



2009年 02月 碩士學位論文

# 마이크로 렌즈가 집적된 InGaN 계열 발광다이오드의 제작과 특성 분석

# 朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

# 李 賢 行

# 마이크로 렌즈가 집적된 InGaN 계열 발광다이오드의 제작과 특성 분석

Fabrication and Characterizations of InGaN-based Light-Emitting Diode integrated with Microlens Array

2009年 02月 25日

# 朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

# 李 賢 行

# 마이크로 렌즈가 집적된 InGaN 계열 발광다이오드의 제작과 특성 분석

### 指導教授 朴 時 賢

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함

2008年 10月

## 朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

李賢行

# 李 賢 行의 碩士學位 論文을 認准함



#### 2008年 11月

# 朝鮮大學校 大學院

목 차

#### ABSTRACT

제1장	서	론	 1
C II L O			_

 제2장 이 론
 5

 제1절 발광다이오드
 5

 제2절 발광다이오드의 효율
 13

 제3절 탈출콘
 15

 제4절 마이크로 렌즈
 19

 제5절 자외선 경화형 광학 접착제
 21

 제6절 광선추적 전산모사
 23

 제7절 적분구
 25

### 제3장 마이크로 렌즈가 집적된 발광다이오드의 제작 ………… 28

제4장 제작된 발광다이오드의 광추출 효율 전산모사 (	36
-------------------------------	----

제1절	광추출 호	효율 전산	모사를 위힌	: 설계	•••••	 36
제2절	전산모사	· 결과 및	실험결과외	의비	교분석	 39

제5장 결론	 41
【참고문헌】	 42

# 그림목차

<그림. 1> 발광다이오드의 응용분야
<그림. 2> 발광다이오드의 캐리어 분포와 광방출 모식도
<그림. 3> 에폭시 반구로 보호된 전통적인 발광다이오드의 탈출 콘의 모식도 9
<그림. 4> 광자결정 발광다이오드
<그림. 5> 나노 크기의 요철이 형성된 발광다이오드
<그림. 6(a)> 탈출 콘 정의
<그림. 6(b)> Area element
<그림. 6(c)> Area of calotte-shaped section of the sphere
<그림. 7> 자외선 경화형 접착제를 이용한 마이크로렌즈 제작 방법 모식도 20
<그림. 8> 자외선 경화형 광학접착제의 투과도
<그림. 9> 적분구면에서 반사 및 입사하는 빛의 기하학적 관계
<그림. 10> 마이크로렌즈 어레이가 집적된 발광다이오드의 광학 현미경 사진… 30
<그림. 11(a)> 패키지된 발광다이오드의 모식도
<그림. 11(b)> 패키지된 발광다이오드의 광학현미경 사진
<그림. 12(a)> 패키지된 발광다이오드의 광출력
<그림. 12(b)> 패키지된 상태에서 구동 전압 비교
<그림. 13> 패키지된 발광다이오드의 방출 스펙트럼
<그림. 14> 광선 추적 전산모사를 위한 패키지된 발광다이오드 구조 설계 37
<그림. 15> 광선추적 전산모사를 이용한 패키지된 발광다이오드 구조에서 광선 추적과
출력된 광의 원거리 측정의 모식도
<그림. 16> 패키지된 상태에서 측정각도에 따른 수학적으로 계산된 광출력 세기
비교 ~~~~ 40

#### ABSTRACT

# Fabrication and Characterizations of InGaN-based Light-Emitting Diode integrated with Microlens Array

Hyun-Haeng Lee Advisor : Prof. Si-Hyun Park, Ph.D. Department of Photonic Engineering, Graduate School of Chosun University

We fabricated 460 nm InGaN-based light-emitting diodes(LEDs) integrated with microlens array of a UV-curable optical adhesive, and observed an enhancement of light output power of the LEDs.

The epitaxial layer of InGaN-based LED were grown by organo-metallic vapor phase epitaxy (OMVPE). LED chips were fabricated using dry etching, metal deposition and thermal annealing process. Microlens array of UV-curable optical adhesive that had a relatively high value of the refractive index of 1.63 was then integrated on the LED chip by one step photolithography and thermal reflow process. Molding epoxy with the refractive index value of 1.53 was used for filling up plastic leaded chip carrier (PLCC) with LED chip after a die-bonding and a wire-bonding between the LED chip and metal pad on PLCC. The electrical and optical properties of the fabricated LEDs were investigated with the measurements of current versus light output intensities and voltage versus current using an integrating sphere coupled with a spectrometer. We observed the increase of light output intensities in our microlens array integrated LEDs compared with the reference LEDs without any microlens. Moreover, we emphasized that the light output enhancement effects of microlens array in LEDs were observed in the packaged form LEDs, not in a mere chip state LEDs. This increase of light out in the microlens integrated LEDs was caused by the enhancement of the extraction efficiency due to the microlens onto LED chip.

We numerically calculated the light extraction efficiency of the microlens integrated LEDs using a ray tracing simulation methode. We showed that the simulated results were consistent with our experimental results.

#### 제1장서 론

발광다이오드(light-emitting diodes; LEDs)는 다양한 응용 분야를 가지고 있기 때 문에 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 발광다이오드는 현재 교통 신호, 총천 연색 디스플레이(Full-color display), 휴대폰과 액정디스플레이(liquid crystal display; LCD)의 백라이트유닛 (back light unit; BLU) 그리고 일반 조명과 경관조 명에 많이 사용되고 있다. 앞으로는 환경 분야와 바이오 분야까지 그 범위가 확대 될 것으로 예상된다. 다양한 분야에서 발광다이오드의 수요가 증가함에 따라 고출 력 고효율 발광다이오드의 연구는 더욱더 활발해 지고 있다. 그림. 1은 발광다이오 드의 응용 분야를 나타낸다.



그림. 1 발광다이오드의 응용분야

발광다이오드의 효율은 내부 양자효율, 광 추출효율, 주입전류 효율 및 적출효율 의 곱으로 나타낼 수 있다. 여기서 내부 양자 효율(internal quantum efficiency; IQE)은 발광 다이오드의 성장된 에피탁시 층(epitaxial laver)의 결정 특성에 연관 되어 있는 반면에, 외부 추출 효율(extraction efficiency)은 주로 소자의 기하학적 구조와 관련 있다. 외부 추출 효율은 사실상 반도체와 공기 계면에서 내부전반사 (total internal reflection; TIR)의 작용이다. 단순한 기하학적 계산은 InGaN 계열의 평면 직사각형 발광다이오드 구조가 오직 4%의 추출효율을 갖는다는 것을 보여준 다.[1-2] 발광 다이오드에 형성된 추출 효율의 매우 낮은 값은 발광 다이오드의 추 출 효율의 증가를 목표로 hemispherical dome[6], photon recycling[7], resonate cavity[8], surface texturing[9–11], substrate separation[12], reshaping the light escape cone[13], coupling to surface plasmon modes [14,15], flip-chip packaging [16], photonic crystal structures [17 - 27],그리고 patterned *n*-GaN substrates[28,29] 등의 방법을 이용하여 많은 연구가 수행되게 했다.

광추출효율을 높이기 위하여, 상대적으로 높은 굴절률 값(n≈1.63)을 가지는 자 외선 경화형 광학 접착제(ultraviolet curable optical adhesive)와 단일 포토리소그 래피 그리고 열적 재 흐름 방법을 이용하여 InGaN 계열 발광다이오드 칩 위에 마 이크로렌즈를 제작하고 집적하였다. 다음으로 PLCC(plastic leaded chip carrier) 위 에 다이본딩(die-bondig) 및 와이어본딩(wire-bonding) 후 일반적인 상용의 발광다 이오드와 마찬가지로 몰딩용 에폭시(n=1.53)로 몰딩해서 패키지 공정을 완료하였 다. 마이크로 렌즈 재료로 사용된 자외선 경화형 광학 접착제는 일반적인 패키지에 사용하는 에폭시와 광학적으로 구분되는 물질이다.

이 논문에서 상대적으로 높은 굴절률 값 *n*≈1.63을 가지는 자외선 경화형 광학 접착제로 InGaN 계열 발광다이오드 위에 마이크로렌즈 어레이 집적과, 그 발광다 이오드를 일반적인이 발광다이오드 패키지 공정에 사용되는 *n*=1.53의 굴절률 값 을 가지는 에폭시로 몰딩한 패키지 구조를 기술했다. 마이크로렌즈가 집적된 발광 다이오드는 광학현미경(optical microscope; OM)으로 특성을 조사하였고, 전류 주 입 조건에서 적분구(integrating sphere)를 이용하여 전류대비 광출력 세기, 전류대 비 전압 특성을 조사하였다. 마이크로렌즈 어레이가 없는 일반적인 방법으로 패키 지 된 발광다이오드에 비해 마이크로렌즈 어레이가 집적되고 패키지 된 발광다이 오드에서 광추출 증가를 보인다는 것을 확인했고, 이것은 패키지된 형태의 최종 발 광 다이오드 구조에서 마이크로렌즈 어레이의 광추출 증가 효과가 유지된다는 것 을 나타낸다. 제작된 발광다이오드에서 이론적 광 출력이 얼마나 증가하는가를 계 산하기 위해 광선 추적 전산모사(ray tracing simulation)를 수행하였고, 계산 결과 가 실험과 일치한다는 것을 확인했다.

#### 제2장 이 론

#### 제1절 발광다이오드

발광다이오드는 발광소자로서, 실제적으로 빛이 발생하는 활성층(active layer)에 효율적으로 전류가 공급되고, 이 때 발생한 빛이 발광다이오드 외부로 효과적으로 방출하도록 하는 것이다. 아래 그림. 2는 일반적인 발광다이오드의 전류 공급 흐름 도 및 빛의 방출 구조를 나타낸다. 반도체에서 빛을 얻기 위해서는 전도대역 (conduction band)에 지속적으로 전자(electron)를 공급하고, 가전자대역(valence band)에는 전자가 떨어질 빈자리, 즉 정공(hole)을 마련해주어야 한다. 이를 위해서 그림1처럼 p형 반도체에 양의 전압을 걸어주고 정공을 주입하고, n형 반도체에는 음의 전압을 인가하여 전자를 주입하여 준다. 이렇게 주입된 전자와 정공은 i층 즉 활성층에서 광자를 방출한다. 발광다이오드 중 특히 GaN로 대표되는 Ⅲ-Ⅴ 질화물 은 GaN를 포함하여 AlN나 InN와 같은 이원계 질화물간의 조성에 따라 1.9 eV (InN) ~ 6.2 eV (AlN)까지 direct band gap을 가지는 반도체를 형성할 수 있어. 자외선 영역부터 청색을 포함한 가시광선 전영역의 빛의 발생 및 감지할 수 있는 발광 및 수광 소자 제작에 사용될 수 있는 유용한 물질로 인정받고 있다. GaN를 이용한 청색 발광소자는 기존에 개발된 적색 및 녹색 파장의 발광소자와 더불어 가시광선의 전 영역을 나타낼 수 있으므로 총천연색 디스플레이(full color display) 를 실현할 수 있기 때문에, 대형광고판, 자동차를 비롯한 다양한 전자기기의 영상 단말기와 액정디스플레이, 백라이트유닛 등에 크게 활용될 수 있으므로 이들 분야 의 소자 및 부품의 개발에 큰 기여를 할 것이다.

현재 발광다이오드는 다양한 방면에 응용되고 있다. 계기표시장치로서의 발광다 이오드를 벗어나 본격적인 조명장치로서 발광다이오드가 부각되기 시작한 것은 1993년 일본의 Nichia 사의 GaN계 청색 발광다이오드 개발을 바탕으로, 2000년을 전후해 적색, 청색, 녹색 및 백색 발광다이오드의 효율과 출력이 빠른 속도로 증가 하고 부터이다. 오늘날 발광다이오드 광원은 에너지 절감 및 친환경적인 광원으로 자리 잡아가면서 연간 5조 달러의 전력비를 5분의 1로 절감할 수 있는 새로운 대 체 광원으로 각광받고 있다. 현재 이를 실용화하기 위해 일본의 Nichia, 독일의 Osram, 한국의 삼성전기 등에서 고효율 고출력 광원용 개발을 위하여 다양한 신기 술을 개발하고 있다. [33]

만들어지는 대부분의 발광다이오드는 기판 위에 평면 사각형 구조로 반구 형태 의 에폭시에 덮여있는 단순한 다자인이 적용되었다. 이러한 디자인은 내부 양자효 율보다 매우 낮은 외부 추출효율(n<sub>opt</sub>≈4%)의 결과를 나타내었다. 낮은 외부 추출 효율로 인해 작은 크기와 장시간의 수명을 장점으로 하는 표시등과 소형 숫자 표 시등의 응용으로 다른 광원들과 경쟁하였었다. 이러한 광 응용제품들은 고효율 고 출력의 발광다이오드를 요구한다.

광 추출의 어려움은 물리적으로 반도체와 주변 물질과의 큰 굴절률 차이에 있다. 그 결과로 칩 안의 발광된 대부분의 빛은 반도체 쪽으로 다시 반사가 된다. 고휘도 발광다이오드는 광이 쉽게 빠져나갈 수 있는 형태로 디자인이 된다. 발광다이오드 의 발광층에서 발광된 빛은 칩 내부를 통과해 주변으로 빠져간다. 빛은 기판, 반도 체충, 접합층 그리고 에폭시 몰딩의 각 흡수층을 지나면서 줄어든다. 흡수가 있는 기판위에 성장되고 에폭시로 보호된 평면 사각 발광 구조(an absorbing-substrate LED; ASLED)를 고려하자. 반도체 구조의 각층의 굴절률은 일반적으로 매우 비슷 하여, 각층에 대해 하나의 평균 값 n<sub>s</sub>를 사용할 수 있다. 에폭시 반구의 굴절률은 n<sub>e</sub>이다. 일반적인 발광다이오드의 구조와 빛의 경로를 그림. 3에서 나타내었다. 발 광층의 한 점에서 만들어진 빛은 단지 2θ<sub>e</sub> 각도의 원뿔 이내의 진행방향을 가질 때 에폭시 반구 속으로 진행할 수 있다. 임계각 θ<sub>e</sub>는 스넬의 법칙(Snell's law)에 의해 주어진다.

$$\theta_c(n_e, n_s) = \sin^{-1} \left( \frac{n_e}{n_s} \right) \tag{4.1}$$

- 6 -

탈출 콘(escape cone) 내에서 진행하는 빛의 일부는 반도체와 에폭시의 경계에서 반사된다. 반구 내로 탈출한 빛의 일부는 에폭시와 공기의 경계에서 반사가 일어난 다. 각도 θ > θ<sub>c</sub>의 탈출 콘 밖으로 진행하여 반도체의 표면에 입사하는 빛은 모두 내부 반사를 일으킨다. 그림. 2에 나타난 구조에서 대부분의 빛은 기판과 전극의 흡수에 의해 공기 중으로 빠져나가지 못한다.[3]



그림. 2 발광다이오드의 캐리어 분포와 광방출 모식도



그림. 3 에폭시 반구로 보호된 전통적인 발광다이오드의 탈출 콘의 모식도

외부 추출효율을 증가시키는 방법은 현재 계속 연구 중에 있으며 대표적으로 그림. 4 처럼 광자결정(photonic crystal)을 발광다이오드 위에 형성하거나, 그림. 5에서 나타나 는 것처럼 발광다이오드 면에 식각을 통해 나노 크기로 요철을 형성하는 방법 등이 있 다.



그림. 4 광자결정 발광다이오드 사진과 모식도





그림. 5 나노 크기의 요철이 형성된 발광다이오드

#### 제2절 발광 다이오드의 효율

이상적인 발광다이오드의 활성영역은 모든 주입된 전자에 대해 하나의 광자가 발광한 다. 각 전하 양자-입자(전자)는 하나의 빛 양자-입자(광자)를 생성한다. 따라서 발광다 이오드의 이상적인 활성 영역은 1의 양자 효율을 갖는다. 내부 양자 효율(internal quantum efficiency)은

$$\eta_{int} = \frac{초당 활성영역에서 발광하는 광자의 수}{초당 발광다이오드로 주입되는 전자의 수} = \frac{P_{int}/(h\nu)}{I/e}$$
(식.2)  
로 정의되고  $P_{int}$ 는 활성영역으로부터 발광한 광출력이고,  $I$ 는 주입 전류이다.

활성영역에 의해 방출된 광자는 발광다이오드 틀(die)로부터 탈출할 것이다. 이상적인 발광다이오드에서, 활성영역으로부터 방출된 모든 광자는 또한 자유공간으로 방출된다. 이와 같이 발광다이오드는 1의 추출 효율을 갖는다. 하지만, 실제 발광다이오드에서, 활 성영역으로부터 방출된 출력의 전부가 자유 공간으로 탈출하는 것은 아니다. 어떤 광자 들은 아마도 결코 반도체 틀(die)을 떠나지 못할 것이다. 이것은 몇 개의 가능성 있는 손실 메커니즘 때문이다. 예를 들면, 활성영역에 의해 방출된 빛은 발광다이오드의 기판 에서 재흡수가 일어날 수 있고 기판은 방출 파장에서 흡수가 있다고 가정한다. 빛은 금 속 접촉(metallic contact) 면에 입시될 것이고, 금속에 의해 흡수될 것이다. 게다가, 광 포획 현상(trapped light phenomenon)으로 언급되는 내부전반사(total internal reflection)는 반도체로부터 빛이 달아날 확률을 감소시킨다. 광 추출 효율(light extraction efficiency)은

 $\eta_{extraction} = \frac{\underline{x} \mathrm{ { fr}} \, \pi \mathrm{ {R}} \, \mathrm{ {COL}} \, \mathrm{ {COL}} \, \mathrm{ {S}} \, \mathrm{ {S}} \, \mathrm{ {S}} \, \mathrm{ {COL}} \, \mathrm{ {S}} \, \mathrm{ {COL}} \, \mathrm{ {S}} \, \mathrm{ {C}} \, \mathrm{ {S}} \, \mathrm{ {C}} \, \mathrm{ {S}} \, \mathrm { {S}} \, \mathrm { {S$ 

추출 효율은 고 효율 발광다이오드에 심한 제한이 될 수 있다. 고 정밀과 값 비싼 소 자 공정에 호소하지 않고서는 추출 효율을 50% 이상 증가시키는 것은 어렵다.

외부 양자 효율(external quantum efficiency)은

$$\eta_{ext} = \frac{number \ of \ photons \ emitted \ into \ free \ space \ per \ second}{number \ of \ electrons \ injected \ into \ LED \ per \ second} = \frac{P/(h\nu)}{I/e} = \eta_{int}\eta_{extraction} \tag{(4.4)}$$

로 정의된다.

외부 양자 효율은 유용한 빛의 입자의 수대 주입된 전하 입자의 수의 비율을 제시한 다.

출력 효율(power efficiency)은

$$\eta_{power} = \frac{P}{IV} \tag{4.5}$$

로 정의되고, *IV*는 발광다이오드에 제공된 전기적 출력이다. 약식으로(informally), 출력 효율은 또한 콘센트 효율(wallplug efficiency)라고 불린다.[1]

#### 제3절 탈출 콘(escape cone)

반도체와 공기의 계면에서 내부 전반사가 일어난다면, 반도체 내부에서 생성된 빛은 반도체로부터 탈출하지 못한다. 만약 광선의 입사각이 법선 입사에 가깝다면, 빛은 반도 체로부터 탈출할 수 있다. 하지만 비스듬하게 입사하는 광선에 대해 내부전반사가 발생 한다. 내부 전반사는 높은 굴절률 물질로 구성된 발광다이오드에서 특히 추출효율을 확 연히 감소시킨다.

반도체와 공기사이 계면에서 반도체에서 입사하는 각이 φ로 주어진다고 가정한다. 굴 절된 광선의 입사각 Φ는 스넬의 법칙

$$\overline{n_s}\sin\phi = \overline{n_{air}}\sin\Phi$$
 (식. 6)  
로 추론될 수 있고,  $\overline{n_s}$ 과  $\overline{n_{air}}$ 는 각각 반도체와 공기의 굴절률이다. 탈출콘 그림.  $6(a)$ 에  
설명된 것처럼, 내부 전반사의 임계각은  $\Phi = 90^\circ$  를(을) 사용해서 얻어진다. 스넬의 법  
칙을 사용해서

$$\sin\phi_c = \frac{\overline{n_{air}}}{\overline{n_s}} \sin 90^\circ = \frac{\overline{n_{air}}}{\overline{n_s}}$$
(4). 7a)

과

$$\phi_c = \arcsin\frac{\overline{n_{air}}}{\overline{n_s}} \tag{(4). 7b}$$

를 얻는다. 반도체의 굴절률은 일반적으로 높다. 예를 들면, GaAs는 3.4의 굴절률을 가 지고 있다. 따라서 식. 8을 따르면, 내부전반사의 임계각은 아주 작다. 이 경우 근사 값 sinφ<sub>c</sub> = φ<sub>c</sub>로 쓸 수 있다. 내부 전반사의 임계각은 다음에 주어지는

$$\phi_c \approx \frac{n_{air}}{\overline{n}_s} \tag{(4). 8}$$

로 주어진다.

이 내부전반사각을 빛 탈출 콘(light escape cone)이라 정의한다. 콘의 외부로 방출되는 빛은 내부전반사가 되는 반면에, 콘으로 방출되는 빛은 반도체로부터 탈출할 수 있다.

다음으로, 빛 탈출 콘으로 방출되는 빛의 총 fraction을 정의할 목적으로 곡률 *r*을 갖 는 구형 콘의 표면적을 계산하였다. 그림. 6(b).(c)에서 보이는 것처럼 calotte 형태의 표면의 표면적은 다음의 적분과 같이 주어진다.

$$A = \int dA = \int_{\phi=0}^{\phi_c} 2\pi r \sin\phi d\phi = 2\pi r^2 (1 - \cos\phi_c).$$
 (A)

빛이  $P_{source}$ 의 총 출력을 가지는 반도체에서 점광원으로부터 방출된다고 가정하자. 그리고 나서 반도체로부터 탈출할 수 있는 출력은 아래와 같이 주어진다.

$$P_{escape} = P_{source} \frac{2\pi r^2 (1 - \cos\phi_c)}{4\pi r}$$
(4). 10)



그림. 6 (a) Define of the escape cone by the critical angle  $\Phi_c$ . (b) Area element dA. (c) Area of calotte-shaped section of the sphere defined by radius r and angle

이 계산은 오직 반도체 내부에서 방출된 빛의 일부(fraction)가 반도체로부터 탈출할 수 있다는 것을 나타낸다.

이 일부(fraction)는 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} = \frac{1}{2} (1 - con\phi_c). \tag{(1)}$$

높은 굴절률을 가지는 물질의 내부전반사 임계각이 상대적으로 작기 때문에, 코사인 항 은 멱급수로 확대될 수 있다. 이차항보다 높은 항은 무시하여 산출한다.

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} \approx \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\phi_c^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{4} \phi_c^2. \tag{4}. 12$$

식. 8의 근사 값을 사용하여, 아래의 식을 얻는다.

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} \approx \frac{1}{4} \frac{\overline{n_{air}^2}}{\overline{n_s^2}}.$$
(A). 13)

이 탈출 문제는 고 효율 발광다이오드에서 중요한 문제이다. 대부분의 반도체의 굴절률 은 상당히 높고(> 2.5) 따라서 반도체에서 생성된 빛의 낮은 비율만이 평면 발광다이오 드로부터 탈출할 수 있다. 이 문제는 대략 1.5의 작은 굴절률을 가지는 폴리머를 가지고 있는 반도체에서는 덜 중요하다.

#### 제4절 마이크로렌즈 (refractive microlens)

마이크로렌즈는 통신, 의료기기, 멀티미디어기기, 전자기기분야 등의 부품에 다양하게 응용되고 있다. 마이크로렌즈는 반도체 레이저와 광섬유와의 연결부분에서 레이저의 퍼 짐을 막는데 사용되며, 광감지 센서의 효율을 증대시켜 디스플레이의 성능 향상 등을 가능하게 한다. 현재 연구되어지고 있는 마이크로렌즈의 제작법은 레이저 펄스를 이용 한 식각 방법, 감광액을 이용한 재흐름 방법, 건식식각 방법, CO<sub>2</sub> 가스 레이저를 사용한 유리표면 가공 방법, 용해된 유리의 표면장력을 이용한 방법, 폴리머의 이온빔 증착과 레이저 가공법, 잉크젯 기술, 그레이스케일 마스크 방법 등 매우 다양하다.[34] 하지만 이러한 공정들은 두 단계 이상의 공정을 거쳐야 하기 때문에 공정이 복잡해지고 공정비 가 많아지는 단점이 있다. 하지만 자외선 경화형 광학 접착제를 이용한 마이크로렌즈는 그림. 7처럼 그 제작 공정이 음성감광액을 이용한 포토리소그래피와 같은 특성을 보이 고 있기 때문에 단일 포토리소그래피 공정만으로도 제작이 가능하다.



그림. 7 자외선 경화형 접착제를 이용한 마이크로렌즈 제작 방법 모식도

# 제5절 자외선 경화형 광학접착제(UV curable optical adhesive)

자외선 경화형 광학접착제는 보관 상태에서는 액상을 유지하다 도포되어 200~400 nm 영역의 근자외선으로 광중합성을 이용하여 경화되며 강한 접착력을 나타낸다. 또한 저온에서 경화하므로 반도체 소자에 열적이 손상을 주지 않는다. 그리고 자외선에서 10-30 초 내외로 빠른 시간 내에 경화된다. 또한 경화 전에는 액상으로 존재하기 때문 에 접착뿐만 아니라 스핀코터를 이용하여 박막으로 도포도 가능하고 박막두께 조절도 용이하다. 또한 일정한 굴절률을 가지고 있고 그림. 8처럼 가시광선 영역에서 98% 이상 의 투과율을 보인다.



그림. 8 n≈1.63의 굴절률 값을 가지는 자외선 경화형 광학접착제의 투과도.
 UV-VIS-NIR Spectrometer(model : Cary500Scan)를 사용하여 측정한 마이크로렌즈 물
 질인 자외선 경화형 광학접착제는 가시광 영역에서 98% 이상의 투과율을 보인다.

#### 제6절 광선추적 전산모사 (Ray Tracing Simulation)

선형 광학은 가장 단순한 광의 이론이다. 빛은 정해진 기하학적 법칙에 따라서 다른 광학매질들을 이동하는 선들에 의해 설명된다. 선형 광학은 따라서 또한 기하 광학이라고 불린다. 선형 광학은 근사 이론이다. 비록 빛에 관하여 우리의 일상 경 험을 충분히 설명할 수 있다 할지라도, 충분히 설명할 수 없는 선형 광학의 많은 형상이 있다.

선형광학은 광선의 *위치와 방향*과 관련이 있다. 따라서 이것은 상의 형성을 공부 하는데 유용하다. 선형 광학은 유리 섬유(glass fiber)와 같은 주어진 매질들 안으 로 유도되는 빛의 조건을 결정하게 한다. 비등방성 매질들에서, 광선은 광 에너지 의 방향을 가리킨다. 선의 다발들은 선들의 밀도가 빛 에너지의 밀도에 비례하는 것으로 그려질 수 있다. 예를 들면, 빛이 점광원으로부터 등방성으로 생성될 때, 주 어진 원뿔의 선과 관련된 에너지는 원뿔의 입체각과 비례한다. 선들은 주어진 영역 을 교차하는 광학 에너지를 결정하기 위한 광학 시스템을 통하여 그려질 것이다.

#### 선형광학의 가정(postulates of ray optics)

- 빛은 선의 형태로 이동한다. 그 선들은 광원에 의해 방출되고 광학 검출기에 도달했을 때 관측될 수 있다.
- 광학 매질은 굴절률이라 불리는 n ≥ 1 양(quantity)에 의해 특징되어진다. 굴절 률은 자유공간에서 속도 c₀대 매질에서의 속도 c의 비율이다. 따라서 거리 d만 큼 이동한 빛에 의해 걸리는(take) 시간은 d/c = nd/c₀와 같다. 따라서 광로 길 이(optical path length)라고 알려진 곱(product) nd에 비례한다.
- *r* = (*x*,*y*,*z*). 균질하지 않은 매질에서, 굴절률 *n*(*r*)은 *r* = (*x*,*y*,*z*) 위치의 함수이 다. 따라서 주어진 두 점 *A*와 *B*사이의 경로를 따르는 광로 길이는

광로 길이 = 
$$\int_{A}^{B} n(r)ds$$
 (식. 14)

여기서 ds는 경로를 따르는 길이의 미분 요소이다. A에서 B로 이동한 빛에 의해 걸리는 시간은 광로 길이에 비례한다.

• Fermat's Principle. 페르마의 정리. 두 점 A와 B사이를 이동하는 광선은 두

점사이의 이동한 시간(또는 광로 길이)은 인접한 경로와 관련되어 있는 극값 (extremum)이다.

• 극값은 변화율이 0이라는 것을 의미한다. 즉

$$\delta \int_{A}^{B} n(r)ds = 0 \tag{4.15}$$

극값은 아마도 변화(inflection)의 최소나 최대 혹은 점이 될 것이다. 하지만 일반적 으로 이와 같은 경우 그것은 최소이다.

#### 광선은 최소 시간의 경로를 따라 이동한다.

때때로 최소 시간은 단일 경로보다 더 많은 경로에 의해 나눠진다. 그때 이것은 모 두 선들에 의해 동시에 따라간다.

#### 제7절 적분구(Integrating sphere)

적분구는 그 내부 구면이 완전구면이며, 표면의 반사특성이 램버르트(Lambert) 표면의 특성을 가진 것으로 정의된다. 여기서 램버르트 표면이란 그 표면의 확산반 사도가 1.0이며 표면에서 반사한 빛의 광도가 입사한 빛의 방향에 관계없이 반사면 의 수직방향과 반사방향과의 각  $\theta$ 의 cosine값에 비례하는 분포를 가지는 면으로 정의된다.

적분구 안에 위치한 광원에서 방출된 빛이 구의 내면에서 반사될 때 그 입사각 에 관계없이 cos 에 비례하여 반사되므로 구 전면에 거의 골고루 반사되고 이것이 다시 반사될 때마다 또 cos 에 비례하여 반사되는 과정에서 구 내면 어느 곳에서 나 광조도가 같게 된다.

이 때 적분구의 구면 한 곳에 작은 구멍을 뚫고 광조도계로 입사하는 빛의 광조 도를 측정하면 이 광조도로부터 전광선속을 대략적으로 계산할 수 있다. 그림. 9에서 보인 것과 같이 구면상의 임의의 점 P를 중심으로 한 작은 면적 dS에

dS에서 반사된 빛의 광휘도를  $L_V$ , 이것이 구면상의 다른 임의의 점  $P_1$ 에 만드 는 광조도를  $E_1$ 이라 하면 P에서  $P_1$ 방향으로 복사하는 광도  $I_V$ 는 직선  $\overline{PP_1}$ 과 직 선  $\overline{OP}$ 가 이루는 각이  $\varphi$ 라 할 때

$$L_V = L_V dS \cos\varphi \tag{(A). 16}$$

로 주어지고 이것이 다시 P1에 만드는 광조도 EV1은

$$E_{V1} = \frac{L_V dS}{d^2} \cos\varphi = \frac{L_V dS}{d^2} \cos^2\varphi \tag{(4). 17}$$

로 계산된다.

서 반사된 빛을 생각하자.

여기서 다시 기하학을 이용  $d = 2r\cos\varphi$ 의 관계를 사용하면

$$E_{V1} = \frac{L_V dS}{4r^2} \tag{(4). 18}$$

가 유도된다.

즉, 적분구 임의의 점 P에서 반사된 빛이 임의의 다른 점 P<sub>1</sub>에 만드는 광조도  $E_V \ge P_1$ 의 위치에 관계없이 같게 된다.

적분구 안에 광원을 위치시켰을 때 이 광원이 적분구 표면에 주는 광조도의 평 균을  $E_{Vd}$ 라 하고 m을 적분구 표면의 확산 반사도라 하자. 이때 적분구 표면의 한 곳에 광조도계를 위치시키면 이 광조도계에는 광원에서 직접 오는 빛  $E_{Vd}$ 와 적분 구 표면에서 반사된 다음 오는 빛  $E_{Vm}$ 의 합이 나타나게 된다.

여기서  $E_{Vm}$ 은 빛이 적분구 표면에서 여러 번 반사된 것들의 합이고 n번 반사된 다음 입사하는 빛이 만드는 광조도는  $E_{Vm} = mnE_{Vd}$ 이므로

$$E_V = E_{Vd}(1 + m + m^2 + \dots + m^n) = E_{Vd}(\frac{1 - m^{n+1}}{1 - m})$$
(4). 19)

로 주어진다. 이때 m은 적분구 표면의 반사도이다. 여기서 n는 무한대이므로

$$E_V = \frac{E_{Vd}}{1-m} = E_{Vd}\alpha \tag{(4). 20}$$

으로 주어지며, α는 적분구표면의 흡수도(1-m)이다. 그러므로 적분구 내부 표면 의 한 점에서 읽는 광조도  $E_V$ 는 광원이 적분구 표면에 반사되지 않고 직접 주는 광에너지에 의한 광조도  $E_{Vd}$ 와 1/α의 곱이 된다.

여기서 적분구 표면의 평균 반사도가 95 %인 경우(BaSO4 페인트를 칠한 경우)  $E_V = 20E_{Vd}$ 가 될 것이다. 따라서 전광선속의 대략적인 값은  $E_V$ 값의 1/20에 적분 구 구면의 면적을 곱하면 얻을 수 있다. 그러나 적분구를 사용할 경우에는 보통 표 준전구와의 비교측정 방법을 사용하여 전광선속을 측정한다.



그림. 9 적분구면에서 반사 및 입사하는 빛의 기하학적 관계

#### 제3장 마이크로 렌즈가 집적된 발광다이오드의 제작

#### 제1절 제작공정

실험에 사용된 청색 InGaN 기반 발광다이오드는 (0001) 방향의 2 인치 사파이어 기판 위에 Low Pressure OrganoMetallic Vapor Phase Epitaxy(OMVPE) 방법에 의해 성장되었다. 에피탁시 층의 성장은 처음에 40 nm 두께의 저온 성장 GaN 버퍼 층을 기른 후, 0.5 @m 두께의 un-doped GaN층, 1.2 um n<sup>-</sup>-typed GaN층, 1.2 um 두께의 n<sup>+</sup>-typed GaN층, 0.1 um 두께의 다중양자우물(multi quantum well; MQW) 의 성장으로 이뤄진다. 다중양자우물은 5 쌍의 2 nm 두께의 InGaN 우물(well)과 18 nm 두께의 GaN 장벽(barrier)로 구성되었다. 다중양자우물 위에 14 nm 두께의 p-type AlGaN층, 120 nm 두께의 p-type GaN층을 성장하고, 마지막으로 epi 층 위 에 증착되어지는 indium tin oxide(ITO)와 오믹 접합(ohmic contact) 특성을 향상 시키기 위해 2 nm 두께의 n-type InGaN층을 성장시킨다. OMVPE 방법에 의한 에 피탁시 층 성장이 끝난 후, 발광다이오드 소자 제작 위해 n-type InGaN층을 inductively coupled plasma(ICP)를 이용하여 n-type metal contact을 위해 n<sup>+</sup>-type GaN까지 식각하여, 1 um 두께의 메사(mesa) 구조를 형성하였다. ITO는 전류퍼짐 (current spreading)과 투명 전극의 용도로 식각 되지 않은 n-type InGaN 위에 150 nm 두께로 증착되었다. 이 소자를 N₂:O₂=1:1 합성가스 분위기에서 600 ℃에서 1분 간 열처리하였다. Cr과 Au는 각각 노출된 n<sup>+</sup>-type GaN과 식각 되지 않은 n-type InGaN 위에 n-type과 p-type 전극의 용도로 증착되었고, N2 가스 분위기에서 350 ℃에서 1분간 열처리하여 최종적으로 노출된 n<sup>+</sup>-type GaN과 식각되지 않은 n-type InGaN 위에 각각 10 nm와 600 nm의 Cr과 Au가 n-type 전극으로 증착되 었다.

발광다이오드 소자 제작이 끝난 후, 자외선 경화형 광학 접착제로 마이크로 렌즈 어레이를 발광다이오드 소자 위에 집적했다. 먼저 *n*≈1.63의 굴절률 값을 가지는 자외선 경화형 접착제를 스핀코팅(spin-coating) 방법으로 발광다이오드 칩이 제작 된 웨이퍼에 코팅하고 100℃ 열판(hot-plate)에서 소프트베이킹(soft-baking) 후 마 스크 얼라이너(mask aligner)에서 마이크로 렌즈 패턴이 있는 마스크와 자외선 경 화형 접착제가 도포된 웨이퍼를 정렬하고 접착제가 경화될 때까지 자외선에 노광 을 한다. 그다음 아세톤에서 자외선에 노광되지 않은 부분의 접착제를 제거하는 현 상 공정을 거치면 원기둥 모양으로 경화된 접착제를 형성했다. 그다음, 160℃ 열판 에서 열적 재흐름 방법으로 원기둥 모양의 접착제의 가장자리 부분을 흐르게 해서 일정한 곡률을 가지는 마이크로렌즈를 완성했다.

그림 10은 300 × 300 um 크기의 메사 패턴을 가지는 발광 다이오드가 집적된 발광다이오드의 광학 현미경 사진이다. 다양한 크기를 가지는 마이크로 렌즈 어레 이는 발광다이오드 위에 집적되었다. 마이크로렌즈의 곡률반경은 공정 중에 마이크 로렌즈 패턴의 직경을 변화시키거나 두께를 변화시켜 조절할 수 있다. 마이크로 렌 즈 어레이가 없는 보통의 발광다이오드는 비교를 목적으로 마이크로 렌즈 어레이 가 집적된 발광다이오드와 같은 조건으로 제작되었다.

발광다이오드 칩 위에 마이크로렌즈 어레이를 집적한 후에, 사파이어 기판을 래 핑(lapping)하고 330 × 300 um 크기의 각각의 칩으로 다이싱(dicing)하였다. 패키징 을 위해서, 각 발광다이오드 칩을 은이 함유된 전기전도성 에폭시(silver-loaded electrically conductive epoxy)로 plastic leaded chip carrier(PLCC)의 바닥에 다이 본딩(die-bonding)을 했다. 그 다음 발광다이오드 칩 위의 p형, n형 전극을 PLCC 바닥의 p형과 n형 전극에 Au wire로 연결했다. 최종적으로, 소자는 1.53의 굴절률 을 가지는 투과형 에폭시로 몰딩했다. 그림. 11(a)는 마이크로렌즈가 집적된 발광다 이오드의 모식도이고, 그림. 11(b)는 패키지 공정 후 발광다이오드 소자의 광학 현 미경 사진이다. 상온에서 전류 주입으로 구동되는 발광다이오드의 전기적 광학적 특성을 적분구와 LED chip tester를 이용하여 측정하였다.





(a) *D* = 15 μm

(b) *D* = 20 µm



(C)  $D = 30 \ \mu m$  (d) reference

그림. 10 300 × 300 um 크기의 메사 패턴을 가지는 발광 다이오드에 마이크로렌 즈 어레이가 집적된 광학 현미경 사진이다. 다양한 크기를 가지는 마이크로 렌즈 어레이는 발광다이오드 위에 집적되었다. (D=렌즈직경)



(b)



그림. 11 패키지된 발광다이오드 (a) 모식도와 (b) 광학현미경 사진.

#### 제2절 광학적·전기적 특성 분석

그림. 12(a)는 20 mA의 전류가 주입된 마이크로렌즈가 집적된 발광다이오드의 광 출력 강도를 나타낸다. 패키지된 상태에서 일반적인 발광다이오드에서 보다 마 이크로 렌즈가 집적된 모든 발광다이오드가 광 출력 강도가 약 10%정도 증가함을 알 수 있었다. 높은 굴절률을 가지는 자외선 경화형 광학 접착제를 마이크로렌즈로 사용한 패키지된 발광다이오드는 마이크로렌즈로부터 광출력 증가 효과가 여전히 유지되었다.

그림. 12(b)는 마이크로 렌즈가 집적된 발광다이오드와 일반적인 발광다이오드 사이에 구동 전압에서 차이가 없음을 보여준다. 그림 13에서 보이는 방출 스펙트럼 에서, 마이크로렌즈가 집적된 발광다이오드와 일반 발광다이오드의 피크 파장과 표 준스펙트럼(normalized spectrum) 형태는 변하지 않은 반면에, 마이크로렌즈가 집 적된 발광다이오드에서 총 출력 세기의 증가는 보존되었고, 이것은 발광다이오드에 마이크로렌즈 집적이 내부 양자효율에 영향을 미치는 것 없이 발광다이오드의 추 출 효율에 영향을 미친다는 것을 의미한다.



그림. 12 (a) 20 mA 전류를 주입했을 때 패키지된 발광다이오드의 광출력



그림. 12 (b) 패키지된 상태에서 마이크로 렌즈가 집적된 발광다이오드와 일반 발광 다이오드의 20 mA 전류를 주입했을 때 구동 전압



그림. 13 패키지된 발광다이오드의 방출 스펙트럼

#### 제4장 제작된 발광다이도의 광추출 효율 전산모사

#### 제1절 광추출 효율 전산모사를 위한 설계

광전추적전산모사 프로그램은 발광다이오드의 이론적 추출효율을 계산하기위해 수치전산모사를 수행되었다. 그림. 14에서와 같이 에피탁시 층과 p-형, n-형 메탈 패드와 PLCC 구조를 가지는 발광다이오드 패키지 구조는 실제 패키지된 발광다이 오드 구조를 바탕으로 설계하였다. 그다음 다중 양자우물로부터 발광되는 모든 광 선을 추적했다. 그 광선은 처음에 람버시안(Lambertian) 형태로 발광다이오드 내부 에서 발산되고, 그다음 발광다이오드 구조의 모든 계면에서 반사되고, 투과되고, 최 종적으로 발광다이오드로부터 공기로 빠져나가거나 발광다이오드 내부에서 흡수된 다. 그림. 15에서처럼 각도에 따라 far-field에서 빠져나오는 광선들을 관측했다. 이 그림은 또한 제작된 발광다이오드 구조에서 추적된 광선을 나타낸다.



**그림. 14** 광선 추적 전산모사를 위한 패키지된 발광다이오드 구조 설계. 에피탁시 층 과 p-형, n-형 메탈패드와 PLCC 구조를 가지는 발광다이오드 패키지 구조는 실제 패키지된 발광다이오드 구조를 바탕으로 설계.



**그림. 15** 광선추적 전산모사를 이용한 패키지된 발광다이오드 구조에서 광선 추적과 출력된 광의 far-field 측정의 개략도.

### 제2절 전산모사 결과 및 실험결과와의 비교분석

그림. 16은 측정각도에 따른 광출력 세기 나타내는 전산모사 결과이다. 마이크로 렌즈가 집적된 발광다이오드는 일반의 발광다이오드에 비해 10% 더 높은 광출력 을 나타낸다. 이 결과들은 실험의 결과와 매우 일치한다.



**그림 16.** 마이크로렌즈가 집적된 후 패키지된 발광다이오드와 집적되지 않고 패 키지된 일반적인 발광다이오드의 측정각도에 따른 수학적으로 계산된 광출력 세기. 일반적인 발광다이오드에 비교해서 마이크로렌즈가 집적된 발광다이오드가 광출력 이 10% 상승하고 전면으로의 발광이 증가되었다.

#### 제5절 결론

본 연구에서, 상대적으로 높은 굴절률 값을 가지는 자외선 경화형 광학접착제로 InGaN 계열 발광다이오드 위에 마이크로렌즈 어레이를 집적하고, 반면에 상대적으 로 낮은 굴절률 값을 가지는 에폭시로 위 발광다이오드를 패키지 했다. 발광다이오 드의 에피 구조는 OMVPE에 의해 성장됐고, 중심파장은 463 nm이다. 자외선 경화 형 광학접착제로 만들어진 마이크로렌즈 어레이는 단일 포토리소그래피공정과 열 적 재흐름 방법만으로 제작되었다. 패키지 공정에 사용되는 에폭시 물질의 굴절률 의 값이 일반적으로 자외선 경화형 광학접착제의 굴절률 값과 유사하고, 발광다이 오드 내부로부터의 광이 패키지된 구조의 몰딩 에폭시와 마이크로렌즈 어레이를 구분하지 못하기 때문에 에폭시로 몰딩되고 패키지된 발광다이오드에서는 칩 레벨 에서 달성된 마이크로렌즈가 집적된 발광다이오드의 증가된 광출력이 사라질 것이 다. 그러므로 마이크로렌즈는 발광다이오드 몰딩 공정에서 사용되는 일반적인 에폭 시 물질보다 굴절률 값이 더 높은 물질로 제작했다. 전기적으로나 광학적인 특성차 이가 없는 패키지된 보통의 발광다이오드와 비교해서 마이크로 렌즈가 집적된 후 패키지된 발광다이오드의 광출력 세기는 약 10% 증가되었다는 것을 알았다. 제작 된 마이크로렌즈가 집적된 후 패키지 된 발광다이오드 구조의 광선 추적 전산모사 로 실험적 결과와 일치된 약 10%의 증가를 보였다.

#### 【참고문헌】

[1] E. Fred Schubert, Light-Emitting Diodes, 2nd ed. (Cambridge, Cambridge, 2006), P. 21.

[2] S. Nakamura and G. Fasol, The blue laser diode, (Springer, Berlin, 1997).

[3] A. Žukauskasm, M. S. Shur, and R. Gaska, Introduction to solid-state light, (John Wiley and Son, New York, 2002).

[4] J. K. Lee, Cho, B. H. Kim, S, -H. Park, E. Gu, I. Watson and M. Dawson, J. Korean Phys. Soc. 49, 407 (2006).

[5] S. -G. Son, S. -H. Park, H. Cho, J. H Kim, J. -H. Moon, J. K. Lee, S. -M.

Kim, J. -H. Baek, C. -W. Jeon, J. Korean Phys. Soc. 51, 377 (2007).

[6] W. N. Carr and G. E. Pittman, Appl. Phys. Lett. 3, 173 (1963).

[7] I. Schnitzer, E. Yablonovitch, C. Caneau and T. J. Gmitter, Appl. Phys. Lett.62. 131 (1993).

[8] E. F. Schubert, N. E. J. Hunt, M. Micovic, R. J. Malik, D. L. Sivco, A. Y. Cho and G. J. Zydzik, Science 265, 943 (1994).

[9] I. Schnitzer, E. Yablonovitvh, C. Caneau, T. J. Gmitter and A . Scherer, Appl. Phys. Lett. 63, 2174 (1993).

[10] R. Windisch, C. Rooman, S. Meinlschmidt, P. Koesel, D. Zipperer, G. H. Dhler, B. Doutta, M. Kuijk, G. Borghs and P. Heremans, Appl. Phys. Lett. 79, 2315 (2001).

[11] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P, DenBaars and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett. 84, 855 (2004).

[12] W. S. Wong, T. Sands and N. W. Cheung, Appl. Phys. Lett. 72, 599 (1998).
[13] M. R. Krames, M. Ochiai-Holcomb, G. E. Höfler, C. Carter-Coman, E. I. Chen, I.-H. Tan, C. P. Kocot, M. Hueschen, J, Posselt, B. Loh, G. Sasser and D. Collins, Appl. Phys. Lett. 75, 2365 (1999).

[14] W. L. Barnes, J. Lightwave Technol. 17, 2170 (1999).

[15] J. Vučkovič, M. Lončar and A. Scherer, IEEE J. Quantum Electron. 36, 1131 (2000).

[16] J. J. Wierer, D. A. Steigerwald, M. R. Krames, J. J. O'Shea, M. J. Ludowise, G. Christenson, Y,-C. Shen, C. Lowery, P. S. Martin, S. Subramanya, W. Gotz, N. F. Gardner, R. S. Kem and S. A. Stockman, Appl. Phys. Lett. 78, 3379 (2001).

[17] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos and E. F. Schubert, Phys. Rev. Lett. 78, 3294 (1997).

[18] R. K. Lee, O. J. Painter, B. D'Urso, A. Scherer and A. Yariv, Appl. Phys. Lett. 74, 1522 (1999).

[19] M. Boroditsky, T. F. Krauss, R. Coccioli, R. Bhat and E. Yablonovitch, Appl. Phys. Lett. 75, 1036 (1999).

[20] M. Boroditsky, R. Vrijen, T. F. Krauss, R. Coccioli, R. Bhat and E. Yablonovitch, J. Lightwave Technol. 17, 2096 (1999).

[21] T. Baba, K. Inoshita, H. Tanaka, J. Yonekura, M. Ariga, A. Matsutani, T. Miyamoto, F. Koyama and Kenichi Iga, J. Lightwave Technol. 17, 2113 (1999).

[22] A. A. Erchak, D. J. Ripin, S. Fan, P. Rakich, J. D. Joannopoulos, E. P. Ippen, G. S. Petrich and L. A. Kolodziejski, Appl. Phys. Lett. 78, 563 (2001).

[23] H. -Y. Ryu, J.-K. Hwang, D. -S. Song, I.- Y. Han and Y.-H. Lee, Appl. Phys. Lett. 78, 1174 (2001).

[24] M. Rattier, H. Benisty, R. P. Stanley, J. -F. Carlin, R. Houdré, U. Oesterle,
C. J. M. Smith, C. Weisbuch and T. F. Krauss, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 8, 238 (2002).

[25] T. N. Oder, K. H. Kim, J. Y. Lin and H. X. Jiang, Appl. Phys. Lett. 84, 466 (2004).

[26] J. J. Wierer, M. R. Krames, J. E. Epler, N. F. Gardner and M. G. Craford, Appl. Phys. Lett. 84, 3885 (2004).

[27] D. -H. Kim, C. -O. Cho, Y. -G. Roh, H. Jeon, Y. S. Park, J. H. Cho, J. S. Im, C. Sone, Y. Park, W. J. Choi and Q. -H. Park, Appl. Phys. Lett. 87, 203508 (2005).

[28] K. -W. Kwon, S. -H. Park, S. -S. Cho, B. -Jin. Kim, I. -H. Kim, J. K.

- Lee, S. W. Ryu and Y. H. Kim, Jpn. J. Appl. Phys. 46, 7622 (2007).
- [29] J. Nanosci. Nanotechno. accepted (2008).
- [30] J. -H. Hong and S. -H. Park, J. of Soc. Info. Display 16, 531 (2008).
- [31] http://www.chemoptic.com
- [32] S. -H. Park et al, J. Korean Phys. Soc., submitted (2008).
- [33] J. -I. Shim, J. C. Yi, J. R. Kim, fundamentals of Modern Light Emitting Semicondctors, (bookshill, Seoul, 2007), p. 88
- [34] K. Ryoo, Y. Kim, K. Jeon, Clean Technology, 11, 4 (2005).

저작물 이용 허락서								
학 과 광기술공학과 학번 20077493 과정 석사								
성명	성 명 한글 이 현 행 한문 李 賢 行 영문 Hyun-Haeng Lee							
주 소 김	주 소 전라남도 영암군 도포면 구학리 1536번지							
연락처 E	연락처 E-mail : naeng2@paran.com							
한글 마이크로 렌즈가 집적된 InGaN 계열 발광다이오드의 제작과 특성분석								
	영문			1				
	Fabrication and char light-Emitting Diode	acterizations of integrated wit	th Microlens	sed s Arrav				
본인이 저 저작물을 이용	나작한 위의 저작물에 대 용할 수 있도록 허락하고	하여 다음과 같은 동의합니다.	조건 아래 조	선대학교가				
	- [	가 음-						
<ol> <li>저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복 제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.</li> <li>위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다 만, 저작물의 내용변경은 금지함.</li> <li>배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.</li> <li>저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표 시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.</li> <li>해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1 개월 이내에 대학에 이를 통보함.</li> <li>조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.</li> <li>소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작 물의 전송·출력을 허락함.</li> </ol>								
동의여부 : 동의(0) 반대()								
2009년 2월								
저작자: 이 현 행 (인)								
조선대학교 총장 귀하								
- 45 -								