저융점합금 라인을 이용한 플렉시블 OLED 봉지

배건 · 문철희*

호서대학교 디지털디스플레이공학과

Flexible OLED Encapsulation with LMPA Line

Geon Bae and Cheol-Hee Moon*

School of Display Engineering, Hoseo University, Asan-si 31499, Republic of Korea

Abstract: We have developed an encapsulation technology for OLED devices using an LMPA sealing line to enhance barrier characteristics against moisture and oxygen penetration. To verify the potential of this technology for flexible OLED devices, three experimental factors were investigated in this study. First, the stability of the sealing line on the flexible substrate after repetitive bending was investigated by measuring changes in line resistivity. Secondly, temperature evolution and distribution on the flexible substrate during thermal processes were investigated. Thirdly, an OLED sample with the edge sealing line was manufactured and the lifetime was compared with a reference sample. The results showed the potential value of the LMPA sealing line to enhance the reliability and lifetime of flexible OLED devices.

(Received October 1, 2018; Accepted February 11, 2019)

Keywords: OLED(Organic light emitting diode), sealing, encapsulation, LMPA, Cu(Copper)

1. 서 론

플렉시블 디스플레이는 평면 디스플레이와 달리 디스플레이의 전기적, 광학적 특성의 변화나 손실 없이 종이처럼 수 센티미터 이내로 휘거나 접을 수 있도록 제조된 디스플레이를 말한다 [1]. LCD, PDP와 같은 디스플레이는 플렉시블 디스플레이를 구현하는 데 있어 구조적 한계를 가지고 있으나 유기 발광 소자 (OLED: organic light emitting diode)는 수백 나노미터 두께의 유기 다층 박막으로 이루어져 있고 외부 광원이 필요하지 않아 플렉시블 디스플레이를 구현하기에 적합한 소자로 주목 받고 있다 [2,3]. 플렉시블 OLED 디스플레이를 본격적으로 상용화하기 위하여 극복해야 할 가장 큰 과제는 수명이다 [4]. OLED의 수명에 있어 문제점은 첫째는 소자 자체의 열화이며 둘째로는 압점 형성에 의한 휘도의 급격한 감소를 들 수 있다. 소자 자체의 열화는 사용되는 소재의 전기적, 열적 특성, 디바이스 내의 전하 분포, 계면 특성 등이 관련

되어 있다. 압점 형성에 의한 소자 수명 감소는 OLED에 사용되는 유기 소재가 수분과 산소에 취약하다는 점에 기인한다. OLED 소자의 구동 시 기판을 투과한 수분 및 산소가 소자 내에서 전기·화학적 반응을 일으키며 수소 가스를 형성한다. 이로 인하여 전극과 유기물이 분리되어 압점을 형성하거나 OLED를 형성하는 유기 박막의 미세한 틈으로 침투하여 음극으로 사용되는 알루미늄 박막을 파손시켜 빛을 내지 않는 흑점이 발생한다 [5].

이를 방지하기 위하여 유리 기판의 OLED 소자에는 글래스 프리팅을 이용한 봉지 기술[6]이 널리 사용되어왔으나, 플렉시블 OLED에서는 이 기술을 적용할 수 없어 새로운 봉지기술이 요구된다. 가장 대표적인 기술로는 최근 모바일 기기, 태블릿 등 중소형 OLED 디스플레이에 적용되고 있는 TFE(Thin film encapsulation) 기술을 들 수 있다. 이는 OLED 소자 전면을 무기 층과 유기 층의 다층 박막으로 코팅하는 방법이다. Al_2O_3 등의 무기 층은 산소나 수분에 높은 차단성을 부여하며, 유기 층은 기판 유연성에 기여하며 무기 층에 존재하는 미세 결함을 커버하는 역할을 한다 [7-9]. 하지만 이 기술은 고가의 진공 증착 장비를 필요로 하며 공정시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 또 다른 봉지 기술인 하이브리드 봉지 기술은 무기 단일

- 배건: 박사과정, 문철희: 교수

*Corresponding Author: Cheol-Hee Moon

[Tel: +82-41-540-5923, E-mail: chmoon@hoseo.edu]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

막을 OLED에 코팅하고 접착 특성이 있는 배리어 필름을 라미네이팅 등의 방법으로 소자 전면에 형성하는 비교적 간단한 공정으로 구성되어 있다. 이는 OLED TV 등 대면적 OLED에 적용되고 있는데[10], 이 기술은 OLED에서 요구하는 내 투습성의 척도인 WVTR(Water vapor transmission rate)의 기준치를 만족시키지 못하는 단점이 있으며 특히 측면에서의 투습에 취약하다. 본 연구팀은 유리 기판의 OLED 소자에 대하여 저융점합금 (LMPA: Low melting point alloy)과 에폭시를 혼합한 소재를 수분과 산소의 침투를 방지하는 외곽 실링 라인으로 적용한 봉지기술을 발표한 바 있다 [11,12]. 본 연구에서는 이 기술을 플렉시블 OLED소자에 확대 적용하기 위한 기초 실험으로서, 몇 가지 실험을 통하여 그 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 실험 방법

그림 1은 기존 하이브리드 봉지 기술(a)과 본 연구에서의 새로운 봉지방법(b)을 비교한 것이다. 그림(a)에서 보듯이 기존의 하이브리드 봉지 기술은 OLED 소자를 보호하기 위해 얇은 무기막이 도포되어 있으며 상부로부터 침투되는 수분 및 산소를 차단하고자 접착층이 형성된 배리어 필름을 OLED 소자 위에 부착시켜 전면에 대한 내 투습성을 부여하고 있다. 하지만, 이 구조는 소자 측면에서 침투되는 수분과 산소에 쉽게 노출되는 단점을 지니고 있다. 그림(b)는 본 연구에서 제안하는 구조로써, 기존 하이브리드 봉지 구조 측면에 LMPA 재질의 실링라인을 형성하여 측면에서의 내 투습성을 향상키는 구조이다.

본 연구에서는 그림(b)에서 제안한 LMPA 실링라인을 플렉시블 OLED에 적용하는 것이 목적이며, 이를 위해 다음의 3가지 실험을 진행하였다. 첫째로 LMPA 라인을 유연기판에 형성한 뒤 반복 굽힘 후 저항의 변화를 관찰하여 라인 안정성을 조사하였다. 유연기판으로는 플렉시블 OLED에 사용되는 PI 필름을 사용하였다. 둘째로 LMPA 라인 형성 시 OLED에 열 손상이 가해지는지 여부를 파악하기 위해 LMPA 라인에만 열을 인가할 수 있는 hot bar를 제작하여 열 압착 공정을 진행하고 이때 플렉시블 기판에서의 온도 분포를 조사하였다. 셋째로 LMPA 라인이 적용된 OLED를 제작하고 수명을 평가하여 내 투습성 향상 여부를 간접적으로 조사하였다. 소자 제작을 위한 OLED 기판으로는 아직 완벽한 전면 내 투습성을 지닌 고분자 필름이 없으므로 유리 기판을 사용하여 실링라인의 기본적인 효과를 우선적으로 파악하였다.

Fig. 1. Comparison of the two structures. (a) conventional hybrid encapsulation (b) new concept

2.1 반복 굽힘 특성 평가용 샘플 제작

반복 굽힘에 대한 LMPA 라인의 신뢰성 평가를 위해 그림 2와 같이 Cu가 코팅된 PI 필름을 상 하판으로 사용하고 중앙에 LMPA 라인이 형성된 구조의 샘플을 제작하였다. 본 연구에서 사용한 LMPA는 용융온도가 139 °C인 Sn-58Bi(Tamura Co.) 페이스트를 사용하였다. Sn-58Bi와 Cu는 적절한 온도에서 열처리 시 Sn-Cu 합금을 형성하여 강한 접착력을 얻을 수 있으므로 [13] Cu를 하지 층으로 사용하여 그 위에 Sn-Bi 라인을 형성하였으며 Cu 패턴의 선폭은 LMPA와 같은 선폭으로 패터닝 하였다. LMPA는 ST#325 스크린 마스크를 사용하여 선폭을 0.5, 0.7, 1 mm로 달리하여 하판에 인쇄하였으며, 이후에 상판을 덮은 후 150 °C로 설정된 핫플레이트에서 1분간 0.215 kgf/cm²의 압력을 주어 LMPA 라인을 형성하였다. 이 때 제작된 샘플의 치수는 30 mm × 80 mm 이며, 반복 굽힘은 샘플

Top view

Side view

Fig. 2. A schematic drawing of the sample for the repetitive bending test.

양 끝 부분을 고정한 뒤 곡률 반경을 5, 10, 15 mm로 달리하여 0.5 Hz의 주파수에서 각각 500회씩 굽힘 변형을 반복하였다. 반복 굽힘 후 LMPA 라인에 미세한 크랙이 발생하거나 기판과의 접착력이 낮아진다면 샘플에 흐르는 전류 또한 달라질 것이므로, 양쪽에 5 mm 정도 전압을 인가할 수 있는 영역을 두어 샘플 양 단에 1 V의 전압을 인가하여 LMPA 라인에 흐르는 전류를 측정하여 저항 특성 변화를 관찰하였다. 또한 LMPA 라인의 시간에 따른 굽힘 특성을 평가하기 위해 같은 샘플을 2일간 굽힘 상태를 유지한 후에 저항 변화를 관찰하였다.

2.2 Hot bar를 이용한 LMPA 열 압착 공정

LMPA 열처리를 소성로 또는 핫플레이트 등에서 진행하면 열이 OLED 샘플 전체에 가해지므로 소자의 유기물 성분을 손상시키게 된다. ETL로 사용되는 저분자인 TPBi의 경우 T_g 가 122 °C로 매우 낮으므로 열에 의한 특성 저하를 특히 조심해야 한다. 따라서 본 연구에서는 LMPA 라인에만 국부적으로 열을 가할 수 있도록 hot bar를 제작하여 LMPA의 열 압착 공정을 진행함으로써 OLED 소자에 열 손상을 주지 않는 조건을 찾는 실험을 진행하였다.

그림 3(a)은 LMPA 라인을 적용한 유리 기판 기반 OLED 샘플 사진이다. 기판의 크기는 30 mm × 30 mm이며 유기층은 기판의 중앙에 10 mm × 10 mm의 면적으로 코팅되어 있다. 그림 3(b)에서는 LMPA 라인을 플렉시블 OLED에 적용했을 때 열 분포를 파악하기 위하여 (a)와 동일한 설계를 가지는 PI 필름에 hot bar가 적용되는 영역과 OLED 영역을 표시하였다. 그림 3(b)에서 점선의 위치에 hot bar를 일정한 압력을 가하여 접촉하였으며, 점선 위치에서부터 이격된 거리를 d 로 표기하여 d 에 따른 온도변화를 써모커플을 이용하여 측정하였다.

2.3 LMPA 라인이 적용된 OLED 소자 제작

플렉시블 OLED 소자 제작 시 기판은 주로 PI 등의 고

Fig. 3. Sample design for the hot bar experiments. (a) glass substrate (b) PI film substrate

분자 필름이 사용되지만 수분과 산소에 대한 투습성이 높아 그대로 사용할 수 없다. 본 실험에서는 LMPA 라인의 측면 내 투습성을 간접적으로 평가하기 위해 유리 기판의 OLED 샘플을 제작하고 LMPA 라인 유무에 따른 수명 특성을 비교, 평가함으로써 실링 라인의 효과를 파악하였다.

그림 4는 본 연구에서 제작한 OLED 소자의 층 구성과 각각의 에너지 레벨을 나타낸 것이다. 각 층의 구성은 그림 5에 언급된 재료와 두께로 제작하였다.

본 연구에서 외곽 실링라인을 적용한 OLED 소자의 하부 유리 기판의 제작 방법을 그림 6에 나타내었다.

먼저 30 mm × 30 mm 크기의 유리에 코팅되어 있던 150 nm 두께의 ITO 막을 포토리소그래피를 이용하여 그림

Fig. 4. The energy diagram for the each layer of the OLED device.

Fig. 5. Specification of each layer for the lower glass substrate.

Fig. 6. Manufacturing process for the lower glass substrate.

a의 형태로 패터화하였다. 다음 공정으로는 그림 b와 같이 RF 스퍼터로 500 nm 두께의 SiO₂ 막을 형성하였다. 이와 같이 절연막을 코팅하는 이유는 LMPA가 전기도전 특성을 가지므로 향후 형성할 외곽 실링라인과 ITO 전극배선들과의 전기적 절연을 위해서이다. 여기서 절연막의 성막 영역은 발광영역은 덮지 않으면서 전압을 공급하는 배선의 단자부위가 노출되도록 설정하였다. 세번째 공정으로는 그림 c에서 보듯이 실링 라인의 하지층으로 사용할 Cu 패터를 형성하였다. 먼저, DC 스퍼터를 사용하여 Cu막을 코팅하였는데 Cu막의 두께는 기존 연구결과를 근거로 2 µm로 형성하였다. 본 연구팀의 실험결과에 의하면 Cu의 두께가 불충분하면 Cu가 Sn-Cu 합금 형성에 소진되어 하부 기판과의 접착력을 상실하게 된다 [11]. 이와 같이 코팅된 Cu 막을 포토리소그래피를 이용하여 그림 c의 형태로 패터화하였다. Cu 패터의 위치는 향후 LMPA 실링 라인이 위치하여 상하판 합착을 이루게 되는 위치이므로 발광 면적의 외부에 위치하면서도 SiO₂ 막의 위에 위치하도록 해야 배선 전극 간의 쇼트를 막을 수 있다.

다음으로는 그림 d에 나타난 바와 같이 소자 내부에 유기물 층을 코팅하였다. 이를 상세히 설명하면 다음과 같다. 첫 번째 유기층인 홀 주입층 (HIL: Hole injection layer)은 poly(3,4-ethylene dioxythiophene): poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS, CLEVIOS P VP Al 4083)를 4,000 rpm으로 스핀 코팅 후 150 °C에서 10분간 건조하여 30 nm 두께의 막으로 형성하였다. 두 번째 유기물인 발광층 (EML: Emission layer)은 host 물질로써 Poly(9-vinylcarbazole) (PVK, Mw: 1,100,000, Aldrich)를 사용하였으며 인광 dopant 물질로써 Tris[2-phenylpyridinato-C2,N]iridium(III) (Ir(ppy)₃, Aldrich)를 사용하였다. host 물질인 PVK의 부족한 정공 이동도와 전자 이동도를 개선하고자 정공 수송재료인 N,N'-bis(3-methylphenyl)-N,N'-bis(phenyl)-benzidine (TPD, Aldrich)와 전자 수송재료인 2-(4-Biphenyl)-5-(4-tert-butylphenyl)-1,3,4-oxadiazole (PBD, Aldrich)를 추가하여 60:5:10:25의 무게 비로 클로로벤젠에 1 wt% 첨가한 후 이틀간 교반하였고, 이를 2,500 rpm으로 스핀 코팅 후 80 °C에서 30분간 건조하여 40 nm 두께의 막으로 형성하였다. 세 번째 유기물인 전자 수송층 (ETL: Electron transport layer)은 2,2',2''-(1,3,5-Benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1-H-benzimidazole) (TPBi, Aldrich)를 톨루엔에 0.5 wt% 첨가하여 이틀간 교반하였고, 이를 4,000 rpm으로 스핀 코팅 후 100 °C에서 10분간 건조하여 20 nm 두께의 막으로 형성하였다.

다음 공정은 양극 제작으로서 알루미늄을 열 증착 방식

으로 3 Å/s의 속도로 100 nm 두께의 막으로 그림 e와 같은 형태의 패터로 형성하였다. 알루미늄 전극 패터는 실링라인 안쪽에서 ITO 전극과 오믹 접합을 이루도록 설계해야 한다. 그 이유는 알루미늄 전극이 Cu 패터 위까지 연결되면 Cu와 LMPA의 결합을 방해하기 때문이다.

상부 기판으로는 20 mm × 20 mm 크기의 유리 기판 위에 하부 기판에 형성한 Cu 패터와 동일한 위치에 동일한 방법으로 Cu 패터를 형성한 후 LMPA를 Cu 패터와 일치하도록 인쇄하였다. 이렇게 제작한 상하부 기판을 열과 압력을 가하면서 합착하였으며 이때 상부기판과 하부기판 사이 빈 공간은 UV 경화성 접착제 (NOA65, Norland)를 도포하고 365 nm 파장의 UV 경화기를 이용하여 120 mJ/cm²의 에너지를 조사하여 소프트 경화를 한 뒤 형광등 아래에서 1일간 방치하여 소자의 봉지공정을 완료하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 반복 굽힘 특성

그림 7은 본 연구팀이 제작한 LMPA 라인의 반복 굽힘 실험결과이다. 그림 (a)는 LMPA 라인의 폭을 각각 0.5, 0.7, 1.0 mm로 제작한 샘플을 곡률 반경을 5, 10, 15 mm로 달리하여 500회 반복 굽힘을 실시하였을 때의 저항 변화이다. 그래프에서 보듯이 LMPA 라인의 폭이 0.7과 1.0 mm인 경우에는 반복 굽힘을 실시한 후에도 저항 변화가 거의 발생하지 않았다. 이는 본 연구에서 제작한 LMPA라인이 반복굽힘 변형 후에도 유연 기판에서 접착력을 잘 유지하고 쉽게 금이 가지 않음을 보여준다. LMPA의 폭이 0.5 mm의 경우에도 반복 변형 후 안정성이 유지되었으나, Cu를 0.5 mm의 선폭으로 패터닝하는 데에 어려움이 있어 본 실험에서는 0.7 mm의 실링 라인이 최적인 것으로 판단하였다. 그림 (b)에서는 LMPA 라인의 시간에 따른 저항 변화를 파악하기 위해 샘플을 2일간 방치하여 시간 경과에 따른 저항 변화를 조사하였다. 그 결과, 모든 조건에서 반복 굽힘 전후의 저항 변화가 거의 나타나지 않았으나 곡률 반경이 5 mm 인 경우에는 저항 값이 다소 높음을 알 수 있었다.

3.2 Hot bar 압착 공정 시 온도 분포

그림 8 (a)는 hot bar를 이용한 LMPA 열 압착 과정에서 시간에 따른 위치별 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 여기서 d는 hot bar가 접촉되는 위치인 실링라인으로부터의 이격 거리이다. 본 실험에서는 다음의 3가지 위치에 대한 온도 변화를 측정하였다.

Fig. 7. Change of the line resistance under the two different conditions. (a) after 500 times repetitive bending (b) after 2 days elapsed on the bend

- ① LMPA 라인에 직접 압력이 가해지는 Hot bar의 중심 영역
- ② Hot bar로부터 5 mm 떨어진 지점 (발광영역의 가장 자리에 해당)
- ③ Hot bar로부터 10 mm 떨어진 지점 (발광영역의 중심 부분에 해당)

Hot bar의 중심 영역(①)에 대한 온도 측정 결과로는, 약 30초 후 LMPA의 용융온도인 139 °C에 도달하였으며, 약 40초 후에는 약 155 °C의 온도로 유지됨을 확인하였다. LMPA 라인 형성을 위해서 150 °C 이상의 온도가 60초 간 인가되어야 하므로 이로부터 Hot bar를 이용한 LMPA 라인 형성에는 총 100초가 필요하다고 판단되어 100초 동안의 온도 변화를 측정하였다. 그림 8(a)에서 알 수 있듯이 d = 5 mm인 지점(②)은 열 압착을 개시하여 100초 경과 시까지 온도가 계속 증가하고 있기는 하지만 120 °C 이하인 것으로 측정되었다. d = 10 mm인 지점(③)에서도

Fig. 8. Thermal characteristics during the hot bar process. (a) temperature evolution with time (b) temperature distribution after 100s

전반적으로 d = 5 mm인 경우와 측정 오차범위 내에서 유사한 온도분포를 보였다. 그림 8(b)는 열 압착 공정 시 100초 후 샘플 전 영역에 걸친 온도 분포를 나타낸다. 그림과 같이, hot bar 실링이 이루어지는 영역은 LMPA 용융을 위한 온도 범위 내로 온도가 분포되며, OLED 영역에서는 120 °C 이하의 온도 분포를 보여준다. 이상의 결과를 종합하면 다음과 같다. OLED에 사용되는 유기 소재 중 열에 가장 취약한 TPBi의 T_g 가 122 °C임을 고려하면, 본 연구에서 제안하는 열 압착 공정을 이용하여 OLED 소자의 열 손상 없이 실링라인을 성공적으로 형성하고 기판을 합착할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 LMPA 라인이 적용된 OLED 수명 평가

그림 9 (a)는 이와 같은 방법으로 제작하여 완성한 샘플을 사진 촬영한 것으로서, 외곽 실링 라인의 효과를 파악하기 위하여 20 mm × 20 mm 크기의 유리 기판을 UV 경화성 접착제로 실링한 샘플(b) 및 봉지하지 않은 샘플(c)

Fig. 9. OLED samples manufactured by different encapsulation technologies. (a) with LMPA sealing line (b) with epoxy (c) no encapsulation

Fig. 10. Comparison of the lifetime characteristics for the OLED devices with different encapsulation.

과 특성을 비교하였다. 여기서 (a)와 (b)에서 사용한 UV 경화성 접착제는 동일한 소재를 사용하였다. 측정기기로는 분광 광도계(PR650, Photo research co.)와 멀티미터(Keithley 2400)를 기반으로 하는 IVL 평가 시스템을 활용하였다. 측정 방법으로는 초기 휘도를 100%로 하여 휘도가 50%로 감소한 시점까지 수명 평가를 진행하였다.

그 결과는 그림 10에서 보듯이 붕지하지 않은 OLED 샘플의 경우 휘도 반감기까지 약 26시간이 소요되었으며 유리 붕지가 적용된 OLED 샘플의 경우에는 약 53시간의 시간이 소요되었다. 이에 비하여 LMPA 붕지 기술이 적용된 OLED 샘플의 경우에는 휘도 반감기까지 약 61시간이 소요되어 유리 붕지 기술보다 수명이 15% 향상된 결과를 나타내었다. 이는 LMPA를 이용한 실링 라인이 측면으로 투습 되는 수분과 산소를 차단하는 데 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

기존 플렉시블 OLED의 붕지 공정기술 중 하나인 하이브리드 붕지 공정의 단점으로 지적되는 측면 투습을 개선

하고자 LMPA를 이용하여 외곽 실링 라인을 추가한 새로운 기술에 대하여 다음과 같은 실험 결과를 얻었다.

1. LMPA 라인을 PI 기판에 형성하여 500회 반복 굽힘 변형 테스트 및 2일간 굽힘 상태를 유지한 결과, 곡률반경이 5 mm인 조건에서도 저항변화가 관찰되지 않았으므로 금속 실링라인은 플렉시블 소자 제작 시에 굽힘 변형에 대하여 안정적인 것으로 판단된다. 이러한 특성은 선폭이 0.5 mm인 경우에도 유지되었다.

2. 자체 제작한 hot bar를 활용하여 PI 기판에 실링라인을 형성하기 위한 열 압착 공정을 진행하였다. 이 때 OLED 소자 내부에 전달되는 온도는 115 °C 이하로 파악되었으므로, 소자의 열 손상 없이 실링 라인을 형성하고 합착할 수 있음을 확인하였다.

3. 실링라인의 내 투습 효과를 확인하기 위하여 유리 기판을 이용하여 OLED 소자를 제작하였고, 이를 레퍼런스 소자와 비교한 결과 수명이 약 15% 개선됨을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임. (과제번호#2016-0063)

REFERENCES

1. R. H. Reuss, B. R. Chalamala, A. Moussessian, M. G. Kane, A. Kumar, D. C. Zhang, J. A. Rogers, M. Hatalis, D. Temple, G. Moddel, B. J. Eliasson, M. J. Estes, J. Kunze, E. Handy, E. S. Harmon, D. B. Salzman, J. M. Woodall, M. A. Alam, J. Murthi, S. C. Jacobsen, M. Olivier, D. Markus, P. M. Campbell, and E. Snow, *Proc. IEEE* **93**, 1239 (2005).
2. J. S. Park, H. Chae, H. K. Chung, and S. I. Lee, *Semicond. Sci. Technol.* **26**, 034001 (2011).
3. L. Zhou, A. Wanga, S. C. Wu, J. Sun, S. Park, and T. N. Jackson, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 083502 (2006).
4. M. Schaer, F. Niesch, D. Berner, W. Leo, and L. Zuppiroli, *Adv. Funct. Mater.* **11**, 116 (2001).
5. P. E. Burrows, G. L. Graff, M. E. Gross, P. M. Martin, M. Hall, E. Mast, C. C. Bonham, W. D. Bennett, L. A. Michalski, M. S. Weaver, J. J. Brown, D. Fogarty, and L. S. Sapochak, *Proc. SPIE* **4105**, 75 (2001).
6. P. E. Burrows, V. Bulovic, S. R. Forrest, L. S. Sapochak, D. M. McCarty, and M. E. Thompson, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 2922 (1994).
7. J. H. Choi, Y. M. Kim, Y. W. Park, T. H. Park, J. W. Jeong, H. J. Choi, E. H. Song, J. W. Lee, C. H. Kim, and B. K. Kim,

- Nanotechnol.* **21**, 475203 (2010).
8. A. A. Dameron, S. D. Davidson, B. B. Burton, P. F. Carcia, R. S. McLean, and S. M. George, *J. Phys. Chem. C* **112**, 4573 (2008).
 9. A. B. Chwang, M. A. Rothman, S. Y. Mao, R. H. Hewitt, and M. S. Weaver, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 413 (2003).
 10. Z. Wu, L. Wang, C. Chang, and Y. Qiu, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 981 (2005).
 11. H. S. Choi, H. K. Kwon, K. S. Kim, J. S. Park, and C. H. Moon, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* **4**, 1131 (2014).
 12. K. M. Park and C. H. Moon, *J. Nanoelectron. Optoe.* **11**, 183 (2016).
 13. S. H. Hong, H. J. Park, Y. S. Kim, J. T. Kim, Y. S. Na, K. R. Lim, W.-M. Wang, and K. B. Kim, *Met. Mater. Int.* **24**, 241 (2018).