

InGaN LED에서 칩 구조 및 칩마운트 구조에 따른 광추출효율에 관한 연구

이성재[†]

충남대학교 전기정보통신공학부 전자공학과
Ⓣ 305-764 대전시 유성구 궁동 220

(2005년 5월 2일 받음, 2005년 6월 13일 수정본 받음)

InGaN LED에서 칩 구조 및 칩마운트 구조에 따른 광추출효율의 변화를 Monte Calo 기법을 이용하여 해석하였다. Simulation을 통해 얻은 중요한 결론의 하나는, InGaAlP 또는 InGaN/SiC LED의 경우에는 달리, InGaN/sapphire LED의 경우 칩의 측 벽면 기울임 기법의 광추출효율 개선효과가 상대적으로 미미하다는 점이다. InGaN/SiC LED의 경우와는 달리, 기판으로 사용되는 sapphire의 굴절률이 상대적으로 작아서 생성된 광자들이 기판으로 넘어가는데 전반사장벽을 만나게 되어, 많은 광자들이 기판으로 넘어가지 못하고 두께가 매우 얇은 반도체 결정층에 갇히는 현상 때문이다. 동일한 현상은 epi-down 구조의 칩 마운트에서 광추출효율이 크게 개선되지 못하는 원인으로도 작용하게 된다. 광추출효율 관점에서의 epi-down 구조의 InGaN/sapphire LED가 갖고 있는 잠재력을 살리기 위한 방법의 하나는 기판-에피택시 계면을 texturing 하는 것이라고 할 수 있는데, 이 경우 생성된 광자들이 다량 기판으로 넘어갈 수 있게 되어 광추출효율이 현저하게 개선된다.

주제어 : Light-emitting diode (LED), Light-emission efficiency, Photon extraction efficiency, Monte carlo analysis

I. 서 론

InGaN LED는 가시광 영역에서 가장 중요한 LED로 자리 잡게 되었는데, 그 가장 큰 원인은 신뢰성이 탁월하다는 점 외에 출력광의 스펙트럼이 자외선에서부터 적색까지의 매우 넓은 영역에 걸쳐 있기 때문이다.^[1] InGaN LED로부터 발생된 청색 및 녹색 빛은 InGaAlP 또는 AlGaAs LED로부터 발생된 적색 빛과 혼합될 경우 질이 좋은 전색표시기(full-color display)를 만들 수 있다. 한편 청색 빛은 적절한 형광물질(phosphor)과 결합될 경우 백색 LED를 제작할 수 있는데, 최근 들어 백색 LED는 LCD의 backlight의 광원으로 사용됨은 물론, 광출력이 날로 증가됨에 따라, 최근 들어서는 일반조명 분야에서도 본격적으로 사용되기에 이르렀다.

LED의 광출력을 증대시키는 일은 LED의 응용 확대와 직결되는 중요한 문제인데, 그 관건의 하나는 광추출효율을 극대화 시키는 것이다. LED 칩은 그림 1에 보인 바와 같이 정방형 모양을 하고 있는 것이 보통인데, 이와 같은 정방형 형태의 칩 구조가 갖는 가장 심각한 문제점은 생성된 광자들의 상당량이 칩 벽면에서의 연속적인 전반사현상으로 말미암아 칩 내에 갇히는 것이다. 왜냐하면 칩 내에 갇힌 광자들은 칩 내에 존재하는 다양한 요인에 의하여 결국 흡수됨으로써 광추출 효율을 크게 손상시키기 때문이다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 유력한 방안의 하나는 LED 칩의 기하적 모양을 변형시키는 것인데, 그림 2에 보인 바와 같이, 칩의 표면을 인위적으로 거친 표면으로 만들어

주는 surface texturing 기법과 칩의 측 벽면을 수직방향으로 부터 일정한 각도로 기울여 주는 측 벽면 기울임(sidewall slanting) 기법이 있다.^[2-7] 이와 같은 기법을 이용하여 칩의 기하적 구조를 변형시키면, 칩 벽면에 입사된 광자들이 반사를 할 때 그 경로가 불규칙하게 바뀌게 되어 연속적인 전반사현상이 차단됨으로써 광추출효율이 크게 개선되어진다. 하지만 이와 같은 칩 구조의 변형을 통한 광추출효율의 개선 정도는 LED 칩을 구성하는 반도체 재질, 칩 구조, 칩마운트 구조 등에 따라 민감한 차이가 난다.

그림 3은 InGaN/sapphire LED의 칩 구조와 칩마운트 결합의 중요한 예들을 보여주고 있다. 칩마운트 방식에는 칩의 epitaxy 사이드 표면이 반사체의 표면에 마주 닿도록 부착하는 epi-down 마운트 방식과 칩의 기판 밑면이 반사체에 표면에 마주 닿도록 부착시키는 epi-up 마운트 방식이 있다. 일반적으로 방열 관점에서는 epi-down 방식이 유리한 것으로 알려지고 있지만, 광추출효율 관점에서는 두 방식 사이에 우열 관계가 분명치 않다. Epi-down 마운트의 경우, 광자들은 일단 기판으로 넘어가기만 하면 반사체나 전극으로부터의 차폐현상 피하여 칩 밖으로 쉽게 탈출할 수 있다는 점에서 충분한 잠재력을 갖는다고 할 수 있다. 하지만, InGaN/sapphire LED의 경우, 기판으로 사용되는 sapphire의 굴절률이 반도체 결정층의 굴절률에 비하여 상대적으로 작아서 활성층으로부터 생성된 광자가 기판으로 넘어가는데 전반사현상이라는 장애물을 만나게 된다. 그 결과 생성된 광자들의 상당 비율이 기판으로 넘어가지 못하고 반도체 결정층 내에 갇히게 됨으로써 광추출효율이 크게 제한을 받게 된다.

칩마운트 방식을 비교할 때 고려해야할 또 하나의 사항은 반사체 또는 heat sink의 구현에 있어서 난이도라고 할 수 있

[†] E-mail: sjlee@cnu.ac.kr

다. 예를 들어, epi-down 마운트의 경우, 양전극과 음전극을 전기적으로 서로 격리시켜야하기 때문에, 반사체는 두 부분으로 나뉘어져서 반드시 부도체 위에 부착되어야 한다. 이러한 원인으로 LED 칩을 반사체에 epi-down으로 부착시킬 때 정렬문제에 신경을 써야하며 또한 부도체가 추가됨으로 인한 방열상의 문제도 대두될 수 있다. 이에 비하여 epi-up 방식에서는 부도체인 sapphire 기판 면이 반사체에 부착되기 때문에, 두 전극을 전기적으로 따로 격리시킬 필요가 없게 된다. 따라서 반사체는 한 몸체로 되어 있으며 부도체에 부착시킬 필요도 없게 된다. 이와 같은 점에서, 방열 면만을 고려한다면, 그림 3(c)에 보인 구조에서와 같이 sapphire 기판을 제거한 후 epi-up 방식으로 칩을 부착시키는 것을 고려할 수 있다. 하지만, InGaN/sapphire LED의 경우 sapphire 기판을 제거하게 되면, LED 칩과 칩을 에워싸고 있는 에폭시 사이의 굴절률 정합이 나빠지면서 광추출효율이 감소되는 문제가 나타나게 된다.

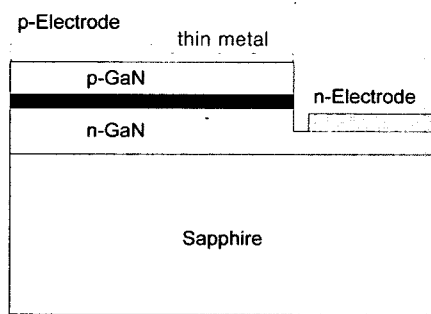
끝으로 그림 3(e)와 3(f)에 보인 칩 마운트 구조는 기판-에피택시 계면을 texturing한 구조의 칩을 이용한다는 특징을 갖고 있는데, 이와 같이 기판-에피택시 계면을 texturing하게 되면 생성된 광자들이 원활하게 기판으로 넘어가면서, 특히 epi-down 칩마운트 구조에서 광추출효율이 크게 개선되는 효과가 나타나게 된다.

본 논문이 추구하고 있는 가장 중요한 목표는 InGaN LED에서 칩 구조 및 패키징 방식-surface texturing, 칩의 기하적 구조 변형, 칩 마운트 방식, 기판 제거, 기판-에피택시 계면 texturing, 이들 기법의 다양한 조합 -에 따라 광추출효율이

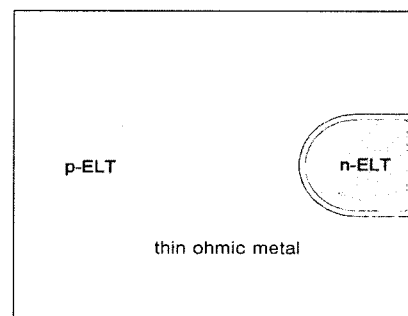
어떻게 영향을 받는지에 대한 개괄적인 개념을 얻기 위한 것이다. 이들 문제에 대한 전반적인 지식은 새로운 LED 칩 구조나 패키징 구조를 개발하는 데에 있어서 하나의 길잡이로서의 역할을 할 수 있을 것이다.

II. InGaN LED의 중요한 구조적 특징

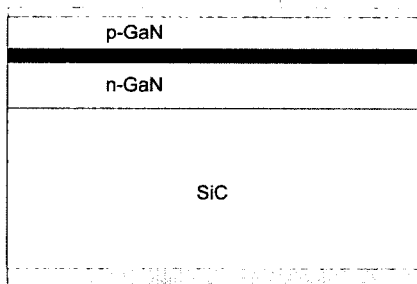
InGaN LED는 그림 1에 보인 바와 같이 sapphire나 SiC 기판 위에 성장되는데, 기존의 LED 칩 구조와는 확연히 구분되는 특징이 있다. InGaN LED의 경우 상부 전하집속층으로 사용되는 p-GaN 결정층의 전도도가 하부 전하집속층으로 사용되는 n-GaN 결정층의 전도도에 비하여 약 100분의 1수준으로 매우 작은 것이 보통인데, 그 근본적인 이유는 전하 이동도가 $10\text{cm}^2/(\text{volt} \cdot \text{sec})$ ^[8]로 매우 작은 데서 연유된다. 한편 p-GaN의 상부 전하집속층은 일반적으로 약 $0.2\ \mu\text{m}$ 정도의 매우 얇은 두께를 갖고 있다. 이와 같이 상부 전하집속층의 전도도가 매우 낮으면서 두께마저 얇아짐에 따라 공급되는 전류의 측면방향으로 확산현상이 심각하게 제한을 받게 된다. 그 결과 상부 전극으로부터 공급되는 전류는 활성층의 전 영역에 걸쳐 균등하게 공급되지 못하고 활성층의 특정 영역으로 집중되는 현상이 발생하게 된다.^[9] 이와 같은 문제점을 완화하기 위한 방안의 하나로 보통, 그림 1(b)에 보인 바와 같이, p-GaN 결정층의 상부 표면에 약 200 Å 정도로 매우 얇은 전극막을 도포함으로써 p-GaN 결정층의 면전도도를 개선시키게 된다.



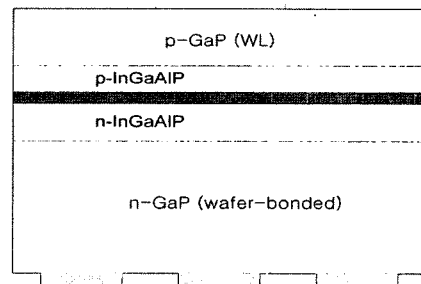
(a) InGaN/sapphire 계열



(b) 위에서 바라본 InGaN/sapphire LED 전극 구조



InGaN/SiC 계열



AlInGaP 계열

그림 1. 주요 LED 구조.

이와 같이 칩의 표면에 형성된 얇은 전극막은 그림 1(d)에 보인 바와 같은 종래의 LED 칩 구조에서는 찾아볼 수 없는 InGaN LED 칩 구조만의 특징이라고 할 수 있다. 그림 1(d)의 칩 구조는 AlInGaP 또는 AlGaAs 계열에서 주로 이용되는 구조인데, 중요한 특징으로는 소위 창문층(window layer)을 갖고 있다는 점이다.^[10] 창문층은 활성층의 위쪽에 형성된 보통 50 μm 정도의 매우 두꺼운 비흡수성의 결정층을 의미하는데, 이와 같은 두꺼운 결정층은 활성층으로부터 생성된 광자들이 상부전극과 상호작용하는 빈도수를 크게 줄여줌으로써 광추출효율을 크게 개선시키는 역할을 하게 된다. 일반적으로 오믹전극은 입사되는 광자들의 상당부분을 흡수하는 것으로 여겨지는데, 이와 같은 흡수효과는 AlGaAs나 AlInGaP 계열에서 더욱 심각한 것으로 알려지고 있다.

이와 같은 창문층 개념에 비추어 보면, InGaN LED 칩 구조는 많은 문제점을 갖는다고 할 수 있다. 즉 InGaN LED의 상부 전하 집속층은 0.2 μm 정도로 매우 얇기 때문에 생성된 광자들의 상당량이 칩 밖으로 빠져 나가기 전에 상부전극이나 칩의 상부표면에 형성된 얇은 전극막에 입사되는 것을 피할 수 없게 되어 창문층으로서의 역할을 기대할 수 없게 된다. 특히 주목할 점은 활성층으로부터 생성되어 하부의 기판 쪽을 향하여 방출되는 광자들의 경우에도 상당 비율이 굴절률이 상대적으로 낮은 sapphire 기판으로부터 반사되어 상부에 있는 전극으로 재입사한다는 점이다. 따라서 만일 InGaN LED의 경우에서도, AlInGaP이나 AlGaAs LED에서처럼 전극에서의 광자의 손실이 심각하다면, 기대되는 광추출효율은 미미할 수밖에 없다. 그러나 이와 같은 예측과는 판이하게, 실제의 InGaN LED로부터 측정된 외부양자효율은 10~30% 정도로, 그림 1(d)의 구조에 바탕을 둔 AlInGaP LED의 경우에 비하여 손색이 없는 것으로 알려지고 있다.

이와 같은 예상 밖의 결과를 설명할 수 있는 유일한 대안은, InGaN LED의 경우, 전극에서의 광자의 손실이 AlInGaP 또는 AlGaAs LED의 경우에 비하여 상대적으로 작다는 가정을 받아들이는 것뿐이다. 일반적으로 GaN와 같은 넓은 밴드갭을 갖는 반도체에 형성된 오믹전극은 완전한 오믹특성을 갖는 전극과는 거리가 있는 것으로 여겨진다. 일례로, GaN 결정에서 주로 많이 이용되고 있는 Ni/Au 오믹전극의 표면은, 다른 계열의 오믹전극에서 흔히 관찰되는 특유의 얼룩진 패턴 대신에, 보통 매우 깨끗한 surface morphology를 보여주는데, 이와 같은 표면 상태는 오믹전극 바로 하부의 영역이 비정질 상태라기보다는 결정구조가 거의 손상됨이 없이 그대로 유지되고 있는 것을 의미하는 것으로 판단되며, 그 결과로 광자들에 대한 흡수효과도 크게 감소되는 것으로 여겨진다.

III. 광추출에 관한 기본 개념

InGaN LED는 광추출 관점에서 다른 LED에 비해 상대적으로 잇점을 갖는데 그 근본적인 이유는 반도체 결정층 또는 기판의 굴절률이 LED를 에워싸는데 주로 사용되는 에폭시의 굴절률과의 차이가 상대적으로 작아서 생성된 광자들이

칩 밖으로 손쉽게 빠져나가기 때문이다. 활성층으로부터 생성된 광자들이 굴절률이 작은 에폭시로 빠져나기 위해서는 우선적으로 칩의 벽면에 대한 광자들의 입사각이 임계각 θ_c .

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_e/n_s) \quad (1)$$

보다 작은 값을 갖아야만 한다. 단 위 식에서 n_s 와 n_e 는 각각 반도체 결정층 및 LED 칩을 에워싸는데 쓰이는 재질의 굴절률을 의미한다. 만일 광자들의 입사각이 임계각보다 크게 되면 광자는 칩의 벽면으로부터 전반사(total internal reflection)를 하게 된다. 이와 같은 칩 벽면에서의 전반사현상으로부터, 광자들이 임의의 한 면을 통하여 칩 밖으로 빠져나가기 위해서는 그 광자들의 진행방향과 그 면에 대한 법선이 이루는 각이 θ_c 이하인, 소위 탈출콘(escape cone) 내부로 방출될 때만 가능하다는 개념이 등장하게 된다. LED 칩은 일반적으로 정방형 모양을 하고 있는데, 이 경우 활성층의 임의의 한 점에서 생성되는 광자들에게는 칩의 각 벽면에 대한 한 개씩 모두 6개의 탈출콘을 갖게 된다. 만일 어느 한 광자가 6개의 탈출콘 밖으로 방출되었다고 가정하면, 그 광자는 칩 벽면으로부터 연속적인 전반사현상으로 말미암아 칩 내에 갇히게 되고 궁극적으로는 칩 내에서 흡수될 수밖에 없다. 정방형 LED 칩의 경우, 칩 내에 갇히게 되는 광자의 비율 η_{trap} 은 근사적으로

$$\eta_{trap} = \frac{4\pi - 6\Omega_c(n_s, n_e)}{4\pi} \quad (2)$$

$$\Omega_c(n_s, n_e) = 2\pi(1 - \sqrt{1 - (n_e/n_s)^2}) \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 단 위 식에서 Ω_c 는 한 탈출콘의 입체각을 의미하며, LED 칩을 구성하는 모든 결정층은 모두 동일한 굴절률 n_s 를 갖는 것으로 가정하였다. 하지만, InGaN/sapphire LED 칩과 같이 기판으로 사용되는 sapphire의 굴절률이 반도체 결정층에 비하여 크게 차이가 나는 경우에는, 약간 수정된 형태의 수식을 사용할 수밖에 없다.^[11] 이상의 수식을 이용하여 계산한 η_{trap} 은 AlInGaP 또는 AlGaAs LED의 경우 약 70%, InGaN/sapphire LED와 InGaN/SiC LED의 경우 각각 약 40%와 50% 정도로 나타났다.

이와 같이 높은 비율의 광자들이 칩 내에 갇혀 있는 것을 방지한 상태에서, 광추출효율을 크게 개선하는 데는 근본적인 한계가 있을 수밖에 없을 것이다. 따라서 광추출효율을 획기적으로 개선시키기 위한 우선적인 접근 방법은 칩 내에서의 연속적인 전반사현상을 차단하는 것인데, 이제까지 개발된 가장 유력한 방안은 칩의 기하적 구조를 미시적 또는 거시적으로 변형시키는 것이다. 즉 그림 2에 보인 바와 같이 칩의 표면을 매끄러운 면 대신에 거친 표면으로 만들어주는 surface texturing 기법과 칩의 측 벽면을 수직방향으로부터 일정한 각도로 기울여 주는 측 벽면 기울임(sidewall slanting) 기법을 들 수 있다. 이와 같은 기법을 이용하여 칩의 기하적 구조를 변형시키게 되면,

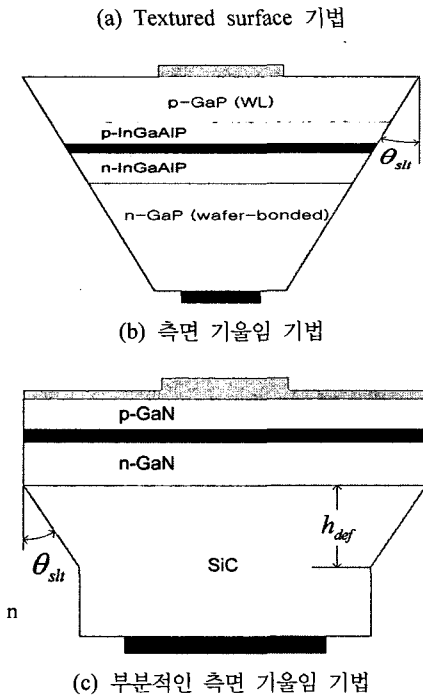


그림 2. 칩 캐비티의 기하적 변형을 이용한 LED 칩 구조

칩의 벽면으로 입사한 광자들이 반사를 할 때 그 진행방향이 불규칙하게 변하는 현상이 발생하게 된다. 그 결과 광자들이 첫 번째 벽면에서 전반사를 하여 칩 밖으로 빠져나가는 데에 실패한 다하더라도 다음 단계에서 벽면에 대한 입사각이 임계각 이하로 주어질 기회가 있기 때문에 언젠가는 칩 밖으로 빠져 나갈 수 있게 되며 그 결과로 광추출효율이 획기적으로 개선되어진다. 일반적으로 이와 같은 칩의 기하적 구조의 변형기법의 효율성은, 예를 들어 InGaN/sapphire LED에서처럼, 칩 내에 갇힌 광자들의 비율이 낮은 경우에는 상대적으로 떨어진다고 할 수 있다.

IV. LED simulation에서 요구되는 중요한 모델들

본 논문에서는 LED 칩 simulation을 위해 기존에 개발된 Monte Carlo 기법을 이용하였는데,^[7] 이 기법은 칩 내에서 일어나는 광자들의 다양한 사건들을 매우 사실적으로 고려할 수 있기 때문에, 일반적으로 simulation 결과의 정확도가 높다는 장점이 있다. Monte Carlo 기법의 핵심은 충분히 많은 수, 예를 들어 약 50만개 정도의 광자들을 활성화의 전

영역에 걸쳐 발생시킨 다음, 각 광자들의 칩 내에 존재하는 각 계면에서의 반사/굴절, 매질 내에서의 흡수 등의 사건을 포함한 일체의 행적을 난수(random number)를 이용하여 확률적으로 추적하는 것이다. 이 절에서는 좀 더 정확한 LED 해석을 위해 요구되는 중요 모델들을 살펴보기로 한다.

(1) Textured surface 모델

일반적으로 광자들이 texturing이 가해진 거친 표면으로 입사하게 되면, 광자들이 진행경로가 불규칙하게 바뀌는 현상이 발생하게 된다. 이론적으로는 textured surface의 미세적 구조가 알려지면 광자들의 정확한 경로를 추적하는 것이 가능하다고 할 수 있으나, textured surface의 구체적인 구조는 매우 복잡하게 주어질 뿐만 아니라 LED 칩의 종류 및 texturing 기법에 따라 민감하게 변하기 때문에^[3,4] 그 구체적인 구조를 simulation 프로그램에 반영하는 것은 쉽지 않은 일이다.

하지만 LED의 동작 관점에서, textured surface의 가장 근본적인 역할은 입사된 광자들의 경로를 불규칙하게 바꾸어 주는 것이라고 한다면, 현실적인 대안의 하나는 textured surface의 구체적인 묘사 없이도 광자들의 경로만을 random하게 바꾸어 줄 수 있는 모델을 생각하는 것이라고 할 수 있을 것이다. 이하에서는 기존에 개발된 textured surface 모델의 핵심적인 사항만을 다루기로 한다.^[7]

이 모델에서는 우선, 그림 4에 보인 바와 같이, 한 광자가 textured surface를 향하여 입사한다고 가정한다. 그리고 그 광자의 textured surface 상의 입사점에 중심을 둔 미소영역(differential area)이 평면이며 dS 크기의 면적을 갖는다고 가정한다. 이와 같은 미소영역표면은 보통 그 표면이 향하고 있는 방향정보 까지를 포함한 미소영역표면 벡터 dS

$$dS = dS a_1 \tag{4}$$

로 표현할 수 있는데, 위 식에서 a₁은 dS의 법선방향으로의 단위 벡터를 의미한다. 만일 a₁의 방향이 texturing이 전혀 가해지지 않은, 즉 표면이 매끄러운 기준 평면에 대한 단위법선 벡터 a₀로부터 벗어나게 된다면, dS 표면으로 입사한 광자의 경로는 기준면에 입사되었을 때 주어지는 광자의 경로와는 차이를 나게 된다. 이와 같이 textured surface로부터 광자들의 진행방향이 갑자기 바뀌게 되는 정도는 a₁과 a₀ 사이의 각 θ에 비례하기 때문에, θ에 대한 적절한 확률분포함수를 지정해줌으로써 textured surface로부터 광자들의 진행경로가 불규칙하게 바뀌게 되는 정도를 결정할 수 있게 된다. 본 연구에서는 θ에 대한 확률분포함수 P(θ)로서 아래의

$$P(\theta) = k \cdot \cos^n(\theta) \tag{5}$$

분포함수를 가정하였다. 단 위 식에서 k는 적절한 비례상

수를 나타내며, n_{st} 는 surface texturing 지수로 양의 실수 값을 갖는다. Surface texturing 지수 n_{st} 는 표면상태의 불규칙성과 관련을 갖는 변수로, n_{st} 값이 증가할수록 $P(\theta)$ 는 기준면에 대한 법선방향을 따라 더욱 뾰족하게 분포하기 때문에 표면의 불규칙성이 감소하게 되고 그 결과로 textured surface로부터 광자들의 진행경로가 불규칙하게 바뀌는 정도가 완화된다고 할 수 있다. 특히 n_{st} 가 무한대의 값을 갖게 되면 $P(\theta)$ 는 $\delta(\theta)$ 에 수렴하게 되는데, 이때 textured surface는 표면이 매끄러운 기준면과 차이가 나지 않게 되어 광자의 경로는 전혀 바뀌지 않게 된다. 이러한 관점에서 $1/n_{st}$ 는 textured surface의 불규칙성에 비례하는 변수라고 할 수 있다.

실제로 미소영역표면 벡터 dS 의 향하는 각 θ 는 2개의 자유도를 갖는 공간각이라고 할 수 있는데, simulation에서는 두

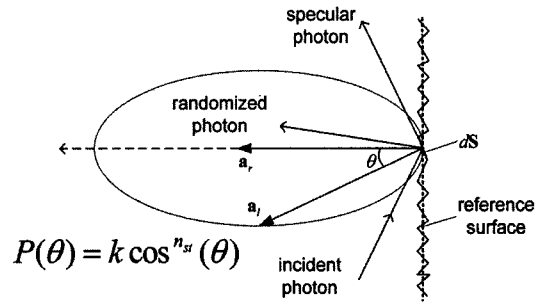


그림 4. Textured surface 모델

개의 난수를 발생시켜 결정된다. 일단 θ 값이 결정되고 나면 dS 면으로 입사하는 광자에 대한 입사각이 결정되고 이를 바탕

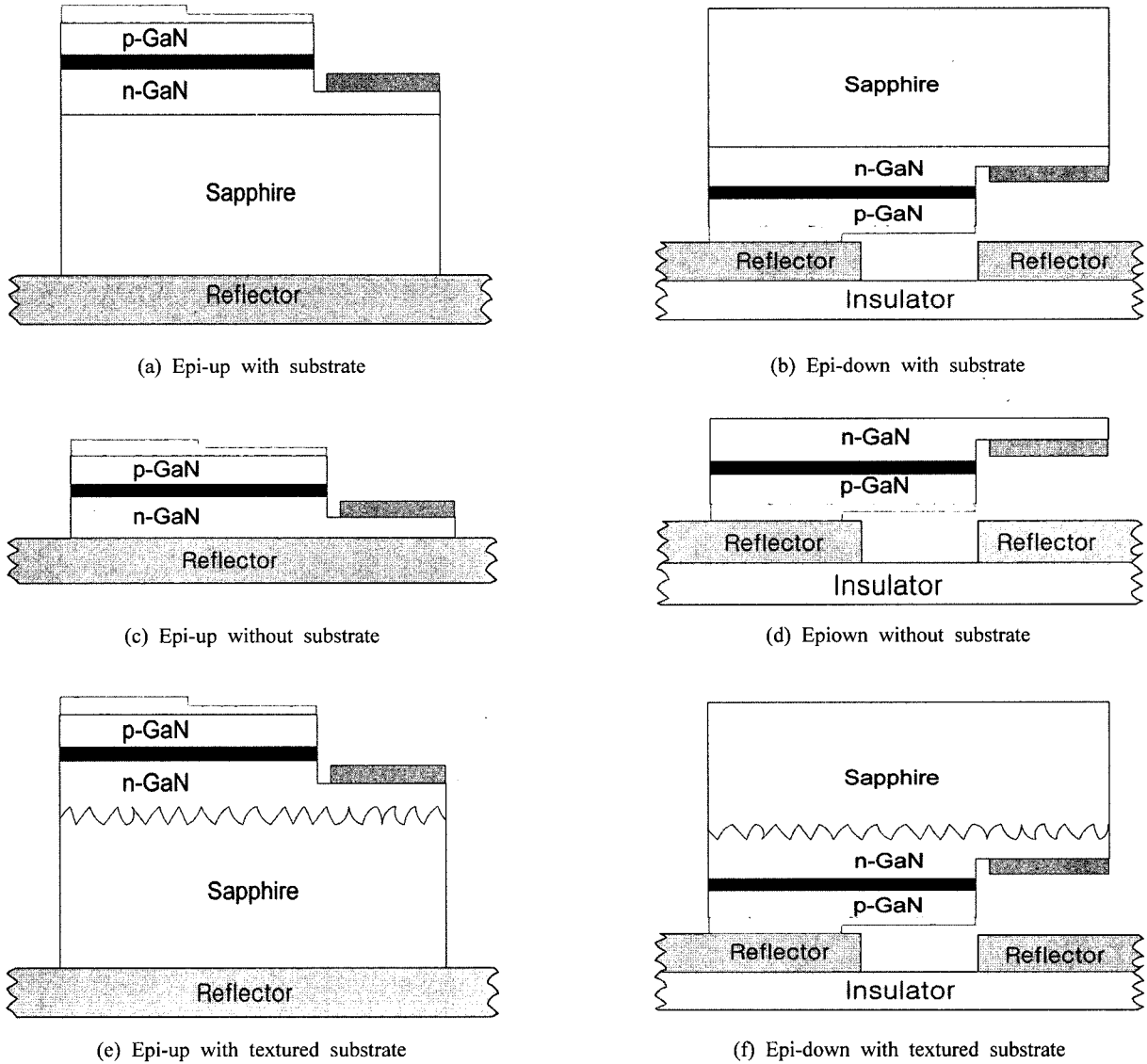


그림 3. 다양한 칩 구조와 결합된 칩 마운트 방식

으로 dS 면으로부터의 광자의 반 도사는 투과의 방향이 결정됨으로써 광자들의 경로를 추적하는 것이 가능하게 된다.

이상의 textured surface 모델이 갖는 장점의 하나는, textured surface의 구체적인 구조를 규정하지 않고서도, n_{st} 값을 간단히 조절하는 것만으로 textured surface의 불규칙성 또는 그 표면에서 광자들의 경로가 불규칙하게 바뀌는 정도를 조절할 수 있다는 점이다. 위의 모델은 단점도 갖고 있는데, 일례로 실제의 textured surface가 주어질 때 그 표면에 대응되는 n_{st} 값을 결정하는 것이 용이하지 않다는 것이다. n_{st} 의 값을 결정하기 위한 현실적인 방안의 하나는, textured surface가 추가됨으로 인한 외부양자효율의 개선되는 비율에 대한 측정값을 simulation 상에서 광추출효율이 개선되는 비율과 비교함으로써 n_{st} 의 값을 정하는 것인데, 대부분의 경우 n_{st} 값으로 10~20 정도가 적당한 것으로 확인되었다.^[7]

(2) 얇은 오믹전극막 모델

InGaN LED의 해석을 어렵게 만드는 점의 하나는 칩의 상부 표면에 도포된 얇은 오믹전극막의 재료적 성질을 간단하게 정의할 수 없다는 점이라고 할 수 있다. 예를 들어 오믹전극막이 입사된 광자들의 일부를 통과 시키는 성질, 즉 반투명 특성은 오믹전극막을 순수한 금속, 오믹, 또는 유전체 등으로 간단히 분류할 수 없다는 사실을 말해주는 것으로 해석할 수 있다.

얇은 오믹전극막에서의 광자의 반사/투과율 및 흡수 비율은 광추출효율에 직접적인 영향을 주기 때문에, 이들 변수들에 대한 대강의 값을 추정할 수 있는 모델을 개발을 하는 것은 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있는데, 본 논문에서는 오믹전극막의 두께의 변화에 따라 광자의 반사/투과율 및 흡수율을 손쉽게 조절할 수 있는 오믹전극막에 대한 새로운 모델을 제시하고자 한다.

이 모델에서는 우선, 그림 5에 보인 바와 같이, 칩의 상부 표면위에 도포되어 있는 얇은 전극막에는 pin-hole 형태의 수많은 구멍들이 균등하게 분포되어 있는 것으로 가정한다. 그리고 광자들이 오믹전극막의 pin-hole 영역에 입사하게 되면 정상적인 반사/투과 법칙을 따라 반사하거나 투과하게 되며 광자들이 그 밖의 영역으로 입사하게 되면 흡수 또는 반사되는 것으로 가정한다.

이 같은 가정 하에서는, 입사 광자에 대한 오믹전극막에서의 평균 반사도 R_{thin} 과 평균 투과도 T_{thin} 은 각각

$$R_{thin} = R_{Fre} \gamma_{open} + R_{thick}(1 - \gamma_{open}) \tag{6}$$

$$T_{thin} = \gamma_{open}(1 - R_{Fre}) \tag{7}$$

와 같이 주어지는 것으로 간주할 수 있다. 단 위 식에서 R_{thick} 은 전극 패드 하부 영역에서처럼 두꺼운 오믹전극에서의 광자의 반사도를, R_{Fre} 는 pin-hole 영역에서의 광자의 Fresnel 법칙에 의한 광자의 반사도를, 그리고 γ_{open} 은 얇은

전극막 전체의 면적에 대한 pin-hole에 의해서 구멍이 난 영역이 차지하는 비율을 의미한다. 위식은 기본적으로 얇은 전극막에서 구멍이 나지 않은 영역은 두꺼운 오믹전극과 동일하게 취급한다는 가정을 전제로 하고 있다. 두꺼운 오믹전극의 경우 γ_{open} 의 값은 영이 된다고 가정할 수 있다면, 전극에서 흡수되지 않고 살아남는 광자는 모두 반사되는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 두꺼운 전극막에서의 광자에 대한 반사도 R_{thick} 은

$$R_{thick} = 1 - A_{thick} \tag{8}$$

와 같이 표현할 수 있는데, 위 식에서 A_{thick} 은 두꺼운 오믹전극에 입사한 광자들 중에서 흡수되는 광자들의 비율을 의미한다. 끝으로 얇은 전극에서의 광자들의 평균 흡수율 A_{thin} 은

$$A_{thin} = (1 - \gamma_{open})A_{thick} \tag{9}$$

와 같이 표현할 수 있다.

이상의 얇은 전극막에 대한 모델이 갖는 장점은 pin-hole에 의해 구멍 난 영역의 비율 γ_{open} 을 간단히 조절함으로써 얇은 전극막에서의 광자의 투과도와 흡수율을 조절할 수 있다는 점인데, 직관적으로 γ_{open} 은 전극막의 두께가 증가하면 비례적으로 감소하는 특성을 갖는다고 할 수 있다.

(3) 활성층에서의 광자 생성 모델

일반적으로 생성된 광자가 칩 밖으로 빠져나올 확률은 활성층에서의 광자의 생성지점에 따라 약간씩 달라진다. 따라서 정확한 광추출효율을 계산하기 위해서는 생성된 광자들의 활성층에서의 밀도분포를 어느 정도 정확하게 계산할 필요가 있다. 일반적으로 생성된 광자들의 밀도는 활성층에서의 전류의 밀도에 비례하는 것으로 간주할 수 있는데, 이론적으로 전류밀도는 적절한 경계조건을 적용하여 Poisson 방정식을 풀어 구할 수 있다. 하지만, LED 칩의 경우에서처럼,

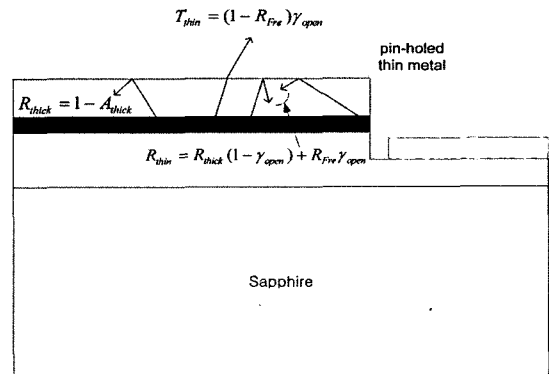


그림 5. 얇은 오믹전극막 모델.

3차원 구조에서 Poisson방정식을 푸는 것 그 자체만으로도 만만치 않은 작업이라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 생성된 광자의 활성층에서의 밀도를 근사적으로 예측할 수 있는 직관에 바탕을 둔 모델을 제시하고자 한다.^[9]

이 모델에서는 우선, 그림 6에 보인 바와 같은 활성층의 임의의 한 점에서 전자-정공 쌍의 밀도 $\rho_G(x, y)$ 는

$$\rho_G(x, y) = k_G S_P(x, y) S_N(x, y) \quad (10)$$

와 같이 표현된다고 가정한다. 단 위 식에서 k_G 는 적절한 비례상수를 의미하며, S_P 와 S_N 은 각각 양전하 및 음전하의 측면 방향으로 확산의 정도와 관련을 갖는 함수다. 그리고 S_P 와 S_N 은 각각

$$S_P(x, y) = \exp(-L_P(x, y)/\lambda_P) \quad (11)$$

$$S_N(x, y) = \exp(-L_N(x, y)/\lambda_N) \quad (12)$$

와 같이 간단한 확산함수 형태로 표현된다고 가정한다. 위 식에서 L_P 와 L_N 은 각각 주어진 점으로부터 p-전극과 n-전극까지의 측면 방향으로의 최단거리를 의미하며, λ_P 와 λ_N 은 각각 양전하와 음전하에 대한 확산길이라고 정의한다. 끝으로

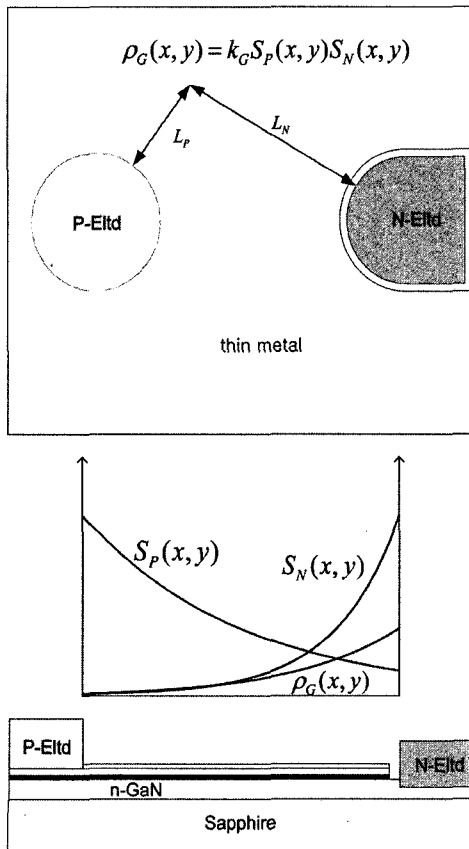


그림 6. 활성층에서의 광자의 생성모델과 정의된 제반의 분포함수의 예

전하의 측면방향으로의 확산길이는 전하가 통과하는 결정층의 전도도와 두께에 비례한다고 가정하면, λ_P 와 λ_N 은

$$\lambda_P = k_D \sum_t \sigma_{Pt} t_{Pt} \quad (13)$$

$$\lambda_N = k_D \sum_m \sigma_{Nm} t_{Nm} \quad (13)$$

와 같이 표현할 수 있다. 단 위식에서 k_D 는 적절한 비례상수, σ_{Pt} 과 t_{Pt} 은 각각 p-side의 t -번째 층의 전도도와 두께를, σ_{Nm} 과 t_{Nm} 은 각각 n-side의 m -번째 층의 전도도와 두께를 의미한다. 위에서 정의된 다양한 분포함수들의 한 예를 보이면 그림 6에 보인 바와 같다.

V. Simulation 결과

이미 언급된 바와 같이, LED의 해석을 위해 Monte Carlo 기법을 사용하였다. Simulation 결과를 살펴보기 전에 실제의 simulation에 사용된 제반의 변수들에 대하여 살펴본다. 우선, 서로 상이한 계열에 속하는 LED의 동작특성을 좀 더 공평한 바탕 위에서 비교하기 위해서, 특별히 언급되지 않는 한 모든 LED 칩의 크기는 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 이며 기판의 두께는 $100 \mu\text{m}$ 로 가정하였다. 일반적으로 LED 칩의 크기가 증가할수록 광자들이 칩 밖으로 빠져나오기 전에 칩 내에서 이동하는 거리가 비례적으로 증가하기 때문에, 광추출효율은 칩의 크기에 대하여 지수 함수적으로 감소하게 된다. LED 칩을 구성하는 각 결정층에서의 굴절률 n , 흡수계수 α , 오믹전극에서 광자의 흡수비율 A_{thick} , 반사체 반사도, 그리고 전하 확산거리 등을 요약하면 표1에 보인 바와 같다. 끝으로 모든 LED 칩은 굴절률이 1.50인 에폭시 매질 속에 에워싸여 있는 것으로 간주 하였으며, single-point 계산을 위해 발생시킨 광자들의 수는 50만개였다.

그림 7은 AlInGaP, InGaN/sapphire, InGaN/SiC LED에서

표 1. LED 구조 해석을 위해 사용된 주요 변수

		InGaN/sapphire	InGaN/SiC	InGaAlP
활성층	n	2.70	2.70	3.60
	α [1/cm]	50	50	50
상부전하 집속층	n	2.48	2.48	3.50
	α [1/cm]	8	8	8
하부전하 집속층	n	2.48	2.48	3.50
	α [1/cm]	8	8	8
기판	n	1.77	2.74	NA
	α [1/cm]	1	4	NA
오믹 전극 (A_{thick})		0.2	0.2	0.5
얇은오믹전극막 (γ_{open})		0.5	0.5	NA
반사체(반사도)		0.9	0.9	0.9
전하	λ_P [μm]	1000	1000	500
확산길이	λ_N [μm]	200	500	500

surface texturing 기법이 광추출효율에 미치는 영향을 보여주고 있는데, 그래프의 가로축은 texturing이 가해진 칩 표면의 거칠기의 정도를 나타낸다. 일반적으로 표면의 거칠기가 증가할수록 난반사특성이 증가하고 그에 따라 광추출효율이 개선되지만 LED의 종류에 따라 개선의 정도는 큰 차이를 보인다. 즉 AlInGaP LED의 경우 주어진 n_{st} 의 변화 구간에서 광추출효율이 110%정도로 크게 개선되는 반면에, InGaN/sapphire LED의 경우 개선의 정도가 38% 정도로 크게 떨어지며, InGaN/SiC LED의 경우에는 개선의 정도가 두 LED의 중간정도로 나타나고 있다. 이와 같이 AlInGaP LED에서 surface texturing 기법의 효과가 상대적으로 크게 나타나는 이유는 다른 종류의 LED에 비하여 정방형 모양의 칩 내에 갇혀있는 광자의 비율이 상대적으로 높기 때문이다.

그림 8은 LED 칩의 측벽면 기울임 기법이 광추출효율에 미치는 영향을 보여주고 있는데, 일반적으로 칩 벽면 기울임 각이 클수록 칩 벽면에 부딪힌 광자들의 경로가 더욱 심하게 바뀌기 때문에 광추출효율이 더 크게 개선된다. 하지만 특기할만한 점은 InGaN/sapphire LED의 경우 개선의 정도가 다른 LED에 비하여 상대적으로 미미하다는 점이다. 이와 같은 InGaN/sapphire LED의 특기할 점은 기본적으로 기판으로 사용되는 sapphire의 굴절률이 약 1.77 정도로 하부 전하집속층

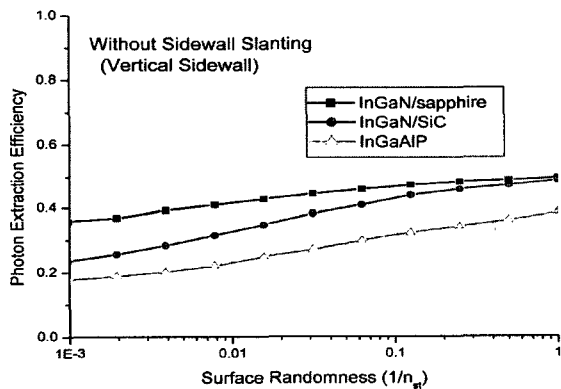


그림 7. Textured surface에서 표면의 거칠기가 광추출효율에 미치는 영향.

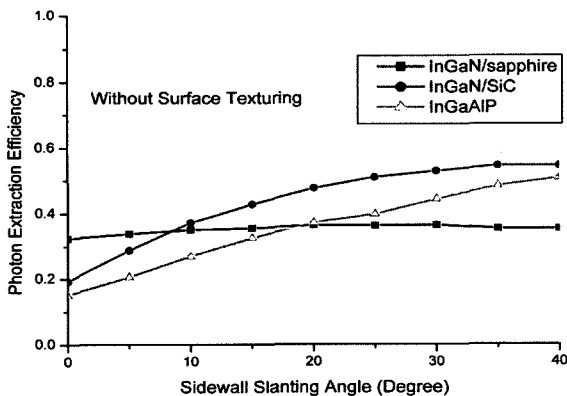


그림 8. 측 벽면 기울임 각에 따른 광추출효율.

으로 사용되는 n-GaN의 굴절률 약 2.48보다 크게 작을수록 연유된다. 즉 굴절률이 작은 sapphire 기판의 경우 입사하는 광자들에게 전반사장벽으로 작용하게 되어 생성된 광자들의 상당부분이 기판으로 넘어가지 못하고 반도체 결정층에 갇히게 된다. 그런데 InGaN/sapphire LED에서 반도체 결정층의 총 두께는 보통 $5\mu m$ 이하로 LED 칩 전체의 두께에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 결정층에 갇혀 있는 광자들이 기울어진 측 벽면을 만날 확률도 무시할 수 있을 정도로 되어 광추출효율은 거의 개선되지 못하게 된다. 한편 전반사 장벽을 뚫고 sapphire 기판으로 넘어간 광자들의 경우, 기판의 굴절률이 에폭시의 굴절률과 정합이 상대적으로 잘되어 있기 때문에, 기판의 측 벽면이 기울어짐 여부에 관계없이 칩 밖으로 쉽게 빠져나가게 된다. 따라서 전체적으로 InGaN/sapphire LED의 경우에는 측벽면 기울임 기법의 광추출효율 개선효과는 상대적으로 미미하게 된다.

그림 9는 LED 칩의 측 벽면을 이미 40° 기울여 놓은 상태에서, 칩 표면에 추가적으로 surface texturing을 가할 때 광추출효율이 어떻게 변하는 지를 보여주고 있다. 일반적으로 surface texturing 기법과 측 벽면 기울임 기법은 공히 벽면에 입사한 광자들의 경로를 불규칙하게 바꾸어 준다는 점에서 그 기능이 중복된다고 할 수 있다. 따라서 측 벽면이 이미 충분히 기울어져 있는 상황에서는 추가적으로 surface texturing이 가해진다고 하더라도 광추출효율이 추가적으로 크게 개선되는 것을 기대할 수 없다. 하지만 예외적으로 InGaN/sapphire LED에서는, 앞에서 이미 설명된 바와 같이, 측 벽면 기울임 기법이 큰 역할을 하지 못하기 때문에 두 기법 간에 기능의 중복이 거의 없다. 따라서 이 경우 광추출효율의 개선효과는 거의 전적으로 surface texturing 기법에 의해서 주어지는 것으로 해석 할 수 있다.

그림 10은 InGaN/SiC LED의 칩의 기하적 모양을 그림 3(c)에 보인 바와 같이 SiC 기판의 일부영역의 측 벽면만을 기울여 주는 형식으로 변형시킬 때, 그 변형의 깊이 h_{def} 가 광추출효율에 미치는 영향을 보여주고 있다. 주목할 점은 InGaN/sapphire LED에서 sapphire 기판을 포함한 측 벽면 전체의 영역을 기울여 주더라도 광추출효율이 별로 개선되

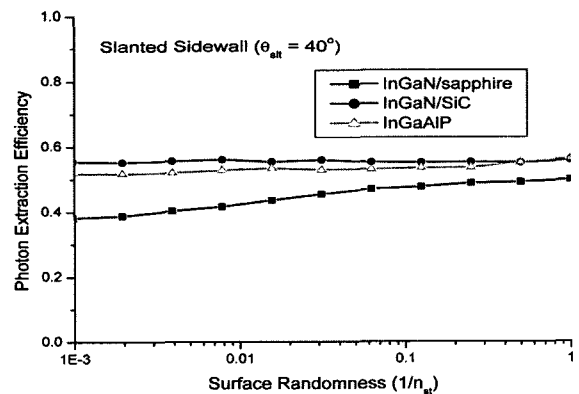


그림 9. 측 벽면 기울임 기법에 의하여 이미 변형된 칩에 추가된 surface texturing이 광추출효율에 미치는 영향.

지 못하는 것과는 판이하게, 기판의 일부 영역만을 변형시키더라도 광추출효율이 민감하게 개선된다는 점이다. 이와 같이 두 LED에서 현격한 차이가 나타나는 이유는 두 기판의 굴절률 상의 차이점에 기인된다. 즉 SiC 기판의 굴절률은 약 2.74로 n-GaN 결정층의 굴절률 2.48보다 약간 크기 때문에 기판이 전반사장벽으로 역할을 하지 않을 뿐만 아니라 굴절률 정합도 상당히 좋은 상태가 되어 생성된 광자들이 SiC 기판으로 다량 넘어가게 되고 그 곳에서 기울어진 측 벽면으로부터 광자들의 경로가 크게 바뀌면서 광추출효율이 크게 개선되게 된다. 그림 10으로부터 알 수 있는 또 하나의 사실은 h_{def} 가 100 μm 로 칩의 기하적 모양이 충분히 변형된 경우에는 surface texturing의 추가적인 광추출 개선 효과는 매우 미미하다는 점이다.

그림 11은 기판을 제거했을 때의, 칩의 측 벽면 기울임 기법이 광추출효율의 개선에 미치는 영향을 보여주고 있다. 기판이 제거된 칩에서는, 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이, 칩의 전체적인 두께가 현저하게 감소되어 광자들이 기울어진 측 벽면을 만날 기회가 무시할 수 있을 정도로 작아져 측 벽면 기울임 효과가 거의 나타나지 못하게 된다.

그림 12는 InGaN/sapphire LED에서 칩마운트 방식과 광추출

출효율과의 관계를 보여주고 있다. 직관적으로는 그림 3(b)에 보인 바와 같은 epi-down 방식의 경우, 기판은 전극이나 반사체로부터의 어떠한 차폐도 받지 않고 완전하게 열려 있기 때문에 기판으로 넘어간 광자들이 쉽게 칩 밖으로 빠져 나갈 수 있어서 광추출효율이 epi-up 방식에 비하여 크게 개선될 것으로 예상할 수 있다. 하지만, 이 같은 직관적인 추론과는 달리, 실제로 계산된 epi-down 방식의 광추출효율은 epi-up 방식에 비하여 결코 높지가 않다. 이와 같이 epi-down 방식에서 광추출효율이 변변치 못한 현상도 생성된 광자들의 상당부분이 기판으로 투과되지 못하고 반도체의 결정층 내부에 갇히는 현상과 관련을 갖는다.

이와 같은 사실을 좀 더 분명하게 설명하기 위한 일환으로, 그림 13에서는 InGaN/sapphire LED에서 기판의 굴절률을 변화시켜 가면서 두 칩 마운트 방식의 광추출효율을 서로 비교하였다. 기판의 굴절률이 낮은 영역에서는 epi-up 방식이 epi-down 방식에 비하여 더 높은 광추출효율을 보이고 있지만 기판의 굴절률이 큰 영역에서는 역으로 epi-down 방식이 더 높은 광추출효율을 보인다. 기판의 굴절률이 낮은 영역에서는 생성된 광자들이 기판으로 넘어가는 데에 전반사장벽을 만나게 되지만 기판의 굴절률이 증가하게 되면 InGaN/SiC LED의 경우에서처럼

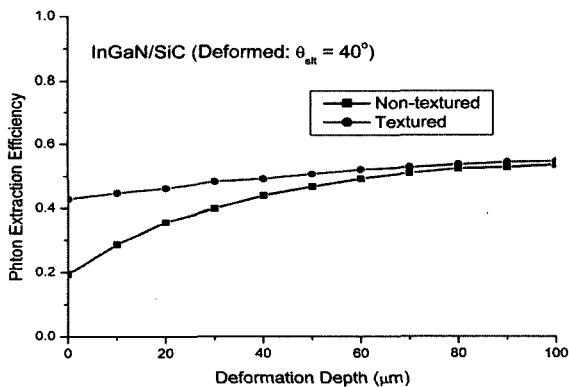


그림 10. InGaN/SiC LED에서 변형의 깊이가 광추출효율에 미치는 영향.

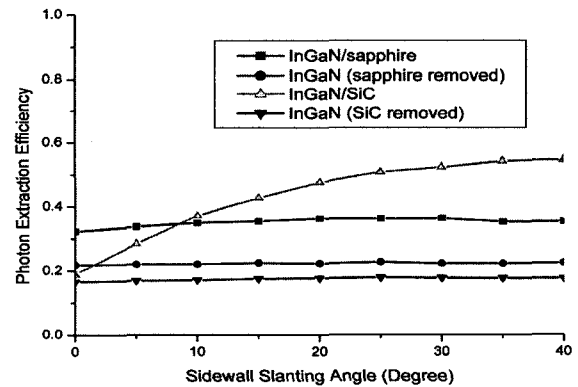


그림 11. 기판이 제거된 칩에서 측 벽면 기울임이 광추출효율에 미치는 영향.

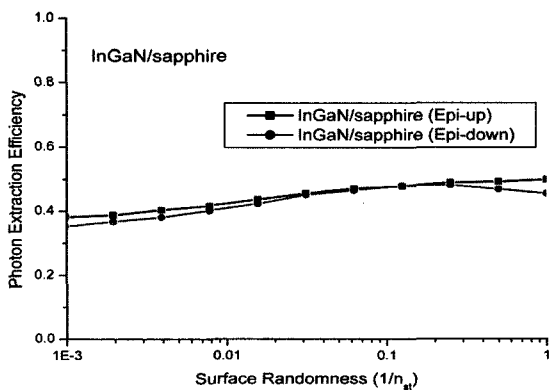


그림 12. 칩마운트 방식에 따른 광추출효율의 비교.

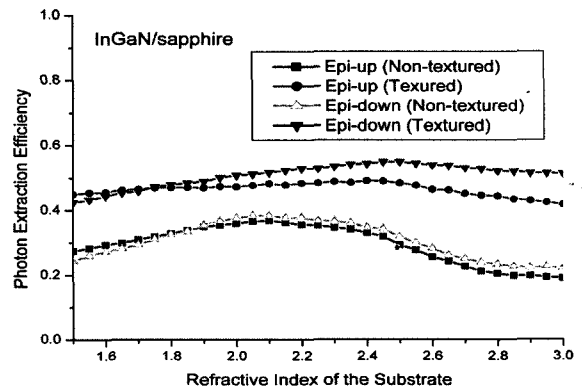


그림 13. 기판의 굴절률을 변화시킬 때의 칩마운트 방식에 따른 광추출효율의 비교.

전반사장벽이 사라지게 되어 생성된 광자들의 활발하게 기판으로 넘어가게 된다. 그런데 epi-down 방식에서는 epi-up 방식에서와는 달리 기판이 전극이나 반사체로부터 차폐가 전혀 없기 때문에 기판으로 넘어간 광자들이 훨씬 쉽게 칩 밖으로 빠져나가게 되어 상대적으로 더 높은 광추출효율을 보이게 된다.

그림 14는 InGaN/sapphire LED에서 기판의 두께가 광추출 효율에 미치는 영향을 보여주고 있다. 일반적으로 기판의 두께가 감소하면서 기판의 측면을 통과하여 칩 밖으로 빠져나오는 광자들의 비율이 감소되면서 광추출효율도 마찬가지로 감소한다고 할 수 있는데, 특히 기판으로 넘어간 광자의 경우 오직 측면을 통해서만 밖으로 빠져나갈 수 있는 epi-up 방식의 경우에서 광추출효율이 더욱 심각하게 감소하게 된다. 이에 비하여 epi-down 방식에서는 기판으로 넘어간 광자들이 칩의 측면은 물론 열려 있는 상부 면을 통하여 빠져나갈 수 있기 때문에 기판의 두께가 감소하는데서 오는 광추출 효율의 감소 효과는 상대적으로 작게 된다.

이상으로부터 방열 관점을 접어두고 광추출효율 관점에서만 비교할 경우, epi-down 방식은 epi-down 방식에 비하여 이점이 없는 것으로 결론을 내릴 수 있을 것이다. 하지만, 여전히 epi-down 방식은 생성된 광자들이 일단 기판으로 넘어가기만 하면 쉽게 칩 밖으로 빠져나간다는 점에서 광추출효

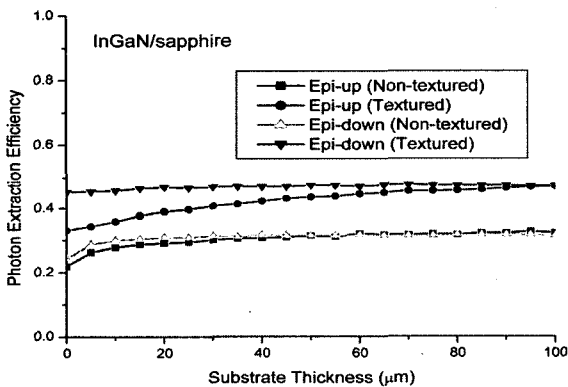


그림 14. 기판의 두께에 따른 광추출효율의 변화.

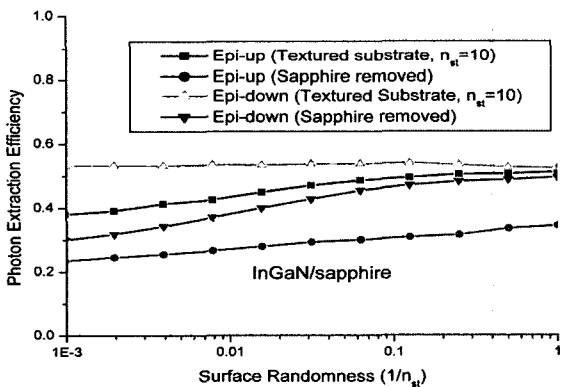


그림 15. 기판의 제거, 기판-에피택시 계면의 texturing, 칩마운트 방식, textured surface가 광추출효율에 미치는 영향.

율 관점에서 충분한 잠재력을 갖고 있는 것으로 판단된다.

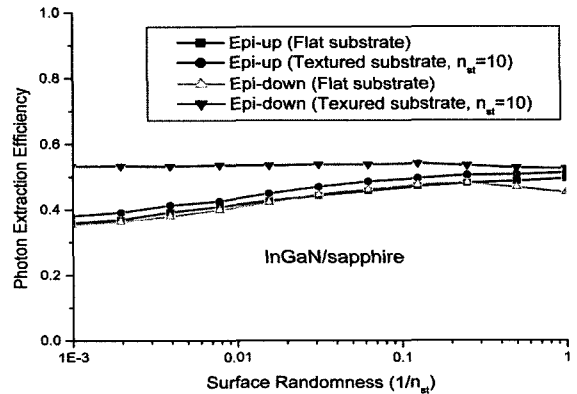


그림 16. 기판의 제거, 기판-에피택시 계면의 texturing, 칩마운트 방식, textured surface가 광추출효율에 미치는 영향.

Epi-down 방식이 갖는 이 같은 잠재력을 살릴 수 있기 위한 전제조건은 sapphire 기판으로 넘어가는 광자들의 비율을 획기적으로 높일 수 있는 방안을 마련하는 것인데, 그 방안의 하나는 그림 3(e)와 3(f)에 있는 칩의 구조에서처럼 기판-에피택시 계면을 texturing 하는 것이다. 이 경우 texturing된 계면에 생성된 광자들이 도달하게 되면 광자들의 진행경로가 불규칙하게 바뀌면서 기판으로 활발하게 넘어가면서 광추출 효율이 크게 개선되어진다.

그림 15와 16은 그림 3에 보인 다양한 칩 구조 및 칩 마운트 방식에 따른 광추출효과를 종합적으로 보여주고 있는데, 예상한 바대로, 기판-에피택시 계면이 texturing된 칩의 경우 - 특히 epi-down 방식에서 - 광추출효율이 크게 개선되어진다. 그림 15로부터 알 수 있는 또 하나의 중요한 사실은 sapphire 기판을 제거할 경우 칩 마운트 방식에 상관없이 광추출효율이 오히려 후퇴한다는 점이다. 이는 sapphire 기판을 제거할 경우 LED 칩과 에폭시 간의 굴절률 정합이 나빠지는 점은 물론, 생성된 광자들이 더욱 빈번하게 오믹전극과 상호작용하면서 그 곳에서 흡수되는 현상이 심화되기 때문이다. 따라서 InGaN/sapphire LED에서 기판을 제거하기 위해서는 광자의 흡수를 최소화할 수 있는 오믹전극의 개발이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

VI. 결론 및 검토

InGaN LED의 칩 구조 및 칩 마운트 방식에 따른 광추출 효율을 Monte Carlo 기법을 이용하여 분석하였다. 광추출 효율을 획기적으로 개선시키기 위한 방안으로 보통 칩의 표면을 거칠게 만들어 주는 surface texturing 기법과 칩의 측면 면을 수직방향으로부터 일정각도 기울여 주는 측면 기울임 기법 등이 많이 사용되고 있지만, 이들 기법의 광추출 효율 개선 효과는 LED의 종류에 따라 크게 차이가 난다는 사실을 확인할 수 있었다.

일반적으로 두 기법 간에는 동작 특성상에 약간의 차이를 갖는다. 즉 textured surface에서는 광자들이 반사할 경우 그

진행방향이 매우 불규칙하게 주어지는 것과는 달리, 기울어져 있는 측 벽면에서는 광자들이 반사할 경우 주로 칩의 상부 쪽을 향하게 되어 상대적으로 쉽게 칩 밖으로 빠져 나갈 수 있게 된다. 따라서 일반적으로 광추출효율 개선 정도는 측 벽면 기울임 기법이 surface texturing 기법에 비하여 더 크다고 할 수 있지만, 예외적으로 InGaN/sapphire LED에서는 측 벽면 기울임 기법의 광추출효율 개선 효과가 상대적으로 미미한 것으로 분석되었다. InGaN/sapphire LED에서는 기판으로 사용되는 sapphire의 굴절률이 상대적으로 작아서, 생성된 광자들의 상당 비율이 기판으로부터의 전반사현상으로 말미암아 기판으로 넘어가지 못하고 반도체 결정층에 갇히는 현상이 나타나게 된다. 그런데 InGaN/sapphire LED의 경우 반도체 결정층의 총 두께는 5 μm 정도 이하로 매우 작기 때문에 결정층에 갇힌 광자들이 기울어져 있는 측 벽면을 만날 확률이 매우 미미하게 되고 그 결과로 광추출효율은 거의 개선되지 못하게 된다.

InGaN/sapphire LED에서 생성된 광자들이 기판으로 원활하게 넘어가지 못하는 현상은, 또 다른 한편으로 epi-down 칩마운트 방식의 광추출효율을 심각하게 손상시키기는 역기능으로 이어져, 결과적으로 광추출효율 관점에서 만 비교할 경우, epi-down 칩 마운트 방식은 epi-up 칩 마운트 방식에 비하여 결코 이점이 없는 것으로 분석되었다. 그럼에도 불구하고 epi-down 방식은 광추출효율 관점에서 커다란 잠재력을 갖고 있다고 할 수 있는데, 그 잠재력을 살릴 수 있는 구체적인 방안의 하나는 기판-에피택시 계면을 texturing 하는 것으로 판단된다. 생성된 광자들이 texturing된 기판-에피택시 계면에 도달하게 되면, 광자들의 진행방향이 불규칙하게 바뀌면서 광자들이 다량 기판으로 넘어갈 수 있게 되고, 그 결과로 특히 기판에 대한 전극이나 반사체로부터의 차폐현상이 전혀 없는 epi-down 방식의 광추출효율이 현저히 개선되는 것으로 분석되었다.

최근 들어 InGaN/sapphire LED에서 sapphire 기판을 제거하기 위한 시도들이 있지만, 방열관점을 무시하고 광추출효율 관점만을 고려하면, 오히려 역효과가 나는 것으로 판단된다. 즉 기판이 제거되게 되면, 칩을 에워싸는 에폭시와의 굴절률 정합관계가 나빠질 뿐만 아니라, 광자들이 더욱 빈번하게 전극과 접촉하면서 그 곳에서 흡수되는 현상이 나타나서 광추출효율은 오히려 상당히 큰 폭으로 감소되는 것으로 분석되었다. 따라서 InGaN/sapphire LED에서 기판을 제거하기 위해서는 광자들의 흡수현상을 최소화할 수 있는 전극 개발이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 중대형사업의 지원과 학술진흥재단의 지역대학우수과학자지원사업의 일부 지원을 받아 수행되었습니다. 아울러 연구 진행 중에 많은 유익한 정보를 흔쾌히 제공해주신 Ninex의 김 봉진 박사에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] T. Mukai, M. Yamada, and S. Nakamura, "InGaN-based uv/blue/green/amber/red LEDs," in *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications III*, Proc. SPIE, vol. 3621, pp. 2-14, Jan. 1999.
- [2] I. Schnitzer, E. Yablonovitch, C. Caneau, T. J. Grnitter, and Scherer, "30 % external quantum efficiency from surface textured, thin-film light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 16, pp. 2174-2176, Oct. 1993.
- [3] R. Windisch, B. Dutta, M. Kuijk, A. Knobloch, S. Meinschmidt, S. Schoberth, P. Kissel, G. Borghs, G. Dohler, and P. Heremans, "40 % efficient thin surface-textured light-emitting diodes by optimization of natural lithography," *IEEE. Trans. on Elect. Dev.*, vol. 47, no. 7, pp. 1492-1497, July 2000.
- [4] R. Windisch, C. Rومان, S. Meinschmidt, P. Kissel, D. Zipperer, G. Dohler, B. Dutta, M. Muijk, G. Borghs, and P. Heremans, "Impact of textured transmission on high-efficiency surface light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 15, pp. 2315-2317, Oct. 2001.
- [5] S. J. Lee and S. W. Song, "Efficiency improvement in light emitting diodes based on geometrically deformed chips," in *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications III*, Proc. SPIE, vol. 3621, pp. 2-14, Jan. 1999.
- [6] M. R. Krames, M. Ochiai-Holcom, G. E. Hoffler, C. Carter, E. I. Chen, I.H. Tan, P. Grillo, N. F. Gardner, H. C. Chui, J.Huang, S. A. Stockman, F. A. Kish, M. G. Craford, T. S. Tan, C. P. Kocot, M. Hueschen, J. Posselt, B. Loh, G. Sasser, and D. Collins, "High-power truncated (Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5} P/GaP light-emitting diodes exhibiting >50% external quantum efficiency," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, no. 16, pp. 2365-2367, Oct. 1999.
- [7] S. J. Lee, "Analysis of light-emitting diodes by Monte Carlo photon simulation," *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 9, pp. 1427-1437, Mar. 2001.
- [8] S. Nakamura and G. Fasol, *The blue laser diode*, Springer, Berlin, 1997.
- [9] S. J. Lee, "Electrode design for InGaN/sapphire light-emitting diodes based on multiple thin ohmic metal patches," in *Fourth International Conference on Solid State Lighting*, Proc. SPIE, vol. 5530, pp. 338-346, Aug. 2004.
- [10] K. H. Hunag, J. G. Yu, C. P. Kuo, R. M. Fletcher, T. D. Osentowski, L. J. Stinson, and M. G. Craford, "Two-fold 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, Aug. 1992.
- [11] S. J. Lee, "Analysis of InGaN high-brightness light-emitting diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 11, pp. 5990-5993, Nov. 1998.

Photon Extraction Efficiency in InGaN Light-emitting Diodes Depending on Chip Structures and Chip-mount Schemes

Song Jae Lee[†]

Electronics Engineering Department, Chungnam National University Yusung-gu Koong-dong 220 Taejeon 305-764, Korea

[†]*E-mail: sjlee@cnu.ac.*

(Received May 2, 2005, Revised manuscript June 13, 2005)

The performance of the InGaN LED's in terms of the photon extraction efficiency has been analyzed by the Monte Carlo photon simulation method. Simulation results show that the sidewall slanting scheme, which works well for the AlInGaP or InGaN/SiC LED, plays a very minimal role in InGaN/sapphire LED's. In contrast to InGaN/SiC LED's, the lower refractive index sapphire substrate restricts the generated photons to enter the substrate, minimizing the chances for the photons to be deflected by the slanted sidewalls of the epitaxial semiconductor layers that are usually very thin. The limited photon transmission to the sapphire substrate also degrades the photon extraction efficiency especially in the epitaxial-side down mount. One approach to exploit the photon extraction potential of the epitaxial-side down mount may be to texture the substrate-epitaxy interface. In this case, randomized photon deflection off the textured interface directly increases the number of the photons entering the sapphire substrate, from which they easily couple out of the chip and thereby improving the photon extraction efficiency drastically.

OCIS Codes : 230.3670.