論文95-32A-2-6

1.55㎛ DFB 레이저의 특성에 미치는 Grating 구조와 Mirror 위치의 영향 -II

(Effect of grating structures and mirror positions on characteristics of 1.55㎛ DFB lasers-II)

權 奇 英 *

(Kee Young Kwon)

요 약

이 논문에서는 한 쪽 거울면에 무반사(AR) 코팅을 해준 1.55㎛ DFB 레이저에서, 굴절율 grating과 이득 grating이 공존하는 경우 두 grating의 구조와 배치방법에 따른, 발진 주파수와 발진이득 그리고 축방향으로의 광강도 공간분포 등의 특성 변화를 이론적으로 해석함으로써, 거울면의 위치에 관계없이 좋은 특성을 갖는 LD를 얻을 수 있는 최적구조를 얻었으며, 이는 굴절율 grating과 이득 grating의 위상 차이 $\Delta\Omega$ 를 $\Delta\Omega=0$ 또는 π로 하고, $(\kappa L)_r$ 값은 1~3 으로, $(\kappa L)_i$ 값은 0.5~0.9 로하는 것이 이상적임을 지적한다. 이 경우 $\Delta\Omega=0$ 인 DFB 레이저가 $\Delta\Omega=\pi$ 인 DFB 레이저보다 1.2 배 정도 더 좋은 특성을 갖는 것도 밝힌다.

Abstract

The operating characteristics, such as, the threshold gain, lasing frequency, and longitudinal intensity profile, etc., of 1.55㎛ DFB laser diode with index and/or gain grating structures and with one side AR-coated mirror have been analyzed. From this analysis, the optimum design parameters have been shown that $\Delta\Omega$ (the phase difference between index grating and gain grating) is 0 or π, $(\kappa L)_r=1\sim3$ and $(\kappa L)_i=0.5\sim0.9$. It has been also shown that the modal selectivity and intensity uniformity of the DFB lasers with $\Delta\Omega=0$ are ~1.2 times better than those of the DFB lasers with $\Delta\Omega=\pi$.

I. 서 론

광대역 광통신 시스템에 소요되는 광원으로 Bragg 산란을 이용한 DFB (Distributed Feedback) 레이저 다이오드(LD)가 각광을 받고 있으나, 굴절율 결합 DFB 레이저의 경우 발진파장의 축퇴[1]와, 거울면의 반사율과 위상에 민감한 발진특성이[2][3] 문제가 된다. 이를 개선하기 위하여 무반사막 코팅 λ/4 위상 편이 DFB LD가 제안되었지만, 잔류 반사율이 극히 작아야하고(≪0.005),[4] 공간 불균일 이득분포 현상이 심한 것[5]이 문제가 되었다. 최근에 제안된 다른 방법의 LD는 위상 편이가 없는 이득/손실 결합 DFB LD이며, 발진이득의 차이와 공간 불균일 이득분포 현상 등에서 향상된 특성을 보이고, 피드백에도 덜 민감한 특성을 보여준다.[6][7][8]

본 논문은 한 쪽 거울면에 무반사(AR) 코팅을 해준 1.55㎛ DFB LD에서, 굴절율 grating과 이득

* 正會員, 公州大學校 工科大學 電子工學科

(Dept. of Electron. Eng., College of Eng., Kongju National Univ.)

接受日字 : 1994년 4월 26일

grating이 공존하는 경우 두 grating의 구조와 배치 방법에 따른, 발진 주파수와 발진이득 그리고 축방향으로의 광강도 공간분포 등의 특성 변화를 이론적으로 해석함으로써, 거울면의 위치변화에도 불구하고 LD의 동작특성이 우수하도록, grating의 구조를 최적화하고자 하는 것이 목적이다. 제 II장에서 이론적 배경을 설명하고, 제 III장에서는 굴절율 및 이득 grating의 구조를 어떻게 하는 것이, 거울면의 위치에 관계없이 LD의 동작특성을 좋게 하는지 이론적 해석결과를 바탕으로 검토하고, 마지막으로 결론을 내렸다.

II. 이 론 [9] [10]

1. 발진 모드와 발진 이득

굴절율 grating과 이득 grating이 주는 효과를 모두 고려하기 위하여, 다음 식과 같이 굴절율 및 이득의 변화를 표현할 수 있다.

$$n(z) = n + (\Delta n)\cos(2\pi z/\Lambda + \Omega) \quad (1)$$

$$\alpha(z) = \alpha + (\Delta\alpha)\cos(2\pi z/\Lambda + \Omega + \Delta\Omega) \quad (2)$$

여기서 $n(z)$는 굴절율이고, $\alpha(z)$는 이득이다. z는 축방향으로의 좌표값으로, 좌측 거울은 $z= -L'/2$ 에 위치하고, 우측 거울은 $z= L''/2$ 에 위치한다.

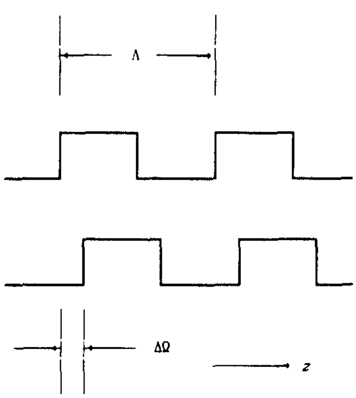


그림 1. 굴절을 grating과 이득 grating이 공존하는 DFB 레이저의 단면구조. A는 굴절율과 이득 grating의 주기이고, $\Delta\Omega$는 굴절율 grating과 이득 grating사이의 위상차이를 나타낸다.

Fig. 1. Schematic diagram of complex coupled structures. A is period of index and gain gratings and $\Delta\Omega$ is a phase difference between index and gain gratings

그림 1.에서 보는 바와 같이 Λ와 Ω는 각각 굴절율 grating과 이득 grating의 주기 및 위상이고, $\Delta\Omega$는 굴절율 grating과 이득 grating의 위상차이를 나타낸다. 만족시켜야 하는 파동 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 E(z,t) + k^2(z)E(z,t) = 0 \quad (3)$$

식(3)의 해는 $E(z,t) = E(z)e^{i\omega t}$ 의 형태로 나타낼 수 있으며, $k^2(z)$는 $\Delta n \ll n$, $\alpha \ll \beta$ 그리고 $\Delta\alpha \ll \beta$라는 가정하에 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} k^2(z) \approx\ & \beta^2 + 2i\alpha\beta + 4x\beta\cos(2\beta_0 z + \Omega) \\ & -2i(\Delta\alpha)\beta\sin(2\beta_0 z + \Omega)\sin(\Delta\Omega) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\beta_0 = \pi/\Lambda \quad (5)$$

$$\beta = n\omega/c \quad (6)$$

$$x = \left(\frac{\beta}{2}\right)\left(\frac{\Delta n}{n}\right) + i\frac{\Delta\alpha}{2}\cos(\Delta\Omega) \quad (7)$$

식 (4)의 α는 레이저 발진을 위한 문턱에서의 순이득이며, 식 (6)의 발진주파수 ω는 β를 알면 구할 수 있다. 일반성을 잃지 않고 $E(z)$를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E(z) = R(z)e^{-i\beta_0 z} + S(z)e^{i\beta_0 z} \quad (8)$$

여기서 $R(z)$는 z의 양의 방향으로 전파하는 파동이고 $S(z)$는 z의 음의 방향으로 전파하는 파동이며, 다음 식을 만족시킨다.

$$-R' + (\alpha - i\delta)R = ix'e^{-i\Omega}S \quad (9)$$

$$S' + (\alpha - i\delta)S = ix''e^{i\Omega}R \quad (10)$$

여기서

$$\delta = \beta - \beta_0 \quad (11)$$

$$x' = x + \frac{\Delta\alpha}{2}\sin(\Delta\Omega) \quad (12)$$

$$x'' = x - \frac{\Delta\alpha}{2}\sin(\Delta\Omega) \quad (13)$$

(9) (10)식은 다음과 같은 형태의 해를 갖는다.

$$R(z) = r_1 e^{\gamma z} + r_2 e^{-\gamma z} \quad (14)$$

$$S(z) = s_1 e^{\gamma z} + s_2 e^{-\gamma z} \quad (15)$$

여기서 r_1, r_2, s_1과 s_2는 상수이다. 최종적으로 다음과

같은 고유치 방정식을 얻는다.

$$\gamma L = \frac{-1k' L\sinh(\gamma L)}{D} \left\{ \left(\frac{k''}{k}\rho_l + \rho_r\right)^2 (a-\rho^{2)}\cosh(\gamma L) \pm (a+\rho^{2)}\left[\frac{(k''}{k}\rho_l - \rho_r)^2\sinh^2(\gamma L) + \frac{k''}{k}(1-\rho^2)^2\right]^{\frac{1}{2}} \right\} \tag{16}$$

여기서

$$D = (1+\rho^2)^2 - 4\rho^2\cosh^2(\gamma) \tag{17}$$

$$\rho^2 = \rho_l\rho_r = \widehat{\rho_l}\widehat{\rho_r}e^{-i2\beta_0 L} \tag{18}$$

$$\rho_l = \widehat{\rho_l}e^{-i\beta_0 L'}e^{i\Omega} \tag{19}$$

$$\rho_r = \widehat{\rho_r}e^{-i\beta_0 L''}e^{-i\Omega} \tag{20}$$

$$L = (L' + L'')/2 \tag{21}$$

식 (16)에서 γ를 구할 수 있으며, 이로 부터 문턱에서의 이득 a와 δ를 구하고, δ로 부터 발진주파수 $\omega = \frac{c\beta}{n} = \frac{c}{n}(\beta_0+\delta)$를 구할 수 있다.

2. 모드의 광강도 공간분포

식 (14)와 (15)의 $R(z)$, $S(z)$표현식에서 r_1, r_2, s_1및s_2의 절대치는 알 수 없으나 상대적인 크기는 다음식으로 부터 알 수 있다.

$$r_1 = (ix' e^{-i\Omega}/\hat{\Gamma})s_1 \tag{22}$$

$$r_2 = \frac{\left(\frac{x'}{x''} - \rho_l\hat{\Gamma}/ix''\right)}{(\rho_l - \hat{\Gamma}/ix'')} e^{-i\Omega}e^{-\gamma L'}s_1 \tag{23}$$

$$s_2 = \frac{ix''}{\hat{\Gamma}} \frac{\left(\frac{x'}{x''} - \rho_l\hat{\Gamma}/ix''\right)}{(\rho_l - \hat{\Gamma}/ix'')} e^{-\gamma L'}s_1 \tag{24}$$

$$\hat{\Gamma} = -\gamma + a - i\delta \tag{25}$$

식 (22), (23), (24)를 식 (14), (15)에 대입하여, 공진기 내 축방향으로의 광강도 공간분포를 다음식으로부터 구할 수 있다.

$$P_t(z) = c_1|\ R(z) + S(z)\,|^2 \tag{26}$$

Ⅲ. 레이저 특성 수치해석

1. 계산 방법

제1차 Bragg 산란이 일어나는 grating의 주기를 0.225㎛ 로 하였다. 편의상 식 (1), (2)에서 $\Omega=0$가 되게 $z=0$가 되는 지점을 선택하였고, 식 (16)의 γ는 1×10^{-5}보다 작은 오차를 갖도록 반복 계산을 하였다.

한 쪽 거울면에 무반사(AR) 코팅을 하면 단 한 개의 반사면만 존재하게 되며, 편의상 우측 거울에 무반사 코팅을 한 경우를 가정하였다. 이때 $\rho_r=0$ 이므로 우측 거울의 위치에 따른 ρ_r의 위상 변화는 없고, 좌측 거울의 위치 $z=-L'/2$에 의해서만 문턱에서의 순이득 a와 모드의 주파수, 축방향 전계분포 등이 변화하게 된다. 이러한 특성 변화는 식 (16)에서 알 수 있듯이 식 (12) 및 (13)의 x값과 $\Delta\Omega$에 의존하게 된다.

xL은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} xL &= \left(\frac{\beta}{2}\right)\left(\frac{\Delta n}{n}\right)L + i\left(\frac{\Delta a}{2}\right)L\cdot\cos(\Delta\Omega) \\ &= (xL)_r + i(xL)_i\cdot\cos(\Delta\Omega) \end{aligned} \tag{27}$$

여기서

$$(xL)_r = \left(\frac{\beta}{2}\right)\left(\frac{\Delta n}{n}\right)L \tag{28}$$

$$(xL)_i = \left(\frac{\Delta a}{2}\right)L \tag{29}$$

편의상 $(xL)_r=$ 0.0, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, …, 10의 13개 값을 선택하였고, $(xL)_i=$ 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 의 6개 값을 선택하였다.

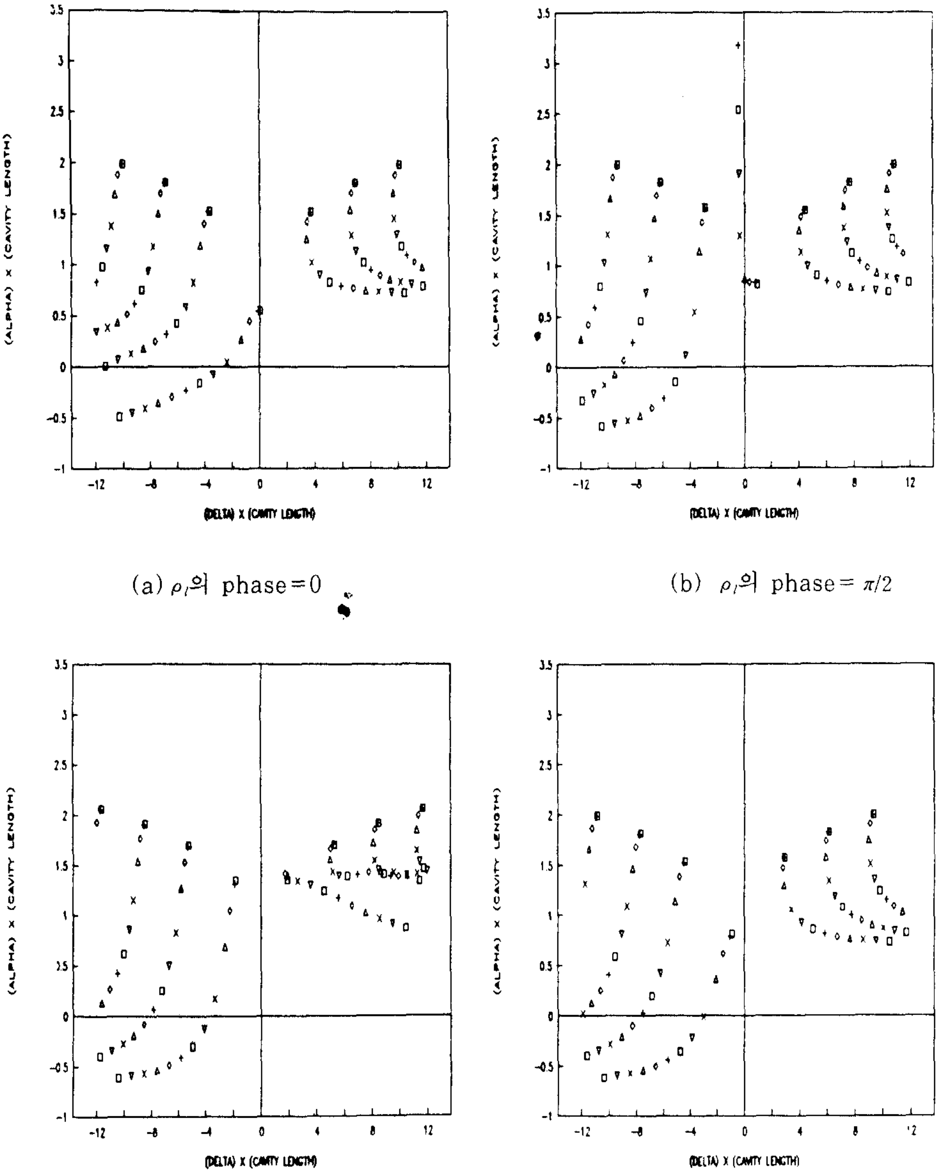
$\Delta\Omega$는 굴절율 grating과 이득 grating의 위상 차이이며, 편의상 $\Delta\Omega=$ 0.0, $\pi/4$, $\pi/2$, 3 $\pi/4$, π, 5 $\pi/4$, 3 $\pi/2$, 7 $\pi/4$ 로 8개 값을 선택하여 계산하였다.

좌측 거울의 위치에 따른 특성을 파악하기위하여 편의상 좌측 거울의 위치 $z=-L'/2$을, $z=\frac{199.6621}{2}$ μm (phase=$-\pi/2$), $z=\frac{199.774}{2}$ μm (phase=π), $z=\frac{199.8873}{2}$ μm (phase= $\pi/2$)와 $z=\frac{200}{2}$ μm (phase=0)의 4 경우로 나누어서 계산하였다.

2. 계산 결과 및 검토

1) 거울의 위치가 모드 이득에 미치는 영향

한 개의 반사면을 갖는 경우 즉 우측 거울에 무반사 코팅을 한 경우 $\rho_r=0$이며, 따라서 우측 거울의 위치에 따른 ρ_r의 위상 변화는 없다. 편의상 $\Delta\Omega=0$, $(xL)_i=0.7$ 로 고정시키고, 좌측 거울의 위상만 0, $\pi/2$, π, $-\pi/2$의 4 가지로 변화시키면서, 각 발진 모드의 aL vs. δL을 $(xL)_r$의 변화에 따라 그린 것이 그림 2.에 나타나 있다. 그림에서 각 모드는 기호로 표시되어 있으며, $(xL)_r=0$은 「□」, $(xL)_r=0.1$은 「+」,



(a) ρ_l의 phase=0 (b) ρ_l의 phase= $\pi/2$

(c) ρ_l의 phase= π (d) ρ_l의 phase= $-\pi/2$

그림 2. $\Delta\Omega=0$, $(kL)_i=0.7$ 로 고정하고 $(kL)_r$을 0에서 10까지 변화시킬 때, 좌측 거울의 위상 조합 4가지에 대한 각 발진 모드의 αL vs. δL 도표

Fig. 2. αL vs. δL graph with $(kL)_r$ as a parameter, in case of $\Delta\Omega=0$, and $(kL)_i=0.7$.

$(\kappa L)_r=0.5$는 「◇」, $(\kappa L)_r=1$은 「△」, $(\kappa L)_r=2$은 「×」, $(\kappa L)_r=3$은 「▽」, $(\kappa L)_r=4$는 「□」, $(\kappa L)_r=5$는 「+」, $(\kappa L)_r=6$은 「◇」, $(\kappa L)_r=7$은 「△」, $(\kappa L)_r=8$은 「×」, $(\kappa L)_r=9$는 「▽」, $(\kappa L)_r=10$은 「□」의 순서로 되어있다. 순수하게 굴절율 grating만 있는 $(\kappa L)_i=0$인 경우에는 (b) ρ_l의 phase= $\pi/2$, (d) ρ_l의 phase=$-\pi/2$인 조건에서 αL vs. δL 도표가 좌우 대칭이므로, 동시에 두 모드

가 발진하는 단점이 있으나[2], 식 (2)로 주어지는 이득 grating을 첨가 시킬 경우, 좌측 거울의 위치가 어떤 경우이더라도 그림 2.와 같이 모드 선별성이 두드러지게 향상됨을 알 수 있다.

2) $\Delta\Omega$ 와 $(\kappa L)_i$ 가 모드이득에 미치는 영향

$\Delta\Omega$ 와 $(\kappa L)_i$ 가 발진모드에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 좌측 거울의 위상은 ρ_l의 phase=0으로 고정하고, $(\kappa L)_i$는 0, 0.3, 0.7 의 3경우로 변화시키고, $\Delta\Omega$는 0, $\pi/2$, π 의 3경우로 변화시키면서, 총 9경우에 대한 αL vs. δL 도표를 그린 것이 그림 3.에 나타나 있다. 가로방향은 $(\kappa L)_i$가 증가하는 방향이고 세로방향은 $\Delta\Omega$가 증가하는 방향이다.

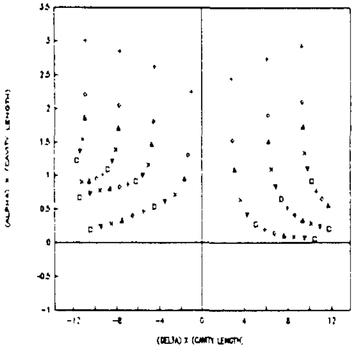
먼저 $\Delta\Omega$를 고정시키고 $(\kappa L)_i$를 변화시킬 경우에 모드 특성을 살펴보면 다음과 같다. $\Delta\Omega=0$ 로 고정시킨 (a)~(c)의 경우, $(\kappa L)_i$가 증가하면서 $\delta L < 0$ 의 모드들은 αL 이 감소하고 $\delta L > 0$ 모드들은 αL 이 증가하는 반시계 방향 회전 경향을 보인다. 그러나 $\Delta\Omega=\pi$ 인 (g)~(i)의 경우에는 이와 반대로, $(\kappa L)_i$가 증가하면서 $\delta L < 0$ 의 모드들은 αL 이 증가하고 $\delta L > 0$ 모드들은 αL 이 감소하는 시계 방향 회전 경향을 보인다. 또한 $\Delta\Omega=\pi/2$ 인 (d)~(f)의 경우에는, $(\kappa L)_i$가 증가하면서 전반적으로 αL의 변화가 거의 없으며, 단지 $(\kappa L)_r$이 2 이하인 모드들은 다소 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 다음 $(\kappa L)_i$를 고정시키고 $\Delta\Omega$를 변화시킬 경우를 살펴보면 다음과 같다. $(\kappa L)_i=0.7$로 고정시키고, (c) $\Delta\Omega=0$, (f) $\Delta\Omega=\pi/2$, (i) $\Delta\Omega=\pi$ 로 증가할 때 $\delta L < 0$ 의 모드들은 αL 이 증가하고, $\delta L > 0$ 모드들은 αL 이 감소하는 시계 방향의 회전 경향을 보인다. 따라서 $\Delta\Omega=\pi/2$ 가 되면, $\Delta\Omega=0$ 일 때 $(\kappa L)_i$ 이 0 에서 0.7로 증가하면서 αL 이 반시계 방향의 회전 변화를 한 것이 [(a)→(c)], $\Delta\Omega$가 0에서 $\pi/2$로 되면서 시계 방향의 회전과 상쇄되어 [(c)→(f)], 다시 원상태 [(a) $\Delta\Omega=0$ 이고 $(\kappa L)_i=0$]로 돌아오는 경향을 보인다. $(\kappa L)_i$를 고정시키고 $\Delta\Omega$를 변화시킬 경우, $\Delta\Omega$가 0에서 $\pi/2$, π 로 증가할 때 $\delta L < 0$ 의 모드들은 αL 이 증가하고, $\delta L > 0$ 모드들은 αL 이 감소하는 시계 방향의 회전 경향을 보이는데, 그 변화의 정도는 $(\kappa L)_i$의 값이 클 수록 더욱 커진다.

$\Delta\Omega=5\pi/4$, $3\pi/2$, $7\pi/4$ 의 경우는 식 (7), (12), (13)에서 알 수 있듯이, $0\le\Delta\Omega\le\pi$ 구간과 $\pi\le\Delta\Omega\le2\pi$ 구간 간의 대칭성으로 인하여, $\Delta\Omega=3\pi/4$, $\pi/2$, $\pi/4$ 때와 각각 유사한 특성을 보인다. 상기의 경향은 ρ_l의 phase=0이 아닌 다른 ρ_l의 phase를 갖는 경우에도 동일하며, 따라서 $\Delta\Omega=\pi/2$ 및 $\Delta\Omega=3\pi/2$ 인 경우에는 αL vs. δL 그림이 좌우대칭인 경우, 이득 grating의 효과를 증가시켜도 특성이 개선되지 않으므로, 모드 선별성이 매우 불량하여 DFB 레이저로 부적합함을 알 수 있다.

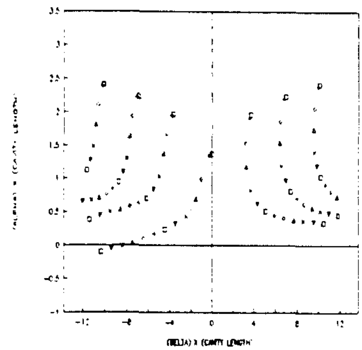
3) 발진모드의 gain 선별성과 안정성

여러가지 $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$, 그리고 $\Delta\Omega$ 값에 대하여 발진모드의 문턱이득 선별성을 비교하기 위하여, 좌측 거울의 위치를 ρ_l의 phase=0, $\pi/2$, π, $-\pi/2$ 의 4가지 경우로 변화시키면서, 각 경우에 대한 문턱이득이 제일 작은 모드(발진 모드)와 그 다음으로 작은 모드간의 문턱이득의 차이 Δg_{th}를 구하여, 총 4 가지 경우 중에서 제일 작은 Δg_{th} 값을, 주어진 $(\kappa L)_r$, $(\kappa L)_i$, 그리고 $\Delta\Omega$ 값에서의 min[Δg_{th}] 로 계산하였다.

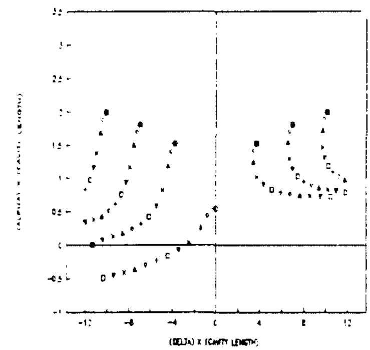
계산 결과를 정리하면 min[Δg_{th}] 값이 커서 발진모드 선별성이 좋은 경우는 $\Delta\Omega=0$ 인 DFB 레이저와 $\Delta\Omega=\pi$ 인 DFB 레이저인 경우이고, $\Delta\Omega=\pi/2$ 및 $\Delta\Omega=3\pi/2$인 경우에는 2.-2)에서 검토한 바와 같이 αL vs. δL 도표가 좌우 대칭인 경우 이득 grating을 강하게 첨가시켜도 특성이 개선이 않되는 까닭에, $\Delta\Omega=0$ 와 $\Delta\Omega=\pi$ 인 경우에 비하여 $1/10^4$ 이하의 선별성을 갖는다. $\Delta\Omega=0$와 $\Delta\Omega=\pi$인 두 경우에 대하여, 좋은 발진 모드 선별성을 보이는 $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$의 범위를 구하면, $(\kappa L)_r$는 2~5 인 경우이고 $(kL)_i$ 는 0.5~0.9 로 클수록 좋다. 동시에 발진모드가 안정하려면 공간 불균일 이득분포 현상이 없어야 한다. 이를 비교하기 위하여 식 (26)에 의한 축방향으로의 광강도 공간분포 $P(z)$를 구하여 min [$P_t(z)$] / Max[$t(z)$] 를 계산하고, ρ_l 의 phase 4 가지 경우 중에서 제일 작은 min [$P_t(z)$] / Max[$t(z)$] 값을, 주어진 $(L)_r$, $(kL)_i$, 그리고 $\Delta\Omega$값에서의 min (min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])로 함으로써, 이 수치를 비교하여 발진 모드의 안정성에 대한 척도로 사용하였다. 발진 모드 안정성을 비교하기위한 min (min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$]) 값을 보면, 무반사 코팅을 전혀 하지않은 두 개의 벽개 반사면을 갖는 DFB 레이저인 경우에는 $\Delta\Omega=\pi$ 일 때 나머지 일곱 가지 $\Delta\Omega$ 값을 갖는 경우에 비하여 $1/10^{11}$ 이하의 특별히 나쁜 특성을 보였지만[10], 이 경우에는 $\Delta\Omega=\pi$ 인 DFB 레이저가 $\Delta\Omega=0$ 인 DFB 레이저 경우 보다는 못하지만 다른 경우들과 비슷한 수준을 나타냈다. $\Delta\Omega=3\pi/4$ 와 $\Delta\Omega=5\pi/4$ 를 제외한 나머지 여섯 경



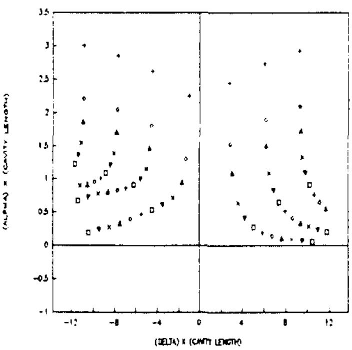
(a) $\Delta\Omega=0$
$(kL)_i=0$



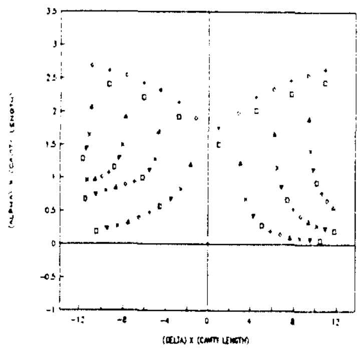
(b) $\Delta\Omega=0$
$(kL)_i=0.3$



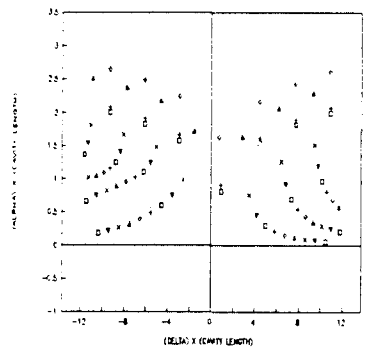
(c) $\Delta\Omega=0$
$(kL)_i=0.7$



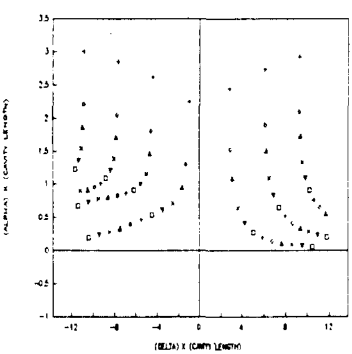
(d) $\Delta\Omega=\pi/2$
$(kL)_i=0$



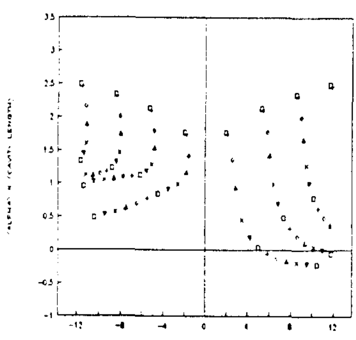
(e) $\Delta\Omega=\pi/2$
$(kL)_i=0.3$



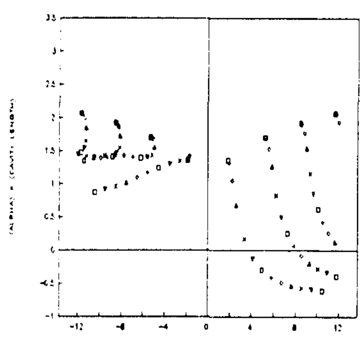
(f) $\Delta\Omega=\pi/2$
$(kL)_i=0.7$



(g) $\Delta\Omega=\pi$
$(kL)_i=0$



(h) $\Delta\Omega=\pi$
$(kL)_i=0.3$



(i) $\Delta\Omega=\pi$
$(kL)_i=0.7$

그림 3. ρ_i의 phase=0으로 고정하고, $\Delta\Omega$와 $(kL)_i$를 변화 시킬 때의 αL vs. δL도표
$\Delta\Omega=0, \pi/2, \pi$이고 $(kL)_i=0, 0.3, 0.7$로 변화할 때의 도표

Fig. 3. αL vs. δL graph with $(kL)_i$ as a parameter, in case of $\rho_i$phase=0.

우는, 대체적으로 $(\kappa L)_r$는 1~3 인 범위에서 그리고 $(\kappa L)_i$는 0~0.9의 전 범위에서 양호한 특성을 갖는다.

$\Delta\Omega=3\pi/4$ 인 경우는 $(\kappa L)_i=0.3$일 때 $(\kappa L)_r$는 2~4 범위에서, $(\kappa L)_i=0.5$일 때 $(\kappa L)_r$는 2~6 범위에

서. 그리고 $(\kappa L)_i$=0.7일 때 $(\kappa L)_r$는 3~6 범위에서 높은 값을 갖는다. (min[Δg_{th}]) 값과 min (min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$]) 값의 곱을, LD의 모드 선별성과 안정성에 대한 우열의 잣대로 사용하는 것은 타당하다. 8가지의 $\Delta\Omega$ 값에 대하여 (min[Δg_{th}]) 값과 min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$]) 값의 곱을 표로 정리하면 다음과 같다.

① $\Delta\Omega$=0 인 경우 (x E-2)

표 1. $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$에 따른 (min[Δg_{th}]) x min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])

Table 1. (min[Δg_{th}])xmin (min[$P_t(z)$] / Max [$P_t(z)$])with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parameters.

$(\kappa L)_r$ $(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	8.E-5	0.081	0.877	0.989	1.195	1.513
2	1.E-5	0.200	0.613	1.021	1.260	1.355
3	3.E-6	0.048	0.464	0.823	0.903	0.984
4	3.E-6	0.080	0.276	0.490	0.531	0.566
5	1.E-6	0.059	0.197	0.292	0.315	0.336
6	3.E-6	0.033	0.157	0.182	0.196	0.210
7	0.E+0	0.012	0.106	0.117	0.127	0.136
8	0.E+0	2.E-4	0.071	0.079	0.085	0.092

② $\Delta\Omega$ π/4 인 경우 (x E-2)

표 2. $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$에 따른 (min[Δg_{th}]) x min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])

Table 2. (min[Δg_{th}])xmin (min[$P_t(z)$] / Max [$P_t(z)$])with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parameters.

$(\kappa L)_r$ $(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	8.E-5	0.082	0.187	0.039	0.166	0.400
2	1.E-5	0.042	0.434	0.725	1.021	1.267
3	3.E-6	0.133	0.189	0.511	0.827	0.901
4	3.E-6	0.105	0.103	0.615	0.491	0.522
5	1.E-6	0.080	0.079	0.254	0.294	0.313
6	3.E-6	0.060	0.074	0.1700.	0.183	0.194
7	0.E+0	0.033	0.070	0.110	0.118	0.126
8	0.E+0	0.016	0.066	0.073	0.079	0.084

위의 결과를 정리하면 ① $\Delta\Omega$=0 인 DFB 레이저와 ⑤ $\Delta\Omega$= π인 DFB 레이저에서는 $(\kappa L)_r$이 1~3 일 때 그리고 $(\kappa L)_i$는 0.5~0.9일 때가 최적조건이며, $(\kappa L)_r$ =2 일 때가 그리고 $(\kappa L)_i$는 0.9로 갈수록 좋은 결과를 보인다. 전체 경우 중 가장 좋은 수치를 나타내는 조건은 ① $\Delta\Omega$=0 인 DFB 레이저에서, $(\kappa L)_r$=1, $(\kappa L)_i$=0.9 일 때의 1.513×10^{-2}로, ⑤ $\Delta\Omega$= π 인 DFB 레이저에서의 1.275×10^{-2} 때 보다 1.2 배 향상된 값을 갖는다. 결론적으로 한 개의 반사면을 갖는 경우에 있어서 거울면의 위치에 관계없이 좋은 특성을

③ $\Delta\Omega$ π/2 인 경우 (x E-6)

표 3. $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$에 따른 (min[Δg_{th}]) x min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])

Table 3. (min[Δg_{th}])xmin (min[$P_t(z)$] / Max [$P_t(z)$])with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parameters.

$(\kappa L)_r$ $(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	0.785	0.455	0.118	0.044	0.025	0.016
2	0.101	0.048	0.034	0.103	0.153	0.203
3	0.028	0.069	0.088	0.093	0.117	0.147
4	0.028	0.043	0.083	0.080	0.077	0.091
5	0.013	0.021	0.040	0.058	0.056	0.072
6	0.027	0.040	0.039	0.E+0	0.037	0.036
7	0.E+0	0.E+9	).E+0	0.027	0.027	0.026
8	0.E+0	0.E+0	0.028	0.E+0	0.027	0.E+0

④ $\Delta\Omega$=3 π/4 인 경우 (x E-2)

표 4. $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$에 따른 (min[Δg_{th}]) x min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])

Table 4. (min[Δg_{th}])xmin (min[$P_t(z)$] / Max [$P_t(z)$])with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parameters.

$(\kappa L)_r$ $(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	8.E-5	0.063	0.078	0.013	0.003	0.022
2	1.E-5	0.036	0.669	0.759	0.405	0.091
3	3.E-6	0.126	0.358	1.415	1.078	0.372
4	3.E-6	0.105	0.234	1.135	1.073	0.381
5	1.E-6	0.080	0.209	1.069	0.728	0.258
6	3.E-6	0.061	0.226	0.858	0.443	0.128
7	0.E+0	0.033	0.241	0.547	0.239	0.036
8	).E+0	0.016	0.256	0.320	0.103	0.011

⑤ $\Delta\Omega = \pi$ 인 경우 (x E-2)

표 5. $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$에 따른 (min[Δg_{th}]) x min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])

Table 5. (min[Δg_{th}])xmin (min[$P_t(z)$] / Max [$P_t(z)$])with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parameters.

$(\kappa L)_r$ / $(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	8.E-5	0.041	0.639	0.540	0.513	0.518
2	1.E-5	0.129	0.468	0.902	1.241	1.275
3	3.E-6	0.031	0.345	0.701	0.724	0.657
4	3.E-6	0.054	0.264	0.400	0.378	0.328
5	1.E-6	0.038	0.140	0.201	0.188	0.172
6	3.E-6	0.023	0.124	0.128	0.121	0.112
7	0.E+0	0.010	0.089	0.103	0.104	0.100
8	0.E+0	2.E-4	0.053	0.060	0.061	0.062

⑥ $\Delta\Omega = 5\ \pi/4$ 인 경우 (x E-2)

표 6. $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$에 따른 (min[Δg_{th}]) x min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])

Table 6. (min[Δg_{th}])xmin (min[$P_t(z)$] / Max [$P_t(z)$])with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parameters.

$(\kappa L)_r$ / $(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	8.E-5	0.172	0.020	0.069	0.027	0.012
2	1.E-5	0.060	0.076	0.019	0.012	0.001
3	3.E-6	0.040	0.033	0.007	0.008	0.174
4	3.E-6	0.035	0.002	0.001	0.071	0.380
5	1.E-6	0.022	0.008	0.039	0.151	0.481
6	3.E-6	0.020	2.E-4	0.046	0.205	0.530
7	0.E+0	0.010	0.005	0.054	0.234	0.542
8	2.E-6	0.003	0.003	0.060	0.236	0.530

갖는 레이저 다이오드를 만들기 위해서는, 굴절율 grating과 이득 grating의 위상 차이를 $\Delta\Omega=0$ 또는 π로 하고, $(\kappa L)_r$ 값은 1~3 으로, $(\kappa L)_i$ 값은 0.5~0.9 로 하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 특별히 ④ $\Delta\Omega = 3\ \pi/4$ 인 경우, $(\kappa L)_i$ 값이 0.5~0.7 일 때 $(\kappa L)_r$ 값이 3~5 의 범위에서, $\Delta\Omega = \pi$ 인 DFB 레이저 보다 좋은 특성을 보여주지만, $\Delta\Omega = 3\ \pi/4$를 제작하는데 있어서 다소 어려움이 따른다. ③ $\Delta\Omega = \pi/2$ 인 경우와 ⑦ $\Delta\Omega = 3\ \pi/2$ 인 경우에는 αL vs. δL 도표의 좌우 대칭성이 개선되지 않아 min[Δg_{th}] 값이 작은 것이 원인이 되어 특히 나쁜 특성을 나타낸다. $(\kappa L)_i = 0$ 인 순수 굴절율 결합 DFB 레이저는, 좌우 대칭인 αL vs. δL 도표를 갖는 좌측 거울의 위상 조건이 항상 존재하여, $\Delta\Omega$ 값에 관계없이 항상 $1/10^4$ 이하의 나쁜 특성을 보인다.

⑦ $\Delta\Omega = 3\ \pi/2$ 인 경우 (x E-6)

표 7. $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$에 따른 (min[Δg_{th}]) x min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])

Table 7. (min[Δg_{th}])xmin (min[$P_t(z)$] / Max [$P_t(z)$])with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parameters.

$(\kappa L)_r$ / $(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	0.785	1.300	2.980	6.056	10.72	12.52
2	0.101	0.146	0.220	0.456	0.646	0.871
3	0.028	0.007	0.004	3.E-4	0.006	0.059
4	0.028	0.010	0.003	0.002	0.E+0	0.E+0
5	0.013	0.007	0.003	0.012	0.047	0.E+0
6	0.027	0.E+0	0.003	0.E+0	0.E+0	0.E+0
7	0.E+0	0.007	0.005	0.E+0	0.E+0	0.031
8	0.020	0.002	0.010	0.E+0	0.E+0	0.E+0

⑧ $\Delta\Omega/4$ 인 경우 (x E-2)

표 8. $(\kappa L)_r$과 $(\kappa L)_i$에 따른 (min[Δg_{th}]) x min(min[$P_t(z)$] / Max[$P_t(z)$])

Table 8. (min[Δg_{th}])xmin (min[$P_t(z)$] / Max [$P_t(z)$])with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parameters.

$(\kappa L)_r$ / $(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	8.E-5	0.511	0.062	0.474	0.902	1.361
2	1.E-5	0.140	0.438	0.691	0.441	0.162
3	3.E-6	0.106	0.305	0.672	0.814	0.874
4	3.E-6	0.105	0.145	0.419	0.488	0.528
5	1.E-6	0.074	0.091	0.274	0.293	0.311
6	3.E-6	0.051	0.075	0.170	0.181	0.193
7	0.E+0	0.026	0.068	0.110	0.117	0.125
8	2.E-6	0.011	0.064	0.073	0.078	0.083

Ⅳ. 결 론

한 쪽 거울면에 무반사(AR) 코팅을 해준 1.55 μm

DFB 레이저 다이오드에서, 굴절율 grating과 이득 grating이 공존하는 경우 두 grating의 구조와 배치 방법에 따른, 발진 주파수와 발진이득 그리고 축방향으로의 광강도 공간분포 등의 특성 변화를 이론적으로 해석함으로써, 거울의 위치에 관계없이 좋은 특성의 LD를 얻을 수 있는 최적 구조를 찾는 것이 본 논문의 목적이다. 제 III 장의 해석결과를 통하여 $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$, 그리고 $\Delta\Omega$ 의 변화에 따른 $\min[\Delta g_{th}]$ 값과 $\min(\min[P_t(z)] / Max[P_t(z)])$ 값의 변화 양상을 파악할 수 있으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.① $(\kappa L)_i=0$ 인 순수한 굴절율 결합 DFB 레이저의 경우는, 좌우대칭인 αL vs. δL 도표를 갖는 한쪽 거울의 위상 조건이 항상 존재하여, 그 한쪽 거울의 위치에 매우 민감한 발진특성을 보이고 또한 발진파장의 축퇴현상이 발생하는 단점이 있으나, 이득 grating을 동시에 만들어 주면 거울의 위치에 관계없이 단일 모드가 안정되게 발진하도록 하는 것이 가능하며, 이러한 효과는 $(\kappa L)_i$가 0.3 이상 만 되면 두드러지고, $(\kappa L)_i$가 0.9까지 커질수록 더욱 현저하게 나타난다.② 두 개의 반사면을 갖는 DFB 레이저와는 다르게, $\Delta\Omega=\pi$인 DFB 레이저가 매우 좋은 특성을 보이며, $\Delta\Omega$인 DFB 레이저의 $(\min[\Delta g_{th}])\times\min(\min[P_t(z)] / Max[P_t(z)])$ 값에 비하여 80% 정도되는 수치를 갖는다. ③ 거울의 위치에 관계없이 좋은 특성을 갖는 레이저 다이오드를 만들기 위해서는, 굴절율 grating과 이득 grating의 위상 차이 $\Delta\Omega$를 0 또는 π로 하고, $(\kappa L)_r$ 값은 1~3 으로, $(\kappa L)_i$ 값은 0.5~0.9 로 하는 것이 최적 조건이다. ④ $(\kappa L)_r$ 값과 $(\kappa L)_i$ 값에 따라 다르기는 하지만, 전반적으로 $\Delta\Omega=0$, $\Delta\Omega=3\pi/4$, $\Delta\Omega=\pi$, $\Delta\Omega=\pi/4$, $\Delta\Omega=7\pi/4$, $\Delta\Omega=5\pi/4$, $\Delta\Omega=\pi/2$, $\Delta\Omega=3\pi/2$ 의 순서로 좋은 특성을 보이며, $\Delta\Omega=\pi/2$ 및 $\Delta\Omega=3\pi/2$ 인 경우는 현격히 특성이 나빠진다.

참 고 문 헌

[1] H.C. Casey and M.B. Panish, Heterostructure Lasers (Part A), Academic Press, pp.90-105, 1978.

[2] 권기영 외, "DFB Laser의 Beam Profile에 관한연구", 한국전자통신연구소 (연구수행기관: 공주대학교) 연구보고서, 제 2 장, 1992

[3] J. Buus, "Mode selectivity in DFB lasers with cleaved facets," Electron. Lett., vol. 21, pp. 179-180, 1985.

[4] J. Kinoshita and K. Matsumoto, "Yield analysis of SML DFB lasers with an axially-flettened internal field," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, pp. 1324-1332, 1989.

[5] H. Soda, Y. Kotaki, H. Sudo, H. Ishikawa, S. Yamakoshi, and H. Imai, "Stability in single longitudinal mode operation in GaInAsP/InP phase- adjusted DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 23, pp. 804-814, 1987.

[6] Y. Nakano, Y. Luo, and K. Tada, "Facet reflection independent, single longitudinal mode oscillation in a GaAlAs/GaAs distributed feedback laser equipped with a gain-coupling mechanism," Appl. Phys. Lett., vol. 55, pp. 1606-1608, 1989.

[7] Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inone, H. Hosomatsu, and H. Iwakoka, "Purely gain-coupled distributed feedback lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 56, pp. 1620-1622, 1990.

[8] G. Morthier, P. Vankwikelberge, K. David, and R. Baets, "Improved performance of AR-coated DFB lasers by the introduction of gain-coupling," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 170-172, 1990.

[9] H. Kogelnik and C. V. Shank, "Coupled-wave theory of distributed feedbsck lasers," *J. of Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 2327-2335, 1972.

[10] 권기영, "1.55 μm DFB 레이저의 특성에 미치는 Grating 구조와 Mirror 위치의 영향", 대한전자공학회 논문지 제31권 A편 제9호, pp. 128-138, 1994.

저 자 소 개

權 奇 英(正會員) 第31卷 A編 第 5 號 參照

현재 공주대학교 전자공학과 조교수