

습식 식각 공정을 이용하여 제작된 광양자테 소자의 특성 분석

김경보¹, 이종필², 김무진^{3*}

¹인하공업전문대학 금속재료과 교수, ²중원대학교 전기전자공학전공 교수, ³강남대학교 IoT 전자공학과 교수

Characterization of photonic quantum ring devices manufactured using wet etching process

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

요약 본 논문에서는 VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 레이저를 만드는 구조와 유사한 GaAs 웨이퍼상에 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 장비로 GaAs와 AlGaAs 에피층을 형성시킨 구조를 사용한다. 3차원 공진현상에 의해 자연 발생되는 광양자테 (PQR: Photonic Quantum Ring) 소자를 건식 식각 방법인 CAIBE (Chemically Assisted Ion Beam Etching) 기술로 제작하였지만, 진공 분위기에서 진행해야 하는 문제점 때문에 저가격으로 쉽게 소자를 제작할 수 있는 방법이 연구되었고, 그 결과 인산, 과산화수소, 메탄올이 혼합된 용액의 습식식각 기술로 가능성을 확인하였으며, 이 방법을 적용하여 소자를 제작한 내용에 대해 논한다. 또한, 제작된 광소자의 스펙트럼을 측정하였고, 이 결과들을 이론적으로 해석하여 얻은 파장값과 비교한다. 광양자테 소자는 3차원 형상으로 세포를 모델링하거나, 디스플레이 분야로의 응용이 가능할 것으로 기대한다.

주제어 : 광양자테소자, 습식식각, 3차원 공진 모드, 스펙트럼, 파장

Abstract A structure in which GaAs and AlGaAs epilayers are formed with a metal organic chemical vapor deposition equipment on a GaAs wafer similar to the structure of making a vertical cavity surface emitting laser is used. Photonic Quantum Ring (PQR) devices that are naturally generated by 3D resonance are manufactured by chemically assisted ion beam etching technology, which is a dry etching method. A new technology that can be fabricated has been studied, and as a result, the possibility of wet etching of a solution containing phosphoric acid, hydrogen peroxide and methanol was investigated, and the device fabrication by applying this method are also discussed. In addition, the spectrum of the fabricated optical device was measured, and the results were theoretically analyzed and compared with the wavelength value obtained by the measurement. It is expected that the PQR device will be able to model cells in a three-dimensional shape or be applied to the display field.

Key Words : Photonic quantum ring device, Wet etching, 3 dimensional resonance mode, Spectrum, Wavelength

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

1. 서론

우리나라의 메모리 반도체 공정 및 관련 기술은 세계 시장을 선도하고 있고, 이를 바탕으로 전자소자는 비약적으로 발전하고 있으며, 앞으로도 전망이 밝은 분야이다. 웨어러블, 사물인터넷(IoT), 인공지능(AI) 등 4차 산업혁명의 첨단 기술과 접목돼 다양하게 활용 가능한 미래형 테크놀로지로 빛을 발광하거나 흡수하는 광소자가 있으며, 광통신, 센서, 조명 등과 같은 다양한 분야에 적용되어 우리 실생활에 없어서는 안되는 중요한 기술로 자리매김하고 있다. 이 중에서 Fig. 1에서와 같이 광소자의 대표적인 것으로 수직 공진 표면 발광형 레이저(VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting laser)가 있으며, 근거리 광통신의 중요한 핵심부품이다[1-3]. 하지만, 온도에 의한 파장 변이 및 편광 불균일한 특성으로 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다 [4-6].

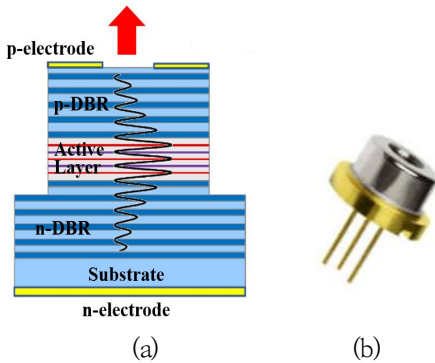


Fig. 1. (a) Structure and (b) mass production product of VCSEL device.

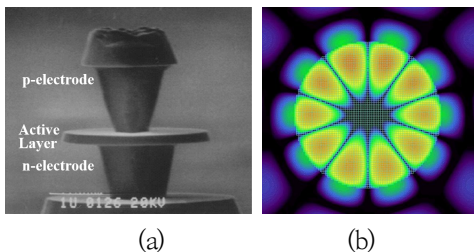


Fig. 2. (a) Structure and (b) simulation results of microdisk lasers.

다른 대표적인 광전자소자로 Fig. 2(a)와 같은 마이크로 디스크가 있으며, 활성층 두께를 파장보다 작게 제작하면,

내부 공진 모드 수가 적다 [7,8]. Fig. 2(b)는 FDTD (Finite Difference Time Domain) 시뮬레이션을 이용하여 활성층을 위에서 본 내부 공진에 의한 광파가 외부로 진행되는 것을 보여주고 있으며, 문턱전류 값이 작은 디바이스이다.

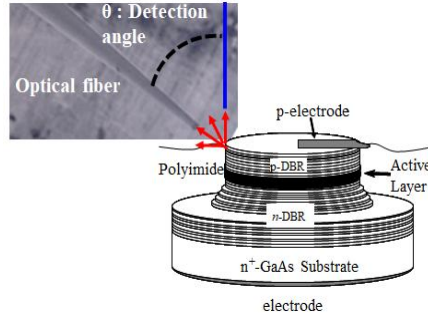


Fig. 3. Structure and oscillation characteristics of PQR devices. Externally, a fiber probe is shown to measure the intensity of waves generated from the device.

오랫동안 연구되고 있는 것으로 Fig. 3에서와 같이 광양자테(PQR: Photonic Quantum Ring) 소자가 있으며, 구조는 VCSEL 소자와 동일하지만 가장 자리에서 발생한 3차원 WG (Whispering Gallery) 현상을 나타내는 것으로 VCSEL보다 낮은 전류에서 특성을 나타내고, 온도에 따른 파장 변이가 작다 [9-11]. 이와 같은 특성으로 차세대 디스플레이의 광원이나 광통신, 집적회로와의 결합을 통한 혼성집적회로에의 적용을 가능하게 한다. 또한, 하나의 소자를 이용하여 각도에 따른 다파장 발진을 가능하게 하여 파장 분할 다중 기술에 집중적인 연구를 하고 있다.

본 논문은 광양자테 소자를 용액 공정을 이용한 습식 식각 방법을 이용하여 제작하고 소자의 광특성을 분석한 내용에 대한 것이다. 2000년 초반에 이루어진 연구를 토대로, 최근에 광양자테 소자의 센서와 바이오 관련 분야에의 공동 연구 요청 건 및 양산 가능성을 고려한 신개념 소자 개발의 절실한 요구[12]가 있어 재현성 평가 및 빠른 연구 진행을 위해 과거의 연구 중 저가로 광양자테를 제작할 수 있는 실험을 발굴하여 진행하였다.

2. 본론

2.1 실험 방법

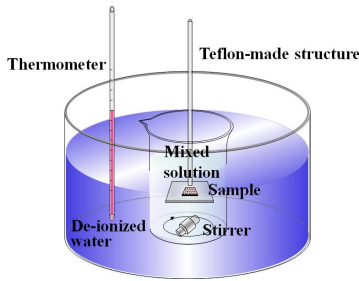


Fig. 4. Experimental apparatus.

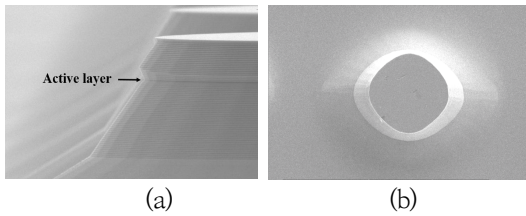


Fig. 5. (a) Top and (b) side view of wet etched mesa using mixed solution ($H_3PO_4:H_2O_2:CH_3OH = 1:1:10$).

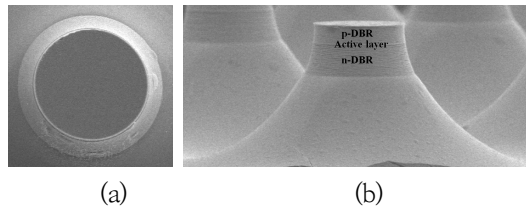


Fig. 6. (a) Top and (b) side view of wet etched mesa sing mixed solution ($H_3PO_4:H_2O_2:CH_3OH = 3:1:1$).

금속 유기를 원료로 사용하여 기판 상에 막을 증착시키는 유기금속화학증착 (MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 장비를 이용하여 고농도 n형으로 도핑된 GaAs 기판상에 GaAs와 AlGaAs가 반복된 n형 DBR (Distributed Bragg Reflector), 활성층, p형 DBR을 형성(Fig. 3 참조)한다. 메사를 형성하기 위하여 산용액인 인산(H_3PO_4), 과산화수소(H_2O_2), 메탄올(CH_3OH)을 혼합한 식각용액을 사용하며, 탈이온수를 담긴 수조에 식각용액이 담긴 비커를 넣고, 물의 온도를 공정 온도로 정하였으며, 식각이 전체적으로 고르게 되도록 하기 위해 stirrer를 이용하여 용액을 저어준다. 전체 공정 장치도는 Fig. 4와 같다. 샘플은 테프론 재질로 특수 제작된 구조물위에 고정되고, stirrer와의 접촉을 방지하기 위해 손잡이가 있는 형태로 구성되었다. 인산, 과산화수소, 메탄올을 1:1:10비율로 섞어서

30도의 온도에서 약 7분간 습식식각을 진행했을 때의 결과는 Fig. 5와 같다. 식각률의 차이로 인해 Fig. 5(a)에서 메사의 활성층 영역이 다른 곳에 비해 많이 제거되었으며, 또한, 윗면에서의 관찰한 이미지인 Fig. 5(b)와 같이 방향에 따라 다른 식각특성으로 마스크로 사용된 원형 PR 모양과는 다른 형태가 관찰되었다. 이와 같은 현상이 일반적인 습식 식각에서 나타나는 결과이다. 옆면이 수직에 가깝고 원형인 메사를 얻기 위해 3:1:1의 비율로 용액을 섞고 40도의 온도로 20분간 공정을 진행하였을 때 웨이퍼의 결정성에 관계없이 전체적으로 고른 식각률을 유지하여 윗면이 원형(Fig. 6(a)), 활성층 옆면이 Fig. 6(b)와 같이 수직에 가까운 구조를 얻을 수 있었다. 이 공정 진행시 추가적으로 중요한 부분은 활성층이 노출될 때까지 공정을 진행하여 3차원 공진이 가능하도록 해야 한다. 자세한 습식 공정 및 각 용액들의 역할은 참고문헌 13에 자세히 설명되어 있다. 다음으로 메사 보호를 하고, 또한, 후속 공정시 식각 stop 층으로 사용하기 위해 실리콘 질화막 1000\AA 을 플라즈마를 이용한 화학기상증착 장치를 이용하여 증착하고, 후속 공정인 전극을 형성하기 위해 폴리이미드로 소자를 포함한 전체 영역을 평탄화한다. 이후 RIE (Reactive Ion Etching) 장비로 메사 표면에 덮혀있는 실리콘 질화막이 드러날 때까지 산소플라즈마를 이용하여 식각하고, 동일한 장비에 식각 가스 CF_4 를 공급하여 1000\AA 의 실리콘 질화막을 제거한다. 마지막으로 p형과 n형 전극을 thermal evaporation 방법으로 형성하면 광양자체 소자를 제작할 수 있다.

2.2 광양자체 소자 특성

제작된 광양자체는 외부에서 $\sim\mu A$ 급의 전류를 공급하면서 소자의 발광 특성을 고분해능 현미경과 CCD (Charge Coupled Device)가 연동되어 있는 컴퓨터로 이미지를 확인할 수 있다. Fig. 7(a)는 $10\mu m$ 직경의 소자에 $4\mu A$ 를 공급하였을 때의 CCD 사진이다. 빛이 가려진 부분은 외부에서 p-DBR에 전류를 공급하기 위해서 형성된 p형 전극이며, 최외각의 메사 영역에서 Rayleigh-밴드내에서 자연발생된 것을 관찰할 수 있다. 이 빛들은 2차원 WG 마이크로디스크 레이저가 접선 방향으로 외부로 빛이 나아가는 것과는 달리 Fig. 3의 빨간색으로 표시한 것처럼 외부로 다양한 각도에서 다른 파장으로 나아간다 [14].

Fig. 7(b)는 Fig. 3에서와 같이 광섬유(optical fiber)를 광양자테의 mesa표면에서 수직인 선을 기준으로 θ (Detection angle)를 12도와 15도로 기울여 측정 한 스펙트럼이다. 소자에 주입한 전류는 1mA로, 833nm와 837nm의 범위에서 다양한 peak들이 존재 하며, 단파장으로 갈수록 peak의 간격이 넓어진다. 또한, 12도에서 가장 큰 peak 파장은 836.38nm이며, 15도에서는 835.59nm였다. 두 파장의 차이는 약 0.8nm 정도며, PQR은 각도가 증가할 때 단파장으로 이동하는 특성이 있으며, 0도에서 75도로 측정 각도를 변화시킬 때 30nm 파장천이를 나타낸다. 이러한 현상은 3차원 구조의 WG 공진기 내부에서의 toroidal 특성 때문이다 [15].

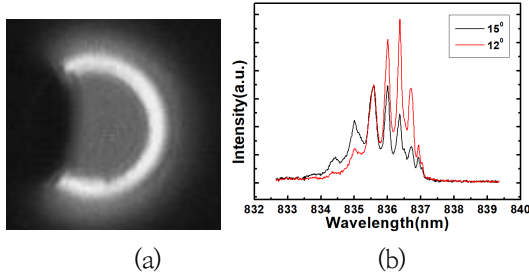


Fig. 7. (a) Near field image of device with a diameter of 10 μm , when 4uA current was supplied. (b) Spectrum measured at 12 and 15 degrees by injecting 1 mA current into a same device. In individual PQR modes, the intensity changes when the angle is different, but the oscillation wavelength does not change.

2.3 스펙트럼 분석

건식 식각 기술인 CAIBE (Chemically Assisted Ion Beam Etching) 장비로 광양자테를 제작하여 이 소자들의 스펙트럼에 대한 모드 해석 결과들은 이미 소개되었다 [16].

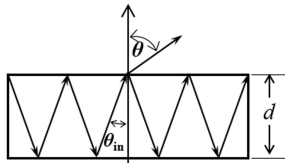


Fig. 8. Non-vertical Fabry-Perot conditions inside and outside the 3D resonator. Resonant mode is expressed in a zigzag form in a space trapped by DBR located above and below the active layer.

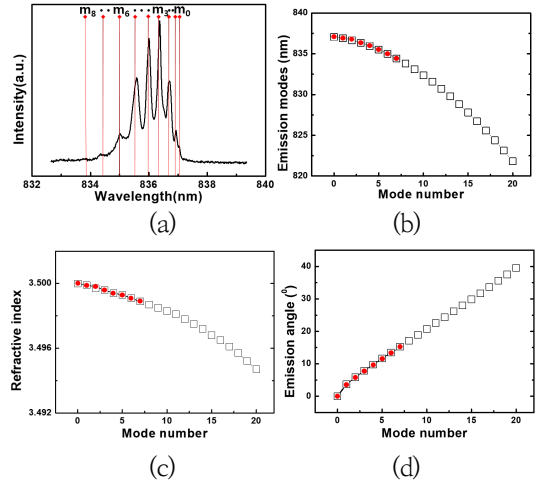


Fig. 9. (a) Measurement results at 12 degrees in the previous figure (Vertical lines are wavelengths by mode analysis.), (b) Measured mode wavelength (solid circle) and calculated emission wavelength (empty square), (c) Refractive index according to the mode obtained by substituting the values of the wavelength obtained from the measurement (solid circle) or the calculation (empty square) into the equation 1, (d) Emission angle for each mode calculated by substituting the value of the refractive index for the mode order into Equation 5.

본 절에서는 습식 식각으로 제작된 소자의 결과들을 해석하고자 한다. 3차원 공진기 내부의 광양자테 모드들은 2가지로 나누어 모델화할 수 있다. 먼저 활성층 위와 아래에 위치해 있는 DBR에 의해 갇힌 공간에서 지그재그형태로 진행되는 형태 (Fig. 8 참조)와 2차원 WG와 같이 가장자리를 따라 공진(Fig. 2(b) 참조)하는 것으로 나눌 수 있으며 이때의 파장에 대한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_m = \lambda_0 \frac{n_m}{n_0} \left[1 + \left(\frac{x_m^1 \lambda_0}{2\pi R n_0} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (1)$$

상기 식을 차수 m에 대해 미분하고, n_m 을 아래 수식으로 대체하면,

$$n_m = n_0 + \alpha(\lambda_m - \lambda_0) \quad (2)$$

$$\Delta\lambda_m \approx \frac{n_0}{(\alpha\lambda_0 - n_0)} \frac{\lambda_0^3 \Delta x_m^1}{(2\pi R n_0)^2} x_m^1 \quad (3)$$

로 유도된다. 여기서 R은 광양자테 소자의 반지름이

며, λ_0 는 θ 가 0도일 때 외부로 방출되는 파장으로 이 경우 굴절률은 n_0 이다. α 는 모드들의 복굴절(modal birefringence)에 의해 다른 굴절률을 의미하는 상수이다. 일반적으로 이 상수는 매우 작은 값으로 여기서는 10^{-4} 로 정했으며, 이것으로부터 모드들간의 파장에 따른 굴절률 차이는 작음을 예상할 수 있다. x^1_m 은 m 차 베셀함수의 근을 의미한다. 이 값을 제외한 항들은 고정되며, 특히 이 값은 차수가 증가함에 따라 차이가 커짐을 알 수 있으며, 이는 식 (3)에서 중요한 요소로 작용하며, 단파장으로 갈수록 파장 간의 간격이 벌어지는데 가장 큰 영향을 미친다.

습식 공정으로 제작된 지름 $10\mu\text{m}$ 소자의 12도에서 측정된 결과(Fig. 7(b))와 이론적으로 계산된 값과 비교한 것을 Fig. 9(a)에 나타냈다. 수직선으로 나타낸 값들은 유도된 모드들의 파장을 나타내며, x^1_m 값에 연관된 값을 m 차 모드의 파장이라고 한다면, 발진 파장들의 차수를 표현할 수 있다. 예를 들어 m_5 는 5번째 peak 모드의 파장을 나타낸다. 모드 차수에 대한 스펙트럼 측정값을 표현한 Fig. 9(b)로부터 두 결과가 상당히 일치함을 알 수 있다. 이를 통해 각도를 증가시키거나 감소시켰을 때 3차원 광양자태 소자에서의 발진 파장을 유추할 수 있다.

외부로 진행하는 파장과 각도에 따른 상관성을 파악하기 위하여 Fig. 8와 같이 3차원 공진기 내·외부 조건에서 수직이 아닌 Fabry-Perot 조건에서의 파장을 계산하면,

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 \frac{n}{n_0} \cos \theta_m \\ &= \lambda_0 \frac{n}{n_0} \left[1 - \left(\frac{\sin \theta}{n} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

파장 크기의 공진기내부에서 전류 주입에 의해 생성된 광파가 θ_{in} 의 각도로 입사하면, θ 의 각도로 외부 공기중으로 나아가는 것을 의미한다. (4)식과 (1)식은 좌변이 파장으로 같기 때문에 우변들을 정리해서 각도에 대한 식으로 유도하고 quantization rule을 적용하여 각도에 대해 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\theta_m = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_m}{n_0} \frac{x^1_m \lambda_0}{2\pi R} \left[1 + \left(\frac{x^1_m \lambda_0}{2\pi R n_0} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\} \quad (5)$$

여기서 n_m 은 θ_m 기울기로 방출되는 λ_m 파장에 대한 m 차 모드의 굴절률이다. 이 값은 Fig. 9(a)에 peak들의 파장(측정값과 계산된 값)을 수식 (1)에 대입하여 구할 수 있으며 Fig. 9(c)에 나타내었다. 차수가 증가함에

따라 파장 및 굴절률도 감소하였다. 모드 차수에 대응되는 굴절률 값을 식 (5)에 대입하면 Fig. 9(d)와 같이 각 모드들에 대한 각도를 알 수 있다.

3. 결론

기존 건식식각 기술로 제작한 광양자태 소자를 비진공 방법인 습식식각으로 구현하였으며, 사용된 용액들은 인산, 과산화수소, 메탄올을 3:1:1로 혼합하여 40도의 온도에서 20분 공정을 진행하였을 때 활성층 옆면이 수직에 가깝고, 옆면이 매끄러운 원통형 메사를 얻을 수 있었다.

이 소자의 광특성 중 스펙트럼을 분석하기 위하여 OSA (Optical Spectrum Analyzer) 장비로 소자 외부로 방출되는 모드들을 소자의 수직방향에서 12도와 15도 기울인 각도에서 측정하였고, 특히 12도에서 관찰된 peak들은 DBR 위아래 지그재그 방향으로 진행되는 파와 2차원 마이크로디스크에서 가장자리를 따라 발진하는 파로 나누어 이론적으로 해석된 파장들과 거의 일치하였다. 이로부터 광양자태 소자 내부의 모드들은 활성층내에서 가장자리로부터 일정한 폭(Rayleigh-band)내에서 3차원 공진으로 형성된다고 설명할 수 있다는 이론을 뒷받침한다.

광양자태 소자는 3차원 세포 모델링을 위한 바이오 분야나 디스플레이의 발광 소자로의 응용을 기대해 볼 수 있으며, 특히 바이오에 대한 최근 관심 증대로 대학 병원과 공동 연구를 추진하고 있다.

REFERENCES

- [1] C. Gierl, T. Gruendl, P. Debernardi, K. Zogal, C. Grasse, H. Davani, G. Böhm, S. Jatta, F. Küppers, P. Meißner & M. Amann. (2011). Surface micromachined tunable $1.55\ \mu\text{m}$ -VCSEL with 102 nm continuous single-mode tuning. *Optics Express*, 19(18), 17336-17343. DOI : 10.1364/OE.19.017336
- [2] V. Jayaraman, G. D. Cole, M. Robertson, A. Uddin & A. Cable. (2012). High-sweep-rate 1310 nm MEMS-VCSEL with 150 nm continuous tuning range. *Electronics Letters*, 48(14), 867-869. DOI : 10.1049/el.2012.1552
- [3] K. Iga. (2000). Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6), 1201-1215. DOI : 10.1109/2944.902168

- [4] G. Hasnain, K. Tai, L. Yang, Y. H. Wang, R. J. Fischer, J. D. Wynn, B. Weir, N. K. Dutta & A. Y. Cho. (1991). Performance of Gain-Guided Surface Emitting Lasers with Semiconductor Distributed Bragg Reflector. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 27(6), 1377-1385. DOI : 10.1109/3.89954
- [5] J. H. Ser, Y. G. Ju, J. H. Shin & Y. H. Lee. (1995). Polarization stabilization of vertical-cavity top-surface-emitting lasers by inscription of fine metal-interlaced gratings. *Applied Physics Letters*, 66(21), 2769-2771. DOI : 10.1063/1.113469
- [6] T. Yoshikawa, H. Kosaka, K. Kurihara, M. Kajita, Y. Sugimoto & K. Kasahara. (1995). Complete polarization control of 8×8 vertical-cavity surface-emitting laser matrix arrays. *Applied Physics Letters*, 66(8), 908-910. DOI : 10.1063/1.113593
- [7] B. Gayral, J. M. Gerard, A. Lemaitre, C. Dupuis, L. Manin & J. L. Pelouard. (1999). High-Q wet etched GaAs microdisks containing InAs quantum boxes. *Applied Physics Letters*, 75(13), 1908-1910. DOI : 10.1063/1.124894
- [8] M. Fujita, R. Ushigome & T. Baba. (2001). Large Spontaneous Emission Factor of 0.1 in a Microdisk Injection Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(5), 403-405. DOI : 10.1109/68.920731
- [9] R. Hristu, S. G. Stanciu, S. J. Wu, F.-J. Kao, O'D. Kwon & G. A. Stanciu. (2011). Optical beam induced current microscopy of photonic quantum ring lasers. *Applied Physics B*, 103, 653-657. DOI : 10.1007/s00340-011-4441-3
- [10] D. K. Kim, Y. C. Kim, M. H. Sheen & O'D. Kwon. (2009). Spatiotemporal dynamics in Rayleigh band of photonic quantum ring laser. *Optical and Quantum Electronics*, 41, 913-919. DOI : 10.1007/s11082-010-9405-z
- [11] O'D. Kwon, D. K. Kim, J. H. Yoon, Y. C. Kim, Y. H. Jang & M. H. Shin. (2009). Photonic quantum ring laser of 3D whispering cave mode. *Microelectronics Journal*, 40(3), 570-573. DOI : 10.1016/j.mejo.2008.06.092
- [12] O. D. Kwon. (2018). A new spectroscopy based upon 3D photonic quantum ring lasers for non-invasive and portable brain/heart disease diagnostic techniques. *Phys. Lett.*, 81, 580-582. DOI : 10.21767/2349-3917-C1-002
- [13] Y. Mori & N. Watanabe. (1978). A New Etching Solution System, $H_3PO_4-H_2O_2-H_2O$, for GaAs and Its Kinetics. *Journal of The Electrochemical Society*, 125(9), 1510-1514. DOI : 10.1149/1.2131705
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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

김 경 보(Kyoung-Bo Kim)

[정회원]



- 2000년 8월 : 포항공과대학교 신소재공학과(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(Jongpil Lee)

[정회원]



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

- 2015년 6월 ~ 현재 : 중원대학교 전기전자공학전공 교수
- 관심분야 : Solar Heat, Electric Car, Microgrid, Power System
- E-Mail : leejp@jwu.ac.kr

김 무 진(Moojin Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2005년 2월 ~ 2012년 8월 : 삼성 디스플레이(책임연구원)
- 2012년 8월 ~ 2015년 3월 : 포스코(책임연구원)

- 2015년 4월 ~ 2020년 2월 : 중원대학교 전기전자공학 전공 교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 강남대학교 IoT전자공학과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Semiconductor, Laser
- E-Mail : moojinkim7@kangnam.ac.kr