

포토리소그래피를 통한 광통신용 실리콘 렌즈 제작 및 특성 연구

박준성^{1,2} · 이대장¹ · 노호균¹ · 김성근¹ · 허재영¹ · 류상완¹ · 강성주^{2,†} · 하준석^{1,2,†}

¹전남대학교 광전자융합기술연구소, ²전남대학교 화학공학부

Research on Fabrication of Silicon Lens for Optical Communication by Photolithography Process

Junseong Park^{1,2}, Daejang Lee¹, Hokyun Rho¹, Sunggeun Kim¹, Jaeyeong Heo¹,
Sangwan Ryu¹, Sung-Ju Kang^{2,†}, and Jun-Seok Ha^{1,2,†}

¹Optoelectronics Convergence Research Center, Chonnam National University, 77 Yong-bong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

²School of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yong-bong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

(Received June 13, 2018: Corrected June 19, 2018: Accepted June 27, 2018)

초 록: 광결합 효율(Fiber coupling efficiency)을 개선하기 위해서는 Laser diode에서 넓은 각도로 방출된 빛을 광섬유의 중심(Core) 부분으로 모아주는 집광렌즈(Collimating lens)가 필수적이다. 현재 사용되는 집광렌즈는 형틀(Mold)을 이용한 글래스 몰드(Glass mold) 공법이 널리 사용되고 있다. 이 방식은 생산단가가 저렴하지만, 정교한 성형이 어렵고 구면수차와 같은 품질문제가 있다. 본 연구는 기존의 글래스 몰드 공법을 반도체 공정으로 대체함으로써 표면 가공의 정밀도를 높이고, 렌즈의 재질 또한 반도체 공정에 적합한 실리콘으로 변경하였다. 반도체공정은 PR을 이용한 포토리소그래피(Photolithography) 공정과 플라즈마를 이용한 건식 식각(Dry etching) 공정으로 구성된다. 광결합 효율은 실리콘 렌즈의 광학적 특성을 평가하기 위해 초정밀 정렬 시스템을 사용하여 측정되었다. 그 결과, 렌즈 직경 220 μm 일 때의 최대 광결합 효율은 50%로 측정되었고, 렌즈 직경 210-240 μm 범위에서는 최고 광결합 효율 대비 5% 이하의 광결합 특성저하를 보여줌을 확인하였다.

Abstract: In order to improve the coupling efficiency, a collimator lens that collects the light emitted from the laser diode at a wide angle to the core of the optical fiber is essential. Glass mold method using a mold is widely used as a collimator lens currently used. Although this method is inexpensive to produce, it is difficult to form precisely and quality problems such as spherical aberration. In this study, the precision of surface processing was improved by replacing the existing glass mold method with the semiconductor process, and the material of the lens was changed to silicon suitable for the semiconductor process. The semiconductor process consists of a photolithography process using PR and a dry etching process using plasma. The optical coupling efficiency was measured using an ultra-precision alignment system for the evaluation of the optical characteristics of the silicon lens. As a result, the optical coupling efficiency was 50% when the lens diameter was 220 μm , and the optical coupling property was 5% or less with respect to the maximum optical coupling efficiency in the lens diameter range of 210-240 μm .

Keywords: Silicon Lens, Aspherical Lens, Optical Coupling Efficiency, Reflow, Photolithography, Dry Etching

1. 서 론

최근 5G 기술 기반의 대용량 모바일 서비스의 수요가 증가하였다. 이로 인해 데이터 트래픽이 급증하였고 100기가급 이상의 초고속 네트워크의 고도화가 필수적으로 요구되고 있다.^{1,2)} 현재 사용하고 있는 장거리 통신 네트워크 중 레이저 다이오드(Laser Diode, LD)와 단일모드

광섬유(Single Mode Fiber, SMF)간의 광결합 시스템이 주로 사용된다.³⁻¹¹⁾ 이 시스템에서 가장 중요한 요소는 광결합 효율(coupling efficiency)과 광정렬 오차 허용도(misalignment tolerance)이다. 레이저 다이오드와 단일모드 광섬유를 직접 붙여 결합한 버트 커플링(butt coupling)으로는 높은 광결합 효율을 기대하기 어렵다.¹²⁾ 따라서 LD와 SMF 사이에 광결합 효율을 증대시키는 광학 요소가 필요하며, 현재

[†]Corresponding author

E-mail: jsha@jnu.ac.kr, sjkang@chonnam.ac.kr

© 2018, 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.

시스템에선 콜리메이터 렌즈(Collimator lens)를 이용한 광결합 시스템이 대부분을 차지하고 있다. 이러한 콜리메이터 렌즈로는 볼렌즈(Ball lens)와 GRIN(Gradient index)렌즈¹⁰⁾, 비구면 렌즈(Aspheric lens)등이 이용될 수 있으며, 생산이 용이한 볼렌즈와 높은 결합 효율을 이끌어 낼 수 있는 GRIN 렌즈가 많이 이용되고 있다.¹³⁾ 비구면 렌즈의 경우 일반 콜리메이터 렌즈와 다르게 구면수차로 인한 손실이 없다. 그 결과 다른 콜리메이터 렌즈는 구면수차를 작게 하기 위해 몇 개의 렌즈를 조합해야 하지만, 비구면 렌즈는 구면수차가 없기 때문에 1개의 렌즈로도 광결합 시스템을 제작할 수 있다.¹⁴⁾ 이러한 이유로 제품의 소형화와 경량화가 가능하다. 하지만 그 복잡한 형상으로 인하여 기존의 렌즈처럼 연마하여 제작하는 것이 매우 어렵다. 그래서 연마법이 아닌, 금형에 유리 등의 재료를 넣고 찍어내는 방법인 글래스몰드 공법을 이용한다.¹⁵⁾ 이러한 제작공정은 실리카의 연화를 위해 매우 높은 온도가 요구되는데, 고온은 금형의 열화 및 냉각시간으로 인한 공정시간의 증가 등의 문제를 야기한다. 이와 같은 문제로 비구면 렌즈는 콜리메이터 렌즈로 많이 이용되지 못하고 있는 실정이다. 하지만 이러한 문제점을 해결한다면 우수한 성능을 가진 콜리메이터 렌즈로 이용될 수 있다. 또한 실리카 렌즈는 상대적으로 낮은 굴절률로 인해 초점거리를 좁힐 수가 어렵기 때문에 소형화와 경량화가 어렵다.¹⁶⁾ 따라서 이를 대체하기 위한 새로운 재료의 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 기존의 실리카를 이용한 글래스몰드 공법이 아닌, 실리콘을 이용한 반도체 공정법으로 비구면 렌즈를 제작하였다. 포토리소그래피 공정과 리플로우 공정을 이용하여 돔의 형태를 형성하고 플라즈마로 표면을 식각하여 실리콘 렌즈를 구현하였다. 제작된 실리콘 렌즈의 광학적 특성평가를 위해 초정밀 정렬장치를 사용하여 광결합 효율을 측정하였다.

2. 실험 방법

500 μm 두께의 (100)면의 실리콘 웨이퍼 기판 위에 PR(Photoresist) AZ-P4620(AZ electronic materials)을 도포하고, 스펀코터(Spin coater)를 이용하여 1400 RPM으로 1분간 회전시킨다(Fig. 1(1)). 그리고 100°C의 핫플레이트에서 3분동안 소프트베이킹(Soft baking)을 진행했다. 그 후, 원형 패턴을 마스크로 사용하여 420 mJ의 UV 에너지로 샘플을 노광했다(Fig. 1(2)). 현상용액으로는 AZ 300 MIF(AZ electronic materials)을 이용하여 5분동안 현상하였다(Fig. 1(3)). 다음으로 160°C의 핫플레이트에서 30분동안 리플로우(Reflow) 공정을 진행하여 기본적인 돔의 형태를 구축했다(Fig. 1(4)). ICP-RIE(Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching)(VSICP, 12RC) 장비를 이용하여 반응가스 CF_4 , O_2 로 건식 식각을 진행했다(Fig. 1(5)). CF_4 는 주로 실리콘 식각에 영향을 주고, O_2 는 주로 PR 식

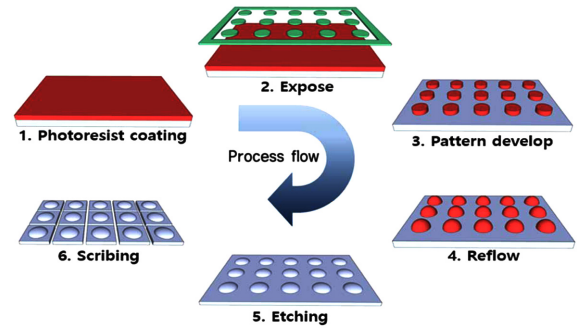


Fig. 1. Silicon lens process diagram.

각에 영향을 준다.¹⁷⁾ 반응가스인 CF_4 , O_2 의 유량조절하고 RF Power인 Platen power는 100 W, Coil power는 500 W로 고정하고 실험을 진행했다. 조절한 가스량은 먼저 CF_4 15 sccm, O_2 3 sccm, 다음으로 CF_4 15 sccm, O_2 1 sccm 마지막으로 CF_4 30 sccm, O_2 2 sccm이다. 식각시간은 각각 40분, 1시간 그리고 30분이다. 식각시간이 다른 이유는 가스량이 증가할수록 식각속도가 증가하기 때문이다. Coil power는 플라즈마를 생성하는 역할을 하고 Platen power는 생성된 플라즈마를 기판쪽으로 끌어당겨서 식각이 더욱 원활히 이루어지게 하는 역할을 한다. 마지막으로 측정을 위해 식각된 실리콘 렌즈를 일정한 크기로 스크라이빙(Scribing)을 진행했다(Fig. 1(6)). 먼저 제작된 실리콘 렌즈의 형상을 확인하기 위해 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)(Oxford, JSM-7500F)를 이용하여 렌즈의 표면을 관찰했다. 그리고 비접촉 3차원 미세형상측정기(Nanosurface 3D Optical Profiler, Nanosystem)를 이용하여 렌즈 각 위치에 따른 높이를 측정했다. 또한 광결합 효율의 중요한 요소인 표면의 모폴로지(Morphology)를 측정하기 위해 AFM(Atomic Force Microscope) (Parksystem, XE-150)을 이용하여 표면 거칠기(Root Mean Square, RMS)와 표면 이미지를 측정하였다. 실리콘 렌즈의 광학적 특성평가를 위해 렌즈의 초점거리를 측정하였고, 이와 함께 실리콘 렌즈를 이용한 반도체 레이저와 광섬유의 광결합 특성을 조사하였다. 실리콘 렌즈의 광학분석을 위해서는 Fig. 4(a)와 같이 초정밀 정렬장치를 사용하였다. 정렬장치는 두 개의 6축 스테이지(Thorlabs, resolution < 50 nm)와 반도체 레이저 및 콜리메이터 등의 광원장치, 광섬유, 광검출기로 구성되었다. 통상적으로 광통신에 이용되는 마이크로 광학계는 광학부품의 위치뿐만 아니라 각도에도 크게 민감하므로, x, y, z축 방향의 선형이동과 θ_x , θ_y , θ_z 방향의 각도 조절이 가능한 6축 스테이지의 사용이 필수적이다. 먼저 초점거리를 측정하기 위해 그립퍼(gripper)로 렌즈를 고정시킨 후 상부 6축 스테이지에 장착하였다. 평행광을 렌즈로 입사시키기 위해 1310 nm의 반도체 레이저가 결합된 fiber optic collimator를 렌즈의 왼쪽에서 정렬하였다. 실리콘 렌즈를 통과한 빛은 초점거리에서 가장 작은 beam waist를 형성하게 되는데, 단일 모드광섬유(mode field diameter = 9.2 μm)를 탐침(probe)으

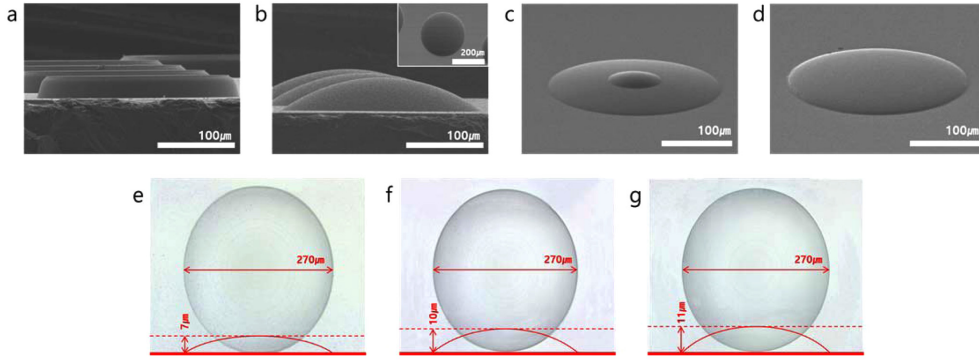


Fig. 2. SEM images of (a) before PR reflow, (b) after PR reflow, (c) during plasma etching, (d) silicon lens after plasma etching. (e-g) 3D Optical Profiler image of Silicon lens height 7, 10 and 11 μm .

로 사용하여 렌즈와의 거리에 따른 빔의 크기를 조사하였다. 빔의 크기가 최소가 되는 지점을 거리측정기로 관측하여 초점거리를 결정하였다. Fig. 4(b)는 위의 방법으로 구성된 초점거리 측정을 위한 광학부품 배열을 보여준다. 실리콘 렌즈의 광결합 특성은 10 Gbps급 1310 nm 반도체 레이저를 광원으로 하여 렌즈 사용에 따른 단일 모드광섬유(SMF-28, Corning)와의 광결합 효율을 평가하였다. 반도체 레이저로는 distributed feedback laser를 사용하였고, 30 mA의 전류 인가 조건에서 광출력은 8.4 dBm이다. 측정을 위해 렌즈 정렬장치를 커플링 효율을 측정할 수 있도록 셋업 하였다. 렌즈 삽입 후에 레이저에서 방출된 빛이 단일모드광섬유에 최대로 입사될 수 있도록 렌즈가 장착된 상부 스테이지와 광섬유가 장착된 우측 스테이지를 각각 정렬시켰다. 효율적인 광결합을 위해서는 레이저와 렌즈 거리(L1), 렌즈와 광섬유 거리(L2)가 핵심적인 요소이므로, L1-L2 조합을 변경하면서 나머지 정렬요소를 최적화하며 가장 높은 광결합 효율을 조사하였다.

3. 결 과

Fig. 2(a-b)은 PR의 리플로우 공정이다. PR이 비가교형태의 positive photoresist일 때, 일정 온도 이상의 고온에서 유동성을 가지며 표면적을 작게 하려는 특성을 가지고 있다. 따라서 PR이 원기둥 형태에서 돔 형태로 변형이 일어난다.¹⁸⁻¹⁹⁾ 이 때, 리플로우 공정 시 가해주는 온도가 PR의 유리전이온도보다 낮을 경우 리플로우 현상은 일어나지 않게 되고, 반대로 PR의 분해온도보다 높은 온도가 가해졌을 경우 Burning 현상이 발생한다. 따라서 리플로우가 원활히 일어날 수 있는 최적의 온도와 시간을 찾는 것이 중요하고 본 실험에서는 선행실험을 토대로 핫플레이트에서 최적의 리플로우 조건으로 30분간 160°C의 온도를 가해주었다. 리플로우 공정 이후 PR이 돔의 형태로 형성된 것을 확인하였다. 이후, ICP-RIE을 이용하여 식각을 진행하면 PR이 마스크 역할을 하여 돔 형태의 실리콘 렌즈가 제작되는 것을 확인할 수 있고, Fig. 2(b-d)에 나타내었다. Fig. 2(e-g)은 동일 직경 270 μm 의 원형 패턴

PR에서 가스유량을 조절하여 식각을 진행한 후, 비접촉 3차원 미세형상측정기(Nanosurface 3D Optical Profiler, Nanosystem)을 이용하여 실리콘 렌즈의 형상을 측정하였다. 가스량은 먼저 CF₄ 15 sccm, O₂ 3 sccm이고, 식각시간은 40분으로 진행했을 때 실리콘 렌즈의 높이는 7 μm 로 측정되었다. 다음으로 CF₄ 15 sccm, O₂ 1 sccm이고, 식각시간은 1시간으로 진행했을 때 실리콘 렌즈의 높이는 10 μm 로 측정되었으며, 마지막으로 CF₄ 30 sccm, O₂ 2 sccm이고, 식각시간은 30분으로 진행했을 때는 실리콘 렌즈의 높이는 11 μm 로 측정되었다. 가스유량을 조절하여 실리콘 렌즈의 높이를 조절하는 이유는 PR의 두께에는 한계가 있기 때문이다. 그래서 식각 공정에서 식각 선택비를 조절하여 실리콘 렌즈의 높이를 조절하는 방법을 선택했다. 식 (1) Lens conic section equation에 의하면 동일 직경에서 렌즈의 높이가 증가할수록, 곡률반경이 감소하게 된다. 곡률반경이 감소하면, 이론적 계산에 따라 광결합 효율이 증가한다.

11 μm 높이의 실리콘 렌즈의 표면 거칠기를 확인하기 위해 AFM(Atomic Force Microscope)을 이용하였다. 렌즈 중앙부분의 20 \times 20 μm^2 의 면적의 표면의 거칠기를 측정하였고, Fig. 3(a)에 나타내었다. 제작된 실리콘 렌즈 표면의 RMS는 1.296 nm로 우수한 표면 거칠기 값을 보여주었다. 이와 같은 우수한 표면 거칠기는 광결합 효율에 큰 영향을 미친다. 만약 렌즈의 표면 거칠기가 높다면, 표면에서의 광 산란으로 인한 손실이 매우 커지게 된다. 따라서 렌즈 표면을 매끈하게 가공하는 것이 광결합 효율을 높이는 데 큰 역할을 할 수 있다. 포토리소그래피를 이용한 제작 공정이 보다 우수한 표면 거칠기 값을 보이는 이유는 그 제작 방법으로 설명될 수 있다. 글래스몰드의 경우, 몰드에 열과 압력을 가하여 렌즈를 제작하기 때문에 몰드의 표면에 손상이 가해지게 된다. 또한, 몰드의 반복 사용으로 인한 피로손상 역시 함께 일어날 수 있다. 반면 포토리소그래피 공법은 PR의 표면장력을 이용한 리플로우 공정법으로 렌즈를 제작하기 때문에 마치 물방울의 표면처럼 매우 매끄러운 렌즈를 가공하는 것이 가능하다. 하지만 리플로우 공정조건에서 시간이 부족하거나 가해

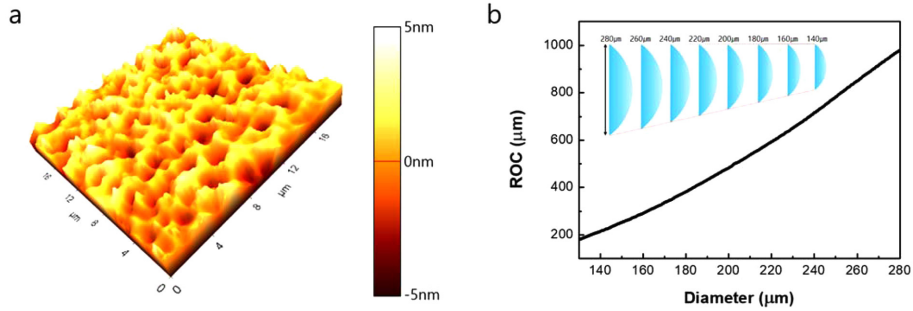


Fig. 3. (a) AFM image and (b) ROC graph of silicon lens height 11 μm.

주는 온도가 낮을 경우, 리플로우 현상이 일어나지 않거나 PR의 표면과 내부의 경화정도가 달라지게 된다. 그 결과, 식각이 진행될 때 부분적으로 식각의 정도가 달라지게 되면서 표면 거칠기 값이 증가한다. 또한 시간이 과하거나, 가해주는 온도가 높을 경우, PR의 Burning 현상이 발생한다. 이로 인해 표면 거칠기 값이 증가한다. 따라서 최적화된 리플로우 조건이 중요하다.

우수한 표면거칠기 값을 확보하여 11 μm 높이의 실리콘 렌즈를 130-280 μm 범위의 다양한 직경으로 제작하였다. 먼저 직경과 높이를 이용하여 아래의 식 (1) Lens conic section equation에 의해 곡률반경을 구할 수 있다.

$$(1 - \epsilon^2)x^2 - 2Rx + y^2 = 0 \tag{1}$$

이 식에서 R은 곡률반경, $-\epsilon^2(=K)$ 은 코닉상수, x는 직경, y는 높이를 의미한다.²⁰⁾

Fig. 3(b)은 11 μm 렌즈 높이에서 130-280 μm 범위의 다

양한 직경에 따른 곡률반경을 계산하여 그래프로 나타냈다. 동일 렌즈 높이일 때, 렌즈의 직경이 작아질수록 곡률반경도 작아진다는 것을 확인할 수 있다.

렌즈 직경에 따른 실리콘 렌즈의 초점거리 측정결과를 Fig. 4(c)에 나타내었다. Fig. 3에서 분석한 바와 같이 렌즈 직경이 증가하면 렌즈 곡면의 곡률반경이 증가하게 된다. 따라서 곡률반경의 증가로 렌즈 직경에 따른 초점거리의 증가를 설명할 수 있다. 렌즈 직경이 210-260 μm 범위에서 변화할 때 초점거리는 75 μm에서 162 μm로 증가함을 확인하였다. 한편 Fig. 4(d)는 실리콘 렌즈를 사용한 반도체 레이저와 단일모드 광섬유의 최대 광결합 효율을 보여주는데, 렌즈 직경이 220 μm일 때 최대값 50%를 갖는다.

본 실험 조건에서 렌즈 직경이 감소할수록 렌즈의 초점거리가 감소하므로, 이론적 계산에 의하면 가장 작은 직경에서 더 높은 광결합 효율을 보여야 한다. 그러나 초점거리가 짧아질수록 장치의 광결합 정렬 허용도가 작아

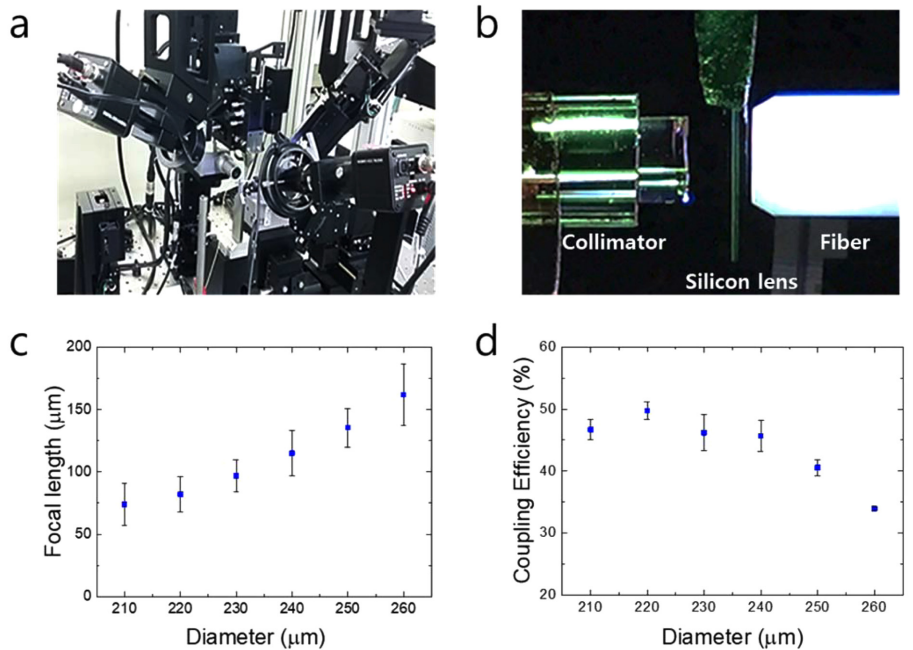


Fig. 4. (a) Optical characterization setup of silicon lens, (b) optical component alignment image for focal length measurement. (c) Focal Length of silicon lens by lens diameter, (d) optical coupling efficiency of Semiconductor laser and single mode optical fiber by lens diameter.

진다. 즉, 일정 허용도 이하에서는 이론적인 광결합 효율보다 실제 광결합 효율이 더 낮아지는 현상이 발생한다. 그래서 이론적인 경향과는 달리 초점거리가 너무 짧으면 장치의 광결합 정렬 허용도의 한계로 인해 실제 광결합 효율이 낮아지는 것으로 판단된다. 렌즈 직경이 증가함에 따라 광결합 효율은 점차적으로 감소하지만, 렌즈 직경 210-240 μm 범위에서는 최고 광결합 효율 대비 5% 이하의 광결합 특성저하를 보여줌을 알 수 있다. 즉, 실리콘 렌즈의 제작공정에서 렌즈 직경 및 곡률반경의 허용공정오차가 상당히 크며, 따라서 높은 공정수율의 확보가 가능할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유리 재료를 이용한 글래스몰드 공법의 렌즈 제작방법의 문제점을 해결하고자 반도체 공정 방식의 렌즈 제작방법을 연구하였다. 또한 유리 재료의 상대적으로 낮은 굴절률의 문제 등으로 재료 또한 실리콘으로 대체하였다. 포토리소그래피 공정에서 PR 리플로우를 통해 비구면 렌즈의 형태를 제작하였고, 건식식각 공정을 통해 제작된 렌즈의 높이는 7 μm , 8 μm 그리고 11 μm 였다. 이 중에서 가장 우수한 곡률반경을 가진 11 μm 높이의 렌즈 표면을 AFM으로 확인하였고, 표면 거칠기 값은 1.296 nm였다. 또한 다양한 직경의 렌즈를 11 μm 의 높이로 제작함으로써 다양한 곡률반경을 가진 렌즈를 제작할 수 있었다. 특히, 렌즈 직경이 220 μm 일 때 최대 50%의 광결합 효율을 보여주었고, 렌즈 직경 210-240 μm 범위에서 최고 광결합 효율 대비 5% 이하의 광결합 특성저하를 확인하였다. 이와 같은 결과는 5G 기술과 같은 초고속 광통신 기술에 적용되어 그 특성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음[2015-0-00771, 100기가급 초소형 광모듈 상용화 기술개발].

References

1. J. J. Lee, J. Y. Huh, S. K. Kang, J. K. Lee, J. C. Lee, and D. S. Lee, "Market and Technology Trends in 100Gb/s Optical Transceiver", *Elec. Tele. Trends.*, 30, 65 (2015).
2. D. M. Kim, T. K. Lee, T. H. Lee, and M. Y. Jeong, "Design for High-Efficient Passive Optical PCB Interconnection by Using Built-in Lens Structure", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(2), 47 (2012).
3. J. Minowa, M. Saruwatari, and N. Suzuki, "Optical Componentry Utilized in Field Trial of Single-Mode Fiber Long-Haul Transmission", *IEEE*, 30, 551 (1982).
4. L. G. Cohen, and M. V. Schneider, "Microlenses for Coupling Junction Lasers to Optical Fibers", *Appl. Opt.*, 13, 89 (1974).
5. E. Weidel, "Light Coupling from a Junction Laser into a Monomode Fibre e with a Glass Cylindrical Lens on the Fibre End", *Opt. Commun.*, 12, 93 (1974).
6. H. Kuwahara, M. Sasaki, and N. Tokoyo, "Efficient Coupling from Semiconductor Lasers into Single-Mode Fibers with Tapered Hemispherical Ends", *Appl. Opt.*, 19, 2578 (1980).
7. J. Sakai, and T. Kimura, "Design of a Miniature Lens for Semiconductor Laser to Single-Mode Fiber Coupling", *IEEE J. Quantum Electron*, QE-16, 1059 (1980).
8. J. Yamada, Y. Murakami, J. Sakai, and T. Kimura, "Characteristics of a Hemispherical Microlens for Coupling Between a Semiconductor Laser and Single-Mode Fiber", *IEEE J. Quantum Electron*. QE-16, 1067 (1980).
9. H. Sakaguchi, N. Seki, and S. Yamamoto, "High Efficiency Coupling from Laser Diodes into Single-Mode Fibers with Quadrangular Pyramid-Shaped Hemielliptical Ends", *Optical Society of America*, paper TUL1 (1981).
10. G. Eisenstein, and D. Vitello, "Chemically Etched Conical Microlenses for Coupling Single-Mode Lasers into Single-Mode Fibers", *Appl. Opt.*, 21, 3470 (1982).
11. G. D. Khoe, J. Poulissen, and H. M. de Vrieze, "Efficient Coupling of Laser Diodes to Tapered Monomode Fibers with High Index End", *Electron. Lett.*, 19, 205 (1983).
12. S.K. Kim and M.K. Song, "Optical coupling coefficients and packaging of optical transmitter module for optical subscriber", *Opt. Soc.*, 11, 179 (2000).
13. M. Saruwatari, and K. Nawata, "Semiconductor laser to single-mode fiber coupler", *Appl. Opt.*, 18, 1847 (1979).
14. S. B. Kang, C. K. Hwangbo, E. K. Kang, J. S. Kim, and S. D. Kang, "Analysis of the performance of the aspheric lens collimator", *J-Kics*, 2006, 725 (2006).
15. S. Yin, H. Jia, G. Zhang, F. Chen, and K. Zhu, "Review of small aspheric glass lens molding technologies", *Front. Mech. Eng.*, 12, 66 (2017).
16. I. Y. Hwang, J. S. Ha, and S. W. Ryu, "Design of a Silicon Fresnel Lens for Optimized Light Coupling in a Transmitter Optical Subassembly", *K. J. Met. Mater.*, 55, 813 (2017).
17. M. Quirk, and J. Serda, "Semiconductor manufacturing technology", NJ: Prentice hall, (2001).
18. F. T. O'Neill, and John T. Sheridan, "Photoresist reflow method of microlens production Part I: Background and experiments", *Optik*, 113(9), 391 (2002).
19. S. H. Kim, S. K. Hong, K. H. Lee, and Y. H. Cho, "Shape Error and Its Compensation in the Fabrication of Microlens Array Using Photoresist Thermal Reflow Method", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(2), 23 (2013).
20. G. I. Kweon, and C.H. Kim, "Aspherical lens design by using a numerical analysis", *Phy. Soc.*, 51, 93 (2007).