

이차전지로 구동하기 위한 다른 발진 특성을 나타내는 조명용 광양자테 소자 개발

김경보¹, 이종필², 김무진^{3*}

¹인하공업전문대학 금속재료과 교수, ²중원대학교 전기전자공학과 교수,
³강남대학교 IoT전자공학과 교수

Development of Photonic Quantum Ring Device with Different Oscillation Characteristics for Driving with Secondary Battery

Kyoung-Bo Kim¹, Jongpil Lee², Moojin Kim^{3*}

¹Professor, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Inha Technical College

²Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering, Jungwon University

³Professor, Department of IoT Electronic Engineering, Kangnam University

요 약 최근 조명 산업이 중요한 분야로 인식되면서 PQR (Photonic Quantum Ring) 소자는 LED(Light Emitting Diode)를 대체할 수 있는 차세대 광원이 될 전망이다. 본 연구에서는 기존 연구와 유사한 결과를 검증하고, 소자의 광특성을 분석하기 위해 광섬유가 연결된 스테이지에 x, y, z 좌표를 입력하면 자동으로 이동하며, 또한, 소자에 광섬유를 근접시키는 NSOM (Near field scanning optical microscopy) 장치를 추가한 측정 시스템을 이용하여 소자의 광특성 실험과 공진 및 어레이 소자의 광특성 시뮬레이션을 통해 조명용 소자로 가능성을 검증하고자 하였다. 이를 위해 메사와 홀 형태가 동시에 존재하는 메사 직경 40 μ m, 홀 직경 3 μ m의 소자를 제작하여 소자의 근접장으로 PQR 소자는 μ A에서 동작하며, 메사와 홀 소자는 서로 독립적으로 구동됨을 관찰하였다. 위치에 따른 소자의 광파장 스펙트럼을 측정하여 메사와 홀 소자에 의한 커플링 현상을 처음으로 확인하였다.

주제어 : 광양자테, 메사와 홀 형태, 광학 스펙트럼, 근접장

Abstract We studies to verify results similar to those of previous experiments, and their potential as a lighting device through optical characteristics experiments and resonance and optical characteristics simulations of array devices. The photonic quantum ring (PQR) device having a mesa diameter of 40 μ m and an internal hole diameter of 3 μ m was fabricated. Through the near-field observation of the fabricated device, it was found that the PQR device operates even at μ A, and also that the mesa and hole devices are driven independently of each other. As a result of measuring the wavelength spectrum of the device according to the location, the coupling phenomenon due to mesa and holes was confirmed.

Key Words : Photonic quantum ring, Mesa and hole shapes, Optical spectrum, Near field

*This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2021R1F1A1046135). * MSIT : Ministry of Science and ICT

*Corresponding Author : Moojin Kim(moojinkim7@kangnam.ac.kr)

Received September 8, 2021

Revised October 5, 2021

Accepted November 20, 2021

Published November 28, 2021

1. 서론

1.1 광양자테 레이저(PQR: Photonic quantum ring) 소개

전력 소모가 작고 다양한 색깔의 빛을 발광시킬 수 있기 때문에 현재 조명용 소자로는 LED(Light emitting diode)가 대표적이며, 백열전구를 대체한 형광등을 대체하고 있는 상황이다. LED는 반도체 물질의 밴드갭(Bandgap)에 따라 방출되는 빛의 파장이 다르며, 아래의 식 1처럼 표현된다[1].

$$\lambda = 1.24/E_G \quad (1)$$

λ 는 빛의 파장을 나타내며, E_G 는 반도체 물질의 bandgap을 의미한다. 하지만, 이러한 광전자소자도 문턱 전압(Threshold voltage)이상의 수 V의 전압을 인가하면 mA급의 전류가 흐르게 되며, 이러한 현상으로 인해 반도체 물질에서 전도대의 전자와 가전자대의 정공이 결합하게 되어 빛이 발생하게 된다.

본 연구진은 과거 광양자테 레이저(PQR: Photonic quantum ring)이라는 광전자 소자를 연구를 진행하였다 [2-9]. 하지만, 당시 PQR 소자를 제작하기 위해서는 MBE(Molecular beam epitaxy)나 MOCVD(Metal organic chemical vapor deposition) 장비를 이용하여 nm 두께의 활성층(QW: Quantum well) 및 n-DBR(Distributed Bragg reflector), p-DBR이 증착되어야 하기 때문에 이러한 막들을 증착하기도 어렵고, 증착된 웨이퍼는 상당히 비싼 가격으로 구입이 가능하였다. 또한, 이러한 웨이퍼에 반도체 제조공정 기술을 이용하여 소자를 제작해야 하므로 소자의 제조 비용이 높다. 하지만, 반도체 기반 기술이 발전함에 따라 사이즈가 큰 웨이퍼에 증착이 가능해졌고, 또한 매우 정확하게 원하는 두께의 막을 보다 빠른 속도로 형성할 수 있고, 무엇보다 웨이퍼의 가격이 저렴하다.

이러한 이유로 광양자테 연구를 다시 시작하게 되었고, 또한, 최근 LED 보급이 증가함에 따라 광양자테 소자가 발광 다이오드를 대체할 가능성이 높아졌다. PQR은 활성층 안에서는 Ray-leigh band내에서 자연 발생하는 quantum wire 특성과 위·아래에 위치한 DBR에 의해 공진 조건이 형성되는 3차원 공진기이기 때문에 μ A 정도의 공급 전류에서 발광하고, 뿐만 아니라 온도에 대한 안정성이 매우 뛰어나다. 일반적으로 온도가 높아지

면 밴드갭이 감소하기 때문에 식 1에서와 같이 장파장으로 이동하는 현상이 나타난다. 하지만, PQR은 60도 이상의 고온에서 온도가 증가해도 발진 파장의 변화가 거의 없다.

1.2 기존 연구 내용 및 후속 연구 필요성

원형 메사 구조의 광양자테가 연구되고, 온도 및 각도에 따른 다파장 발진이 관찰된 후 타원형, 삼각형 등 다양한 형태의 PQR 소자가 제작되어 연구되었다. 이후 이러한 소자들의 고집적화를 통해 멀리까지 빛이 나아가는 현상을 이용하여 지능형 교통시스템이나 개별 소자가 구동되도록 하여 디스플레이로의 적용가능성을 조사하였다. 또한, flip chip 기술을 이용하여 광통신으로의 특성을 검토하였다. 건식 식각으로 메사를 형성하는 방법을 대신하여 용액을 이용한 습식 식각 공정으로 제작하는 기술도 개발하였다 [10]. 뿐만 아니라, 메사와 반대인 hole 형태의 소자도 제작하여 전기적, 광특성에 대한 데이터를 확보하였다 [2-9].

광자 방출을 높이기 위하여 가운데 부분에 hole이 형성된 소자에 대해 공정을 단순화하여 제작된 소자를 살펴보고자 한다. 그 이유는 동일한 구조에 메사와 홀 소자가 동시에 구현되기 때문에 방출되는 광자수가 증가하여 효율적인 조명 구현이 가능하기 때문이다. 또한, 기존 연구에서는 제대로 다루지 않은 서로 다른 소자가 독립적으로 동작하는 것을 근접장 분석과 파장스펙트럼 측정을 통해서 증명하여 차세대 조명 소자로서의 가능성을 보여준다. 또한, 이러한 소자의 시뮬레이션에 대한 연구도 수행하였다. 연구진은 스틸 기판 한 면에 이차전지를 구현하는 연구를 하고 있으며, 다른 면에는 광양자테 소자를 구현하여 이차전지를 광양자테 전력으로 사용하는 융합을 통한 미래 조명 소자로서의 가능성을 위해서 보다 많은 실험을 진행하고 있다. 이를 통해 데이터를 축적함으로써 현재 조명용 시장을 지배하고 있는 중국산 LED를 우리나라가 특허와 원천 기술을 보유하고 있는 광양자테 소자로 대체하여 조명 산업 발전에 기여하고자 한다.

2. 본론

2.1 실험 방법

포토 마스크 제작에 시간이 소요되기 때문에 그림 1과 같은 형태를 전문 소프트웨어를 이용하여 그린 다음 외

부에 의뢰하여 포토 리소그래피(Photolithography) 공정을 위한 마스크를 제작한다.

다음 n^+ -GaAs 웨이퍼 상에 MBE 장비를 이용하여 71nm 두께의 n^+ -AlAs와 62nm 두께의 n^+ -Al_{0.29}Ga_{0.71}As를 반복적으로 성장시킨 24층의 n-DBR을 형성하고, 이후 9nm GaAs 층이 8nm Al_{0.29}Ga_{0.71}As이 반복적으로 3층이 성장되었다. 또한, p-DBR을 형성시키기 위하여 71nm 두께의 p^+ -AlAs와 62nm 두께의 p^+ -Al_{0.29}Ga_{0.71}As를 반복적으로 성장시킨 25층을 구현하면 광양자테 소자를 제작하기 위한 웨이퍼 구조가 완성된다.

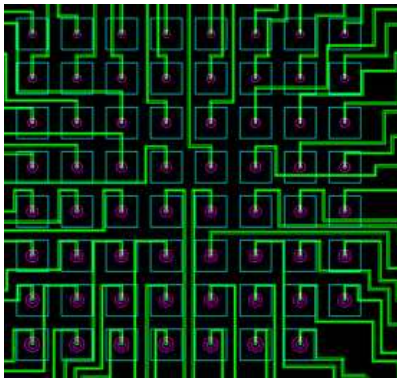


Fig. 1. Photolithography mask image for fabrication of photonic quantum ring devices.

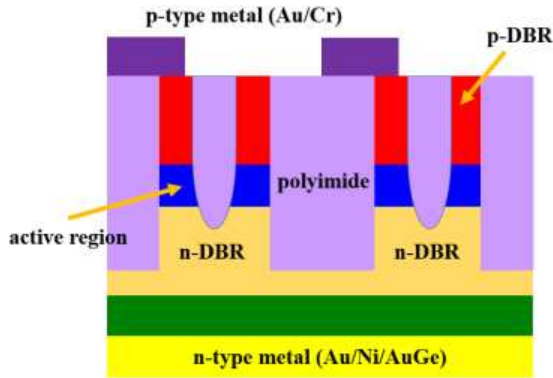


Fig. 2. Cross-sectional diagram of PQR devices.

PQR 소자는 먼저 상기에 설명한 웨이퍼의 표면에 존재하는 유기물을 제거하기 위하여 기존의 용액 공정 대신에 건식 방법인 산소 상압플라즈마로 표면 처리를 진행하여 시간을 단축하였다. 공정 조건은 100W 파워에서 30초간 처리한다. PR(Photo resist)을 식각을 위한 마스크로 사용하기 위하여 photo 작업을 수행하면 웨이퍼 표면에는 원형 모양에 가운데가 작은 원형으로 PR이 제

거된 높이가 약 2 μ m인 형상이 구현된다. 이후 CAIBE (Chemically assisted ion beam etching) 장비를 이용하여 에칭하면 메사 안쪽이 원형으로 식각된 모양을 나타내는 구조가 완성된다. 건식 공정 조건은 아르곤 (Ar), Cl₂, BCl₃을 각각 5sccm, 2sccm, 3sccm 공급하고 기판을 25도 기울인 상태에서 20분간 진행한다. 기존의 아세톤과 asher 장비대신 산소 상압플라즈마 장비를 이용하여 식각 마스크로 사용된 PR을 완전히 제거하고 표면 평탄화를 위해 polyimide를 스핀 코팅 기술로 형성한 후 물질에 남아있는 solvent를 제거할 목적으로 1시간 30분 동안 열처리(Annealing)한다. 이후 메사 표면을 노출하고자 산소 플라즈마를 이용한 RIE(Reactive ion etching) 공법을 수행한다. 웨이퍼 뒷면에 n형 메탈을 thermal evaporator로 AuGe, 니켈(Ni), 금(Au)을 순서대로 증착시킨다. 다음 lift-off 공정으로 p형 메탈인 크롬(Cr)과 금을 메사 위에 형성하면 그림 2와 같이 광전자 소자는 완성된다. 사이즈는 메사 직경 40 μ m, 내부 hole의 직경 3 μ m이다. 전기 및 광특성을 측정하기 위해 scribing된 소자들은 package에 은(Ag) 페이스트를 이용하여 고정시키고 wire bonder로 p형 전극을 패키지에 연결한다.

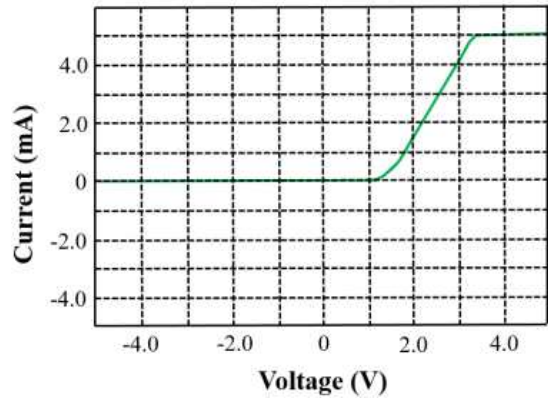


Fig. 3. Current properties for voltage of fabricated PQR devices.

완성된 소자가 다이오드 특성을 나타내는지 확인하기 위해 probe station 장비를 이용하여 전압에 따른 전류를 측정 결과를 그림 3에 보였다. 역방향에서는 전류가 거의 흐르지 않으며, 순방향에서 0V 근처에서는 전류가 흐르지 않다가 전압이 약 1.4V까지 증가하면 전류가 지수함수적으로 급격하게 증가하는 현상을 나타낸다. 이때 1.2V를 turn-on 전압 또는 문턱 전압(Threshold voltage)이라고 부르며, 광양자테 소자는 다이오드로 동작함을 알 수 있다. 이와 같이 구동 전압이 낮기 때문에

이차전지를 기반으로 한 파워시스템으로 전력을 공급할 수 있다.

2.2 광양자테 소자 측정을 위한 광섬유 (Optical fiber) 제조

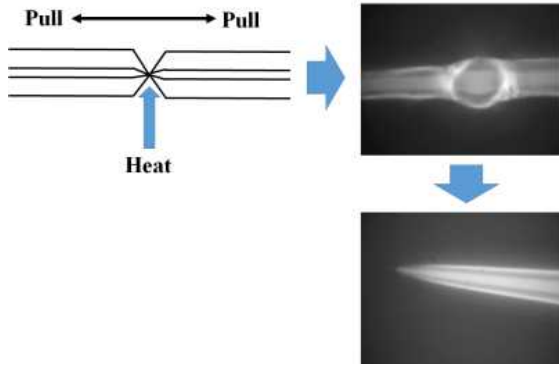


Fig. 4. Optical fiber image manufactured by heat and pull methods.

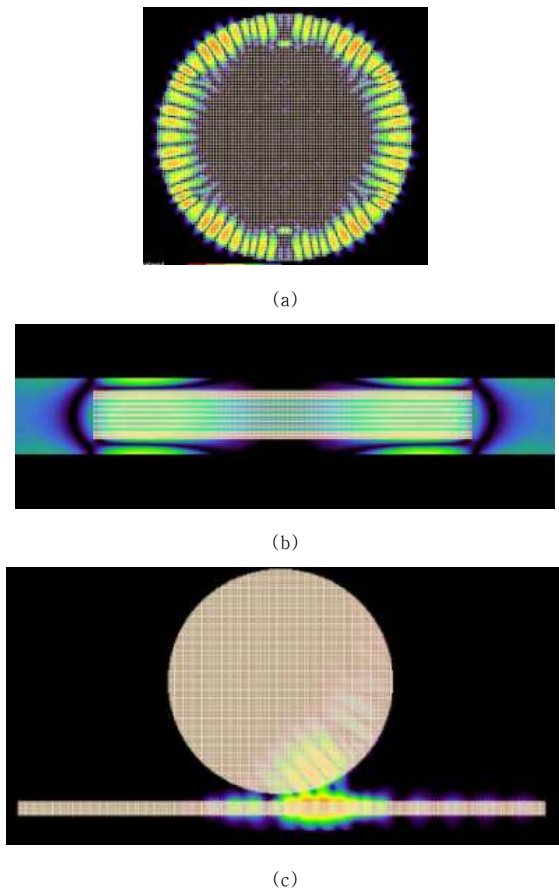


Fig. 5. FDTD simulation results of a QW structure in which InGaAs and InGaAsP are repeated with 6 layers, electric field distribution in (a) top view and (b) cross section of a microdisk. (d) Coupling of the resonant wave in the microdisk with an external waveguide.

PQR 다이오드의 광특성을 측정하기 위해서 사용되는 MMF(Multi-mode fiber)는 125 μm /50 μm 로 제작된 소자보다 직경이 크기 때문에 열을 가하는 heat-pull 방법을 적용하여 그림 4처럼 광섬유의 끝부분을 5 μm 이하로 만든다. 그 이유는 소자에 전류를 인가하면 내경과 외경에서 빛을 발진하기 때문에 각각의 소자에서 발생하는 파장 스펙트럼을 독립적으로 관찰할 수 있도록 하기 위함이다.

2.3 서로 다른 광양자테 소자의 근접장 (Near field) 분석

광양자테 레이저는 2차원 평면으로는 마이크로디스크 레이저처럼 빛을 발진하는 형태로 InGaAs와 InGaAsP로 이루어진 원형의 마이크로디스크 내부의 FDTD(Finite differential time domain)를 이용한 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다. 공진조건이 만족되는 field가 5(a)에서와 같이 디스크 가장자리에 나타나며, 이러한 공진조건을 만족하는 공진파(Resonant wave)들은 2차원적인 형태로 그림 5(b)와 같이 외부로 방출된다. 또한, 5(c)에서 보여주는 것처럼 소자 내에서 발생한 빛을 waveguide를 이용하여 커플링(Coupling)하면 원하는 곳까지 보낼 수 있다. 이러한 파들은 마이크로디스크의 크기와 반도체 물질에 의해 구현된다.

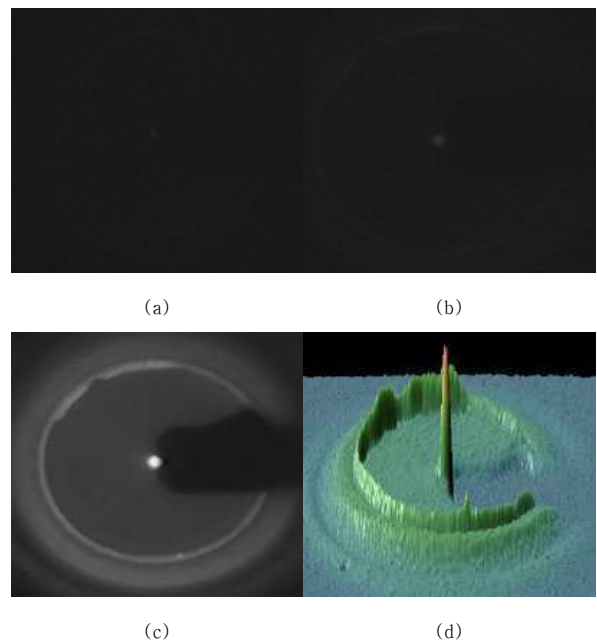


Fig. 6. Near-field image of the device when (a) 15 μA , (b) 30 μA , (c) 120 μA current was applied to a device with a mesa diameter of 40 μm and an internal hole diameter of 3 μm . (d) 3D image of the intensity of light energy when 120 μA current is supplied as in (c).

반면, 광양자테 레이저는 2차원 마이크로디스크 구조 위·아래 형성된 DBR에 의해 3차원 발진 특성을 나타낸다. 이와 같은 현상을 관찰하기 위해 먼저 제작된 소자의 근접장을 분석하고자 한다.

CCD 이미지 관찰을 위해 내경과 외경의 차이가 큰 메사 직경 40 μm , 내부의 hole의 직경 3 μm 소자를 선택하였다. 그림 6(a)는 15 μA 의 전류를 인가하였을 때의 near field로 가운데 3 μm hole에 의한 빛을 관찰할 수 있으며, 30 μA 에서는 45 μm 메사의 에지에서도 공진하는 파가 검출된다 (그림 6(b)). 120 μA 가 주입되는 그림 6(c)에서는 가장자리에서 보다 명확한 2차원 링이 확인되며 가운데는 매우 선명하다. 추가적으로, 6(d)는 6(c)에처럼 120 μA 전류를 공급했을 때 광에너지 세기를 3D로 형상화한 것으로 3 μm hole에서 강한 빛이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 메사와 hole 소자는 서로 독립적으로 동작하는 것을 증명한다. 이러한 광파들은 메사 외부로는 evanescent로 나아간 후 propagation 특성을 나타내며, 각도에 따른 다과장이 관찰된다 [11-14].

주입 전류를 매우 감소시켰을 때의 현상을 조사하기 위하여 0.8 μA 와 0.4 μA 에서의 광에너지 3D 형상을 그림 7에 나타내었다.

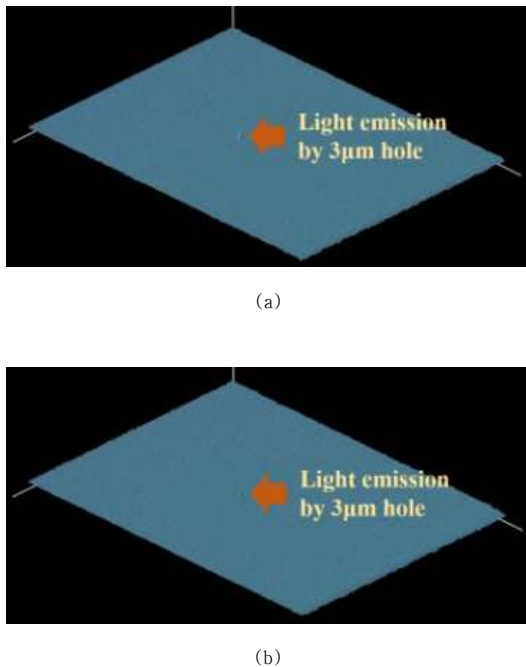


Fig. 7. 3D images of light energy intensity when (a) 0.8 μA and (b) 0.4 μA currents were injected.

이와 같이 주입 전류가 sub- μA 정도로 작을 때는 방출되는 빛의 세기가 매우 작기 때문에 CCD에서는 검출할 수 없었으며, 예상되는 것처럼 문턱전류 값이 낮은 가

운데 영역에서 미약한 빛이 나타나는 것을 알 수 있다.

2.4 서로 다른 광양자테 소자의 스펙트럼 분석

이번 섹션에서는 제작된 소자에서 메사와 홀에서 발진하는 각각의 파장들과 이 두 소자 가운데에서의 스펙트럼에 대해 다루어보고자 한다.

과장에 따른 빛의 세기를 측정하기 위해 8(a)는 가장자리 메사 소자, 8(b)는 메사와 hole 소자의 가운데, 8(c)는 hole PQR에서의 광섬유 위치를 보여준다.

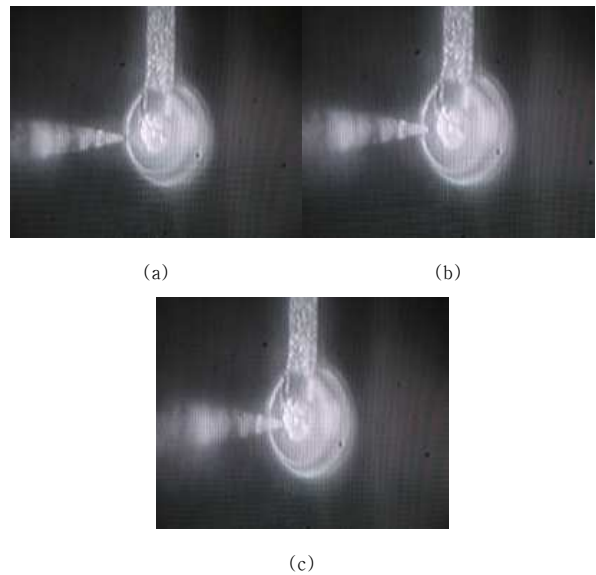


Fig. 8. CCD image showing the optical fiber position to measure (a) mesa device, (b) coupling of mesa and hole device, and (c) hole PQR.

또한, 광양자테와 VCSEL 소자가 동시에 측정되기 때문에 현미경을 이용하여 optical fiber를 소자의 수직 방향에서 각도를 기울여 접근시킨다. 과거에는 x, y, z 방향으로 움직이는 micro stage를 이용하여 수동으로 움직였지만, 최근에는 좌표를 입력하면 원하는 위치까지 fiber를 지지하고 있는 스테이지가 자동으로 이동하고 미세한 접근을 위하여 NSOM (Near field scanning optical microscopy) 기술을 이용하여 소자 위 20nm 이하까지 접근할 수 있도록 하였다 [15,16]. 매우 작은 영역에서의 빛의 스펙트럼을 측정하기 때문에 소자에 주입된 전류는 3.5mA다.

광양자테 소자는 각도에 따른 다과장을 발생시키므로 그림 8의 각각의 위치에 있을 때 소자의 수직인 방향을 기준으로 0도에서 30도까지 10도 간격으로 각도에 따른 과장을 OSA(Optical spectrum analyzer)를 이용하여

그림 9에서처럼 관찰하였다. 메사 모양 및 hole 소자들 에 대한 연구는 기존에 이루어졌으며, 또한, 메사와 hole 이 있는 소자도 어느 정도 분석이 이루어졌다. 하지만, 한 구조에 두 개의 서로 다른 발진 특성을 가지는 광소자가 있기 때문에 이들 소자들의 커플링에 의한 검토는 없었다.

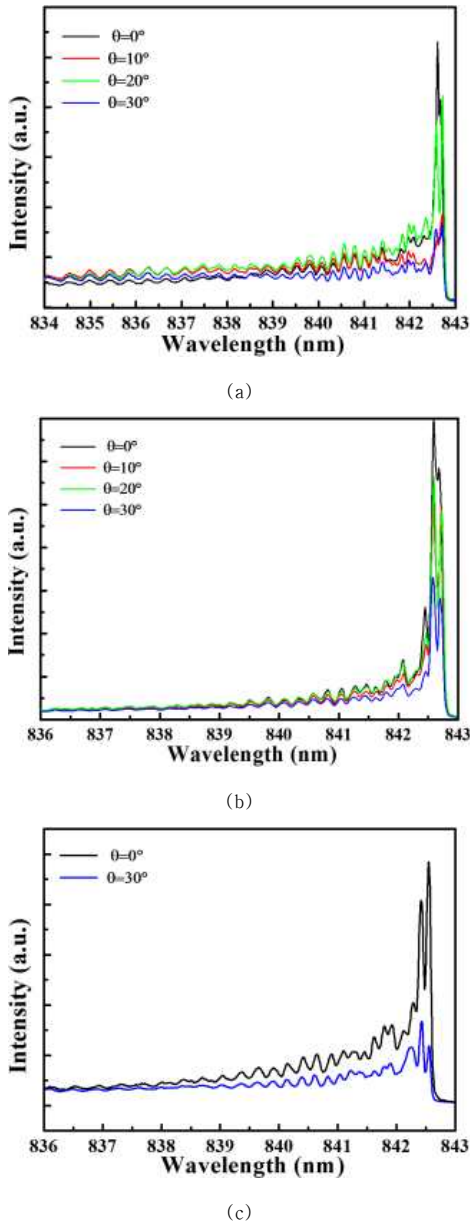


Fig. 9. Oscillation spectrum results in (a) mesa device, (b) mesa and hole coupling, (c) hole PQR.

그림 9(c)는 메사와 hole 소자 사이에서의 파장 스펙트럼의 정확한 분석을 위해 0도와 30도만 측정한 결과로 메사(그림 9(a))와 hole(그림 9(b))에서 측정한 파장과 유사한 경향을 따르기 때문에 두 소자들의 공진된 광파들에 의한 영향으로 해석할 수 있다. 또한 공진 조건에

만족된 파들은 836nm와 843nm사이에서 나타나고 있다. 이러한 현상은 한 구조에 형성되었다라도 두 소자 사이의 거리가 수십 μm 정도 되기 때문에 그림 10에서와 같이 메사와 홀에서 발생한 빛들의 커플링에 의해 현상 (Interference)으로 판단된다. 즉, 그림 4에서처럼 광섬유를 heat and pull에 의해 섬유 끝을 $5\mu\text{m}$ 정도로 제작하였고, 스펙트럼을 측정하기 위하여 각도를 30도로 tilting하였다. 앞에서 언급한 것처럼 광양자태 소자는 각도에 따른 다파장 특성으로 발진하므로 광섬유에 들어가는 빛들은 홀소자에서 발진한 빛과 메사형 소자에서 발진하는 빛들이 커플링되어 스펙트럼으로 확인되며, 뿐만 아니라 메사형 소자에서의 빛을 더 많이 광섬유에 입사되도록 측정시스템이 구성되어 있기 때문에 메사에서 발진된 빛들도 추가로 검출될 수 있다. 따라서, 그림 9(c)의 스펙트럼의 836nm에서 839nm 영역에서 intensity가 같은 파장에서 hole 소자에서 발진한 빛들(그림 9(b))보다 파위가 더 큰 이유는 이러한 측정 시스템에 의존한 것이다. 이와 같은 실험 데이터들은 광양자태 레이저의 독특한 발진특성으로 본 연구에서 처음 확인된 결과이다.

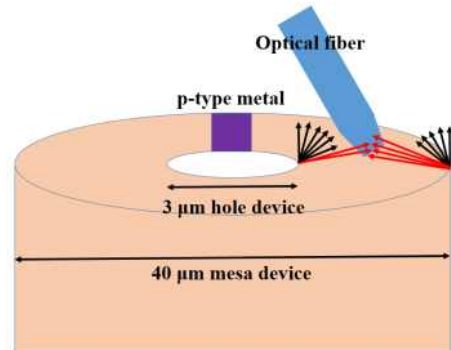


Fig. 10. Schematic diagram of a measurement system with an optical fiber approached between a mesa and a hole element to analyze the coupling phenomenon of the fabricated PQR device.

광양자태 소자들의 커플링 현상과 이러한 소자들을 조명 소자에 적용하기 위해서는 여러 개를 한 기판에 형성하는 어레이 제작 기술이 필요하다. 그림 11은 메사 직경 $30\mu\text{m}$, 내부 hole의 직경 $7\mu\text{m}$ 소자가 x 방향 $65\mu\text{m}$ 간격으로 24개, 이와 같은 24개가 y 방향 $60\mu\text{m}$ 간격으로 24줄이 있는, 즉 24×24 어레이의 1m 거리에서의 빛의 세기에 대한 시뮬레이션 결과이다. 마이크로디스크와 같은 레이저 발진 특성으로 정가운데 빛의 세기가 가장 강하며, 거리가 멀어질수록 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 레이저 소자들의 어레이를 시뮬레이션할 때 나타나는 공통된 현상이다.

본 논문에서 연구되고 있는 소자는 hole과 메사가 동시에 존재하는 광양자태 레이저이므로 기존의 결과와는 다를 것으로 추정된다. 이러한 측면에서 그림 11의 좌표 (200, 300)을 보면 매우 작은 파위가 나타난다. 이러한 현상은 일반적인 레이저에서 나타나지 않는 특이한 현상이다. 즉, 기존의 소자와는 다른 구조이며 두 가지의 서로 다른 레이저가 공존하므로 interference에 의한 현상도 발견되는 반면, 추가적인 광특성이 확인된다.

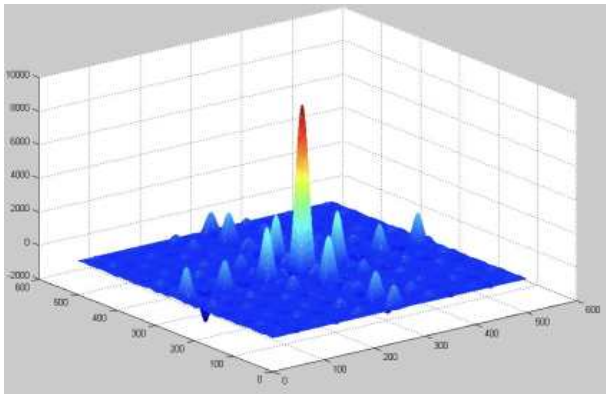


Fig. 11. Simulation results at a distance of 1 m in a 24×24 array, in which 24 elements with a mesa diameter of $30 \mu\text{m}$ and an internal hole diameter of $7 \mu\text{m}$ were spaced $65 \mu\text{m}$ apart in the x direction, and 24 such 24 elements were spaced $60 \mu\text{m}$ apart in the y direction.

2.5 기존 공정 및 소자와의 비교 분석

공정 단순화를 위해 기존 웨이퍼 세정을 TCE, Acetone, Methanol 순으로 진행하였지만, 산소 상압플라즈마를 이용한 건식 기법으로 보다 빠르게 이 과정을 진행하였다. 또한, 메사 형성 후 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 장비를 이용하여 소자 표면을 보호하고, 메사 표면에 형성된 폴리이미드 제거시 오버 에칭(Over-etching)에 의한 반도체가 식각되는 것을 막기 위해서 SiN_x 를 형성하였다. 하지만, 본 연구에서는 SiN_x 를 형성하지 않고 소자를 제작하였기 때문에 소자 제작에 따른 tact time을 줄임으로써 향후 양산시 수율 향상을 기대할 수 있고 이를 통해 가격 경쟁력을 갖출 수 있다.

이와 같이 이전 소자 제작 방법보다 단순화된 공정으로 만들어진 소자는 기존 소자처럼 μA 의 전류를 주입했을 때 근접장 영상이 관찰되었으며, 또한 다파장 특성을 확인하였다. 보다 자세한 데이터는 결론에서 언급하고자 한다.

3. 결론

최근 조명용으로 LED가 형광등을 대체하고 있으며, LED를 대신할 광전자 소자는 없는 상황이다. 본 연구진은 1990년대 후반부터 2010년까지 광양자태 소자를 집중적으로 연구하였으며 그 당시 적용 분야로는 광통신, ITS (Intelligent road system), 디스플레이 분야로의 응용을 위해 역량을 집중했다. 이후 관련된 연구가 의료 기기로 한정되었다.

하지만, 최근 조명이 중요한 분야로 인식되고 있기 때문에 광양자태는 LED를 대체할 수 있는 차세대 광원이 될 것이라 판단되었다. 따라서, 원하는 위치까지 자동으로 광섬유를 이동할 수 있는 스테이지 시스템을 구현하여 정밀 분석과 시뮬레이션을 수행하였다.

이를 위해 과거에 hollow 소자로 명명한 소자가 보다는 많은 빛을 외부로 방출할 수 있어 조명 소자로는 최적의 구조라 판단되었다. 따라서 메사와 hole 형태가 동시에 구현되는 광양자태 소자를 제작하였으며, 구체적으로는 메사 직경 $40 \mu\text{m}$, 내부의 hole의 직경은 $3 \mu\text{m}$ 이다.

근접장 관찰을 통해 μA 급의 낮은 전류에서 구동이 되는 것을 파악하였고, 메사와 hole 소자들은 서로 독립적으로 구동되는 것을 알 수 있었다. 특히 메사 직경 $40 \mu\text{m}$, 내부의 hole의 직경 $3 \mu\text{m}$ 소자는 $1 \mu\text{A}$ 이하에서도 3차원 세기 분석을 통해 약하지만 빛을 내는 것을 확인하였다.

위치에 따른 소자들의 파장 스펙트럼을 측정하였으며, 메사와 hole에 의한 커플링 현상(Interference)을 발견하였으며, 이러한 현상은 제작된 소자가 조명 소자에 최적이라는 것을 단적으로 보여준다.

이러한 소자들을 조명에 사용하기 위해서 어레이에 대한 시뮬레이션을 진행하였으며, 집적화된 레이저 어레이와 유사한 intensity 분포와 함께 일반적인 레이저 어레이에서는 나타나지 않는 추가적인 특성도 확인할 수 있었다. 이러한 현상들에 대해서는 보다 자세한 연구가 필요하다.

향후 조명용으로 적용 가능성을 위해 가시광 영역에서의 메사와 hole 구조가 동시에 구현되어 red, green, blue 빛을 발생하는 소자 및 이들의 집적화된 어레이에 대한 연구를 기반으로 white 빛을 발광할 수 있는 기술을 개발해야 할 것이다.

또한, 광양자태 레이저는 구동 전압이 낮기 때문에 이러한 소자의 특성은 연구중인 플렉서블 이차전지로 충분한 전력 공급이 가능하기 때문에 플렉서블 기관의 한쪽

면에는 이차전지를 다른 면에는 광양자태 소자를 제작하여 새로운 개념의 조명 시스템을 구현하고자 한다.

REFERENCES

- [1] K. B. Kim, J. P. Lee & M. J. Kim (2020). Optical and electrical properties of AZO thin films deposited on OHP films. *Journal of Convergence for Information Technology*, 10(9), 28–34.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.09.028
- [2] J. C. Ahn, K. S. Kwak, B. H. Park, H. Y. Kang, J. Y. Kim & O'Dae Kwon (1999). Photonic Quantum Ring. *Physical Review Letters*, 82(3), 536–539.
DOI : 10.1103/PhysRevLett.82.536
- [3] O'Dae Kwon, M. J. Kim, S. J. An, D. K. Kim, S. E. Lee, J. Bae, J. H. Yoon, B. H. Park, J. Y. Kim & J. Ahn (2006). Hole emitter of photonic quantum ring. *Applied Physics Letters*, 89(1), 011108.
DOI : 10.1063/1.2219346
- [4] D. K. Kim, E. G. Lee & O'Dae Kwon (2007). Optical encoder based on rectangular photonic quantum ring laser's orthogonal polarisation states. *Electronics Letters*, 43(3), 188–189.
DOI : 10.1049/EL:20073042
- [5] J. Y. Kim, K. S. Kwak, J. S. Kim & B. K. Kang (2001). Fabrication of photonic quantum ring laser using chemically assisted ion beam etching. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 19(4), 1334–1338.
DOI : 10.1116/1.1382872
- [6] M. J. Kim, D. K. Kim, S. E. Lee & O'Dae Kwon (2004). Wet etching fabrication of photonic quantum ring laser. *Journal of Applied Physics*, 96(9), 4742–4745.
DOI : 10.1063/1.1786346
- [7] J. P. Lee & M. J. Kim (2017). Characteristics of 32×32 Photonic Quantum Ring Laser Array for Convergence Display Technology. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(5), 161–167.
DOI : 10.15207/JKCS.2017.8.5.161
- [8] J. H. Yoon, S. J. An, K. H. Kim, J. K. Ku & O'Dae Kwon (2007). Resonance spectrum of a three-dimensional photonic quantum ring laser with an equilateral triangle microcavity. *Applied Optics*, 46(15), 2969–2974.
DOI : 10.1364/AO.46.002969
- [9] O'Dae Kwon, M. J. Kim, S. J. An, D. K. Kim & S. E. Lee (2005). Photonic quantum corral, carrier ordering, and photonic quantum dot/ring device. *Microelectronics Journal*, 36(3–6), 298–300.
DOI : 10.1016/j.mejo.2005.02.083
- [10] K. B. Kim, J. P. Lee & M. J. Kim (2020). Characterization of photonic quantum ring devices manufactured using wet etching process. *Journal of Convergence for Information Technology*, 10(6), 28–34.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.06.028
- [11] B. H. Park, J. C. Ahn, J. Bae, J. Y. Kim, M. S. Kim, S. D. Baek & O'Dae Kwon (2001). Evanescent and propagating wave characteristics of the photonic quantum ring laser. *Applied Physics Letters*, 79(11), 1593–1595.
DOI : 10.1063/1.1402655
- [12] K. B. Kim, S. N. Lee, Y. H. Kim & M. J. Kim (2020). Three-dimensional Characteristics of the Photonic Quantum Ring Laser. *Applied Science and Convergence Technology*, 29(4), 67–70.
DOI : 10.5757/ASCT.2020.29.4.067
- [13] J. W. Bae, J. W. Lee, O'Dae Kwon & V. G. Minogin (2003). Spectrum of three-dimensional photonic quantum-ring microdisk cavities: comparison between theory and experiment. *Optics Letters*, 28(20), 1861–1863.
DOI : 10.1364/OL.28.001861
- [14] J. Y. Kim, K. S. Kwak, J. S. Kim & B. K. Kang & O'Dae Kwon (2001). Fabrication of photonic quantum ring laser using chemically assisted ion beam etching. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 19(4), 1334–1338.
DOI : 10.1116/1.1382872
- [15] S. K. Buratto (1996). Near-field scanning optical microscopy. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1(4), 485–492.
DOI : 10.1016/S1359-0286(96)80062-3
- [16] R. Degl'Innocenti, M. Montinaro, J. Xu, V. Piazza, P. Pingue, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere & D. A. Ritchie (2009). Differential Near-Field Scanning Optical Microscopy with THz quantum cascade laser sources. *Optics Express*, 17(26), 23785–23792.
DOI : 10.1364/OE.17.023785

김 경 보(Kim, Kyoung-Bo)

[정회원]



- 2000년 8월 : 포항공과대학교 신소재 공학과(공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 5월 : 포항공과대학교 신소재공학과(박사후연구원)
- 2001년 5월 ~ 2004년 8월 : 나이넥스(차장)
- 2004년 8월 ~ 2008년 12월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2009년 1월 ~ 2014년 11월 : 포스코(전문연구원)
- 2014년 11월 ~ 2016년 02월 : 한국생산기술연구원(전문위원)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 금속재료과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Metal processing
- E-Mail : kbkim@inhac.ac.kr

이 중 필(Lee, Jongpil)

[정회원]



- 1999년 8월 : 광운대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1991년 2월 ~ 2015년 5월 : 한국전기학원(Director)
- 2015년 6월 ~ 현재 : 중원대학교 전기

전자공학과 교수

- 관심분야 : Solar Heat, Electric Car, Microgrid, Power System
- E-Mail : leejp@jwu.ac.kr

김 무 진(Kim, Moojin)

[정회원]



- 2005년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2005년 2월 ~ 2012년 8월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2012년 8월 ~ 2015년 3월 : 포스코(책임연구원)
- 2015년 4월 ~ 2020년 2월 : 중원대

학교 전기전자공학전공 교수

- 2020년 3월 ~ 현재 : 강남대학교 IoT 전자공학과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Semiconductor, Laser
- E-Mail : moojinkim7@kangnam.ac.kr