

고출력 조명용 White LED의 수명예측

이명훈[†] · 신승중^{*} · 곽계달^{**}

Lifetime Estimation of High Power White LED for Lighting Use

Myeong-Hoon Lee, Seung-Jung Shin and Kae-Dal Kwack

Key Words: White LED(백색 발광다이오드), Accelerated Life Test(가속수명시험), YAG:CE phosphor(YAG:CE 형광체), Lens Yellowing(렌즈 황변)

Abstract

LEDs which have many merits are widely used in the field of light devices, and have rapidly replaced old light devices such as incandescent or fluorescent lamps. Long life, on the order of 50,000 to 100,000 hours, is one of the key features of light emitting diodes(LEDs) that has attracted the lighting community to this technology. High Power white LEDs have yet to demonstrate this capability. This paper planned accelerated life test that has two factor(temperature, current) and two levels. Finally, using ALTA programs, we estimated the common shape parameter of Weibull distribution, life-stress relationship, B_{10} life and accelerating factors.

1. 서론

LED(Lighting Emitting Diode, 발광다이오드)는 기존의 백열등, 형광등, HID에 비하여 수명, 처리 속도 등에서 큰 장점이 있다. 또한 흑체복사를 이용하여 넓은 스펙트럼의 빛을 생성시킨 후 원하는 색깔의 필터를 사용하는 현재의 백열등 방식보다 그 효율이 매우 높다.⁽¹⁾

현재 고출력 조명용 White LED가 자동차 헤드 램프, LCD모니터 및 TV의 백라이트 등 사용분야가 다각화됨과 동시에 제품에 대한 신뢰성이 대두되고 있지만, 수명 예측에 대한 연구나 자료는

부족한 실정이며, 정보도 공유되고 있지 않다.

본 연구에서는 고출력 LED의 대표적인 적용사례 중 하나인 고출력 조명용 White LED를 대상으로 필드에서 나타난 고장을 바탕으로 고장모드와 고장 메커니즘을 분석하고, 가속수명시험을 수행하여 수명-스트레스 관계식, 가속계수 및 B_{10} 수명을 추정하고자 한다.

2. 고출력 조명용 White LED의 고장분석

2.1 White LED의 구조와 발광원리

SMD type LED의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 P-N junction을 이루는 반도체 화합물인 chip이 금 wire와 Conductive Silver paste를 통해서 Anode, Cathode electrode에 연결되어 있으며, 이를 통해 전력을 공급받아 발광한다. 또한 외부로부터의 충격으로부터 보호하기 위하여 Epoxy 또는 Silicon이 봉지되어 있다.

LED는 P형, N형 반도체가 접합된 형태의 chip이 있는데, P형에는 +의 전하를 갖는 정공이, N형

[†] 이명훈, 한양대학교 전자통신컴퓨터 공학부

E-mail : ikari100@hanmail.net

TEL : 019-224-2324

* 한세대학교 IT학부

** 한양대학교 전자통신컴퓨터 공학부,

신뢰성분석연구센터(RARC)

반도체에는 -의 전하를 갖는 전자가 캐리어의 대부분을 차지하고 있다. P형과 N형 반도체는 모두 전도율이 좋지만 이 둘을 접합하게 되면 P형 반도체의 운반자인 정공과, N형 반도체의 운반자인 전자가 서로 끌어당겨서 재결합하면서 없어지기 때문에 depletion zone이 생성되며, 발광원리는 Fig. 2에 보이듯이 P형과 N형 반도체의 양단에 전압을 인가하면 junction의 장벽이 약하게 되어 정공과 전자가 depletion zone으로 이동할 수 있게 된다. 이 때 정공과 전자가 충돌하게 되고, 이 둘은 재결합을 거치면서 에너지를 잃게 되는데 LED는 이때의 에너지를 이용하여 빛으로 방출한다.⁽²⁾

LED가 백색 빛을 발광하기 위한 방법에는 세 가지가 있다. 첫 번째로 빛의 삼원색인 Red-Green-Blue 삼색의 LED칩을 한 패키징에 조합하여 함께 구동하거나, 두 번째로 청색 LED를 여기광원으로 사용하고, YAG의 노란색(560nm)을 내는 형광체를 접목하는 형태와 세 번째로 UV LED에 Red-Green-Blue 형광체를 접목시킨 형태이다.⁽³⁾

2.2 고효율 조명용 White LED의 고장모드/메커니즘

고출력 조명용 White LED는 정격 내에서는 쉽게 고장 나지 않으며 반영구적으로 동작한다. 그렇지만 온도의 변화와 같은 환경적 요인과 과전류와 관련된 고장을 일으킨다. 고장모드는 Open, Short, 발광의 감소(Light Output Reduction), 발광색의 변화(Light Output Color Change)의 형태로 나타나게 된다.

고장모드 중 Open & Short는 ESD, EOS 같은 전기적 충격이나 공정상에서 일어나는 결함으로 인하여 Au wire가 파괴로 이어지며, 공정과정에서 chip내부에 Ion Contamination이 발생하여 chip내부에서 short가 이루어질 수 있다.

White LED의 고장중 하나인 발광의 감소는 부식(Corrosion)과 열, 과전류로 인한 dislocation에 기인한다. LED는 정공과 전자가 충돌하여 잃는 에너지가 가시광선영역의 빛으로 방출되는데, dislocation은 energy bandgap을 변화시켜 가시광선영역의 빛으로 방출되지 못하고 열로 방출되기 때문에 발광이 감소하게 된다.

White LED는 다른 LED와 달리 발광색의 변화에 민감하다. 이것을 일으키는 요인으로는 열과 과전류로 인한 에폭시의 변색, Junction부분의 온도에 따른 Spectrum의 변화 및 chip에서 방출되어

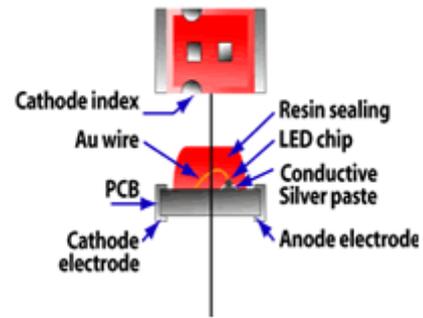


Fig. 1 Structure of SMD type LED

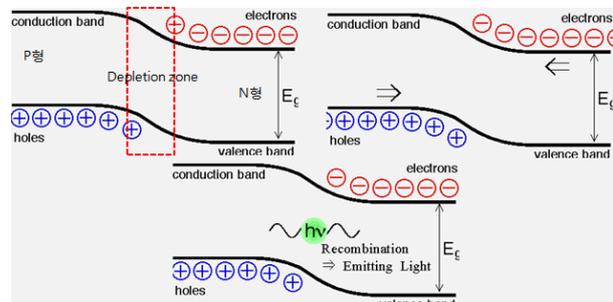


Fig. 2 Working principle of LED

YAG형광체를 거쳐서 변환되는 빛과 변환되지 않는 빛의 불균형이 있다.⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾

필드에서 고장난 사례를 Fig. 3의 (a), (b)에 나타내었다. 그림에서 (a)는 Wire fracture, (b)는 Color change이다. 상기 고효율 조명용 White LED의 고장모드와 고장메커니즘을 FTA(Fault Tree Analysis)를 나타내면 Fig. 4와 같게 된다.

3. 가속수명시험

고출력 조명용 White LED의 고장분석 결과, 주요 고장모드는 Color Change이며, 주 고장 메커니즘은 내·외부로부터의 열에 의한 Lens yellowing (이하 황변으로 칭함)이다. White LED의 황변에 대한 수명을 추정하기 위하여 가속수명시험을 수행하였다.

3.1 2단계 품질기능전개

(2-stage QFD; Quality Function Deployment)

White LED의 수명을 평가하기 위한 시험 항목을 도출하기 위하여 2-stage QFD를 수행하였고 이를 Fig. 5에 나타내었다. 그림의 단계 1에서는 고



(a) Wire fracture (b) Color change
Fig. 3 White LED failure

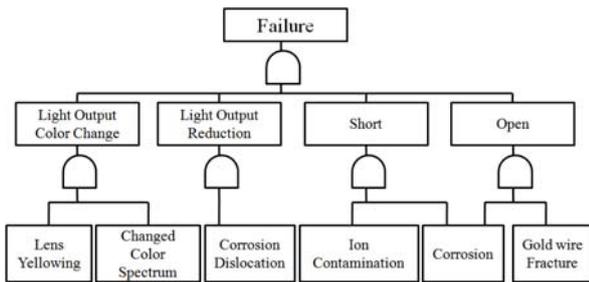


Fig. 4 FTA of White LED

장모드/메커니즘과 스트레스의 관계를 단계 2에서는 고장모드/메커니즘과 시험방법의 관계를 나타내고 각 항목에 대한 점수를 산정하여 수명 추정을 효과적으로 수행할 수 있는 시험 방법들을 평가하였다. 2-stage QFD 분석결과, 고온 및 과전류를 가속인자로 하는 시험법이 고효율 조명용 White LED의 가속수명시험에 가장 적합하다고 판단하였다.

3.2 시료 선정 및 고장판정기준

본 연구에서 사용한 고효율 조명용 White LED의 형상을 Fig. 6 (a), (b)에 나타내었다. 그림 (a)에서 나타냈듯이 시료는 3개의 LED chip이 금 wire를 통해서 Anode, Cathode electrode에 연결되어 있으며, 외부로부터의 충격으로부터 보호하기 위한 Epoxy와 백색 빛을 발광하기 위한 YAG형광체가 교반되어 봉지되어 있다.

가속수명시험에 사용한 시료의 전기적 특성 및 고장판정기준을 Table 1에 나타내었으며, 시험시 고장판정 기준은 Light Output의 색이 노란색 즉, 황변이 발생하는 경우로 정하였다.

3.3 가속인자 및 수준의 결정

가속수명시험에서 가속인자인 온도와 전류의 크기는 제조사에서 제공한 최고 사용 환경 온도 80°C를 기준으로 115%, 130% 가속된 90°C, 105°C

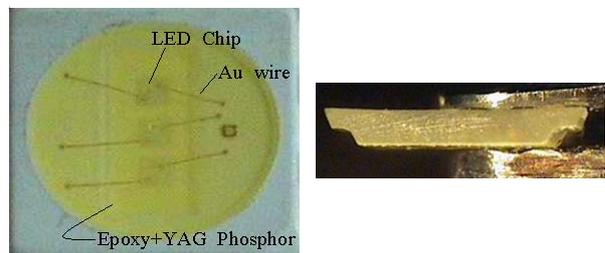
Requirements / Stress	Mechanisms			
	Corrosion	Dislocation	Lens Yellowing	Goldwire Fracture
Performance Emitting Light	△	◎	○	
Component Life : 30,000hr	△	○	△	○
Operation Current : 180mA		○	◎	○
Temperature -30 ~ 80 °C	○	○	◎	○
Humidity : 25 ~ 85%	◎			
Score	10	11	14	9

(a) Matrix1 - Failure Mode/Mechanism

Mechanisms	Test	Test			
		High Current Test	High Temperature Test	Thermal Shock Test	Temperature Humidity Cycle
Corrosion	5			△	◎
Dislocation	8	△	○		○
Lens Yellowing	11	◎	◎		
Goldwire Fracture	2	○		○	◎
Score		69	79	11	59

(b) Matrix2 - Test Method

Fig. 5 2-Stage QFD



(a) Top view (b) Cross-section

Fig. 6 Photo of test sample

Table 1 Electrical Specification and Failure Criteria

Characteristic	Range	Failure Criteria
Forward Voltage at $I_F=180\text{mA}$	$3.5\text{V} \leq V_F \leq 3.8\text{V}$	Change of Light Output Color (Yellow)
Luminous Intensity at $I_F=180\text{mA}$	9.2cd	
Reverse Current at $V_F=5\text{V}$	$I_R \leq 50\mu\text{A}$	

의 조건을 선택하였으며, 정격전류 180mA를 기준으로 125%, 150% 가속된 225mA, 270mA의 조건을 선택하였다. 그러므로 가속수명시험 조건은

Table 2와 같이 3개의 조건에서 각각 10개의 시료로서 시험을 시행하였다.

3.4 시험장치 및 시험방법

가속수명시험을 수행하기 위한 시험 장치를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 시험 장치는 DC Power Supply, 저항, Fuse, 항온조(oven)로 구성되어 있다.

시험의 측정은 10개의 White LED가 모두 황변이 될 때까지 진행하며, 매 24시간마다 고장여부를 확인하였다.

3.5 시험결과

3.5.1 시험의 관측결과

가속수명시험에서 빛이 노란색으로 변한 시료를 고장분석한 결과 봉지제인 에폭시에서 황변이 발생하였으며, 양품과 고장시료의 단면을 Fig. 8 (a), (b)에 각각 나타내었다. 그림 (a)는 양품의 단면사진이며, 그림 (b)는 고품의 단면사진이다. 그림에서 알 수 있듯이 봉지제인 Silicon이 노란색으로 변색되었음을 알 수 있다. 또한 각 시료의 고장시간을 각 조건별로 Table 3에 나타내었다.

3.5.2 수명분포의 적합성 검토 및 가속성 검토

가속수명시험을 통하여 얻은 데이터에 적합한 수명분포를 결정하기 위하여 와이블, 지수, 대수 정규분포의 우도함수(Likelihood Function)값을 비교하여 Table 4에 나타내었다. 우도함수 값을 비교한 결과, 값이 가장 큰 와이블 분포가 수명분포에 가장 적합하다는 것을 알 수 있다. 시험에서 관측된 White LED의 고장시간을 시험조건 별로 와이블 용지에 타점하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 각 조건 별 데이터들이 직선성을 띄며 배치되어있고, 각 수명분포 추정선이 서로 거의 평행하게 나타남을 볼 수 있다. 이에 와이블 분포가 적합하다고 할 수 있으며, 시험 조건에 따른 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다.

3.5.3 가속수명시험 모델

White LED의 수명을 예측하기 위하여 2개의 가속변수인 온도와 전류에 대한 온도-전류 모델을 적용하고자 한다. 본 연구에서는 White LED의 수명분포를 와이블로 가정하고, 와이블 특성수명(η), 온도(T), 전류(I)사이의 관계식을 식 (1)과 같이 가

Table 2 Test Matrix

Group	Test Condition		
	Current(mA)	Temp(°C)	No. of Sample
1	270	105	10
2	270	90	10
3	225	105	10

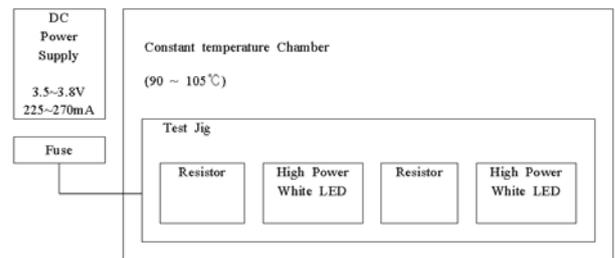
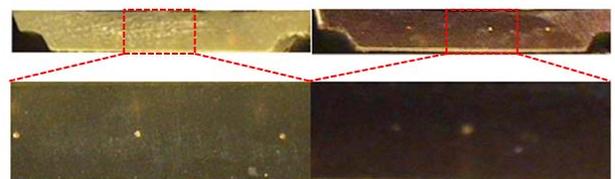


Fig. 7 Experimental apparatus for ALT

Table 3 Failure time Matrix [unit : hr]

	270mA, 105°C	270mA, 90°C	225mA, 105°C
#1	144	216	288
#2	168	216	288
#3	168	240	336
#4	240	288	384
#5	240	288	456
#6	336	312	456
#7	336	360	576
#8	336	408	576
#9	360	480	696
#10	360	480	696



(a) Normal (b) Failure

Fig. 8 Cross-sectional shape of LED

Table 4 Conformance result of life distribution

Distribution	Weibull	Exponential	Lognormal
Likelihood Function	-181.7045	-205.5315	-181.9872

정하였다.

$$\eta(T, I) = \frac{C}{T^n \cdot e^{(-B/I)}} \quad (1)$$

여기서, C, n, B는 재료 및 시험방법 등에 따라 결정되는 상수이다.

3.5.4. 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계식
 와이블 분포와 식 (1)의 수명-스트레스 관계식을 가정하고, ALTA 프로그램을 이용하여 수명시험 데이터를 분석한 결과 상수는 각각 다음과 같다.

$$\beta = 3.7480, B = 1846.1552$$

$$C = 1.2178 \times 10^8, n = 3.1805$$

White LED의 황변에 대한 와이블 분포의 형상모수값이 3.7480으로 추정되었으며, 이는 마모고장임을 알 수있다. 또한 온도 및 전류에 의한 수명-스트레스 관계식과 가속계수 식은 식 (2) 및 식 (3)과 같이 각각 추정할 수 있다.

$$\eta(T, I) = \frac{1.2178 \times 10^8}{T^{3.1805} \cdot e^{(-1846.1552/I)}} \quad (2)$$

$$AF(T, I) = \left(\frac{T_d}{T_a} \right)^{-3.1805} \cdot e^{1846.1552/(I_d/I_a)} \quad (3)$$

3.5.5 시험결과의 해석 및 B₁₀수명의 추정

온도와 전류에 대한 가속계수의 영향을 Fig. 10 (a), (b)에 나타내었다. 그림에서 LED의 가속계수 추정 결과, 온도에 대한 가속계수보다 전류에 대한 가속계수가 상대적으로 높아 전류가 수명에 미치는 영향이 큰 것으로 추정된다. 이는 온도에 의한 외부로부터의 열보다는 전류에 의해 칩에서 생성되는 내부로부터의 열이 커서 에폭시를 변색시키는 중요한 요인이 되며, 이에 의하여 결국 황변이 발생하게 된다.

White LED의 B₁₀수명에 대한 관계식을 식 (4)에 나타내었다.

$$B_{10} = \eta \cdot [-\ln(1 - 0.1)]^{1/3.7480} \quad (4)$$

두 가속 인자에 대한 B₁₀ 수명 추정치를 Fig. 11

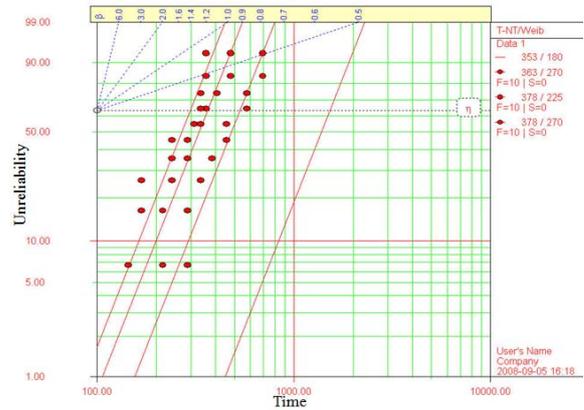
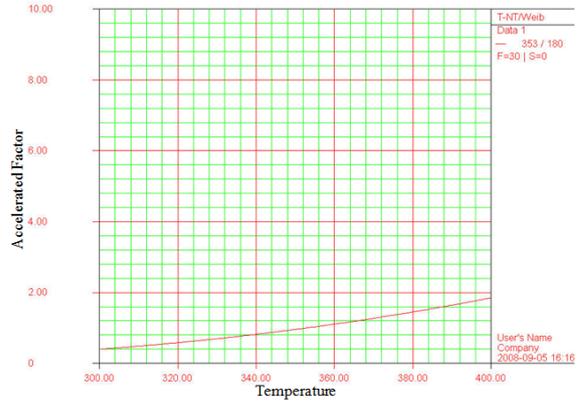


Fig. 9 Weibull probability paper plot



(a) Temperature



(b) Current

Fig. 10 AF vs. Stress

(a), (b)에 나타내었다. 그림 (a)에서 x축은 온도, y축은 B₁₀수명을 나타낸다. 온도 변화에 대한 B₁₀ 수명 추정 시에는 전류를 170, 180, 190mA에서, 온도는 40℃부터 110℃까지 변화시켰다. 전류가 180mA일 때, 온도 80℃에서 B₁₀수명은 15,003 hr이며, 80℃를 기준으로 10% 감소된 72℃에서는

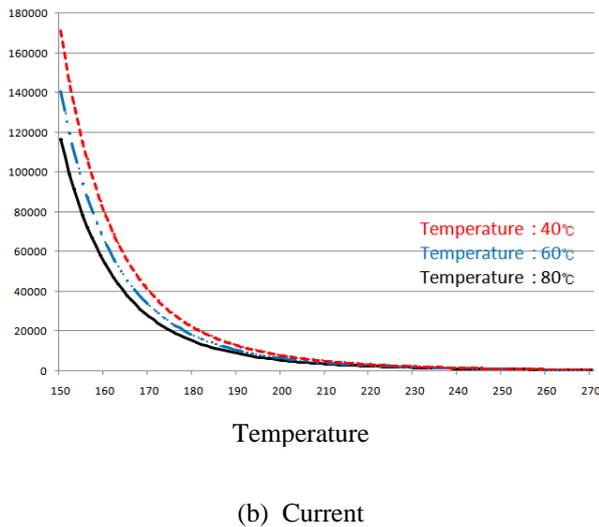
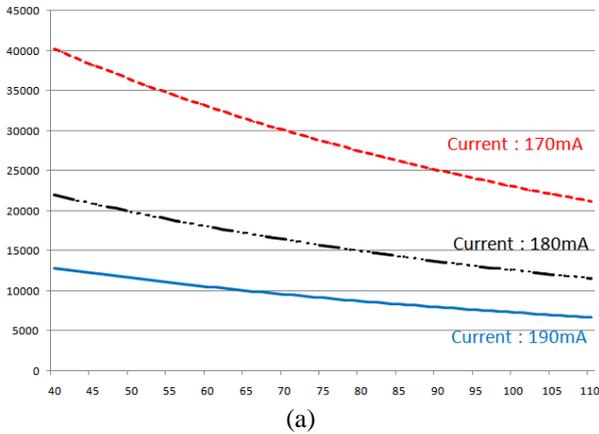


Fig. 12 B₁₀ Life vs. Stress

16,138 hr, 10% 증가된 88°C에서는 13,971 hr로 추정되었으며, 정격전류 180mA, 온도 80°C를 기준으로 온도가 10% 감소시 B₁₀수명이 1.08배 증가하였으며, 10% 증가시 1.07배 감소하였다. 주변 온도의 변화는 B₁₀ 수명에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

그림 (b)에서 x축은 전류, y축은 B₁₀수명을 나타낸다. 전류 변화에 대한 B₁₀ 수명 추정 시 온도를 40, 60, 80°C로 가정하고 전류를 150mA부터 270mA까지 변화시켰다. 온도 40°C일 때, 전류 180mA에서 B₁₀수명은 21,994 hr이며, 180mA를 기준으로 10% 감소된 162mA에서는 68,741 hr, 10% 증가된 198mA에서는 8,657 hr로 추정되었으며, 정격전류 180mA, 온도 40°C를 기준으로 전류가 10% 감소시 B₁₀수명이 3.13배 증가하였으며, 10% 증가시 2.54배 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 고효율 조명용 White LED를 대상으로 가속수명시험을 실시한 결과 White LED의 주 고장모드는 Change of Light Output Color이며, 고장 메커니즘은 황변이다. White LED의 B₁₀수명은 온도 80°C를 기준으로 온도를 10% 증감시켰을 시 수명이 약 1.08배 증감되었으며, 정격전류 180mA를 기준으로 전류를 10% 증감시켰을 시 수명이 약 3배 증감되었다. 그러므로 White LED는 온도보다는 전류에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있었으며, White LED는 필드조건 60°C, 180mA일 경우 수명은 18,061 hr로 나타났다.

참고문헌

- (1) Jang W. J., Hwang J. S., Hong S. K., Hong S. W. and Jung B. M., 2006, "Highly Effective Lighting Technologies", Agin, p21
- (2) E. Fred Schubert, 2003, "Light-Emitting Diodes", Cambridge University Press, p26~46
- (3) E. Fred Schubert, 2003, "Light-Emitting Diodes", Cambridge University Press, p245~253
- (4) Melanie Ott, 1996, "Capabilities and Reliability of LEDs and Laser Diodes", NASA Goddard Space Flight Center
- (5) Nadarajah Narendran, Nishantha Maliyagoda, Andrew Bierman, Richard Pysar, and Martin Overington, 2000, "Characterizing white LEDs for general illumination applications", *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Application IV*, Vol. 3938, pp 240~248
- (6) Lumileds, 2004, "Technical Report"
- (7) Cree, 2004, "Technical Report"