

## 외부 공진기 레이저 구현을 위한 평면도파로 격자 제작

임종훈 · 임균 · 이경식<sup>†</sup>

성균관대학교 정보통신공학부 광통신연구실  
Ⓣ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

송정환 · 조재걸 · 정선태 · 오윤경

삼성전자 정보통신총괄 통신연구소 광소자 Lab  
Ⓣ 442-370 경기도 수원시 팔달구 매탄동

(2004년 4월 6일 받음, 2004년 11월 17일 수정본 받음)

평면도파로 (Planar Lightwave Circuits)를 수소처리한 후 격자를 제작하였다. 성장특성 분석 결과 격자는 거듭제곱식 (power law)에 따라서 성장되는 것을 알 수 있었다. 격자의 성장특성을 이용하여 외부 공진기 레이저용 평면도파로 격자를 설계하고 제작한 결과 예상치와 거의 일치하는 격자 특성을 얻을 수 있었고, 제작된 격자로 구현된 외부 공진기 레이저에서 ~40dB의 인접모드억압비 (side mode suppression ratio)를 갖는 단일모드 발진을 관측할 수 있었다.

주제어 : Gratings, External Cavity Laser, Planar Lightwave Circuits.

### I. 서 론

근래 인터넷의 발달과 멀티 미디어 서비스 비중의 증가로 통신용량이 급격히 증가하였고, 이를 충족시키기 위한 연구 개발의 결과로 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 광전송 기술과 FTTH(Fiber-To-The-Home) 구현을 위한 광 액세스 네트워크 기술이 개발되었다. 현재 이와 같은 기술을 이용한 광통신 시스템에는 광섬유 및 벌크 형태로 이루어진 광통신 소자들이 사용되고 있는데, 최근 하이브리드 집적 기술을 이용한 평면도파로(Planar Lightwave Circuits) 집적 형태의 소자<sup>[1,2]</sup>로 기존 소자들을 집적시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 평면도파로 집적 소자는 기존의 광섬유 및 벌크 형태의 소자들을 평면도파로와 함께 단일 칩으로 구성하여 집적하므로 소형이며 안정적이고, 단위 공정으로 만들어진 단일 웨이퍼에 의해서 다수의 소자를 생산할 수 있으며, 대량생산을 통한 우수한 가격 경쟁력을 지니고 있어서 향후 기존의 광통신 소자들을 대체할 것으로 예상된다. 특히 FTTH 구현을 위한 광송수신용 모듈은 생산성 및 가격 경쟁력이 요구되는 소자이므로 평면도파로 집적 기술에 대한 효용성이 크다고 할 수 있다.

브래그 격자(Bragg grating)를 이용한 외부 공진기 레이저 (External Cavity Laser)는 레이저의 증폭 매질에 비하여 뛰어난 온도 안정성을 갖는 브래그 격자에 의해서 발진 파장을 안정화시킬 수 있다는 장점이 있어서 WDM 광통신 시스템의 광원으로 적합하다.<sup>[3,4]</sup> 평면도파로 집적 형태의 외부 공

진기 레이저는 평면도파로 집적 소자가 가지는 장점을 그대로 가지므로 많은 관심을 끌고 있다. 현재 평면도파로 외부 공진기 레이저용으로 많이 사용되고 있는 평면도파로 격자는 식각에 의한 굴절률 변화로 야기되는 격자로서 위상 마스크를 이용한 자외선 노출에 의한 격자에 비해 가변성이 낮고 추가 공정이 필요하다는 단점이 있다. 최근에는 ITU-T의 채널 규격에 적합한 다채널 집적 광원을 구현하기 위해 격자 특성의 가변성이 우수한 자외선 노출 방법을 이용한 평면도파로 격자를 적용하기 위한 연구<sup>[5-7]</sup>가 진행중이며, 이에 대한 제작 및 그 활용분야에 대한 가능성은 제기되었으나 성장특성에 대한 집중적인 연구는 거의 다루어진 바 없다.

본 논문에서는 광감도(photosensitivity)를 가지는 실리콘 평면도파로를 수소 처리하여 광감도를 향상시키고, 위상 마스크를 이용한 자외선 노출 방법으로 평면도파로 격자를 제작하여 그 성장특성을 분석하여 보았다. 또한 관측된 성장특성을 바탕으로 외부 공진기 레이저용 평면도파로 격자를 설계하고, 제작 및 측정하여 설계치와 비교하였고, 제작된 평면도파로 격자로 외부 공진기 레이저를 구성하여 그 특성을 살펴보았다.

### II. 평면도파로 격자의 성장특성

위상 마스크를 이용한 자외선 노출 방법으로 평면도파로 격자를 제작하였다. 사용된 평면도파로는 40  $\mu\text{m}$ 의 두께의 클래딩과  $6.5 \times 6.5 \mu\text{m}$  크기의 코어를 가지며 각각의 Ge 농도는 2.1 wt%, 13.5 wt%였다. 평면도파로 코어의 굴절률은 1.456 이고 굴절률차  $\Delta n$ 는 0.75%였으며, 도파손실은 0.03 dB/cm였

<sup>†</sup> E-mail: kslee@skku.ac.kr

다. Ge가 첨가되어 광감도가 있는 실리카 평면도파로의 광 감성을 높이기 위해서 수소를 코어 내에 확산시키는 수소 처리법<sup>[8]</sup>을 사용하였다. 수소처리시의 수소처리 시간, 압력, 온도 및 도파로 구조는 코어 내로 확산되는 수소 분자의 농도에 영향을 미치는데, 평면도파로의 경우 코어 중심의 수소 농도를 나타내는 확산 방정식<sup>[9]</sup>에 의하면, 수소처리 시간이 증가함에 따라서 코어 내로 수소 농도가 점차 증가하다가 포화되고 수소처리 압력이 클수록 포화되는 수소 농도가 커지는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 수소 농도의 차이에 따른 격자 성장 특성의 변화를 없애기 위하여 상온의 온도와 100 atm의 기압으로 포화가 발생하는 시간인 4일 이상동안 충분히 수소처리함으로써 ~11 Kppm의 일정한 수소 농도를 가질 수 있도록 수소 처리하였다.

수소 처리된 평면도파로에 위상 마스크를 정렬하고 KrF 엑시머 레이저( $\lambda=248$  nm, 5 Hz)에서 나온 자외선 빔을 원통형 렌즈를 통해서 집속하여 조사시킴으로써 평면도파로 코어의 굴절률 변화를 야기하여 격자를 형성하였다. 엑시머 레이저에 가해지는 동작 전압을 변화시킴으로써 레이저에서 나오는 펄스당 노광량(fluence)  $F_p$ 를 조절하고, 자외선 빔을 가변적으로 차단할 수 있는 빔 차단기를 이용하여 격자의 길이  $L$ 을 조절함으로써 여러 가지 제작 조건에서의 평면도파로 격자 성장 특성을 분석하였다. 그림 1은 평면도파로 격자에서 노출 시간에 따른 격자의 투과 스펙트럼 변화를 나타낸 그림이다. 이 때 격자주기는 533.65 nm이었고, 격자의 길이는 5 mm이었으며, 레이저 노광량은 485 mJ/cm<sup>2</sup>이었다.

노출시간  $t$ 가 증가함에 따라서 평면도파로 격자가 성장하여 격자의 강도와 대역폭이 증가하였으며, 중심파장은 장파장쪽으로 이동하였다. 결합모드 이론에 따르면<sup>[10,11]</sup>, 격자의 반사율  $R$ 과 대역폭  $\Delta\lambda$ 는 각각 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = \tanh^2 \left[ \frac{\eta n L \Delta n}{\lambda} \right] \quad (1)$$

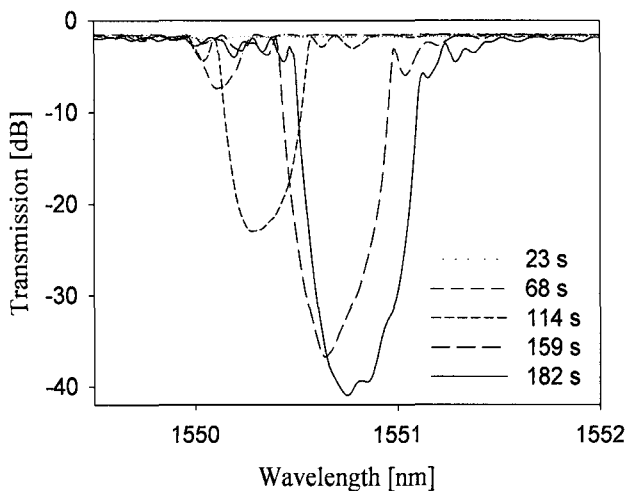


그림 1. 노출 시간에 따른 평면도파로 격자의 투과 스펙트럼 변화.

$$\Delta\lambda = (\lambda^2 / 2\pi n_{eff} L) \sqrt{(n\pi L \Delta n / \lambda)^2 + \pi^2} \quad (2)$$

여기서,  $\eta$ 는 도파로를 진행하는 빔의 코어 내부로의 응집률을 나타내며 0.85로 추정하였고,  $\Delta n$ 은 굴절률 변화량,  $n_{eff}$ 는 유효 굴절률을 나타낸다. 식 (1)과 (2)에 의하면 자외선 노출에 의한 굴절률 변화량을 나타내는  $\Delta n$ 이 증가할수록 격자의 반사율과 대역폭이 증가하여 격자가 성장하는 것을 알 수 있다. 격자 성장시  $\Delta n$ 은 상대적으로 반사율이 적은 연성 격자(weak grating)일 경우 반사율에 대한 식 (1)을 이용하여 구할 수 있고, 반사율이 100%에 가까운 강성 격자(strong grating)에서는 대역폭에 대한 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다. 일반적으로, 노출시간  $t$ 의 증가에 따라  $\Delta n$ 은 비선형적인 증가관계를 갖는데 단일-광자 흡수 모델(one-photon absorption model)<sup>[12]</sup>과 거듭제곱식(power law)에 따르면,  $\Delta n$ 은 노출시간  $t$ 의 함수로 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta n = \Delta n_{max} [1 - \exp(-At)] \quad (3)$$

$$\Delta n = Ct^b \quad (4)$$

여기서,  $\Delta n_{max}$ 는 최대 굴절률 변화량이고,  $At$ 는 자외선 빔의 강도를 나타낸다. 그림 2는 그림 1의 평면도파로 격자에서 노출 시간에 따른 반사율을 나타낸 그림이다. 점선은 단일-광자 흡수 모델을 적용해서 곡선맞춤한 선으로서  $\Delta n_{max}$  값으로는 실험 결과로 측정된  $8.6 \times 10^{-4}$  값이 사용되었으며, 실선은 거듭제곱식을 이용한 맞춤곡선으로  $C=2.3 \times 10^{-7}$ ,  $b=1.53$ 이었다.

실험결과에 의하면 광섬유 격자의 경우와 유사하게<sup>[12]</sup>, 단일-광자 흡수 모델에 의한 곡선맞춤보다는 거듭제곱식에 의한 곡선맞춤이 더 잘 맞았다. 다양한 제작 조건 변화에 따른 성장특성의 변화를 알아보기 위해 5 mm길이의 격자 외에 3 mm길이의 격자도 동일한 레이저 노광량으로 제작해 보았다.

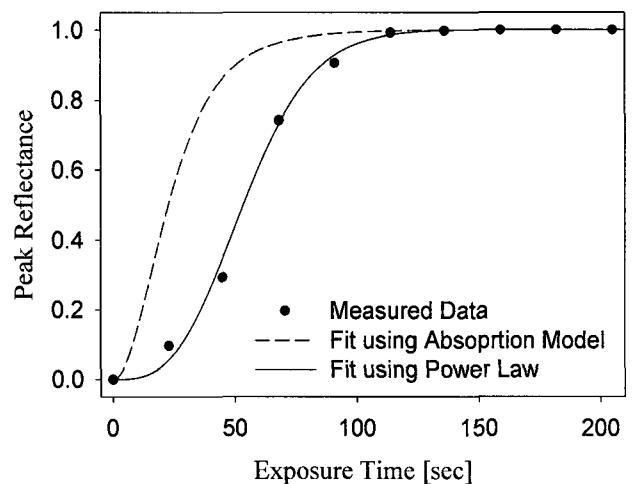


그림 2. 노출 시간에 따른 평면도파로 격자의 반사율 변화.

점 : 측정치, 점선 : 흡수 모델에 의한 맞춤 곡선, 실선 : 거듭제곱식에 의한 맞춤 곡선

또한, 294 mJ/cm<sup>2</sup>의 레이저 노광량에서도 3 mm와 5 mm길이의 격자를 제작하였는데, 모든 경우에서 거둬제공식에서의 곡선맞춤 값으로 잘 설명되었다. 표 1에 서로 다른 네 가지 실험 조건에서의 곡선맞춤 파라미터값을 열거해 보았다.

총 레이저 노광량 F는 격자 제작 과정에서 고려할 중요한 요소로서, 레이저의 펄스당 노광량 F<sub>p</sub>에 총 펄스 수를 곱한 값으로 정의된다. 일반적으로 엑시머 레이저의 펄스당 노광량은 사용되는 가스의 소모 정도에 따라서 제어 불가능하게 변하게 되는데, 이와 무관하게 총 펄스 수를 조절함으로써 제어가 가능한 총 레이저 노광량을 기준으로 격자의 성장 특성을 관측한다면 좀 더 효과적인 분석이 가능하다. 총 레이저 노광량과 굴절률 변화량 Δn이 거둬제공식<sup>[13]</sup>에 의존함을 알아보기 위하여 동일한 총 레이저 노광량에서의 네 가지 실험 조건에 따른 Δn의 평균 값들을 다음 형태의 거둬제공식으로 곡선맞춤하였다.

$$\Delta n = AF^B \quad (5)$$

그림 3의 실선은 A=8.8×10<sup>-8</sup>, B=1.47로 곡선 맞춤한 선이며, 각 조건에서의 Δn 값들의 제곱평균(RMS) 에러를 나타내는 에러바는 펄스당 레이저 노광량의 변동에 의한 것이라고 예측된다. 여러 가지 서로 다른 조건에서 얻어진 파라미터값은 표 1과 같다.

표 1. 여러 가지 격자제작 조건에서의 파라미터 값들

| L[mm] | Fp[mJ/cm <sup>2</sup> ] | 식 (4)                 |      | 식 (5)                 |      |
|-------|-------------------------|-----------------------|------|-----------------------|------|
|       |                         | C(×10 <sup>-7</sup> ) | b    | A(×10 <sup>-8</sup> ) | B    |
| 3     | 294                     | 2.7                   | 1.37 | 9.5                   | 1.46 |
|       | 485                     | 3.7                   | 1.44 | 8.9                   | 1.48 |
| 5     | 294                     | 1.2                   | 1.53 | 8.9                   | 1.46 |
|       | 485                     | 2.3                   | 1.53 | 8.1                   | 1.48 |

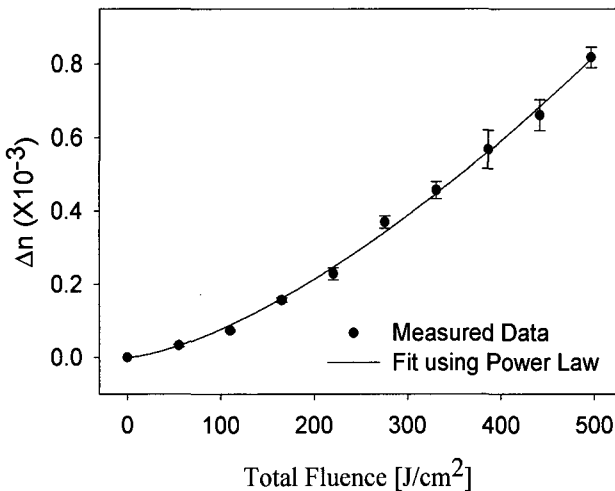


그림 3. 총 레이저 노광량 증가에 따른 굴절률 증가.  
 점 : 측정치들의 평균값, 실선 : 거둬제공식(A=8.8×10<sup>-8</sup>, B=1.47)에 의한 맞춤 곡선, 에러바 : 제곱평균 에러

### III. 외부 공진기 레이저용 평면도파로 격자 제작

외부 공진기 레이저 구성에 사용될 평면도파로 격자의 대역폭과 반사율을 각각 0.9 nm과 0.55로 설계하였다. 격자길이가 1 mm일 경우 설계 조건을 만족시키기 위해서는 5.5×10<sup>-4</sup>의 굴절률 변화량 Δn이 요구되었고, 앞 장에서 얻은 A=8.8×10<sup>-8</sup>, B=1.47 값과 식 (5)로부터 382 J/cm<sup>2</sup>의 총 레이저 노광량이 요구되었다. 그림 4는 529 mJ/cm<sup>2</sup>의 레이저 노광량으로 144초간 조사시킴으로써 요구되는 총 레이저 노광량을 만족시켜 제작한 평면도파로 격자의 투과 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 측정된 대역폭과 반사율이 각각 ~0.95 nm, ~0.55로 설계치와 거의 일치하여 평면도파로 격자의 성장 특성이 거둬제공식과 결합모드 이론에 의해 잘 설명됨을 알 수 있다.

제작된 평면도파로 격자와 600 μm 길이를 갖는 FP-LD를 이용하여 외부 공진기 레이저를 구성하였다. FP-LD의 후면 반사경의 반사율은 80%였으며, 전면 반사경은 외부 공진기 레이저 발진시 불필요한 반사 특성을 억제할 수 있도록 ~1%의 반사율로 반사방지(antireflection) 코팅되었다.<sup>[7]</sup> FP-LD 전면과 평면도파로 격자를 포함하는 도파로면의 공극(air gap)을 포함한 외부 공진기의 길이는 2.1 mm이었다. 평면도파로 격자를 이용하여 외부 공진기 레이저를 구성하기 전의 발진 스펙트럼과 구성한 후의 발진 스펙트럼을 각각 그림 5(a)와 그림 5(b)에 나타내었다. 여러 개의 다중 모드로 발진되던 FP-LD는 평면도파로 격자의 중심 파장에서 ~40 dB의 인접모드억압비(side mode suppression ratio) 특성을 갖는 안정된 단일모드로 발진하여 제작된 평면도파로 격자가 외부 공진기 레이저의 외부 반사경으로 효과적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

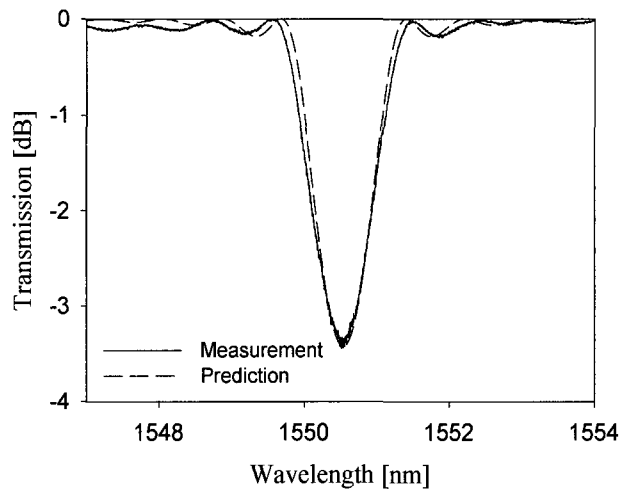
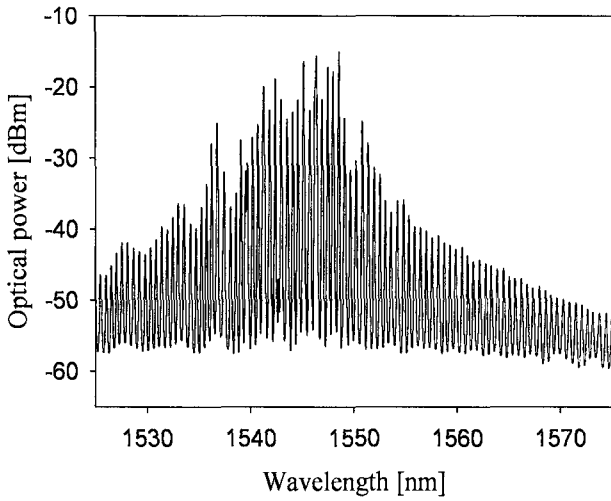
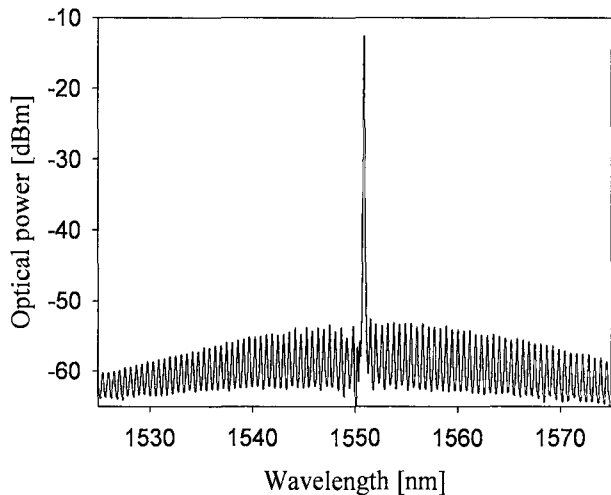


그림 4. 평면도파로 격자의 투과 스펙트럼.  
 실선 : 측정치, 점선 : 예상치



(a)



(b)

그림 5. 외부 공진기 레이저 (a) 구성 전의 FP-LD의 발진 스펙트럼과 (b) 구성후의 발진 스펙트럼.

#### IV. 결 론

Ge가 도핑된 실리카 평면도파로를 수소처리하여 광감도를 향상시킨 후, 여러 가지의 제작조건으로 평면도파로 격자를 제작하여 그 성장 특성을 살펴보았다. 평면도파로 격자의 성장특성은 결합모드 이론과 거듭제곱식  $\Delta n = A F^B$  ( $A = 8.8 \pm 0.7 \times 10^{-8}$ ,  $B = 1.47 \pm 0.01$ )에 의해 잘 묘사되었다. 분석된 평면도파로 격자의 성장특성을 이용하여 외부 공진기 레이저용 평면도파로 격자가 설계, 제작되었고 제작된 평면도파로 격자의 대역폭과 반사율은 거듭제곱식과 결합모드 이론에 의해 예상했던 값과 거의 일치함을 알 수 있었다. 제작된 평면도파로 격자와 FP-LD를 이용하여 외부 공진기 레이저를 구성하였고, 외부 공진기 레이저 구성 전의 FP-LD 출력 스펙트럼과 외부 공진기 레이저의 출력 스펙트럼을 측정하였다. 제

작된 평면도파로 격자에 의하여 다중 모드로 발진되던 FP-LD는  $\sim 40\text{dB}$ 의 인접모드억압비를 갖는 외부 공진기 레이저로 동작하여, 제작된 평면도파로 격자가 외부 반사경으로 효과적으로 이용될 수 있음을 확인하였다. 분석 방법과 분석된 성장특성 결과들은 WDM 및 FTTH 구현에 이용될 평면도파로 외부 공진기 레이저의 제작에 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

- [1] H. Takahashi, "Planar lightwave circuit devices for optical communication: present and future," *Proceeding of SPIE, Active and Passive Optical Components for WDM Communication III*, vol. 5246, pp. 520-531, 2003.
- [2] T. Miya, "Silica-based planar lightwave circuits: passive and thermally active devices," *IEEE J. Selected Topics In Quantum Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 38-45, 2000.
- [3] J.-I. Hashimoto, T. Takagi, T. Kato, G. Sasaki, M. Shigehara, K. Murashima, M. Shiozaki, and T. Iwashima, "Fiber-Bragg-grating external cavity semiconductor laser(FGL) module for DWDM transmission," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 9, pp. 2002-2009, 2003.
- [4] T. Sato, F. Yamamoto, K. Tsuji, H. Takesue, and T. Horiguchi, "An uncooled external cavity diode laser for coarse-WDM access network systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 7, pp. 1001-1003, 2002.
- [5] T. Tanaka, Y. Hibino, T. Hashimoto, M. Abe, R. Kasahara, M. Ishii, Y. Inoue, and Y. Tohmori, "100-GHz spacing eight-channel light source integrated with gratings and LDs on PLC platform," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 1348-1350, 2002.
- [6] T. Tanaka, Y. Hibino, T. Hashimoto, R. Kasahara, Y. Inoue, A. Himeno, M. Itoh, M. Abe, H. Ohashi, and Y. Tohmori, "PLC-type hybrid external cavity laser integrated with front-monitor photodiode on Si platform," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 2, pp. 95-96, 2001.
- [7] F. Le Gall, S. Mottet, N. Devoldere, J. Landreau, "External cavity laser for DWDM access network," in *European Conf. on Optical Communication '98*, Madrid, Spain, pp. 285-286, 1998.
- [8] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, and W. A. Reed, "High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 13, pp. 1191-1193, 1993.
- [9] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, (Oxford University Press, London, England, 1975).
- [10] R. Kashyap, *Fiber Bragg Grating*, (Academic Press, San Diego, USA, 1999), pp. 409-441.
- [11] T. Erdogan, "Fiber Grating Spectra," *J. Lightwave Technol.*,

vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294, 1997.  
[12] H. Patrick, and S. L. Gilbert, "Growth of Bragg gratings produced by continuous-wave ultraviolet light in optical fiber," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 18, pp. 1484-1486, 1993.

[13] V. Grubsky A. Skorucak, D. S. Starodubov, and J. Feinberg, "Fabrication of long-period fiber gratings with no harmonics," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 87-89, 1999.

## Fabrication of gratings in Planar Lightwave Circuits for External Cavity Laser

Jong Hoon Lim, Gun Lim, and Kyung Shik Lee<sup>†</sup>

*School of Information and Communications Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: kslee@skku.ac.kr*

Jeong Hwan Song, Jaegeol Cho, Suntae Jung, and Yunkyung Oh

*Network Research Team, Telecomm R&D Center, Samsung Electronics, Suwon, Korea*

(Received April 6, 2004, Revised manuscript November 17, 2004)

Bragg gratings were fabricated in Ge-doped silica planar lightwave circuits (PLC) for different writing conditions to study the growth characteristics. The refractive index modulation of the gratings grew in the PLC with total fluence  $F$  according to the power law  $\Delta n = AF^B$ . The characteristics of the PLC gratings formed for external cavity lasers match closely to those predicted by the power law. The oscillation spectra of the FP-LD with a Bragg grating grown in the PLC waveguide were also presented.

OCIS Codes : 050.2770, 140.3460, 230.7390