

## 측면 식각된 LED의 광추출 효율에 관한 연구

노영광 · 권기영<sup>†</sup>

공주대학교 전자공학과

Ⓣ 314-701 충남 공주시 신관동 182번지

(2002년 8월 21일 받음, 2003년 2월 20일 수정본 받음)

AlGaInP/GaP 계열 고휘도 LED의 광추출효율을 높이기 위하여 평행직육면체 다이스 측면을 식각할 경우에, 식각 깊이와 각도가 광추출효율에 미치는 영향을 재료의 흡수계수와 전극의 반사 및 흡수율에 따라 해석하고 공정의 용이성을 고려한 광추출효율의 개선이 기대되는 측면 식각깊이와 식각각도를 고찰하였다. 그 결과 결함 등에 의한 재료의 흡수계수가  $0\sim 1\text{ cm}^{-1}$  이 되도록 발광다이오드 재료의 결정을 성장시켰을 경우, 전극을 고려하지 않은 LED의 기하구조의 변화를 통한 광추출효율 개선 효과를 얻기 위해서 측면의 식각각도는  $22^\circ\sim 45^\circ$ 로 하고 식각깊이는 다이스 높이의  $8\%\sim 17\%$ 로 할 때 전극을 고려하지 않은 TIP 구조 LED의 80%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있고, 식각깊이를 다이스 높이의  $16\%\sim 39\%$ 로 하면 전극을 고려하지 않은 TIP 구조 LED의 90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있다. 전극의 영향을 고려할 경우 LED의 기하구조의 변화를 통한 광추출효율 개선 효과를 얻기 위해서 측면의 식각각도는  $25^\circ\sim 45^\circ$ 로 하고 식각깊이는 다이스 높이의  $30\%\sim 36\%$ 로 할 때 전극을 고려한 TIP 구조 LED의 80%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있고, 식각깊이를 다이스 높이의  $57\%\sim 71\%$ 로 하면 전극을 고려한 TIP 구조 LED의 90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있음을 밝혔다.

주제어 : Light extraction efficiency, LED.

### I. 서 론

1960년대 연구되기 시작해 1970년대부터 상용화된 LED는 최근들어 그 휘도가 빠르게 개선되고 있어 LED를 이용한 반도체 조명의 시대에 대한 기대가 더욱 커지고 있다. 1990년대 후반에 들어서면서 LED의 조명효율은 백열전구 수준을 넘어섰으며 3원색과 백색 LED가 등장하면서 LED의 응용범위가 넓어져 자동차 계기판 표시등, 액정표시장치 백라이트, 공황 환주로의 안내등, 옥외 전광판 등에 활용되고 있다. 그리고 현재 백열등과 형광등을 LED로 대체하여 전력소모를 줄이고 경제적이고 반영구적이며 환경친화적인 고효율 LED 조명등을 개발하기 위하여 노력하고 있다.<sup>[1]</sup>

고효율 LED를 얻기 위해서는 LED의 내부양자효율과 외부양자효율이 높아야 한다. 먼저 높은 내부양자효율을 얻기 위해서는 활성층에서의 발광재결합률을 높이고 비발광재결합률을 낮추어야 하며, 이를 위해서는 결정의 질을 개선해야 하고 이중이종접합 또는 다중양자우물 구조와 같이 활성층의 캐리어 농도를 높이는 접합 구조로 설계해야 한다. 현재 내부양자효율은 거의 100%에 가까워졌다. 외부양자 효율을 높이기 위해서는 활성층에서 방출된 빛이 활성층, 기판, 전극에 의해서 흡수되어 사라지지 않도록 설계해야 한다. 특히 활성층에서 발생한 빛이 반도체-에폭시 경계면으로 입사할 때, 반도체 재료의 높은 굴절률로 인하여 외부로 탈출하지 못하고 내부로 전 반사되어 반도체 내부에 갇히게 되므로, 빛을 LED 표면 밖으로 탈출시켜 광추출효율을 높이는 것이 중요하다. 이러한 광

탈출 문제는 1960년대 LED 개발 초기부터 알려졌고 반도체 다이스의 모양을 변화시켜 이 문제를 해결할 수 있다는 것이 증명되었다.<sup>[2]</sup> LED 모양을 식각에 의해 변형시켜 광추출효율을 높인 대표적인 예가 TIP(Truncated Inverted Pyramid) LED이다.<sup>[3]</sup> TIP LED는 다이스의 측면 구조를 변형시켜 반도체 내부로 전반사되는 광양을 감소시킴으로써 광추출효율을 높인 소자이며, 최근에 50% 이상의 외부양자효율을 얻을 수 있음이 발표되었다.

본 논문에서는 red, orange, yellow 파장의 빛을 내는 AlGaInP/GaP 계열 고휘도 LED<sup>[5]</sup>의 광추출효율을 높이기 위하여 평행 직육면체의 측면을 식각할 경우에, 식각 깊이와 각도가 광추출효율에 미치는 영향을 반도체 재료의 흡수계수와 전극의 반사 및 흡수율에 따라 해석하고 공정의 용이성을 고려한 광추출효율 개선이 기대되는 식각 깊이와 각도를 고찰하였다.

### II. 해석 방법

LED의 광추출효율(extraction efficiency)의 정의는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\text{반도체 외부로 방출된 광자의 수}}{\text{활성층에서 방출된 광자의 수}} \quad (1)$$

실제의 LED는 활성층에서 발생한 빛이 활성층, 기판, 금속 전극에서 흡수되거나 전반사에 의해서 반도체 다이스를 탈출하지 못하는 현상이 존재하여 1보다 작은 광추출효율 값을 갖게 된다.

본 논문에서는 광선추적기법으로 활성층에서 방출된 광자가

<sup>†</sup>E-mail: kky@mail.kongju.ac.kr

반도체 내부와 외부의 굴절률 경계면에서 Snell의 법칙과 Fresnel 정리에 의해서 입사, 반사, 투과되고 반도체 내부에서 흡수에 의해서 감쇄되거나 전극에 의해서 반사 또는 흡수되는 과정을 3차원 상에서 추적하여 반도체 칩 외부로 투과 방출된 광자의 총량을 구하고, 활성층에서 방출된 광자에 대한 투과율을 구하여 광추출효율을 구하였다. LED의 활성영역에서 방출된 광자에 대한 광추출효율은 다음 식으로부터 계산하였다.

$$\eta = \frac{1}{MPQ} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^R N_{ijk} \quad (2)$$

여기서  $i$ 는 활성영역상에 균일하게 분포하는 발광점들의 일련 번호 즉  $i$ 번째 발광점의 번호를 의미하며,  $j$ 는  $i$ 번째 발광점에서 균등한 고체각으로 방사되는 광선의 번호를 의미하고, 모든  $j$ 번째 광선 방향으로  $Q$ 개의 광자가 방출되는 것으로 가정하였다. 따라서 LED의 활성영역 전체에서 방출된 광자의 총 개수는  $MPQ$ 이다. 또한  $k$ 는  $Q$ 개의 광자가 다이오드 내부에서 진행하다가 경계면을 만나 일부는 투과되고 나머지는 내부로 반사되며, 반사된 광자는 다시 진행하다가 또 다른 경계면을 만나고 하는 동작이 되풀이 되는데, 현재 고려하는 경계면이 몇 번째 만나는 경계면에 해당하는지 그 번호를 의미하며, 본 논문에서는 편의상  $k$ 의 최대값  $R$ 을  $R=100$ 으로 제한하였다. 결국  $N_{ijk}$ 는  $i$ 번째 발광점에서  $j$ 번째 방향으로 출발한  $Q$ 개의 광자 중에서,  $k$ 번째의 경계면을 만났을 때 이 경계면에서 투과 되어 다이오드 외부로 탈출하는 광자의 개수를 의미한다.

또한 LED를 탈출한 광자가 다이오드 내부에서 이동한 평균거리  $L$ 를 비교하기 위하여 다음 식과 같이 평균거리  $L$ 을 계산하였다.

$$L = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^R (L_{ijk} \times N_{ijk})}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^R (N_{ijk})} \quad (3)$$

여기서  $L_{ijk}$ 는 LED를 탈출한  $N_{ijk}$ 개의 광자가 탈출하기 전까지 다이오드 내부에서 진행한 거리이다.

이와 같은 알고리즘으로 그림 1과 그림 2의 LED 구조에 대하여 시뮬레이션하고 결론을 도출하였다. 그림 1은 TIP 구조의 LED를 나타낸 것이고, 그림 2는 본 논문에서 시뮬레이션에 사용된 일각 식각된 LED 구조를 나타낸 것이다. 가정된 LED는 상·하단전극(ohmic contact), 유도층(GaP), 활성층(AiGaInP), 투명기판(GaP)의 구조이다.<sup>[5]</sup> 보통 활성층이 LED

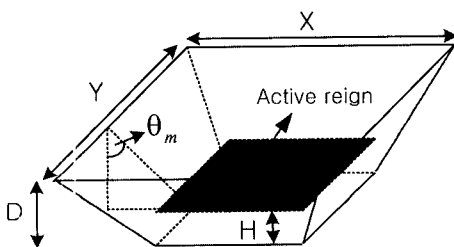


그림 1. TIP 발광다이오드.

에서 차지하는 두께는 작으므로 LED 재료는 편의상 GaP로 하였으며, 에폭시로 LED를 둘러싸서 패키징을 한 경우에 대

표 1. 그림 1에 도시된 TIP 발광다이오드에서 전극을 고려하지 않은 시뮬레이션에 사용된 파라미터와 값

파라미터	값
다이오드 높이, $D$	변수( $\leq 110 \mu\text{m}$ )
다이오드 윗면, 가로길이( $X$ )=세로길이( $Y$ )	300 $\mu\text{m}$
다이오드 밑면, 가로길이=세로길이	변수
활성영역 높이, $H$	$0.5 \times D$
활성영역, 가로길이 = 세로길이	변수
식각 각도, $\theta_m$	변수
다이오드 내부 굴절률, $n_i$	3.02(GaP)
다이오드 외부 굴절률, $n_r$	1.5(Epoxy)

표 2. 그림 1에 도시된 TIP 발광다이오드에서 전극을 고려한 시뮬레이션에 사용된 파라미터와 값

파라미터	값
다이오드 높이, $D$	250 $\mu\text{m}$
다이오드 윗면, 가로길이( $X$ )=세로길이( $Y$ )	변수
다이오드 밑면, 가로길이 = 세로길이	400 $\mu\text{m}$
윗면 원형 판전극 지름	100 $\mu\text{m}$
밑면 전면전극, 가로길이 = 세로길이	400 $\mu\text{m}$
전극 (반사율)/(흡수율)	(85%)/(15%)
활성영역 높이, $H$	50 $\mu\text{m}$
활성영역, 가로길이 = 세로길이	400 $\mu\text{m}$
식각 각도, $\theta_m$	변수
다이오드 내부 굴절률, $n_i$	3.02(GaP)
다이오드 외부 굴절률, $n_r$	1.5(Epoxy)

표 3. 그림 2에 도시된 A 구조에서 전극을 고려하지 않은 시뮬레이션에 사용된 파라미터와 값

파라미터	값
다이오드 높이, $D$	110 $\mu\text{m}$
다이오드 윗면, 가로길이 = 세로길이	변수
다이오드 밑면, 가로길이( $X$ )=세로길이( $Y$ )	300 $\mu\text{m}$
활성영역 높이, $H$	변수
활성영역, 가로길이 = 세로길이	변수
식각 각도, $\theta_m$	변수
식각 깊이, $t_m$	$D-H$
다이오드 내부 굴절률, $n_i$	3.02 (GaP)
다이오드 외부 굴절률, $n_r$	1.5 (Epoxy)

표 4. 그림 2에 도시된 A 구조에서 전극을 고려한 시뮬레이션에 사용된 파라미터와 값

파라미터	값
다이오드 높이, $D$	250 $\mu\text{m}$
다이오드 윗면, 가로길이 = 세로길이	400 $\mu\text{m}$
다이오드 밑면, 가로길이( $X$ )=세로길이( $Y$ )	변수
밑면 원형 판전극 지름	100 $\mu\text{m}$
윗면 전면전극 가로길이 = 세로길이	400 $\mu\text{m}$
전극 (반사율)/(흡수율)	(85%)/(15%)
활성영역 높이, $H$	200 $\mu\text{m}$
활성영역, 가로길이 = 세로길이	400 $\mu\text{m}$
식각 각도, $\theta_m$	변수
다이오드 내부 굴절률, $n_i$	3.02(GaP)
다이오드 외부 굴절률, $n_r$	1.5(Epoxy)

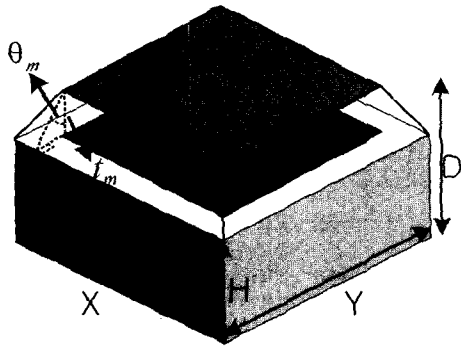


그림 2. 시뮬레이션에 사용된 LED 구조(A 구조).

하여 시뮬레이션을 수행하였다. GaP의 전극으로 사용되는 재료에는 Au, Al, Ni, Pd 등이 있으며,<sup>[8-10]</sup> 본 시뮬레이션에서는 편이상 전극에서의 반사율을 85%로 하였고, 나머지 15%는 흡수된다고 가정하였다.<sup>[3]</sup> 시뮬레이션에 필요한 파라미터와 그 값을 그림 1에 대한 것은 표 1과 표 2에, 그리고 그림 2에 대한 것은 표 3과 표 4에 각각 나타내었다. 표 1에서  $\theta_m$ 이 50° 이상일 경우에는 밑면의 크기가 100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 가 유지 되도록 다이스 높이 D를 110  $\mu\text{m}$ 보다 낮추었다. 표 1과 표 3은 전극이 없는 경우이고 표 2와 표 4는 전극이 있는 경우이다. 전극의 흡수가 LED의 광추출효율에 미치는 영향을 실제에 가깝게 해석하기 위해서 표 2와 같이 TIP LED 구조를 실제 크기에 가깝게 설정하고,<sup>[3,4]</sup> 따라서 이와 성능을 비교하기 위한 A 구조도 표 4와 같이 전극, 활성층, 다이스 높이를 표 2의 TIP LED와 같게 유지하였다.

### III. 해석 결과 및 토의

평행직육면체의 측면을 식각하여 식각깊이와 각도가 광추출 효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 아래와 같이 7가지 경우로 나누어 시뮬레이션을 실시하였다.

- [경우 1] 흡수계수가  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 식각각도에 따른 광추출효율과 평균이동거리
- [경우 2] 식각각도가  $\theta_m = 35^\circ$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 흡수계수에 따른 광추출효율과 평균이동거리
- [경우 3] 식각각도가  $\theta_m = 30^\circ$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조(그림 2)의 흡수계수에 따른 광추출효율과 평균이동거리
- [경우 4] 흡수계수가  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 식각각도와 식각깊이에 따른 광추출효율과 평균이동거리
- [경우 5] 흡수계수가  $\alpha = 5 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 식각각도와 식각깊이에 따른 광추출효율과 평균이동거리
- [경우 6] 흡수계수가  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려한 TIP 구조의 식각각도에 따른 광추출효율과 평균이동거리
- [경우 7] 흡수계수가  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려한 A 구조의 식각각도와 식각깊이에 따른 광추출효율과 평균이동거리

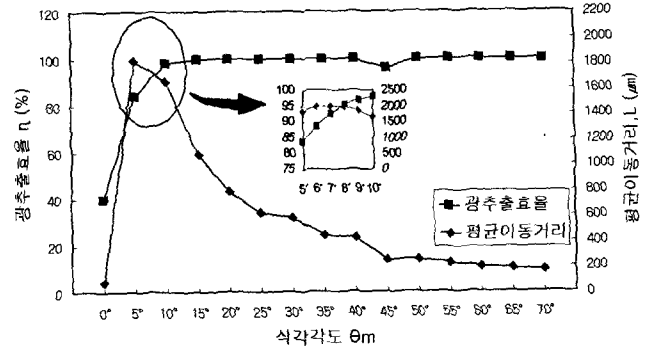


그림 3. 흡수계수  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 식각각도에 따른 광추출효율과 평균이동거리.

각 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴보면 다음과 같다. [경우 1] 즉 흡수계수가  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ 인 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 식각각도에 따른 광추출효율과 평균이동거리에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 3에 나타나 있다. 4개의 측면을 전체에 걸쳐 일정한 각도로 식각한 TIP 구조의 경우 평행직육면체 구조와<sup>[6,7]</sup> 마찬가지로 6개의 광 탈출 원뿔이 형성된다. TIP 구조에서 식각된 4개의 측면은 평행직육면체 구조의 측면과 다르게 광자의 진행 방향을 바꾸어 광자가 다른 경계에서 임계각 안에 들어올 수 있는 확률을 측면 식각각도가 커질수록 높게 되어 그림 3과 같이 광추출효율을 높이고 평균이동거리를 감소시키는 역할을 한다. TIP 구조의 광추출효율은 식각각도  $\theta_m$ 이 커질수록 증가하다가 식각각도가 10° 이상이 되면 광추출효율은 거의 100%로 포화된다. 그림 3에서 5°-10° 식각각도 범위에서 식각각도가 증가함에 따라서 광추출효율이 크게 증가하고 평균이동거리가 큰 값을 갖는 현상을 보여준다. 이것은 식각각도가 작을 경우 광자가 식각된 측면과 만나 진행 방향이 바뀌어 다른 경계에서 임계각 안에 들어와 다이스를 탈출하려면 다이스 내에서 긴 거리를 이동해야 함을 의미한다. 평균이동거리는 식각각도가 7°일 때 최대값을 보여주며 이 최대값의 e<sup>-1</sup>으로 줄어드는 식각각도는 약 22°이고, 식각각도가 45° 이상이 되면 평균이동거리는 거의 변화되지 않는다. 평균이동거리가 길다는 것은 반도체 재료에서 광손실이 있는 경우 흡수계수  $\alpha$ 가 0보다 크면 클수록 그만큼 광손실이 크게 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 식각각도를 크게 할수록 평균이동거리가 짧아지므로 흡수계수가 0이 아닌 경우에 광손실을 줄일 수 있으므로 바람직하나, 식각각도가 커지면서 전극면적의 확보가 곤란하고 제작의 어려움이 있으므로, 식각각도  $\theta_m$ 은 약 22°~45° 사이가 적당할 것으로 판단된다.

그림 4는 [경우 2] 즉 식각각도  $\theta_m = 35^\circ$ 로 하여 식각한 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 흡수계수에 따른 광추출효율과 평균이동거리에 대한 시뮬레이션 결과이다. 광추출효율은 흡수계수가  $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ 이 될 때까지는 거의 100% 값을 보이다가  $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ 를 넘어서는 서서히 감소하여  $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$ 이 되면 72%로 줄어든다. 따라서 TIP 구조에서 100%에 가까운 광추출효율을 얻기 위해서는 결함이 없고 손실이 적은 양질의 결정을 성장하여 흡수계수  $\alpha$ 가 1  $\text{cm}^{-1}$ 이상이 되도록 제작하여야 한다. 실제 0.28  $\text{cm}^{-1}$  정도의 흡수계수는 쉽게 달성

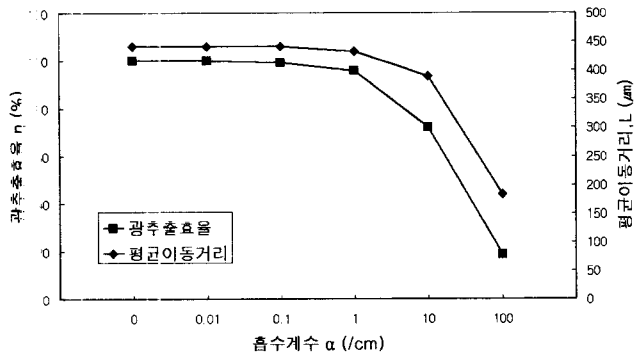


그림 4. 식각각도  $\theta_m = 35^\circ$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 흡수계수에 따른 광추출효율과 평균이동거리.

할 수 있는 것으로 보고 되어 있다.<sup>[11]</sup> 평균이동거리도 광추출 효율과 비슷한 경향을 보이며, 흡수계수가 클 때에 이동거리가 짧게 나오는 것은 식 (3)에서 알 수 있듯이 이동거리가 긴 광자는 흡수되어 탈출하지 못하고 이동거리가 짧은 광자들이 이동거리 계산에 기여하는 바가 커서 나타나는 현상이다.

그림 5와 그림 6은 [경우 3] 즉 식각각도  $\theta_m$ 을 임계각 크기인  $30^\circ$ 로 식각한 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 흡수계수에 따른 광추출효율과 평균이동거리에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 7은 전극을 고려하지 않은 TIP 구조가 갖는 초미 광추출효율 값의 80% 및 90%의 값에 해당하는 광추출

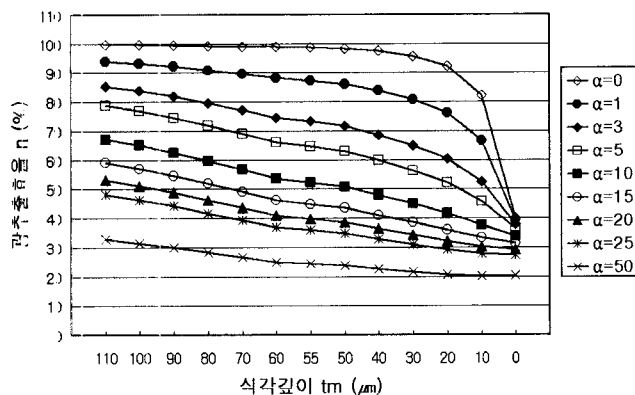


그림 5. 식각각도  $\theta_m = 30^\circ$ 일 때 흡수계수 변화에 따른 전극을 고려하지 않은 A구조의 광추출효율.

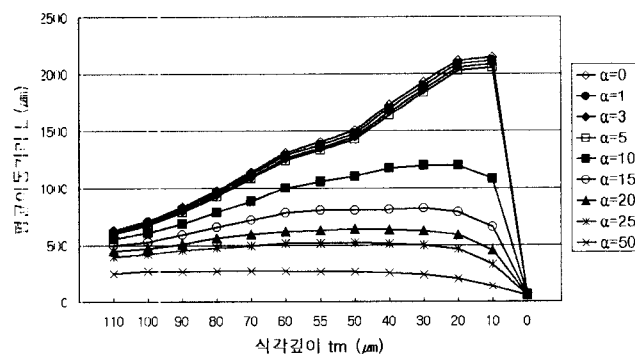


그림 6. 식각각도  $\theta_m = 30^\circ$ 일 때 흡수계수 변화에 따른 전극을 고려하지 않은 A구조의 평균이동거리.

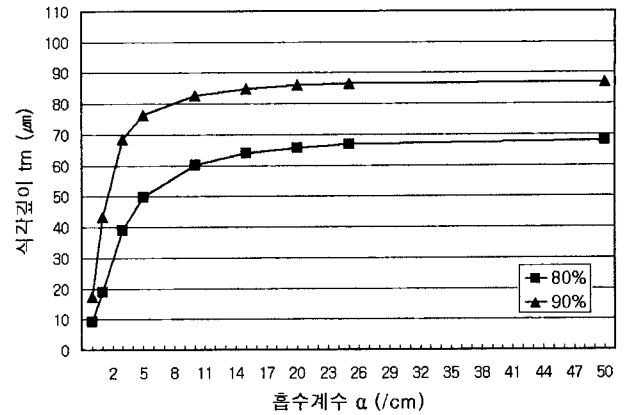


그림 7. 식각각도  $\theta_m = 30^\circ$ 일 때 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 광추출효율과 비교하여 80% 및 90%의 효과를 기대할 수 있는 전극을 고려하지 않은 A 구조의 흡수계수와 식각깊이.

효율을 갖도록 하기위하여, 그림 2와 같은 전극을 고려하지 않은 A 구조에서 식각깊이  $t_m$ 을 얼마로 해주어야 하는지 그 수치를 흡수계수  $\alpha$ 의 변화에 따라 도식한 그림이다. 흡수계수  $\alpha$ 가  $0 \sim 1 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 식각깊이  $t_m$ 이  $9 \sim 19 \mu\text{m}$ (다이소 높이 D의 8%~17%에 해당)만 되어도 TIP 구조의 80%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있으며,  $18 \sim 43 \mu\text{m}$ (다이소 높이 D의 16%~39%에 해당)를 식각하면 TIP 구조의 90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 흡수계수가 커질수록 TIP 구조와 같은 광추출효율을 얻기 위해서는 그만큼 식각깊이  $t_m$ 을 증가시켜야 하며, 흡수계수가  $10 \text{ cm}^{-1}$ 보다 커지면 식각깊이  $t_m$  값이 포화되는 모습을 볼 수 있다. 즉 흡수계수가  $10 \text{ cm}^{-1}$ 보다 큰 경우에는 흡수에 의한 광손실이 커져 식각깊이에 대한 광추출효과의 의존성이 적음을 보여준다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 식각깊이가 증가하면서 평균이동거리가 감소하는 경향이  $\alpha$ 가  $10 \text{ cm}^{-1}$ 보다 클 때와  $\alpha$ 가  $5 \text{ cm}^{-1}$ 보다 작을 때에 확연히 달라지는 현상에서도 이를 알 수 있다.

그림 8과 그림 9는 [경우 4] 즉 흡수계수가  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 식각각도와 식각깊이에 따른 광추출효율과 평균이동거리에 대한 시뮬레이션 결과이다. 측면을 식각하지 않은 평행직육면체 LED의 경우 6개의 광

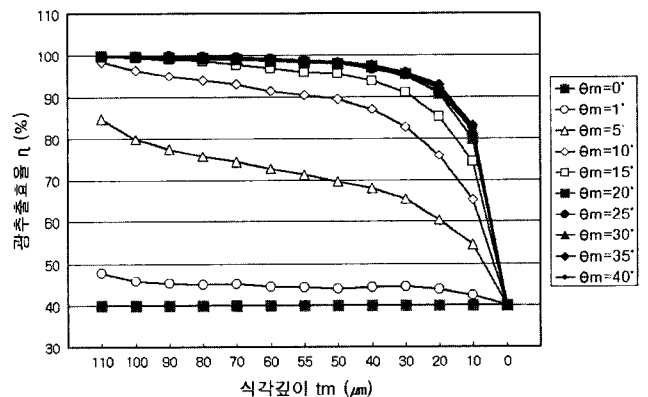


그림 8. 흡수계수  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 광추출효율.

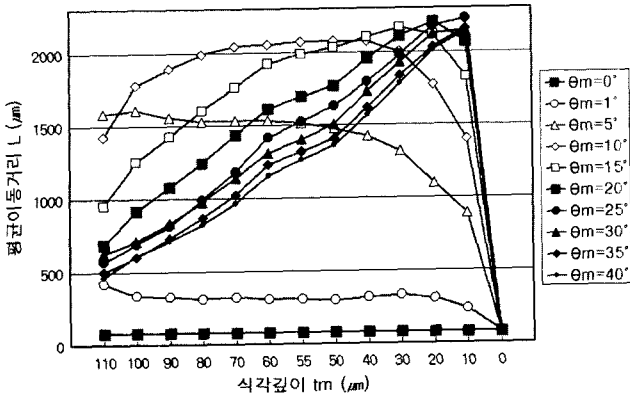


그림 9. 흡수계수  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 평균이동거리.

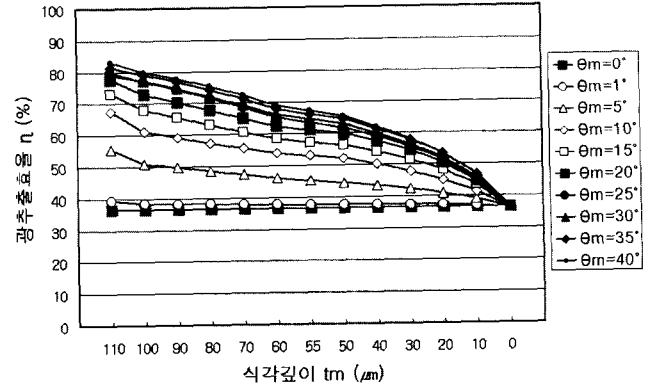


그림 11. 흡수계수  $\alpha=5 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 광추출효율.

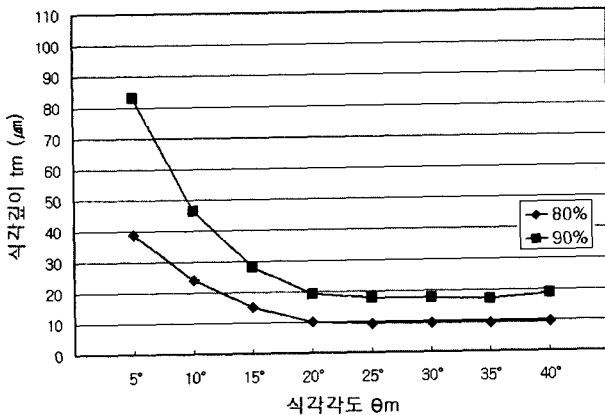


그림 10. 흡수계수  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$ 일 때 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 광추출효율과 비교하여 80% 및 90%의 효과를 기대할 수 있는 전극을 고려하지 않은 A 구조의 식각각도와 식각깊이.

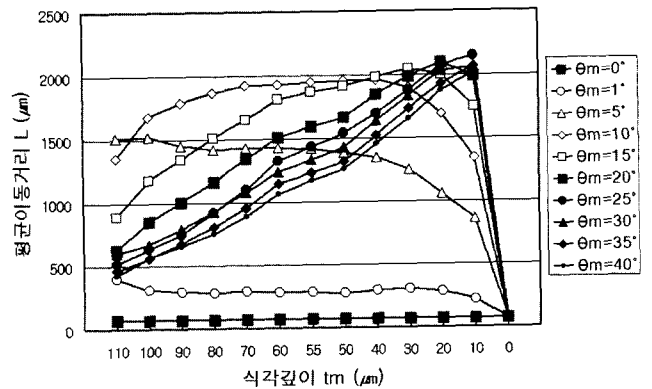


그림 12. 흡수계수  $\alpha=5 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 평균이동거리.

탈출 원뿔이 형성된다.<sup>16,7)</sup> 그런데 A 구조의 경우에 식각된 측면으로 인해서 4개의 광 탈출 원뿔이 추가된다. 이 추가된 광 탈출 원뿔로 인해서 광추출효율이 개선되는 결과는 그림 8에 나타나 있다. 또한 식각된 측면은 광자의 진행 방향을 바꾸어서 광자가 다른 경계에서 임계각 안에 들어올 수 있는 확률을 높이게 되어 그림 8과 같이 광추출효율을 높일 뿐만 아니라 그림 9와 같이 광자의 평균이동거리를 감소시키는 역할을 한다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 식각각도  $\theta_m$ 이 0°에서 20°로 점점 증가해가면서 전체 식각깊이 범위에 걸쳐 광추출효율이 빠르게 증가함을 보이다가,  $\theta_m$ 이 20°보다 커지면 식각깊이가 50~110  $\mu\text{m}$  범위에서 거의 100%의 광추출효율을 보인다.  $\theta_m$ 이 20° 보다 클 때는 식각깊이가 약 30  $\mu\text{m}$ 가 될 때까지는 식각깊이가 증가함에 따라 광추출효율이 급격히 증가하는 현상을 보이다가, 식각깊이가 30  $\mu\text{m}$ 보다 커지면 포화되는 특성을 나타낸다. 그림 10은 흡수계수가  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우에 전극을 고려하지 않은 TIP 구조가 갖는 최대 광추출효율 값의 80% 및 90%의 값에 해당하는 광추출효율을 갖도록하기 위한 전극을 고려하지 않은 A 구조에서의 식각깊이  $t_m$ 의 수치를 식각각도  $\theta_m$ 의 변화에 따라 도식한 그림이다. 식각각도  $\theta_m$ 이

20°이상인 경우에 식각깊이  $t_m$ 이 10  $\mu\text{m}$ (다이소 높이  $D$ 의 9%에 해당)만 되어도 TIP 구조의 80%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있으며, 17~19  $\mu\text{m}$ (다이소 높이  $D$ 의 15%~17%에 해당)를 식각하면 90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 식각각도  $\theta_m$ 이 20°보다 작아질수록 TIP와 같은 광추출효율을 얻기 위해서는 그 만큼 식각깊이  $t_m$ 을 증가시켜야 함을 보여준다.

그림 11과 그림 12는 [경우 5] 즉 흡수계수가  $\alpha=5 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 A 구조의 식각각도와 식각깊이에 따른 광추출효율과 평균이동거리에 대한 시뮬레이션 결과이다. 식각깊이가 커지면서 광추출효율이 변화하는 경향을 식각각도 변화에 따라 살펴보면, 흡수계수가  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$ 인 그림 8의 경우에는 초기에 급격한 증가를 보이다가 포화되는 비선형적 변화를 보인 반면, 그림 11에서는 광추출효율이 거의 선형적으로 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 그림 13은 흡수계수가  $\alpha=5 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우에 전극을 고려하지 않은 TIP 구조가 갖는 최대 광추출효율 값의 90% 및 80%의 값에 해당하는 광추출효율을 갖도록 하기 위한 전극을 고려하지 않은 A 구조에서의 식각깊이  $t_m$ 의 수치를 식각각도  $\theta_m$ 의 변화에 따라 도식한 그림이다. 흡수계수가  $0 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우 그림 10에서 관찰할 수 있었던 경향 즉, 식각각도를 크게 해주면 식각깊이를 작게 해주어도 높은 광추출효율을 얻을 수 있었던 경향과는 다르게, 그

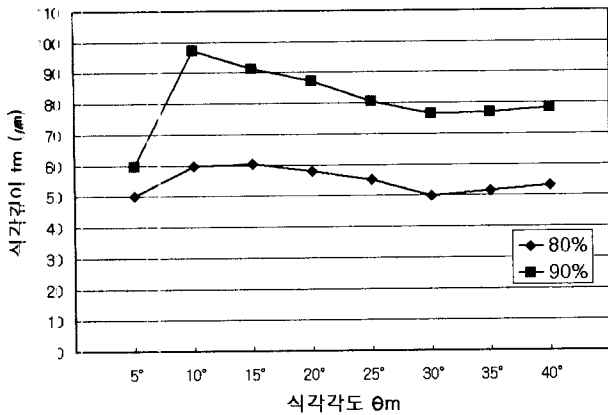


그림 13. 흡수계수  $\alpha=5 \text{ cm}^{-1}$  일 때 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 광추출효율과 비교하여 80% 및 90%의 효과를 기대할 수 있는 전극을 고려하지 않은 A 구조의 식각각도와 식각깊이.

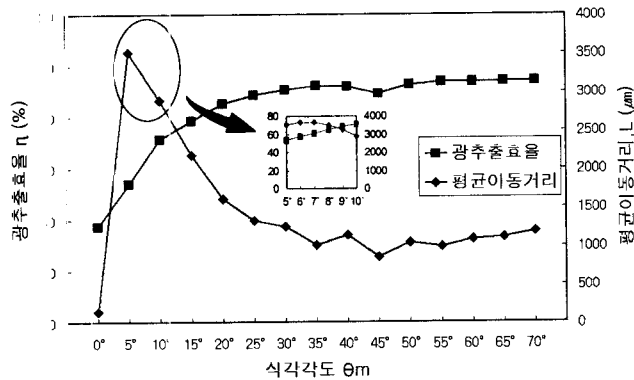


그림 14. 흡수계수  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$  인 경우 전극을 고려한 TIP 구조의 식각각도에 따른 광추출효율과 평균이동거리.

림 3에서는 식각각도에 관계없이 식각깊이가 50~60 $\mu\text{m}$ (다이스 높이 D의 45%~55%에 해당)가 되어야 TIP 구조와 비교하여 80%의 광추출효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 그림 10과 그림 13을 비교하면 같은 광추출효과를 얻기 위해서 흡수계수가 큰  $\alpha=5 \text{ cm}^{-1}$  인 경우에는 식각깊이를 더 크게 해야 하는 것을 알 수 있다.

그림 14는 [경우 6] 즉 흡수계수가  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$  인 경우 전극을 고려한 TIP 구조의 식각각도에 따른 광추출효율과 평균이동거리에 대한 시뮬레이션 결과이며 그림 3에 나타난 [경우 1]에 대한 결과와 비슷한 경향을 나타낸다. 그림 3과 그림 14의 광추출효율을 비교해 볼 때 그림 3에 비해서 그림 14의 광추출효율이 식각각도 전체 범위에 걸쳐 낮아졌다. 이것은 다이스 윗면과 밑면을 향한 광 탈출 원뿔이 광을 흡수하는 전극에 가려져 광 손실이 일어났기 때문에 나타난 결과이다. 또한 최대 효율 즉 포화값의 90%에 해당하는 광추출효율을 갖는 식각각도가 그림 3에서는 7°이었으나 그림 14에서는 20°로 증가하였다. 이것은 20° 이하로 식각된 측면을 갖는 경우 식각각도가 작을수록 식각된 측면에 의한 진행 방향의 변화가 작게 되어 광자가 탈출하지 못하고 다이스 내부에서 진행하는 거리가 길어지며 따라서 광자들이 전극과 만나 흡수되는 확률이

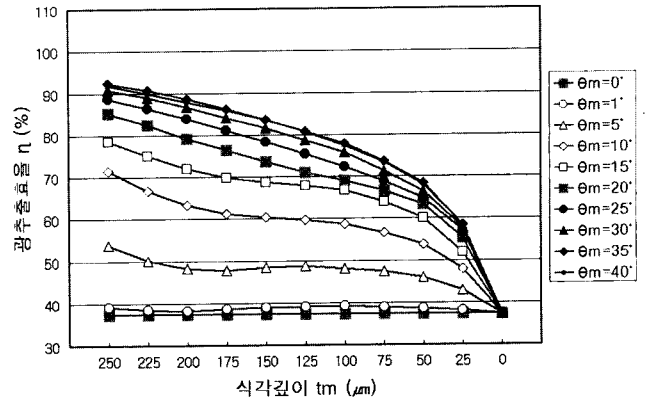


그림 15. 흡수계수  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$  인 경우 전극을 고려한 A 구조의 광추출효율.

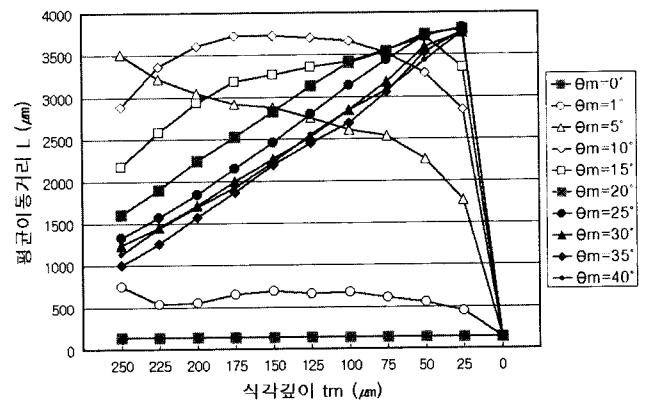


그림 16. 흡수계수  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$  인 경우 전극을 고려한 A 구조의 평균이동거리.

증가하기 때문이다. 그림 14에서 평균이동거리는 그림 3에 나타난 결과와 마찬가지로 식각각도가 7°일 때 최대값을 보여주며 이 최대값의  $e^{-1}$ 으로 줄어드는 식각각도는 약 25°이다. 그리고 그림 14는 LED 전극의 광 흡수를 고려할 때 평균이동거리가 길면 전극에 의한 광손실이 커짐을 보여준다. 따라서 LED 전극의 광흡수를 고려할 경우 식각각도  $\theta_m$ 은 약 25°~45° 사이가 적당할 것으로 사료된다. 전극이 있고 흡수계수가  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$ 이며 식각각도가  $\theta_m=35^\circ$ 인 경우 전극을 고려한 TIP 구조의 광추출효율은 그림 14와 같이 92%이고, 전극이 없고 흡수계수가  $\alpha=1 \text{ cm}^{-1}$ 이며 식각각도가  $\theta_m=35^\circ$ 인 경우 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 광추출효율은 그림 4와 같이 96%이다. 따라서 일반적으로 GaP의 광 흡수계수가  $1 \text{ cm}^{-1}$ 보다 작은 것을 고려할 때 전극에 의한 광 손실이 GaP 칩에 의한 손실보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

그림 15와 16은 [경우 7] 즉 흡수계수가  $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$  인 경우 전극을 고려한 A 구조의 식각각도와 식각깊이에 따른 광추출효율과 평균이동거리에 대한 시뮬레이션 결과이다. A 구조에 대하여 전극을 고려하지 않은 [경우 4]에 대한 시뮬레이션 결과인 그림 8과 다르게 전극의 흡수를 고려할 경우 A 구조의 광추출효율을 높이기 위해서 그림 15와 같이 더 큰 식각깊이와 식각각도가 요구된다. 이것은 상·하단 전극이 윗면과 밑

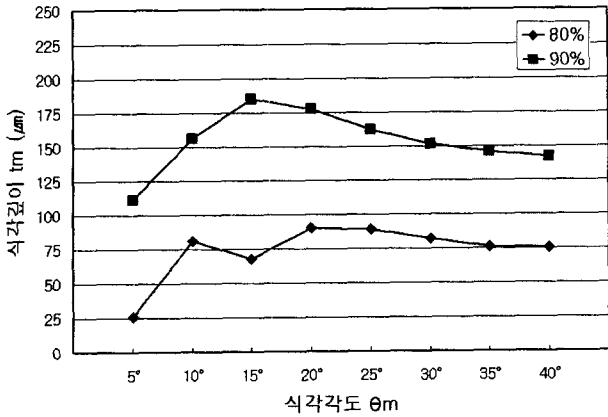


그림 17. 흡수계수  $\alpha = 0 \text{ cm}^{-1}$  일 때 전극을 고려한 TIP 구조의 광추출효율과 비교하여 80% 및 90%의 효과를 기대할 수 있는 전극을 고려한 A 구조의 식각각도와 식각깊이.

면을 향한 2개의 광 탈출 원뿔을 가려서 광 흡수가 일어나고, 식각된 측면에 의해서 진행 방향이 바뀌어 탈출 할 수 있는 광자들이 전극을 만나 흡수되어 광추출효율이 낮아지기 때문이다.<sup>16)</sup> 그림 17은 전극을 고려한 TIP 구조가 갖는 최대 광추출효율 값의 80% 및 90%의 값에 해당하는 광추출효율을 갖도록 하기위하여, 전극을 고려한 그림 2와 같은 A 구조에서 식각깊이  $t_m$ 을 얼마로 해주어야 하는지 그 수치를 식각각도  $\theta_m$ 의 변화에 따라 도식한 그림이다. 식각각도  $\theta_m$ 이 20° 이상인 경우에 식각깊이  $t_m$ 이 76~91  $\mu\text{m}$ (다이스 높이 D의 30%~36%에 해당)만 되어도 TIP 구조의 80%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있으며, 142~178  $\mu\text{m}$ (다이스 높이 D의 57%~71%에 해당)로 식각하면 TIP 구조의 90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서 평행직육면체 발광다이오드의 측면의 일부를 식각할 경우에, 측면 전체를 식각하지 않고도 TIP 구조의 광추출효율에 가까운 값을 얻기 위해서는 식각 깊이와 각도를 어느 정도로 해주어야 하는지 알아보기 위하여, 흡수계수와 전극의 효과를 고려하여 해석하였다. TIP 구조에서 식각각도  $\theta_m$ 은 22°~45° 사이가 적당하고, 흡수계수가  $1 \text{ cm}^{-1}$ 보다 작으면 거의 100%의 광추출효율을 가지며, 흡수계수가  $5 \text{ cm}^{-1}$ 가 되면 흡수되는 광손실로 인하여 광추출효율이 83%로 감소된다. 전극을 고려하지 않은 그림 2와 같은 A 구조에서 식각각도  $\theta_m$ 을 30°로 하면서 흡수계수가 0~1  $\text{cm}^{-1}$ 인 경우 식각깊이가 다이스 높이의 8%~17%만 되어도 TIP 구조의 80%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있으며, 식각깊이가 다이스 높이의 16%~39%로 되면 TIP 구조의 90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있다. 그리고 식각각도  $\theta_m$ 이 20° 이상이고 흡수계수가 이상적으로 0  $\text{cm}^{-1}$ 인 경우에 식각깊이가 다이스 높이의 9%만 되어도 전극을 고려하지 않은 TIP 구조의 80%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있으며, 다이스 높이의 15%~17%를 식각하면 90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있다. 전

극의 반사 및 흡수율을 고려하고 GaP 재료에 의한 흡수계수가 0  $\text{cm}^{-1}$ 인 경우에 다이스 높이의 30%~36%로 식각하면 전극을 고려한 TIP 구조의 80%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있으며 식각깊이를 다이스 높이의 57%~71%로 하면 전극을 고려한 TIP 구조 LED의 90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있다. 따라서 그림 2의 A 구조는 측면 전체를 식각하지 않고 일부만을 식각함에도 불구하고 TIP 구조의 80%~90%에 해당하는 광추출효율을 얻을 수 있으며, TIP 구조 같이 측면 전체를 식각하는 어려운 공정을 거치지 않고 측면의 일부를 식각하는 보다 용이한 공정으로 높은 칩 수율을 얻을 수 있는 이점이 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년도 두뇌한국21사업에 의하여 일부 지원되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] M. George Craford, "Overview of Device Issues in High-Brightness Light-Emitting Diodes," *Semiconductors and semimetals*, vol. 48, pp. 47-63, 1997.
- [2] 米津宏雄, 光通信素子工學(工學圖書, 1984), 3章.
- [3] M. R. Krames, "High-power truncated-inverted-pyramid ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ ) $\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaP}$  light-emitting diodes exhibiting >50% external quantum efficiency," *Applied Physics Letter*, vol. 75, no. 16, pp. 2365-2367, 1999.
- [4] F. A. Kish, F. M. Steranka, and D. C. DeFervere, "Very high-efficiency semiconductor wafer-bonded transparent-substrate ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ ) $\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaP}$  light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no. 21, pp. 2839-2841, 1994.
- [5] F. A. Kish and R. M. Fletcher, "AlGaInP Light-Emitting Diodes," *Semiconductors and semimetals*, vol. 48, pp. 149-226, 1997.
- [6] K. H. Huang, J. G. Yu, and R. M. Fletcher, "Twofold efficiency improvement in high performance AlGaInP light-emitting diodes in the 555-620 nm spectral region using a thick GaP window layer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 9, pp. 1045-1047, 1992.
- [7] S. J. Lee, "Design rules for high-brightness light-emitting diodes grown on GaAs substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 2, pp. 509-516, 1998.
- [8] R. Fremunt, J. Kortan, O. and Janouskova, "Investigation of Au-Ni ohmic contacts on n-type GaP," *J. Phys. D*, vol. 6, pp. 95-97, 1973.
- [9] M.-H. Park and L. C. Wang, "The Si/Pd ohmic contact to n-GaP based on the solid phase regrowth principle," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, no. 7, pp. 3138-3142, 1997.
- [10] F. Zhanga and D. Zhang, "Pb/Zn/Pd ohmic contacts to p-GaP," *Materials Science and Engineering B*, vol. 48, pp. 198-201, 1997.
- [11] Takao Saito and Ken Suto, "Raman gain and optical loss in GaP-AlGaP waveguides," *J. Appl. Phys.*, vol. 87, no. 7, pp. 3399-3403, 2000.

## Study on light extraction efficiency of a side-etched LED

Y. K. Noh and K. Y. Kwon<sup>†</sup>

*Kongju Univ. Electronic Engineering Department, Kongju 314-701, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: kky@mail.kongju.ac.kr*

(Received August 21, 2002, Revised manuscript February 20, 2003)

In the case of a AlGaInP/GaP system rectangular parallelepiped high brightness LED which has side walls etched to be slanted off the vertical direction, we have studied the effects of lossy electrodes and material absorption and etching depth and angle of side walls on its light extraction efficiency. If LEDs have no electrodes, in order to obtain an 80% light extraction efficiency of a TIP (truncated inverted pyramid) LED, the side-etched LEDs should have an etching angle of 22°~45° and an etching depth of 8~17% of a dice height and an absorption coefficient less than 1 cm<sup>-1</sup>. In case of etching depth of 16~39% of a dice height, we can obtain a 90% light extraction efficiency of a TIP LED. But when LEDs have two electrodes and no absorption loss, in order to obtain an 80% light extraction efficiency of a TIP LEDs, the side-etched LEDs should have an etching angle of 25°~45° and an etching depth of 30~36% of a dice height. In case of etching depth of 57~71% of a dice height, we can obtain a 90% light extraction efficiency of a TIP LED.

OCIS Code : 230.367.