)은 전형적으로 약 1개 내지 6개의 CdSe/ZnS QD 층들에 대응하는 약 15 내지 90 nm의 두께를 갖는다.
- [0014] 전력 소스(26)가 QLED(10)에 전기장을 인가할 때, (HTL(18)을 통해) HIL(16) 및 ETL(22)은 각기 활성 방출 영역(20) 내로 홀들 및 전자들을 주입하며, 여기에서 주입된 홀들 및 전자들은 그것의 QD들 내에 캡처되고 광자들을 방출하기 위해 방사적으로 재결합된다. 따라서, 활성 방출 영역(20)이 또한 방출 층으로서 표현될 수 있다.
- [0015] 종래 기술의 QLED들(10)에 있어서, HTL(18)은, HTL(18)이 사용되지 않았던 경우에 달리 활성 방출 영역(20) 및 HIL(16)의 계면에서 발생할 수 있는 (광자 방출이 없는 희망되지 않는 재결합인) 홀들 및 전자들의 비-방사성 재결합을 방지하기 위해 사용된다.
- [0016] ITO는 그것의 높은 전도율 및 높은 투명도에 기인하여 애노드 접촉부로서 널리 이용된다. 전형적인 QLED들에 있어서, 알루미늄(Al)이 캐소드(24)로서 사용된다. Al이 공기 중에서 열화될 수 있고 QLED(10)의 효율을 감소시킬 수 있음에 따라, Ag가 캐소드 접촉부(24)에서 사용될 수 있다. QLED(10)의 광 추출 효율을 증가시키기 위하여 ITO가 또한 캐소드 접촉부(24)에서 사용될 수 있다.
- [0017] Ag 박막은 일반적으로 열 증발 기술들을 사용하여 증착된다. 그러나, 하부 층의 표면은 활성 방출 영역(20) 내에 결함들을 생성하고 증가된 누설 전류를 생성하는 스퍼터링 프로세스에 의해 생성되는 고-에너지 입자들과 충돌되며, 그럼으로써 활성 방출 영역의 감소된 효율 및 감소된 수명을 야기한다. 무기 ZnO 박막 층은 QD 층들을 층들로부터 보호하는 보호 층으로서 이용된다. 또한, ZnO는 QLED(10) 내에서 HBL(22)로서 역할하며, 활성 방출 영역(20)으로부터의 홀 누설 또는 오버플로우를 방지한다. 무기 ZnO 나노결정들은 또한 QD 밴드 갭에 비하여 그들의 높은 전자 이동도 및 매칭된 원자가(valance) 및 전도 에너지 레벨들에 기인하여 ETL로서 사용될 수 있다.
- [0018] ZnO의 매우 얇은 층들은, 스핀-코팅, 솔-겔, 스프레이-코팅 및 나노입자 증착과 같은 몇몇 증착 기술들을 사용하여 용이하게 구현된다. 예컨대 CdSe/ZnS QD 층들 사이의 활성 방출 영역(20) 내의 큰 결정 격자 불일치에 의

해 초래되는 높은 전위 밀도를 감소시키기 위하여 그리고 고-성능 QLED들(10)을 제조하기 위해 광-추출 효율을 증가시키기 위하여, 애즈-디포지티드 필름(as-deposited film)들은 일반적으로 결정질 구조를 최적화하기 위하여 일반적으로 적절한 온도(약 100℃)에서의 어닐링 프로세스를 필요로 한다. 애노드(14) 및 캐소드(24)를 제외한 모든 층들은 주변 공기 조건 하에서 스핀-코팅 방법에 의해 제조된다. CdSe/ZnS의 어레이는 스핀-코팅 프로세스에서 자기-조립에 의해 층별로 제조되며, 여기에서 용매 재료 내의 QD 용액이 기판 상으로 부어지고 그런 다음 용액을 균일하게 퍼지게 하기 위하여 회전하도록 설정된다. 에칭 단계에서, 층들의 상이한 격자 파라미터들에 의해 초래되는 전위 밀도들을 감소시키기 위하여 그리고 스핀-코팅 프로세스를 위해 요구되는 용매들을 기화시키기 위하여 열 처리가 사용된다.

- [0019] 일반적으로, QLED의 2개의 상이한 인접한 층들 사이에서 결정 격자들의 불일치(격자 불일치)에 의해 초래되는 전위들의 밀도 때문에 QLED의 설계에서 두꺼운 QD 층들을 사용하는 것은 QLED의 내부 효율을 감소시킨다. QLED 제조에서 초래되는 결함들은 비-방사성 재결합에 기인하여 QLED의 내부 효율을 감소시킨다. 전위와 같은 결함들이 존재하면, 일부 전자들이 활성 방출 영역(20) 내로 주입되는 것이 아니라 결함들로 끌어당겨질 수 있다. 결과적으로, 방사성 재결합의 양이 감소한다. 따라서, 결함들을 갖는 QLED의 제조를 방지하기 위하여, 층들의 두께는 광학 디바이스들에서 사용되는 반도체들에 대하여 약 50 nm와 같이 그 재료의 드 브로이 파장보다 더 작아야만 한다.
- [0020] QLED 구조체는 460 nm(청색) 내지 650 nm(적색)의 전체 가시 파장 범위에 걸쳐 그리고 보라색-청색(violet-blue) 스펙트럼의 대부분의 비가시 부분(350 내지 450 nm)에 걸쳐 튜닝될 수 있다. 디바이스 구조체 및 QD들 내의 화학적 조성을 조정함으로써 방출 파장들은 자외선(UV) 및 근적외선(NIR) 범위까지 연속적으로 확장되었다.
- [0021] 또한, QLED의 주요한 단점은 고-전류 밀도에서 효율 드롭(droop)을 초래하는 전자 누설이 알려져 있다. 효율 드롭에 대한 설명들 중 하나는 전자-누설 메커니즘에 의해 초래되며, 이는 저 전류들에서는 적은 영향을 갖지만 고 전류들에서는 상당히 커지게 된다.
- [0022] 따라서, QLED들의 주요한 단점은 OLED들에 비하여 그들의 더 낮은 효율이며, 이는 전자 누설 및 전하 밸런스(charge balance)에 기인한다(참조 문헌 [11] 내지 [14] 참조). 디바이스의 아키텍처에서 다양한 유형들의 무기 및 유기 재료들을 사용함으로써 이러한 장벽들을 조사하고 제거하기 위한 다수의 연구들이 수행되었다.
- [0023] Pan 등은, HTL에서 TAPC 및 PVK의 혼합 용액을 사용하여 홀 수송 층을 수정함으로써 26.2 cd/A의 전류 효율, 19.2 lm/W의 전력 효율, 및 6.2%의 외부 양자 효율이 달성될 수 있다는 것을 보여주었다(참조 문헌 [15] 참조).
- [0024] Dai 등은, 활성 층과 ZnO 사이에 폴리(메틸 메타크릴레이트)(즉, PMMA)를 추가하여 캐소드로부터의 전자 누설을 감소시킴으로써 외부 양자 효율이 15%에 이르기까지 극적으로 증가될 수 있다는 것을 보여주었다(참조 문헌 [16] 참조).
- [0025] Zhang 등은 구조체에서 홀 수송 층으로서 폴리[N,N'-비스(4-부틸페닐)-N,N'-비스페닐벤지딘](즉, 폴리-TPD)의 효과를 연구하였으며, QLED의 외부 양자 효율이 12%에 이르기까지 증가될 수 있다는 것을 보여주었다(참조 문헌 [17] 참조).
- [0026] Dong 등은 전자 주입 및 홀 차단 층들로서 세습 카보네이트 필름들을 사용하였으며, 5.8 V의 낮은 구동 전압을 가지고 1000 mA/cm²의 전류 밀도를 갖는 165,000 Cd/m²의 휘도를 보고하였다(참조 문헌 [18] 참조).
- [0027] Kim 등은 역전된 구조의 적색 CdSe/ZnS QLED에 대한 전자 주입 및 수송 층으로서 ZnO 나노입자들과 혼합된 폴리 에틸렌이민 에톡실레이티드(즉, PEIE)를 제안하였다(참조 문헌 [19] 참조). PEIE는 ZnO의 일-함수를 3.58 eV로부터 2.87 eV로 감소시킴으로써 활성 층 내로의 전자 주입의 강화를 가능하게 한다. Kim 등은 각기 1.53 cd/A의 전류 효율 및 8600 Cd/m²의 전류 효율 값들 및 최대 휘도를 갖는 디바이스를 보고하였다.
- [0028] Jiang 등은, 전자 수송 층 내에 PVK 및 4,4',4"-트리스(N-카르바졸릴)트리페닐아민(TCTA)의 얇은 장벽 층을 삽입함으로써, 효율이 3.5 Cd/A로부터 7.8 Cd/A로 개선될 수 있음을 보여주었다(참조 문헌 [20] 참조).
- [0029] Yang 등은 인광체가 없는 백색광 LED들을 제조하기 위하여 활성 층의 구조를 수정하기 위해 다수의 InGaN/GaN 양자 우물들을 사용하였다(참조 문헌 [21] 참조).
- [0030] Zhang 등은 ZnO 및 QD들 및 4,4'-비스(카르바졸-9-일)비페닐(즉, CBP) 층들 사이에 Al₂O₃를 코팅하였으며(즉, CBP/Al₂O₃/QD/Al₂O₃/ZnO의 구조를 가짐), 이는 15.3 Cd/A이르기까지 디바이스 성능을 상당히 개선하였다(참조 문

헌 [11] 참조).

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

- [0031] 일 측면에 따르면, QLED 내의 전자 누설을 감소시키기 위한 방법이 개시된다. 방법은 CdSe/ZnS 양자점(QD)들 사이의 습윤 층으로서 다층 양자-장벽(quantum-barrier; QB) 층들을 사용한다. 일부 실시예들에 있어서, QB 층들은 폴리(메틸 메타크릴레이트)(즉, PMMA)에 의해 형성될 수 있으며, 이의 밴드 갭은 전자들이 재결합 없이 활성 방출 층을 통과하는 것을 방지하여 전자 누설을 감소시킨다.
- [0032] 일 측면에 따르면, 색-포화(color-saturated) QLED 디바이스가 개시된다. QLED 디바이스는 다층 활성 방출 영역을 포함한다. 활성 방출 영역은 $(n - 1)$ 개의 QB 층들과 인터리브된 n 개의 QD 층들을 포함하며, 여기에서 n 은 1보다 큰 양의 정수이고 그 결과 각각의 QB 층은 QD 층들의 인접한 쌍 사이에 샌드위치된다.
- [0033] 일부 실시예들에 있어서, QD 층들은 콜로이드성 CdSe/ZnS QD 방출기들을 포함하며, QB 층들은 PMMA의 얇은 층들이다.
- [0034] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 CdSe/ZnS QD 층은 각각의 QD 층의 두께의 약 1 배 내지 20 배의 두께를 갖는다. 일부 실시예들에 있어서, 각각의 CdSe/ZnS QD 층은 각각의 QB 층의 두께의 약 8 배의 두께를 갖는다. 일부 실시예들에 있어서, 각각의 CdSe/ZnS QD 층은 약 15 nm 내지 35 nm의 두께를 가지며, 각각의 양자 장벽 층은 약 2 nm 내지 4 nm의 두께를 갖는다.
- [0035] PMMA QB 층들은 또한 전자 누설을 방지하기 위하여 QD 층들을 분리하는 습윤 층들로서 역할한다.
- [0036] 일부 실시예들에 있어서, 활성 방출 영역은 ETL/HBL과 HIL 사이에 샌드위치된다.
- [0037] 일부 실시예들에 있어서, ETL/HBL은 ZnO 나노입자들로 만들어지며, 전자들을 주입하고, QD 방출기들에 대한 최적 전하 밸런스를 유지하며, 은(Ag) 캐소드의 증착 프로세스 동안 QD들을 보호하기 위하여 활성 방출 영역에 결합된다. QD 층들과 ETL 사이의 강한 전자 결합은 전하 수송을 용이하게 한다.
- [0038] HIL은 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜)폴리스티렌 설포네이트(즉, PEDOT:PSS)로 만들어질 수 있다.
- [0039] 일부 대안적인 실시예들에 있어서, QLED는 활성 방출 영역과 HIL 사이에 별개의 HTL을 포함한다. HTL은 폴리(9-비닐카바졸)(즉, PVK) 및 폴리[N,N'-비스(4-부틸페닐)-N,N'-비스페닐벤지딘](즉, 폴리-TPD)으로 만들어질 수 있다.
- [0040] QLED 디바이스의 성능은, QD 및 QB 층들 중 하나 이상의 두께를 제어함으로써 및/또는 이러한 층들의 수를 조정함으로써 수정될 수 있다. QLED 디바이스들은 5% 이상의 외부 양자 효율을 나타낸다. 디바이스의 효율을 증가시키기 위하여 QLED 디바이스의 상이한 층들 사이의 응력을 감소시키기 위해 열 처리가 사용될 수 있다.
- [0041] 일 측면에 따르면, QB 층들에 의해 분리된 복수의 활성 층들을 포함하는 아키텍처를 갖는 콜로이드성 CdSe/ZnS (코어-셸) QD 나노입자 방출기들을 사용하는 일련의 고도로-포화된 적색 QLED들의 제조가 개시된다. 일부 실시예들에 있어서, 아세톤에 용해된 PMMA가 QB 재료로서 사용된다. PMMA의 더 넓은 밴드갭은 양자 장벽으로서 역할하며 전자들이 방사성 재결합 없이 활성 방출 영역을 통과하는 것을 방지하고, 그럼으로써 높은 전류 밀도들에서 전자 누설을 감소시킨다. 다양한 실시예들에 있어서, 방사성 재결합은 재결합 구역 내의 QB 층들의 수를 변화시킴으로써 수정될 수 있다. 활성 방출 영역 내에 양자 장벽들을 도입함으로써, QLED들의 전류 효율이 8 볼트(V)에서 207000 cd/m^2 의 최대 휘도를 가지고 6.7로부터 19.0 cd/A로 3배 증가될 수 있다.
- [0042] 일 측면에 따르면, 양자점(QD) 발광 다이오드(QLED) 디바이스가 제공된다. QLED 디바이스는 활성 방출 영역을 포함한다. 활성 방출 영역은 $(n - 1)$ 개의 QB 층들과 인터리브된 n 개의 QD 층들을 포함하며, 여기에서 n 은 1보다 큰 양의 정수이고 그 결과 각각의 QB 층은 2개의 인접한 QD 층들 사이에 샌드위치된다.
- [0043] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층은 카드뮴 셀레나이드/아연 설파이드(CdSe/ZnS)를 포함한다.

- [0044] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QB 층은 폴리(메틸 메타크릴레이트)(PMMA)를 포함한다.
- [0045] 일부 실시예들에 있어서, $n = 3$ 이다.
- [0046] 일부 실시예들에 있어서, $n = 5$ 이다.
- [0047] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 각각의 QB 층의 두께의 약 8 배이다.
- [0048] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 약 15 nm 내지 35 nm이며, 각각의 QB 층의 두께는 약 1 nm 내지 5 nm이다.
- [0049] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 약 15 nm 내지 35 nm이며, 각각의 QB 층의 두께는 약 2 nm 내지 4 nm이다.
- [0050] 일부 실시예들에 있어서, QLED는 전자-수송 층(ETL); 및 홀-주입 층(HIL)을 더 포함한다. 상기 ETL 및 HIL은 그 사이에 활성 방출 영역을 샌드위치한다.
- [0051] 일부 실시예들에 있어서, ETL는 합성 ZnO 나노결정들을 포함하며, HIL는 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜) 폴리스티렌 설포네이트(PEDOT:PSS)를 포함한다.
- [0052] 일부 실시예들에 있어서, QLED 디바이스는 활성 방출 영역과 HIL 사이에 샌드위치된 홀-수송 층(HTL)을 더 포함한다.
- [0053] 일부 실시예들에 있어서, HTL은 폴리(9-비닐카바졸)(PVK)을 포함한다.
- [0054] 일부 실시예들에 있어서, QLED는 ETL에 결합된 캐소드 층; HIL에 결합된 애노드 층; 및 애노드 층에 결합된 투명 기판을 더 포함한다.
- [0055] 일부 실시예들에 있어서, 캐소드 층은 은을 포함하며, 애노드 층은 인듐 주석 산화물(ITO)을 포함하는 투명 층이다.
- [0056] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QB 층은 각각의 QD 층보다 더 높은 전도성 밴드를 갖는다.
- [0057] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QB 층의 원자가 밴드에서의 에너지는 각각의 QD 층의 원자가 밴드에서의 에너지보다 더 높다.
- [0058] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QB 층은 PVK, 4,4'-사이클로헥실리덴비스[N,N-비스(4-메틸페닐)벤젠아민](TAPC) 또는 폴리[N,N'-비스(4-부틸페닐)-N,N'-비스페닐벤지딘](폴리-TPD)을 포함한다.
- [0059] 일 측면에 따르면, 순차적으로 함께 결합된 복수의 층들을 포함하는 QLED 디바이스가 제공된다. 복수의 층들은, 그것의 제 1 측면으로부터 제 2 측면까지: 캐소드 층; 전자 수송 층(ETL); 활성 방출 영역; 홀-주입 층(HIL); 및 애노드 층을 포함한다. 활성 방출 영역은 $(n - 1)$ 개의 양자-장벽(QB) 층들과 인터리브된 n 개의 양자점(QD) 층들을 포함하며, 여기에서 n 은 1보다 큰 양의 정수이고 그 결과 각각의 QB 층은 2개의 인접한 QD 층들 사이에 샌드위치된다.
- [0060] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층은 카드뮴 셀레나이드/아연 셀파이드(CdSe/ZnS)를 포함한다.
- [0061] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QB 층은 폴리(메틸 메타크릴레이트)(PMMA)를 포함한다.
- [0062] 일부 실시예들에 있어서, n 은 3 또는 5 또는 2(포함) 내지 6(포함) 사이의 정수일 수 있다.
- [0063] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 각각의 QB 층의 두께의 약 8 배이다.
- [0064] 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층의 두께는 약 15 nm 내지 35 nm이며, 각각의 QB 층의 두께는 약 2 nm 내지 4 nm이다.

도면의 간단한 설명

- [0065] 도 1은 종래 기술의 QLED의 구조체를 도시하는 개략도이다.
- 도 2a는 본 개시의 일부 실시예들에 따른 다중-QD-층 QLED 디바이스의 구조체를 예시하는 개략도이다.
- 도 2b는 전력 소스에 의해 전력이 공급되는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스를 예시하는 개략도이다.

- 도 3은 실험들에서 사용된 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 일 예의 구조체를 예시하는 개략도이다.
- 도 4는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스들을 테스트하기 위한 LED 측정 시스템을 도시한다.
- 도 5a 내지 도 5c는 도 4에 도시된 LED 측정 시스템에서 사용하기 위하여 3차원(3D) 프린팅에 의해 제조된 샘플 홀더의 평면도, 저면도, 및 사시도이다.
- 도 6a는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 플랫-밴드(flat-band) 에너지 레벨 도면이다.
- 도 6b는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 단면을 도시하는 주사 전자 현미경(SEM) 이미지이다.
- 도 7a 내지 도 7c는 상이한 다중-QD-층 QLED들 및 통상적인 QLED들의 실험 결과를 도시하며, 여기에서
- 도 7a는 8 볼트(V)의 전압에서, 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스들의 출력 파워들의 비교를 도시하며,
- 도 7b는 8 V의 전압에서, 다중-QD-층 QLED 디바이스 및 통상적인 QLED 디바이스의 출력 파워들의 비교를 도시하고,
- 도 7c는 다중-QD-층 QLED 디바이스 및 통상적인 QLED 디바이스의 전류 밀도 대 전압 특성을 도시하며, 여기에서 삽입물은 다중-QD-층 QLED 디바이스의 국제 조명 위원회(Commission Internationale de l'Éclairage; CIE) 색 좌표들을 보여준다.
- 도 8a는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 유한 요소법(FEM) 구조체를 도시한다.
- 도 8b는 단일 CdSe/ZnS QD 층을 포함하지만 어떠한 QB 층들도 포함하지 않는 통상적인 QLED 디바이스의 FEM 구조체를 도시한다.
- 도 9a는 (각기 도 2a에 도시된 바와 같은) 4개의 다중-QD-층 QLED 디바이스들의 광발광(Photoluminescence; PL) 강도들을 예시한다.
- 도 9b는 3.4 V에서의 통상적인 QLED 디바이스 및 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 PL 강도들을 도시한다.
- 도 9c는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 I-V 커브를 도시한다.
- 도 10은, 모두 시뮬레이션으로부터 획득된, (a) 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 전자 농도, (b) (QB 층들이 없는) 통상적인 QLED 디바이스의 전자 농도, (c) 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 홀 농도, 및 (d) 통상적인 QLED 디바이스의 홀 농도를 도시한다.
- 도 11a는 각기 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스 및 통상적인 QLED 디바이스의 방사성 재결합 레이트(rate)를 도시한다.
- 도 11b는 상이한 수의 QB 층들을 갖는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스들 및 통상적인 QLED 디바이스들의 정규화된 최대 PL 강도들을 도시한다.
- 도 12는 상이한 수의 QD 층들을 갖는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 최대 방사성 재결합 레이트들을 도시한다.
- 도 13은 4개의 QB 층들과 인터리브된 5개의 QD 층들을 갖는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 각각의 QD 층 내의 방사성 재결합을 도시한다.
- 도 14는 단일 QD 층을 갖는 그리고 어떠한 QB 층들도 없는 통상적인 QLED 디바이스의 QD 층 내의 방사성 재결합을 도시한다.
- 도 15a 및 도 15b는 4개의 QB 층들과 인터리브된 5개의 QD 층들을 갖는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 각각의 QD 층 내의 전자들의 농도를 도시한다.
- 도 16a 및 도 16b는 단일 QD 층을 갖는 그리고 어떠한 QB 층들도 없는 통상적인 QLED 디바이스의 QD 층 내의 전자들의 농도를 도시한다.
- 도 17은 다양한 동작 전압들(1 V 내지 6 V)에서의 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 자연 방출 레이트 대 파장을 도시한다.
- 도 18은 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스에 의해 생성되는 총 에너지 대 전류 강도를 도시한다.

도 19는 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 송신되는 광자들 대 전류를 도시한다.

도 20은 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 송신되는 광자들 대 전류 밀도의 퍼센트를 도시한다.

도 21은 도 2a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 방출/방사 패턴을 도시한다.

도 22a 및 도 22b는 본 개시의 일부 대안적인 실시예들에 따른 다중-QD-층 QLED 디바이스의 구조체를 도시한다.

도 23a는 이러한 실시예들의 시뮬레이션에서 사용된 도 22a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 구조체를 도시한다.

도 23b는 도 22a에 도시된 다중-QD-층 QLED 디바이스의 층들에 대한 에너지 레벨 도면을 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0066] 실시예들은 본원에서 다층 활성 방출 영역을 갖는 QLED 디바이스를 개시한다. 활성 방출 영역은 $(n - 1)$ 개의 QB 층들과 인터리브된 n 개의 QD 층들을 포함하며, 여기에서 n 은 1보다 큰 양의 정수이고 그 결과 각각의 QB 층은 QD 층들의 인접한 쌍 사이에 샌드위치된다.
- [0067] 활성 방출 영역은 홀-주입 층(HIL)과 전자-수송 층/홀-차단 층(ETL/HBL) 사이에 샌드위치될 수 있다.
- [0068] 홀-수송 층(HTL)이 활성 방출 영역과 HIL 사이에 적용될 수 있다.
- [0069] 개시된 QLED 디바이스의 다층 구조체는 누출 또는 소산 없이 광자들을 방출하기 위한 효율적인 방사성 재결합을 위하여 전자들 및 홀들을 함께 작은 영역들 내로 가져가는 난제를 해결하거나 또는 적어도 완화시킨다. 복수의 방출성(emissive) QD 층들을 갖는 활성-영역을 사용함으로써, 전자들 및 홀들은 ETL 및 HTL의 표면들로부터 직접적으로 활성 방출 영역 내로 수송될 수 있으며 그 안에서 방사적으로 재결합될 수 있으며, 그럼으로써 높은 재결합 효율을 제공한다.
- [0070] QLED 디바이스 구조체
- [0071] 이제 도 2a 및 도 2b를 참조하면, 다중-QD-층 QLED 디바이스가 도시되며, 이는 일반적으로 참조 번호 100을 사용하여 식별된다. 이러한 실시예들에 있어서, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는 (이후에 설명되는) 애노드 측면 상에서 "투명한" 1-측면 투명 디바이스이며, 광은 애노드 측면으로부터 방출되고 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 (이후에 설명되는) 캐소드 측면으로부터 반사될 수 있다(도 3 참조).
- [0072] 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는 함께 순차적으로 그리고 기관(114)에 결합되는(또는 달리 이에 증착되는) 상이한 재료들의 복수의 층들(102 내지 112)을 포함한다. 특히, 이러한 실시예들에 있어서, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는, 기관(114)으로부터 순차적으로 명명되는, 애노드 층(112), HTL(108), 활성 방출 영역(106), ETL/HBL(104), 및 캐소드 층(102)을 포함한다. 이러한 실시예들에 있어서, 애노드 층(112)은 투명하며, 캐소드 층(102)은 비-투명하다.
- [0073] 활성 방출 영역(106)은 복수의 얇은 QD 층들(122), 예컨대 하나 이상의 QB 층들(124)과 인터리브된 하나(1) 내지 다섯 개(5)의 QD 층들(122)을 포함하며, 그 결과 각각의 QB 층(124)은 인접한 QD 층들(122)의 쌍 사이에 샌드위치된다. 따라서, QD 층들(122)의 수는 QB 층들(124)보다 하나(1)만큼 더 크다. 다시 말해서, 활성 방출 영역(106)은 $(n - 1)$ 개의 QB 층들과 인터리브된 n 개의 QD 층들을 포함하며, 여기에서 n 은 1보다 큰 양의 정수이다.
- [0074] QB 층(124)은 활성 방출 영역(106)으로부터의 전자 누설을 감소시키기 위해 사용된다. 이러한 실시예들에 있어서, QB 층들(124)은 또한 습윤 층들로서 역할한다. 실험 물리학에서, 습윤 층은, 그 위에 자기-조립된 양자점들 또는 얇은 필름들이 생성되는 표면 상에 성장되는 원자들의 초기 층이다.
- [0075] 도 2a 및 도 2b에 도시된 예에 있어서, 활성 방출 영역(106)은 두 개(2)의 QB 층들(124)과 인터리브된 세 개(3)의 QD 층들(122)을 포함한다. 각각의 QB 층(124)은 2개의 인접한 QD 층들(122) 사이에 샌드위치된다.
- [0076] QB 층들(124)은 전자/홀 누설을 방지하거나 또는 적어도 감소시키기 위해 사용된다. 이상의 실시예들에 있어서, (2개의 최외측 QD 층들(122A 및 122B)을 제외한) 각각의 QD 층(122)은 QB 층들(124)의 인접한 쌍 사이에 샌드위치된다. QB 층들(124)의 쌍은 그 사이에 샌드위치된 QD 층(122) 내에 전자들을 유지하며, 따라서 QD 층(122) 내의 전자들의 농도를 증가시키는데 도움을 준다.
- [0077] ETL(104)이 QD 층(122A) 내로 전자들을 주입하며 그럼으로써 전자들이 QD 층(122A)으로부터 ETL(104) 내로 이동

할 가능성이 없기 때문에, ETL(104)에 인접한 QD 층(122A)은 그 사이에 임의의 양자 장벽 층을 필요로 하지 않는다. HTL(108)이 EBL로서 역할하며 그럼으로써 전자들이 QD 층(122A)으로부터 HTL(108) 내로 이동할 가능성이 없기 때문에, HTL(108)에 인접한 QD 층(122B)은 그 사이에 임의의 양자 장벽 층을 필요로 하지 않는다.

[0078] QD 층(122)의 두께 및 QB 층(124)의 두께는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 성능에 상당한 영향을 준다. 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층(122)의 두께는 각각의 QB 층(124)의 두께보다 더 크다. 예를 들어, 일 실시예에 있어서, 각각의 QD 층(122)은 약 15 nm 내지 35 nm의 두께를 갖는 얇은 QD 필름이다. 각각의 QB 층(124)의 두께는 약 1 nm 내지 5 nm이다. 일부 실시예들에 있어서, 각각의 QD 층(122)의 두께는 바람직하게는 각각의 QB 층(124)의 두께의 약 8 배이다. 예를 들어, 각각의 QD 층(122)은 약 15 nm 내지 35 nm의 두께를 가지며, 각각의 QB 층(124)은 약 2 nm 내지 4 nm의 두께를 갖는다.

[0079] 다양한 층들의 재료들

[0080] 다양한 층들(102 내지 114, 122 및 124)은 임의의 적절한 재료들로 만들어질 수 있다. 예를 들어, 캐소드(102)는 은(Ag)과 같은 적절한 비-투명 재료로 만들어질 수 있지만, 또한, 일부 대안적인 실시예들에 있어서, 비-투명 알루미늄(Al), 투명 ITO, 또는 유사한 것과 같은 다른 적절한 비-투명 또는 투명 재료로 만들어질 수 있다. 애노드(112)는 투명 인듐 주석 산화물(ITO)로 만들어질 수 있으며, 기관(114)은 유리나 같은 투명 지지 재료로 만들어질 수 있다.

[0081] ETL(104)은, 각기 7.5 전자볼트(eV) 및 4.2 eV에서 원자가 밴드 및 전도 밴드를 가지며 그럼으로써 다중-QD-층 QLED(100)의 성능을 개선하기 위한 ETL(104) 또는 홀-차단 층(HBL)로서 사용하기에 적절한 합성 ZnO 나노결정들과 같은 아연 산화물(ZnO)로 만들어진 무기 층일 수 있다.

[0082] HTL(108)은, 각기 5.8 eV 및 2.3 eV에서 원자가 밴드 및 전도 밴드를 갖는 폴리(9-비닐카바졸)(즉, PVK)로 만들어질 수 있다. 일부 대안적인 실시예들에 있어서, HTL(108)은 PVK로 만들어질 수 있으며, 추가로 폴리[N,N'-비스(4-부틸페닐)-N,N'-비스페닐벤지딘](즉, 폴리-TPD)의 첨가에 의해 개선될 수 있다. 일부 대안적인 실시예들에 있어서, HTL(108)은, N,N'-디페닐-N,N'-비스(1-나프틸-페닐)-(1,1'-비페닐)-4,4'-디아민(즉, NPB), 4,4',4"-트리(N-카르바졸릴)트리페닐아민(즉, TCTA), 4,4'-사이클로헥실리덴비스[N,N'-비스(4-메틸페닐)벤젠아민](즉, TAPC), 폴리-TPD 또는 이들의 혼합물로 만들어질 수 있다. 물론, 다른 적절한 재료들이 대안적으로 사용될 수 있다.

[0083] HIL(110)은 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜) 폴리스티렌 설포네이트(즉, PEDOT:PSS)로 만들어질 수 있으며, 이는 5 eV에 위치된 밴드 다이어그램을 갖는다. 폴리(스티렌 설포네이트) 음이온들로 도핑된 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜)(PEDOT:PSS)과 같은 전도성 폴리머는 다양한 유기 광전자 디바이스들에서 광범위하게 사용된다. PEDOT:PSS는 다가음이온(polyanion)으로 도핑된 폴리티오펜 유도체의 혼합물이다. 이러한 폴리머들은 높은 전기 전도율 및 양호한 산화 저항을 나타내며 그럼으로써 전자기 차폐에 대해 적절하다. 따라서, 폴리머 필름은, 900 nm로부터 2,000 nm까지 실질적으로 100% 흡수를 가지고 가시광 스펙트럼 전체에 걸쳐 그리고 심지어 NIR 및 근거리 UV 스펙트럼 영역들에서 높은 투명도를 갖는다는 것이 발견되었다.

[0084] 카드뮴 셀레나이드/아연 설파이드(CdSe/ZnS)는 각기 진공에서 6.7 eV 및 3.4 eV에서 원자가 밴드 및 전도 밴드를 갖는다. 활성 방출 영역(106) 내에서, 각각의 QD 층(122)은 CdSe/ZnS-유도 나노입자들로 만들어지며, 이들은 광 또는 광자를 방출하기 위하여 그 내부로 주입된 전자들 및 홀들을 캡처하고 재결합하기 위한 많은 수의 QD들을 형성한다. 각각의 QD 층(122)이 CdSe/ZnS-유도 나노입자들의 드 브로이 파장(약 50 nm)보다 더 작은 약 15 nm 내지 35 nm의 작은 두께를 가지기 때문에, 결정 격자 불일치가 감소되어 광 방출 효율을 개선한다.

[0085] 이러한 실시예들에 있어서, 각각의 QB 층(124)은 폴리(메틸 메타크릴레이트)(즉, PMMA)로 만들어진다. PMMA는 넓은 밴드갭을 가지며(참조 문헌 [22] 및 [23] 참조), 고도의 이동성 전자들이 재결합 없이 활성 방출 영역(106)을 통과하는 것을 방지하기 위해 사용될 수 있다.

[0086] 인터리브된 QD 층들(122) 및 QB 층들(124)은 전자들이 탈출할 수 없는 활성 방출 영역(106)을 형성하며, 그럼으로써 전자 누설의 감소 및 외부 효율의 증가를 야기한다. (이하에서 설명되는) 시뮬레이션 결과들은, QB 층들(124)의 전도 밴드가 QD 층들(122)의 전도 밴드보다 더 넓기 때문에 인터리브된 QD 층들(122) 및 QB 층들(124)을 사용하는 것이 재결합의 레이트를 증가시킬 수 있다는 것을 보여준다. 결과적으로, 활성 방출 영역(106) 내의 전자들 및 홀들의 재결합의 확률이 증가한다.

[0087] 예

- [0088] 이러한 예에 있어서, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는 하나 이상의 QB 층들(124)과 인터리브된 복수의 CdSe/ZnS QD 층들(122)에 의해 형성된 활성 방출 영역(106)을 포함하며, 여기에서 각각의 QB 층(124)은 인접한 CdSe/ZnS QD 층들(122)의 쌍 사이에 샌드위치된다. 이상에서 설명된 바와 같이, 다수의 QB 층들(124)은 전자 누설을 크게 감소시킨다.
- [0089] 이러한 예에 있어서, 기관(114) 및 애노드(112)는, 애노드 층(112)으로서 코팅된 ITO를 갖는, 미국, 캘리포니아주, 애너하임 소재의 Thin Film Devices Incorporated에 의해 제공되는, $14\text{--}16\ \Omega\text{sq}^{-1}$ 의 시트 저항을 갖는 패턴화된 ITO-유리 기관으로 만들어진다.
- [0090] HIL(110)은 영국, 셰필드 소재의 Ossila Ltd에 의해 제공되는 가장 일반적으로 사용되는 PEDOT:PSS 제형들 중 하나인 폴리(에틸렌 디옥시테오펜)/폴리스티렌설포네이트, Al 4083으로 만들어진다.
- [0091] HTL(108)은 $1,100,000\ \text{g/mol}$ 의 평균 분자량을 갖는 PVK로 만들어진다.
- [0092] ETL(104)은, 미국, 미주리주, 세인트 루이스 소재의 Sigma Aldrich Corporation에 의해 제공되는 아연 아세테이트 디하이드레이트($\geq 98\%$) 및 칼륨 하이드록사이드($\geq 85\%$)로 만들어진 합성 ZnO 나노결정들에 의해 형성된다.
- [0093] 이러한 예에 있어서, ZnO 나노입자들은 수정들을 가지고 Pacholski 등에 의해 보고된 방법(참조 문헌 [24] 내지 [26] 참조)에 의해 마련될 수 있다. 수정된 방법에 따르면, $2.46\ \text{g}$ 의 $\text{Zn}(\text{Ac})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 이 30 분 동안 60°C 에서 $55\ \text{mL}$ 의 메탄올에 용해된다. 그런 다음, 일정하게 교반되면서 60°C 에서 $0.96\ \text{g}$ 의 KOH(칼륨 하이드록사이드)를 함유하는 $25\ \text{mL}$ 의 메탄올 용액이 한 방울씩 첨가된다. 반응 혼합물은 60°C 의 일정한 온도에서 아르곤(Ar) 분위기(즉, O_2 로부터 반응 혼합물을 분리하기 위하여 Ar의 비활성 가스로 충전된 환경) 하에서 2 시간 동안 교반된다. 획득된 산물은 그 안에 ZnO 나노결정들을 갖는 백색 용액으로서 나타난다. ZnO 나노결정들은 추가로 1 분 동안 $1500\ \text{rpm}$ 의 속도로 메탄올을 가지고 2번 세척된다. $20\ \text{mg/mL}$ ZnO 용액을 마련하기 위하여, $200\ \text{mg}$ 의 나노결정들이 $10\ \text{mL}$ n-부탄올 및 $200\ \mu\text{L}$ 에탄올아민 내에 재-분산된다. 용액은 사용 전에 $0.2\ \mu\text{m}$ 폴리비닐리덴 디플루오라이드(PVDF) 멤브레인 필터들을 가지고 필터링된다.
- [0094] 캐소드(102)는 미국, 캘리포니아주, 롱 비치 소재의 R.D. Mathis Company에 의해 제공되는 99.99% 순도의 은 펠릿들로 만들어진다.
- [0095] QD 층들(122)은, 미국, 아칸소주, 페이엣빌 소재의 NN-LABS, LLC에 의해 제공되는 CdSe/ZnS/옥타데실아민($630\ \text{nm}$, 양자 수율(QY) $> 40\%$)으로 만들어진다.
- [0096] QB 층들(124)은 $120,000\ \text{g/mol}$ 의 평균 분자량을 갖는 PMMA로 만들어진다.
- [0097] 이상에서 설명된 재료들을 가지고, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는 다음의 제조 프로세스를 통해 제조될 수 있다.
- [0098] 기관(114)은 비누 욕조 내에서 초음파 처리되고 적절한 정제수 및 에탄올을 가지고 행궤될 수 있다. 정제수는 역 삼투(RO)와 같은 임의의 적절한 물-정제 기술을 가지고 만들어질 수 있다. 행궤 이후에, 기관은 이소프로판올 욕조에서 꺼내 젖서 따뜻한 음과 욕조 내에서 5 분 동안 초음파 처리될 수 있다. 친수성 표면 처리를 위하여, 기관은 따뜻한 음과 욕조에서 5 분 동안 신선한 $10\ \text{vol.}\%$ NaOH 내에서 초음파 처리되고, 뜨거운 물에서 2번 행궤지며, 마지막으로 N_2 가스를 송풍함으로써 건조될 수 있다.
- [0099] PEDOT:PSS는 $0.45\ \mu\text{m}$ PVDF 필터를 통해 무-고무 주사기를 가지고 필터링될 수 있다. 그런 다음, 필터링된 PEDOT:PSS는 60 초 동안 $3000\ \text{rpm}$ 으로 미리-세정된 ITO 기관 상에 스핀-코팅되며, 그 다음 30 분 동안 150°C 로 베이킹되어 HIL(110)을 형성한다.
- [0100] HTL(108)을 형성하기 위하여, PVK는 $10\ \text{mg/mL}$ 의 농도를 갖는 클로로벤젠 내에 용해되고, 60 초 동안 $3000\ \text{rpm}$ 으로 HIL(110) 상에 스핀-코팅되며, 30 분 동안 150°C 에서 베이킹될 수 있다.
- [0101] 각각의 QD 층(122)을 형성하기 위하여, CdSe/ZnS QD들은 n-옥탄($5\ \text{mg/mL}$) 내에 용해되고, 45 초 동안 $1000\ \text{rpm}$ 으로 HTL(108) 또는 이웃 QB 층(124) 상으로 스핀-코팅되며, 그 다음 5 분 동안 110°C 로 어닐링될 수 있다. 각각의 CdSe-ZnS QD 층(122)은 약 $25\ \text{nm}$ 의 두께를 갖는다.
- [0102] 각각의 QB 층(124)을 형성하기 위하여, PMMA가 아세톤($100\ \mu\text{g/mL}$) 내에 용해되고, 45 초 동안 $2000\ \text{rpm}$ 으로 이웃 QD 층(122) 상에 스핀-코팅되며, 5 분 동안 110°C 에서 어닐링될 수 있다. 각각의 PMMA QB 층(124)은 약 3

nm의 두께를 갖는다.

- [0103] 이러한 예에 있어서, 2개의 PMMA QB 층들(124)과 인터리브된 3개의 CdSe/ZnS QD 층들(122)이 형성된다.
- [0104] 활성 방출 영역(106)(즉, 인터리브된 QD 층들(122) 및 QB 층들(124))을 형성한 이후에, 이 상에서 설명된 바와 같이 획득된 ZnO 나노입자들이 20 mg/ml(n-부탄) 용액 내에 분산되고, 그런 다음 50 초 동안 3000 rpm으로 "최상단" QD 층(122) 상으로 스핀-코팅되며, 그 다음 30 분 동안 60°C에서 베이킹되어, 약 90 nm의 두께를 갖는 ETL(104)을 형성할 수 있다.
- [0105] "top" Ag 캐소드 층(102)은 20W의 전력, 2×10^{-6} mbar의 압력, 및 25 분의 증착 시간을 가지고 열 증발기에 의해 ETL(104) 상으로 증착되어 약 100 nm의 캐소드 층(102)을 형성할 수 있다. 그러면 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)가 형성된다.
- [0106] 도 3에 도시된 바와 같이, 이 상과 같이 제조된 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는, 기관(114)으로서 유리, 애노드(112)로서 ITO, HIL(110)로서 PEDOT:PSS, HTL(108)로서 PVK, 활성 방출 영역(106)을 형성하는 인터리브된(QD 층들(122)로서, 각기 약 25 nm 두께의) CdSe-ZnS 층들 및 (QB 층들(124)로서, 각기 약 3 nm 두께의) PMMA 층들, ETL(104)로서 ZnO(약 90 nm 두께), 및 캐소드(102)로서 Ag(약 100 nm 두께)의 구조체를 갖는다. 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)를 직류(DC) 전원(116)에 결합함으로써, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)가 그것의 애노드 측면으로부터 광을 방출한다.
- [0107] 도 4에 도시된 바와 같이, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)를 홀딩하기 위한 샘플 홀더(134)(도 5a 내지 도 5c 참조)를 갖는 적분 리셉터(132)(5/8-인치 입력 포트를 갖는 2x2x2 인치)를 포함하는 LED 측정 시스템(130)을 사용하여 테스트될 수 있다. UV-대-가시 스펙트럼(190 nm 대 850 nm)에 대한 블랙-코멧(Black-Comet) 분광계(136)가 총 전력(와트 및 루멘) 및 연색 평가 지수(CRI)를 측정하기 위하여 미국, 플로리다주, 탐과 소재의 StellarNet Inc.에 의해 제공되는 F600-VISNIR 광 섬유 케이블(138)을 통해 적분 리셉터(132)에 결합되며(참조 문헌 [27] 참조), 여기에서 측정 결과들은 컴퓨팅 디바이스(140)로 전송된다. 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 I-V 특성(즉, 전류-전압 특성 또는 I-V 커브)은 미국, 오레곤 주, 비버턴 소재의 Tektronix, Inc.에 의해 제공되는 키슬리 2400 소스미터(142)를 사용하여 측정된다.
- [0108] 도 6a는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 플랫-밴드 에너지 레벨 도면이다. 도 6b는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 단면을 도시하는 주사 전자 현미경(SEM) 이미지이다.
- [0109] 대부분의 QLED들에서, PEDOT:PSS는 흔히 그것의 깊은 일 함수(deep work function)에 기인하여 HIL에 대하여 사용되며, 활성 층에 대한 효율적인 홀 주입을 제공한다(참조 문헌 [28] 참조). 주입 계면들로부터 멀어지도록 HTL을 배치하는 것이 매우 유용할 수 있다. PVK 에너지 레벨들은 활성 층의 에너지 레벨들과 매칭되며, 이는 이것을 HTL에 대한 좋은 후보로 만든다(참조 문헌 [29] 참조). 또한, PVK는 CdSe/ZnS 나노입자들에 비하여 더 높은 원자가 밴드를 갖는다(참조 문헌 [30] 및 [31] 참조). 이는 인접한 층에 대한 전자들 및 홀들의 주입을 용이하게 한다. CdSe/ZnS QD 나노입자들은, 그것의 간단한 합성 방법들, QY 효율 및 넓은 범위의 튜닝성(tunability)에 기인하여 QLED들에 대한 활성 층으로서 널리 사용된다(참조 문헌 [32] 내지 [36] 참조). 또한, 유기 ZnO 나노결정들은 일반적으로, 인접한 활성 층에 대하여 그것의 높은 전자 이동도(mobility) 및 매칭되는 에너지 레벨에 기인하여 ETL들로서 사용된다(참조 문헌 [21] 내지 [23] 참조). 이에 더하여, ZnO 나노입자들의 두꺼운 필름은 Ag를 증착하는 동안 QD들에 대한 보호 층으로서 역할할 수 있다(참조 문헌 [41] 내지 [44] 참조). 도 6a는, ZnO 나노입자들이 QD들의 전도성 밴드와 유사한 그것의 최저 비점유 분자 오비탈(lowest unoccupied molecular orbital; LUMO) 레벨에 기인하여 전자 수송에 도움이 된다는 것을 보여준다.
- [0110] 통상적인 QLED들의 주요한 단점들 중 하나는 전자 누설에 의해 초래되는 효율 드롭이다(참조 문헌 [12] 및 [13] 참조). 전자 누설은, 홀들 및 전자들의 이동도의 차이에 기인하여 고도의 이동성 전자들이 홀들과 재결합할 수 없을 때 발생한다(참조 문헌 [15] 참조). PVK의 홀 이동도는 $2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 이며(참조 문헌 [45] 및 [46] 참조), ZnO의 전자 이동도는 박막들에 대하여 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 이다(참조 문헌 [16] 참조). 이는 활성 층에서의 전하의 불충분한 주입을 야기하여 방사성 재결합의 더 낮은 레이트를 야기한다.
- [0111] 따라서, 양자 장벽들에 대한 좋은 후보는 반드시 다음의 3가지 속성들을 가져야만 한다: 첫째, 폴리머의 전자 이동도 및 홀 이동도는 반드시 전자들 및 홀들이 효율적으로 통과하게끔 하는 브리지로서 작용하기에 충분히 높아야 한다. 둘째, 전자들이 방사성 재결합 없이 통과하는 것을 방지하기 위하여, QB 층(124)의 전도성 밴드는 반드시 QD의 전도성 밴드보다 상당히 더 높아야 한다. 셋째, QB 층(124)은, 홀들이 큰 에너지 갭을 대면하지 않

고 QD 층을 통과할 수 있도록 QD에 비하여 원자가 밴드에서 더 높은 에너지를 가져야 한다. 양자 장벽이 이러한 조건들을 충족시키는 경우, 전자들은 활성 층을 통과할 때 상당한 에너지 장벽을 대면할 것이며, 이는 활성 층에서의 전자들의 더 높은 농도를 야기한다(참조 문헌 [22] 및 [23] 참조).

[0112] PMMA의 박막은 이상에서 언급된 에너지 밴드갭 속성들을 가지며, 이는 이를 QB 층들(124)에 대한 강한 후보로 만든다. 또한, QB 층들(124)을 형성하기 위한 용매로서 아세톤과 함께 PMMA를 사용하는 것은 옥탄 내에 용해된 CdSe/ZnS를 제거하거나 또는 씻어내지 않을 것이다. 따라서, 일부 실시예들에 있어서, QB 층들(124)로서 PMMA를 사용하는 것이 바람직하다. 통상적인 QLED 제조 방법들/프로세스들이 이러한 실시예들에서 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)를 제조하기 위해 사용될 수 있다.

[0113] PMMA이 절연체 폴리머이기 때문에, 각각의 스핀-코팅된 PMMA QB 층은, 이것이 전류를 차단하지 않도록 작거나 또는 얇은 두께를 가져야 할 필요가 있다. Ismael 등은, PMMA 층의 두께를 감소시킴으로써 전도율이 상당히 증가한다는 것을 보여주었다(참조 문헌 [49] 참조). 이러한 예에 있어서, 각각의 CdSe/ZnS QD 층(122)은 약 25 nm의 두께를 가지며, 각각의 PMMA QB 층(124)은 약 3 nm의 두께를 갖는다. 도 6b에 도시된 SEM 이미지에서, 인접한 QD 층들(122)이 PMMA QB 층들(124)의 이미징을 방해하기 때문에 (어두운 라인으로 표시된) PMMA QB 층들(124)이 거의 보이지 않는다.

[0114] 일부 대안적인 실시예들에 있어서, PVK, TAPC, 및 폴리-TPD와 같은 이상에서 언급된 에너지 밴드갭 속성들을 갖는 홀-수송 폴리머들의 얇은 층들(참조 문헌 [15], [20], [47], 및 [48] 참조)이 QB 층들(124)로서 사용될 수 있다. 그러나, QB 층들(124)로서 이러한 폴리머들을 사용하는 것의 단점은, 이러한 폴리머들의 대부분이 하부 QD 층(122)의 제거 또는 씻어냄을 초래할 수 있는 벤젠 용매들을 함유할 수 있음에 따라 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 대응하는 제조 프로세스가 어려울 수 있다는 점이다. 가능한 씻어냄을 보상하기 위하여 요구되는 것보다 더 큰 두께를 갖는 QD 층들을 형성하고, QD 층들(122)에 대한 씻어냄을 제어하기 위하여 QB 층들(124)을 형성할 때 제조 조건들을 주의 깊게 제어할 수 있다. 그러나, 이러한 프로세스가 어려울 수 있다.

[0115] 대안적으로, 이상에서 설명된 QB 재료들과 함께 다른 적절한 QD 재료들을 사용할 수도 있다. QD 재료들의 예들은, 코어로서 CdSe, CdTe, CdS, 또는 InP를 사용하며 셸로서 ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe, PbS, PbSe, PbTe, 또는 InAs를 사용하는 재료들을 포함한다.

[0116] 실험 및 시뮬레이션 결과들

[0117] 도 7a 내지 도 7c는 상이한 다중-QD-층 QLED 디바이스들(100) 및 통상적인 QLED 디바이스들의 실험 결과를 도시한다. 이러한 도면들에서, Bn은 이상에서 설명된 바와 같이 제조된 (n-1) 개의 PMMA QB 층들(124)과 인터리브된 n 개의 CdSe/ZnS QD 층들(122)을 포함하는 활성 방출 영역(106)을 갖는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)를 나타내며, 여기에서 n = 2, 3, 4, 5, ...이고, An은 QD 층들(122)의 총 두께와 동일하거나 또는 대략 동일한 두께를 갖지만 QB 층들을 갖지 않는 단일 CdSe/ZnS QD 층을 갖는 통상적인 QLED 디바이스를 나타낸다.

[0118] 도 7a는 8 볼트(V)의 전압에서 다중-QD-층 QLED 디바이스들(100)의 출력 파워들의 비교를 도시한다. 이러한 비교에서 다중-QD-층 QLED 디바이스들(100)은 이상에서 설명된 바와 같이 제조된 (n-1) 개의 PMMA QB 층들(124)과 인터리브된 n개의 QD 층들(122)을 가지며, 여기에서 n = 2, 3, 4, 또는 5이다. 보여질 수 있는 바와 같이, 두 개(2)의 PMMA QB 층들(124)과 인터리브된 세 개(3)의 QD 층들(122)을 갖는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)(즉, B3)가 가장 큰 파워 출력을 나타낸다. 용매로서 아세톤과 함께 PMMA를 사용하는 것이 하부 층들의 거칠기를 감소시킬 수 있다는 것이 알려져 있다(참조 문헌 [16] 참조). 또한, 더 많은 층들은 더 많은 전위들을 초래하고, 활성 방출 영역 내에서의 전파를 트래핑할 수 있다. 따라서, PMMA QB 층들(124)의 수를 4 개의 층들을 초과하여 증가시키면, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 효율이 상당히 감소할 수 있다. 또한, 4개의 PMMA QB 층들(124)이 사용될 때 QB 층들의 큰 에너지 밴드 갭에 기인하여 청색 편이 효과가 두드러지게 된다.

[0119] 도 7b는 8 V의 전압에서 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3) 및 통상적인 QLED 디바이스(A3)의 출력 파워들의 비교를 도시한다. 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3)는 2개의 PMMA QB 층들(124)과 인터리브된 3개의 CdSe/ZnS QD 층들(122)을 포함하는 활성 방출 영역(106)을 갖는다. 통상적인 QLED 디바이스(A3)는 B3의 3개의 CdSe/ZnS QD 층들(122)의 총 두께와 동일하거나 또는 대략 동일한 두께를 갖지만 QB 층들을 갖지 않는 CdSe/ZnS QD 층을 갖는다. 도시된 바와 같이, 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3)는 통상적인 QLED 디바이스(A3)보다 상당히 더 큰 파워 출력을 갖는다. 특히, B3의 피크는 A3의 피크의 1.88 배이다.

[0120] 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3)의 상당히 더 큰 출력-파워는, 인터리브된 QB 층들(124)이 8 V에서 활성 층에서의 전자들의 농도를 상당히 증가시킨다는 것을 보여준다.

[0121] 또한, 당업자들은, CdSe/ZnS QD 층의 증가된 두께는 심각한 격자 불일치를 초래할 수 있으며 결과적으로 증가된 수의 전위들 및 디폴트(default)들을 초래할 수 있음을 이해할 것이다. 이러한 전위들 및 디폴트들은 전자들 및 홀들에 대한 트래핑 스팟들을 초래하여 비-방사성 재결합을 증가시키고 효율을 낮출 수 있다(참고 문헌 [52] 참조).

[0122] 따라서, A3의 두꺼운 CdSe/ZnS QD 층을 B3의 복수의 얇은 QD 층들(122)로 실질적으로 분할함으로써, B3에서 각각의 얇은 CdSe/ZnS QD 층(122) 내의 격자 불일치 및 에너지 트랩들이 감소되며, 이는 결과적으로 증가된 방사성-재결합 및 증가된 출력-파워를 야기한다.

[0123] 도 7c는 B3 및 A3의 전류 밀도 대 전압 특성을 도시하며, 여기에서 삼입물은 B3의 국제 조명 위원회(Commission Internationale de l'Éclairage; CIE) 색 좌표들을 보여준다. B3 및 A3의 전류 밀도들은, 각기 전압이 3.5 V 및 2 V에 도달할 때 극적으로 증가한다(예를 들어, 0.02 mA/mm²까지 증가할 수 있으며, 이는 QLED 디바이스들(B3 및 A3)이 가시광 강도로 광을 방출하게끔 한다). B3의 동작 전압은 A3보다 더 높으며, 이는 활성 방출 영역(106) 내의 비-전도성 PMMA QB 층들(124)의 존재에 기인할 수 있다. 또한, PMMA의 넓은 에너지 밴드갭은 엑시톤들의 주입을 시작하기 위한 높은 전압들을 의미한다. B3에 비하면, 통상적인 QLED 디바이스(A3)는 어떠한 PMMA QB 층들을 갖지 않으며, 턴 온하기 위하여 더 낮은 전압들을 요구한다. 34.7 nm의 좁은 반치 전폭을 갖는 638 nm에서의 대칭적 방출 피크는 (x=0.677, y=0.295)의 CIE 색 좌표들에 대응하며, 이는 스펙트럼 궤적에 가깝고 디스플레이 애플리케이션들에 대해 바람직하다.

[0124] 표 1은 동작 전압, 반치 전폭(FWHM) 및 효율과 관련하여 A3 및 B3의 비교를 도시한다. 도시된 바와 같이, B3는, PMMA QB 층들(124)이 동작 전류에 대하여 더 높은 구동 전압을 요구하기 때문에 더 높은 동작 전압을 갖는다. A3 및 B3의 FWHM들은 35 nm 내지 40 nm의 범위 내이며, 그럼으로써 순수 색 방출들을 보장한다(참조 문헌 [53] 참조). B3 내의 PMMA QB 층들(124)의 존재는 전류 효율을 6.7 Cd/A으로부터 19.0 Cd/A으로 증가시키고, 전력 효율을 2.6 lm/W으로부터 7.5 lm/W로 증가시키며, 발광을 111,000 Cd/m²로부터 207,000 Cd/m²으로 증가시킨다.

[0125] 표 1. A3 및 B3의 전류 효율 및 전력 효율 비교.

샘플	A3	B3
동작 전압(V)	6	6.6
테스팅 전압(V)	8	8
FWHM(nm)	34.6	37.4
전류(mA)	148	98
발광(Cd/m ²)	111,000	207,000
전류 효율(Cd/A)	6.7	19
전력 효율(lm/W)	2.6	7.5
활성 층	QD/QD/QD	QD/PMMA/QD/PMMA/QD

[0126]

[0127] 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 시뮬레이션들은, 방사성 재결합 레이트를 향상시키기 위한 PMMA QB 층들(124)의 최적 수를 결정하기 위하여, 캐나다, 브리티시컬럼비아 주, 밴쿠버 소재의 Crosslight Software Inc.에 의

해 제공되는 Advanced Physical Models of Semiconductor Devices의 소프트웨어 패키지인 APSYS를 사용하여 수행되었다(참조 문헌 [54] 참조). 시뮬레이션들에서, PMMA 밴드 오프셋 비율 분의 CdSe/ZnS는 0.75로서 간주된다. PMMA의 속성들은 참조 문헌 [55]에 기초하여 정의된다. 시뮬레이션들에서, 바이어싱 전압 하에서 활성 층에서의 전자 및 홀 농도들이 연구되었다.

- [0128] 도 8a는 APSYS에서 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3)의 유한 요소법(FEM) 구조체를 도시한다. 특히, 시뮬레이션에서 사용되는 FEM 구조체는 약 $5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 의 포지티브 도핑된 입자들의 수를 갖는 50 nm 홀 주입 층, 약 $5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 의 네거티브 도핑된 입자들의 수를 갖는 50 nm 전자 주입 층, 활성 방출 영역(106), 및 50 nm 전자 수송 층을 포함한다. 활성 방출 영역(106)은 2개의 PMMA QB 층들(124)과 인터리브된 3개의 CdSe/ZnS QD 층들을 포함한다. 각각의 CdSe/ZnS QD 층은 약 8 nm의 두께를 가지며, 각각의 PMMA QB 층(124)은 1 nm의 두께를 갖는다. 도 8a에 도시된 (활성 방출 영역(106)을 제외한) 구조체는 시뮬레이션을 위해 사용되며, (실험들을 위해 사용되는) 도 3에 도시된 구조체와는 상이하다는 것을 주의해야 한다. 그러나, 이하의 테스트 및 분석이 활성 방출 영역(106)에 초점을 맞추기 때문에, 활성 방출 영역(106) 외의 구조체 차이는 활성 방출 영역(106)의 테스트 및 분석 결과들에 크게 영향을 주지 않는다.
- [0129] 제 1 단계로서, QD 재료는 APSYS에서 양자-장벽 영역 내부에 내장된 재료로서 정의되며, QD 재료의 속성들이 식별된다. 다음으로, QD 층들(122)의 구조체가 별개의 서브-프로젝트를 사용하여 정의되며, QD 층들(122)의 속성들이 다시 메인 거시(macroscopic) 시뮬레이션 내로 로딩된다. 그런 다음, 이러한 부분으로부터 계산된 미세 솔루션들로부터의 양자 레벨들 및 광학 전환 오버랩들이 입력으로서 메인 시뮬레이션으로 불러오기 된다.
- [0130] 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 간략화된 FEM 구조체를 정의한 이후에, 시뮬레이션의 초기 상태는 평형 상태로 설정되며, 이는 2개의 조건들을 포함한다: (i) 외부 바이어스가 존재하지 않으며 및 (ii) 디바이스는 열 평형 상태이다. 따라서, 전극들 상의 전압 및 전류가 0이다.
- [0131] 스캔 명령문이, 접촉부들의 전압만이 변화하면서 전류가 계산되는 동안 방정식 해법기를 작동시키기 위해 메인 시뮬레이터 엔진에 의해 사용된다. 이는, 이전에 알려진 솔루션을 느리게 수정하고 전류와 같은 제어 변수들을 점진적으로 업데이트함으로써 이루어진다. 그런 다음, 초기 추측으로서 이전에 알려진 솔루션을 가지고 비-선형 뉴턴 알고리즘을 사용하여 업데이트된 해법이 찾아진다. 수렴이 달성된 이후에, 해법기는, 정의된 최대 전압(3.4 V)에 도달될 때까지 계속해서 솔루션을 업데이트한다. 3.4 V의 전압은 시뮬레이션 I-V 커브 결과들에 기초하여 목표 전압으로서 선택된다. 소프트웨어의 출력은 CrosslightView 소프트웨어를 사용함으로써 시각화된다.
- [0132] 비교로서, 도 8b는 B3의 CdSe/ZnS QD 층들(122)의 총 두께와 동일한 두께를 갖지만 어떠한 QB 층들도 포함하지 않는 단일 CdSe/ZnS QD 층을 갖는, APSYS에서의 통상적인 QLED 디바이스(A3)의 FEM 구조체를 도시한다.
- [0133] 도 9a는 3.4 V에서의 4개의 다중-QD-층 QLED 디바이스들(B2, B3, B4, 및 B5)의 광발광(PL) 강도들을 예시한다. 도시된 바와 같이, 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3)(2개의 QB 층들(124)과 인터리브된 3개의 QD 층들(122))은 최대 PL 강도를 생성하며, 이는 도 7a에 도시된 실험 결과들과 부합된다. 도 7a가, B4가 B2보다 더 높은 전력-출력 피크를 갖는다는 것을 보여주지만, 도 9a는 B2가 B4보다 더 높은 PL-강도 피크를 갖는다는 것을 보여준다.
- [0134] 도 9b는 3.4 V에서의 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3) 및 통상적인 QLED 디바이스(A3)의 PL 강도들을 도시한다. 도시된 바와 같이, 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3)(2개의 QB 층들(124)과 인터리브된 3개의 QD 층들(122))은 통상적인 QLED 디바이스(A3)의 약 1.79 배의 PL-강도를 나타내며, 이는 도 7b에 도시된 결과들과 부합된다.
- [0135] 도 9c는 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3)의 밀도-전압(J-V) 특성들을 도시한다. 도시된 바와 같이, B3의 시뮬레이션된 모델의 동작 전압은 약 3.4 V이다.
- [0136] 도 10은, 모두 APSYS 시뮬레이션으로부터 획득된, (a) 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 전자 농도, (b) (QB 층들이 없는) 통상적인 QLED 디바이스의 전자 농도, (c) 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 홀 농도, 및 (d) 통상적인 QLED 디바이스의 홀 농도를 도시한다. (b) 및 (d)에서의 QD 층들의 두께는 (a) 및 (c)에서의 3개의 QD 층들의 총 두께와 동일하다. 전자/홀 주입의 방향은 화살표들로 표시된다. 도 10은 ((a) 및 (b)에 대하여) 전자들 및 ((c) 및 (d)에 대하여) 홀들의 농도의 표시로서 질을 사용하는 그레이스케일 이미지이다. 도 10의 범례에 의해 도시되는 바와 같이, 더 어두운 그레이는 더 높은 전자/홀 농도를 나타내며, 더 밝은 그레이는 더 낮은 전자/홀 농도를 나타낸다.
- [0137] 도 10 (a) 및 (b)의 비교는, 2개의 QB 층들(124)의 존재가, 특히 처음 2개의 QD 층들에서의 전자 농도를 크게 증가시킨다는 것을 보여준다. 도 10 (c) 및 (d)를 비교하면 동일한 결론이 관찰될 수 있다.

- [0138] 도 11a는 각기, $x = 60 \mu\text{m}$ 상의 활성 층을 통과하는 가상 라인을 따른 위치에 대한 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3) 및 통상적인 QLED 디바이스(A3)의 방사성 재결합 레이트들을 도시한다. 도시된 바와 같이, 활성 방출 영역(106) 내의 QB 층들(124)의 존재는 더 높은 광자 방출 레이트를 야기한다. 재결합 레이트 계산은 단순성을 목적으로 위하여 QD 층들(122) 이외의 다른 층들에 대해서는 수행되지 않았다.
- [0139] 도 11b는 다중-QD-층 QLED 디바이스들(Bn) 및 통상적인 QLED 디바이스들(An)의 정규화된 최대 PL 강도들을 도시하며, 여기에서 n은 상이한 전압들(3.4 V 및 5.8 V)에서의 $n = 2, 3, 4, 5$, 및 6이다(즉, QB 층들의 수 k는 $k = 1, 2, 3, 4$, 및 5이다). 여기에서, 3.4 V 전압은 다중-QD-층 QLED 모델의 J-V 특성들에 의해 결정된다. 레이저들과 같은 다른 애플리케이션들이 더 높은 전압들을 필요로 하기 때문에, 5.8 V 전압이 또한 시뮬레이션에서 사용된다.
- [0140] 도시된 바와 같이, 3.4 V의 동작 전압을 가지면, 다중-QD-층 QLED 디바이스들(Bn) 내의 QB 층들(124)의 존재는 PL 강도를 증가시키며, 이 중에서 $k = 2$ (즉, 2개의 QB 층들과 인터리브된 3개의 QD 층들을 갖는 B3)가 가장 큰 정규화된 최대 PL 강도를 야기한다. 5.8 V와 같은 더 높은 전압들에서, 다중-QD-층 QLED 디바이스들(Bn)은 통상적인 QLED 디바이스들(An)에 비하여 PL 강도들과 관련하여 탁월한 성능을 나타낸다. 5.8 V에서, $k = 4$ (즉, 4개의 QB 층들과 인터리브된 5개의 QD 층들을 갖는 B5)가 가장 큰 정규화된 최대 PL 강도를 야기한다. 도 11b는 또한, 다중-QD-층 QLED 디바이스들(Bn)과 통상적인 QLED 디바이스들(An) 사이의 성능 차이가 더 낮은 전압들(예를 들어, 3.4 V)보다 더 높은 전압들(예를 들어, 5.8 V)에서 더 크다는 것을 보여준다.
- [0141] 이상의 실험 결과들 및 시뮬레이션 결과들은, CdSe/ZnS QD 층들과 인터리브된 PMMA QB 층들을 이용하면, 다중-QD-층 QLED 디바이스들(100)은 단일 CdSe/ZnS QD 층을 가지며 어떠한 QB 층들도 없는 통상적인 QLED 디바이스들보다 더 높은 효율을 나타낸다는 것을 보여준다. 통상적인 QLED 디바이스들에 비하여, 다중-QD-층 QLED 디바이스들(100)은 전자 누설의 더 낮은 레이트를 가지며, 이는 방사성 재결합의 더 높은 레이트를 야기한다. 인터리브된 3개의 QD 층들(122)(각기 약 25 nm의 두께를 가짐) 및 2개의 QB 층들(124)(각기 약 3 nm의 두께를 가짐)을 갖는 다중-QD-층 QLED 디바이스(B3)는 19 cd/A의 전류 효율 및 $207,000 \text{ Cd/m}^2$ 의 발광을 갖는 최적화된 디바이스일 수 있다.
- [0142] 추가적인 시뮬레이션/실험 결과들이 도 12 내지 도 21에 제시된다.
- [0143] 도 12는 5.8 V에서의 상이한 수 n개의 QD 층들(122)을 갖는 다중-QD-층 QLED 디바이스들(100) 및 통상적인 QLED 디바이스들의 최대 방사성 재결합 레이트를 도시하며, 여기에서 다중-QD-층 QLED 디바이스들(100)의 결과들은 오제(auger) 재결합 및 비-방사성 재결합을 무시함으로써 획득된다. 다시 말해서, 도 12는, 그 내부에서 QB 층들이 결함을 갖지 않는 이상적인 다중-QD-층 QLED 디바이스들(100)의 최대 방사성 재결합 레이트의 시뮬레이션 결과들을 도시한다. 또한, $n = 1$ 일 때, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는, 단일(얇은) QD 층을 가지며 어떠한 QB 층들도 갖지 않는 통상적인 QLED 디바이스와 사실상 동등하다.
- [0144] QD 층들(122)의 수가 증가하면, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 최대 방사성 재결합 레이트가 증가한다. QD 층들(122)의 수가 다섯 개(5)의 층들일 때, 최대 방사성 재결합 레이트가 상한에 도달하며, QD 층들의 수 n을 더 증가시키는 것은 최대 방사성 재결합 레이트의 추가적인 증가를 야기하지 않을 것이다.
- [0145] 반면, 단일 QD 층의 두께가 증가하면(즉, n이 증가하면), 통상적인 QLED 디바이스의 최대 방사성 재결합 레이트가 감소한다.
- [0146] 도 13은 4개의 QB 층들(124)과 인터리브된 5개의 QD 층들(122)을 갖는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 각각의 QD 층(122) 내의 방사성 재결합을 도시한다. 비교로서, 도 14는 단일 QD 층을 갖는 그리고 어떠한 QB 층들도 없는 통상적인 QLED 디바이스의 QD 층 내의 방사성 재결합을 도시한다.
- [0147] 도 15a 및 도 15b는 4개의 QB 층들(124)과 인터리브된 5개의 QD 층들(122)을 갖는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 각각의 QD 층(122) 내의 전자들의 농도를 도시한다. 비교로서, 도 16a 및 도 16b는 단일 QD 층을 갖는 그리고 어떠한 QB 층들도 없는 통상적인 QLED 디바이스의 QD 층 내의 전자들의 농도를 도시한다.
- [0148] 도 17은 다양한 동작 전압들(1 V 내지 6 V)에서의 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 자연 방출 레이트 대 파장을 도시하며, 여기에서 자연 방출은 또한 발광으로 치칭되며 이는 양자 기계 시스템이 여기된-에너지 상태에서부터 더 낮은-에너지 상태로 천이하는 프로세스이고, 광자 형태의 에너지를 방출한다. 도 17에서, 제 1 피크(152)는 QB 층들(124)의 존재 때문에 발생하며, 제 2 피크(154)는 양자점들과 관련된다. 또한, 1 V로부터 6 V로 동작 전압이 증가하면 광 방출 피크가 증가한다는 것이 보여질 수 있다.

- [0149] 도 18은 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)에 의해 생성되는 총 에너지 대 전류 강도를 도시한다. 도 18은 총 에너지와 전류 사이에 선형적인 경향이 존재한다는 것을 보여준다.
- [0150] 도 19는 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 송신되는 광자들 대 전류를 도시한다. 광자의 초기 에너지 및 그것의 편향 각도를 포함하는 2개의 인자들이 광자 송신들의 에너지의 양을 결정한다. 각각의 광자는 그것의 파장과 관련된 특정 에너지를 운반한다. 따라서, 짧은 파장의 광자들은 긴 파장의 광자들보다 더 많은 에너지를 운반한다. 또한, 방사성 재결합의 유형(직접 재결합, 쇼클리-리드-홀(Shockley-Read-Hall; SRH) 재결합, 또는 오제 재결합)에 기초하여, 송신되는 광자들은 전류 밀도와 함께 변화한다.
- [0151] 도 20은 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 송신되는 광자들 대 전류 밀도의 퍼센트를 도시한다. 도 20은 QD 층들로서 CdSe/ZnS를 사용하는 다중-QD-층 QLED(100)에서 송신되는 광자들의 최고 퍼센트가 385 A/m에서 관찰될 수 있다는 것을 보여준다.
- [0152] 도 21은 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)의 방출/방사 패턴을 도시한다. 도시된 바와 같이, 다중-QD-층 QLED 디바이스(100)는 실질적으로 방출 표면에 수직인 방향에서 최대 방출 파워를 갖는 지향성 광원이다. 도 21에 도시된 방사 패턴은, 가시성의 특정 각도에 대하여 광을 분산시키거나 또는 포커싱하기 위한 플라스틱 렌즈들과 같은 패키지들을 사용하지 않으면 최대 광의 방향의 20° 내에서 에너지의 대부분이 방출된다는 것을 나타낸다.
- [0153] QLED 디바이스의 대안적인 구조체
- [0154] 이상의 실시예들에 있어서, QLED(100)는, 그렇지 않았다면 활성 방출 영역(106)과 HIL(110)의 계면에서 발생할 수 있는 홀들 및 전자들의 비-방사성 재결합을 방지하기 위하여 활성 방출 영역(106)에 인접하여 HTL(108)를 포함한다.
- [0155] 일부 대안적인 실시예들에 있어서, QLED는 어떠한 HTL도 포함하지 않을 수 있다. 도 22a 및 도 22b는 이러한 실시예들에서의 QLED(300)의 구조체를 도시한다. 도 23a는 이러한 실시예들에서의 시뮬레이션에서 사용되는 다중-QD-층 QLED 디바이스(300)의 구조체를 도시하며, 도 23b는 다중-QD-층 QLED 디바이스(300)의 층들에 대한 에너지 레벨 다이어그램을 도시한다.
- [0156] 도시된 바와 같이, 활성 방출 영역(106)은 ETL/HBL(104)과 HIL(110) 사이에 샌드위치된다. 활성 방출 영역(106)은 HIL(110)에 직접 결합된다.
- [0157] 도 2a 및 도 2b에 도시된 실시예들과 유사하게, 이러한 실시예들에 있어서 활성 방출 영역(106)은 (n - 1)개의 QB 층들과 인터리브된 n개의 QD 층들을 포함하며, 여기에서 n은 1보다 큰 양의 정수이고 그 결과 각각의 QB 층(124)은 인접한 QD 층들(122)의 쌍 사이에 샌드위치된다.
- [0158] 당업자들은, 다양한 실시예들에 있어서, QLED 디바이스(100 또는 300)가, 임의의 적절한 방법들, 예를 들어, 코팅, 나노입자 증착(예컨대 라디오 주파수(RF) 증착, 열 증발 증착 또는 화학 기상 증착(CVD) 방법), 및/또는 유사한 것을 사용함으로써 제조될 수 있음을 이해할 것이다.
- [0159] 일부 대안적인 실시예들에 있어서, 이상에서 설명된 다층 설계 및 아키텍처는 그것의 효율을 개선하기 위하여 일부 유기 발광 다이오드(OLED)들에 적용될 수 있다. 이상에서 설명된 다층 아키텍처를 사용할 때, 이전의 층들이 아세톤 내에 용해된 PMMA에 의해 씻겨지지 않을 것을 보장하기 위하여 적절한 유형의 용매들을 선택하는 것이 중요할 수 있다.
- [0160] 일부 대안적인 실시예들에 있어서, 이상에서 설명된 다층 설계 및 아키텍처는 추가로 QB 층들 사이에 유색(청색/녹색/적색) 층들을 코팅함으로써 백색 QLED들의 제조를 위해 활용될 수 있다.
- [0161] 이상에서 실시예들에 첨부된 도면들을 참조하여 설명되었지만, 당업자들은 첨부된 청구항들에 의해 정의되는 바와 같은 범위로부터 벗어나지 않고 변형들 및 수정들이 이루어질 수 있음을 이해할 것이다.
- [0162] **약어**
- [0163] 3D: 3차원
- [0164] Ag: 은
- [0165] Al: 알루미늄
- [0166] CBP: 4,4'-비스(카르바졸-9-일)비페닐

[0167]	CdSe: 카드뮴 셀레나이드
[0168]	CdSe/ZnS: 카드뮴 셀레나이드/아연 설파이드
[0169]	CIE: 국제 조명 위원회
[0170]	CRI: 연색 평가 지수
[0171]	CVD: 화학 기상 증착
[0172]	DC: 직류
[0173]	EBL: 전자-차단 층
[0174]	EL: 전계 발광
[0175]	ETL: 전자 수송 층
[0176]	eV: 전자볼트
[0177]	FEM: 유한 요소법
[0178]	FWHM: 반치전폭
[0179]	g: 그래프
[0180]	HBL: 홀-차단 층
[0181]	HIL: 홀-주입 층
[0182]	HTL: 홀-수송 층
[0183]	IQE: 내부 양자 효율
[0184]	ITO: 인듐 주석 산화물
[0185]	LED: 발광 다이오드
[0186]	LUMO: 최저 비점유 분자 오비탈
[0187]	ml: 밀리리터
[0188]	NIR: 근적외선
[0189]	nm: 나노미터
[0190]	NPB: N,N'-디페닐-N,N'-비스(1-나프틸-페닐)-(1,1'-비페닐)-4,4'-디아민
[0191]	OLED: 유기 발광 다이오드
[0192]	PEDOT:PSS: 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜) 폴리스티렌 설포네이트
[0193]	PEIE: 폴리에틸렌이민 에톡실레이티드
[0194]	PL: 광발광
[0195]	PMMA: 폴리(메틸 메타크릴레이트)
[0196]	폴리-TPD: 폴리[N,N'-비스(4-부틸페닐)-N,N'-비스페닐벤지딘]
[0197]	PVDF: 폴리비닐리덴 디플루오라이드
[0198]	PVK: 폴리(9-비닐카바졸)
[0199]	QB: 양자-장벽
[0200]	QD: 양자점
[0201]	QLED: 양자점 발광 다이오드
[0202]	QY: 양자 수율

- [0203] RF: 라디오 주파수
- [0204] RO: 역삼투
- [0205] SEM: 주사 전자 현미경
- [0206] SRH: 쇼클리-리드-홀
- [0207] TAPC: 4,4'-사이클로헥실리덴비 [N,N-비스(4-메틸페닐)벤젠아민]
- [0208] TCTA: 4,4',4"-트리(N-카르바졸릴)트리페닐아민
- [0209] UV: 자외선
- [0210] V: 볼트
- [0211] ZnO: 아연 산화물
- [0212] ZnS: 아연 설파이드
- [0213] **참조 문헌들**
- [0214] [1] P. Reiss, J. Bleuse, and A. Pron, "Highly Luminescent CdSe/ZnSe Core/Shell Nanocrystals of Low Size Dispersion," *Nano Lett.*, vol. 2, no. 7, pp. 781-784, 2002.
- [0215] [2] P. O. Anikeena, J. E. Halpert, M. G. Bawendi, and V. Bulovic, "Quantum Dot Light-Emitting Devices with Electroluminescence Tunable over the Entire Visible Spectrum," *Nano Lett.*, vol. 9, pp. 2532-2536, 2009.
- [0216] [3] J. J. Li et al., "Large-scale synthesis of nearly monodisperse CdSe/CdS core/shell nanocrystals using air-stable reagents via successive ion layer adsorption and reaction," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 125, no. 41, pp. 12567-12575, 2003.
- [0217] [4] F. Chen et al., "Enhanced Performance of Quantum Dot-Based Light-Emitting Diodes with Gold Nanoparticle-Doped Hole Injection Layer," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 11, no. 1, 2016.
- [0218] [5] Q. Huang et al., "High-performance quantum dot light-emitting diodes with hybrid hole transport layer via doping engineering," *Opt. Express*, vol. 24, no. 23, p. 25955, 2016.
- [0219] [6] X. Yang et al., "Highly flexible, electrically driven, top-emitting, quantum dot light-emitting stickers," *ACS Nano*, vol. 8, no. 8, pp. 8224-8231, 2014.
- [0220] [7] X. I. A. O. J. In et al., "Efficient light-emitting diodes based on reverse type-I quantum dots," vol. 7, no. 12, pp. 9297-9305, 2017.
- [0221] [8] S. Baskoutas and A. F. Terzis, "Size-dependent band gap of colloidal quantum dots," *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 1, 2006.
- [0222] [9] N. Chestnoy, T. D. Harris, R. Hull, and L. E. Brus, "Luminescence and photophysics of cadmium sulfide semiconductor clusters: the nature of the emitting electronic state," *J. Phys. Chem.*, vol. 90, no. 15, pp. 3393-3399, 1986.
- [0223] [10] C. B. Murray, C. R. Kagan, and M. G. Bawendi, "Synthesis and Characterization of Monodisperse Nanocrystals and Close-Packed Nanocrystal Assemblies," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 545-610, 2000.
- [0224] [11] H. Zhang et al., "Ultrastable Quantum-Dot Light-Emitting Diodes by Suppression of Leakage Current and Exciton Quenching Processes," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 45, pp. 31385-31391, 2016.
- [0225] [12] J. Piprek, F. Rømer, and B. Witzigmann, "On the uncertainty of the Auger recombination coefficient extracted from InGaN/GaN light-emitting diode efficiency droop measurements," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 10, 2015.
- [0226] [13] B. Zhu et al., "Low turn-on voltage and highly bright Ag-In-Zn-S quantum dot light-emitting

diodes," J. Mater. Chem. C, vol. 6, no. 17, pp. 4683-4690, 2018.

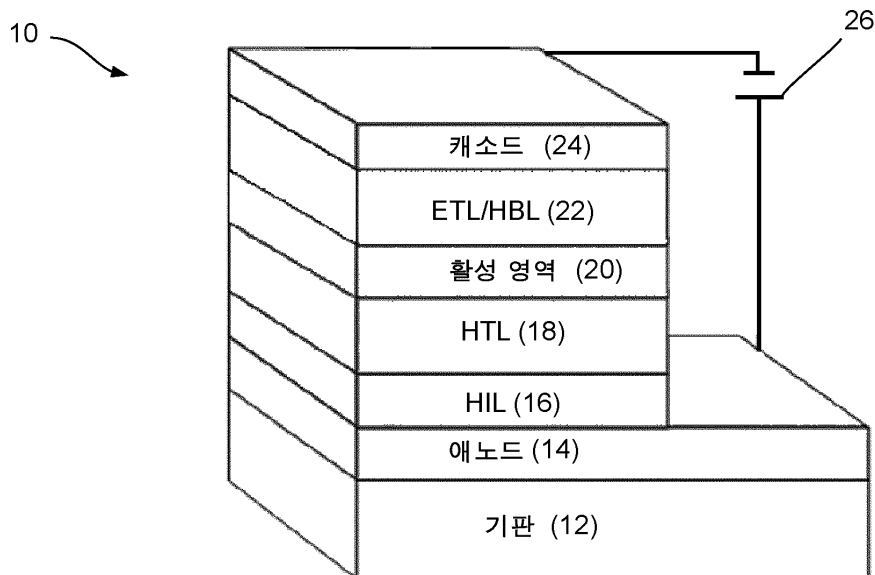
- [0227] [14] K. Qasim et al., "Large-Area Quantum-Dot Light Emitting Diode Arrays with ZnO Nanoparticles as Electron Transport/Injection Layer," Sci. Adv. Mater., vol. 6, no. 12, pp. 2625-2631, 2014.
- [0228] [15] J. Pan, J. Chen, Q. Huang, L. Wang, and W. Lei, "A highly efficient quantum dot light emitting diode: Via improving the carrier balance by modulating the hole transport," RSC Adv., vol. 7, no. 69, pp. 43366-43372, 2017.
- [0229] [16] X. Dai et al., "Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots," Nature, vol. 515, no. 7525, pp. 96-99, 2014.
- [0230] [17] Q. Zhang et al., "Enhancing extraction efficiency of quantum dot light-emitting diodes by surface engineering," Opt. Express, vol. 25, no. 15, p. 17683, 2017.
- [0231] [18] Y. Dong et al., "20.2: Ultra-Bright, Highly Efficient, Low Roll-Off Inverted Quantum-Dot Light Emitting Devices (QLEDs)," SID Symp. Dig. Tech. Pap., vol. 46, no. 1, pp. 270-273, 2015.
- [0232] [19] H. H. Kim et al., "Inverted quantum dot light emitting diodes using polyethylenimine ethoxylated modified ZnO," Sci. Rep., vol. 5, pp. 1-5, 2015.
- [0233] [20] Y. Jiang, H. Tang, S. Chen, and H. Kwok, "Optimizing the Balance of Holes and Electrons in Inverted Quantum Dot Light-Emitting Diodes by Inserting Electron Transportation Barrier Layer," SID Tec. Dig., pp. 274-277, 2015.
- [0234] [21] G. F. Yang et al., "InGaN / GaN multiple quantum wells on selectively grown GaN microfacets and the applications for phosphor-free white light-emitting diodes," Rev. Phys., vol. 1, no. 1800, pp. 101-119, 2016.
- [0235] [22] I. Al - Deen Hussein Ali Al - Saidi and R. Jabar, "Investigation of Optical Properties of Solochrome Dark Blue Dye Doped Polymer Films," J. Mater. Phys. Chem., vol. 5, no. 1, pp. 32-38, 2017.
- [0236] [23] D. I. Son, C. H. You, J. H. Jung, and T. W. Kim, "Carrier transport mechanisms of organic bistable devices fabricated utilizing colloidal ZnO quantum dot-polymethylmethacrylate polymer nanocomposites," Appl. Phys. Lett., vol. 97, no. 1, pp. 1-4, 2010.
- [0237] [24] C. Pacholski, A. Kornowski, and H. Weller, "Self-assembly of ZnO: From nanodots to nanorods," Angew. Chemie - Int. Ed., vol. 41, no. 7, pp. 1188-1191, 2002.
- [0238] [25] E. A. Meulenkaamp, "Synthesis and Growth of ZnO Nanoparticles," J. Phys. Chem. B, vol. 102, no. 29, pp. 5566-5572, 1998.
- [0239] [26] S. Dayneko et al., "Effect of surface ligands on the performance of organic light-emitting diodes containing quantum dots," Proc. SPIE Vol. 9270, vol. 103, no. 6, p. 927009, 2014.
- [0240] [27] S. R. Forrest, D. D. C. Bradley, and M. E. Thompson, "Measuring the Efficiency of Organic Light-Emitting Devices," Adv. Mater., vol. 15, no. 13, pp. 1043-1048, 2003.
- [0241] [28] Z. Li et al., "A low-work-function, high-conductivity PEDOT:PSS electrode for organic solar cells with a simple structure," Synth. Met., vol. 210, pp. 363-366, 2015.
- [0242] [29] U. Wurfel, A. Cuevas, and P. Wurfel, "Charge carrier separation in solar cells," IEEE J. Photovoltaics, vol. 5, no. 1, pp. 461-469, 2015.
- [0243] [30] S. S. Lo, L. Yang, and C. P. Chiu, "ZnO/poly(N-vinylcarbazole) coaxial nanocables for white-light emissions," J. Mater. Chem. C, vol. 3, no. 3, pp. 686-692, 2015.
- [0244] [31] F. Meng et al., "An organic-inorganic hybrid UV photodetector based on a TiO₂ nanobowl array with high spectrum selectivity," RSC Adv., vol. 3, no. 44, pp. 21413-21417, 2013.
- [0245] [32] V. L. Colvin, M. C. Schlamp, and A. P. Alivisatos, "Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer," Nature, vol. 370, no. 6488, pp. 354-357, 1994.

- [0246] [33] M. K. Choi, J. Yang, T. Hyeon, and D.-H. Kim, "Flexible quantum dot light-emitting diodes for next-generation displays," *npj Flex. Electron.*, vol. 2, no. 1, p. 10, 2018.
- [0247] [34] B. O. Dabbousi et al., "(CdSe)ZnS Core-Shell Quantum Dots: Synthesis and Characterization of a Size Series of Highly Luminescent Nanocrystallites," *J. Phys. Chem. B*, vol. 101, no. 46, pp. 9463-9475, 1997.
- [0248] [35] M. Mehrjoo, M. Molaei, and M. Karimipour, "A novel process for synthesis of CdSe/ZnS core-shell QDs and their application for the Methyl orange (MO) degradation," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 201, pp. 165-169, 2017.
- [0249] [36] D. V. Talapin, A. L. Rogach, A. Kornowski, M. Haase, and H. Weller, "Highly Luminescent Monodisperse CdSe and CdSe/ZnS Nanocrystals Synthesized in a Hexadecylamine-Trioctylphosphine Oxide-Trioctylphosphine Mixture," *Nano Lett.*, vol. 1, no. 4, pp. 207-211, 2001.
- [0250] [37] L. Qian, Y. Zheng, J. Xue, and P. H. Holloway, "Stable and efficient quantum-dot light-emitting diodes based on solution-processed multilayer structures," *Nat. Photonics*, vol. 5, no. 9, pp. 543-548, 2011.
- [0251] [38] H. Peng, W. Wang, and S. Chen, "Efficient Quantum-Dot Light-Emitting Diodes With 4,4,4-Tris(N-Carbazolyl)-Triphenylamine (TcTa) Electron-Blocking Layer," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 36, no. 4, pp. 369-371, 2015.
- [0252] [39] J. Kwak et al., "Bright and efficient full-color colloidal quantum dot light-emitting diodes using an inverted device structure," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 5, pp. 2362-2366, 2012.
- [0253] [40] B. S. Mashford et al., "High-efficiency quantum-dot light-emitting devices with enhanced charge injection," *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 5, pp. 407-412, 2013.
- [0254] [41] W. Wang, H. Peng, and S. Chen, "Highly transparent quantum-dot light-emitting diodes with sputtered indium-tin-oxide electrodes," *J. Mater. Chem. C*, vol. 4, no. 9, pp. 1838-1841, 2016.
- [0255] [42] J. Meyer et al., "Transparent inverted organic light-emitting diodes with a tungsten oxide buffer layer," *Adv. Mater.*, vol. 20, no. 20, pp. 3839-3843, 2008.
- [0256] [43] G. Parthasarathy, C. Adachi, P. E. Burrows, and S. R. Forrest, "High-efficiency transparent organic light-emitting devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 15, pp. 2128-2130, 2000.
- [0257] [44] Y. J. Lee et al., "Development of inverted OLED with top ITO anode by plasma damage-free sputtering," *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 14, pp. 4019-4022, 2009.
- [0258] [45] D. H. Lee, Y. P. Liu, K. H. Lee, H. Chae, and S. M. Cho, "Effect of hole transporting materials in phosphorescent white polymer light-emitting diodes," *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 11, no. 3, pp. 427-433, 2010.
- [0259] [46] P. D'Angelo et al., "Electrical transport properties characterization of PVK (poly N-vinylcarbazole) for electroluminescent devices applications," *Solid. State. Electron.*, vol. 51, no. 1, pp. 101-107, 2007.
- [0260] [47] Q. Sun et al., "Bright, multicoloured light-emitting diodes based on quantum dots," *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 12, pp. 717-722, 2007.
- [0261] [48] Q. Sun, D. W. Chang, L. Dai, J. Grote, and R. Naik, "Multilayer white polymer light-emitting diodes with deoxyribonucleic acid-cetyltrimethylammonium complex as a hole-transporting/electron-blocking layer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 25, 2008.
- [0262] [49] L. N. Ismail, Z. Habibah, M. H. Abdullah, S. H. Herman, and M. Rusop, "Electrical properties of spin coated PMMA for OFETs applications," *Int. Conf. Electron. Devices, Syst. Appl.*, pp. 333-338, 2011.

- [0263] [50] B. C. Shekar, S. Sathish, and R. Sengoden, "Spin coated nano scale PMMA films for organic thin film transistors," Phys. Procedia, vol. 49, no. 0, pp. 145-157, 2013.
- [0264] [51] H. Q. Zhang, Y. Jin, and Y. Qiu, "The optical and electrical characteristics of PMMA film prepared by spin coating method," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 87, no. 1, 2015.
- [0265] [52] G. Venturi et al., "Dislocation-related trap levels in nitride-based light emitting diodes," Appl. Phys. Lett., vol. 104, no. 21, 2014.
- [0266] [53] S. Reineke, M. Thomschke, B. Lüssen, and K. Leo, "White organic light-emitting diodes: Status and perspective," 2013.
- [0267] [54] "APSYS User's Manual." <http://www.crosslight.com>, 2005.
- [0268] [55] Z. T. Huang et al., "Electron transport in solution-grown TIPS-pentacene single crystals: Effects of gate dielectrics and polar impurities," Chinese Chem. Lett., vol. 27, no. 12, pp. 1781-1787, 2016.

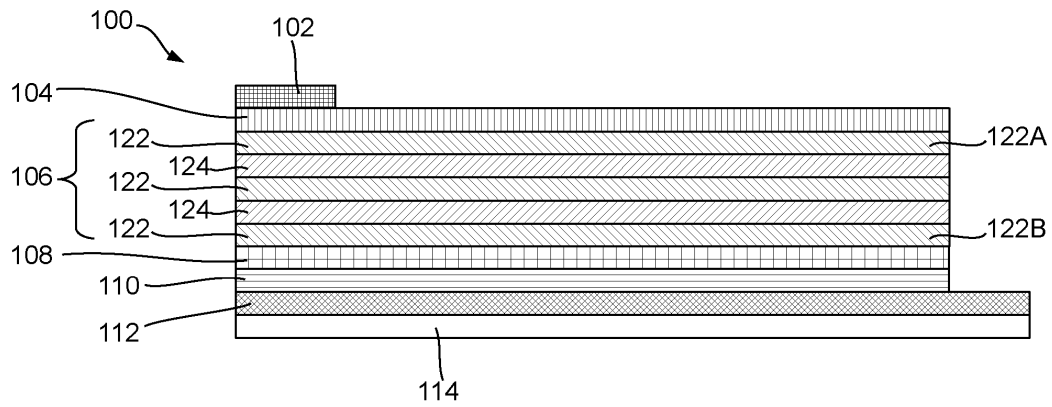
도면

도면1

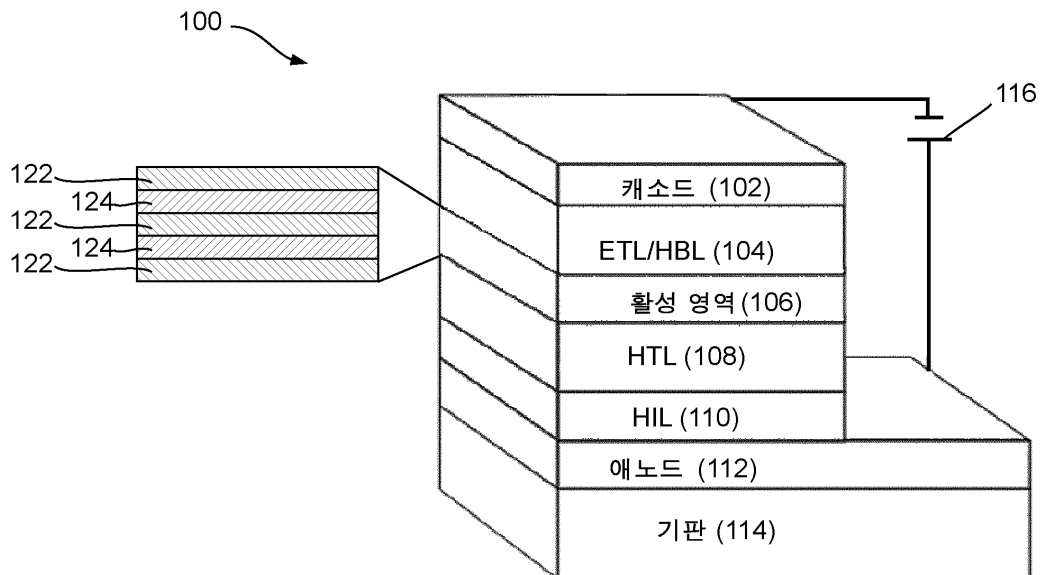


(종래 기술)

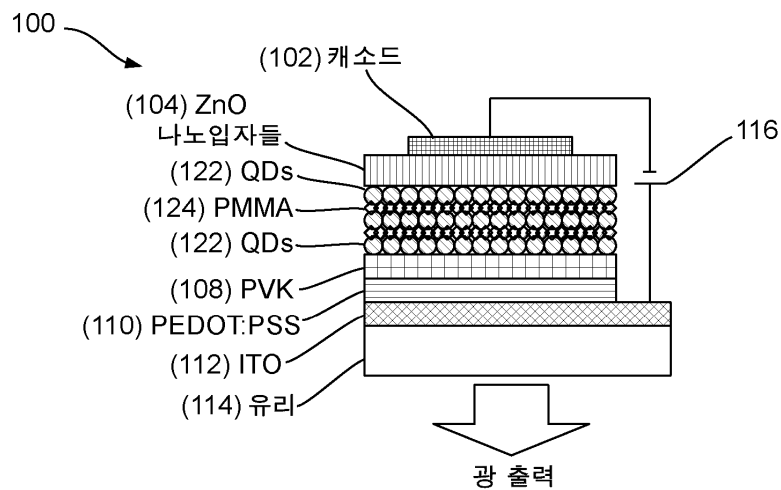
도면2a



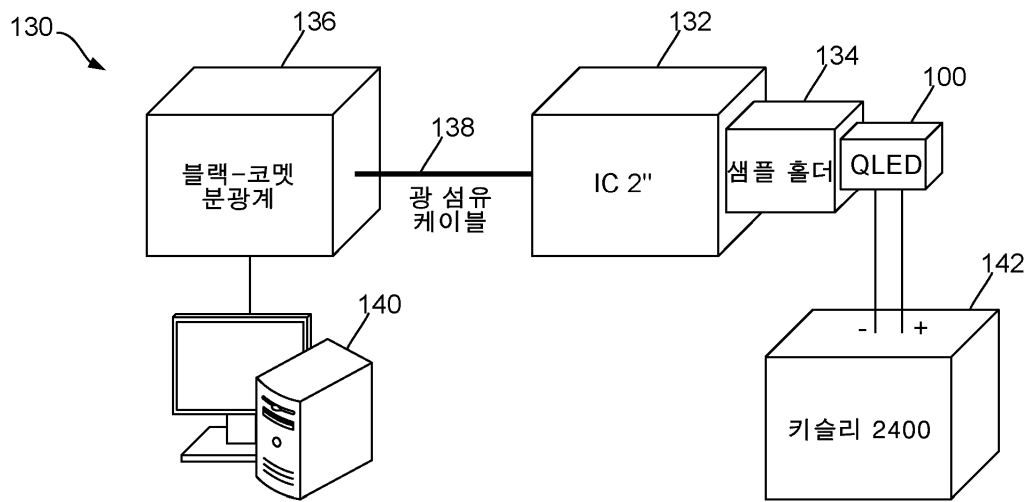
도면2b



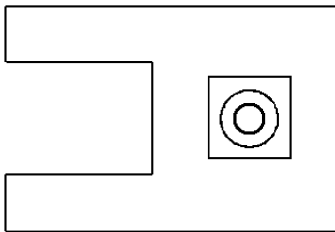
도면3



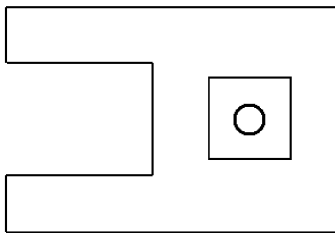
도면4



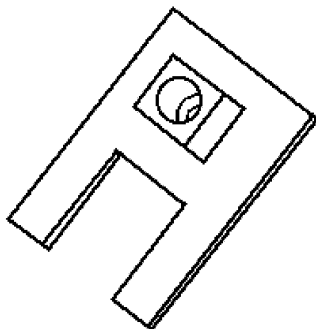
도면5a



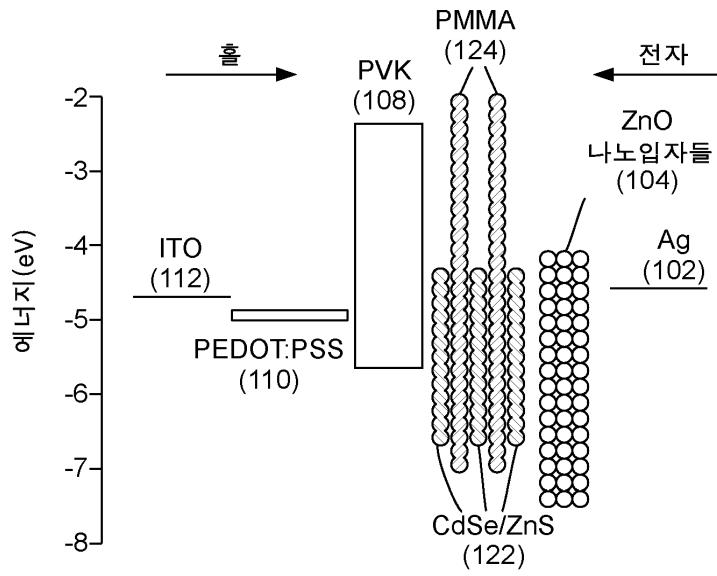
도면5b



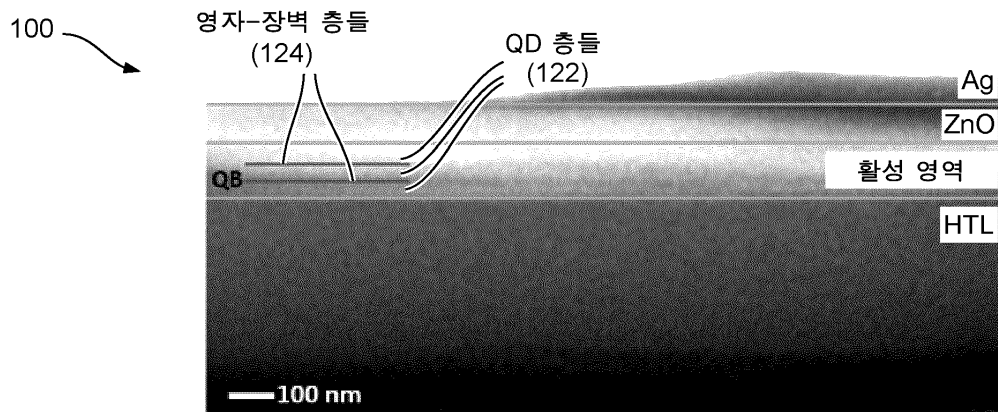
도면5c



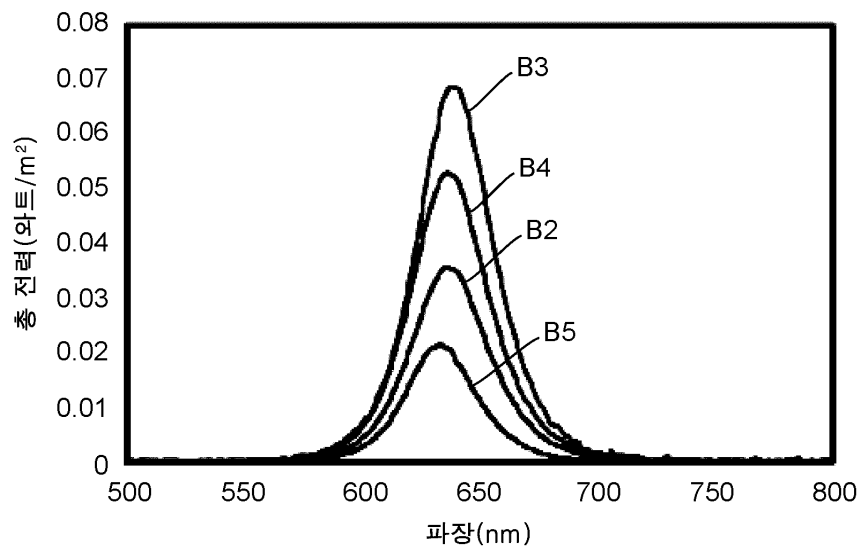
도면6a



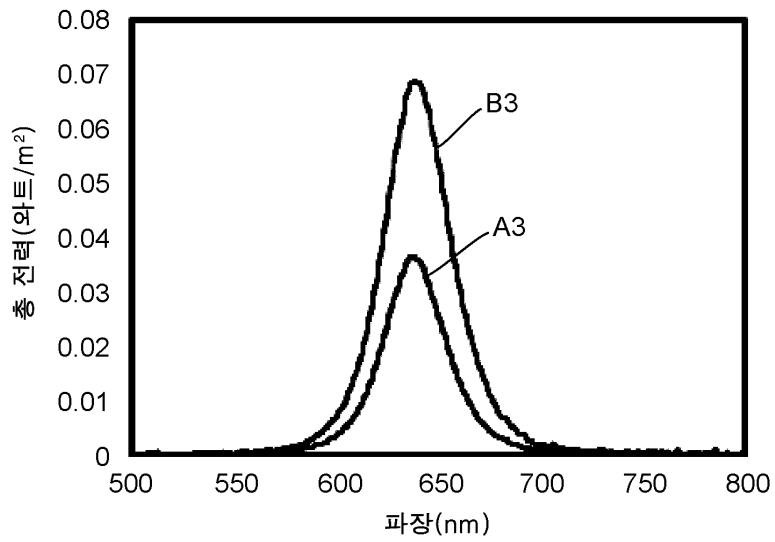
도면6b



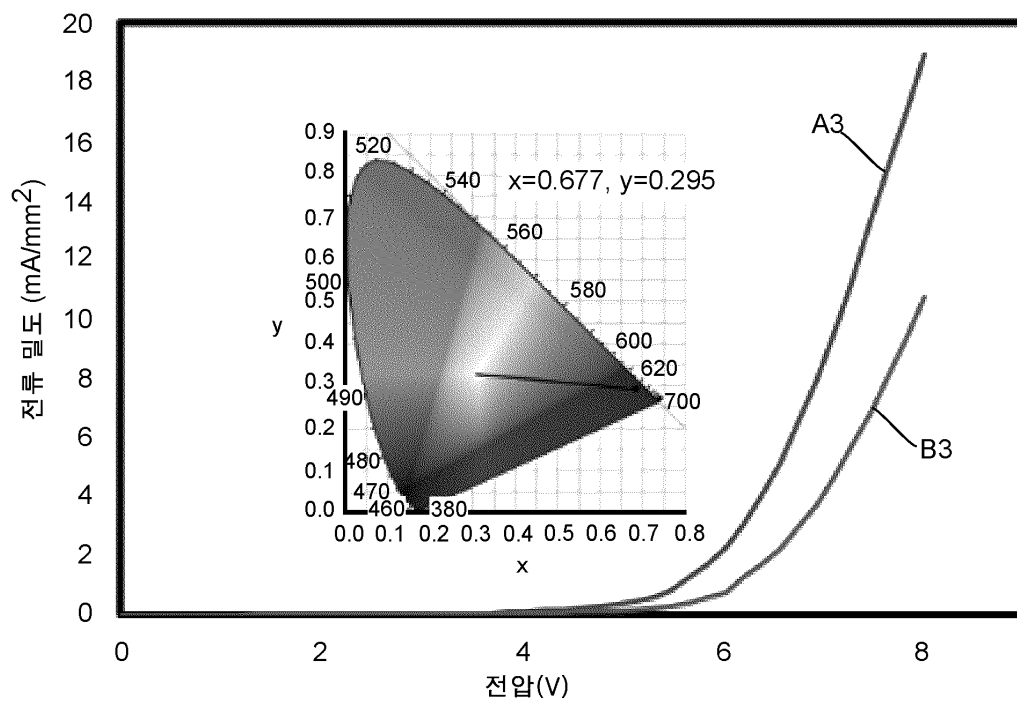
도면7a



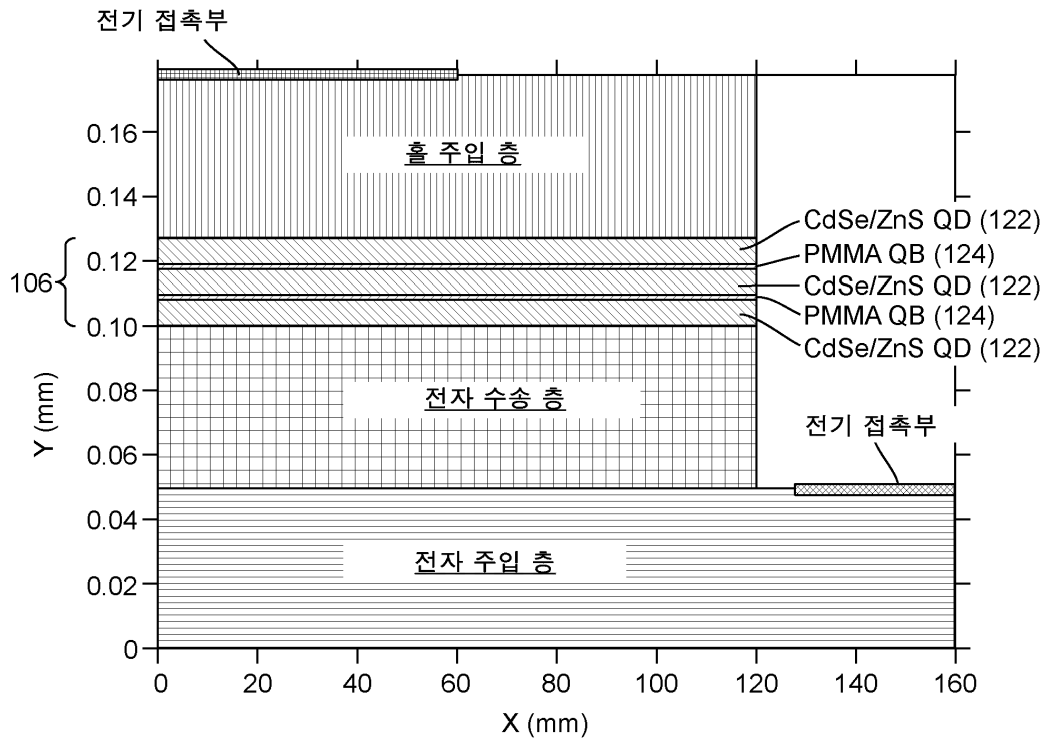
도면7b



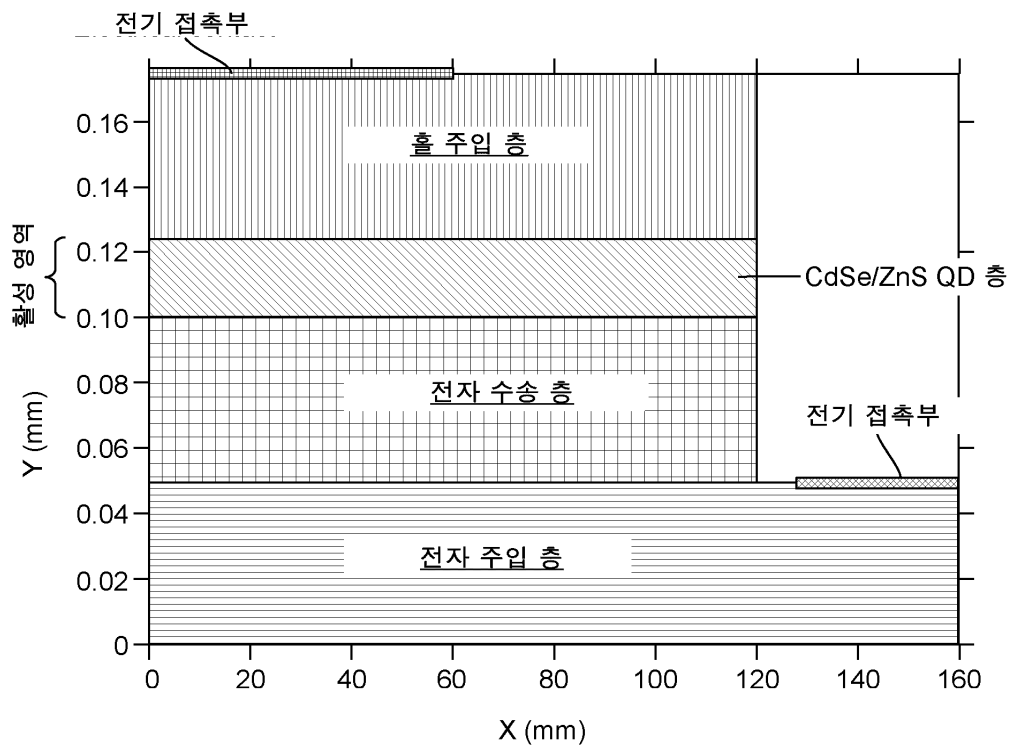
도면7c



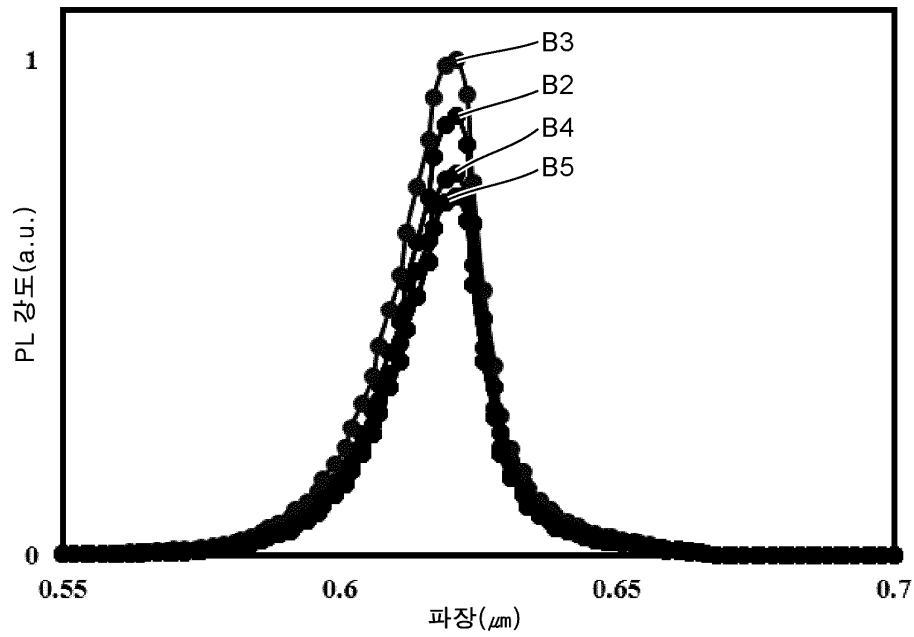
도면8a



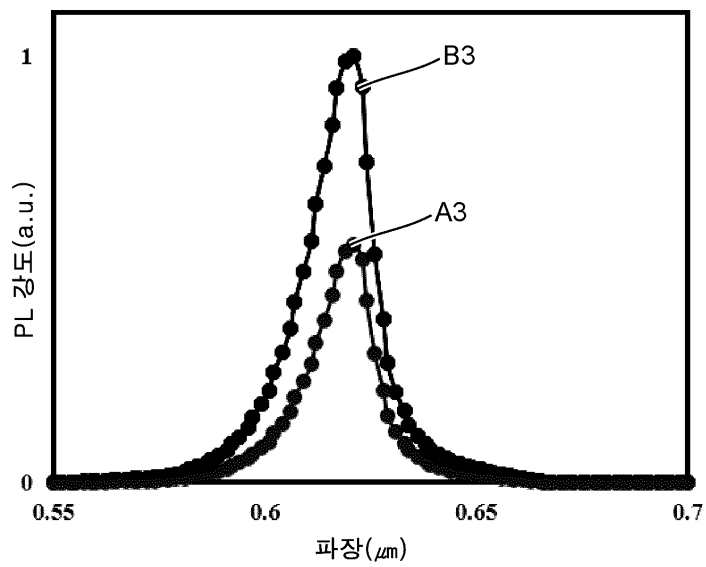
도면8b



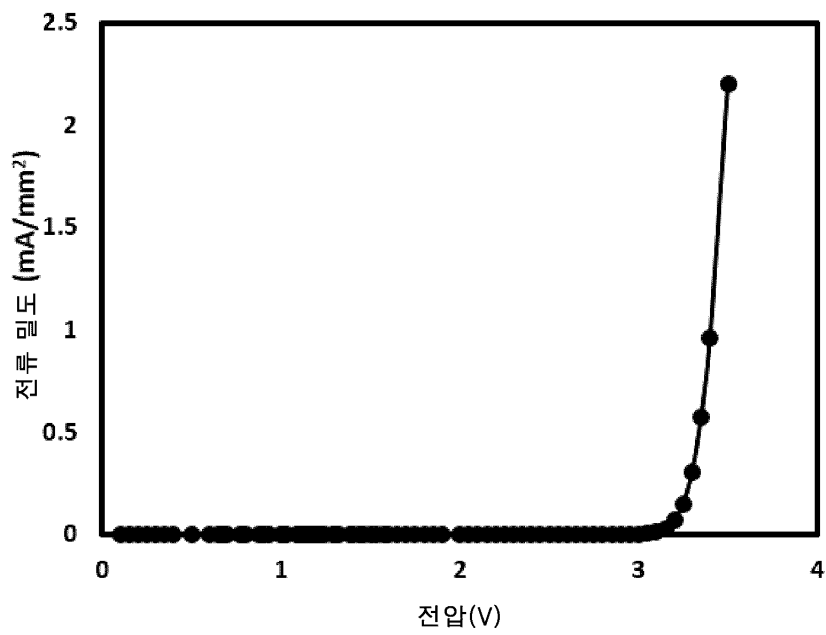
도면9a



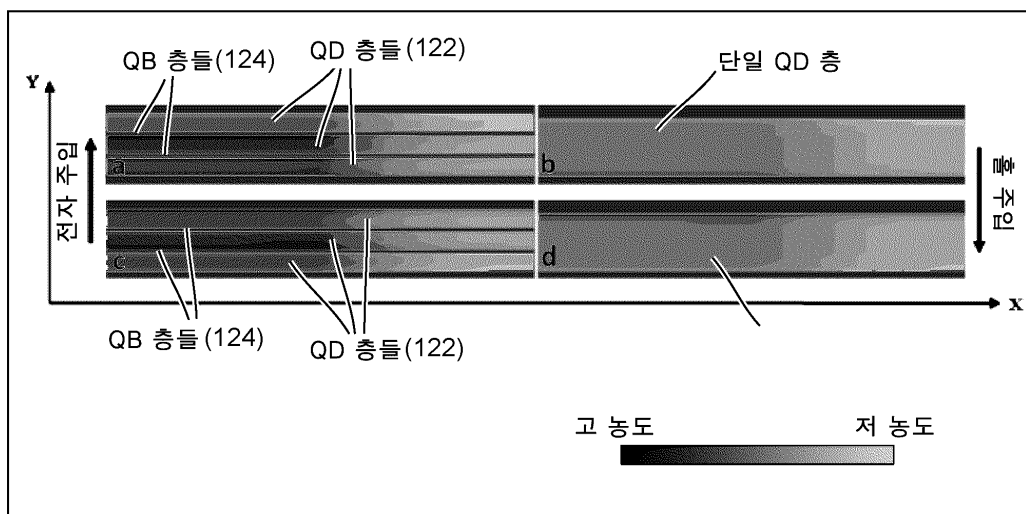
도면9b



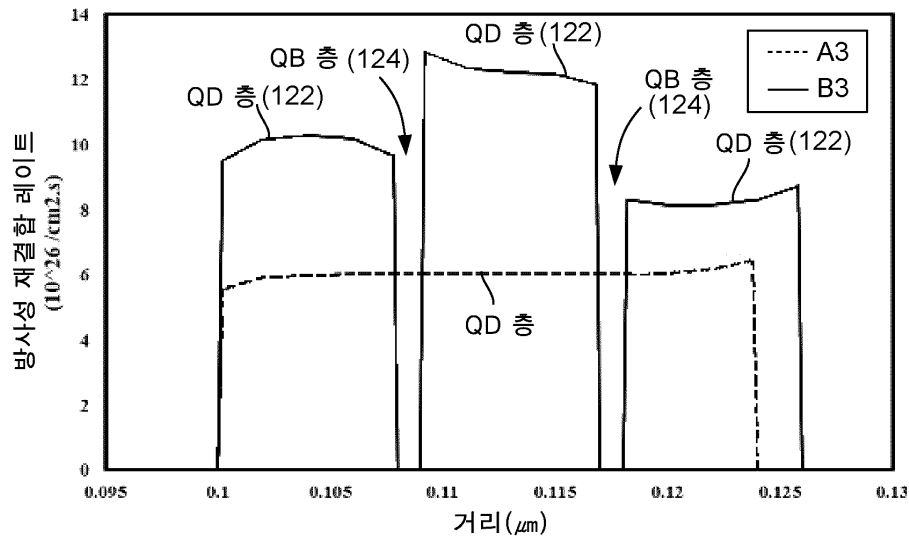
도면9c



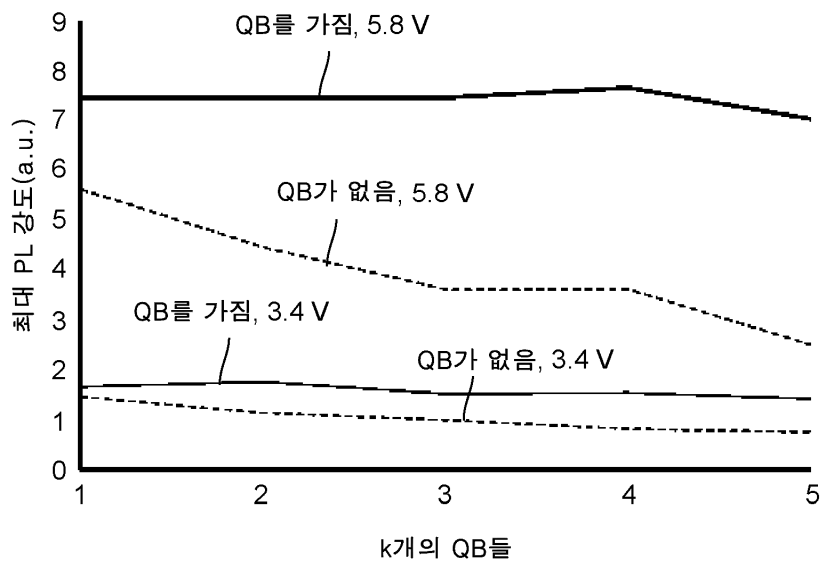
도면10



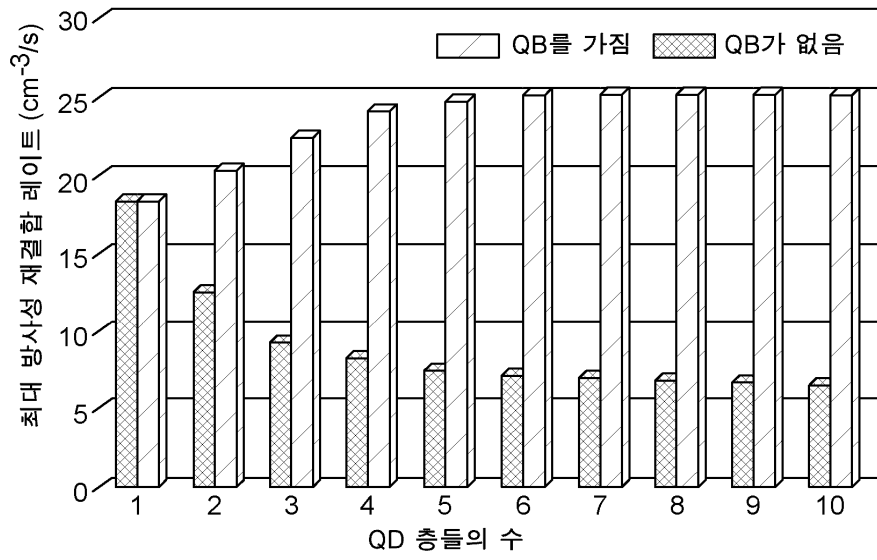
도면11a



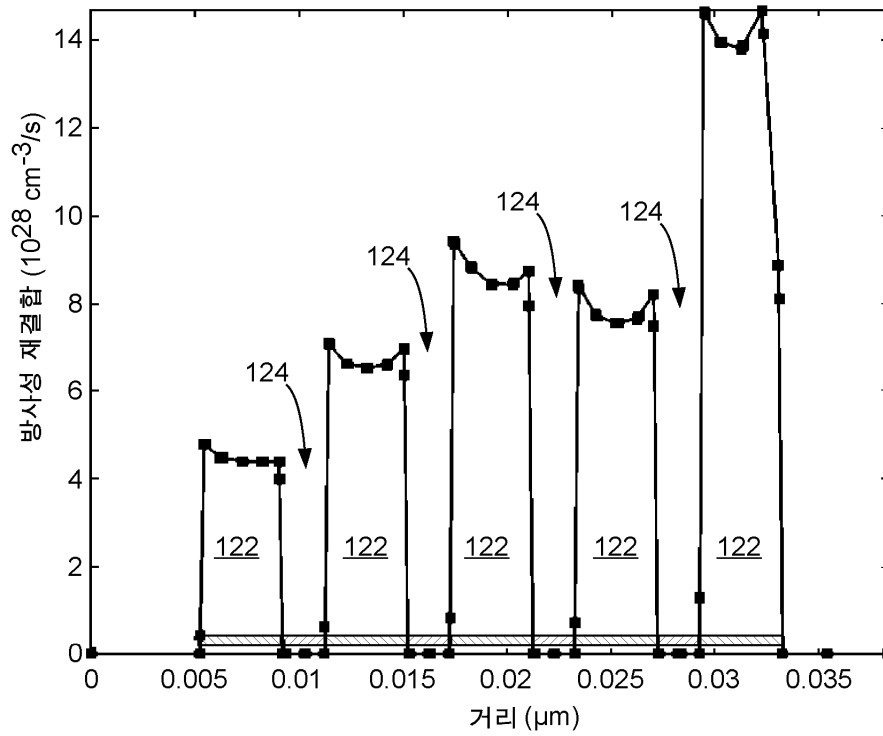
도면11b



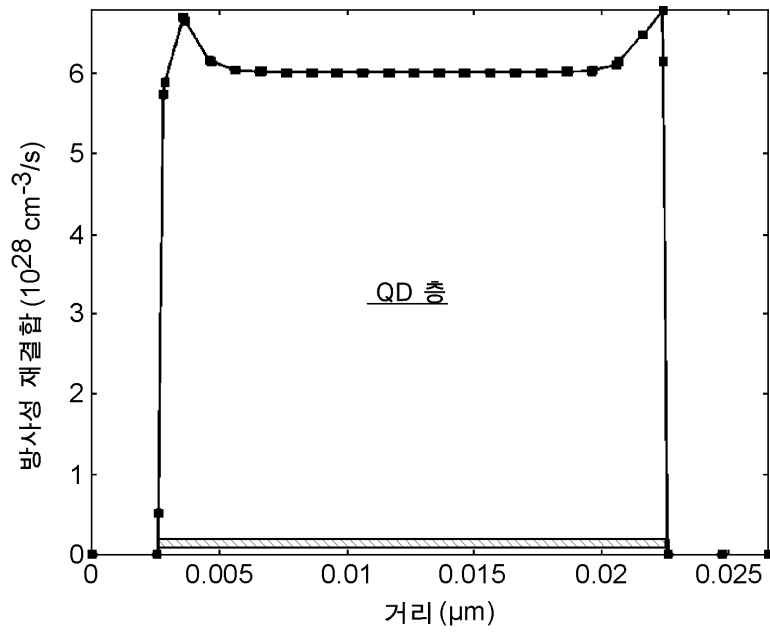
도면12



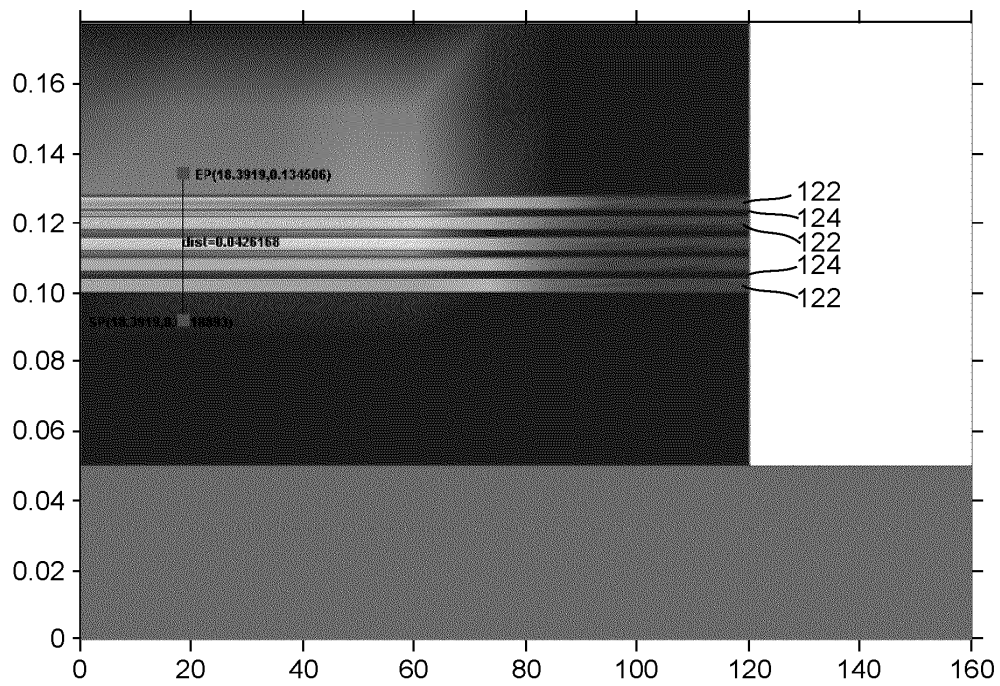
도면13



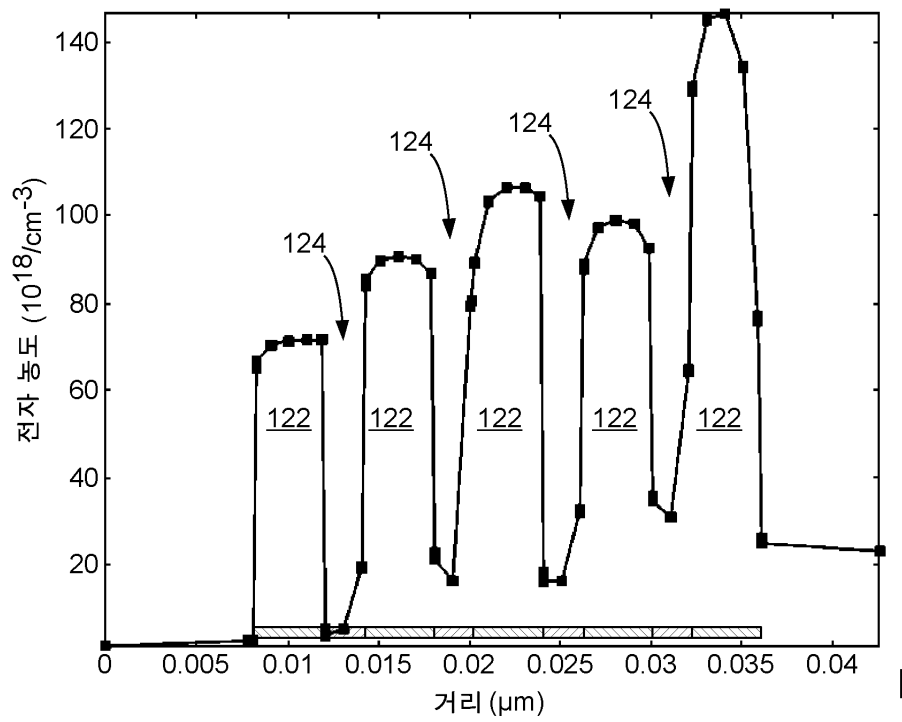
도면14



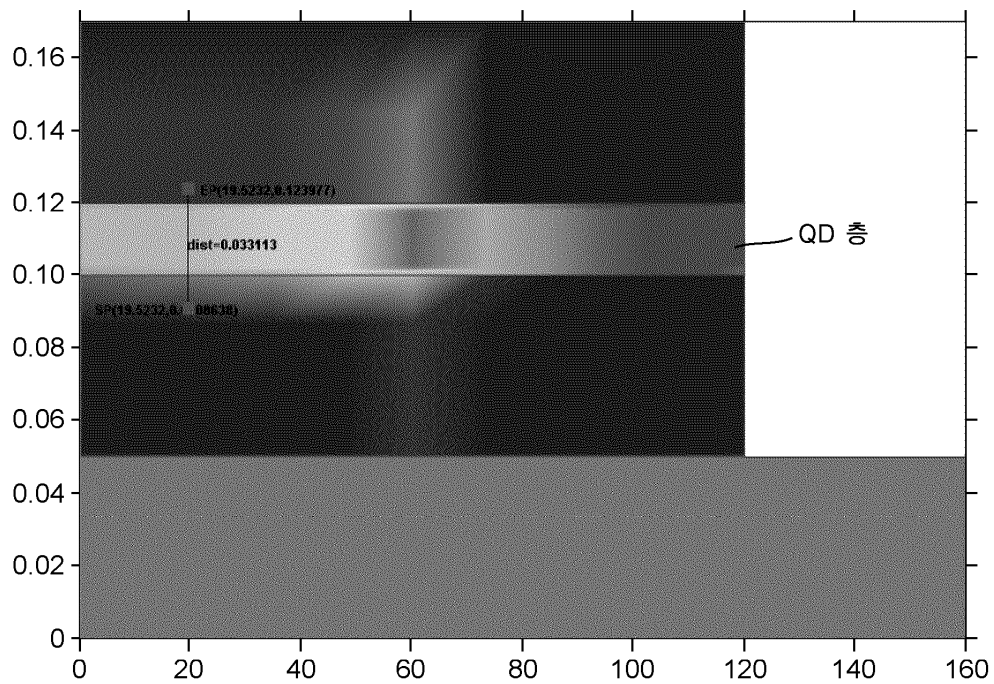
도면15a



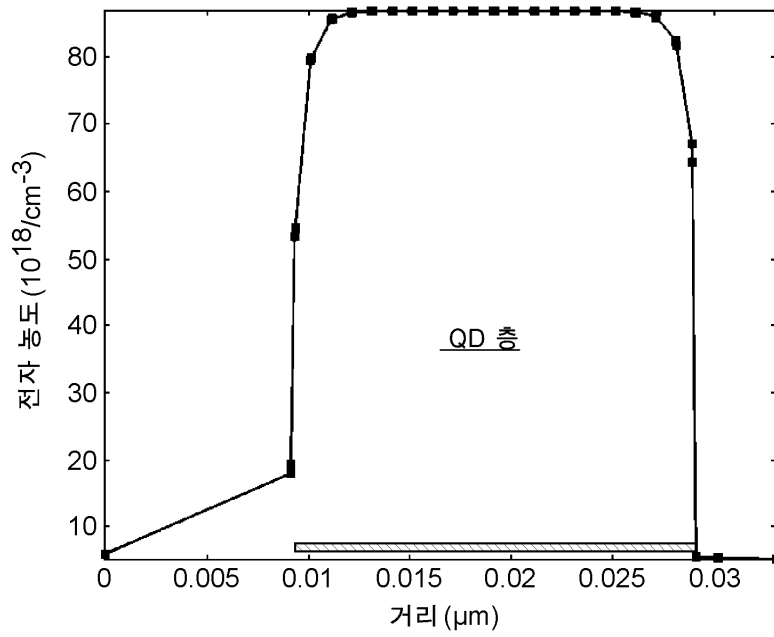
도면15b



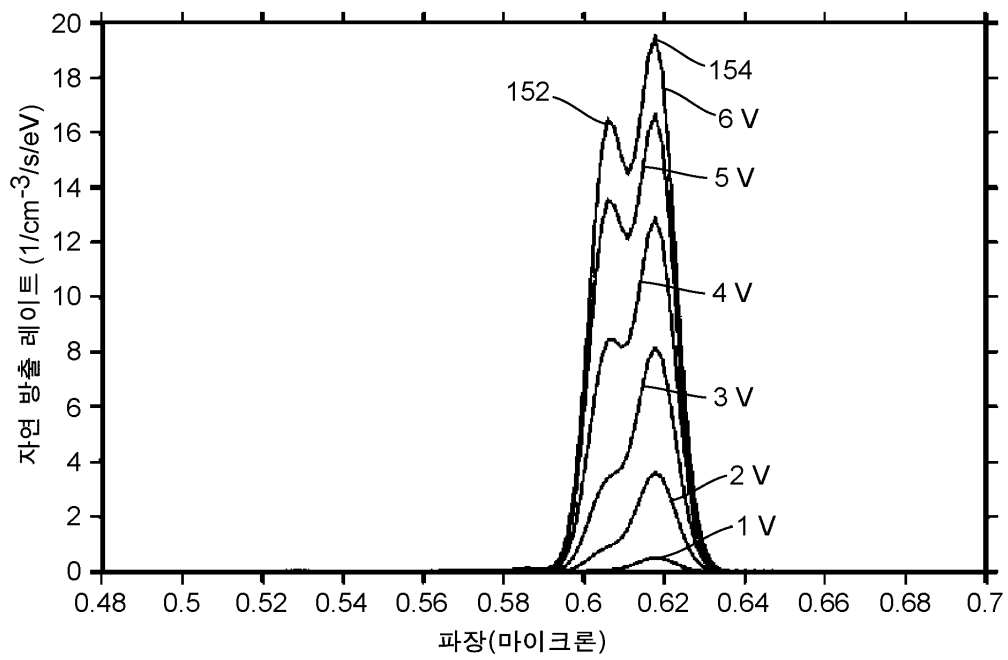
도면16a



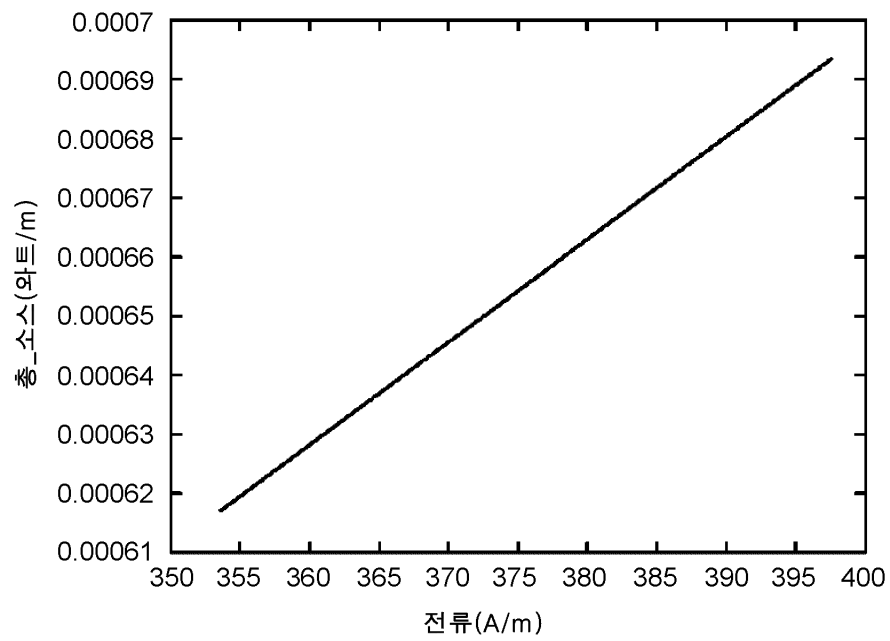
도면16b



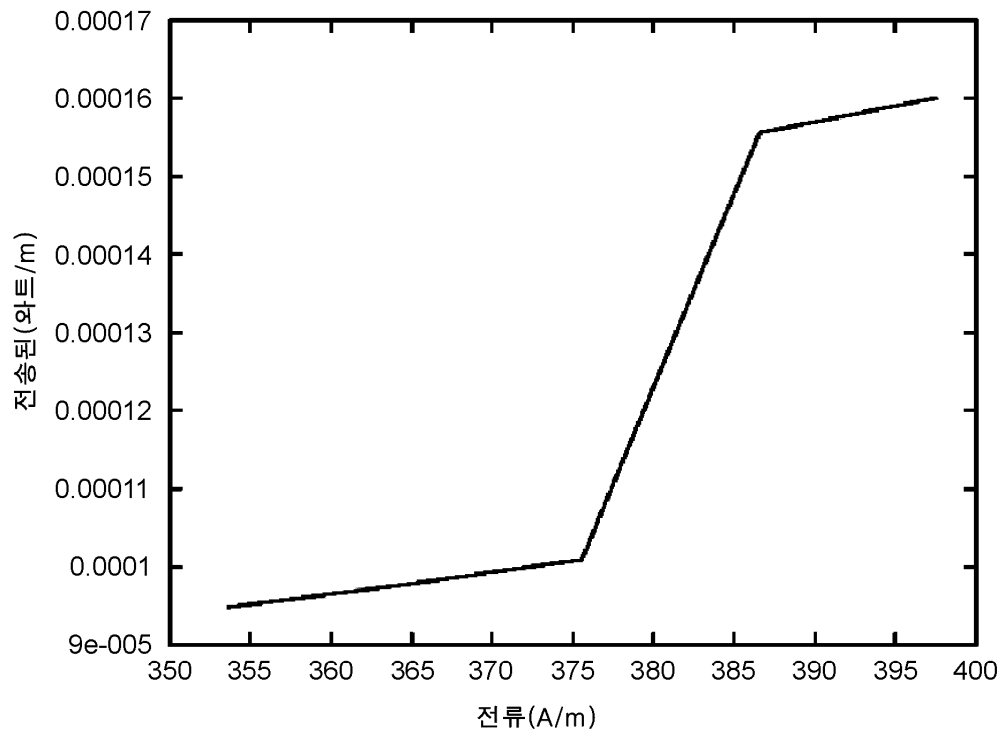
도면17



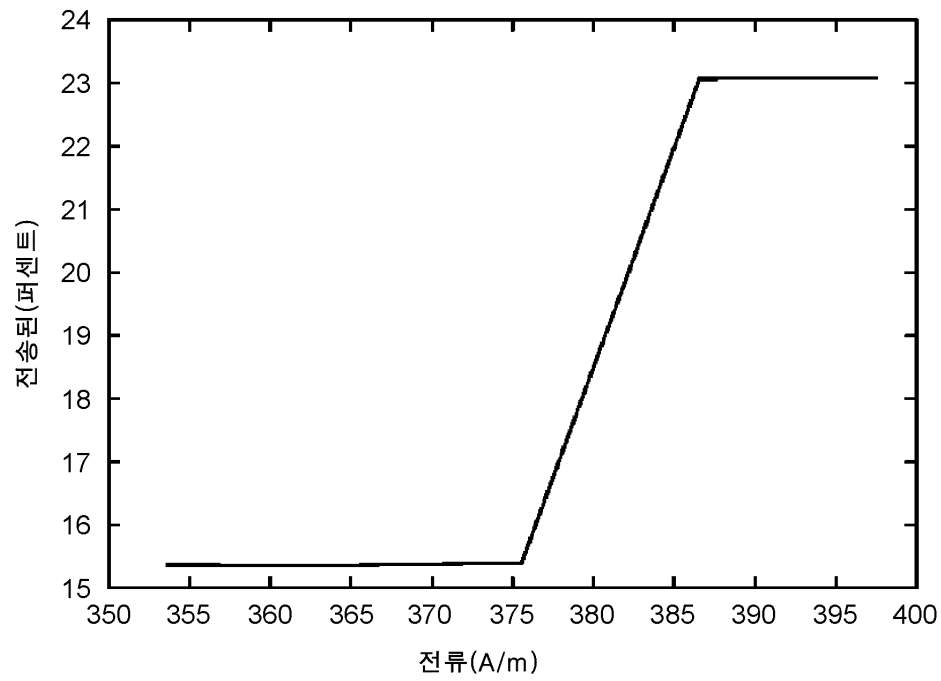
도면18



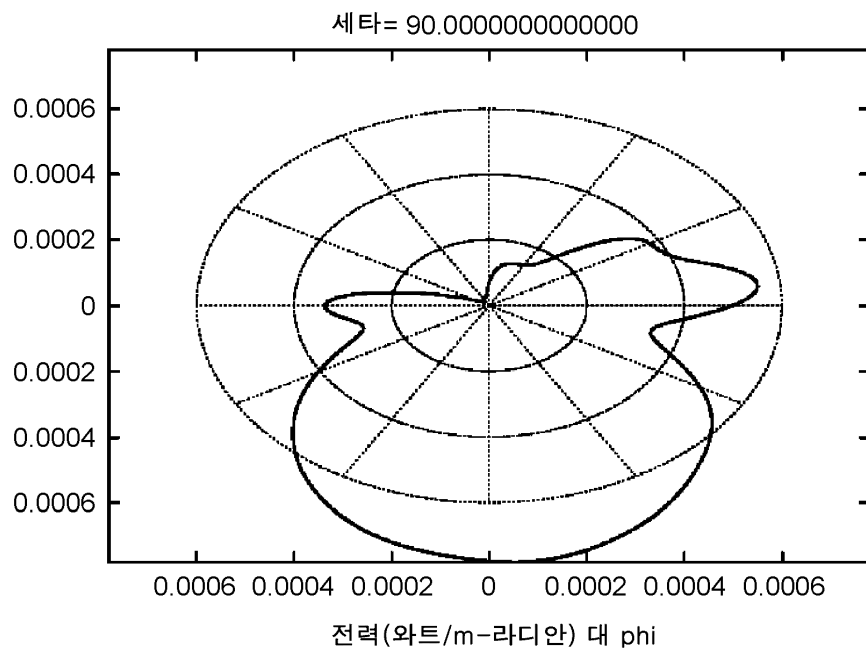
도면19



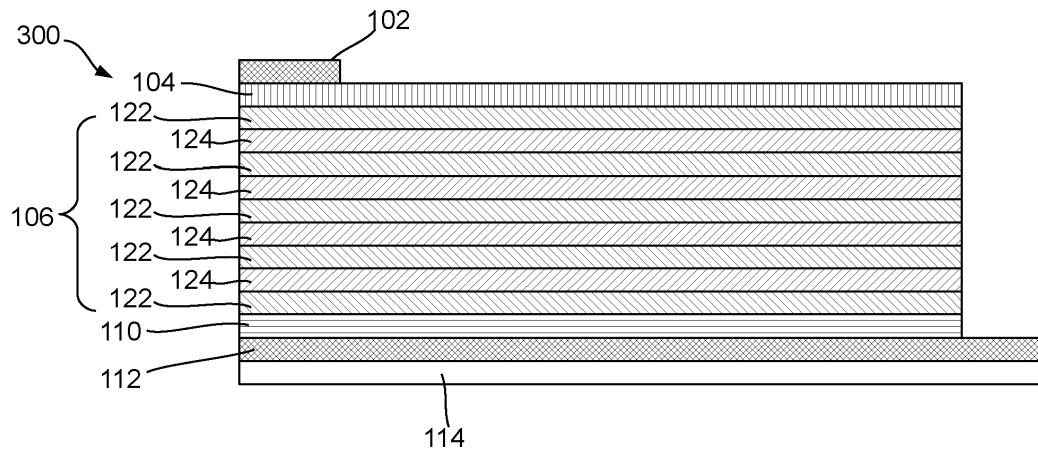
도면20



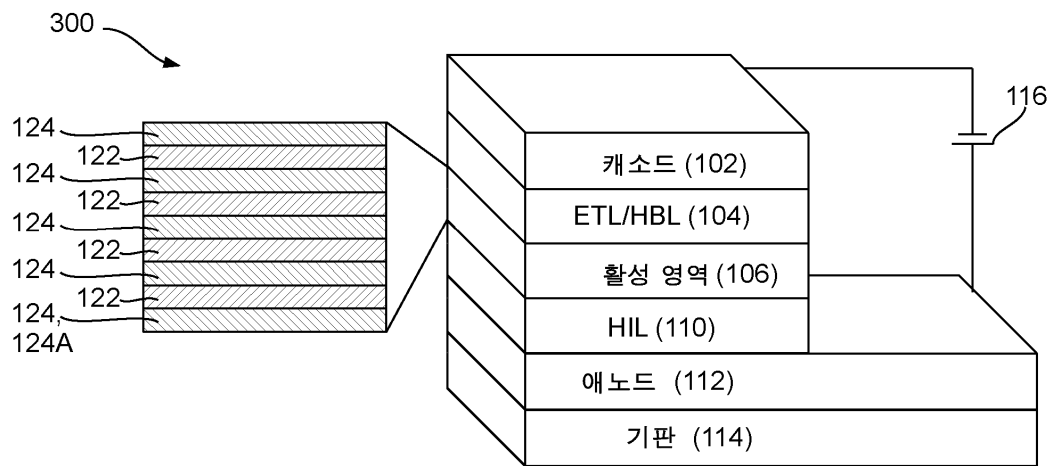
도면21



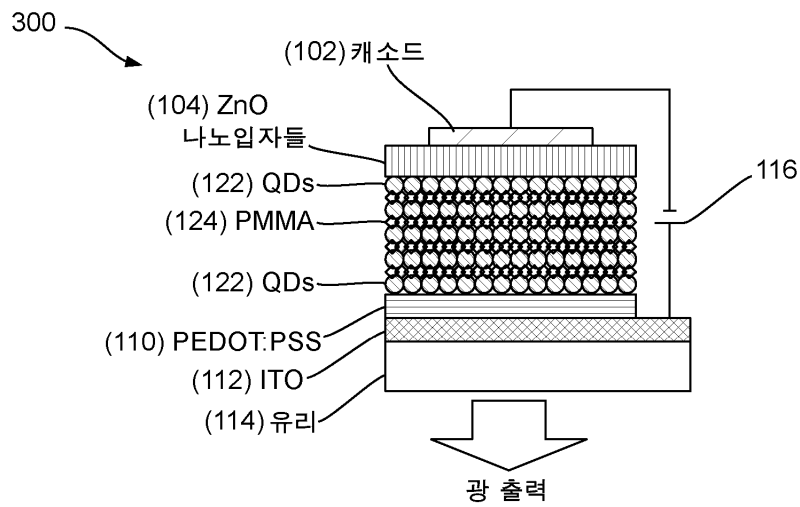
도면22a



도면22b



도면23a



도면23b

