

백색광 개발 기술 동향



손성진
(㈜AXITRON)

1. 서론

현재 100년 이상 지속되어온 백열전등과 형광등을 대신할 조명수단이 등장하고 있다. 반도체를 이용한 조명이 바로 그것이다. 발광효율이 높은 반도체 발광소자 (Light Emitting Diode, LED)를 조명에 사용해 전력소모를 줄임으로써 에너지 소모를 줄이고 환경을 보존하자는 것이다. 또한 반도체발광소자는 이미 1960년대부터 연구되기 시작 하였다. 그런데 30 여년이 지난 이 시점에서 LED를 이용한 조명을 이야기하

는 이유는 그림 1에서 보듯이 최근 들어 LED의 휘도가 매우 빠르게 개선되고 있고 이를 이용한 반도체 조명 시대가 예상보다 앞당겨질 것으로 전망된다.

현재 LED의 발광 성능지수가 15 lumens/watt를 넘어 백열전구(incandescent lamp)를 대체할 수 있는 정도까지 개선되어서 마침내 고효율의 백색LED 램프가 출현하게 되었다. 백색 LED램프를 만들기 위해서는 크게 2가지의 방법이 제안되어 있다.

하나는 빛의 삼원색인 적색, 녹색, 청색의 각각의 칩을 조합하면 백색 광원을 만들 수가 있고 또 다른 방법은 청색 혹은 UV LED를 이용하여 형광체를 여기 시켜 백색광을 얻는 방법이 있다. 전자의 경우에는 각각의 색의 조합에 따라 LED의 효율이 크게 달라 질 수가 있고 각 색의 LED의 동작 전압이 다르고 광 출력의 온도 특성이 다르고 또한 각각의 소자의 수명과 내구성도 틀리는 등 검토 해야 할 점이 아직 많이 남아 있다. 후자의 경우에는 형광체의 양자효율이 높아야 하는데 1996년 9월 니치아 화학 회사에서 고휘도 청색 LED칩 위에 YAG (Yttrium, Alumium, Garnet)계 형광물질을 증착하여 백색 광원 제조에 성공 했다고 발표하였다. 그것의 밝기가 500mcd로 자동차 실내등 밝기의 반 정도로 알려져 있다. 그림 2는 형광체를 이용한 백색발광 다이오드의 스펙트럼을 보여주고 있다.

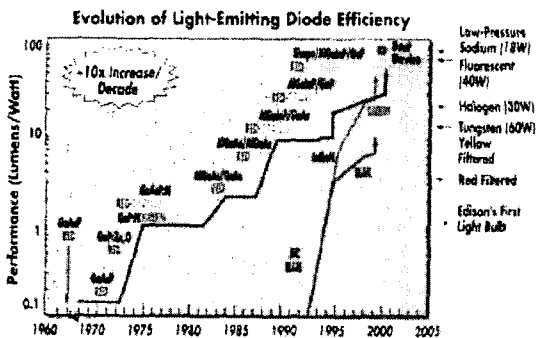


그림 1. 발광다이오드의 효율변화.

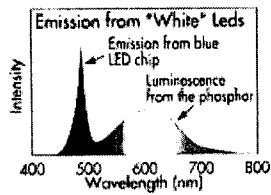


그림 2. 형광체를 이용한 백색광 스펙트럼.

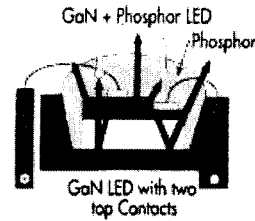


그림 3. 니치아 화학 형광체 백색 발광소자.

현재는 휘도가 3cd (반폭치15 배향성), 발광 출력 2mW, 효율 20 lm/W, 색온도 8000K, 응답 속도 0.1mm의 특성을 나타내고 있으며 백열 전구보다 많은 장점을 가지고 있어 새로운 조명기기에의 응용의 전망을 밝게 해 주고 있다.

2. 백색 발광 소자 제작 및 기술 관련 동향

2.1 백색 발광 소자의 제작

2.1.1 red, green, 및 blue 삼원색 배합에 의한 제작

백색광 display unit 제작은 red, green, 및 blue의 삼원색을 기초로 한 색 배합에 의하여 백색광을 얻어내는 방식으로서 효율적인 백색광 제작을 위해서는 단파장 blue-chip의 광이 장파장 red-chip에 의해 흡수되어 전체 발광 효율을 저하시키는 것을 방지하기 위해 red, green, blue 삼원색 기본 unit의 높이를 조정하여 외부 양자 효율을 향상시키는 것이 필요하다.

아울러 blue LED chip 자체의 발광 효율을 높이기 위하여 LED-chip과 리드 프레임을 연결하는 접착제 내부에 blue에 대해 60% 이상의 반사율을 가지는 백색 filter를 첨가하여 반사된 광을 다시 LED-chip의 에폭시 수지로 구성된 cap을 통하여 외부로 빠져 나오게 하여 외부 양자 효율을 높이는 것이 요구된다. 또한 red, green, 및 blue 삼원색 unit의 white balance를 맞추기 위하여 발광 영역을 LED 렌즈를 중심으로 20-70도 이내에 조정하여 배치하여야 하는데 이는 반치 각이 20도 작을 경우 삼원색간의 간섭효과가 없으며, 70도 이상인 경우에는 장파장 빛의 단파장 빛 흡수에 의하여 발광출력이 저하되는 것을 막기 위함이다. 따라서 red, green, 및 blue 삼원색 unit의 white balance를 맞추기 위하여 삼원색 LED 간의 거리 및 LED-chip의 높이를 맞추는 것이 중요하다.

2.1.2 형광체를 이용한 백색발광 소자 제작

일본 니치아 화학 및 독일 오스람사에서 채택하고 있는 방식으로 파장이 430 nm 영역의 단파장 광을 입사하여 열적으로 들뜬 YAG phosphor 형광체로부터 나오는 가시광 영역의 광과 원래의 단파장 사이의 색 배합에 의하여 백색광을 얻은 방법으로써 package화된 백색발광 소자의 기본구조는 그림 3 과 4와 같다. 그림에서 보듯이 니치아 화학에서는 사파이어

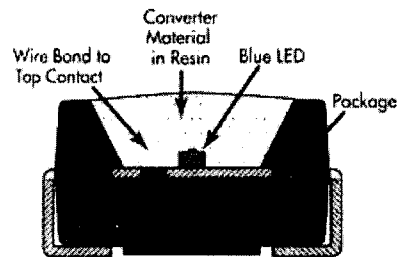


그림 4. 오스람사 형광체 백색 발광소자.

기판 위에 광원을 성장하였으며, 오스람사에서 SiC기판을 사용한 것이 서로 다른 점이다.

광이 die-bonding용 합성수지에 입사 되는 것을 방지하기 위하여 In, Cu, Pd, Rh, W, Ti, Ni, Al, Ag등의 금속 또는 TiO₂, SiO₂, BaF₂ 등의 도전성 재료를 사파이어나 SiC 등의 기판 back-side에 코팅한 광 반사재료, LED-chip과 리드 프레임 사이의 열전도를 높이기 위하여 Au, Ag, Al, Cu등이 함유되어 에폭시 수지, 실리콘 수지등을 사용한 Die-bonding 재료, 지향각을 크게 하기 위한 Ti산 Be, 산화 Ti, 산화 Al, 산화 Si등을 투입한 Elastomer, Gel 형태의 실리콘 수지, Amorphous 불소수지, 투광성 Polyamide 수지등을 사용한 색 변환 재료 및 Y₃Al₅O₁₂(yttrium aluminum garnet) phosphor(YAG phosphor), Mn 이 doping 된 산화 Mg, Ti, Al이 도핑된 유화 ZnCd, Be계 유전체 등의 형광 물질로 구성되며 이 중에서 YAG phosphor는 파장 450 nm의 여기 광 파장을 사용하여 530~580nm의 가시광 영역의 광을 얻을 수 있고, Al 을 Ga으로 치환하여 발광 파장을 단파장화, Y 를 Gd(gadolinium) 등으로 치환하여 장 파장화가 가능하다.

현재는 휘도가 3 cd (반폭치15 배향성), 발광 출력 2 mW, 효율 20 lm/W, 색온도 8000K, 응답 속도 0.1 mm의 특성을 나타내고 있다.

2.1.3 Polymer를 사용한 백색발광 소자 제작

현재까지 미국 내에서는 유일하게 GaN 레이저 다이오드의

제작을 발표하고 있는 캘리포니아 대학의 연구 그룹이 채택한 방식으로 파장 450 nm대의 단파장 광을 GaN 질화물 반도체 발광 소자 상부에 올려져 있는 polymer에 입사 시켜 polymer로부터 단파장 광원에 의하여 열적 천이에 의하여 여기 되어 나오는 가시광 영역의 광과 원래의 단파장 광의 색 배합을 이용하여 백색광을 제작하는 방법이다. 2차 여기 되어 나오는 가시광 영역의 광원의 파장은 polymer의 두께를 조절하여 polymer내부의 BuEH-PPV, MEH-PPV등의 광 여기용 재료 농도를 비움으로서 2차 여기 되는 여기광의 파장도 결정되어진다.

2.1.4 ZnSe를 사용한 백색발광 소자 제작

일본의 스미토모 전기에서 향후 백색광 제작을 위한 방안으로서 채택하고 있는 방식으로 그림 5에서 보듯이 ZnSe 기판 위에는 ZnSe blue LED를 결정 성장하여 ZnSe 활성 영역에서 발광되는 청색광과 ZnSe 기판에서 나오는 yellow 중심의 넓은 가시광의 색 배합에 의하여 백색광을 제작하는 방법이다. 이 방식은 ZnSe 기판이 반 도전성 물질이므로 기존의 top and bottom 전극을 이용하여 기존의 phosphor 여기 방식에 비해 제조 공정이 간단하고 무엇보다도 최근에 자주 발생하는 고휘도 LED 분야의 특허 문제를 피할 수 있다는 장점이 있다.

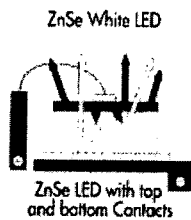


그림 5. ZnSe를 사용한 백색 발광 소자.

2.1.5 InGaN-MQW(Multi Quantum Well)의 상 분리 (phase separation)를 이용한 백색발광 소자

삼원계 화합물 반도체인 InGaN는 에너지 간격이 1.9 eV 인 InN와 3.4 eV 인 GaN의 혼합에 의하여 이루어지는 직접 천이형 고용체이다. 따라서, In 조성에 의해 그 에너지간격이 1.9 에서 3.4 eV 까지 변화할 수 있다. 그러나 GaN와 InN은 격자 상수 차이가 약 11%로 크기 때문에 GaN와 InN의 혼합에는 일정 범위의 혼합갭(miscibility gap)이 존재한다.

이러한 혼합갭 영역에서 InGaN 고용체는 열역학적으로 불안정하여 열역학적으로 안정한 두개의 상으로 자발적인 스피노달 분해를 하게된다. 이러한 상 분리는 In함량이 적은 모재(matrix)속에 In 함량이 많은 상이 무질서하게 분포하게 된다. GaN-InN 상대도로부터 성장 온도 760도 에서 분리되는

두상의 조성은 대략 In 함량이 20%와 80% 정도가 된다.

이와 같은 조성의 상들은 에너지 간격으로 볼 때 각각의 자 주색과 지색 영역의 빛을 방출할 수 있다

따라서, 형광체를 사용한 Nichia 화학의 방식과 다르게 형광체를 사용하지 않고 InGaN-MQW 의 In조성비의 차이에 따른 상 분리 현상을 사용한 백색광을 제작하는 것으로서 나디지온, 한국 광주 과학 기술원과 일본 Matsushita 등에서 현재 개발 중에 있다. 그림 6은 상분리를 이용한 적색, 녹색, 청색의 MQW-InGaN 단일칩 백색광 구조를 보여주고 있다.

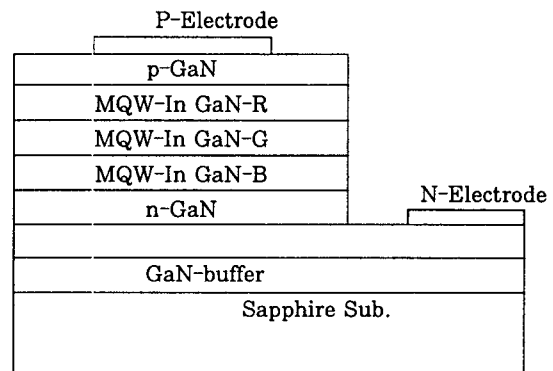


그림 6. InGaN 상분리를 이용한 단일칩 백색 발광 소자 구조.

단일칩에서 백색광을 제작할 경우 백색광 LED의 공정을 단순화 할 수 있고 LED의 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다.

그러나 이러한 InGaN의 상분리 재현성, color temperature조정, 높은 조도를 가진 백색광을 어떻게 얻을 것인가 아직 문제로 남아 있다.

2.2 GaN 백색발광 소자 관련 시장 동향

일반 조명용 및 디스플레이용 LED 시장은 현재 전 세계적으로 19억\$의 시장을 형성하고 있으며 향후 2003년까지는 약 32억 \$ 정도로 신장 될 것으로 보인다. 일반적으로 가시광 영역의 LED 시장은 크게 광 출력 1 candela 이하의 범용 LED 와 1 cd 이상의 고 휘도 LED로 구별되며 전 세계시장의 약 77%가 범용 LED 시장이지만 옥 내외용 디스플레이 시장 확대에 따라 고 휘도 LED 시장이 큰 폭의 신장세를 보이고 있어 향후 2003년까지는 고휘도 LED의 시장 점유율이 확대되어 약 1 억\$ 정도의 시장을 형성 할 것으로 예측하고 있다. 일반 가정용 조명시설 및 옥외용 디스플레이의 back light로서 사용되는 백색 발광 소자에 대한 관심이 크게 늘고 있는데 이는 기존의 백열전등보다 3배 이상의 효율을 가지며 10배 이상의 수명을 기대 할 수 있기 때문이다.

현재의 일반 전구나 형광등의 세계 시장의 규모가 약 100억 달러로 평가되는데 앞으로 약 5년 후부터 LED전구가 특별한

목적의 조명으로 사용되기 시작 할 것으로 예상되고 있으나 General Electric, Phillips 및 Osram 등과 같은 조명기기 전문 대규모 회사들이 White LED의 대한 개발에 박차를 가하기 시작했기 때문에 예상보다 가까운 장래에 LED를 이용한 조명이 나올 것으로 예상하고 있다.

2.3 조명용 백색 발광 다이오드를 이용하기 위한 해결과제

첫번째로 LED는 긴수명, 소형, 초 저전력, 고 신뢰성의 장점을 가지고 있으나, 일반적인 조명 램프로 사용하기에는 너무 비싸다는 문제점이다. 가격을 낮추는 것도 해결해야 할 커다란 과제다. 수명이 길고 전력소모가 적어 유지보수비를 모두 고려하면 LED 조명이 경제적이지만, 구입가격이 너무 높으면 시장진입에 어려움이 따르기 때문이다. 앞으로 대량생산 체제가 갖춰지고 소자당 광 출력이 높아져 조명기구에 들어가는 LED 소자의 수가 적어지면 가격하락도 충분히 가능하다. 칩 가격이 10년마다 10분의 1로 하락한 것을 고려하면 저가격화 과제도 해결될 전망이다. 표준 규격을 가진 전구를 만드는데 \$30~\$60 정도의 비용이 들기 때문에 가격을 낮추는 일이 최대의 관건이다.

그림 7은 일반조명과 백색 LED의 특성을 비교한 그림이다. 현재의 기술수준으로 백색 LED칩 하나에서 17 lumen의 빛이 나오는데 드는 전력소모는 1.12W다. 그러므로 60W 백열전구와 같은 밝기를 유지하려면 50개의 LED 소자를 써야 하며 이 때 총 전력소모는 56W가 돼 백열전구와 비슷하다.

수명이 100배 이상 긴 점이 큰 장점이나 가격이 수십 배 비싸기 때문에 현재로는 실용성이 적다. LED의 조명효율이 빠

Technologies for directional lighting applications

Fixture	Flux (lm)	Power (W)	Efficiency (lm/W)	Lamp life (hours)	Initial cost (\$)
Incandescent (60 W A-lamp)	430	60	7.2	750	10
White LED system (700 × 5 mm LEDs)	420 (16 lm LED)	42	10	10,000	700

그림 7. 일반조명과 백색 발광 다이오드소자 특성 비교.

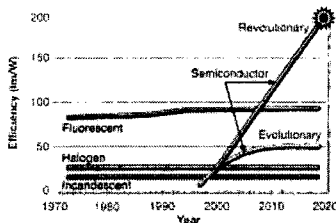


그림 8. 조명용 기구의 효율 변화.

Application	Ra	Technology	Ra
Indoor/retail	90+	Phosphor-converted LEDs	
Indoor office/home	80	Blue LED - yellow phosphor	60-
Indoor work area	60	Blue LED - green and red phosphor	90-
Outdoor pedestrian area	60-	Multichip LEDs	
Outdoor general illumination	40	RGB (610 nm - 540 nm - 470 nm) Blue - yellow (500 nm - 526 nm)	80- 40

그림 9. 백색광 제작 방법에 따른 Ra 값과 응용.

른 속도로 높아지는 추세에 비해 보면 몇 년 후면 형광등보다 효율이 높은 LED 조명등이 출현할 것으로 전망된다.

이같이 LED가 형광등을 능가하는 조명기구가 되려면 조명 효율을 더 높여야 하고, 두 번째는 칩 하나에서 나오는 광 출력을 더 높여야 하며, 이에 따른 방열문제를 해결해야 한다. 백색 조명기구에서 조명효율의 이론적 한계는 CCT (Correlated Color Temperature)에 따라 다르지만 대략 400~500 lm/W 정도다. CCT는 조명기구에서 나오는 빛의 색이 고온의 고체에서 나오는 빛과 비교될 때 그 고체의 온도로 표시한 것으로 이 온도가 높을수록 푸른 기운이 도는 백색이 된다. 그러므로 에너지 변환효율을 50%대로 올리면 그림 8에서 보듯이 조명효율 200 lm/W의 '꿈의 조명기구'가 탄생하게 된다.

이는 형광등의 조명효율 60~100 lm/W에 비해 약 2~3배 향상된 값이다. 이를 위해서는 LED 소자의 구조, 패키지 구조, 방열, 형광물질의 효율 등의 측면에서 개선이 이뤄져야 한다. 이미 고성능 LED의 에너지 변환효율이 30%대에 와있는 만큼, 200 lm/W의 실현도 멀지 않았다고 할 수 있다.

조명효율을 높이려면 LED칩 기판에서도 개선이 필요하다. 기판은 LED 소자에서 나오는 빛을 흡수하지 않아야 하며, 결정특성이 좋아 그 위에 성장되는 발광층 결정의 특성을 저하시키지 않아야 한다. 이러한 면에서는 특히 GaN 벌크 (bulk) 웨이퍼의 개발이 요구된다.

세 번째는 백색광의 질적인 측면에서도 해결해야 할 과제가 남아 있다. CRI (Color Rendering Index) 가 높은 백색광을 만들어야 하는데 일반적으로 이 값을 Ra라 부른다. Ra란 태양광으로 비출 때와 다른 조명기구로 비출 때 물체의 색깔이 달라지는 정도를 나타내며, 색깔이 태양광에서와 같을 때 Ra 값을 100으로 정의한다. 그림 9는 백색광 제작 방법에 따른 Ra값과 사용하는 용도를 보여주고 있다. Ra 값이 높은 백색광을 만드는 방법은 색을 직접 섞거나, 형광물질을 통해 섞는 방법으로 대별되며, 이 가운데에서 조명효율이 높은 방법을 선택해야 한다.

2.4 GaN 백색발광 소자 관련 특허

질화물 반도체 백색 발광 소자에 관한 특허는 이 분야에서 선도적인 역할을 해온 니치아 화학 이 상당량의 특허를 확보

국가	특허번호	발명의 명칭	출원인	기타
JP	특개평11-135836	백색발광다이오드 및 그 제조방법	財団法人工業技術研究院	
JP	특개평10-163526	발광소자 및 발광다이오드	松下電工工業(株)	
JP	특개평10-144961	반도체 발광소자	豊田合成(株)	
JP	특개평10-22527	3축질화물 반도체발광소자	豊田合成(株)	
JP	특개평10-22525	3축질화물 반도체발광소자	豊田合成(株)	
JP	특개평10-12916	발광소자	日立電線(株)	
JP	특개평9-232627	백색발광소자	松下電氣産業(株)	
US	5,684,309	Stacked quantum well aluminum indium gallium nitride light emitting diodes	North Carolina State University	
US	5,851,905	Methods of forming indium gallium nitride or aluminum indium gallium nitride using controlled hydrogen gas flows	North Carolina State University	

그림 10. 단일칩 방식의 백색광 특허.

하고 있으며,이외에 일본의 토요다고세이, 히타치, 마쯔시타, 산요등이 특허를 확보하고 있다. 구체적인 특허 형성을 위해서 설명한 백색 발광 소자 개발 방식 별로 분류해보면 적색,녹색,청색의 삼원색 LED unite의 색 조합을 통한 백색광 개발이 15건 정도로 니치아, 마쯔시타, 산요, 나고야 전기등이 주요 특허 등록 회사이다.

형광체나 polymer, resin등을 여기 하여 백색개발 방식은 12건의 특허가 등록 되어 있으며, 그 중 4건을 니치아 화학이 가지고 있다.

그림 10은 단일칩 방식으로 제작한 백색광에 관련된 특허들이다.

대부분의 백색발광 소자 관련된 특허는 위 2가지 방식이 주류를 이루고 있으며, 단일칩 방식인 InGaN 발광층의 In 조성비 조절을 통한 백색발광 소자 관련 개발 특허는 마쯔시타가 2건, 토요다고세이가 2건 정도의 특허를 소유하고 있으며, 국내에서는 나리지*온과 한국 광우 과학 기술원에서 특허를 출원중이다.

3. 결 론

이와 같이 반도체 조명이라는 빛의 혁명은 이미 진행되고 있다. 대표적인 조명 업체들과 LED 소자 제작사들의 연합에서 반도체 조명은 가능성의 단계를 넘어서 실현의 단계로 접어들고 있음을 알 수 있다. 독일의 지멘스와 오스람이 연합해 '오스람 광반도체(Osram Opto Semiconductors)'를 설립했고, 미국의 제너럴일렉트릭(General Electric)과 화합물 반도체 장비 전문회사 엠코어(EMCORE)가 연합해 젤코어(GEL-CORE)를 만들었다. 필립스와 휴렛패커드의 LED 부문이 협력해 루미레드(Lumileds)를 탄생시켰다.

미국과 일본은 에너지 및 환경문제 해결을 위해 국가적 과제로 LED 조명기술 개발을 추진하고 있다. 현재 국내에서도 국가 과제로 시작되고 있으며, 학교와 연구소, 기업에서 연구 개발 중에 있다. 이미 일본은 가로등 시제품을 만들어 발표한 바 있다. 우리 나라에서도 LED 조명기구 생산이 시작되고 있다.

전세계 에너지 소비의 8%, 전기소모의 20% 정도가 조명에 사용된다. LED 조명으로 전력소모를 5분의 1 수준으로 줄일 수 있으므로 2025년께는 전력소모를 750 109kWh, 이산화탄소 배출량을 2억톤 정도 줄일 수 있으리라는 것이 미국 광산업협회(OIDA)의 예측이다. 이제 LED 소자를 이용한 조명은 단순 표시램프에서 일반 조명으로 그 영역을 확대할 것임이 분명해졌다. 빛의 혁명이 이미 일어나고 있는 것이다.

Reference

- [1] I-hsiu Ho and G.B. Stringfellow, Appl. Phys. Lett. 69, 2701 (1996)
- [2] D. Doppalapud, S.N. Baus, K. F. Ludwig, and T. D. Mustakas, J. Appl. Phys. 84,1389 (1998)
- [3] Compound Semiconductor, Vol. 5, Num. 1 (1999)
- [4] Compound Semiconductor, Vol. 5, Num. 4 (1999)
- [5] Compound Semiconductor, Vol. 6, Num. 2 (2000)
- [6] Compound Semiconductor, Vol. 6, Num. 4 (2000)
- [7] Compound Semiconductor, Vol. 7, Num. 1 (2001)

저 자 약 력

성명 : 손 성 진

◆학력

1985년-1992년 B. D 전북대학교 물리학과

1992년-1994년 M. S 전북대학교 물리학과
(고체물리전공)

1996년-1999년 Ph. D 전북대학교 반도체과학기술학과
(전공: 질화물반도체 광소자)

◆경력

-2001년 9월 나리지온 부설연구소/EPI팀
선임 연구원 근무

- InGaAlP 고휘도 황색 LED 양산개발

- Ga N청색 LED 양산 개발

- 조명용 질화물 백색광 개발

1994년 11월-1997년11월 한국표준과학연구원

객원 연구원

2001년 10월-현재 (주)AXITRON 근무