

論 文

DH LD의 Gain/Refractive Index Guiding
 解析에 關한 研究

正會員 金 恩 洙* 正會員 朴 漢 奎**

A Study on the Analysis of Gain/Refractive
 index Guiding of DH LD

Eun Soo KIM* and Han Kyu PARK**, Regular Members

要 約 本論文에서는 스트라이프構造型 DH LD의 lateral waveguiding mechanism에 대한 理論的解析이 시도되었다. 解析過程에서 실제에 아주 근사한 활성층의 利得 및 屈折率變化에 대한 數學的모델을 이용하여 섹터이론에 의한 DH LD의 2차원적 waveguiding을 해석하고 비소굴절률변화(Δn), 활성층두께(d), cavity length(L)에 대한 빔폭 의존성을 해석하였다.

ABSTRACT In this paper, the theoretical analysis of lateral guiding in stripe geometry DH Laser Diode is performed. In the analysis, the gain & refractive index variations in active layer are modeled by very analogous mathematical function to their real profiles and the two dimensional lateral waveguiding of DH LD have been analyzed by perturbation theory. Finally, the beam width dependence of refractive index variation(Δn), active layer width(d), and cavity length(L) have been analyzed.

1. 序 論

스트라이프構造型DH (Double Heterojunction) LD (Laser Diode)에서 光導波機構 (waveguiding mechanism)는 接合面에 수직방향 (vertical)과 평행방향 (lateral)으로 나누어 생각할 수 있으며 이 중 접합면에 수직한 방향으로의 waveguiding기구는 二重헤테로接合에 의한 유전체 도파로로서 optical

confinement factor (Γ)로 특징지어지며 TE 기본모우드 전송에 필요한 maximum optical confinement factor (Γ_{max})⁽¹⁾의 존재도 이미 발표된 바 있다.

그러나 lateral 방향으로의 光導波機構는 극히 최근에 와서 비로소 이해가 가능하여 이에 대한 많은 理論 및 實驗的研究가 시도되었다.

1973年 Cook & Nash⁽²⁾는 처음으로 DH LD의 lateral guiding을 解析하였으나 物理的機構가 理論에 충분히 포함되지 못하고 filamentary lasing을 주로 설명했으며 같은 해 Schlossor⁽³⁾는 活性層의 屈折率의 실수항이 非活性層 (passive layer)의 그것보다 낮을 수 있다고 하여 利得에 의한 guiding의 重要性을 제시하였다.

1974年 Haki⁽³⁾는 基本모우드의 gain guiding을 1차원적 모델로서 解析하였고 1975年⁽⁵⁾에는 self-consistent 모델로서 빔폭을 계산하였다. 같은 해

* 光云工科大學電子工學科
 Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University,
 Seoul, 132 Korea

** 延世大學校工科大學電子工學科
 Dept. of Electronic Engineering, Yonsei University,
 Seoul, 120 Korea

論文番號 82-14 (接受 1982. 8. 16)

Cook & Nash⁽⁶⁾는 이득과 미소 굴절률 변화에 의해 waveguiding을 해석하고 반송자에 의해 anti-guiding의 실험적 근거를 제시하였다.

그 후 1977년 Paoli⁽⁷⁾는 처음으로 2차원적 모형을 제시하고 주입전류의 함수로 빔폭변화를 실험적으로 측정하였으며 Kirkby⁽⁸⁾는 스트라이프폭에 따라 구체적인 guiding mechanism을 제시하고 실험적으로 확인하였다.

1978⁽⁹⁾, 1979⁽¹⁰⁾년에는 Streifer는 대칭형과 비대칭형 guiding을 실제에 아주 근사한 이득변화를 사용하여 lateral waveguiding을 해석하였으며 Butler & Delaney⁽¹¹⁾는 Hermite-Gaussian함수의 선형 결합으로 빔폭의 세기를 결정하고 이를 사용하여 빔폭을 계산하였다.

따라서 현재까지의 研究結果에 의하면 스트라이프構造型 DH Laser Diode의 lateral waveguiding은 活性層(active layer)내에서의 이득 및 굴절률의 空間的變化에 기인됨이 밝혀졌다.

그러나 지금까지의 分析모델의 問題點은 DH LD의 활성층에서의 이득 및 굴절률의 변화가 비 活性層에서도 나타난다고 가정해야만 모우드 방정식을 유도해 낼 수 있는데 있으며 이득이나 미소한 굴절률 변화에 의한 guiding을 독립적으로 해석할 수 있어야만 lateral guiding機構 및 빔폭변화를 정확히 예측할 수 있으므로 本論文에서는 실제에 아주 근사한 이득 및 굴절률 변화에 대한 수학적 모델⁽⁹⁾을 이용하여 섭동이론⁽¹²⁾에 의해 새로이 전개된 perturbed mode equation에 의한 DH LD의 lateral guiding機構를 해석하고 그 결과에 대해 논하고자 한다.

2. Perturbed Mode Equation

스트라이프構造型 DH LD의 lateral guiding을 결정하는 활성층의 이득 및 굴절률의 空間적 변화에 의한 광도파 현상을 해석하기 위해 새로이 전개되어 이미 본 저자에 의해 발표된 바 있는 perturbed mode equation⁽⁹⁾은 다음과 같다.

DH LD의 구조를 그림 1과 같이 생각할 때 lateral方向으로의 변화가 없을 때의 전자파의 전계 E_x 는

$$\nabla^2 E_x = \mu \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x \quad (1)$$

로 해석된다. 이 때 모우드는 vertical구조의 굴절률 변화에 의해 결정되며 전계 E_x 는 각 모우드로서 Fourier 전개가 가능하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

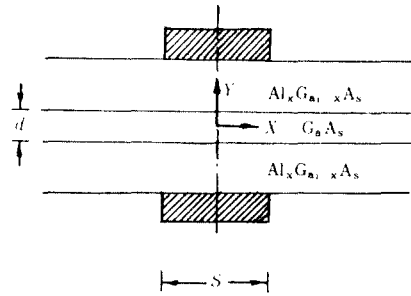


그림 1 스트라이프構造型 DH LD의 횡단면
Cross section of stripe geometry DH laser diode.

$$E_x = \sum_l \frac{A_l}{2} E_x(y) e^{j(\omega t - \beta_l z)} \quad (2)$$

위 식에서 l 은 모우드 번호이고 A_l 과 β_l 은 l 번째 모우드의 크기 및 전송계수를 의미한다. 그러나 lateral方向으로 이득과 굴절률의 변화가 있을 때 이러한 변화를 polarization perturbation ($P_{pert}(x, t)$)로 대치함으로써 다음과 같은 perturbed wave equation이 얻어진다.

$$\nabla^2 E_x = \mu \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x + \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} [P_{pert}(x, t)] \quad (3)$$

이러한 perturbation이 존재할 때 모우드 방정식은 (2)식에서 Fourier 급수전개에 계수로 사용된 A_l 의 미분 방정식으로 나타난다. 따라서 (2)식을 (3)식에 대입하고 (1)식을 이용하여 first-order perturbation theory를 적용한 후 모우드의 orthogonality 조건을 적용하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} e^{j(\omega t - \beta z)} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \frac{2\omega\mu}{\beta} - j\beta e^{j(\omega t - \beta z)} \frac{2\omega\mu}{\beta} \\ & = \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_{-\infty}^{\infty} [P_{pert}(x, t)] E_x dy \quad (4) \end{aligned}$$

(4)식은 DH LD에서의 perturbed guidance를 해석하기 위한 새로운 식으로 lateral방향의 이득이나 굴절률 변화가 단지 (P_{pert})_x에 포함되어 있으므로 독립적으로 두 物理的現象을 해석할 수 있으며 vertical축에 대한 적분으로 생긴 (4)식의 우변은 DH LD의 전송 모우드가 2차원적 효과에 의해 결정됨을 보여준다.

3. lateral guiding의 解析

3-1 利得變化에 의한 guiding

그림 1의 DH LD구조는 guiding mechanism을 해석하기 위해 그림 2와 같이 도시할 수 있다. 그림에서 n_1, n_2, n_3 는 굴절률을 나타낸다.

그림 2에서 vertical方向은 헤테로접합에 의해

①, ③영역의 굴절률은 각각 n_1, n_3 이며 lateral 방향으로의 굴절률 변화는 없지만 ②영역에서는 반송자가 활성층에 주입됨에 따라 n_{2r} 은 x 에 따라 변하게 된다. 이러한 이득변화는 ②영역의 복소 굴절률의 허수항으로 표시할 수 있는데 $n_2 = n_3$ 인 대칭구조의 경우 다음과 같다.

$$n(x, y) = \begin{cases} n_1 & : x > \frac{d}{2} \\ n_{2r} + jn_{2i}(x) & : -\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2} \\ n_1 & : x < -\frac{d}{2} \end{cases} \quad (5)$$

활성층에서 나타나는 이득분포는 Streifer의 결과⁹⁾를 이용하면 실제이득변화가 포물선 형태를 취하므로 다음과 같은 포물선 함수로^{2), 10)} 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned} n_{2i}(x) &= -\eta_0 + \eta_1 (x/x_1)^2 \\ x_0 &= x_1 (\eta_0/\eta_1)^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서 η_0 는 $x=0$ 에서 이득크기를 의미하며 η_1/x_1^2 는 이득의 감소정도를 나타내는 커브의 fitting factor이다. 또한 x_0 는 이득이 zero가 되는 점을 의미한다. ($n_{2i}(\pm x_0) = 0$)

위 식의 모델링 parameter를 실제 DH LD에서 나타나는 threshold gain (g_{th})로 표시하면 g_{th} 는

$$g_{th} = \frac{1}{l} \left\{ \Gamma \theta_{fc} + \frac{1}{l} l_n \left(\frac{1}{R} \right) \right\} \quad (7)$$

이므로

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \left(\frac{4\pi}{\lambda} n_{2r} \right)^{-1} g_{th} = \frac{\lambda g_{th}}{4\pi n_{2r}} \\ &= \frac{\lambda}{4\pi n_{2r}} \frac{1}{l} \left(\Gamma \theta_{fc} + \frac{1}{l} l_n \left(\frac{1}{R} \right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\eta_1/x_1^2 = \frac{1}{x_0^2} \frac{\lambda}{4\pi n_{2r}} \frac{1}{l} \left\{ \Gamma \theta_{fc} + \frac{1}{l} l_n \left(\frac{1}{R} \right) \right\} \quad (9)$$

와 같이 표현할 수 있다. 위 식에서 θ_{fc} 는 자유

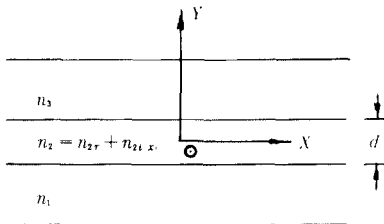


그림 2 Guiding mechanism을 分析하기 위한 DH LD의 모델도.
Modeled structure of DH LD to analyse Guiding mechanism.

반송자에 의한 흡수계수이며, L 은 cavity length이고 R 은 mirror의 반사계수를 의미한다.

따라서 활성층에 반송자가 주입됨으로써 나타나는 lateral 방향으로의 gain perturbation polarization은 (6)식에서 구한 이득분포를 사용하여 다음과 같이 설정할 수 있다¹⁰⁾.

$$P_{pert} = j2\epsilon_0 n_{2r} \{ -\eta_0 + \eta_1 (x/x_1)^2 \} E_x \quad : -\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2}$$

$$P_{pert} = 0 \quad : |x| > \frac{d}{2} \quad (10)$$

(10)식을 (4)식에 대입하여 A_z 에 대한 미분 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - j\beta \frac{\partial A}{\partial z} = -j\omega^2 \mu \epsilon_0 n_{2r} \quad (11)$$

여기서 I_z 은 l 번째 모우드의 optical confinement factor이다.

lateral guiding에서 문제가 되는 것은 우선 A_z 의 x 의존성을 구하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$A_{lx} = e^{-\xi x} \cdot H_n(\sqrt{\xi} x) \quad (12)$$

$$\xi^2 = -2j\omega^2 \mu \epsilon_0 n_{2r} \eta_1 l^2 / x_1^2$$

위 식에서 H_n 은 n 차 Hermite다항식을 뜻하며 ξ 는

$$\xi = (1-i) (k_0^2 n_{2r} \eta_1 / x_1^2 l)^{1/2} \quad (13)$$

이 된다.

(13)식에서 실수항은 모우드의 크기를 나타내며 허수항은 위상을 표시하므로 ξ 는 다음과 같이 분리될 수 있다.

$$\xi = \xi_{re} + j\xi_{im} \quad (14)$$

따라서 (13)식과 (14)식으로부터

$$\xi_{re} = (k_0^2 n_{2r} \eta_1 / x_1^2 l)^{1/2} \quad (15)$$

$$\xi_{im} = -[k_0^2 n_{2r} \eta_1 / x_1^2 l]^{1/2}$$

이 되므로 (12)식으로부터 기본모우드인 경우 $n=1$ 로 하면 $H_n=1$ 이므로 이 때의 빔폭은

$$W_e = \sqrt{\frac{2}{\xi_{re}}} \quad (16)$$

$$\xi_{re} = [k_0^2 n_{2r} \eta_1 / x_1^2 l]^{1/2}$$

와 같이 구할 수 있으며 위 식에서 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 를 의미한다.

3-2 미소 굴절률 변화에 의한 guiding

lateral 방향으로 미소한 굴절률 변화가 있을 때의 perturbation polarization은

$$P_{pert}(x, t) = -\epsilon_0 \Delta n^2 (x/x_1)^2 E_x$$

$$: -\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2} \quad (17)$$

$$P_{\text{pert}}(x, t) = 0 \quad : |x| > \frac{d}{2}$$

과 같이 표현될 수 있다.

따라서 (17)식을 (4)식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - 2j\beta \frac{\partial A}{\partial z} = \mu \epsilon_0 \omega^2 \Delta n^2 (x/x_1)^2 E_x A I_1 \quad (18)$$

이 경우도 전절 (3-1)과 같은 과정을 거쳐 A_{Lx} 를 구하면 기본모우드의 경우

$$A_{Lx} = e^{-\frac{\beta}{2} x^2} \cdot I_0(\sqrt{\beta} x) \quad (19)$$

$$\beta^2 = \Gamma \mu \epsilon_0 \omega^2 \Delta n^2 / x_1^2$$

와 같이 된다. 이 때 빔폭은

$$W_e = \sqrt{\frac{2}{\beta}} \quad (20)$$

로 주어진다.

실제계산에 있어서도 Δn^2 도 2차원적 효과를 고려하기 위해 다음 식으로 주어야 한다⁷⁾.

$$\Delta n^2 = n_{eff} \Delta n = [\epsilon_0 l' + (1-l') \epsilon_1]^{1/2} \Delta n$$

4. 빔폭 변화의 分析

3장에서 구한 빔폭식에 DH LD parameter 값을 대입하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구한 빔폭변화는 다음과 같다.

4-1 이득변화에 의한 빔폭분석

그림 3은 이득변화에 의한 빔폭의 활성층 두께 의존성을 나타낸 것으로 그림에서 보면 활성층 두께가 작아짐에 따라 빔폭이 증가하며 특히 $d=0.1\mu\text{m}$ 이하에서 상당히 증가함을 볼 수 있다.

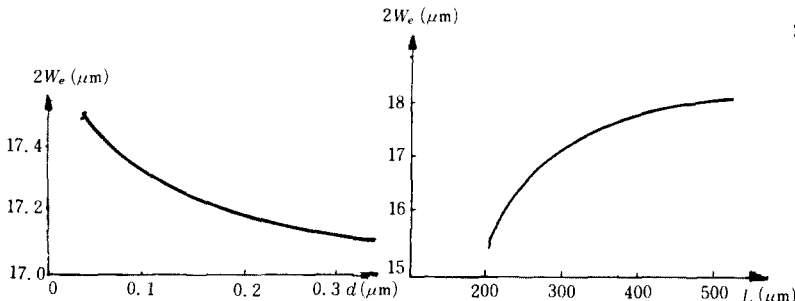


그림 3 빔폭의 활성층 두께 의존성 (gain guiding)
Beam width dependence of active layer width (gain guiding).

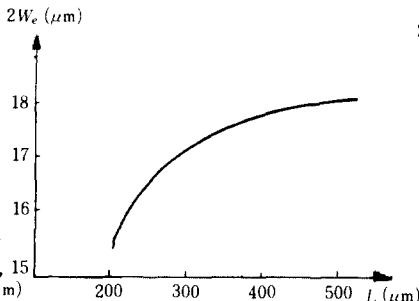


그림 4 빔폭의 cavity length 의존성 (gain guiding)
Beam width dependence of cavity length (gain guiding).

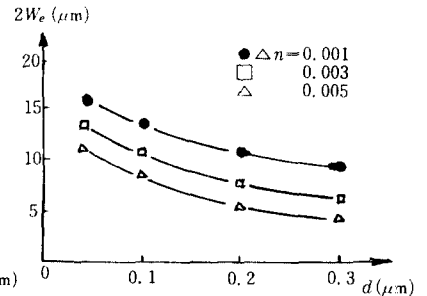


그림 5 빔폭의 활성층 두께 의존성 (refractive index guiding)
Beam width dependence of active layer width (refractive index guiding).

또한 그림 4는 레이저 cavity length의 변화에 따른 빔폭의 변화를 도시한 것으로 cavity length가 증가하면 (7)식에서 mirror loss는 감소하고 빔폭은 증가하게 됨을 알 수 있다.

특히 cavity length가 $200\mu\text{m}$ 이상에서는 빔폭이 상당히 증가함을 볼 수 있다.

4-2 미소 굴절률 변화에 의한 빔폭분석

그림 5에는 굴절률 변화를 $\Delta n=0.001$ 부터 $\Delta n=0.005$ 까지 변화시켜 가면서 활성층 두께 d 의 변화에 따른 빔폭의 계산결과를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 guidiry의 2차원적 효과의 중요성을 알 수 있으며 활성층 두께가 얇아지면 빔폭이 증가함을 알 수 있다.

그림 6에는 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 층과 GaAs 활성층과의 굴절률차 Δn_e 의 변화에 따른 빔폭의 계산결과를 나타내었다. 그림 5와 비교해 볼 때 Δn_e 의 변화는 d 의 변화에 비해 빔폭에 미치는 영향이 작음

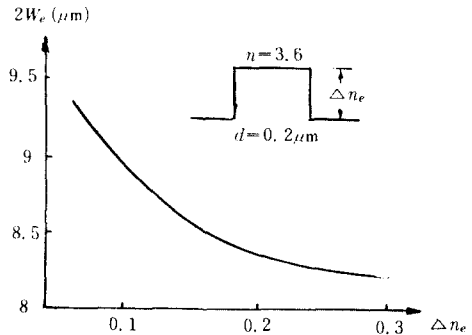


그림 6 빔폭의 Δn_e 의존성, $d=0.2\mu\text{m}$ (refractive index guiding)
Beam width dependence of Δn_e , $d=0.2\mu\text{m}$ (refractive index guiding).

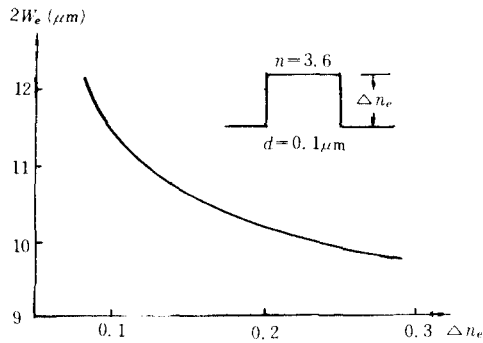


그림 7 빔폭의 Δn_e 의 의존성, $d=0.1\mu\text{m}$
(refractive index guiding)
Beam width dependence of Δn_e , $d=0.1\mu\text{m}$
(refractive index guiding).

을 알 수 있으나 vertical guiding이 덜되면 날 될 수록 빔폭도 증가함을 보여주고 있다. 그림 7도 역시 $d=0.1\mu\text{m}$ 일 때 Δn_e 의 변화에 따른 빔폭의 변화로서 그림 5와 같은 결과를 나타낸다.

5. 結 論

本論文에서는 DH LD의 活性層에서의 利得 및 屈折率의 變化를 실제에 매우 근사한 數學的 모델을 이용하여 결정하고 집중이론에 의한 lateral waveguiding 기구를 해석하고 빔폭의 變化를 분석하였다.

분석결과 활성층의 미소 굴절률 變化가 증가함에 따라 빔폭이 감소되고 활성층폭이 감소함에 따라 빔폭은 증가되며 특히 $0.1\mu\text{m}$ 이하에서 상당히 증가됨이 밝혀졌다.

그리고 cavity length가 증가함에 따라 빔폭도 증가하고 특히 cavity length가 $200\mu\text{m}$ 이상에서 상당히 증가됨이 분석되었다.

参 考 文 献

- (1) 朴漢奎, 權宰機, "DH LD의 optical confinement factor 와 peak field intensity," 1979년 5월, 집중실험보고서용, 전자공학학회, 1979.
- (2) F.R Nash, D.D. Cook, "Mode Guidance Parallel to the Junction Plane of Double Heterostructure GaAs Lasers," J. Appl. phys. vol. 44, no. 10, pp. 4696-4707, 1973.
- (3) Schlosser, "Gain induced modes in planar structure," B. S. T. J., vol. 52, no. 6, pp. 887-905, 1973.
- (4) B.W. Hakki, "Mode Gain and Junction current in GaAs under lasing conditions," J. Appl. phys., vol. 45, no. 1, pp. 288-294, 1974.
- (5) B.W. Hakki, "Striped GaAs Lasers; Mode Size and Efficiency," J. Appl. phys. vol. 46, no. 6, pp. 2723-2730, 1975.
- (6) D.D. Cook & F.R. Nash, "Gain induced Guiding and Astigmatic Output Beam of GaAs Lasers," J. Appl. phys. vol. 46, no. 4, pp. 1660-1672, 1975.
- (7) T.L. Paoli, "Waveguiding in Stripe Geometry Junction Laser," IEEE J. of Quantum Electronics, vol. QE-13, no. 8, pp. 662-668, 1977.
- (8) P.A. Kirkby, et al, "Observation of self focusing in stripe geometry Semiconductor lasers and the development of a comprehensive model of their operation," IEEE. J. of Quantum Electronics, vol. QE-13, no. 8, pp. 705-719, 1977.
- (9) W. Streifer, "Analysis of Gain-induced waveguiding in stripe geometry diode lasers," IEEE. J. of Quantum Electronics, vol. QE-14, no. 6, pp. 418-427, 1978.
- (10) W. Streifer, "Symmetrical and asymmetrical waveguiding in very narrow conducting stripe lasers," IEEE J. of Quantum Electronics, vol. QE-15, no. 3, pp. 136-141, 1979.
- (11) J.K Butler & J.B. Delaney, "A Rigorous Boundary Value Solution for the Lateral Modes of Stripe Geometry Injection Lasers," IEEE J. of Quantum Electronics, vol. 14 no. 7, pp. 507-513, 1978.
- (12) 金恩洙, 朴漢奎, 楊仁應, "스트라이프構造型 DH Laser Diode의 Lateral Guiding 解析에 관한 研究," 대한전자공학회지, vol. 17, no. 5, pp. 1-7, 1980.
- (13) 金恩洙, 朴漢奎, "DH Laser Diode에서의 利得 및 屈折率 變化에 관한 解析," 1979년 집중실험보고서용, 대한전자공학회, 1979.



金 恩 洙 (Eun Soo KIM) 正會員
1955年 8月 1日 生
1978年 2月 : 延世大學校 電子工學科 卒業
1980年 2月 : 延世大學校 大學院 電子工學科 卒業 (工學碩士)
1980年 3月 ~ 現在 : 延世大學校 大學院 電子工學科 博士課程
1981年 3月 ~ 現在 : 光云工科大學 電子工學科 專任講師



朴 漢 奎 (Han Kyu PARK) 正會員
1941年 6月 21日 生
1964年 2月 : 延世大學校 電氣工學科 卒業
1968年 2月 : 延世大學校 大學院 電氣工學科 卒業 (工學碩士)
1973年 : 불란서 라리대학교 (소르본느대학교) 博士課程修了 (DEA)
1975年 : 불란서 라리6대학 (ph. D)
1976年 ~ 現在 : 延世大學校 工科大學 電子工學科 教授