

論文2000-37SD-9-1

다중양자우물의 상호 섞임 현상을 이용한 다중파장검출기의 제작 (Fabrication of Wavelength Division Demultiplexing Photodetectors Using Quantum Well Intermixing)

余 德 鎬*, 尹 炘 勳*, 金 成 俊*

(Deok Ho Yeo, Kyung Hun Yoon, and Sung June Kim)

요 약

InGaAs/InGaAsP 다중양자우물구조에 불순물없는 vacancy 확산으로 지역 선택적인 상호 섞임 현상을 유도하고, 다중 파장 검출이 가능한 집적 광도파로형 photodetector를 제작 및 측정하였다. 다중양자우물구조는 상호섞임에 의해서 밴드갭이 크게 청색편이 하였다. 집적 광수신소자는 p-i-n 구조이며, 밴드갭이 큰 영역과 작은 영역이 광도파로를 따라 일렬이 되도록 하였다. 광도파로의 폭은 20 μm 이며, 각 광수신소자의 길이는 250 μm 이다. Tunable 레이저와 편광기를 이용하여, TE/TM 편광된 빛을 광수신소자에 butt-coupling 방법으로 입사하여 소자의 파장 특성을 측정하였다. 제작된 소자는 1480 nm 와 1550 nm 파장 영역을 분리, 수광할 수 있음을 보였다.

Abstract

Utilizing impurity free vacancy diffusion(IFVD) method, area selective intermixing of InGaAs/InGaAsP multi-quantum well (MQW) structure was done. After this, wavelength division demultiplexing waveguide type photodetectors was integrated and measured. It showed large blue shift in bandgap due to intermixing of MQW. Photodetectors are based on typical p-i-n structure and devices having large and small bandgap areas line up linearly. Width of waveguide and length of each photodetector are 20 and 250 μm , respectively. TE/TM polarized light from tunable laser was butt-coupled to the photodetector and spectral response was measured. Photodetectors can demultiplexing 1480 and 1550 nm wavelength.

I. 서 론

파장분할다중방식은 향후 광통신 시스템에서 주류로 자리를 잡을 것이며, 여기에 핵심적인 기술은 파장을 분리하여 검출하는 소자이다. 이러한 기능을 갖는 광수신 소자는 서로 다른 밴드갭을 갖는 물질을 이용하여 집적할 수 있다. 서로 다른 밴드갭을 갖는 물질은

선택적 에피의 성장^[1], 양자우물내 전계에 의한 Stark 효과^[2-3], 다중양자우물의 상호섞임 현상^[4] 등을 이용하여 구현할 수 있다. 이 중 다중양자우물의 상호섞임 현상은 양자우물내의 전자와 정공의 속박에너지를 인위적으로 변화시킬 수 있는 방법이다.

InGaAs/InGaAsP 다중양자우물구조는 광도파로, 레이저, 광변조기, 광증폭기, 수광소자 등에 응용되는 기본 구조이며, III족 원소와 V족 원소의 상호섞임 현상에 의해 bandgap energy가 증가한다^[5-11]. 따라서, 상호섞임 현상을 이용하여 서로 다른 밴드갭이 필요한 소자의 집적이 가능하다. 다중양자우물구조는 불순물의 주입^[6-7], 레이저의 집광^[8], 불순물이 없는 vacancy의 확산(IFVD; Impurity free vacancy diffusion)^[9-12] 등에 의해서 상호섞임 현상이 일어난다. IFVD에 의한

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部

(School of Electrical Engineering of Seoul National University)

接受日字:2000年3月29日, 수정완료일:2000年7月3日

상호섞임 방법은 주로 산화막, 질화막 등의 유전물질 을 증착후 고온 열처리를 함으로써 이루어진다. Vacancy의 확산에 의한 방법은 간단하며, 불순물의 주입에 비해 광도파로의 제작시 자유 반송자(free carrier) 흡수에 의한 전송손실이 없다는 장점이 있다. InGaAs cap층을 갖는 InGaAs/InP 다중양자우물구조에 산화막을 증착후 고온 열처리를 하면 상호섞임 현상에 의해 밴드갭 energy의 청색편이를 얻을 수 있으며, 이용하여 저손실 광도파로를 제작할 수 있다^[12].

본 논문에서는 InGaAs cap층을 갖고 상온에서 1575 nm의 Photoluminescence (PL) peak을 갖는 InGaAs/InGaAsP 다중양자우물구조를 vacancy 확산에 의한 상호섞임 현상을 이용하여 밴드갭 energy의 증가를 보였으며, 이를 다중과장 검출기를 제작하였다. 이러한 다중과장 검출기는 향후 ATM-PON(Asynchronous-Transfer-Mode Passive Optical Network) 시스템에 PLC(Planar lightwave circuit)을 대체한 저가격, 고성능의 특성을 얻기위한 소자의 집적으로서 응용될 수 있으리라 본다^[13].

II. InGaAs/InGaAsP 다중양자우물구조의 상호섞임 현상

본 논문에서 사용한 epi의 구조는 아래 그림 1과 같다. 기판은 N-InP이며, 모든 epi층은 격자정합된 층으로서 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)에 의해 성장되었다. N-InP buffer 층 이외의 모든 epi 층은 불순물이 도핑되지 않은 진성 반도체이며, 이는 고온 열처리 과정에서 P형 불순물

U-InGaAs	0.1 μm
U-InP	0.5 μm
U-InGaAsP	0.15 μm
U-InGaAsP	0.05 μm
5 \times 84 \AA InGaAs/ 4 \times 100 \AA InGaAsP Multi quantum well structure	
U-InGaAsP	0.05 μm
U-InGaAsP	0.15 μm
N-InP buffer	1 μm
N-InP Substrate	

그림 1. 실험에 사용된 epi의 구조

Fig. 1. Epitaxial layer structure used in the experiment.

로 사용되는 Zn가 다중양자우물층으로 확산이 되는 것을 방지하는 것과 소자간의 분리를 위함이다. 다중양자우물은 두께가 84 \AA 인 InGaAs 우물 5층과 100 \AA 인 InGaAsP 장벽 4층으로 구성되어 있으며, 상온과 10K에서 PL peak의 위치는 각각 1575, 1480 nm이다.

InP-SiO₂, InGaAs-SiN_x 등의 조합에 의해서는 양자우물의 밴드갭 energy가 거의 변하지 않지만, InGaAs cap 층과 SiO₂ 유전물질의 조합에 의해서는 크게 증가된다^[10-11]. 따라서, 본 논문에서는 1700 \AA 두께의 SiO₂를 플라즈마화학기상증착 (PECVD; Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)으로 U-InGaAs cap 층위에 증착한 후 750 $^{\circ}\text{C}$ 에서 45초간 열처리하여 다중양자우물의 상호섞임을 유발하였다. 아래 그림 2와 같이 열처리 후 다중양자우물은 청색편이를 보였다. SiO₂를 증착하지 않은 시편은 고온 열처리에 의한 다중양자우물의 self-intermixing현상에 의해 43nm의 청색편이를 보였고, SiO₂를 증착한 경우 IFVD에 의해 126nm의 큰 청색편이가 나타났다. 따라서, SiO₂를 증착 및 사진공정을 통하여 밴드갭 차이가 큰 물질을 하나의 기판 위에 생성할 수 있다. 상온 PL 측정 data는 보이지 않았지만, 밴드갭의 청색 편이는 저온 PL 측정 결과와 일반적으로 비슷한 값을 보인다. 따라서, 상온에서도 SiO₂의 증착 유무에 따라서, 약 80 nm 정도의 밴드갭의 차이를 보일 것이다. 이러한 밴드갭의 차이를 활용하여, 전송 손실의 차이가 매우 큰 광도파로를 제작할 수 있다^[12].

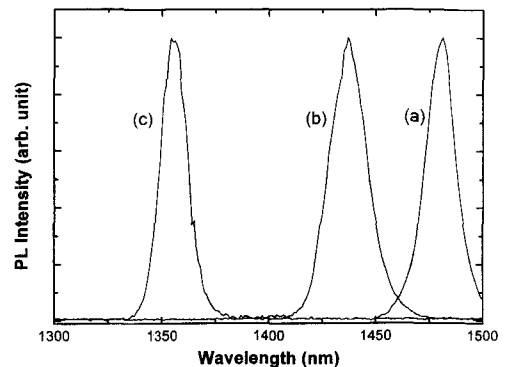


그림 2. 10 K에서 다중양자우물의 PL 스펙트럼 변화 (a) as-grown 상태, (b) SiO₂ 없이 열처리 (c) SiO₂ 증착후 열처리 한 경우

Fig. 2. Changes in PL spectrum for MQW at 10 K (a) as-grown (b) annealed without SiO₂ (c) annealed with SiO₂ dielectric material.

Ⅲ. 다중파장검출기의 제작 및 측정

다중파장검출기의 구조는 아래 그림 3과 같다. 다중파장검출기는 두 개의 광도파로형 photodetector (PD)가 집적이 되어 있으며, 전단(PD₁)과 흡수층 영역은 SiO₂를 증착후 고온 열처리를 한 영역으로 밴드갭이 크게 증가된 영역이며, 후단(PD₂)은 SiO₂를 증착하지 않고 열처리를 한 영역이다. 이러한 광도파로형 PD 구조는 광도파로를 따라서 진행되는 빛이 단파장인 경우 전단에서 검출되며 장파장의 빛은 후단에서 검출되는 구조로 되어 있다^{1,4)}. 전단의 PD에서 충분히 흡수되지 못한 빛을 제거하기 위하여 두 개의 PD 사이에는 100~900 μ m의 흡수층(D)을 별도로 두었다. 다중양자우물의 상호섭입은 epi층위에 PECVD를 이용하여 SiO₂ 유전막을 증착 후 RTA를 이용한 고온 열처리를 통한 IFVD방법에 의해 이루어진다. 본 실험에서는 1700Å의 SiO₂ 유전막 증착 후 사진공정과 HF를 이용한 습식 식각으로 밴드갭이 큰 영역(영역 I)에 SiO₂ 유전막을 남긴 후, 750°C에서 45 초간 열처리하였다. InGaAs와 InP 층에 P형 층 형성은 Zn 확산을 이용하였으며, 두 PD가 전기적으로 분리 되도록 하였다. 광도파로의 형성에는 InGaAs, InP 층을 H₃PO₄:H₂O₂:H₂O = 1:1:10 및 H₃PO₄:HCl = 4:1 혼합용액으로 InGaAsP층까지 선택적 습식 식각을 하였다. 광도파로의 폭은 20 μ m이며, 수광소자의 길이는 250 μ m이다. P-형 금속으로 Au/AuZn/Cr/Au, N-형 금속으로 AuGe/Ni/Au의 다층 금속막

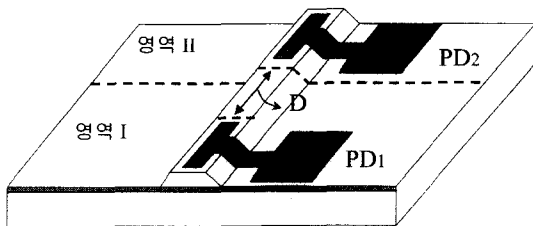


그림 3. 다중파장검출기의 구조. 샘플의 영역 I에는 InGaAs cap 층위의 SiO₂를 남긴 상태에서, 영역 II는 SiO₂를 제거한 상태에서 열처리 하였다.
Fig. 3. Schematic diagram of the wavelength division demultiplexing photodetectors. The region I was annealed with SiO₂ dielectric layer on InGaAs cap layer and the region II was without SiO₂ dielectric layer.

을 thermal evaporator를 이용하여 형성하였다. 두 개의 photodetector 사이의 저항은 I-V 곡선의 측정으로부터 10 k Ω 이상이였다.

그림 4는 인가전압이 0 V인 경우, 제작된 검출기의 단일 소자로서의 TE 및 TM 모드에 따른 광전류 특성이이다. 단일 소자들은 집적소자와 동일한 샘플위에 제작되었다. 파장범위가 서로 다른 두 개의 tunable laser를 이용하여 제작된 소자에 TE 및 TM 모드로 편광된 빛을 입사하였고, Lock-in Amplifier로 전류의 크기를 측정하였다. 소자와 단일 모드 광섬유의 결합은 butt coupling 방법으로 이루어 졌으며, 광섬유의 끝은 end-cleaved 상태였다.

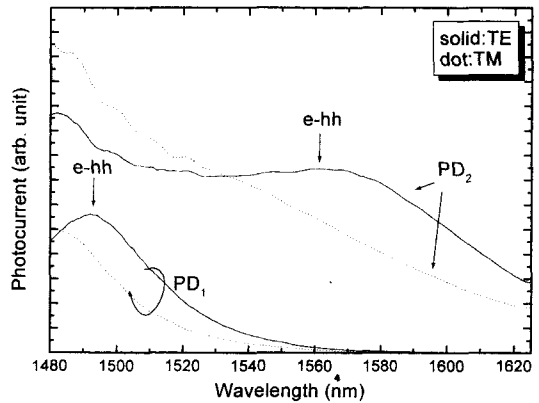


그림 4 TE 및 TM 모드에 대한 PD의 파장별 특성. PD₂의 광전류 특성으로부터 e-hh에 의한 약한 exciton peak가 1565 nm에서 볼수 있다
Fig. 4. Spectral response of the photodetectors for the TE and TM mode. For PD₂, weak exciton peak for e-hh absorption was observed at 1565 nm.

IFVD에 의해서 큰 청색편이가 일어난 PD₁은 그렇지 않은 PD₂와 비교하여 장파장의 빛에 대하여 낮은 광전류를 보이고 있다. TE 모드에 대한 특성에서 PD₂는 1565 nm의 파장에서 electron-heavy hole에 의한 약한 exciton 효과를 볼 수 있다. electron-light hole에 의한 효과는 tunable 레이저의 가변 파장영역이 이에 미치지 못하므로 확인할 수 없었다. 그림 4에서 1500 nm 이하의 파장에서는 광원으로 사용한 tunable laser의 출력이 불안정하여, 광전류가 예상보다 줄어들었음을 볼 수 있다.

그림 5와 6은 인가전압이 0V이고 흡수층의 길이가 100 μ m인 경우, 집적된 다중파장검출기에 광섬유를 통하여 TE 및 TM 모드의 빛을 입사했을 때 나타나는

광전류 특성이다. 입사된 빛은 PD₁을 거쳐 광도파로를 따라 PD₂로 진행하게 된다. 이러한 여러부분으로 나누어진 광도파로형 photodetector의 광전류는 일반적으로 아래 식 (1)과 같이 표현된다^[3].

$$I_i = \left(\frac{e\lambda}{hc} \right) P_0 \gamma (1-R) \eta \frac{\Gamma \alpha_i^{int}(\lambda)}{\alpha_i(\lambda)} \exp\left(-\sum_{k=1}^i \alpha_k(\lambda) L_k\right) \times (1 - \exp(-\alpha_i(\lambda) L_i)) \quad (1)$$

여기서, $e\lambda/hc$ 는 optical power를 광전류로 바꾸는 변환 상수, P_0 는 입력광의 세기, γ 는 결합상수, R 은 광도파로 단면에서의 반사계수, η 내부 양자 효율, Γ 는 흡수층의 confinement factor, $\alpha_i^{int}(\lambda)$ 는 i 번째 검출기의 interband 흡수 계수, $\alpha_i(\lambda) = \Gamma \alpha_i^{int}(\lambda) + \alpha_0$ 는 전체 감쇄 상수, α_0 는 광도파로의 scattering에 의한 감쇄계수이다. 위 식 (1)로부터, 단파장의 빛은 PD₁에서 흡수가 되며, 장파장의 빛은 PD₁에서 흡수되지 않고 PD₂에서 흡수됨을 알 수 있다. 따라서, PD₁의 광전류 특성은 그림 4와 같은 특성을 보이게 되며, PD₂는 PD₁과 흡수층 (D)에서 제거된 양만큼 감쇄된 광전류를 보이게된다. 따라서, PD₂는 장파장 영역에서는 파장이 감소함에 따라 광전류가 증가하며, 단파장 영역에서는 파장이 감소함에 따라 광전류가 감소된 특성을 보이게 된다^[1,4]. 그림 5는 TE 모드의 빛에 대한 광전류 특성으로, PD₂는 1570 nm의 빛에 대하여 가장 많은 광전류를 보이며, 파장이 증가하거나 감소함에 따라 광전류의 양이 감소함을 볼 수 있다.

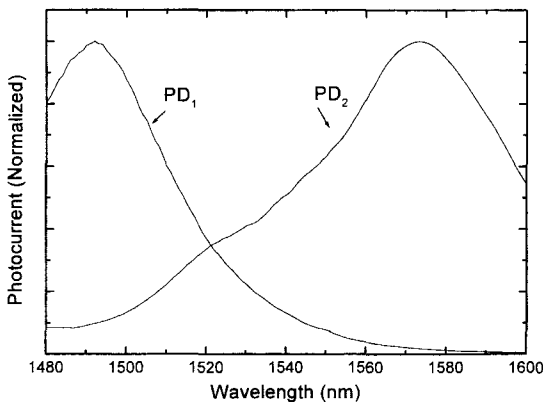


그림 5. TE 모드에 대한 다중파장검출기의 파장 분리 특성(D=100 μ m)

Fig. 5. Spectral response of the wavelength division demultiplexing photodetectors for the TE mode for D is 100 μ m.

그림 6과 같이 TM 모드의 빛에 대하여 PD₂는 1575 nm의 빛에 대하여 가장 많은 광전류를 보이며, 파장이 증가하거나 감소함에 따라 광전류의 양이 감소함을 볼 수 있다. 소자에 역박향의 인가전압이 가해질 경우, 다중양자우물계에 전계가 가해져서 밴드갭이 줄어드는 QCSE(Quantum Confined Stark Effect) 현상에 의해 광전류는 전체적으로 적색편이를 할 것이다. 이 경우, 소자의 동작 속도는 향상시킬 수 있으나, 장파장 광통신 파장 영역인 1550nm의 파장에서 PD₁과 PD₂의 광전류의 비율이 줄어드는 방향으로 진행할 것으로 본다. 따라서, 인가 전압이 0V인 경우가 1550nm 파장영역에서 광전류의 비를 최대한으로 만들 수 있을 것으로 본다.

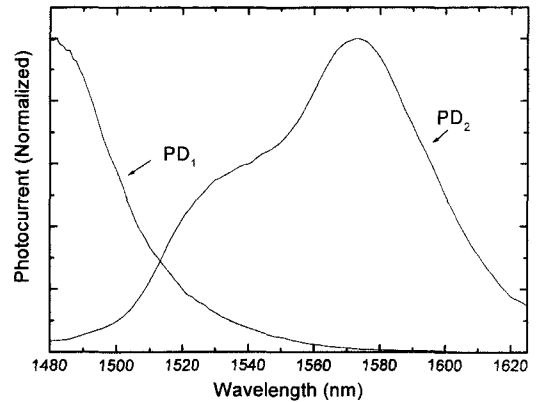


그림 6. TM 모드에 대한 다중파장검출기의 파장 분리 특성 (D=100 μ m)

Fig. 6. Spectral response of the wavelength division demultiplexing photodetectors for the TM mode for D is 100 μ m

그림 7은 PD₁과 PD₂ 사이의 흡수층의 거리 D에 따른 PD의 전류비 특성이다. 1477 nm 파장을 갖는 DFB 레이저를 광원으로 편광이 되지 않은 빛을 입사 하였으며, PD₂에 대한 PD₁의 전류의 비 (PD₁/PD₂)를 구하였다. 두 소자 사이의 거리가 증가할수록 입사된 빛은 흡수층 (D)에서 감쇄가 되므로, PD₂로 광전류는 감소하게 된다. 따라서, 전류의 비는 D의 길이에 따라 증가하게 된다. 제작된 다중파장검출기에서 1477 nm의 파장에 대한 전류의 비는 최대 200 배 (~23 dB)를 보였다. 1560 nm의 DFB 레이저를 이용한 PD₁에 대한 PD₂의 전류의 비 (PD₂/PD₁)는 D의 길이에 무관하게 약 100배 (~20 dB)의 전류비를 보였다. 이는 PD₁과 영역 I에서 1560 nm의 파장에 대한 흡수나

감쇄가 거의 없기 때문이다.

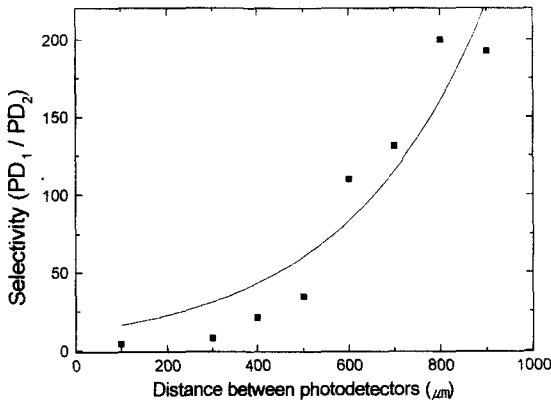


그림 7. 1477 nm 파장에서 검출기간의 거리에 따른 광전류 비

Fig. 7. Selectivity of the photodetectors as a function of distance (D) at 1477 nm.

IV. 결 론

본 논문에서는 IFVD에 의한 다중양자우물구조의 상호섭임 현상을 이용하여 다중파장검출기를 제작하고 특성을 측정하였다. 제작된 소자는 TE 및 TM의 빛에 대하여 1480 nm 대역의 빛과 1560 nm 대역의 빛을 분리할 수 있음을 보였다. 또한, 수광소자 사이의 거리에 따라서 두 소자의 광전류 선택비가 증가함을 보였다. 제작된 광소자는 1477 nm 파장에서 최대 200배, 1560 nm 파장에서 100배의 광전류의 비를 보였다. 이러한 소자는 향후 광통신 시스템에 사용될 소자의 집적, 소형화 및 다기능화에 응용될 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 실험을 하는데 많은 조언을 주신 LG 중앙연구소의 조인성 연구원께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Yasuhiro Suzuki, Ryuzo Iga, Takeshi Yamada, Hideo Sugiura and Mitsuru Naganuma, Crosstalk Characteristics of 1.3- μm /1.5- μm Wavelength Demultiplexing Photodetector Using Laser-Assisted MOMBE Growth, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 17, No. 3, pp. 483-489, 1999.
- [2] Anders Larsson, Peter A. Anderkson, Sverre T. eng and Amnon Yariv, Tunable Superlattice p-i-n Photodetectors: Characteristics, Theory, and Applications, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 24, No. 5, pp. 787-801, 1988.
- [3] D. Moss, F. Ye, D. Landheer, P. E. Jessop, J.G. Simons, H.G. Champion, I. Templeton and F. Chatenoud, Ridge Waveguide Quantum-Well Wavelength Division Demultiplexing Detector with Four Channels, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 4, No. 7, pp. 756-759, 1992.
- [4] A. N. M. Masum Choudhury, P. Melman, A. Silletti, Emil. S. Koteles, B. Foley and B. Elman, etal-Semiconductor-Metal Demultiplexing Waveguide Photodetectors in InGaAs/GaAs Quantum Well Structures by Selective Bandgap Tuning, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 3, No. 9, pp. 817-820, 1991.
- [5] A. Hamoudi, a. Ougazzaden, Ph. Krauz, E. V. K. Rao, M. Juhel, and H. Thibierge, Cation interdiffusion in InGaAsP/InGaAsP multiple quantum wells with constant P/As ratio, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, pp. 718-720, 1995.
- [6] J.-J. He, Y. Feng, E. S. Koteles, P. J. Poole, M. Davis, M. Dion, R. Goldberg, I. Mitchell and S. Charbonneau, Bandgap shifted InGaAsP/InP quantum well waveguides using MeV ion implantation, *Electron. Lett.*, Vol. 31, pp. 2094-2095, 1995.
- [7] M. Razeghi, O. Acher and F. Launay, Disorder of a $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ -InP quantum well by Zn diffusion, *Semicon. Sci. Technol.* pp. 793-796, 1987.
- [8] Andrew McKee, C. J. McLean, Giuseppe Lullo, A. Catrina Bryce, Richard M. De La Rue, John H. Marsh, and Christopher C. Button, Monolithic Integration in InGaAs-

- InGaAsP Multiple-Quantum-Well Structure Using Laser Intermixing, *IEEE J. of Quantum Electron.*, Vol. 33, pp. 45-55, 1997.
- [9] Shina Sudo, Hirofumi Onishi, Yoshiaki Nakano, Yukihiko Shimogaki, Kunio Tada, Mark J. Mondry, and Larry A. Coldren, Impurity-free Disordering of InGaAs/InGaAlAs Quantum Well on InP by Dielectric Thin Cap Films and Characterization of Its In-plane Spatial Resolution, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 1276-1279, 1996.
- [10] J. H. Lee, S. K. Si, Y. B. Moon, E. J. Yoon, and S. J. Kim, Bandgap tuning of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP multiquantum well structure by impurity free vacancy diffusion using In_{0.53}Ga_{0.47}As cap layer and SiO₂ dielectric capping, *Electron. Lett.*, Vol. 33, pp. 1179-1180, 1997.
- [11] Sang Kee Si, Deok Ho Yeo, Kyung Hun Yoon, and Sung June Kim, Area Selectivity of InGaAsP-InP Multiquantum-Well Intermixing by Impurity-Free Vacancy Diffusion, *IEEE J. Selected Optics In Quantum Electron.*, Vol. 4, pp. 619-623, 1998.
- [12] 여덕호, 윤경훈, 김성준, 다중양자우물구조의 상호 섞임을 이용한 광도파로의 제작 및 측정, *대한전자공학회 논문지*, 제36권, D편, 제7호, pp. 630-35, 1999
- [13] T. Kurosaki, T. Hashimoto, N. Ishihara, Y. Suzuki, M. Yanagisawa, H. Kimura, M. Nakamura, Y. Tohmori, Ka. Kato, Y. Kwaguchi, Y. Akahori, Y. Yamada, Ku. Kato, H. Toba and J. Yoshia, "Full Duplex 1300/1550-nm-WDM Optical Transceiver Modules for ATM-PON Systems Using PLC-Hybrid-Integration and CMOS IC Technologies", *ECOC'98*, 20-24 Sept. 1998, Madrid, Spain, pp. 631-632.

 저 자 소 개

余德鎬(正會員) 第36卷 D編 第7號 參照
 1971년 5월 30일생, 1994년 2월 서울대학교 물리학과(학사), 1996년 2월 서울대학교 전자공학과(석사), 현재 서울대학교 전기공학부 박사과정 재학중 <주관심분야: 화합물 반도체, 광전자공학>

尹 旻 勳(正會員)
 1996년 2월 서울대학교 물리학과(학사), 1998년 2월 서울대학교 전기공학부(석사), 현재 서울대학교 전기공학부 박사과정 재학중 <주관심분야: 화합물 반도체, 광전자집적회로>

金成俊(正會員) 第36卷 D編 第7號 參照
 1954년 10월 24일생, 1978년 서울대학교 전자공학과(학사), 1981년 Cornell University 전기공학과(석사), 1983년 Cornell University 전기공학과(박사), 1983년 6월~1989년 7월 AT&T Bell 연구소 연구원, 1989년 8월~현재 서울대학교 공과대학 전기공학부 교수 <주관심분야: 광전자집적회로, 생체전자공학>