

論文 99-36D-7-7

다중양자우물구조의 상호섞임을 이용한 광도파로의 제작 및 측정

(Fabrication and Measurement of Optical Waveguide using Multi Quantum Well Intermixing)

余德鎬*, 尹炅勳*, 金成俊*

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

요 약

Separate confinement heterostructure (SCH) 구조를 갖는 InGaAs/InGaAsP 다중양자우물구조의 상호섞임을 이용하여 광도파로를 제작하였다. 광도파로는 CH_4/H_2 혼합가스를 이용한 반응성 이온 식각 방식으로 제작하였으며, 제작된 광도파로는 폭이 $5\mu\text{m}$ 이고, 식각깊이가 $1.2\mu\text{m}$ 이다. 광도파로의 전송손실은 tunable laser를 이용한 Fabry-Perot 간섭현상을 이용하여 측정하였다. 800°C , 30s 열처리한 후 제작된 광도파로는 1550nm TE 모드에서 3.76dB/cm, TM 모드에서 3.95dB/cm의 전송손실을 보였다. 이 전송 손실은 지금까지 IFVD를 이용해 제작한 광도파로와 비교해서 매우 작은 값이다. 따라서, 이 방법은 광도파로등의 수동소자와 전자소자의 집적에 응용될 수 있다.

Abstract

We have fabricated optical waveguide which utilizes intermixing of InGaAs/InGaAsP multi quantum well separate confinement heterostructure. The waveguide was fabricated by reactive ion etching technique using CH_4/H_2 gas mixture, and the width and depth of the waveguide were $5\mu\text{m}$ and $1.2\mu\text{m}$, respectively. The propagation loss of the waveguide was measured by Fabry-Perot interference phenomena using tunable laser. For the waveguide after 800°C , 30s heat treatment, the measured loss was 3.76dB/cm and 3.95dB/cm for TE and TM mode, respectively. This value is very small compared to other waveguide made by IFVD technique. Hence, this technique can applied to integration of waveguide and electronic devices.

I. 서 론

다중양자우물구조의 상호섞임 현상은 bandgap energy를 인위적으로 변화시킬 수 있는 방법이다. InGaAs / InGaAsP 다중양자우물구조는 광도파로, 레이저, 광변조기, 광증폭기, 수광소자 등에 응용되는 기본 구조이며, III족 원소와 V족 원소의 상호섞임 현

상에 의해 bandgap energy가 증가한다.^[1] 따라서, 상호섞임 현상을 이용하여 서로 다른 bandgap energy가 필요한 소자의 집적이 가능하다.^[2] 다중양자우물구조는 불순물의 주입^[3-7], 레이저의 집광^[8], 불순물이 없는 vacancy의 확산 (IFVD; Impurity free vacancy diffusion)^[9-11] 등에 의해서 상호섞임 현상이 일어난다. 불순물의 주입에 의한 상호 섞임 현상은 인(P)^[3-4] 과 같은 기관과 동종의 불순물 또는 Ne^+ , Fe^+ 등의 이종물질 이온주입^[5] 후 열처리함으로써 가능하다. 또한, 아연 (Zinc) 의 증착 및 확산으로 불순물을 다중양자우물구조에 주입하여 상호섞임 현상을 유도할 수 있다^[6-7]. 레이저의 집광에 의한

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部

(School of Electrical Engineering of Seoul National University)

接受日字:1999年3月8日, 수정완료일:1999年5月25日

상호섭임은 강한 에너지를 가진 레이저를 기판에 주사함으로써 선택적인 bandgap energy의 증가를 얻을 수 있다.^[8] IFVD에 의한 상호섭임 방법은 주로 산화막, 질화막 등의 유전물질을 증착후 고온 열처리를 함으로써 이루어진다.^[9-11] IFVD를 이용하여 저 손실의 광도파로를 제작할 수 있으며^[12] 나아가 광집적회로를 구현할 수 있다.

위에서 열거한 상호섭임 방법중 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 상호섭임 현상에 의해 band-gap energy의 청색편이를 얻을 수 있다.^[10] 이 방법에 의한 상호섭임 현상은 3 μm 이내의 지역선택성이 있으며, 3족원소보다 5족원소의 확산이 더 활발하게 일어난다.^[11]

본 논문에서는 InGaAs cap층을 갖고 상온에서 1530 nm 의 Photoluminescence(PL) peak을 갖는 InGaAs / InGaAsP 다중양자우물구조를 vacancy 확산에 의한 상호섭임 현상을 이용하여 bandgap energy의 증가를 보였으며, 이를 이용하여 1500-1590 nm 영역에서 전송손실이 작은 광도파로를 제작하여 측정하였다. As-grown epi층을 이용한 광도파로는 1550 nm 의 파장에서 약 450 dB/cm 의 큰 전송손실을 보였으나, 다중양자우물의 상호섭임에 의해 전송손실의 급격한 감소를 확인하였다. 광도파로는 CH₄/H₂ 혼합 가스를 이용한 반응성 이온 식각으로 제작되었다. 광도파로 전송손실의 측정은 laser의 발진파장을 변화시킬 때 나타나는 Fabry-Perot 간섭현상을 이용하여 측정하였다.

II. InGaAs/InGaAsP 다중양자우물구조의 상호섭임 현상

본 논문에서 사용한 epi는 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 방법에 의해서 길러졌으며, 모든 층들은 InP 기판과 격자일치가 되도록 하였다. Epi의 구조는 그림 1.과 같으며, n-InP (S-doped; $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 기판위에 n-InP buffer층 (S-doped; $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$), U-InGaAsP, InGaAs/InGaAsP 다중양자우물층, U-InGaAsP,

U-InP clad층, U-InGaAs cap층의 순서로 길러졌다. n-InP buffer 이후의 층들을 모두 불순물이 주입되지 않은 진성 반도체로 기른것은 상호섭임 현상을 만들기 위해 고온 열처리를 하는 동안 Zn등의 확산에 의한 영향을 없애기 위해서이다.^[3] 성장된 epi의 광여기 (PL; Photoluminescence) 측정결과 다중양자우물구조는 10 K 의 저온에서 1468 nm 에서, 상온에서 1530 nm 에서 peak wavelength를 가졌다. InP-SiO₂, InGaAs-SiN_x 등의 조합에 의해서는 양자우물의 bandgap energy가 거의 변하지 않지만, InGaAs cap 층과 SiO₂ 유전물질의 조합에 의해서는 크게 증가된다.^[2] 따라서, 본 논문에서는 1700 Å 두께의 SiO₂를 플라즈마화학기상증착 (PECVD; Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)으로 U-InGaAs cap 층위에 증착한 후 고온에서 열처리하여 다중양자우물의 상호섭임을 유발하였다.

U-InGaAs	0.1 μm
U-InP	1 μm
U-InGaAsP λg=1.1 μm	0.15 μm
U-InGaAsP λg=1.17 μm	0.05 μm
5 InGaAs(lattice matched, 70 Å)/4 InGaAsP (λg=1.21 μm, 100 Å) Multiquantum well	
U-InGaAsP λg=1.17 μm	0.05 μm
U-InGaAsP λg=1.1 μm	0.15 μm
N-InP buffer	1 μm
N-InP Substrate	

그림 1. Epi층의 구조
Fig. 1. Structure of epitaxial layer.

그림. 2은 as-grown sample과 750, 800℃에서 IFVD에 의해 bandgap energy가 증가된 sample의 상온 PL 측정결과이다. (a)는 as-grown 상태의 PL 측정결과이며 1530 nm 에서 최고치를 가진다. 따라서, as-grown 상태의 sample로 광도파로를 제작할 경우 광통신용 파장영역인 1550 nm 근처에서 진행손실이 굉장히 클 것이라고 예상할 수 있다. (b)는 750℃에서 IFVD에 의해 bandgap energy가 증가되어 청색이동된 sample의 상온 PL이며, 이 경우 1540 nm 에서 PL 세기가 매우 작으므로 이보다 장파장의 빛이 제작된 광도파로를 진행할 것으로 예상할 수 있다. (c)는 800℃에서 IFVD후 상온 PL 측정결과이

며, 1450 nm 이상의 파장에서 PL 세기가 충분히 작은 것을 알 수 있다. (b)와 (c)의 경우 IFVD에 의해서 상온 PL 세기가 다소 감소하였으나 반치폭의 크기에는 큰 변화가 없으므로 epi층의 특성이 크게 나빠지는 않았음을 알 수 있다.

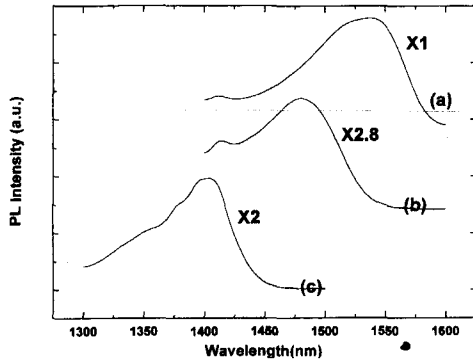


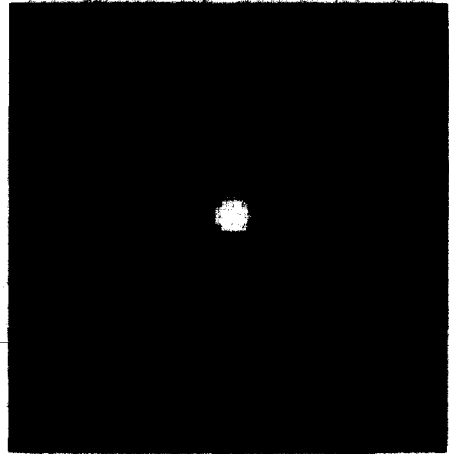
그림 2. 상온(300 K)에서 다중양자우물의 PL 스펙트럼 분포 (a) as-grown 상태 (b) 750°C, 30 s 간 열처리 (c) 800°C, 30 s 간 열처리

Fig. 2. PL spectrum of multi quantum well at room temperature. (a) as-grown and (b) annealed for 750°C, 30 s (c) annealed for 800°C, 30 s.

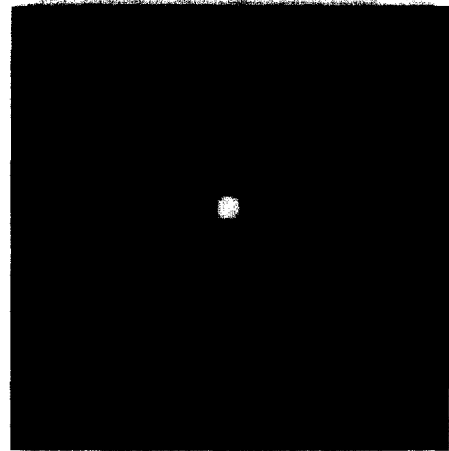
III. 광도파로의 제작공정 및 측정

본 논문에서는 다중양자우물구조를 750°C와 800°C에서 30 s 간 IFVD에 의해 bandgap energy를 증가시킨후, 반응성 이온 식각을 이용하여 ridge형태의 광도파로를 제작하였다. 식각에 사용된 가스는 $\text{CH}_4/\text{H}_2=5$ sccm/100 sccm이며, 식각이 끝난후 O_2 plasma로 표면에 생성된 polymer를 제거하였다. 제작된 광도파로는 폭이 5 μm , 식각 깊이가 1.25 μm 이며 전체길이는 750, 800°C에서 IFVD를 한 각각의 sample에 대하여 8.7 mm, 8.82 mm이다. 제작된 광도파로는 tunable 레이저를 이용하여 1500-1590 nm의 파장영역에서 전송실험을 하였다. 그림 3은 750°C, 30 s 간 열처리한 광도파로를 통과한 TE 및 TM 모드의 상이며, 광도파로는 단일모드에 대해서만 전파가 됨을 확인하였다.

광도파로의 전송 손실을 측정하는 방법에는 cut-back method, scattering method, Fabry-Perot 간섭 등의 방법이 있다. 이 중 Fabry-Perot 간섭 방법은 측정은 제작된 광도파로를 파괴하지 않으면서 비교적 정확하게 전송 손실을 측정할 수 있는 방법이다.^[13]



(a)



(b)

그림 3. 750°C, 30 s 열처리후 제작된 광도파로의 1550nm TE (a) 및 TM (b) 모드의 근접장 모드 모양

Fig. 3. Near field mode pattern for TE (a) and TM (b) mode of fabricated waveguide after 750°C, 30 s heat treatment at 1550 nm.

본 논문에서는 tunable 레이저의 발진 파장을 변화시켜서 광도파로내의 보강 및 상쇄간섭에 의한 출력의 변화를 이용하여 전송손실을 측정하였다. 본 논문에서 사용한 tunable 레이저의 linewidth는 125 kHz 이하로 충분히 작으므로 Fabry-Perot 간섭현상을 측정하기에 충분하다. 그림 4는 750°C, 30 s 열처리한 광도파로의 Fabry-Perot 간섭현상에 의한 투과 세기의 변화이다. TE 모드의 빛에 대해 tunable 레이저의 발진파장을 1550 nm에서 1550.1 nm까지 0.002 nm 단위로 변화시켜가며 광검출기의 출력을 도시한 것이다. 그림으로부터 레이저의 파장이 변화하면서 광도

파로에 입사한 빛이 보강 및 상쇄 간섭을 반복하면서 출력의 세기가 주기적으로 변화함을 볼 수 있다. 0.1 nm 파장 범위 내에서 전송손실의 변화가 없다고 가정하면 제작된 광도파로의 1550 nm, TE 모드에서의 전송손실은 아래 식 (1) 과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{전송손실(dB)} = -10 \log\left(\frac{1}{R} \frac{\sqrt{K}-1}{\sqrt{K+1}}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 R은 광도파로의 절단 단면에서의 반사율이며 K는 보강 및 상쇄 간섭일 때의 광도파로를 통한 빛의 출력의 비로서 $K=Tr/Ta$ (Tr: 보강 간섭일 때 광검출기 출력, Ta: 상쇄 간섭일 때 광검출기 출력) 이다.

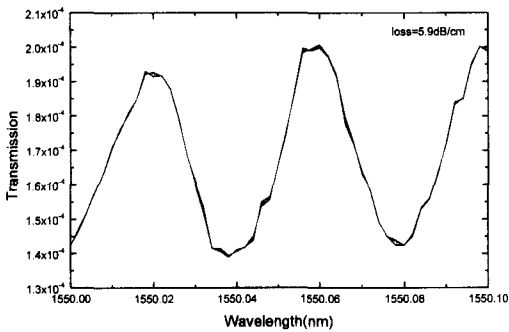


그림 4. 1550 nm 파장 근처에서의 Fabry-Perot 간섭 현상에 의한 투과세기 변화

Fig. 4. Fabry-Perot interference pattern around 1550 nm wavelength.

Tunable 레이저를 이용해서 1500 nm에서 1590 nm 파장영역에서 Fabry-Perot 간섭현상을 TE 및 TM 모드에 대해서 측정하였으며 식 (1)을 이용하여 광도파로의 전송손실을 계산한 후 도파로의 길이로 나누어 광도파로내에서 빛이 1 cm 전송할 때의 손실을 구하였다. 그림 5는 IFVD에 의해 다중양자우물구조의 bandgap energy를 증가시킨 후 제작한 광도파로의 전송손실이다. 750 °C, 30 s IFVD 조건으로 제작한 광도파로의 전송손실은 TE/TM 모드에 대해서 파장이 짧아질수록 커진다. 1530 nm의 파장에서 전송손실이 매우 큰데 이는 그림 3. (b)의 상온 PL 측정결과에서 볼 수 있듯이 1530 nm에서 상당량의 PL 출력이 있기 때문이다. 1520 nm 이하의 파장에서는 큰 전송손실로 인하여 광도파로의 통과한 빛의 세기가 매우 작으며 Fabry-Perot 간섭현상이 나타나지 않았다. 그림 3(c)의 800 °C, 30 s IFVD후 상온 PL 측정결

과로부터 이 조건으로 제작된 광도파로는 전송손실이 더욱 더 줄어들 것으로 예상할 수 있다. 800 °C, 30 s IFVD 조건으로 제작한 광도파로는 1500-1590 nm의 TE/TM 모드에 대해서 3-8 dB/cm의 전송손실을 가짐을 알 수 있으며, 1550nm의 파장에서 TE/TM 모드에 대해서 각각 3.76 dB/cm, 3.95 dB/cm의 전송손실을 갖는다. 이는 750 °C, 30 s IFVD 조건으로 제작한 광도파로에 비해 더 짧은 파장영역에서 전송이 가능하며, 열처리 온도를 증가함으로써 전송손실을 감소시킬 수 있으며, IFVD가 불순물에 의한 상호섞임과 비교하여 free-carrier absorption을 유발하지 않음을 보이는 것이다. 이 전송손실은 IFVD를 이용한 다중양자우물 구조의 상호섞임을 이용하여 제작된 광도파로 중 매우 작은 편이다.

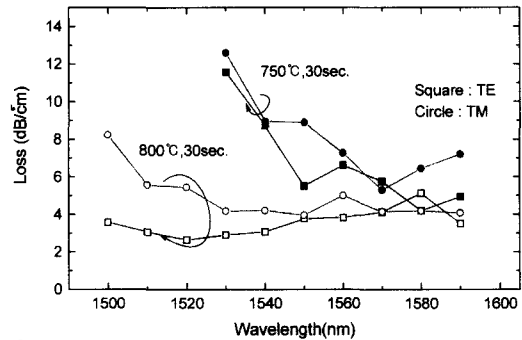


그림 5. 다중양자우물 구조의 상호 섞임 현상 후 광도파로의 파장에 따른 전송손실

Fig. 5. Propagation loss of the waveguide after multi-quantum-well intermixing.

IV. 결론

본 논문에서는 IFVD에 의해 상호섞임 현상이 일어난 다중양자우물 구조를 이용하여 광도파로를 제작하여 광전송손실을 측정하였다. SiO₂ 유전체를 U-InGaAs cap 층에 증착후 고온에서 열처리를 함으로 다중양자우물구조의 상호섞임과 bandgap energy의 증가를 보였고, 상온 PL 측정 결과 상호 섞임현상에 의해 스펙트럼의 청색이동을 확인 하였다. IFVD에 의해 다중양자우물의 상호섞임이 일어난 epi layer를 CH₄와 H₂를 사용한 반응성 이온 식각으로 폭 5 μm, 식각깊이 1.25 μm의 ridge 형태의 광도파로를 제작하였다. 근접장 모드 측정결과 제작된 광도파로는 단일 모드에 대해서 동작함을 확인하였다. Tunable 레이저

의 발진파장 변화에 따른 Fabry-Perot 간섭현상을 이용하여 제작된 광도파로의 전송손실을 측정하였다.

따라서, 본 논문의 결과로부터 IFVD를 다중양자우물구조의 청색이동을 이용하여 전송손실이 작은 광도파로를 제작할 수 있음을 보였으며, 향후 광도파로와 광소자와의 집적에 응용될 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

광전송 손실의 측정에 도움을 주신 서울대학교 전기공학부 박남규 교수님과 한국통신 이상구 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 교육부 학술진흥재단과 정보통신부 대학기초연구지원사업의 지원에 의해서 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] A. Ramdane, P. Krauz, E. V. K. Rao, A. Hamoudi, A. Ougazzaden, D. Robein, A. Gloukhian, and M. Carre, Monolithic Integration of InGaAsP-InP Strained Layer Distributed Feedback Laser and External Modulator by Selectively Quantum-Well interdiffusion, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, No. 9, pp. 1016-1018, 1995.
- [3] 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.
- [4] J. E. Zucker, B. Tell, K. L. Jones, M. D. Divino, K. F. Brown-Goebeler, C. H. Joyner, B. I. Miller, and M. G. Young, Large blueshifting of InGaAs/InP quantum-well band gaps by ion implantation, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60, pp. 3036-3038, 1992.
- [5] J. Z. Wan, D. A. Thompson, J. G. Simmons, Ion implantation induced compositional intermixing in the InGaAs/InP MQW system for wavelength shifted waveguides, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. B*, vol. 106, pp. 461-465, 1995.
- [6] M. Razeghi, O. Acher and F. Launay, Disorder of a $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ -InP quantum well by Zn diffusion, *Semicon. Sci. Technol.* pp. 793-796, 1987.
- [7] G. J. Van Curp, W. M. van de Wijger, G. M. Fontijn, and P. J. A. Thijs, Zn diffusion-enhanced disordering and ordering of InGaAsP/InP quantum well structure, *J. Appl. Phys.*, vol. 67, pp. 2919-2926, 1990.
- [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, Yukihiro 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 SiO_2 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 Multi-

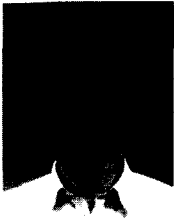
quantum-Well Intermixing by Impurity-Free Vacancy Diffusion, *IEEE J. Selected Topicts In Quantum Electron.*, vol. 4, pp. 619-623, 1998.

- [12] Yasuhiro Suzuki, Hidetoshi Iwamura, and Osamu Mikami, TE/TM mode selective channel waveguides in GaAs/AlAs

superlattice fabricated by SiO₂ cap disordering, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, pp. 19-20, 1990.

- [13] R. G. Walker, Simple and accurate loss measurement technique for semiconductor optical waveguides, *Electron. Lett.*, vol. 21, pp. 581-583, 1985.

저 자 소 개



余 德 鏞(正會員)

1971년 5월 30일생. 1994년 2월 서울대학교 물리학과 (학사). 1996년 2월 서울대학교 전자공학과 (석사). 현재 서울대학교 전기공학부 박사과정 재학중. 주관심분야는 화합물 반도체, 광전자공학



金 成 俊(正會員)

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. 주관심분야는 광전자집적회로, 생체전자공학

尹 炅 勳(正會員)

1996년 2월 서울대학교 물리학과 (학사). 1998년 2월 서울대학교 전기공학부 (석사). 현재 서울대학교 전기공학부 박사과정 재학중. 주관심분야는 화합물 반도체, 광전자집적회로