

論文98-35D-6-3

Strained MQW DFB 레이저의 광출력에 따른 Linewidth Enhancement Factor의 변화

(Variations of the Linewidth Enhancement Factor of Strained MQW DFB Laser with Output Power)

吳 玗 京 * , 郭 桂 達 **

(Yun-Kyung Oh and Kae Dal Kwack)

요 약

Fiber dispersion을 이용한 소신호 응답특성으로부터 1.55 μm strained MQW DFB 레이저의 linewidth enhancement factor α 및 fiber 분산을 측정하였다. 측정된 fiber 분산값은 16.766~16.786ps/nm/km로 일반적인 단일모드 fiber의 분산값을 잘 나타내었다. 레이저의 실제 동작조건에서 α 의 변화를 관찰하기 위하여 광출력의 변화에 따른 α 의 변화를 측정하였는데 광출력 증가에 따라 α 값도 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 아직까지의 어떤 측정보다도 정확히 non-linear gain에 의한 α 의 변화를 설명할 수 있었다.

Abstract

The linewidth enhancement factor α and fiber dispersion of 1.55 μm strained multi-quantum well laser diodes are measured using small signal power modulation transfer function in a dispersive fiber. The measured fiber dispersion values are between 16.766 and 16.786ps/nm/km and these are the expected values from standard single mode fiber. To measure the α parameter in the actual operational range of the laser diodes, the dependence of α on laser output power is measured. The α parameter increases linearly as the power of the laser diode increases. This result can explain the non-linear gain effect on the α parameter more accurately than any other measurements.

I. 서 론

1.55 μm 의 파장을 사용하는 초고속 광통신 시스템은 Erbium-Doped Fiber Amplifier(EDFA)의 도입으로 전송 거리에 대한 제한은 거의 없어지고 있지만 광 fiber의 분산과 고속 변조에 의한 광원의 주파수

흔들림(chirping)으로 인해 전송 bit rate와 거리의 곱으로 표현되는 시스템의 성능이 제한된다^[1,2]. 현재 2.5Gbps 광통신 시스템에서는 레이저 다이오드를 직접 변조하는 방법을 사용하고, 이 경우 chirping은 신호의 turn-on/turn-off 시 발생하는 transient chirp (dynamic chirp)과 DC 상태의 adiabatic chirp으로 나눌 수 있다. transient chirp의 정도를 나타내는 파라미터인 linewidth enhancement factor α 는 레이저의 구조 및 동작 조건에 따라 변화하고 특히 단일 파장을 갖는 DFB(distributed feedback) 레이저에서는 grating의 coupling 계수와 공진기 길이의 곱으로 표시되는 κL 의 변화나 파장 detuning 등에 의해서

* 正會員, 三星綜合技術院 光電子 Lab.

(Photonics Lab., Samsung Advanced Institute of Technology)

** 正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Electronic Eng. Dept., Hanyang Univ.)

接受日字:1997年11月17日, 수정완료일:1998年6月3日

도 α 값이 변화하기 때문에^[3,4] 정확한 α 값의 측정이 필요하다. 또한 인가 전류의 변화(광출력의 변화)에 따른 α 값의 변화는 계산상으로는 그 변화가 예측이 되었지만^[5,6], 이를 실제로 측정하여 확인하기는 쉽지 않다^[7-9].

α 를 측정하는 방법은 sub-threshold 영역에서의 optical spectrum부터 differential gain을 측정하여 계산하는 방법^[10-12] 과, 직접적인 방법으로 transient chirp을 구해 그것으로부터 α 값을 계산하는 방법 등이 사용되고 있다^[13]. 앞의 방법은 sub-threshold 영역에서 측정한 값을 사용하기 때문에 실제로 동작하는 영역에서의 α 값을 알 수 없으며 negative chirp을 갖는 광원에 적용할 수 없다. 두 번째 방법은 실제 동작 조건과 같은 상태에서 직접적으로 파장이 변화하는 것을 나타내기 때문에 가장 유용한 방법이라 할 수 있지만 데이터 처리가 쉽지않고 직접 변조되는 레이저 다이오드의 경우에는 구동전류의 변화에 따른 파장의 변화인 adiabatic chirp의 영향이 같이 나타나기 때문에 α 의 해석이 어렵다. 또다른 방법으로 분산을 갖는 fiber를 이용하여 network analyzer로 α 및 fiber 분산을 함께 측정하는 방법이 발표되었고 이것은 adiabatic chirp을 갖는 직접변조 레이저의 α 측정에 도 적용이 가능하다^[7,14,15].

본 논문에서는 이 방법을 이용하여 1.55 μ m strained multi-quantum well 구조의 DFB 레이저의 인가전류변화에 따른 α 와 fiber 분산을 측정하였다. 이 방법을 통해 SL-MQW DFB 레이저에서의 광출력에 따른 α 값의 변화를 측정하였다. 레이저의 출력이 증가함에 따라 α 가 선형적으로 증가하는 현상을 보였으며 이것은 non-linear gain에 의한 효과로 설명할 수 있었다.

II. 측정이론

Chirping은 레이저의 출력이 변화할때 그에 따른 위상의 변화로 발진파장이 변화하는 것을 말하며 이때 광파의 전자장은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$E = \sqrt{P} e^{j\phi} \quad (1)$$

여기서 P는 광의 세기를 나타내며 ϕ 는 전자장의 위상을 나타낸다. 이 위상의 변화가 광의 세기에 따라

어떻게 변화하는가를 나타내는 linewidth enhancement factor α 는 다음식으로 주어진다.

$$\delta\phi = \frac{\alpha\delta P}{2P} \quad (2)$$

직접변조 레이저의 경우에는 변조시 레이저의 파장이 전류의 크기에 따라 변화하는 adiabatic chirp을 갖는데 이 효과를 무시하기 위해서는 충분히 작은 소신호 변조를 하여 adiabatic chirp에 의한 위상의 변화를 무시할 수 있도록 해야 한다. 소신호 변조되어 나오는 광출력을 변조주파수 f와 변조폭 m을 갖는 다음과 같은 식으로 가정하고

$$P = P_0(1 + m \cos(2\pi ft)) \quad m \ll 1 \quad (3)$$

식(1)과 식(2)에 대입하여 정리하면 전자장 E는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$E = \sqrt{P_0} \left\{ 1 + m \frac{1+ia}{4} e^{i2\pi ft} + m \frac{1-ia}{4} e^{-i2\pi ft} + O(m^2) \right\} \quad (4)$$

여기서 $O(m^2)$ 항은 m^2 을 포함하는 항으로, 가정에서 $m \ll 1$ 로 하였기 때문에 무시할 수 있다.

$P=1/2(E^*E)$ 이고 이 전자장이 fiber를 통과할 때 각 항은 각각 조금씩 다른 속도로 진행하고 그때의 propagation 상수를 대입하여 P에 대해 정리한 후 주파수 성분을 포함한 식만을 정리하면 다음과 같이 된다^[15].

$$P_f = \frac{1}{2} P_0 m \sqrt{1 + \alpha^2} \left| \cos\left(\frac{\pi \lambda^2 DL f^2}{c} + \tan^{-1}(\alpha)\right) \right| \quad (5)$$

여기서 D는 fiber의 분산(dispersion), L은 fiber 길이, 그리고 λ 는 레이저의 발진파장을 나타낸다. 식(5)는 cos항이 0이 될 때 resonance 점을 갖게 되고 그 주파수를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_n = \frac{c}{DL\lambda^2} \left(n + \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1}(\alpha) \right) \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

여기서 f_n 은 n번째 resonance 주파수를 나타낸다. 식에서 알 수 있듯이 f_n^2 과 n의 그래프에서 기울기로부터 DL을 계산할 수 있으며 절편으로부터 linewidth enhancement factor α 를 계산할 수 있다. 식(6)은 레이저의 소신호 대역폭이 무한대라는 가정이 포함되어 있으므로 이를 실험적으로 실현하기 위해서는 fiber를 통과하지 않은 주파수 응답을 기준으로 fiber를 통과한 응답을 표시하면 된다. 그러므로 이 방법은

레이저의 소신호 대역폭이나 모양에 관계없이 α 와 DL 값을 측정할 수 있다.

실제 레이저 칩의 slope efficiency는 0.13W/A가 된다.

III. 실험 및 고찰

측정시스템의 개요도를 그림 1에 나타내었다. ILX3742 레이저 driver로 레이저를 CW로 구동하고 TEC를 이용하여 일정온도(25°C)로 유지하였으며 외부 반사광의 영향을 제거하기 위하여 isolator를 사용하였다. 광 fiber는 일반적인 single mode fiber 76.71km를 사용하였다. Fiber의 길이는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)를 사용하여 측정하였다. 광 fiber를 통과할 때의 손실을 보상하기 위하여 EDFA를 사용하였으며 network analyzer(HP 8510C)의 신호는 50Ω impedance matching을 하여 레이저에 인가하였다. 실험에 사용된 레이저는 1.55μm의 파장을 갖는 DFB 레이저로 그 구조를 그림 2에 나타내었다. 레이저 다이오드는 MOCVD로 성장시킨 InGaAs/InGaAsP Multiple Quantum Well (MQW) 구조로 well은 0.8% compressed strained InGaAs 층으로 구성되고 barrier는 1.3μm InGaAsP 층으로 7개의 well을 형성하였다. 각각의 Well과 barrier의 두께는 40Å, 80Å 이다. Buried heterostructure를 형성하기 위하여 mesa etching 후 semi-insulating InP층을 MOCVD로 재성장하였고 그위에 contact layer를 형성하였다. 레이저의 폭 및 cavity 길이는 각각 500μm와 400μm이다. 단일모드 발진을 얻기 위하여 anti-reflection coating(5%)을 한쪽 경면에 만 하였다.

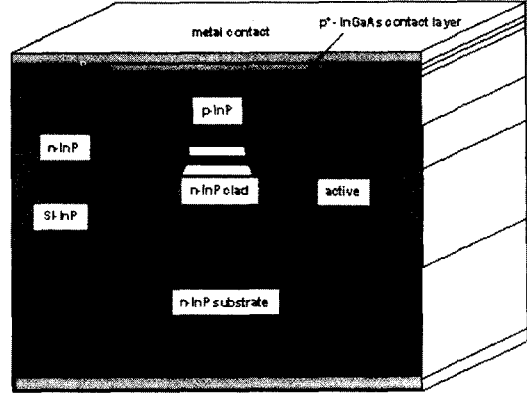


그림 2. SI 저류차단층을 갖는 레이저 구조
Fig. 2. Laser structure with SI current blocking layer.

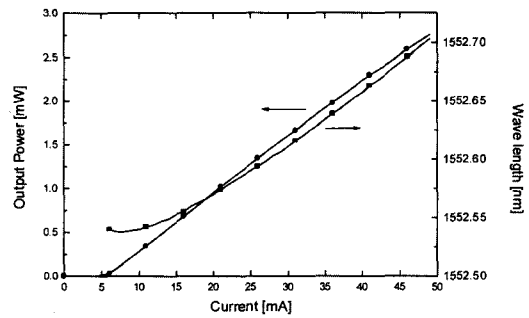


그림 3. 레이저 다이오드의 인가전류에 따른 광출력, 파장 특성
Fig. 3. Power and wavelength dependences on driving currents of the laser diode

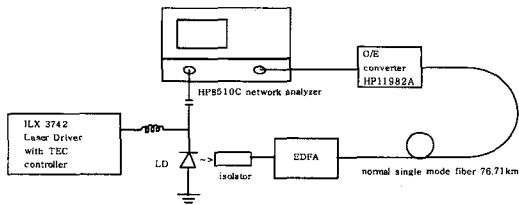


그림 1. 측정 시스템 구성도
Fig. 1. Configuration of chirp and dispersion measurement setup with dispersive fiber.

Fiber를 coupling한 후 laser의 특성을 그림 3에 나타내었다. 임계전류는 6mA, slope efficiency는 0.065 W/A로 fiber coupling efficiency 50%를 감안하면

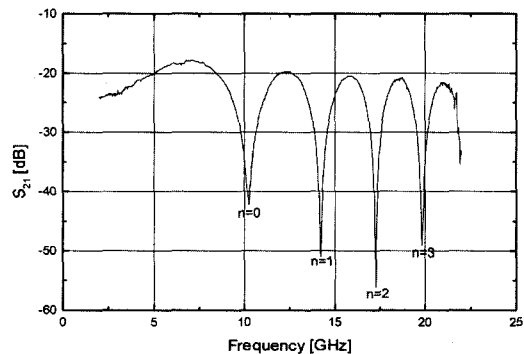


그림 4. Fiber를 통과한 후의 주파수 특성
Fig. 4. Frequency response of a laser diode and dispersive medium.

전류증가에 따른 파장의 변화(adiabatic chirp)은

0.04Å/mA 정도로 이 파장변화도 α 를 계산할때 이 용된다. 그림 4는 주파수 응답의 전형적인 모양을 나타내고 있다. 2GHz에서 22GHz 까지의 주파수 범위에서 4개의 resonance점을 확인할 수 있었으며 정확한 resonance 주파수를 결정하기 위하여 각 resonance 주파수에서 1GHz의 주파수 범위로 확대하여 레이저 구동전류(광출력)에 따른 변화를 측정하였다. 그림 5는 각 resonance 주파수의 광출력 따른 변화를 나타낸다. 광출력이 증가할수록 resonance 주파수는 감소함을 알 수 있다.

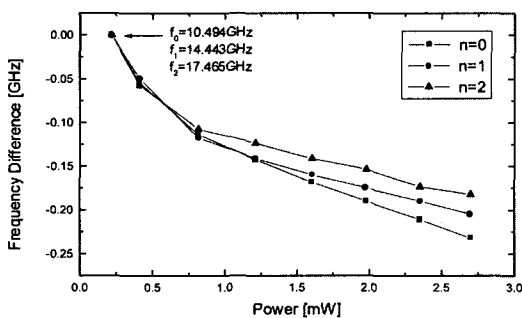


그림 5. 광출력 변화에 따른 resonance 주파수의 변화

Fig. 5. Resonance frequency dependences on laser output power.

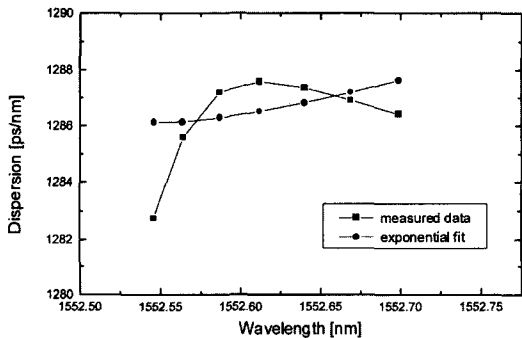


그림 6. 파장에 따른 분산의 변화

Fig. 6. Dispersion dependences on wavelength.

이 resonance 주파수로부터 계산된 fiber 분산을 파장의 함수로 그림 6에 나타내었다. 전류가 증가하면서 adiabatic chirp에 의해 파장이 증가하고 fiber 분산은 증가하여야 하지만 그림에서 보는 것과 같이 실제 측정값으로부터 계산한 분산의 변화가 최대점을 갖는 형태로 표시되는 것은 측정시 오차에 의한 것으로 그림 5의 측정값을 exponential curve fitting하여 계산

한 fiber 분산은 이 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 계산된 분산값은 16.766~16.786ps/nm/km로 일반적인 단일모드 광 fiber의 분산값으로 믿을만한 측정이 되었음을 알 수 있었다. 광출력 증가에 따른 α 값의 변화는 그림 7에 나타내었다. 그림에서 전류가 증가하여 광출력이 증가할수록 α 값은 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 그림에 resonance 점 curve fitting하여 계산한 값도 같이 표시하였는데 측정값과 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

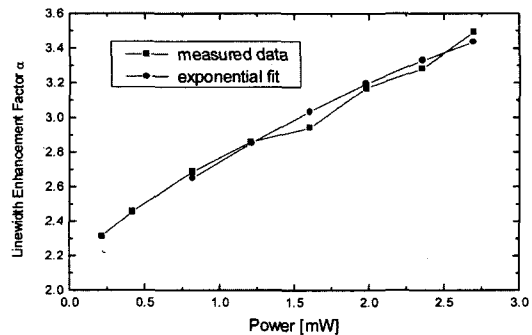


그림 7. 광출력 변화에 따른 linewidth enhancement factor의 변화

Fig. 7. Linewidth enhancement factor dependences on laser output power.

Fiber 분산은 fitting에 의해 오차를 많이 줄일 수 있었지만 첫번째 resonance 주파수 f_0 를 이용하여 계산한 α 값은, 낮은 주파수에서 소신호 응답값이 높은 주파수에 비해 상대적으로 크기 때문에 resonance값의 변화를 조금 더 정확히 측정할 수 있고 그 주파수 변화의 제곱에 비례하여 변화하기 때문에 오차가 적음을 알 수 있다. α 값이 전류증가(광출력증가)에 따라 증가하는 것은 일반적으로 non-linear gain에 의한 효과와 spatial hole burning으로 설명할 수 있다^[5,6]. 실험에 사용된 레이저는 일반적인 DFB 레이저이기 때문에 $\lambda/4$ shifted DFB 레이저에서 크게 발생하는 spatial hole burning에 의한 영향은 무시하였다^[5]. 반도체 레이저의 linewidth enhancement factor α 는 다음과 같은 식으로 정의 된다.

$$\alpha = \frac{\text{Re}(X_p)}{\text{Im}(X_p)} = -2k_0 \left(\frac{\frac{\partial n}{\partial N}}{\frac{\partial g}{\partial N}} \right) \quad (7)$$

여기서 X_p 는 전류인가에 따라 변화하는 susceptibility를 나타내고 N은 주입된 전하밀도, n은 굴절률

그리고 g 는 gain을 나타낸다. Bulk material에서의 gain은 전하밀도에 따라 선형적으로 증가하지만 quantum well 구조에서는 임계전류 이후에 에너지 레벨은 몇개의 구별되는 값을 가지며 빛을 방출하는 에너지 레벨의 전하밀도가 감소하는 non linear 형태를 갖는다. 특히 strained quantum well 구조에서는 최대 gain이 더 커지기 때문에 이 영향은 더욱 커지게 된다. 그러므로 gain은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$g(N, S) = \frac{g(N, 0)}{1 + \xi S} \quad (8)$$

여기서 S 는 photon density를 나타내고 ξ 는 non linear gain coefficient이다. 그러므로 linewidth enhancement factor α 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\alpha = \alpha_0(1 + \xi S) \quad (9)$$

여기서 α_0 는 물질의 일정한 α 값이다. Photon density는 광출력과 같은 의미를 가지므로 레이저의 출력이 증가함에 따라 α 가 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다^[6]. 또한 전류가 증가하고 출력이 증가하면서 발생하는 adiabatic chirp에 의한 파장의 증가도 α 의 증가에 영향을 주지만 파장의 변화가 작기 때문에 그 값은 미약하다^[11]. 그러므로 광출력이 증가함에 따라 α 가 선형적으로 증가하는 것은 non-linear gain에 의한 효과로 설명할 수 있다. 이미 발표된 광출력 변화에 따른 α 의 측정값을 살펴보면 광출력 증가에 따른 α 의 증가가 나타나는 것도 있지만 그 오차값이 한 power에서 $\pm 0.25 \sim 0.5$ 정도로 큰 것^[8] 경향이 반대로 나타나거나^[9] 경향이 나타나지 않는 결과^[7] 들을 볼 수 있다. 측정의 신뢰성을 확인하기 위하여 시판되는 strained multi quantum well 구조를 가지는 레이저의 특성도 측정하였는데 우리가 제작한 레이저와 마찬가지로 광출력에 따라 α 가 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

1.55 μ m strained MQW DFB 레이저의 linewidth enhancement factor α 를 fiber dispersion을 이용한 소신호 응답특성으로부터 레이저 출력변화

에 따라 측정하였다. 이 방법은 adiabatic chirp의 영향을 무시하고 실제 동작전류에서 α 값을 측정할 수 있는 방법으로 사용한 fiber의 분산값도 함께 측정할 수 있는데 측정된 fiber 분산값은 16.766~16.786ps/nm/km로 일반적인 단일모드 fiber의 분산값을 잘 나타내었으며 파장변화에 따른 분산의 증가도 확인할 수 있었다. 레이저의 광출력 변화에 따른 α 의 변화는, 광출력이 증가하면 α 도 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 우리가 조사한 바로는 아직까지 측정된 레이저의 광출력변화에 따른 α 의 변화 중 가장 계산치와 근접한 경향을 보이는 정확한 결과로, strained MQW DFB 레이저에서의 non-linear gain에 의한 α 의 증가로 설명할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] W. Idler, D. Baums, K. Dauv, E. Lach, G. Laube, U. Koerner, M. Schilling, and K. Wunstel, "Chirp-free 2.5-Gbit/s signal generation by a monolithic Mach-Zehnder interferometer wavelength converter and transmission over 188km of standard fiber", OFC'95 Technical Digest, TuO5, pp. 73-74, 1995.
- [2] Nobuhiko Kikuchi, Shinya Sasaki, and Kenro Sekine, "10-Gbit/s dispersion-compensated transmission over 2245-km conventional (non-dispersion-shifted) fibers in a recirculating loop", OFC'95 Technical Digest, FB5, pp. 306-307, 1995.
- [3] H. Mawatari, F. Kano, N. Yamamoto, Y. Kondo, Y. Tohmori, and Y. Yoshikuni, "Spectral Linewidth and Linewidth Enhancement factor in 1.5 μ m Modulation-Doped Strained Multiple-Quantum-Well Lasers", Jpn. J. Appl. Phys. vol. 33, pp. 811-814, 1994.
- [4] H. Nishimoto, M. Yamaguchi, I. Mito, and K. Kobayashi, "High-Frequency Response for DFB LD due to a Wavelength Detuning Effect", J. Lightwave Technol., vol. 5, pp. 1399-1402, 1987.
- [5] X. Pan, H. Olesen, and B. Tromborg, "Influence of nonlinear gain on DFB laser

- linewidth", *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 1074-1076, 1990.
- [6] T. Takahashi and Y. Arakawa, "Non-linear Gain Effects on Spectral Dynamics in Quantum Well Lasers", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 106-107, 1991.
- [7] R. C. Srinivasan and J. C. Cartledge, "On Using Fiber Transfer Functions to Characterize Laser Chirp and Fiber Dispersion", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 1327-1329, 1995.
- [8] H. Nakajima and J. C. Bouley, "Observation of power dependent linewidth enhancement factor in $1.55\mu\text{m}$ strained quantum well lasers", *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 1840-1841, 1991.
- [9] M. Blez, C. Kazmierski, D. Mathoorasing, M. Quillec, M. Gilleron, H. Nakajima, and B. Sermage, "High speed ultralow chirp $1.55\mu\text{m}$ MBE grown GaInAs/AlGaInAs MQW DFB lasers", *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 1040-1042, 1992.
- [10] G. Hunziker, W. Knop, P. Unger, and C. Harder, "Gain, Refractive Index, Linewidth Enhancement Factor from Spontaneous Emission of Strained GaInP Quantum-Well Lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, pp. 643-646, 1995.
- [11] B. Zhao, T. R. Chen, S. Wu, Y. H. Zhuang, Y. Yamada, and A. Yariv, "Direct measurement of linewidth enhancement factors in quantum well lasers of different quantum well barrier heights", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 1591-1593, 1993.
- [12] Basil W. Hakki and Thomas L. Paoli, "Gain spectra in GaAs double-heterostructure injection lasers", *J. Appl. Phys.* vol. 46, pp. 1299-1306, 1975.
- [13] Jichai Jeong and Y. K. Park, "Accurate determination of transient chirp parameter in high speed digital lightwave transmitters", *Electron. Lett.* vol. 33, pp. 605-606, 1997.
- [14] A. Royset, L. Bjerkan, D. Myhre, and L. Hafskjer, "Use of dispersive optical fibre for characterisation of chirp in semiconductor lasers", *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 710-712, 1994.
- [15] F. Devaux, Y. Sorel, and J. F. Kerdiles, "Simple Measurement of Fiber Dispersion and of Chirp Parameter of Intensity Modulated Light Emitter", *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 1937-1940, 1993.

 저 자 소 개

吳玠京(正會員) 第32卷 A편 第11號 參照
 한양대학교 대학원 전자공학과 박사
 과정. 삼성종합기술원 광전자 Lab.
 전문연구원

郭桂達(正會員) 第34卷 D編 第7號 參照
 한양대학교 전자공학과 교수