

論文95-32A-11-4

# AR Coating에 따른 고출력 반도체 레이저의 특성변화

## (Characteristic Dependences of High Power Semiconductor Laser on AR Coating)

吳 玗 京 \*, 郭 桂 達 \*

(Yun Kyung Oh and Kae Dal Kwack)

## 요 약

Edge-Emitting형 반도체 Laser의 특성을 향상시키고 신뢰성을 높이기 위하여 Laser 빛이 나오는 Facet에 HR(High-Reflective) 및 AR(Anti-Reflective) Coating을 한다. 본 논문에서는 InGaAsP/GaAs 구조의 고출력 반도체 Laser의 한쪽면을 90% HR Coating 한 후 다른 쪽 면의 AR Coating을 변화 시키면서 특성 변화를 관찰하였다. Coating Dielectric 물질로는  $Al_2O_3$ 를 사용하였으며 Sputtering 방법으로 증착하였다. 각 AR Coating율에 따른 임계전류밀도, 외부양자효율, 발진파장 그리고 일정 광출력(500mW)을 얻기 위한 동작전류의 변화를 측정하였다. 측정된 결과를 유도된 식으로부터 계산된 계산치와 비교하였고 이는 서로 잘 일치하였다. 고체 Laser 여기용으로 사용되는 고출력 반도체 Laser는 고체 Laser의 흡수 파장폭이 좁기 때문에 정확한 파장조절이 매우 중요하다. 또한 고출력에서 CW로 동작하기 때문에 발생하는 열을 감소시키기 위해서 가능한 한 낮은 전류에서 원하는 광출력을 얻는 것이 바람직하다. 실험의 결과로 일정한 광출력을 얻기 위한 최소의 구동전류를 만족하는 AR Coating율의 범위를 결정할 수 있었으며 이 Coating율에서 조절할 수 있는 파장값은 약 4nm 정도였다.

## Abstract

Mirror coating is applied to laser facets to improve properties of edge emitting laser diodes. In this experiment, InGaAsP/GaAs high power laser diodes were studied with respect to different degrees of anti-reflective coating. Sputtered  $Al_2O_3$  was used as the coating material and the HR coating was kept constant at 90%. Threshold current density, differential quantum efficiency, emission wavelength and the operating current at 500mW were measured for a range of AR coating and compared with theoretically calculated values; that showed good agreements. Precise wavelength control is important for laser diodes for solid state pumping because of small absorption bandwidth. In addition, since these lasers operate under CW condition, a lowest possible operating current for a given power is desired in order to minimize the heat produced. From the results of this experiment, we were able to obtain a optimum range of AR coatings for minimum operating current. The wavelength can be varied up to 4nm within this range.

## I. 서 론

반도체 레이저 기술이 발달함에 따라 그 응용범위가

계속 확대되고 있으며 고체 레이저 Pumping 및 의료 기기, Gas 레이저 대체용으로 더 높은 광출력을 얻기 위한 노력과, 더 높은 광기률 밀도를 얻기 위해서는 발진 파장을 더욱 짧게 또는 고속 통신용 레이저로 사용하기 위해서는  $1.3\mu m$  나  $1.55\mu m$  장파장의 단일 spectrum 모드를 갖는 반도체 레이저 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>1)~4)</sup>. 그리고 거의 모든 반도체 레이저

\* 正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Electronic Eng. Dept., Hanyang Univ.)

接受日字: 1994年1月26日, 수정완료일: 1995年10月10日

는 광출력을 향상시키고 안정적인 동작을 위해 유전체 막을 이용하여 한쪽 경면은 High- Reflective(HR) Coating을 하고 다른 한쪽은 Anti-Reflective(AR) Coating을 하게 되는데 출력이 높아짐에 따라 Coating에 의한 특성변화가 매우 중요하게 된다<sup>[5]</sup>. Coating에 의해 변화하는 중요한 반도체 레이저의 특성들로는 임계전류밀도, 외부양자효율, 발진파장 그리고 최대 출력의 등이 있으며 또한 Coating은 반도체 레이저의 경면을 공기와 차단시킴으로써 경면의 산화를 억제시켜 신뢰성 향상에도 도움이 된다. Coating을 위한 유전체 막으로 주로 사용되는 물질로는  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $ZrO_3$  등이 있는데 레이저에서 빛이 나오는 활성층의 재료에 따라 적합한 것을 선택하여야 한다. 예를 들어 GaAs를 기본물질로 사용하는 반도체 레이저의 경우 열전도율 ( $Al_2O_3: 3 \times 10^{-1} W/cm \cdot deg$ ,  $SiO_2: 1.4 \times 10^{-2} W/cm \cdot deg$ )과 열팽창계수 ( $Al_2O_3: 6 \sim 7 \times 10^{-7}/deg$ ,  $SiO_2: 3.5 \times 10^{-7}/deg$ ,  $3GaAs: 6 \times 10^{-6}/deg$ ) 면에서  $Al_2O_3$  막이  $SiO_2$  막에 비해 안정된 특성을 나타낸다<sup>[6]</sup>. 본 논문에서는 Nd YAG Pumping용으로 사용되는 InGaAsP/GaAs Separate Confinement Heterostructure(SCH) Single Quantum Well(SQW) 구조의 고출력 반도체 레이저의 특성이 AR Coating의 변화에 따라 어떻게 변화하는지 알아보고 이를 계산식과 비교하였으며 또한 이 결과를 이용하여 일정 광출력을 얻기 위한 최소 동작전류를 만족하는 AR Coating율의 범위를 결정하였다. 그리고 Pumping Source로서 가장 중요한 파라미터 중 하나인 발진 파장이 AR Coating에 따라 어떻게 변화하는지 측정하여 최소 동작전류를 만족하면서 조절할 수 있는 파장범위에 대해서도 알아보았다.

## II. 실험

실험에 사용된 반도체 레이저는 LPE 방법으로 성장한 SCH SQW 구조의 고출력 반도체 레이저로서(그림 1)이는 녹색 레이저를 얻기 위한 광원으로 사용되고, 이를 위하여서는 Nd YAG의 흡수율을 고려해 볼 때 중심파장이 810nm 이어야 한다. LPE 에서 레이저 구조를 위하여 성장된 Epi Wafer는 Fabrication 공정에서 Stripe 폭이  $100 \mu m$  인 Wide Stripe 구조로 가공하고 이것을 Cleaving 하여 Bar 상태로 만든 후,

Bar 의 한쪽 경면을  $Si/SiO_2$  를 이용하여 90% HR Coating 하고 Chip 상태로 잘라내어 Die Bonding 하였다. HR coating에 의해서는 임계전류밀도는 감소하고 외부양자 효율은 증가하며 발진파장은 3nm 정도 높아지는 것을 알 수 있었다<sup>[7]</sup>. Die Bonding 한 Chip의 빛이 나오는 앞쪽 경면을 Sputtering 장치를 사용하여  $Al_2O_3$ 로 AR Coating하고 특성 변화를 관찰하였다. AR Coating율은 Monitor Wafer를 이용하여 Sputtering 하면서 간접적으로 측정하였다.

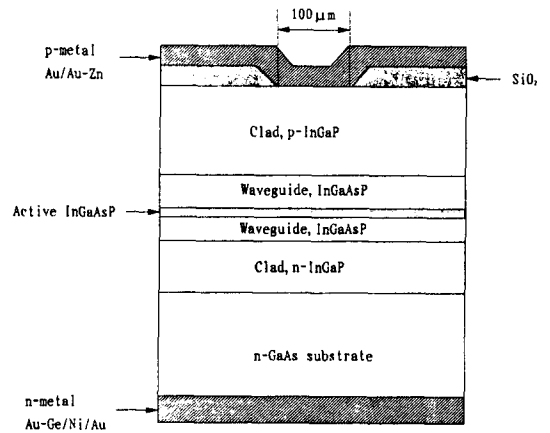


그림 1. InGaAsP/GaAs SCH SQW 레이저 단면도

Fig. 1. The structure of InGaAsP/GaAs SCH SQW laser.

1) 임계전류 밀도의 변화 반도체 레이저의 임계전류밀도의 값은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$J_{th} = J_0 \frac{d}{\eta_i} + \frac{\alpha_0 \cdot d}{\beta \cdot \Gamma \cdot \eta_i} + \frac{d \cdot \ln \frac{1}{R_1 \cdot R_2}}{2 \cdot L \cdot \beta \cdot \Gamma \cdot \eta_i} \quad (1)$$

여기서  $J_0$ 는 zero current offset,  $\eta_i$ 는 internal quantum efficiency,  $\alpha_0$ 는 internal loss,  $\beta$ 는 gain constant,  $\Gamma$ 는 confinement factor,  $L$ 은 cavity length,  $d$ 는 활성층의 두께,  $R_1, R_2$ 는 각각 AR, HR 면의 reflectivity 이다. 이 식은 반도체 레이저 내에서의 Total Loss와 Gain이 일치하는 전류밀도를 나타낸다. 이 식에서 알 수 있듯이 Mirror Loss  $(1/2L) \ln(1/R_1 R_2)$ 은  $R_1$ 이 감소할수록 증가하고 이에 따라 임계전류밀도  $J_{th}$ 도 증가하는 것을 알 수 있다. 실험 결과와 계산한 임계전류밀도를 함께 표현한

것이 그림 2 이다. 계산에 사용된 파라미터 값들은 다음과 같다.

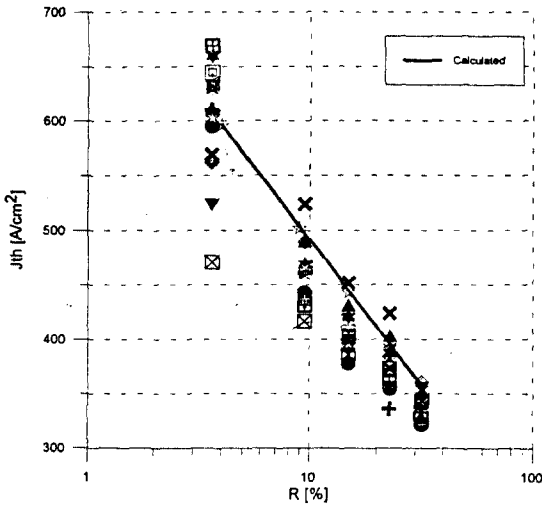


그림 2. Coating을 변화에 따른  $J_{th}$ 의 변화  
Fig. 2.  $J_{th}$  dependences on AR coating rates.

$$J_0 = 4200 \text{ A/cm}^2, \eta_i = 0.7, L = 0.1 \text{ cm}, \Gamma = 0.032, \\ \alpha_0 = 4 \text{ cm}^{-1}, \beta = 0.035 \mu\text{m} \cdot \text{cm/A}, d = 0.018 \mu\text{m}$$

그림 2의 계산값을 구하기 위해 사용된 파라미터들은 실험값과 맞추기 위해 Fitting 된 값이고 실제 다른 실험을 통해 얻은 값들과 큰 차이가 없다<sup>[9]</sup>. 그림에서 알 수 있듯이 임계전류밀도는 AR Coating이 커짐에 따라(반사율이 작아짐에 따라) 계속적으로 증가함을 알 수 있다. 이것은 Mirror Loss가 증가함으로 그에 상응하는 Gain을 얻기 위하여 더 많은 전류가 필요하기 때문이다. 실험값과 계산치가 반사율이 작아질수록 편차가 심해지는 것은 실험을 위해 일정한 AR coating을 한 뒤 특성을 측정하고 이것을 다시 Sputtering M/C에 장착하여 AR Coating을 반복적으로 하는 과정에서 Monitoring 되는 반사율과 실제의 반사율과의 차이가 심해지기 때문이라고 생각한다.

2) 외부양자효율의 변화

Coating이 안된 반도체 레이저에서 하나의 경면에 대한 외부양자효율은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\eta_d = \eta_i \cdot \frac{\frac{1}{2 \cdot L} \cdot \ln \frac{1}{R_0}}{\alpha_0 + \frac{1}{L} \cdot \ln \frac{1}{R_0}} \quad (2)$$

여기서  $R_0$ 는 coating 안된 경면의 Reflectivity이다. Coating이 된 경우에는 양쪽 경면의 Reflectivity

가 다르기 때문에 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다. AR coating된 면에서 나오는 출력의 외부 양자효율은

$$\eta_d = \eta_i \cdot \frac{\frac{1}{2 \cdot L} \cdot \ln \frac{1}{R_1}}{\alpha_0 + \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \ln \frac{1}{R_1 \cdot R_2}} \quad (3)$$

이 된다. 그림 3은 AR coating을에 따른 외부양자효율의 변화를 나타내었는데 외부양자효율 역시 AR coating율이 커질수록 증가함을 알 수 있다.

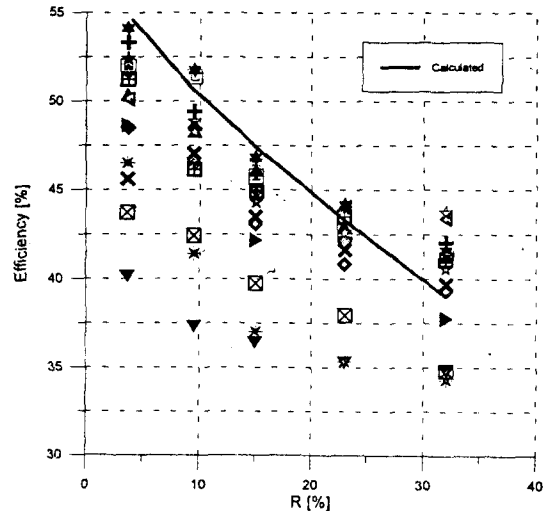


그림 3. Coating을 변화에 따른  $\eta_d$ 의 변화  
Fig. 3.  $\eta_d$  dependences on AR coating rates.

일정한 광출력을 내는 고출력 반도체 레이저는 동작 전류가 낮을수록 열로 방출되는 전력의 양이 적기 때문에 안정적이다. 그러나 위의 두결과를 종합해 보면 AR Coating율이 증가함에 따라 고출력 반도체의 특성이 임계전류면에서는 저하되고 효율면에서는 향상되는 것을 알 수 있다. 이것을 도식적으로 나타낸 것이 그림 4 인데 그림에서 볼 수 있듯이 일정 광출력  $P_0$ 를 얻기 위한 동작전류는  $I_{op}$ 와 같은 적절한 AR Coating율에서 얻을 수 있다. 그러므로 일정한 광출력을 얻기위해 필요한 동작전류가 최소가 되는 AR Coating값을 알아 볼 필요가 있다. 이것을 식으로 정리하면 다음과 같다.

먼저 일정한 광출력  $P_0$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_0 = \eta_d (I_{op} - I_{th}) V_k \quad (4)$$

이식에서  $I_{op}$ ,  $I_{th}$ 는 각각 동작전류, 임계전류를 나

타내고  $V_k$ 는 발진파장에 해당하는 밴드갭 전압인데 이것을 앞에서 유도한 전류밀도의 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_o = \eta_d (J_{op} - J_{th}) V_k S \quad (5)$$

여기서  $S$ 는 Stripe 단면적을 나타낸다. 윗 식의  $J_{th}$ 와  $\eta_d$ 를 앞에서 유도한 식을 대입하여  $J_{op}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$J_{op} = J_o \cdot \frac{d}{\eta_i} + \frac{\alpha_o \cdot d}{\beta \cdot \Gamma \cdot \eta_i} \cdot \frac{P_o}{S \cdot V_k} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 \cdot R_2}\right)}{\ln\left(\frac{1}{R_1}\right)} + \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 \cdot R_2}\right)}{2 \cdot \beta \cdot \Gamma \cdot L \cdot \eta_i} \cdot d + \frac{2 \cdot \alpha_o \cdot P_o \cdot L}{S \cdot V_k \cdot \eta_i} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{R_1}\right)} \quad (6)$$

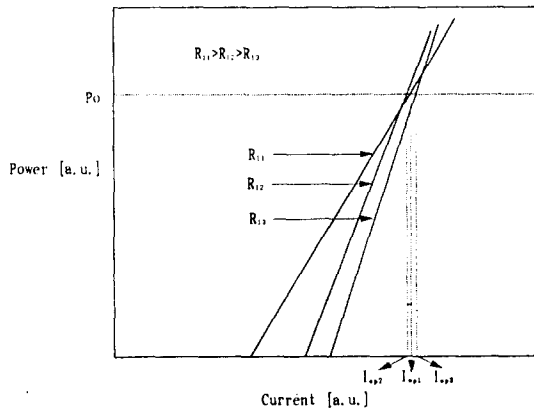


그림 4. AR Coating율에 따른 I-L 특성 변화  
Fig. 4. I-L characteristic dependences on AR coating rates

이 식의 계산치와 실험결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서, 예상했던 대로 일정 광출력을 얻는데 최소 동작전류를 얻을 수 있는 AR Coating율을 결정할 수 있음을 알 수 있다. 그림 5는 20mW의 녹색 레이저를 얻기 위하여 사용되는 500mW의 광출력을 기준으로 한 것이다. 대략 10~20%의 Coating율에서 최소 동작전류를 나타내는 것을 알 수 있다. 파장조절이 중요한 고출력 레이저의 경우 AR Coating에 의한 파장변화를 고려해서(그림 6) Coating할 반사율을 결정하는 것이 바람직하다. AR Coating이 증가함에 따라(반사율 감소) 파장이 짧아지는 이유는 임계전류밀도가 증가하는 것과 결부해서 생각할 수 있다. 즉 임계전류밀도가 증가하는 것은 그만큼 발진 조건에서 Fermi

Level의 차이가 커지는 것을 나타내므로 발진 파장은 감소하게 된다. 그림 6에서 10%~20%의 AR Coating 율에 대해 변화하는 파장은 약 4nm 정도이다.

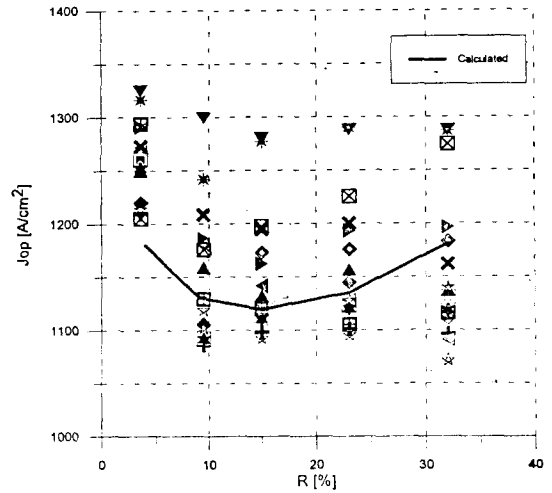


그림 5. Coating율 변화에 따른  $J_{op}$ 의 변화  
Fig. 5.  $J_{op}$  dependences on AR coating rates.

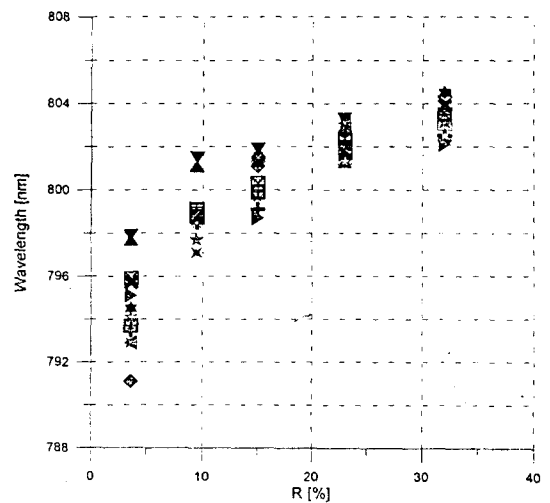


그림 6. Coating율 변화에 따른 파장의 변화  
Fig. 6. Wavelength dependences on AR coating rates.

### III. 결론

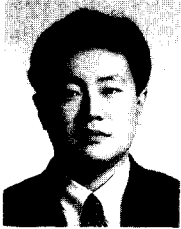
고출력 반도체 레이저의 특성이 경면의 Anti-Reflective(AR) Coating에 따라 어떻게 변화하는지 알아보았다. AR Coating이 증가함에 따라(반사율 감

소) 임계전류 밀도는 증가하고 외부양자효율은 커짐을 알 수 있었다. 이것은 근사적인 계산식과 잘 일치하였다. 실제로 고효율 반도체 레이저를 사용하는데 있어서 중요한 동작 전류가 AR Coating에 의해 어떻게 변화하는지에 대해 계산하고 실험값과 비교하였다. Stripe 폭이  $100\mu\text{m}$ 인 InGaAsP/GaAs SCH SQW 고효율 반도체 레이저를 500mW로 구동시킬때 동작전류는 AR Coating율이 10~20% 정도인 경우 최소값을 나타내었고 이 Coating율에 따른 파장변화는 4nm 정도였다. 즉 파장조절이 매우 중요한 고체 레이저 여기용 고효율 반도체 레이저가 최소의 동작전류를 가지고 파장변화를 용이하게 할 수 있는 범위가 4nm 정도이다. 만약 온도 변화에 의한 파장변화도 고려한다면 약 7nm 정도까지 파장 조절이 가능하게 된다. 앞으로는 Dielectric Coating이 신뢰성 및 Spectral Line Width에 미치는 영향을 조사하여 원하는 특성을 얻기 위한 최적의 Coating 조건을 설정해야 한다고 생각한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] W.E.Plano, J.S.Major, Jr., and D.F. Welch, 'High Power 875nm Al-Free Laser Diodes', *IEEE Photonic Technology Letters*, vol. 6, pp. 465-467(1994).
- [2] J.Diaz, I.Eliashovich, X.He, H.Yi, L. Wang, E.Kolev, D.Garbutov, and M.Razeghi, 'High Power InGaAsP/GaAs 0.8- $\mu\text{m}$  Laser Diodes and Peculiarities of Operational Characteristics', *Appl.Phys. Lett.*, vol. 65(8), pp. 1004-1005(1994).
- [3] A.Valster and C.J.van der Poel, 'High Temperature and High Power Operation of Dual Strained Layer QW Visible Laser Diodes', *11th IEEE International Semiconductor Laser Conference*, Maui, Hawaii, pp. 197-198(1994).
- [4] T.Odagawa, K.Nakajima, K.Tanaka, H. Nobuhara, T.Inoue, N.Okazaki, and K. Wakao, 'High-Speed Operation fo Strained InGaAs/InGaAsP MQW Lasers under Zero-Bias Condition', *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 1682-1686(1993).
- [5] T.R.Chen, Y.Zhuang, Y.J.Xu, P.Derry, N.Bar-Chaim, A.Yariv, B.Yu, Q.Z.Wang, and Y.Q.Zhou, 'Application of a Dielectric Coating to Semiconductor Lasers', *Optics & Laser Tech.*, vol. 22, pp. 245-254(1990).
- [6] M.Fukuda, *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs*, Artech House, Boston-London, pp. 173-182(1991).
- [7] 오윤경, 정현돈, 박계오르기, 김태일, 'High Reflective Coating에 의한 InGaAsP 반도체 레이저의 특성변화', 제2회 광자기술 학술회의, pp. 113-114(1993)
- [8] H.C.Casey, Jr. and M.B.Panish, *Heterostructure Lasers*, Part A, Academic Press, pp. 183(1978).
- [9] D.Z.Garbutov, N.Y.Antonishkis, A.D.Bondarev, A.B.Gulakov, S.N.Zhigulin, N.I. Katsavets, A.V.Kochergin, and E.V.Ragailov, 'High-Power 0.8- $\mu\text{m}$  InGaAsP-GaAs SCH SQW Lasers', *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27(6), pp. 1351-1354 (1991).

## — 저 자 소 개 —



吳玠京(正會員)

1962년 6월 25일생. 1985년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1987년 2월 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1992년 3월부터 한양대학교 대학원 전자공학과

박사과정 재학. 1987년 1월부터 삼성종합기술원 신소재응용연구소 근무. 주관심분야는 반도체 소자 및 반도체 레이저의 특성해석과 설계 등임.

郭桂達(正會員) 第27卷 第7號 參照

현재 한양대학교 공과대학 전자공학과 교수