

Microcavity 적용 광자 발광 소자의 광 추출 향상 연구

이한별^{1,a}, 이은혜¹, 성민호¹, 유시흥¹, 이성의¹

¹ 한국산업기술대학교 신소재공학과

Enhanced Light Outcoupling on Photo-luminescent Devices with Microcavity

Han Byul Lee^{1,a}, Eun Hye Lee¹, Min Ho Sung¹, Si Hong Ryu¹, and Seong Eui Lee¹

¹ Department of Advanced Material, Korea Polytechnic, Sihung 429-793, Korea

(Received October 31, 2012; Revised December 11, 2012; Accepted April 24, 2013)

Abstract: Recently, microcavity is studied to reduce the optical loss of BLU and OLED. In this paper, we suggest applying microcavity to photo-luminescent lamp with plasma discharge technology to meet the display applications for a BLU for LCD. The structure of photo-luminescent lamp consists of SUS foil and ITO glass with microcavity. The opto-electric characteristics of photo-luminescent lamp with microcavity was evaluated. The brightness of photo-luminescent device was increased over 111 cd/m² with the adaptation of patterned microcavity at 30 μm. The 3D optical simulation verified the enhanced light outcoupling when microcavity applied to the device.

Keywords: Microcavity, Plasma, BLU, 3D optical simulation, Outcoupling

1. 서 론

LCD, PDP로 대표되는 FPD (flat panel display)는 20세기 표시소자의 주류였던 CRT 기술로 생산되던 모니터, TV 등의 기존 시장을 잠식해 감과 동시에 notebook, 휴대전화와 같은 새로운 제품을 창출해 가며 디스플레이 시장을 확대하였다 [1,2]. 이 중 LCD에 사용되는 CCFL, LED 백라이트 유닛 (BLU)은 광이 도광판, 반사판, 확산필름과 두 장의 프리즘시트 같은 매질을 통과할 때마다 그 강도가 급격히 줄어 광 손실이 50%에 이른다. BLU의 광 손실을 줄이기

위해 각 부품을 단일화하거나 개수를 축소시키는 등의 연구를 통해 광 특성을 향상시키려는 연구를 하고 있다 [3]. 또한, 면 조명용으로 높은 가능성을 갖고 있는 것으로 알려져 있는 OLED는 공기와 유기물 박막 사이의 굴절률 차이 때문에 내부에서 발생한 광자와 소자 외부로 방출된 광자의 비율인 광 추출 효율이 20% 미만인 것으로 알려져 있다. 낮은 광 추출 효과를 향상시키기 위해 광학적 활성층 도입 및 저굴절률 물질의 삽입 등 많은 방법들이 연구되고 있지만 이러한 방법들은 제조상의 어려움 등의 문제를 가지고 있기 때문에 수 μm급의 microcavity 적용을 통한 광 추출 효율을 향상시키는 연구를 진행하고 있다 [4-6]. PDP로 알려진 광자발광 소자는 간단한 소자 구조와 긴 수명, 넓은 시야각, 밝고 선명한 색 구현이 가능하다는 장점을 갖고 있어 BLU로서의 발전 가능성을 가지고 있다 [7]. 본 연구는 백라이트 제작을 위해, 대면적화에 용이하고 긴 수명을 갖는 광자 발광

a. Corresponding author: onestar1206@naver.com

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소자에 저온공정을 적용하여 광자 발광 소자 구조를 연구 하였고, 백라이트로서 보다 높은 광 추출 향상을 얻기 위해 microcavity를 적용한 방전특성 및 광학 특성에 대해 분석하였다. 또한, 이를 3D 광학 시뮬레이션을 통한 광 추출 향상 결과와 실제 측정된 광 특성 결과를 비교하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 Microcavity 적용 광자 발광 소자 제작

그림 1은 광자 발광 소자의 구조를 나타낸다. 소자의 전극 형성을 용이하게 하기 위해 외부 전극 구조를 제안하였다. 또한, 유연함을 소자에 적용하고자 200 μm 두께의 SUS foil을 하부 기판으로 하여 전극 역할을 동시에 하도록 하였다.

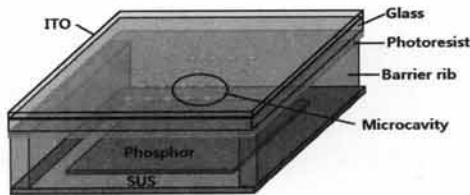


Fig. 1. Photo-luminescence device structure.

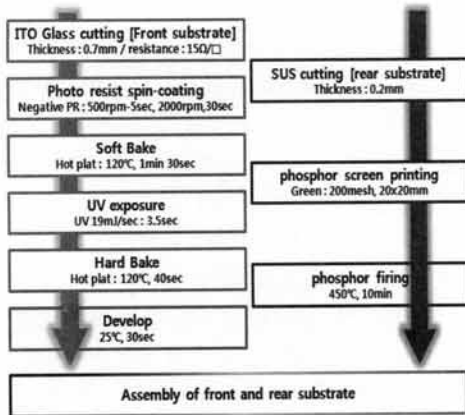


Fig. 2. Process flow of photo-luminescent devices process.

그림 2는 광자 발광 소자의 공정 흐름도이다. SUS foil 위에 스크린 인쇄를 통해 20×20 mm 크기로 녹색

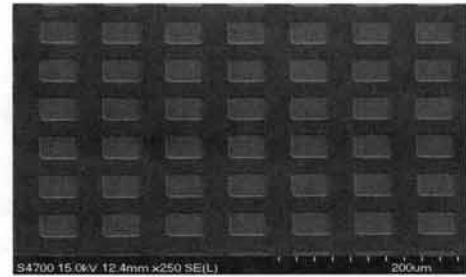


Fig. 3. SEM of patterned microcavity (40 μm).

형광체 ($\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$)를 도포한 후 450°C에서 10분 간 소성하여 형광체를 활성화시켰다. 상부 기판은 면저항 15 Ω/\square 를 갖는 700 μm 두께의 ITO glass를 사용하였으며, microcavity의 패턴 크기에 따른 광학 특성을 연구하기 위해 그림 3과 같이 ITO glass 뒷면에 negative photoresist (DNR-L300-30)를 spin coating법을 통해 500 rpm에서 5초, 2,000 rpm에서 30초 간 코팅하였다. 그 후, 120°C hot plate에서 1분 30초 간 soft bake하였고, UV exposure은 19 mJ/초에서 3.5초 간 유지하였으며, 120°C hot plate에서 40 초간 hard bake 후 developer (TMAH 2.38%)에 담가 패턴을 형성 하였다. 실험에 적용한 photoresist의 패턴 깊이는 각각 20, 30, 40, 50, 60, 70 μm 의 사각 우물형태로 제작 되었으며, reference로 photoresist가 적용 되지 않은 기판을 사용하였다. 그 후, 방전 간격을 유지시키기 위해 0.7 mm 두께의 glass를 상부 기판과 하부기판 사이에 spacer로 사용하였다.

본 연구에서는 진공 챔버 장치에서 방전 특성을 평가하였다. 챔버 안의 초기 진공도 7.5×10^{-5} Torr를 유지한 다음 Ne-Xe 5% 혼합 가스를 100 Torr에서 350 Torr까지 50 Torr씩 증가시키면서 주입하였고, 전극을 power supply (HPI500, FT lab.)에 연결하여 방전개시전압 (V_f)을 측정하였다. 광자 발광 소자의 광학 특성은 휘도계 (CS200)로 측정하였다.

2.2 3D 광학시뮬레이션 모델링

3D 광학시뮬레이션은 Monte carlo법에 의한 광선 추적 원리를 이용하여 광원으로부터 불규칙한 방향으로 출사한 광선이 물체 계면에서의 반사, 굴절의 법칙으로부터 계산 (추적)하는 것이며, 결과로서 휘도 또는 조도를 산출한다. 아래는 광선의 경로를 추적하기 위해 Monte carlo법을 기반으로 하는 웨이브 함수이다.

$$f(x,y) = - \sum_{i=1}^{i=octaves} \sqrt{x^2+y^2} \frac{c_1 \cos(c_2 + 2^i c_3 xy)}{2^i}$$

- C₁ : 주파수, C₂ : 진폭, C₃ : 속도
- i : 웨이브를 생성하기 위해 사용된 옥타브 수

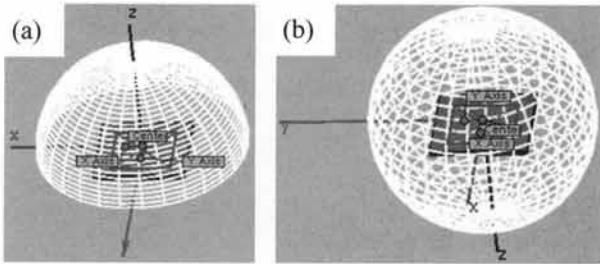


Fig. 4. Simulation analysis in accordance with detector. (a) intensity detector, (b) IES detector.

3D 광학 시뮬레이션은 Dassult Systems의 Solid works 와 OPTIS사의 Optisworks를 사용하였다. 실제 광자 발광 소자와 같은 구조를 만들기 위해 각각의 부품들을 설계하여 광학 특성을 부여하였다. 하부 기판 SUS foil은 표면 특성 (surface scattering)을 reflection 90%, absorption 10%로 설정하였으며, 형광체는 두께 20 μm로 설정하였고, green spectrum을 입력하였다. 상부기판 ITO glass는 표면 특성 transmission 90%, reflection 10%, index 1.5~1.65로 설정하였으며, photoresist pattern은 pattern size 20~70 μm 크기에 두께 2 μm, 표면 특성 transmission 80%, reflection 20%, index 1.7로 설정하였다. 광학 특성이 부여된 각각의 부품들을 하나의 소자로 조립하여 그림 4와 같이 intensity detector, IES detector를 설치하였고, 형광체로부터 방출되는 빛의 ray는 1억 5천 개 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 5는 광자 발광 소자의 방전 전압 및 방전 가스압력 변화에 따른 휘도 특성을 나타낸다. 광자 발광 소자의 경우 기체 방전 시 생기는 플라즈마로부터 나오는 UV가 형광체를 여기시켜 가시광선을 방출하게 된다. 그림 5(a)는 방전 전압의 증가에 따른 휘도 변화를 나타낸다. 방전 전압이 340 V에서 10 V씩 증

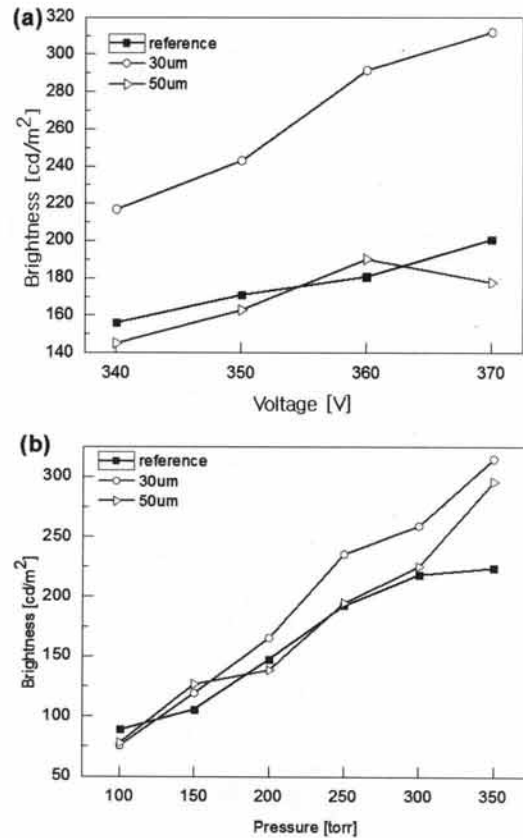


Fig. 5. (a) Luminance with variation of the discharge voltage, (b) luminance with variation of the gas pressure.

가함에 따라 microcavity가 적용되지 않은 소자와 30, 50 μm 크기의 패턴이 적용된 소자 모두 휘도가 증가하는 경향을 나타냈다. Reference와 50 μm 크기의 패턴을 갖는 소자는 비슷한 휘도 값을 가지지만, 30 μm 크기의 패턴을 갖는 소자는 이보다 약 60~120 cd/m² 가량 높은 휘도를 갖는다. 그림 5(b)는 방전 가스 압력 변화에 따른 휘도 변화를 나타낸다. 방전 가스 압력이 100 Torr에서 50 Torr씩 증가함에 따라 microcavity가 적용되지 않은 소자와 30, 50 μm 크기의 패턴이 적용된 소자 모두 휘도가 증가하는 경향을 나타내며, reference와 50 μm 크기의 패턴을 갖는 소자 보다 30 μm 크기의 패턴을 갖는 소자가 약 20~80 cd/m² 가량 높은 휘도를 갖는다. 방전 전압과 가스 압력의 증가에 따라 휘도가 증가하는 것은 방전 전압과 가스압력이 높으면 형광체를 여기시키는 UV의 세기가 증가하기 때문에 휘도가 증가하게 된다.

그림 6은 3D 광학 시뮬레이션을 통한 패턴 크기에

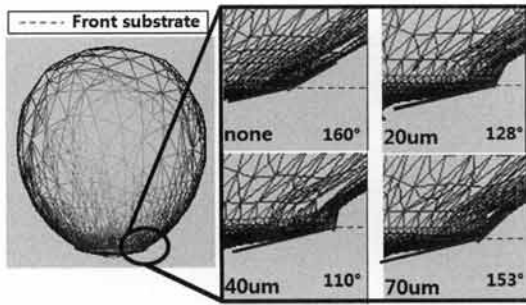


Fig. 6. Light distribution of 3D optical simulation with various patterns.

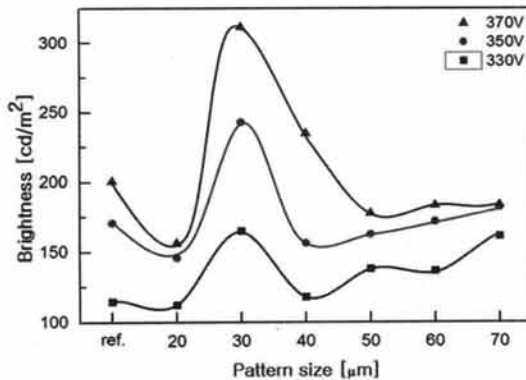


Fig. 7. Luminance with variation of pattern size (at 330, 350, 370 V).

따른 빛의 분포를 나타낸다. 빛의 전체적인 분포는 microcavity의 적용 여부와 관계없이 구형으로 고르게 분포되어 퍼져나간다. 하지만, 상부 기판을 통과하는 영역에서 microcavity가 적용되지 않았을 때는 약 170° 각도로 빛이 넓게 퍼져 나가지만, 패턴 크기가 20, 30 µm일 때 보다 40 µm일 때 10~40° 가량 감소하여 약 100°의 각도로 빛이 퍼져 나간다. 패턴 크기 40 µm에서 10 µm씩 증가할 때 빛이 퍼지는 각도는 약 10~50°가량 증가하였다. 빛이 퍼지는 각도를 통해 패턴의 크기가 30~40 µm일 때 정면 휘도가 향상되는 것을 예측할 수 있다. 이는 microcavity가 적용 되지 않았을 때 방전 공간 내에서 측면으로 퍼지는 빛은 낮은 굴절률을 갖는 glass 기판을 통과하게 된다. 하지만, glass 기판보다 굴절률이 높은 photoresist 패턴을 형성함으로써 측면으로 새어 나가는 빛들을 모아 외부로 추출하기 때문에 휘도가 상승하였다.

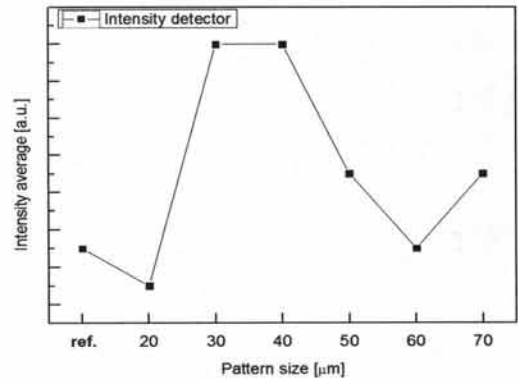


Fig. 8. Average value of intensity with pattern size at detector angles. (0~10°).

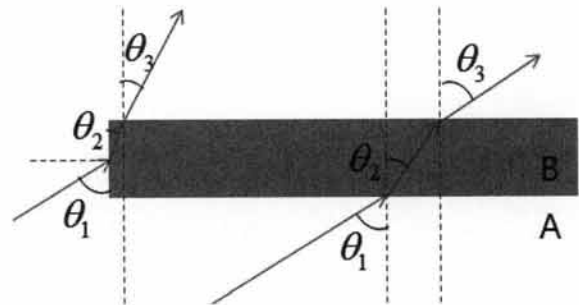


Fig. 9. Reflection of light with microcavity.

그림 7은 방전 전압별 패턴 크기에 따른 휘도 변화를 나타낸다. 방전 전압 330, 350, 370 V에서 패턴 크기가 20 µm일 때 보다 30 µm일 때 휘도가 53~155 cd/m² 가량 증가하였으며, 30 µm 이후로 패턴 크기가 10 µm씩 증가할 때마다 휘도는 약 15~70 cd/m² 가량 감소하였다. 또한, 패턴 크기가 30 µm일 때 microcavity가 적용되지 않은 소자보다 21~111 cd/m² 가량 휘도가 증가하였다. 이를 통해 패턴의 크기가 30 µm일 때 outcoupling 효과가 가장 크게 나타나는 경향을 확인하였다.

그림 8은 intensity detector를 적용하였을 때 패턴 크기에 따른 intensity의 평균값을 나타낸다. 패턴 크기 30 µm를 기준으로 패턴이 적용되지 않은 reference에서 30 µm의 패턴이 적용되었을 때 intensity는 약 1.3배 가량 증가하였고, 패턴 크기가 30 µm에서 70 µm로 커졌을 때는 0.85배 가량 감소하였다. Detector를 설정하였을 때 3D 시뮬레이션의 에러율은 약 0.5%이다.

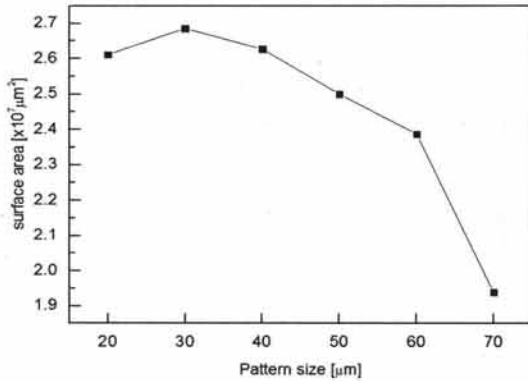


Fig. 10. Area of side surface with pattern size.

3D 광학 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 값을 비교하여 보면 오차가 발생하는데 이것은 3D 시뮬레이션의 경우 Photoresist의 두께와 표면이 매우 균일하다. 하지만, 실제 소자에 수 μm급의 두께를 오차 없이 적층하는 것에 어려움이 있기 때문에 3D 시뮬레이션과 실제 방전 결과에서 오차 발생되는 것으로 예상된다.

그림 9는 빛이 microcavity에 입사할 때 빛의 굴절에 의한 빛의 경로를 나타낸다. 공기 중 A에서 입사하는 빛이 θ₁의 진행 방향을 가질 때 매질 B의 굴절률차이로 인해 매질 내부에서는 빛이 θ₂의 진행 방향을 가지게 되며, 매질에서 외부로 빛이 진행할 때 역시 굴절률의 차이로 인해 매질 경계에서 빛은 θ₃의 진행 방향을 가지게 된다. 이 때 θ₁이 60°의 진행 방향을 가지고 패턴의 아랫면에 입사할 경우 θ₂는 35.26°를 가지게 되며, θ₃은 다시 60°의 진행 방향을 가지게 된다. θ₁이 패턴의 측면에 입사할 경우 매질 내부에서 빛이 진행하는 각도인 θ₂는 19.46°의 작은 각을 가지게 되며, 이로 인해 매질 내부에서 외부로 진행하는 빛의 방향 θ₃은 30°로 처음 입사하는 θ₁이 패턴에 의한 굴절로 빛의 방향이 크게 바뀌게 된다. 이를 통해 패턴의 아랫면보다 측면이 빛의 이동 방향을 결정짓는 요소로 판단된다.

아래는 입사각이 *i*, 굴절각이 *r*일 경우, 이 각도들과 빛의 속도 사이의 관계를 굴절률을 이용하여 표현한 식이다.

$$n = \frac{v_{vac}}{v_{mat}} = \frac{\lambda_{vac}}{\lambda_{mat}} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

- *n* : 굴절률
- *v_{vac}* : 진공에서 빛의 속도, *v_{mat}*: 재료 내에서 빛의 속도
- *λ_{vac}* : 진공에서 빛의 파장, *λ_{mat}*: 재료 내에서 빛의 파장
- *i* : 입사각, *r* : 굴절각

그림 10은 20×20 mm 크기로 형성된 microcavity의 패턴 크기에 따른 전체 측면 면적을 나타낸다. 패턴 크기가 30 μm일 때 측면 면적의 넓이가 가장 넓은 것을 통해서 측면에서 발생하는 굴절에 의해 빛의 방향이 다른 크기의 패턴보다 정면으로 더 많이 바뀌게 된다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 정면 방향으로 굴절된 빛은 광자 발광 소자의 정면 휘도 상승에 기여하는 것으로 예상된다.

4. 결론

백라이트로 사용 가능한 광자 발광 소자는 SUS foil을 하부 기판으로 적용하였으며, 광 추출 향상을 위해 상부 기판에 negative photoresist를 사용하여 사각형 우물 형태의 microcavity를 형성하였다. 이를 진공 챔버 장치에서의 방전 특성과 3D 광학 시뮬레이션에 대한 결과를 살펴보았다.

1. 광자 발광 소자의 대한 특성으로 방전 전압과 방전 가스 압력이 증가할수록 휘도가 증가하는 경향성을 나타내며, microcavity가 적용되지 않은 소자와 30, 50 μm 크기의 패턴이 적용된 소자를 비교하였을 때 30 μm 크기의 패턴을 갖는 소자의 휘도가 방전 전압에 따라서는 60~120 cd/m², 방전 가스 압력에 따라서는 20~80 cd/m² 가량 microcavity가 적용되지 않은 소자보다 높게 측정되었다.

2. 3D 광학 시뮬레이션의 배광 분포를 통해서 30 μm 크기의 패턴이 적용된 상부 기판에 빛이 통과할 때 빛이 퍼지는 각도가 30° 가량 감소하여 정면광으로 추출된다는 것을 확인하였다. 또한, 방전 전압에 따라서 패턴 크기가 30 μm일 때 microcavity가 적용되지 않은 소자보다 휘도가 약 55% 가량 증가하였다. Intensity detector를 설치한 3D 광학 시뮬레이션을 통해 패턴 크기가 30~40 μm일 때 광 추출률이 가장 높은 것으로 확인되며 실제와 유사한 경향을 보인다.

3. 패턴의 아랫면보다 측면에 빛이 입사하였을 때

굴절에 의한 빛의 이동 방향이 더 크게 변하게 되며, microcavity의 측면 면적을 계산한 결과 30 μm 크기의 패턴이 가장 넓은 측면 면적을 갖는다.

이를 통해 30 μm 패턴 크기를 가질 때 정면 휘도가 가장 높은 것은 패턴 측면으로 입사한 빛이 패턴에 의해 굴절되어 빛의 방향이 크게 바뀌면서 정면 휘도 상승에 기여하는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-0000-820).

REFERENCES

- [1] J. K. Lim, Ph. D. *Thesis*, p.18-21, Kyungpook National University, Daegu (2011).
- [2] S. W. Ryu, Ph. D. *Thesis*, p.12-13, Catholic University of Daegu, Daegu (2010).
- [3] T. H. Kim, S. H. Park, H. K. Oh, and Y. J. Shin, *Optics & Laser Technology*, 39, 1437 (2007).
- [4] T. Shiga, H. Fujikawa, and Y. Taga, *J. Appl. Phys.*, 93, 19 (2003).
- [5] M. H. Lu and J. C. Strurm, *J. Appl. Phys.*, 91, 595 (2002).
- [6] M. H. Lu and J. C. Strurm, *Appl. Phys. Lett.*, 78, 1927 (2001).
- [7] T. Tamida, A. Iwata and M. Tanaka, *T. IEE Jpn.*, 118-A, 353 (1998).