

## 유연 기판을 이용한 PLC소자 제작을 위한 롤투롤 공정 연구

강호주 · 김태훈 · 정명영<sup>†</sup>

부산대학교 인지메카트로닉스공학과

### PLC Devices Fabricated on Flexible Plastic Substrate by Roll-to-Roll Imprint Lithography

Ho Ju Kang, Taehoon Kim and Myung Yung Jeong<sup>†</sup>

Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

(Received August 31, 2015; Corrected October 10, 2015; Accepted December 24, 2015)

**초 록:** 저가격, 높은 생산성, 고해상도를 가지는 소자의 패턴 제작 방법에 대한 요구가 계속적으로 증가하고 있다. 롤투롤 연속생산 공정은 저비용, 대량생산이 가능한 차세대 공정으로 각광받고 있다. 본 논문에서는 PLC (planar lightwave circuit) 소자의 제작을 위해서 롤투롤 공정을 이용하여 제조하는 방법을 연구하였다. 제안한 기술은 polydimethylsiloxane (PDMS) 고분자를 이용하여 롤투롤 공정을 통해 PLC소자를 제작하는 공정을 연구하였다. 실리콘 웨이퍼에 형성된 마이크로 패턴을 복제 공정을 수행하였으며 이를 원통금형에 적용하여 롤투롤 공정의 롤 몰드(roll mold)로 사용하였다. 웹 텐션과 웹 속도의 공정 조건 최적화로 롤투롤 공정을 이용하여 PLC소자를 제작하였다. 제작된 PLC소자는 약4.0dB의 삽입 손실을 가지는 1 × 2 광분배기이며, 제안한 롤투롤 공정 기술을 이용한 PLC소자의 제작 공정이 대량연속생산에 유효함을 확인하였다.

**Abstract:** Demand for a low-cost, high-throughput, and high-resolution patterning method for fabricating devices continues to increase. The roll-to-roll (R2R) imprint lithography technique has received a great deal of attention as a means of fabricating next-generation devices. In this paper, we propose a fabrication method for polymeric planar lightwave circuit (PLC) devices that uses R2R imprint lithography. The proposed technique uses an elastomeric polydimethylsiloxane (PDMS) mold. A Si wafer with micro patterns is used as the Si master. The PDMS mold is then replicated from the Si master. By applying a precise web tension and at a given web speed, we fabricated a micro-patterned PLC device. The insertion losses were 4.0 dB for a 1 × 2 optical splitter. As such, the proposed method of fabricating a PLC device by the R2R process was shown to be an effective solution.

**Keywords:** Planar lightwave circuit, Polymeric roll mold, R2R process, Roll-to-Roll imprint lithography, Optical interconnection

## 1. 서 론

정보화 사회의 고도화에 따라 대량의 정보 전송량을 충족시키는 소자를 필요로 하고, 고집적화 및 광대역폭을 가지는 소자의 수요가 늘어나고 있다.<sup>1)</sup> Planar light wave circuit (PLC) 소자는 광통신 분야에서 낮은 전송 손실 및 초고속 데이터 전송의 제공이 가능하기 때문에 많은 연구들이 진행되었다.<sup>1,2)</sup> 기존의 PLC 소자 제작 공정 중에서 실리카 소재를 사용한 PLC 소자의 제작 공정은 반도체 공정과 유사한 방법으로 공정이 복잡하고 장시간이 소

요되어 생산성의 한계를 지니고 있다. 이러한 한계성을 극복하고자 폴리머 소재를 이용한 PLC 소자의 연구가 활발히 진행되었으며, 다양한 연구를 통한 발전으로 기존 실리카 소재의 PLC 소자와 동일한 성능구현이 가능한 연구 결과들이 발표되어, 실리카 소재의 PLC 소자의 대체가 가능해졌다.<sup>2,3)</sup> 고분자 PLC 소자는 실리카 소재의 PLC 소자에 비해 공정 단가의 저가격화가 가능하여 생산성에 많은 장점이 있다.<sup>1,4)</sup> 고분자 소재를 이용한 PLC 소자는 간단한 성형 공정을 통해서 제작이 가능한 장점이 있기 때문에 대량생산 및 저가격화가 가능하다. 또한 연속생

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: myjeong@pusan.ac.kr

© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

산 공정인 롤투를 임프린트 공정을 통해서 제작이 가능하다.<sup>4,5)</sup>

연속 생산 공정인 롤투를 공정은 유연기판에 롤 몰드(roll mold)를 이용하여 연속성을 가지는 성형이 이루어진다. 이러한 대량생산이 가능한 연속 생산 공정은 다양한 응용분야에서 패턴 성형 공정에 적용되어 연구되고 있으며, 대면적 패턴 소자 제작 기술은 생산성 향상을 가능하게 하므로 관련 기술에 대한 관심이 매우 증대되고 있다.<sup>6-8)</sup>

이러한 롤투를 공정은 우수한 원가 경쟁력을 가지고 있으며 고속 대량생산이 가능함으로 디스플레이, 센서, RFID, 컴퓨터 메모리 등의 산업 분야에서 빠르게 적용되어 연구가 진행되고 있다. 그러나 현재의 롤투를 공정으로 광학적인 특성과 기능을 가지는 PLC 소자의 제작을 위해서는 인쇄 패턴의 정밀도가 높아야 하고 균일해야 한다. 롤투를 공정을 이용하여 제작되는 패턴의 특성이 기능적인 성질에 큰 영향을 미치기 때문에 중요한 이슈라 할 수 있으며, 이러한 패턴에 영향을 미치는 공정 변수들이 주요한 논점의 대상이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 롤투를 임프린트 리소그래피 방법을 이용하여 패턴에 영향을 미치는 인자인 웹 속도(web speed)와 웹 텐션(web tension)에 대한 분석을 통해 높은 정밀도를 가지는 광학소자를 제조하는 방법을 제시하고 광학소자의 특성 측정을 통해 성능을 확인하였다.

## 2. 일체형 광소자 패키징 구조

롤투를 임프린트 공정을 통한 PLC 소자 패턴을 제작하기 위하여 PLC 소자의 구조를 설계하였다. 설계된 PLC 소자는 광 분배기로써 1채널의 입력부에서 들어온 광신호가 2채널의 출력부로 분리되는 구조이다. 광소자 도파로의 크기는  $6 \times 6 \mu\text{m}$ 으로 설정하였다. Table 1에서 보여지듯이 UV-경화 레진의 굴절률을 설정하였으며, 균일한 광학적 특성을 가지도록 설계를 하였다. 설계된 광 분배기는 입력값이 1일 때 출력단의 1채널과 2채널에서 0.49로 출력되는 것을 확인하였다.

롤투를 임프린트 공정에 중요한 요소인 롤 몰드의 경우 나노 임프린트 리소그래피 공정에서 흔히 사용되는 스탬프의 재질 중 하나인 PDMS를 사용하였다.<sup>6-9)</sup> PDMS의

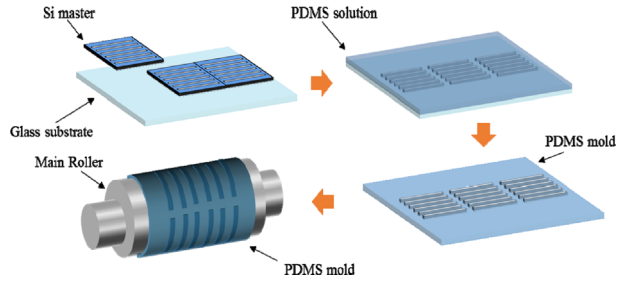


Fig. 1. Schematic diagram of roll mold fabrication.

경우 유연한 재료로써 대면적 기판에 대한 균일한 접촉을 수행하기에 적합하며, 복제 공정을 통해 손쉽게 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

PLC 소자 패턴을 가지는 롤 몰드의 제작은 마스터 제작 단계, 마스터를 복제하는 몰드 제작 단계를 거친다. 마스터 제작을 위해서 Si wafer에 스펀코팅 공정을 이용하여 포토레지스트를 도포한 이후 포토리소그래피 공정을 이용하여 원하는 패턴을 형성시켰다. 패턴된 Si 웨이퍼의 제작에 사용된 PR (photoresist)은 SU-8 (Microchem Co., Su-8)로 Negative PR 이며, PLC 소자 제작을 위해 Su-8를 이용하여 스펀 코팅 공정 및 노광 공정을 진행 하였다.

제작된 패턴을 RIE를 이용한 식각공정으로 음각 패턴을 가지는 Si 스탬프를 제작하였다. Fig. 1에서와 같이 평판형 Si 스탬프를 PDMS (Dow Corning Co., Sylgard 184)를 이용하여 복제를 통해 제작을 하였다. 우선 원통 롤 몰드의 크기에 맞추어서 가로 300 mm, 세로 480 mm의 유리 기판을 제작하였다. 유리 기판위에 제작된 Si 스탬프를 정렬하고, 그 위에 precursor와 curing agent를 10:1의 비율로 배합한 PDMS solution를 도포하였으며, 80°C의 온도에서 60분 동안 열경화를 통해서 대면적의 PDMS몰드를 제작하였다. 제작된 PDMS 몰드를 원통 금형에 감아 패턴이 형성된 롤 몰드를 제작하였다. 기존의 금속 재료를 사용한 롤 몰드의 경우 높은 공정 비용과 제작기간을 가지고 있으나, Si 스탬프를 이용한 Soft 몰드 복제 공정을 통해서 기존의 롤 몰드의 대체가 가능하다. 또한 롤 몰드로 직접 사용하는 경우 금형의 손상시에 추가적인 공정 비용과 시간을 필요로 한다. 그렇기 때문에 제작된 Si 스탬프를 이용하여 PDMS 몰드를 제작하여 사용함으로써 지속적인 사용이 가능하면서, 공정 단계와 공정 비용을 줄이는 것이 가능하였다.

PLC 소자 제작을 위한 롤투를 임프린트 공정은 Fig. 2.에서 보여지듯이 폴리머 재료의 균일한 도포를 위한 디스펜싱 시스템, 자외선 장치 및 롤 몰드 등으로 구성된다. 롤투를 공정에 사용한 유연 필름은 PET위에 PMMA층이 코팅되어 있는 필름을 사용하였다. PLC 소자의 클래드층 물질은 굴절률 1.4856(@830 nm)을 가지는 UV 경화 레진 (Chem Optics Co., WIR30-480)을 사용하였다. 코어층 물질은 굴절률이 1.4968(@830 nm)인 UV 경화 레진 (Chem Optics Co., WIR30-500)을 사용하였다. 클래드 물

Table 1. Design characteristics for optical PLC device

Design factor	Specification
Core	1.4915
Clad	1.4804
Wave length	1550nm
Input power	1
Output power	0.49 (Ch1)
	0.49 (Ch2)

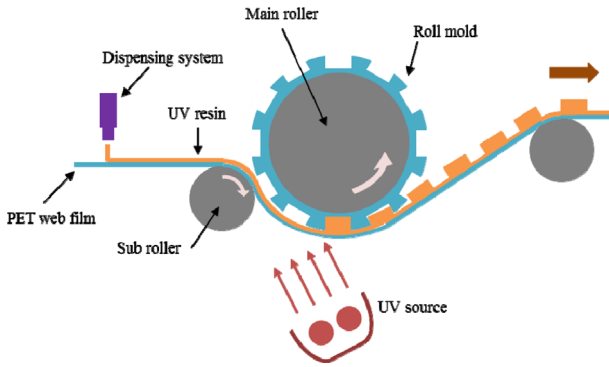
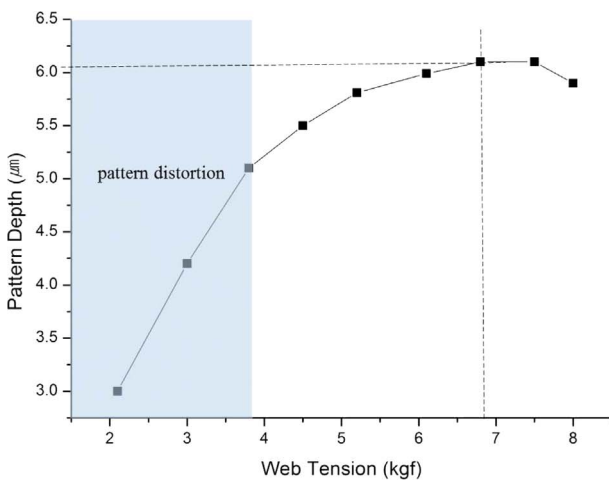


Fig. 2. Schematic diagram of roll to roll imprint lithography.

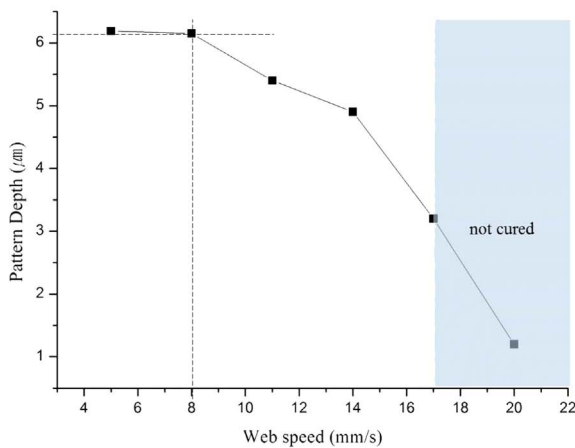
질을 디스펜싱 시스템을 이용하여 유연 기판에 균일하게 도포하였으며, 롤투롤 UV-임프린트 공정을 통해서 클래드 패턴을 유연 기판위에 제작하였다

### 3. 롤투롤 기반 광소자 패키징

롤투롤 임프린트 공정을 통한 PLC 소자의 제작은 롤투



(a)



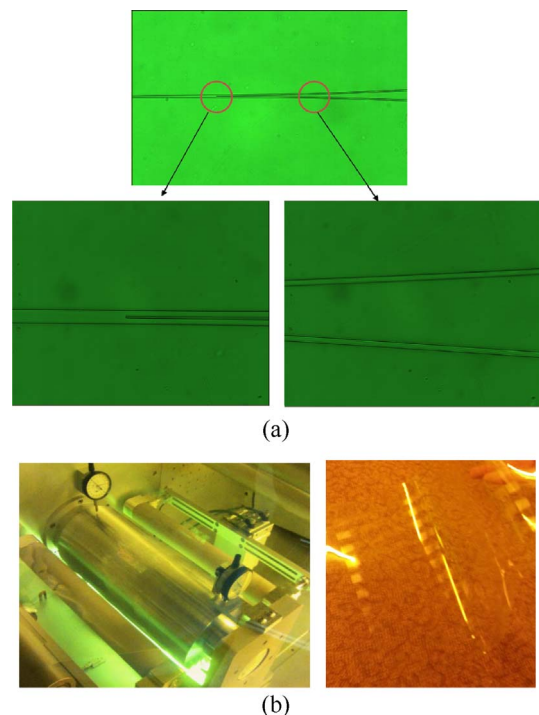
(b)

Fig. 3. Roll imprinted pattern depth according to (a) the web tension and (b) web speed.

롤 임프린트 공정 이후 패턴의 깊이(depth) 성형에 초점을 두고 연구하였다. 롤투롤 임프린트 공정은 성형속도 및 가압구간이 짧아 선평에 비해 깊이의 결함 발생이 높다.<sup>11-13)</sup> 따라서 제안된 PLC 구조는 UV 롤투롤 임프린트 공정으로 깊이의 성형 정밀도에 직접적인 변수인 웹 텐션, 웹 속도에 따른 특성을 확인하였다. 진행된 실험은 하나의 변수를 변경하고 다른 변수는 고정하여 공정특성을 확인 하였다. Fig. 3은 공정변수인 웹 텐션, 웹 속도에 따른 깊이 성형 특성을 보여주며, PLC 소자가 정밀하게 성형이 이루어지는 공정 조건을 확인 하였다.

Fig. 3(a)는 롤투롤 임프린트 공정 에서의 웹 텐션에 대한 성형 특성을 보여준다. 깊이가 만족하는 성형 조건은 6.8 kgf이며, 웹 텐션이 성형조건 이상일 때 필름 위의 롤 몰드의 과다 접촉으로 인한 고분자 레진의 overfull 현상으로 성형 깊이가 감소하는 특성이 보였다. Fig. 3(b)는 웹 속도에 따른 PLC 소자 성형 특성을 보여준다. 웹 속도가 높으며, 필름 기판 위의 고분자 레진과 롤 몰드와의 짧은 성형 시간으로 인하여 미충진 현상이 발생하며, 이러한 미충진 현상은 성형 패턴의 깊이 특성에 영향을 준다. 따라서 PLC 소자 구조의 성형 깊이가 감소 되는 직전의 속도인 8 mm/s의 속도를 공정 조건으로 선택하였다. 롤투롤의 웹 속도의 감소는 패턴의 성형의 정밀도를 향상시키지만 공정시간의 단축에 문제가 있어 깊이의 성형 특성을 고려하여 가장 높은 웹 속도 구간을 선정하였다.

Fig. 4은 롤투롤 임프린트의 최적 공정 조건을 고려하여 6.8 kgf의 웹 텐션, 8 mm/s 웹 속도를 통해 제작된 PLC 소자 패턴을 나타내고 있다. 성형된 PLC소자 패턴은 6.12



(a)

(b)

Fig. 4. Results of roll-to-roll imprint lithography process: (a) fabricated pattern and (b) roll mold.

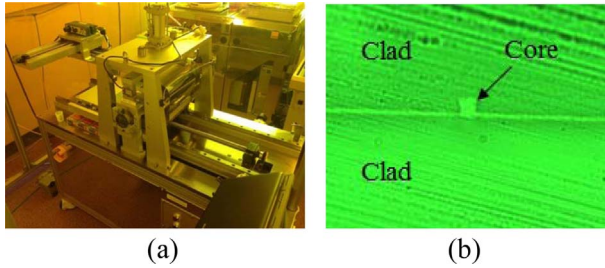


Fig. 5. Roll lamination system and cross-sectional image of PLC device.

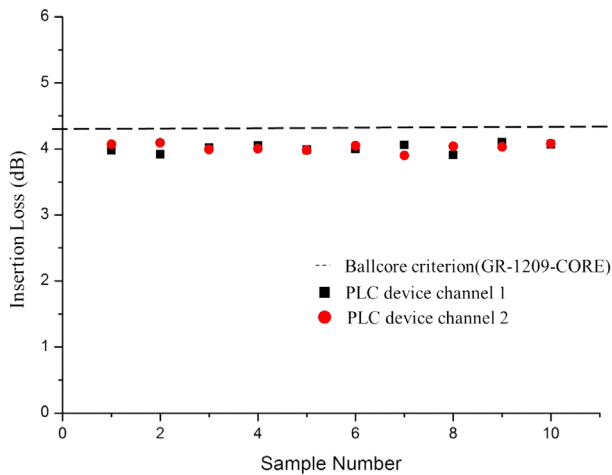


Fig. 6. Optical performance and insertion loss of fabricated optical PLC device.

$\mu\text{m}$ 의 넓이를 가짐을 확인하였다.

롤투롤 공정을 통해 제작된 패턴을 하부 클래드(clad) 층으로 사용하였다. PLC 제작된 하부 클래드에 코어(core) 레진을 도포하고 Fig. 5에서와 같이 롤 라미네이션 공정을 통해 UV 경화를 수행하여 코어층 패턴을 형성하였다. 마지막으로 상부 클래드층을 제작함으로써 PLC 소자를 완성 하였다.

제작된 PLC 광학소자의 광학특성을 평가하기 위해 일반적으로 광통신에서 사용하는 1550 nm 파장대의 광원을 사용하여 입력부에 연결하고, 파워미터를 출력부에 연결하여 삽입손실(insertion loss)과 균일성(optical uniformity)을 측정하였다.

Fig. 6는 제안한 PLC 소자의 광학적 특성인 삽입손실을 나타내었다. 제안한 공정을 통해 제작된 PLC 소자의 광학적 특성을 측정한 결과, 삽입손실은 약 4.0dB이며, 광분배기의 ch1과 ch2의 균일성은 0.2dB 이하로 측정되었다.  $1 \times 2$  광분배기 소자의 삽입손실과 균일성은 Bellcore criterion (GR-1209-CORE)의 기준인 4.2dB의 삽입손실과 0.6dB의 균일성을 충족시켜야 한다. 제안된 공정을 통해 제작된 PLC 구조는 Bellcore criterion의 기준을 충족시키는 것을 확인 하였다. 롤투롤 임프린트 공정의 성형 특성과 공정 조건을 확인하였으며, 이를 통해 제작된 PLC 소자의 광학적 특성이 우수함을 확인하였다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 폴리머 기반의 PLC 소자를 롤투롤 공정에 의해 제작이 가능하도록 공정인자의 조건을 검토하였으며, 제작된 PLC 소자의 광학적 특성을 평가 하였다. 포토리소그래피 공정을 이용하여 패턴된 Si 스탬프를 제작하고, 이를 이용하여 대면적 배열 복제 공정을 통해서 PDMS 몰드를 제작하였다. 간단한 공정을 이용하여 균일한 롤 몰드의 제작이 가능하며 이를 통해서 금형 제작 시간, 비용등의 감소가 가능하도록 공정을 수행하였다.

롤투롤 공정의 공정조건으로 웹 텐션과 웹 속도를 선정하여 연구를 수행하였으며, 웹 텐션 조건이 6.8 kgf이고, 웹 속도가 8 mm/s 일 때 원하는 패턴이 형성되는 성형 조건임을 보였다. 성형 특성은 PLC 소자의 패턴을 기준으로  $6.12 \mu\text{m}$ 의 넓이를 보였다.

제작된 PLC 소자의 광학적 특성은 삽입손실은 3.9dB~4.1dB이며, 광 분배기의 ch1과 ch2의 균일성은 0.2dB 이하로 측정되어 Bellcore criterion의 기준에 만족하는 광학적 특성을 보였다. 본 연구에서 제안한 방법인 롤투롤 공정을 이용한 PLC 소자의 제작은 저비용으로 대량생산이 가능하며, 우수한 광학적 특성의 구현이 가능하기 때문에 네트워크 분야 뿐만 아니라 향후 디스플레이, 자동차 등의 패턴을 이용한 기능성 유연 필름을 필요로 하는 분야에 있어서 저비용, 대량생산의 유효한 방법이 될 것으로 판단한다.

## Acknowledgments

본 연구는 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

## References

1. J. Ryu, B. Lee, K.-H. Baek, L.-M. Do, J. Park, S.-U. Cho and M. Jeong, "Fabrication of low-loss optical interconnected waveguide using a replicated seamless large-area polymeric mold", Journal of the Korean Physical Society, 65, 450 (2014).
2. J. H. Ryu, P. J. Kim, C. S. Cho, E.-H. Lee, C.-S. Kim and M. Y. Jeong, "Optical interconnection for a polymeric plc device using simple positional alignment", Opt. Express., 19, 8571 (2011).
3. W. Ni, X. Wu and J. Wu, "Layer-to-layer optical interconnect coupling by soft-lithographic stamping", Opt. Express 17, 1194 (2009).
4. X. Dou, X. Wang, H. Huang, X. Lin, D. Ding, D. Z. Pan and R. T. Chen, "Polymeric waveguides with embedded micro-mirrors formed by metallic hard mold", Opt. Express, 18, 378 (2010).
5. S. Uhlig, L. Frohlich, M. Chen, N. Arndt-Staufenbiel, G. Lang, H. Schroder, R. Houbertz, M. Popall and M. Robertsson, "Polymer optical interconnects; a scalable large-area panel processing approach", Advanced Packaging, IEEE

- Transactions on 29, 158 (2006).
6. D. M. Kim, J. H. Ryu and M. Y. Jeong, "Optical packaging and interconnection technology", J. Microelectron. Packag. Soc., 19, 13 (2012).
  7. T. Ishigure and Y. Nitta, "Polymer optical waveguide with multiple graded-index cores for on-board interconnects fabricated using soft-lithography", Opt. Express 18, 14191 (2010).
  8. S. Hwang, W.-J. Lee, M. Kim, E. Jung and B. Rho, "Design and analysis of a low loss and large-tolerance optical interface for large-area optical waveguides", Optical and Quantum Electronics, 44, 189 (2012).
  9. H. C. Andrew and P. K. William, "Casting metal microstructures from a flexible and reusable mold", J. Micromech. Microengineering, 19, 095016 (2009).
  10. S. H. Oh, S. U. Cho, C. S. Kim, Y. G. Han, C.-S. Cho and M. Y. Jeong, "Fabrication of nickel stamp with improved sidewall roughness for optical devices", Microelectronic Engineering, 88, 2900 (2011).
  11. L. Woo-Jin, H. Sung Hwan, L. Jung Woon and R. Byung Sup, "Polymeric waveguide film with embedded mirror for multi-layer optical circuits", Photonics Technology Letters, IEEE 21, 12 (2009).
  12. J. H. Kim, T. H. Lee, D. M. Kim and M. Y. Jeong, "A study on the design and fabrication of pluggable lens for optical pcb interconnection", J. Microelectron. Packag. Soc., 21, 25 (2014).
  13. Y. Martz and D. Knittel, "Robust control in industrial roll-to-roll systems: New approaches using finite element modeling of the web", Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on, pp. 464 (2015).