

# 파장가변 레이저 다이오드 기술

정영철 · 김근철

(광운대학교 전자공학부/전자통신공학과)

## 1. 서론

레이저 다이오드(LD: Laser Diode)는 1962년 발명 이후, 다양한 응용 분야의 코히어런트 광원으로 인식되어 많은 연구가 진행되어 오고 있다[1-3]. 레이저 다이오드는 고체(solid-state) 레이저, 가스 레이저, 다이(dye) 레이저에 비하여 작은 크기, 높은 효율, 저가격, 그리고 소자에 인가되는 주입전류의 변화만으로도 수십 GHz 정도까지 변조할 수 있다는 장점이 있다. 또한 브래그(Bragg) 반사단, 외부 광변조기와 같은 반도체 소자를 한판 집적할 수 있어, 낮은 삽입 손실, 뛰어난 기계적 배열(mechanical alignment) 안정성 등을 기대할 수 있다.

그 중 파장가변 레이저 다이오드는 WDM (Wavelength-division multiplexing) 통신 시스템 및 광스위칭 시스템 등에서 중요한 소자로 인식되어 많은 연구가 진행되었으며, 현재 상용화에 근접해 있다.

파장가변 레이저 다이오드는 크게 두 가지로 구분된다. 첫째는 레이저의 튜닝 파장을 조절하는 격자, 파장선택 필터와 같은 동가거울이 레이저의 외부에 있는 하이브리드 파장가변 레이저 다이오드이고, 둘째는 하나의 칩으로 된 monolithic 파장가변 레이저 다이오드이다. 다시 monolithic 파장가변 레이저 다이오드는 동작 원리와 구조에 따라 여러 가지로 구분된다. 다전극 DFB-LD(Distributed Feedback LD)[4-5], 다전극 DBR-LD(Distributed Bragg Reflector LD), TTG-LD, vertical coupler filter LD, SGDBR-LD(Sampled Grating DBR LD), SSGDBR-LD(Super Structure DBR LD) 등이 있다. 파장 가변 범위가 수십 nm 이상이 요구되는 경우에는 vertical coupler filter LD, SGDBR-LD, SSGDBR-LD 등이 유망하다.

## 2. 파장 가변 레이저

많은 광통신 시스템에서 안정적이고 좁은 선폭(linewidth)을 가진 파장 가변 레이저가 요구되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 다전극 DFB-LD와 DBR-LD에 관하여 많

은 연구가 진행되어 왔다. 1980년대 초에 능동 영역과 수동 격자 반사기 영역 그리고 그 뒤에 가변 영역을 함께 사용한 DBR (Distributed-Bragg-Reflector)-LD 개발에 많은 노력이 기울여 졌다. 초기의 DBR-LD는 파장 가변 광원을 목적으로 한 것이 아니라, 수동 도파로와 다른 광소자를 집적시키려는 과정에서 나온 것이기 때문에 파장 가변에 한계가 있고 넓은 파장 가변을 얻기에는 부적합한 것이었다. 그림 1은 일반적인 DBR-LD의 개략도를 보여주고 있다. 이 레이저는 능동(active) 영역, 브래그(Bragg) 영역, 그리고 위상 조절(phase-control) 영역의 세 부분으로 이루어져 있으며, 각 영역에는 서로 다른 전류를 독립적으로 인가할 수 있다. 능동 영역은 광자(photon)을 생성하는 영역으로, 이 영역에 임계전류 이상의 전류를 주입하면 가전자대의 캐리어보다 전도대의 캐리어 수가 더 많은 반전상태가 된다. 능동 영역이 반전상태가 되면 밴드갭(bandgap) 에너지에 대응되는 파장의 빛이 외부로 출력되면, 출력된 빛의 양은 대역경계 부근에서의 방출(emission)양에서 흡수(absorption)양을 뺀 양이다. 위상 조절 영역과 DBR 영역의 밴드갭 에너지는 능동 영역의 밴드갭 에너지보다 크기 때문에, 위상 조절 영역과 DBR 영역을 수동 영역이라고 한다. 수동 영역은 레이저의 발진 파장을 가변하는 영역으로, 수동 영역 중 한 영역 또는 두 영역에 전류를 인가하면, 그 영역의 캐리어 밀도는 증가하고 플라즈마 효과에 의해서 굴절율은 감소한다. 수동 영역 중 DBR 영역의 굴절율이 감소하면 브래그 파장은 단파장 영역으로 이동하고, 위상 조절 영역의 굴절율이 감소하면 공진 모드의 파장이 단파장 영역으로 이동한다. 따라서 DBR 영역에 가하는 전류는 굴절율을 변화시킴으로써 브래그 파장을 변화시키는데 쓰인다[6].

$$\lambda_B = 2n_{eff}A \tag{1}$$

여기서,  $n_{eff}$ 는 브래그 격자의 유효 굴절율(effective refractive index)이고  $A$ 는 새겨진 격자의 주기이다. 이와 같이 브래그 파장은 유효 굴절율과 격자 주기의 함수가 되고 외부로부터의 온도 변화나 전류가 인가되면 유효 굴절율이 변하게 되어 브래그 파장은 달라지게 된다. 위상 조절 영역

으로 인가되는 전류는 DBR 영역으로부터 되돌아 오는 feedback의 위상을 바꾼다. 이 세 영역에 인가되는 전류의 조절로 약 5-7 nm의 파장 가변이 가능하다.

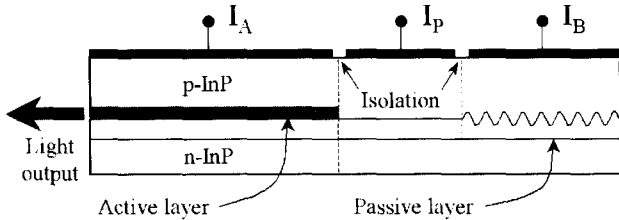


그림 1. 3-전극 DBR-LD의 개략도

1980년대 중반에 등장한 2-전극과 3-전극 파장 가변 DBR-LD는 오늘날까지도 파장 가변 레이저로서 많이 사용되고 있다.

다전극 DBR-LD외에 다전극 DFB-LD도 파장 가변 레이저로서 중요한 역할을 해왔다. 사실 다전극 파장 가변 DFB-LD는 전형적인 DFB-LD와 제조 공정이 거의 유사하다. 그림 2에 나타난 것처럼 단지 윗부분의 p-contact을 두 개 내지는 그 이상으로 나누어 줌으로써 파장 가변을 실현할 수 있는 것이다.

기술적으로 쉬워 보이는 반면 실제 파장 가변 원리는 복잡하고 그 조정 또한 어렵다. DFB-LD에 있어서 파장 가변은 유효 선폭 증가 인자(effective linewidth enhancement factor),  $\alpha_{H,eff}$ 의 변화에 의해 얻어질 수 있다[7]. 유효  $\alpha_H$ 는 물질(material)  $\alpha_H$ 에 좌우되는데, 물질  $\alpha_H$ 는 레이저의 전 영역에 걸쳐 일정한 값을 갖는다. 하지만 각 영역에 다른 전류를 인가하면 각 영역의 유효  $\alpha_H$ 는 달라지게 되고 파장 변화를 일으키게 된다. 그렇지만 불균일한 유효  $\alpha_H$ 는 노이즈를 발생 시키기도 하고 레이저가 불안정해지면 self-pulsating을 발생 시킬 수도 있다[8].

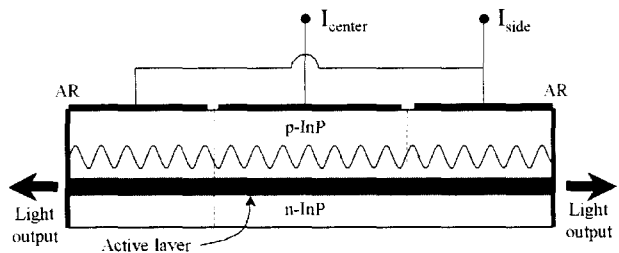


그림 2. 다전극 DFB-LD의 개략도

TTG(Tunable Twin-Guide) DFB-LD[9]는 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 일반적인 DFB-LD의 윗부분에 또 다른 수동 도파로를 집적하여 tuning layer로 사용하는 구조이다. TTG DFB-LD의 경우 tuning layer에 인가하는 하나의 전류 제어으로써 파장 가변을 할 수 있다. Tuning layer에 가해지는 캐리어는 굴절율의 감소를 일으키고 그에 따라 브래그 파장이 작아지게 된다.

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta n}{n_0} \Gamma, \lambda_0 \quad (2)$$

여기서,  $n_0$ 는 유효 굴절율,  $\lambda_0$ 는 자유 공간 파장(free space wavelength), 그리고  $\Gamma$ 는 tuning layer에서의 구속 인자(confinement factor)이다.

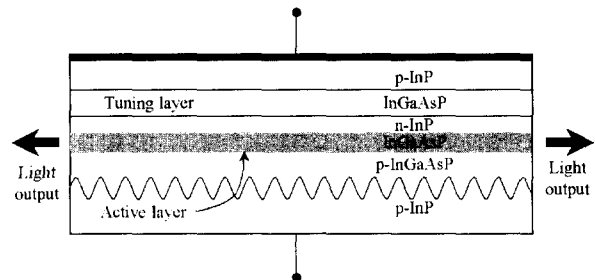


그림 3. TTG(Tunable Twin-Guide) DFB-LD의 개략도

### 3. 광대역 파장 가변 레이저

1990년대 초에 새로운 광대역 파장 가변 레이저가 개발되었다. 여러 요소로 이루어진 두 개의 거울로 구성된 것, grating-assisted codirectional couplers를 사용한 vernier-effect tuning enhancement 구조, Y-branch 구성[10], 그리고 이동 micromechanical mirror[11-12]가 쓰인 VCSEL 등이 여기에 포함된다.

그림 4는 sampled grating DBR(SGDBR)을 나타낸 것으로, 이것은 30 nm 이상의 파장 가변 범위를 가진 최초의 소자이다[13]. 그림 5에는 SGDBR-LD의 파장 가변 개념이라 할 수 있는 vernier mirror tuning 개념을 간단하게 나타내었다. 그림 5에서 보여지는 것과 같은 다른 파장 간격을 가진 두 개의 반사 comb를 얻기 위하여 SGDBR-LD는 여러 요소로 이루어진 서로 다른 두 개의 SGDBR을 사용한다.

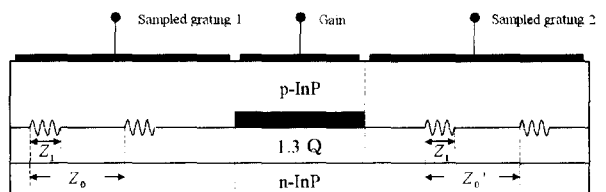


그림 4. 3-전극 SG(Sampled Grating) DBR-LD의 개략도

Sampling grating이란 일반적인 grating에서 주기적으로 grating을 제거한 것을 나타낸다. 이 주기적인 grating의 변조는 반사율의 피크가 주기적으로 나타나는 반사 스펙트럼을 이끌어 낸다. 그림 5에서 나타나는 바와 같이, 각각의 SGDBR의  $R_1, R_2$  두 개의 반사 스펙트럼의 주기는 약간 어긋나 있다. 이 레이저에서의 발진은 두 반사 스펙트럼의 피크가 겹쳐지는 파장에서 일어난다. 피크 사이의 간격들이

다르기 때문에 피크들 중 오직 한 쌍만이 동시에 겹쳐지게 된다. 일반적으로 직접적인 굴절률 변화에 의한 파장 가변 범위는 작다. 그래서 피크들 사이의 범위는 양쪽 SG DBR 을 함께 가변하여 얻을 수 있다. 두 SG DBR 사이의 피크 간격의 차( $P_2 - P_1$ )는 각 SG DBR의 피크 간격보다 훨씬 작기 때문에 한쪽 SG DBR의 적은 굴절률 변화에도 바로 옆에 위치하는 반사율 피크가 겹쳐지게 되며, 약간의 굴절률 변화에 비해 발진 파장은 크게 변화한다. 이것을 vernier effect라고 한다. SG DBR의 반사율 피크 간격은 sampling 주기에 크게 좌우된다.

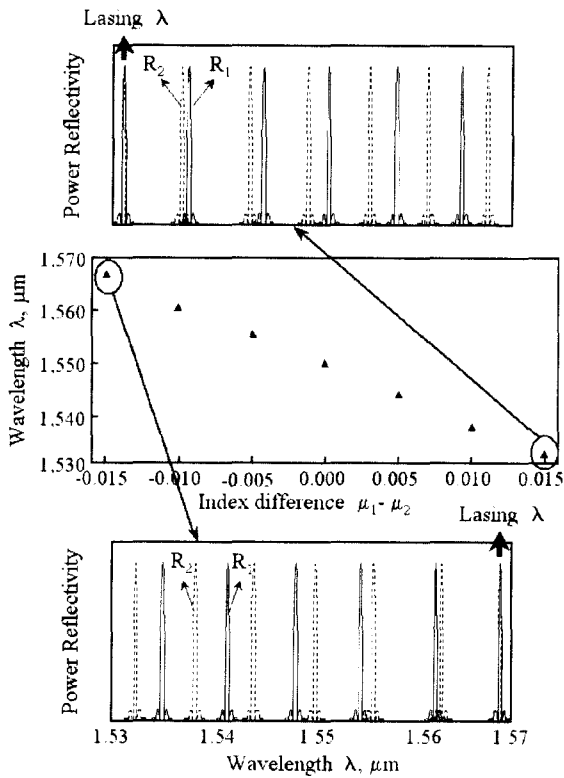


그림 5. 주기적인 반사 피크를 갖는 SG DBR-LD의 불연속 파장 가변

$$P = \frac{\lambda^2}{2\mu_g Z_0} \quad (3)$$

여기서,  $\mu_g$ 는 군굴절률(group refractive index)이다. SGDBR-LD는 높은 모드 억압(mode suppression)을 유지하면서 파장 가변 범위를 얻을 수 있기 때문에 그러한 광대역 파장 가변 레이저 중에서도 독특하다. 이러한 특징은 넓은 범위에 대해 하나의 넓은 대역 필터 대신에 여러 개의 좁은 통과 대역 필터를 사용함으로써 얻을 수 있다[1].

SGDBR-LD의 공통 도파로 디자인의 중요한 특징은 같은 제조 공정을 사용하여 쉽게 집적할 수 있다는 것이다. 이것은 특히 SGDBR에서 더 쉬운데 그것은 능동, 수동, 그리고 격자 영역이 레이저 제조 공정에서 이미 선택적으로 정해져 있고, 거기에 증폭기, 변조기, 필터, 그리고 파장 모

니터 등을 같이 집적할 수 있다. 모두 SGDBR에 필요한 공정 외에 부가적인 재성장이나 처리 과정 없이 얻을 수가 있는 것이다.

그림 6에서 보여지는 superstructure-grating DBR(SSG-DBR)은 SGDBR의 많은 부분의 특성을 공유한다. 이 경우 요구되는 반사 스펙트럼은 SGDBR에서처럼 크기 변조에 의한 것이 아니라 격자의 위상 변조를 사용하여 얻을 수 있으며, Grating chirping을 조절하여 임의의 피크 크기 분포를 얻을 수 있다[14]. 그러나 격자를 형성하는 것이 매우 어렵기 때문에 일반적으로 직접적인 e-beam 리소그래피 기술이 필요하다. 또한 반사 영역 전체에 걸쳐 격자가 존재하기 때문에 반사 영역에서의 캐리어 수명도 반사 영역의 대부분에 격자가 없는 SGDBR보다 낮다.

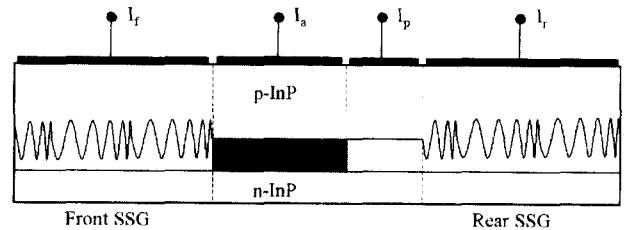


그림 6. SSG DBR-LD의 개략도

처음 동작 가능한 SGDBR의 결과가 발표되고 난 뒤 바로 최초의 grating-assisted codirectional coupler (GACC)를 적용한 1550 nm 파장가변 레이저 다이오드가 개발되었다 [15]. 이 LD의 불연속 파장 가변 범위는 57 nm 정도로 발표 되었지만 SMSR이 25 dB 이하로 측정되었다. 그 후 SMSR이 상당한 수준까지 개선 되었지만 vertical-coupler filter(VCF)의 산발적인 파장 가변 특성은 고유한 것으로 사료된다.

GACC 필터 대역폭 문제의 해결책은 GACC의 한쪽 거울로써 SGDBR을 추가하는 것이다. 이 방법은 near-in 모드들이 SG-DBR에 의해 반사되지 않기 때문에 더 나은 SMSR을 제공한다. GCSR[Grating-assisted Codirectional coupler laser with rear Sampled grating Reflector] 이라 불리는 이 레이저의 첫번째 결과는 [16]에 발표되었다.

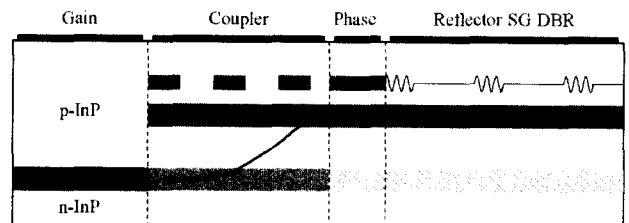


그림 7. GCSR의 개략도

그림 7에서 보여지는 것과 같이 GCSR 구조는 두 개의 세로로 된 도파로(vertical waveguide), 세 개의 다른 밴드갭(bandgap) 영역, 횡축으로 세 번의 구조 변화, 두 개의

다른 격자 등으로 된 비교적 복잡한 구조로써 SG-DBR 레이저보다 훨씬 더 제작하기가 어렵다.

마지막으로 언급할 일체형 파장 가변 레이저는 1550 nm 파장 가변 VCSEL이다. 이것을 동작 가능하게 만들 수 있다면 그 효과는 상당할 것이다. 현존하는 GaAs 소자와 비슷하게 제작된다면, 제작 비용은 현저히 감소할 것이며 다른 소자들과 수직방향 집적(vertical integration)이 훨씬 쉬워질 것이다. Fused mirror를 사용한 1550 nm VCSEL[17], 단일 성장 과정(single-growth step)에 대한 몇 가지 초기의 발표[18-19]와, all-epitaxial 구조, 등 여러 발표들이 있었으나 아직 파장 가변이 되는 것은 없다. 때문에 일체형 파장 가변 VCSEL의 개발을 위한 노력과 연구는 현재에도 계속되고 있다.

#### 4. 결 론

파장 가변 레이저는 다중 채널(multichannel) 코히어런트(coherent) 광통신 시스템과 다중 파장 packet 스위칭 네트워크에서 중요한 역할을 담당할 것이다.

지금까지 살펴본 바와 같이 파장 가변 레이저는 여러 가지 형태로 발전되어 왔다. 현재 시스템에 사용될 수 있게 알맞은 파장 범위를 갖는 적합한 구조의 많은 레이저들이 나오고, 어떤 것들은 변조기나 SOA(semiconductor optical amplifier)와 함께 일체형으로 집적되기도 한다. 그리고 더 큰 파장 가변 범위를 얻기 위하여 그러한 소자들을 배열시키는 형태로도 발전할 것이다.

광대역 파장 가변 레이저도 역시 많은 발전이 있었고, 두 가지가 유망하다고 보인다. 하나는 vernier effect를 이용한 여러 요소로 이루어진 거울(SGDBR 또는 SSGDBR)이고, 다른 하나는 GACC에 SGDBR을 도입한 GCSR이다. 둘 다 100 nm 이상의 파장 가변 범위를 갖고 있고, 높은 SMSR(side mode suppression ratio)를 유지하면서도 60 nm 이상의 파장 가변을 할 수가 있다. 그리고 가까운 시일 내에 상용화도 가능할 것으로 보인다. 하지만 둘 다 전극이 4개 정도로 그 조절에 아직 문제점이 보이지만, 이 해결책 또한 연구 중에 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] Vijaysekhar Jayaraman, Zuon-Min Chuang, and Larry A. Coldren, "Theory, Design, and Performance of Extended Tuning Range Semiconductor Lasers with Sampled Gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, 1993.  
 [2] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Long Wavelength Semiconductor Lasers*. New York : Van Nostrand Reinhold. 1986.  
 [3] M. S. Brella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy,

and B. Mukherjee, "Optical components for WDM Lightwave networks," *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1274-1307, 1997.  
 [4] B. Tromborg, H. Olesen, X. Pan, and S. Saito, "Transmission line description of optical feedback and injection locking for Fabry-Perot and DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 11, pp. 1875-1889, Nov. 1987.  
 [5] H. Olesen, X. Pan, and B. Tromborg, "Theoretical analysis of tuning properties for a phase-tunable DFB laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 12, pp. 2367-2375, Dec. 1988.  
 [6] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication System*. New York : Wiley. 1997.  
 [7] Markus-Christian Amann, Jens Buus. *Tunable Laser Diodes*. Norwood : Artech House. 1998.  
 [8] Bandelow, U. et al, "Theory of selfpulsations in two-section DFB lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 1176-1179, 1993.  
 [9] M. -C. Amann, S. Illek, C. Schanen, and W. Thulke, "Tuning range and threshold current of the tunable twin-guide(TTG) laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 9, pp. 253-254, 1989.  
 [10] O. Hildebrand, M. Schilling, D. Baums, W. Idler, K. Dutting, G. Laube, and K. Wunstell, "The Y-laser : A multifunctional device for optical communication systems and switching networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 2066-2075, 1993.  
 [11] M. C. Larson and J. S. Harris, "Wide and continuous wavelength tuning in a vertical-cavity surface-emitting laser using a micromachined deformable-membrane mirror," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, pp. 891-893, 1996.  
 [12] M. Li, W. Yuen, G. S. Li, and C. J. Chang-Hasnain, "Top-emitting micromechanical VCSEL with a 31.6 nm tuning range," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 18-20, 1998.  
 [13] V. Jayaraman, D. A. Cohen, and L. A. Coldren, "Demonstration of broadband tunability in a semiconductor laser using sampled gratings," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60, no. 19, pp. 2321-2322, 1992.  
 [14] H. Ishii, H. Tanobe, F. Kano, Y. Tohmori, Y. Kondo, and Y. Yoshikuni, "Quasicontinuous wavelength tuning in super-structure-grating(SSG) DBR lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, p. 433-441, Mar. 1996.  
 [15] R. C. Alferness, U. Koren, L. L. Buhl, B. I. Miller, M. G. Young, T. L. Koch, G. Raybon, and C. Burrus, "Broadly tunable InGaAsP/InP laser based on a vertical coupler filter with 57-nm tuning

- range," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60, pp. 3209-3211, 1992.
- [16] M. Oberg, S. Nilsson, K. Streubel, J. Wallin, L. Backbom, and T. Klinga, "74 nm wavelength tuning range of an InGaAsP/InP vertical grating assisted codirectional coupler laser with rear sampled grating reflector," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 735-738, 1993.
- [17] K. A. Black, P. Abranham, A. Keating, Y. J. Chiu, E. L. Hu, and J. E. Bowers, "Improved luminescence from InGaAsP/InP MQW active regions using a wafer fused superlattice barrier," in *IPRM Conf. Proc.*, 1999, pp. 271-276.
- [18] J. Boucart, C. Starck, F. Gaborit, A. Plais, N. Bouche, E. Derouin, L. Goldstein, C. Gortin, D. Carpentier, P. Salet, F. Brillouet, and J. Jacquet, "1-mW CW-RT monolithic VCSEL at 1.55  $\mu\text{m}$ ," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 629-631, June 1999.
- [19] W. Yuen, G. S. Li, R. E. Nabiev, J. Boucart, P. Kner, R. Stone, D. Zhang, M. Beaudoin, T. Zheng, C. He, K. Yu, M. Jansen, D. P. Worland, and C. J. Chang-Hasnain, "High-performance 1.6  $\mu\text{m}$  single-epitaxy top-emitting VCSEL," in *Conf. Lasers Electro-Optics Proc.*, San Francisco, CA, 2000, paper CPD1.