

근거리 광연결용 미러 내장형 연성 광도파로 필름

안종배 · 이우진 · 황성환 · 김계원 · 김명진 · 정은주 · 노병섭[†]

한국광기술원 나노 광전융합 연구센터
☎ 500-460 광주광역시 북구 월출동 971-35

(2012년 1월 12일 받음, 2012년 1월 31일 수정본 받음, 2012년 2월 7일 게재 확정)

본 논문에서는 연성 광 인쇄회로기판(printed circuit board, PCB) 개발을 위한 핵심 부품인 연성 광도파로를 자외선 임프린트 (ultra violet imprint, UV-imprint) 공정에 의해 제작하고 도파손실, 굴곡손실, 반사손실 및 반복굴곡에 대한 내구성을 측정하였다. 먼저, 초정밀 기계가공에 의해 광도파로 패턴과 45° 미러 구조를 포함하는 니켈 마스터를 제작 후 폴리디메틸실록산 (polydimethylsiloxane, PDMS)를 이용하여 탄성체 몰드를 역상 복제 하였다. 역상 복제된 PDMS 몰드를 이용해 UV-imprint 공정에 의한 광도파로의 코어패턴과 45° 미러면을 동시 형성하여, 45° 미러가 내장된 광도파로를 제작하였다. 또한, 광도파로의 끝단을 통상적 방법인 V-sawing 공정으로 45° 미러 구조를 가공하여 미러 내장형 광도파로와 미러 특성을 비교하였다. 제작된 연성 광도파로는 단위 길이당 0.035 dB/cm의 도파손실을 나타내었으며, 반경 1 mm의 180° 굴곡 조건에서 0.77 dB의 굴곡손실을 나타내었다. 또한, 굴곡각도 135°, 굴곡반경 2.5 mm의 반복굴곡 실험에서 10 만회 이상의 반복굴곡에 대한 우수한 내구성을 확인하였다. 내장된 45° 미러의 반사효율을 향상시키기 위해 미러면에 Ni-Au 이중 박막을 증착하여 2.18 dB의 반사손실을 가진 미러 내장형 연성 광도파로를 제작하였다.

Flexible Optical Waveguide Film with Embedded Mirrors for Short-distance Optical Interconnection

Jong Bae An, Woo-Jin Lee, Sung Hwan Hwang, Gye Won Kim, Myoung Jin Kim,
Eun Joo Jung, and Byung Sup Rho[†]

Nano-Photonics Research Center, Korea Photonics Technology Institute, 971-35 Wolchul-dong, Buk-gu, Gwangju 500-460, Korea

(Received January 12, 2012; Revised manuscript January 31, 2012; Accepted February 7, 2012)

In the paper, we fabricated a Ni master with 45°-mirror structures for flexible waveguide fabrication. The flexible waveguide films with embedded 45°-angled mirrors at the waveguide ends were successfully fabricated using a UV-imprint process. Next, in order to enhance the reflectivity of the mirrors, Ni(3 nm)-Au(200 nm) bilayers were evaporated on the 45°-angled facets through a locally opened thin mask using an electron beam evaporator. We measured propagation loss, bending loss, mirror loss and bending reliability of the fabricated waveguide.

Keywords: UV-imprint process, Flexible optical waveguide, Optical interconnection

OCIS codes: (060.4510) Optical communication; (130.5460) Polymer waveguides; (250.5460) Polymer waveguides

I. 서 론

기존의 전기 배선을 이용한 신호 전달의 전송속도 한계를 극복하기 위해 광신호에 의한 정보전달이 지속적으로 연구되었고, 최근에는 인쇄회로기판(printed circuit board, PCB) 내에 광도파로를 삽입하는 광 PCB 형태의 연구가 이루어지고 있으며 다층 연성 광 PCB에도 적용 되어지고 있다.^[1-7] 그림 1

은 다층 연성 광 PCB의 개념도를 나타내며, 광 PCB는 면발 광 레이저(vertical cavity surface emitting laser, VCSEL), 포토다이오드(photodiode, PD)등의 전기/광, 광/전기 변환소자 및 구동소자를 포함하며 광도파로는 끝단에 45° 미러면을 형성 시키고 광 PCB 내부에 삽입된다. VCSEL에서 출사한 광신호는 45° 미러면을 통하여 광도파로에 결합되고, 광도파로를 지난 광신호는 45° 미러면을 통해 다시 PD로 수광된다.^[1]

[†]E-mail: kalparho@hanmail.net

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

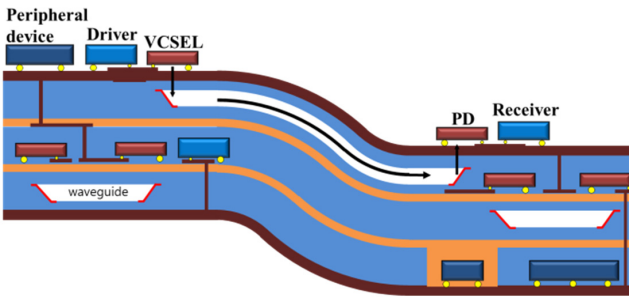


FIG. 1. Schematic configuration of multilayered flexible optical-electrical PCB.

연성 광도파로는 다층 연성 광 PCB 개발을 위한 핵심 부품으로, 연성 광 PCB에 적용성을 높이기 위해서는 저손실, 고유연성 및 물리적 내구성을 필요로 하며, 연성 광 PCB 내부에 적층 및 부품 실장이 용이해야 한다. 기존의 광도파로는, 광도파로 끝단에 미러면을 형성하여 미러면이 손상되기 쉽고 또한 광도파로의 단차가 PCB 표면에 단차를 발생시켜 PCB 적층 및 부품 실장을 어렵게 한다.^[2-4] 이러한 문제점들을 해결하기 위해 45° 미러 구조가 광도파로 내부에 형성되어 있는 미리 내장형 광도파로 제작 방법이 제안되었다.^[5] 본 논문에서는 자외선 임프린트(ultra violet imprint, UV-imprint) 공정에 의해 연성 광도파로를 제작하였다.^[6] 미리 내장형 광도파로 제작을 위해, 45° 미러 구조가 포함된 마스터를 제작하였으며 UV-imprint 공정을 이용하여 광도파로의 코어 패턴과 45° 미러면을 동시에 제작하였다. 또한, 연성 광 PCB 적용을 위해 미리 내장형 광도파로를 기판이 없는 박막형 연성 필름 형태로 제작하였다. 제작된 미리 내장형 연성 광도파로는 도파손실 및 굴곡손실을 측정하고, 내장형 미러의 특성은 통상적인 V-sawing에 의해 제작된 미러와 비교하였으며, 반복 굴곡에 대한 내구성을 확인 하였다.^[7]

II. 미리 내장형 연성 광도파로 제작

그림 2와 같이 UV-imprint 공정을 이용한 미리 내장형 연성 광도파로 제작은 마스터 제작, 몰드 복제, under clad sheet 제작, 패턴 imprint, 금속 박막 증착, 상부 클래드 제작의 단계를 거친다.

미리 내장형 연성 광도파로 제작을 위한 세부 공정은 다음과 같다. 첫 번째, 마스터 제작을 위해 정밀한 두께로 가공된 크롬 합금 스테인레스 금형강(chromium alloyed stainless steel, STAVAX) 기판을 제작 하였다. 가공된 기판은 광도파로 패턴을 형성하기 위해 한쪽 면에 Ni을 200 μm 두께로 증착하고, 단면을 연마하여 마스터 본체를 완성하였다. 광도파로 패턴 형성은 다이아몬드 가공 툴을 이용해 광도파로 코어 형상 및 45° 미러 구조를 이중으로 가공하여 그림 3과 같은 45° 미러 구조를 포함하는 Ni 마스터를 제작하였다.^[8]

제작된 마스터는 코어의 윗면, 측면, 45° 미러면은 각각 3 nm(rms), 5 nm(rms), 2 nm(rms)의 표면조도를 나타내었다.

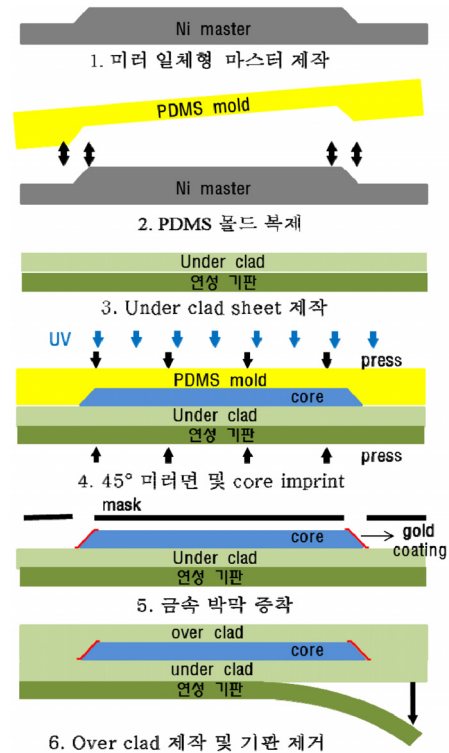


FIG. 2. Fabrication of a waveguide film with embedded 45°-angled mirrors via UV-imprint process.

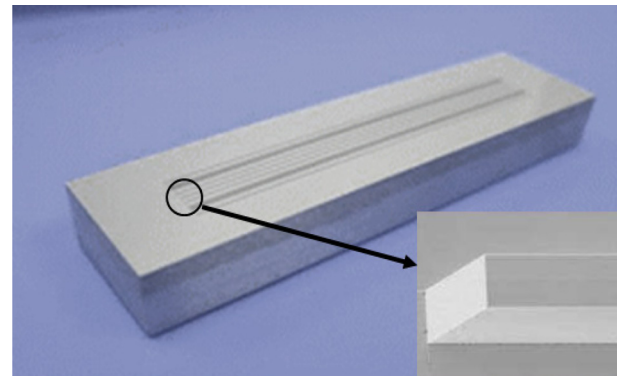


FIG. 3. Ni imprint master with 45°-angled mirrors at the waveguide patterns.

두 번째, 몰드 복제를 위해 제작된 Ni 마스터를 복제 주조 방식을 이용하여 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS) 몰드를 제작하였다. PDMS의 경우 높은 점도로 인해 미세 채널로 주입시, 표면에서의 충전 과정에서 빠져나가지 못한 공기로 인해 미세기포가 형성된다. 이런 과정에서 생긴 미세기포들은 PDMS의 열경화 과정에서 성장하게 되고, 이들은 PDMS의 높은 점성에 의해 빠져나가지 못하므로 인해 패턴 내부에 잔류하게 된다. 이러한 기포들은 UV-imprint를 통한 패턴 제작 과정에서 패턴의 결함을 초래할 뿐만 아니라 패턴의 균일성을 나쁘게 한다. 따라서, 본 논문에서는 PDMS 몰드 제조시 발생하는 기포를 진공 환경에서 기포 제거 및 충

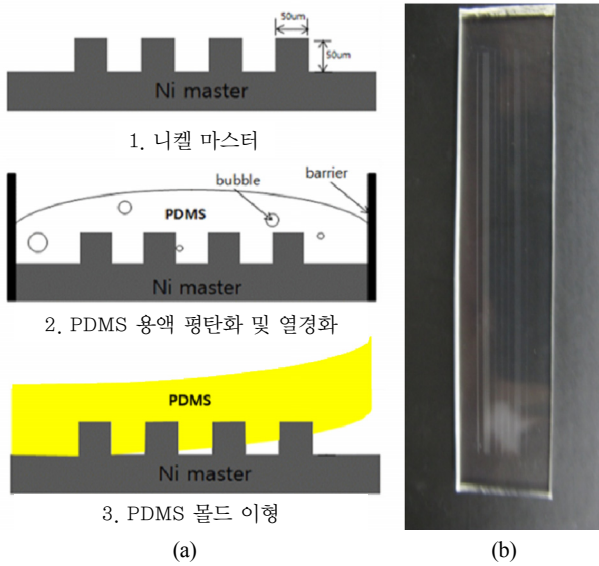


FIG. 4. (a) PDMS mold fabrication process, (b) PDMS mold.

진 효과를 향상시켜 정밀한 PDMS 몰드를 복제하였다. 그림 4(a)는 PDMS 몰드 제작과정을 나타내며 Ni 마스터에 PDMS 용액을 붓고 평탄화와 45 °C에서 3시간 열경화 및 상온 분리하여 그림 4 (b)와 같은 역상 복제된 PDMS 투명 탄성체 몰드를 제작하였다.

세 번째, 하부 클래드 제작을 위해 연성 기판 위에 클래드 레진(refractive index=1.506)을 드랍하고, spin coating에 의해 두께 25 µm의 under clad sheet를 제작하였다. 연성 기판으로는 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 필름을 사용하였으며, 이 기판은 연성 광도파로 제작 공정을 거친 후 제거된다. 50 µm × 50 µm 코어 사이즈를 가지는 연성 광도파로의 총 두께를 100 µm로 제작하기 위해 하부 클래드의 두께는 25 µm로 설정하였다.

네 번째, 45° 미러면 및 코어 패턴을 형성하는 단계에서는, under clad sheet 위에 PDMS 몰드를 이용한 UV-imprint 공정으로 45° 미러면과 코어 패턴을 동시에 형성 하였다. PDMS 몰드 위에 코어 레진(refractive index=1.547)을 도포하고, under clad sheet 위에 올려 놓은 후 압착한 상태에서 UV 경화를 통해 광도파로 코어 패턴 및 45° 미러 구조를 동시에 형성 하였다. UV 경화는 공기 중에서 발생하는 레진의 표면 미경화를 방지하기 위해 질소 분위기에서 수행하였다.

다섯 번째, 제작된 45° 미러면의 반사효율을 향상시키기 위해 Electron-beam evaporation을 이용하여 Au 박막을 증착 하였으며, 광도파로 미러면과 Au 박막의 접착력을 향상시키기 위해 Au 박막 증착의 선 공정으로, 미러면에 Ni 박막을 접착층으로 증착 하였다. 본 연구에서는 Ni 3 nm, Au 200 nm의 이중 박막 증착을 통해 우수한 미러 반사효율을 확보하였다.

마지막으로, 상부 클래드 제작 및 기판을 제거함으로써 미러 내장형 연성 광도파로를 완성 하였다. Over clad 제작시, spin coating 방법은 코어 패턴에 의해 상부 클래드가 불균일하게 형성 되기 쉽다. 따라서, 본 논문에서는 코어 패턴 주위

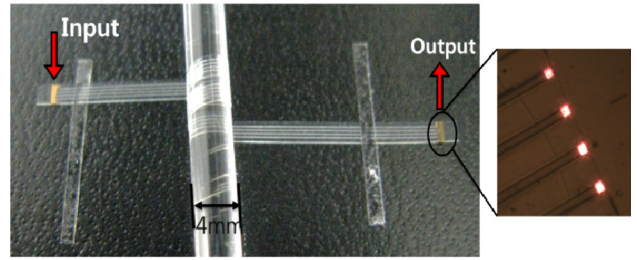


FIG. 5. Fabricated the flexible optical waveguide film.

에 외벽을 형성하고 클래드 레진을 드랍한 후, 평탄화 필름을 덮은 상태로 UV 경화를 수행하여 간단한 공정으로 균일한 두께의 over clad를 형성 하였다.

그림 5는 기판을 제거한 미러 내장형 연성 광도파로 사진이며, 총 두께 100 µm의 박막형 연성 필름 형태로 제작되었다. 제작된 연성 광도파로는 광도파로 표면으로 입사된 광이 내장된 미러를 통해 코어에 수직 결합되며, 굴곡구조를 통과하여 반대편 미러를 통해 표면으로 출력된다. 그림 5의 삽입된 사진은 직경 4 mm, 720° 굴곡구조를 통과하여 표면으로 출력된 출력광 패턴을 나타낸다.

UV-imprint에 의한 광도파로 제작시, under clad sheet, core, over clad가 순차적으로 경화되기 때문에 양 clad 사이의 경계면에서 분리되는 현상이 자주 발생한다. 이 현상은 도파손실을 비롯해 반복굴곡 또는 내열성 등에도 영향을 미치게 되어 광도파로의 신뢰성을 저하시키는 원인이 된다. 이를 보완하기 위해 각 계면에 O₂ 플라즈마 처리를 하여 표면 접착력을 향상시킴으로써 계면분리 현상을 해결하였다. 계면 분리 현상을 해결함으로써 연성 광도파로의 반복 굴곡에 대한 내구성이 개선되었으며, 낮은 도파손실이 확보되었다.

III. 연성 광도파로 특성 평가

제작된 연성 광도파로의 도파손실을 측정하기 위해 광도파로 끝단을 sawing하여 850 nm 파장의 광원 및 50 µm 멀티 모드파이버(multimode fiber, MMF)를 이용하여 삽입손실을 측정하였다. 제작된 광도파로는 cut-back 방식으로 길이에 따른 삽입손실을 비교한 결과 그림 6과 같이 단위 길이당 최저 도파 손실은 0.035 dB/cm로 측정되었다. 굴곡손실은 광도파로의 양 끝단을 50 µm MMF를 이용하여 pig-tailing 한 후, 180° 굴곡 조건에서 굴곡 반경을 달리하며 측정한 결과, 그림 7과 같이 굴곡 반경 1 mm 및 180° 굴곡 조건에서 0.77 dB의 굴곡 손실이 측정되었고, 반경 5 mm 이상의 굴곡에서는 손실 변화가 거의 없음을 확인 하였다. 또한, 45° 미러면에 Ni-Au 박막을 증착 한 후 내장형 미러의 반사손실을 측정하였다. 반사손실의 측정을 위해 양끝단이 수직으로 절단된 광도파로와 한 쪽 끝단에만 미러가 형성된 광도파로의 삽입손실을 비교하였으며, 측정 결과 2.18 dB의 반사손실을 나타내었다. 내장형 미러의 반사손실은 광도파로의 끝단을 V-sawing으로 제작된 미러의 반사손실 2.12 dB와 비교하여 유사한

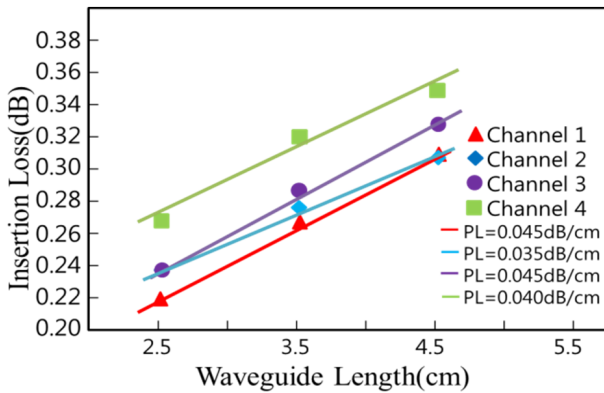


FIG. 6. Propagation loss of the flexible waveguide.

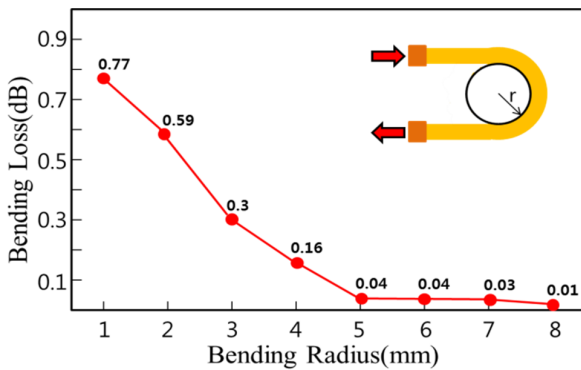


FIG. 7. Bending loss of the flexible waveguide.

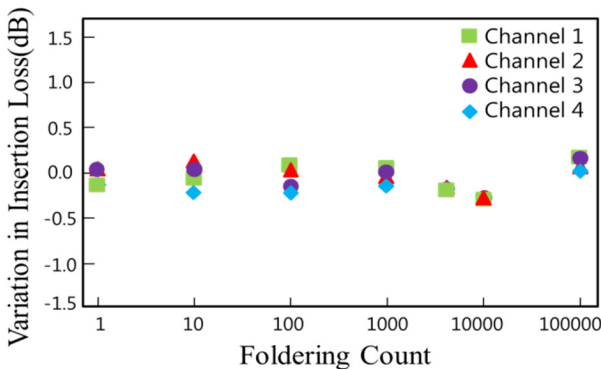


FIG. 8. Variation of an optical loss of flexible optical waveguide after folding test.

특성을 보였다.

다층 연성 광 PCB 내부에 적층을 위한 연성 광도파로는 고유연성을 필요로 하며 또한, 반복굴곡에 대한 내구성을 필요로 한다. 본 논문에서 제작된 연성 광도파로는 100 μm 두께의 박막형 필름 형태로 굴곡에 대하여 우수한 내구성을 가진다. 연성 광도파로의 반복 굴곡에 대한 내구성을 확인하기 위해, 길이 5 cm의 광도파로를 굴곡각도 135°, 굴곡반경 2.5 mm 지그에 장착하여 반복굴곡 실험 후 삽입손실의 변화를 측정하였다. 반복 굴곡 실험 결과 그림 8과 같이 광도파로의

삽입손실 변화는 ± 0.5 dB 이하로 10 만 회까지의 반복굴곡에 대한 내구성을 확인하였다.^[9]

IV. 결 론

본 논문에서는 근거리 광연결을 위한 미러 내장형 연성 광도파로를 박막형 필름 형태로 제작하고 광학적, 물리적 특성을 측정하였다. 제작된 45° 미러 내장형 연성 광도파로는 단위길이당 0.035 dB/cm의 도파손실, 반경 1 mm에서 0.77 dB의 굴곡손실, 2.18 dB의 반사손실 및 10만회 반복굴곡에 대한 내구성을 확인 하였다. 미러 내장형 연성 광도파로는 광도파로 코어 패턴과 45° 미러 구조를 동시에 형성시켜 공정수를 단축시키며, 광도파로 제작의 재현성을 향상시킨다. 또한, 미러 내장형 방식은 기존의 V-sawing등에 의한 광도파로 끝단에 미러를 형성시키는 방법과 비교하여 미러의 외부 노출에 의한 손상을 줄일 수 있으며, 광 PCB 내부에 적층이 용이하고 광 PCB 표면에 단차를 발생시키지 않아 부품 실장에 유리하다.

본 연구에서 개발된 미러 내장형 연성 광도파로는 낮은 도파손실, 고유연성, 물리적 내구성의 특징으로 연성 광 PCB에 적용성이 클 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천 기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. X. Wang, W. Jiang, L. Wang, H. Bi, and R. T. Chen, "Fully embedded board-level optical interconnects from waveguide fabrication to device integration," *J. Lightwave Technol.* **26**, 243-250 (2008).
2. C. Choi, L. Lin, Y. Liu, J. Choi, L. Wang, D. Haas, J. Magera, and R. T. Chen, "Flexible optical waveguide film fabrications and optoelectronic devices integration for fully embedded board-level optical interconnects," *J. Lightwave Technol.* **22**, 2168-2176 (2004).
3. A. L. Glebov, J. Roman, M. G. Lee, and K. Yokouchi, "Optical interconnect modules with fully integrated reflector mirrors," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 1540-1542 (2005).
4. S. H. Hwang, M. H. Cho, S.-K. Kang, T.-W. Lee, H. H. Park, and B. S. Rho, "Two-dimensional optical interconnection based on two-layered optical printed circuit board," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19**, 411-413 (2007).
5. W.-J. Lee, S. H. Hwang, J. W. Lim, and B. S. Rho, "Polymeric waveguide film with embedded mirror for multilayer optical circuits," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21**, 12-14 (2009).
6. M. Immonen, M. Karppinen, and J. K. Kivilahti, "Fabrication and characterization of polymer optical waveguides with

- integrated micromirrors for three-dimensional board-level optical interconnects,” *IEEE Transactions on Electron. Pack. Manufact.* **28**, 304-311 (2005).
7. M. Hikita, S. Tomaru K, Enbutsu, N. Ooba, R. Yoshimura, M. Usui, R. Yoshida, and S. Imamura, “Polymeric optical waveguide films for short-distance optical interconnection,” *IEEE Quantum. Electron.* **5**, 1237-1242 (1999).
 8. W.-J. Lee, J. W. Lim, S. H. Hwang, and B. S. Rho. “Imprint master fabricated by ultra precision machining for optical waveguide,” in *Proc. OECC 2008* (Sydney, Australia, 2008), pp. 1-2.
 9. B. S. Rho, W.-J. Lee, J. W. Lim, K. Y. Jung, K. S. Cha, and S. H. Hwang, “Fabrication and reliability of rigid-flexible optical electrical printed circuit board for mobile devices,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 964-966 (2008).