

광양자테 레이저의 광파 질서와 응용

권오대(權五大), 안정착, 곽규섭(郭圭燮), 박병훈(朴炳勳), 박동훈(朴東勳), 김준연(金峻淵)
포항공과대학교 전자전기공학과
전화 : (0562) 279-2212 / 팩스 : (0562) 279-8119

Lightwave ordering and applications of photonic quantum ring lasers

O'Dae Kwon, J. C. Ahn, K. S. Kwak, B. H. Park, D. H. Park, and J. Y. Kim

Department of Electronic and Electrical Engineering

Pohang University of Science and Technology

E-mail : odkwon@postech.ac.kr

<http://light.postech.ac.kr>

Abstract

We report dimension-reduced and photon-induced quantum rings naturally formed in a vertical-cavity-like active microdisk plane due to Rayleigh's band of whispering gallery modes. The \sqrt{T} -dependent redshift, microampere-range threshold currents, $\lambda/2$ lightwave ordering, and chaotic properties are also discussed.

VCSEL과 동일 구조에서 그것의 1/1,000의 문턱전류를 가지는 신형 레이저 소자를 발명하였다. 즉 μA 의 극소 문턱 전류(Threshold Current) 특성과 출력파장의 \sqrt{T} 의존성 등의 우수한 특성을 지니는 광양자테(PQR: Photonic Quantum Ring)형 원리의 레이저가 개발된 것이다[6-10]. 본 논문에서는 광양자테 레이저의 동작 원리와 quantum wire 특성, 출력 파장의 온도 안정성, 문턱 앞의 chaos 특성 및 응용 기술들을 소개하고자 한다.

I. 서론

최근 저전력 소비와 고밀도 집적이 가능한 광반도체의 개발을 위해 WG(Whispering Gallery) 모드로 동작하는 마이크로디스크(microdisk) 반도체 레이저의 개발이 활발히 진행되어 왔다[1-5]. 초기에 광 평평 만으로 개발되던 이러한 압정형의 마이크로 디스크는 mA 이하의 전류로 구동 가능하게 되었다. 이와 함께, 저전류 동작이 가능한 반도체 레이저로서 VCSEL(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) 역시 최근 산화막 기술로써 mA 이하의 전류 동작을 발전시키고 있다. 한편, 본연구진은 산화막 기술에 의존함이 없이

II. 본론

PQR 레이저 소자는 광 구속을 위하여 공기 중에 떠 있는 압정형의 디스크 대신에 훨성층의 위 아래에 DBR(Distributed Bragg Reflector) 반사층이 있는 VCSEL 구조를 사용하였고, 표면에 수직한 출력을 감지하기 위하여 stripe 또는 분리된 형태의 p-전극이 사용되었다. 그림 1는 직경 15 μm PQR 소자의 근접장 영상을 나타내며, 특이한 two-threshold 연속 발진(lasing) 현상을 설명해준다. 그림 1(a)와 (b)의 고리형태의 PQR 발진은 각각 3 μA 의 투명 조건과 12 μA 의 문턱전류 특성을 가지며, 이는 extracavity evanescent

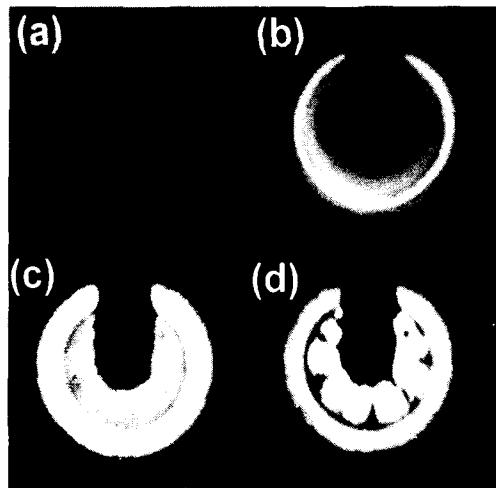


그림 1 Microscope pictures of the PQR laser. The emission is partly blocked due to the stripe electrode. (a) $I = 3 \mu\text{A}$, where a faint evanescent mode image appears indicating the onset of the toroid transparency; (b) $I = 12 \mu\text{A}$, near the PQR threshold; (c) $I = 11.5 \text{ mA}$, right below the VCSEL threshold; (d) $I = 12 \text{ mA}$, at the VCSEL threshold.

field emission이다[1]. 주입 전류를 증가시킴에 따라 이러한 PQR 출력이 매우 강하여 그림 1(c)와 (d)를 측정할 때는 neutral density filter를 사용하였다. 그럼에도 불구하고 여전히 PQR emission 패턴과 그 spectral 특성에는 변함이 없었다. 주입전류를 VCSEL 모드의 threshold인 12 mA 이상으로 증가시킴에 따라, 10-fold rotaional symmetry를 갖는 intra-VCSEL-cavity 고차원 횡모드가 나타난다[11]. 또한 VCSEL threshold 이후에는 토로이드 공진기 내부의 모드 에너지는 intracavity VCSEL 모드와 extracavity PQR 모드로 나뉘지는 모드 경쟁 현상이 생기고 이는 PQR 모드 입장에는 에너지 손실로 작용한다.

또한, Hollow 형태의 PQR 레이저를 원통형태의 PQR 레이저와 동일한 에피 구조와 공정을 통해 제작 하였으며, 원통형태의 PQR 레이저와 같은 크기의 메사 크기를 갖고, 단지 예칭 공정에서 메사 한쪽에 Hollow를 형성시켰다. 이러한 Hollow 형태의 PQR 레이저를 다양한 크기로 제작하였는데, 바깥쪽 메사의 지름/안쪽 메사의 지름이 30/15, 30/10, 15/5, 6/2 (μm) 등의 소자를 제작하였다. 제작된 소자의 발진 전류 측정 및 그 형태를 보기 위해 주입 전류의 양에 따른 근

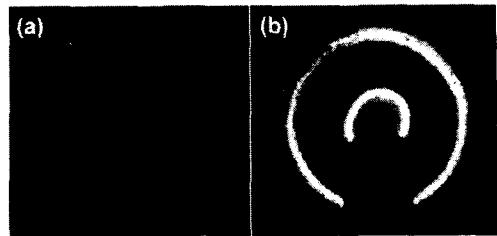


그림 2 Microscope pictures of the hollow PQR laser. (a) $I = 6 \mu\text{A}$, at the onset of the toroid transparency (b) $I = 16 \mu\text{A}$, near the PQR threshold.

접장 측정을 하였으며, 그 결과가 그림 2에 보여지고 있다. 그림 2의 (a)와 (b)는 바깥쪽 지름이 $15\mu\text{m}$, 안쪽 지름이 $5\mu\text{m}$ 인 Hollow 형태의 PQR 레이저의 transparency와 문턱 전류에서의 모습이다. 그림 1에서와 비교하면 두 가지 형태의 PQR 레이저의 transparency 및 문턱 전류의 값이 거의 같음을 알 수 있다. 이러한 특성은 PQR 레이저의 공진기가 광양자태로 이루어져 있음과 일치한다. 만약 PQR 영역의 gain이 양자우물구조에 의해 발생한다면 문턱 전류 특성은 소자의 면적에 비례하여 그 값이 큰 차이가 생기게 되는데, 이는 발진 조건에 도달하기 위한 carrier density가 소자의 면적에 따라 달라지기 때문이다. 그러나 PQR 레이저는 양자 우물 구조를 포함하고 있으나, Rayleigh band 구속 효과에 의해 공진기가 소자의 테두리를 따라 자연 발생되는 Quantum Wire로 이루어져 있기 때문에 hollow 형태와 원통 형태의 PQR 레이저는 문턱 전류 특성이 거의 동일하게 된다.

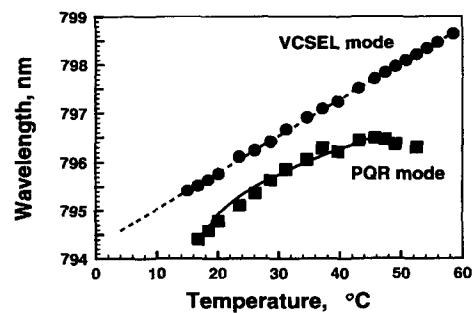


그림 3 Temperature dependent spectra measured with a constant injection current, $I = 12 \text{ mA}$.

PQR 모드와 VCSEL 모드가 확실히 구별되는 또 다른 중요한 특성은 그 출력 파장의 온도 의존 관계의 상이성이다[8,9]. 그림 3는 소자의 온도 변화에 따른



그림 4 Standing waves at a step on a gold (111) surface at RT. Image maps the local density of electron states 0.15 eV above the Fermi level and shows high density at the step and standing waves on the higher side of the step.[15]

PQR 모드와 VCSEL 모드의 출력 파장을 도시한 것이다. VCSEL 모드의 출력 파장은 온도 증가에 대하여 $0.07 \text{ nm}/\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 비율로 선형적으로 증가하는 반면, PQR 모드의 spectral shift는 고유한 \sqrt{T} 관계를 나타낸다. 그림 3의 두 모드의 곡선들은

$$\lambda_{PQR} = 0.42\sqrt{T - 18} + 794.3 \text{ [nm]},$$

$$\lambda_{VCSEL} = 0.07T + 794.3 \text{ [nm]}$$

로 근사 가능하다. 또한, PQR 모드의 출력 파장은 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도 범위에서 거의 변화가 없음을 알 수 있으며, 이러한 특성은 고집적 레이저 어레이를 만들 때 수반되는 지역적 열화 문제를 해결하게 한다. Intracavity VCSEL 모드의 온도계수 $0.07 \text{ nm}/\text{ }^{\circ}\text{C}$ 는 짧은 공진기에서의 index-dominated 효과에 의해 설명되는 반면, PQR 발진의 삼차원 Rayleigh toroid는 활성층의 테두리를 따라 진행하는 helical 광파 운동을 내포하는 긴 공진기로 구별되므로, PQR 모드는 gain-dominated 효과에 의해 설명된다[13]. 관측된 출력파장의 \sqrt{T} 관계는 이러한 gain에 의한 발진을 말해주고 있으며, 이는 Quantum Wire 가정, 즉 \sqrt{T} 에 의존하는 투명 조건에 의해 매우 잘 설명된다[12].

PQR 영역이 Quantum Well로 형성되었음에도 불구하고, Quantum wire의 주요 특성인 출력파장의 \sqrt{T} -의존성을 보이는 것은 이례적으로 낮은 PQR의 threshold 특성을 설명해 준다. 다시 말해, PQR 영역이 에피 구조 상 quantum well로 형성되어있지만, 삼



그림 5 Schematic of three-dimensional WG modal manifolds of helically twisted traveling waves in the expanded toroidal cavity.

$\varphi (\mu\text{m})$	$W_{\text{Rayleigh}} (\mu\text{m})$	$t (\mu\text{m})$	χ
6	0.189	1.32	2
10	0.314	1.58	3
20	0.629	1.86	6
30	0.943	2.14	8
48	1.509	3.35	13

표 1 Calculated Rayleigh bandwidth (W_{Rayleigh}), the distance of the evanescent field peaks from the device edge (t), and the number of PQR (χ) with varying the diameter (φ) of the device.

차원 WG 모드에 의해 이 영역에서 quantum wire ring이 자연 발생되는 것이다. Rayleigh 구속 효과에 의한 삼차원 toroid cavity의 형성은 이를 설명해 준다. 이 독특한 구속 효과는 toroid 내의 공진 모드의 수를 급격히 감소시키며, 따라서 전체 PQR 모드의 여기에 필요한 에너지를 그 만큼 감소시킨다. 더욱이 이는 그림 4와 유사한 경로로 QW 평면에서 quantum wire로의 차원 감소를 유발하는 것을 상상할 수 있다. 그러나 Rayleigh band 내에 나선형의 정상과 다발의 모양을 따라 gradient force[16]에 의한 carrier 들의 3차원적 trapping이 발생할 것이며, 나선형의 궤적을 갖는 ‘complex’ electronic quantum ring 들이 dynamic steady-state를 이룰 것이다.

PQR 발진의 Rayleigh toroid는 여러 각도의 나선형으로 진행하는 광파들 즉 삼차원 WG 모드들의 다발을 내포하게 된다(그림 5). 상기한 electronic quantum wire의 삼차원 상태를 단순화한 2차원 pseudoquantum wire ring들이 WG 모드 다발(manifold)들을 여기시킨다고 가정하자. 이러한 삼차원 WG 발진의 문턱전류값을 계산함에 있어서, 소자의 toroid 구조를 측면단위길이가 반파장인 광양자테들의 동심원형태의 2차원 어레이로 본다. 이때 광양자테들의 측면 단위 길이를 반파장으로 하는 것은 toroid 형태의 공진기에서 형성되는

광파 다발의 횡단면을 볼 때 가상되는 반파장 간격의 peak들로 이루어져 있는 paraxial lightwave의 특징을 반영하기 위함이다. 각각의 광양자테에 대해 transparency carrier 밀도는[12]

$$N_{tr} = (\sqrt{2m_C/\pi\hbar}) \times 1.072\sqrt{k_B(T+273)}$$

로 주어진다. 그때 전체 quantum wire ring들에 대한 투명 전류 $I_{tr}^{Rayleigh}$ 는 하나의 quantum wire ring에 대한 투명 전류 I_{tr}^{PQR} 에 Rayleigh WG 밴드 내부에 존재하는 quantum wire ring들의 개수 χ 를 곱한 양이다. I_{tr}^{PQR} , χ , 그리고 $I_{tr}^{Rayleigh}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$I_{tr}^{PQR} = N_{tr}\pi\phi e/\eta\tau,$$

$$\chi = W_{Rayleigh}/(\lambda_{PQR}/2n_{eff}),$$

$$I_{tr}^{Rayleigh} = \chi I_{tr}^{PQR}$$

$$= W_{Rayleigh}/(\lambda_{PQR}/2n_{eff}) (N_{tr}\pi\phi e/\eta\tau)$$

여기서 ϕ 는 소자 직경, η 는 양자 효율, τ 는 캐리어 수명을 나타낸다. 표1에서 소자의 직경에 따른 계산된 Rayleigh bandwidth와 이 안에 형성되는 광양자테의 개수를 도시하였다. 투명 전류에 고유 손실 $a_i = 5 \text{ cm}^{-1}$ [17]과 거울 손실에 의한 항들[12]을 추가로 고려함으로써 다음과 같은 PQR 발진에 대한 문턱 전류에 대한 표현식을 얻을 수 있다.

$$I_{th} = I_{tr}^{Rayleigh} + I_i + I_{mirror}$$

$$= \left(\frac{\pi n_{eff} e N_{tr} w}{\lambda_{PQR} \tau} \right) \phi^2 + \left(\frac{\pi d e a_i w}{2 g_{1D} \tau} \right) \phi$$

$$+ \left(\frac{d e w \ln R^{-1}}{2 g_{1D} \tau} \right) \phi, \quad (1)$$

여기서 $w = 1 - n_{eff}/n = W_{Rayleigh}/R$ 로서 normalized Rayleigh bandwidth이며, d 는 활성층의 두께, $g_{1D} = 8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ [17]은 미분 이득 계수이다. 이 공식은 상대적으로 매우 작은 거울 손실을 제외하면, 제곱 특성을 보여주고 있다(즉, $I_{th} \propto \phi^2$). 그림6은 소자의 거칠기로 인한 산란 손실에 의한 점진적 차이를 제외하면, 계산값과 실험치가 매우 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. PQR 모드는 VCSEL 모드에 비해 상대적으로 큰 0.5 nm의 선폭을 갖는다. 좀 더 정교한 epitaxy, lithography, 그리고, 예정 공정에 의해 이러한 산란 손실을 줄일 수 있다.

또한, Mesa의 직경이 6 μm 인 PQR 레이저의 근접

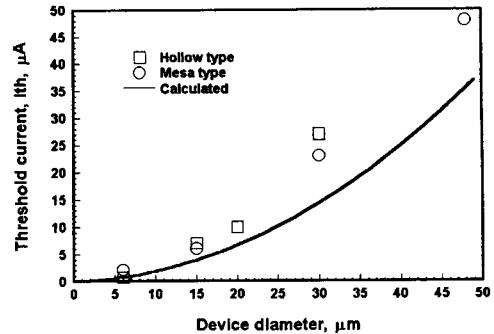


그림 6 Size-dependent PQR threshold currents. The solid curve is from Eq. 1, the circles are from cylindrical, and the squares are from hollow PQR threshold currents measured.

장 축정 실험 중 문턱 전류 이하 특정 구간에서 필드의 세기가 깜박이는 현상을 발견하였다. 이 실험적 사실은 Ikeda의 비선형 미디엄으로 이루어진 Ring cavity system에서의 chaos 현상과 연결 지어 이해할 수 있다[18, 19]. 이 소자의 근접장 축정은 상온에서 CW 모드로 수십 nA 씩 주입 전류를 증가시키면서 CCD를 통해 소자 표면의 근접장 패턴을 관측하는 것으로 이루어졌다. 주입 전류를 10 nA에서부터 1 μA 까지 증가시켰을 때 30 nA에서 100 nA 사이의 근접 필드 출력 세기가 시간에 따라 변하는 현상이 관측되었다(그림 7). 그러나 100 nA 이상의 주입 전류에 대해서는 다시 안정적인 출력 파워를 보였다. 그림 8는 주입 전류에 따른 필드 세기를 나타낸 것이다. 주입 전류가 증가함에 따라 필드 세기의 평균값은 증가하고 fluctuation하는 폭도 증가하는 것으로 나타났다. 이 사실로부터 PQR 레이저는 문턱 전류 이하에서 원통형 활성층에서 문턱 전류 이전에 이미 gain 관련 비선형성이 생성된다는 것을 간접적으로 보여준다. 이 현상은 앞으로 계속 연구될 것이며 PQR 레이저의 동작 메커니즘을 규명하는데 중요한 단서를 제공할 것으로 보인다.

한편, GaAs계 광소자를 기존의 CMOS VLSI와 접속하는 smart pixel에 관한 연구가 활발한데[20], 이 방법은 CMOS 회로의 고집적도, 저가격, 낮은 전력 손실 등의 장점을 그대로 유지하면서, 칩상에 혼성 접촉된 광소자로부터 2차원의 입출력을 가능하게 하므로, 많은 데이터의 입출력을 필요로 하는 광 interconnect 응용에 쓰일 수 있으며, 칩과 광섬유간의 직접적인 데이터 교환 역시 가능하게 된다[21].

최근 기술은 기본적으로 VCSEL 소자를 이용한 것

이 주류를 이루고 있으나, VCSEL 소자의 문턱전류가 mA급이므로, 실제 동작시에 dynamic 또는 static power 소비로 인한 과열문제는 어레이의 집적도를 제

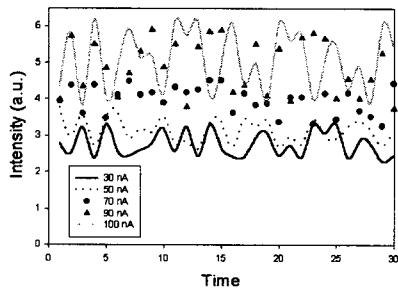


그림 7 Intensity versus time.

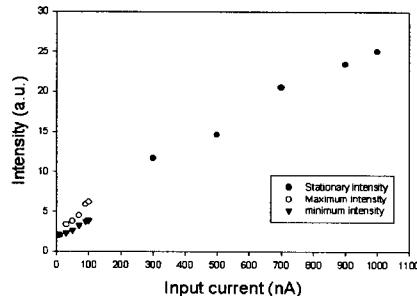


그림 8 Intensity versus injection current.

한시기며, 성능의 저하와 더불어 전류 주입으로 야기되는 소자의 온도 상승에 비례하는 파장변화라는 단점이 항상 따라다니게 된다. 반면, PQR 레이저는 VCSEL 발진 이전에 즉, VCSEL 문턱전류 이하의 크기에서 이미 발진하는 모드로서 μ A급의 극소전류로 작동되고, 작동온도 범위내 파장 변화라는 문제점을 극복함으로 말미암아 대규모 집적도를 가질 수 있는 VLSI-PIC(Photonic Integrated Circuit) 기술의 창출을 가능하게 한다.

다음 그림 9에 PQR 레이저를 구동할 수 있는 CMOS transceiver 회로를 설계하고, 제작된 칩의 layout을 나타내었다. Flip-chip bonding을 수행하면 1Gbps의 광변조가 가능하게 된다. 즉, 극소 문턱전류 특성을 가지고, 수십 μ A영역에서 동작하는 PQR 레이저와 고집적, 저가의 CMOS VLSI를 flip-chip bonding을 통해 혼성집적을 수행함으로써, 3D-chip 형태의 OEIC 개발의 근간을 마련하고, 차세대 광 송/수신기, LAN 스위치 등 고속 데이터 처리 시스템의 개발에 선두적 역할을 할 것이다.

또한, PQR(photonic quantum ring) 레이저가 시각도에 따라 상이한 출력 스펙트럼을 갖는다는 현상을 근거로 한 각도 및 고도를 측정 할 수 있는 시스템 개발이 가능하다. 즉, PQR 레이저의 발진 모드는 주입전류의 증가로 인한 온도 변화에 대해서 파장의 변화가 거의 일정하고 매우 안정적이다. 따라서 PQR 레이저를 사용하여 그림 10과 같이 특정 파장만을 겸출하여 각도 정보를 추출해내는 OASIS(optical angle-sensing integrated spectrum) 장치를 개발함으로써, 이를 이용한 차량 인식 시스템, 공장 자동화, 물류 자동화 등 광자동화 (Optomation: Optical Automation) 시스템의 구현이 가능하다.

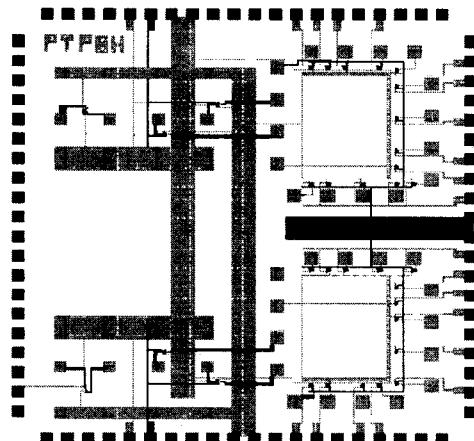


그림 9 Total layout of $0.6\mu\text{m}$ CMOS-based transceiver circuits

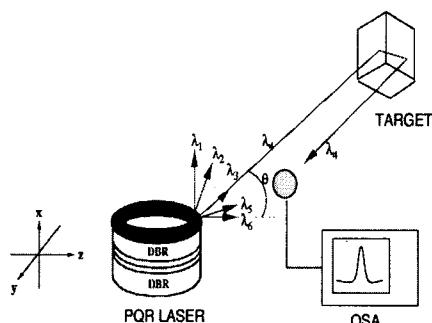


그림 10 Schematic of the OASIS system

VI. 결 론

결론적으로 본 논문에서는 VCSEL과 같은 극미세 공진기에서 자연발생되는 toroid 형태의 공진기로부터, μ A 금의 극소전류특성과 two-threshold 연속 발진 특성, 출력 파장의 \sqrt{T} -의존성, $\lambda/2$ 의 광파적 배열 특성, chaos를 갖는 PQR 발진 현상을 보였다. 이 PQR 소자는 Photonics와 Electronics의 고밀도 접착화를 가능하게 하는 열쇠가 될 수 있을 것이다.

[References]

- [1] S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, and R. A. Logan, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 289 (1992).
- [2] A. F. Levi, R. E. Slusher, S. L. McCall, T. Tanbun-Ek, D. L. Coblenz, and S. J. Pearton, *Electron. Lett.* **23**, 1010 (1992).
- [3] T. Baba, M. Fujita, A. Sasaki, M. Kihara, and R. Watanabe, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9**, 878 (1997).
- [4] Lord Rayleigh, "The problem of the whispering gallery", *Scientific Papers* 5, pp. 617-620. (Cambridge University, Cambridge, England, 1912).
- [5] M. K. Chin, D. Y. Chu, and S. T. Ho, *J. Appl. Phys.* **75**, 3302 (1994).
- [6] O'Dae Kwon, J. C. Ahn, and H. Y. Kang, Post-deadline Paper Tech. Dig. OECC'97, Seoul, Korea, 8-11 July 1997, pp. 6-7, paper PDP1-3.
- [7] J. C. Ahn, H. Y. Kang, and O'Dae Kwon, Proc. SPIE **3283**, pp. 241-251, Optoelectronics '98, San Jose, CA, 24-30 January 1998.
- [8] J. C. Ahn, K. S. Kwak, B. H. Park, H. Y. Kang, J. Y. Kim, and O'Dae Kwon, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 536 (1999).
- [9] K. S. Kwak, J. C. Ahn, B. H. Park, J. Y. Kim, and O'Dae Kwon, "Size and temperature effect of a photonic quantum ring device", ISCS'98, Nara, Japan, Oct. 1998
- [10] B. H. Park, J. C. Ahn, K. S. Kwak, and O'Dae Kwon, "Photonic Quantum Ring Laser", IPC'98, Taipei, Taiwan, Dec 15-18, 1998
- [11] J. C. Ahn, H. Y. Kang, N. J. Son, B. H. Park, K. S. Kwak, Y. H. Lee and O'Dae Kwon, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 2134 (1997). High-order transverse VCSEL modes here showed T-dependent spectra as well.
- [12] A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 1033 (1988).
- [13] G. W. Taylor and P. A. Evaldsson, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-30**, 2262 (1994).
- [15] P. Avouris, *Phys. Today* **11**, 17 (1993).
- [16] V. S. Letokhov and V. G. Minogin, *Phys. Reports* **73**, 1 (1981).
- [17] P. S. Zory, *Quantum well lasers* (Academic, San Diego, 1993).
- [18] R. G. Harrison, and D. J. Biswas, *Nature*, **321**, 394 (1986).
- [19] K. Ikeda, *Optics Communications*, **30**, 257 (1979).
- [20] T. K. Woodward, A. V. Krishnamoorthy, A. L. Lentine, K. W. Goossen, J. A. Walker, J. E. Cunningham, W. Y. Jan, L. M. F. Chirovsky, and R. E. Leibenguth, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 423 (1996).
- [21] A. V. Krishnamoorthy, L. M. F. Chirovsky, W. S. Hobson, R. E. Leibenguth, S. P. Hui, K. W. Goossen, J. A. Walker, and L. A. D'Asaro, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 128 (1999).