

論文97-34D-9-11

반도체 레이저의 비선형 이득의 물리적인 매카니즘에 관한 연구

(Study on the Physical Mechanism of Nonlinear Gain in Semiconductor Lasers)

金昌俸*, 嚴震燮**

(Chang-Bong Kim and Jinseob Eom)

요 약

반도체 레이저의 비선형 이득의 물리적인 매카니즘은 주로 spectral-hole burning에 기인하며 또한 spectral-hole burning 효과의 약 15%의 hot carriers가 관여 한다는 것을 밝혔으며, spectral-hole burning과 관련된 시정수는 약 50 femto초라는 결과를 얻었다. 그 이론을 입증하기 위하여 Hall의 실험에서 얻은 실험결과에 대해 이론적인 분석을 하였으며, 그 결과로서 hot carriers의 효과는 spectral-hole burning 효과의 약 15%에 해당하는 적은 부분을 차지하지만 Hall의 실험 데이터에 대단한 영향을 미친다는 사실을 알수 있었고, 또한 spectral-hole burning은 그들의 실험에서 잘 감지되지 않고, hot carriers는 잘 감지됨을 알수 있었으며, 그 이유로서는 spectral-hole burning과 관련된 시정수에 비해서 Hall이 사용한 pump 및 probe 펄스폭(180 femto초)이 더 긴 시간폭을 갖기 때문이라는 결론을 얻었다.

Abstract

The dominant physical process responsible for the nonlinear gain is from spectral-hole burning with the time constant of about 50 fs and the contribution to the nonlinear gain from hot carriers effect is determined to be about 15% of the contribution due to spectral-hole burning. To prove the above results we fit the data of Hall and found that hot carriers have a profound effect on their experimental data despite the fact that the magnitude of hot carriers effect is only 15% of spectral-hole burning. We suggest that the experiment with a pump pulse width of 180 fs is very sensitive in detecting the effect of hot carriers, but is not sensitive in detecting much faster process associated with spectral-hole burning.

I. 서론

반도체 레이저의 변조특성에서 비선형 이득은 대단

* 終身會員, 公州大學校 電氣電子情報工學部

(Dept. of Electrical, Electronics, and Information & Communication Eng., Kongju National University)

** 正會員, 江原大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng. Kangwon National University)

※ 본 연구는 한국 과학재단의 핵심전문연구(951-0916-118-1) 지원에 의한 것임.

接受日字:1997年5月12日, 수정완료일:1997年7月26日

히 중요한 역할을 하며 그 예로써 그림 1은 비선형 이득을 포함시켰을 경우와 포함시키지 않을 경우의 레이저 주파수 응답곡선을 보여주고 있다¹¹⁾. 그림 1의 상단에 있는 그래프에서 비선형 이득을 포함시키지 않은 경우의 계산된 주파수 응답곡선은 점선으로 표시되었고, 실지로 측정된 주파수 응답곡선은 점들로 표시되었으며, 비선형 이득을 포함시켜서 예상되는 주파수 응답곡선은 실선으로 나타나 있다. 실제로 측정된 주파수 응답 곡선은 비선형 이득을 포함시켜 얻은 주파수 응답곡선과 잘 일치하는 반면, 비선형 이득을 포함시키지 않은 경우의 계산된 주파수 응답곡선과 공진 주파수에서 약 20 dB의 크기 차가 남을 알수 있다.

따라서, 반도체 레이저의 비선형 이득에 관한 연구, 특히 비선형 이득의 물리적인 매카니즘에 관한 연구는 대단히 중요하다.

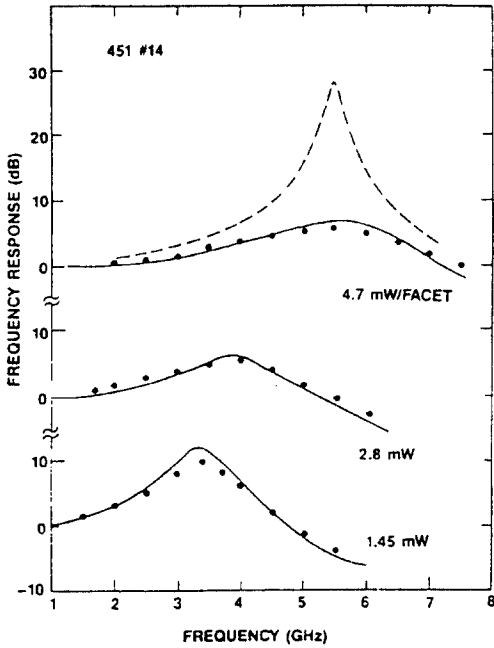


그림 1. 주파수 응답의 예상치와 측정치. 비선형 이득을 포함시키지 않은 경우의 계산치는 점선이며, 실제의 측정된 값은 점으로 표시한 것이며, 비선형 이득을 포함시켜서 예상되는 값은 실선이다

Fig. 1. The predicted and the measured frequency responses. The dashed line is the calculated frequency response without nonlinear gain, the dots are measured frequency responses, and the lines are predicted ones with nonlinear gain.

반도체 레이저의 비선형 이득에 대한 연구의 필요성은 기존의 수행되었던 Marcuse와 Lee^[2]의 연구에서 시작되었다. 그들의 연구는 서로 다른 공진기 길이의 50 μm 와 250 μm 를 갖는 반도체 레이저를 모델로 하여 발진 모드를 시뮬레이션을 통하여 예측하는 것이었다. 이 연구에서는 반도체 레이저의 광자밀도와 캐리어밀도 사이의 관계를 설명하는 비율방정식을 사용하였으며, 이 비율방정식을 사용할때 선형 이득 $G(N)$ 만을 고려하여 발진 모드를 예측하였다. 그 결과는 그림 2와 같이 바이어스 전류가 발진 임계전류보다 큰 값으로 증가 시킬때 주 모드의 크기는 증가 하는 반면

기생 모드의 크기는 변동없이 주 모드를 중심으로 대칭적으로 고정된 크기를 나타내었다. 그러나, 실제의 대부분의 InGaAsP의 반도체 레이저에서는 바이어스 전류가 발진 임계전류보다 큰값으로 증가할때 주 모드는 더 긴 파장대로 옮겨가고, 기생 모드는 주 모드를 중심으로 Marcuse와 Lee가 예측한 대칭적인 형태가 아닌 비대칭적인 형태가 관찰 된다. 이러한 긴 파장대로 모드가 옮겨가는 현상에 대해서 Bogatov^[3]와 Ishikawa^[4]의 연구가 수행되었으며, 그 후에는 GTE의 광전자 연구실^[5]에서 실제의 발진 모드를 예측하기 위하여 대칭 비선형 이득항(symmetric nonlinear gain term)과 비대칭 비선형 이득항(asymmetric nonlinear gain term)을 갖는 현상학적인 공식(phenomenological formula)을 제시하였으며, 실제로 측정된 데이터값들과 현상학적인 공식을 비교하여 비선형 이득 파라미터값들을 결정하였다. 이 연구에서 사용된 현상학적인 이득 공식은

$$G_i(N, S) = G_i(N) - \sum_j \epsilon_{ij} S_j, \quad (1)$$

$$\text{여기에서 } \epsilon_{ij} = \epsilon_0 \frac{1 + \alpha\tau(\omega_i - \omega_j)}{1 + [(\omega_i - \omega_j)\tau]^2} \quad (2)$$

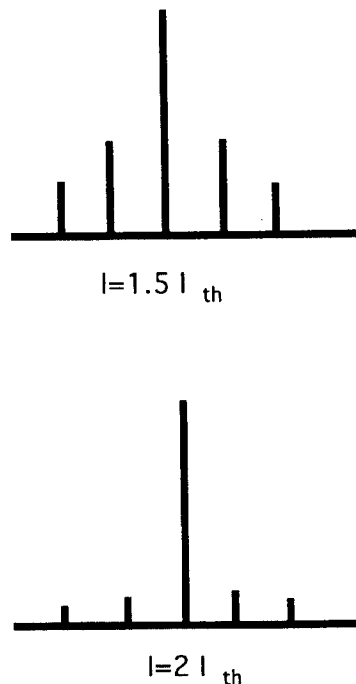


그림 2. Marcuse와 Lee의 시뮬레이션의 결과
Fig. 2. Illustration of simulation results performed by Marcuse and Lee.

는 $\omega_i - \omega_s$ 에 대해서 대칭 및 비대칭향을 갖는 비선형 이득 파라미터이다. 또한 α , τ 및 ϵ_0 는 꺾맞추기 파라미터(fitting parameter)이고, ω_i 및 ω_s 는 i 와 s 모드의 광 주파수이다. 이 연구에서는 $1.3 \mu\text{m}$ buried-crescent 레이저를 사용하였으며, 실험치와 식 (1)을 사용한 계산치가 잘 일치됨을 보여주었다. 그러나, 이 모델을 사용하여 좋은 결과를 얻었으나, 비선형 이득의 물리적인 원인에 대해서는 규명을 하지 못하였다. 반도체 레이저의 비선형 이득을 일으키는 요인으로서 는 여러가지 학설들이 학계에 보고되고 있으며, 그 물리적인 원인으로서는 spectral-hole burning^{[6]-[12]}, spatial-hole burning^{[13], [14]}, hot carriers^{[15]-[19]} 등이 보고되었다. 위의 모든 매카니즘은 모두 자극 방출(stimulated emission)영역에서 이루어진다. 위의 각각의 물리적인 매카니즘들은 서로 다른 시정수를 갖기 때문에 각각의 서로 다른 시정수를 밝히므로써 비선형 이득과 관련된 물리적인 매카니즘을 밝힐수있다. 따라서 비선형 이득과 관련된 시정수를 밝히는 연구는 대단히 중요한 과제이다. Spectral-hole burning 매카니즘은 자극방출에 따른 재결합 시간(stimulated recombination time)이 intraband의 캐리어분산시간(carrier scattering time)보다 짧은 시간에 이루어지기 때문에 발진 파장(lasing wavelength)에서 국부적인 이득 고갈에 기인하며 그와 관련된 시정수는 0.3 ps 보다 적은 것으로 보고되었다. Spatial-hole burning 매카니즘은 공간적으로 종속되는 자극방출률(stimulated emission rate)에 따라서 공간적인 종속의 캐리어 밀도의 고갈을 발생시킨다는 이론이다. 그와 관련된 시정수는 수 nano 초로 보고 되었다. Hot carriers 매카니즘은 자극방출에 따른 열을 자유 캐리어가 흡수하므로써 캐리어의 온도변화를 갖고 온다.

비선형 이득의 물리적인 원인을 밝히기 위하여 Hall^[15]은 dye 레이저를 이용하여 근적외선 영역의 100 femto초의 펄스폭을 갖는 펄스를 사용하여 AlGaAs 레이저 다이오드에 pump-probe 실험을 수행하여 hot carriers가 비선형 이득과 관련된 지배적인 매카니즘 이라고 밝히고, 그와 관련된 시정수가 약 1.5 ps 라고 발표 하였다. 하지만 위의 연구에서는 spectral-hole burning이 존재한다는 증거는 밝히지 못했는데, 만약 spectral-hole burning이 존재 한다면 위의 연구에서 사용되었던 100 femto초의 펄스폭을 갖는 펄스로서는 더 짧은 시정수를 갖는 spectral-hole burning 매카

니즘을 밝힐수 없다는 결론을 내릴수 있다. 즉 spectral-hole burning과 관련된 시정수는 100 femto초 보다 적다는 결론을 추론할수 있다. 그 후 똑같은 실험이 InGaAsP 광증폭기에 180 femto초를 갖는 펄스를 이용하여 수행되었으며^[16] 마찬가지로 spectral-hole burning 현상을 밝히지 못하였고, 비선형 이득과 관련된 지배적인 매카니즘이 hot carriers이며 그와 관련된 시정수가 약 0.65 ps 라고 밝혔다. 마찬가지로 처음 수행되었던 실험과 같은 이유로써 spectral-hole burning과 관련된 시정수가 실험에 사용되었던 펄스폭 보다는 짧은 시간대를 갖기 때문에 spectral-hole burning 현상을 밝히는것이 불가능 했다고 단정할수 있다.

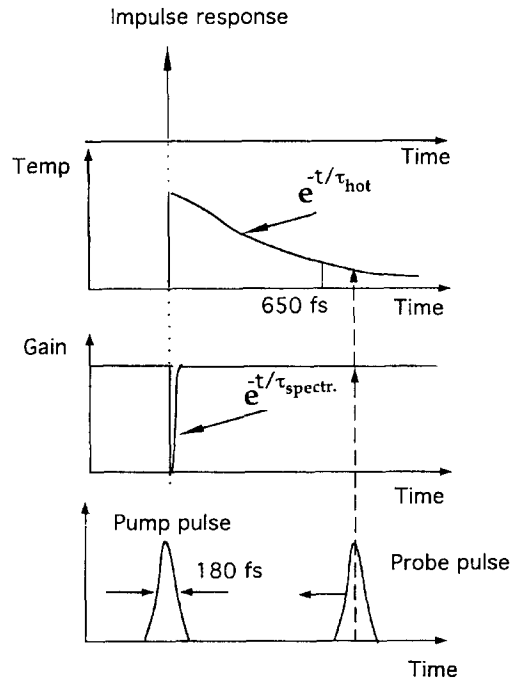


그림 3. 180 femto 초의 펄스폭을 사용하여 수행된 Hall의 pump-probe 실험

Fig. 3. Illustration of pump-probe experiment by the Hall using 180 femtosecond pulses.

그림 3은 Hall의 연구에서 spectral-hole burning 현상이 검출되지 않은 이유를 간략하게 보이고 있다. 그림 3은 이상적인 경우, 즉 임펄스 응답(impulse response)의 경우 레이저의 이득 및 온도변화를 보여 주고 있다. Hot carriers의 경우 캐리어의 온도는 급격히 증가했다가 지수함수적으로 변화하는 시정수 τ_{hot}

를 갖고 감소하게 된다. Spectral-hole burning의 경우에는 레이저의 이득이 급격히 감소했다가 지수함수적으로 변화하는 시정수 τ_{spec} 를 갖고 평형상태로 접근하게 된다. 그러나, 실제의 Hall의 실험에서는 pump 펄스의 폭은 180 fs 이고, probe 펄스는 온도 또는 이득의 변화를 시간의 변화에 따라 탐지하는 역할을 한다. 여러개의 서로 다른 시정수를 갖는 응답들의 합과 측정된 데이터값을 비교하여 Hall은 hot carriers의 시정수 τ_{hot} 이 약 650 fs 이라고 발표하였다. 그러나, Hall의 실험에서 이득변화가 그들이 사용한 probe 펄스폭 180 fs 보다 빠른 시정수 τ_{spec} 를 갖고서 변화한다면 spectral-hole burning 현상을 잘 감지 할수없게 된다. 따라서, spectral-hole burning 현상과 관련된 시정수는 hot carriers와 관련된 시정수 보다 빠르다는 결론을 내릴수 있고 이에 대한 결론을 뒷받침 할만한 많은 연구 결과가 보고되었다.

본 논문의 구성은 II장에서 반도체 레이저의 비선형 이득과 관련된 시정수 측정에 관한 Hall의 pump-probe 실험에 관해서 이론적인 분석을 하여 비선형 이득과 관련된 물리적인 매카니즘들 및 그와 관련된 시정수들을 밝히며, III장에서는 본 논문에서 얻은 이론적인 결과를 논하고, 결론을 맺는다.

II. 비선형 이득의 물리적인 매카니즘

반도체 레이저의 비선형 이득과 관련된 물리적인 매카니즘을 밝히기 위해서는 비선형 이득에 관련된 시정수를 밝히므로써 비선형 이득과 관련된 물리적인 매카니즘을 밝힐 수 있으며 이와 관련된 실험으로서 Fabry-Perot 와 DFB 레이저의 변조특성 실험에서 spectral-hole burning과 관련된 시정수는 0.15 fs 보다 적어야 된다는 결과가 나왔고^[20], 파장 가변이 가능한(가변 범위: 1313nm~1341nm) 진행파특성을 갖는 환형레이저에 1314.4nm 파장의 DFB 레이저를 입사시켜서 얻은 실험 데이터와 이론치를 비교하여 비선형 이득과 관련된 물리적인 매카니즘은 spectral-hole burning 이었고 그 시정수는 약 50 fs 이라는 결과가 있었고, spectral-hole burning보다 더 긴 시정수를 갖는 hot carriers가 관여 된다는 연구가 있었다^[21]. 본 장에서는 앞에서 언급 되었던 Hall의 실험에서 얻은 실험 데이터와 이론적인 분석을 통해서 얻은 데이터를 비교 분석하여 비선형 이득과 관련된 물리적인

매카니즘을 밝히고자 한다. 간단히 Hall 이 수행한 실험^[16]의 개략도는 그림 4에 나타내었듯이 pump와 probe 펄스가 광증폭기로 입사되고 있고, pump 펄스는 이득변화 $\Delta G(t)$ 를 발생시키고 그 변화 $\Delta G(t)$ 는 광증폭기의 출력에서 통과된 probe 펄스를 감지하므로써 측정되고 있다. 이때 pump와 probe 펄스의 편광 방향은 서로 수직인 독립적인 관계에 있다. Hall의 실험에서는 pump-probe 방법을 이용하여 얻은 실험 데이터를 임펄스 응답의 여러 조합에 맞추어 분석하였다. 그 임펄스 응답의 공식은

$$h(t) = u_{-1}(t) [a_0 + a_1 e^{-t/\tau_1} + a_2 e^{-t/\tau_2}] + a_3 \delta(t) \quad (3)$$

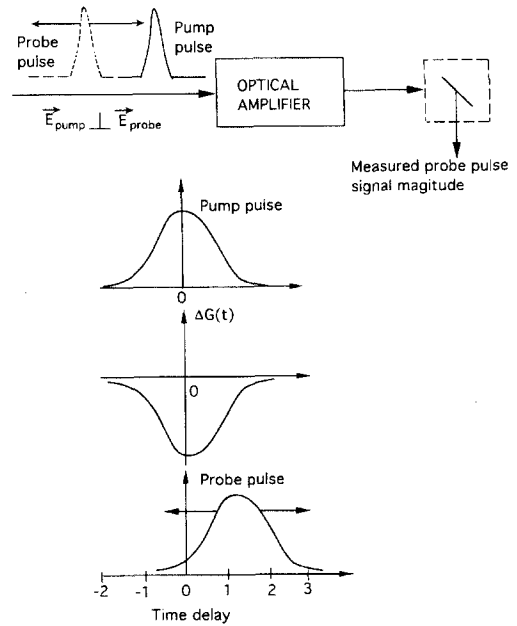


그림 4. Hall의 pump-probe 실험의 개략도
Fig. 4. Illustration of pump-probe experiment by Hall.

와 같이 제시하였으며, 여기에서 $u_{-1}(t)$ 는 단위계단함수이고, $\delta(t)$ 는 임펄스이고, a_i ($i=0, 1, 2, 3$)와 τ_1 과 τ_2 는 측정치를 맞추기 위한 상수들이다. Hall 실험에서는 $\tau_1=650$ fs과 $\tau_2=200$ fs일때 측정치와 제일 근접한 결과를 얻을수 있다고 발표하였으며 이때 hot carriers가 비선형 이득과 관련된 물리적인 매카니즘이며 그 시정수는 650fs이라고 제시하고 spectral-hole burning 존재를 밝히지 못하였다.

Hall의 실험에서 광증폭기의 임펄스 응답 $H(t)$ 는

$$H(t) = -a \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (4)$$

와 같이 주어질수 있으며, 여기에서 τ 는 비선형 이득과 관련된 시정수라고 하자(이 시점에서는 한개의 매카니즘만 가정한다면). 또한 pump와 probe 펄스가 시간에 따라 Gaussian분포를 갖는다고 가정하면, pump 펄스의 광자수 $f(t)$ 는

$$f(t) = \frac{S_p}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

와 같이 주어지며, 여기에서 S_p 는 pump 펄스의 총광자수이고, 펄스의 폭(FWHM)는 2.35σ 이다. 또한 pump 펄스에 의한 이득변화 $\Delta G(t)$ 에 관한 이득응답은

$$\Delta G(t) = f(t) * H(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(t-t')f(t')dt \quad (6)$$

와 같이 주어지며, 식 (3)과 (4)에 의해 $\Delta G(t)$ 는

$$\Delta G(t) = -\frac{S_p}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t H(t-t') \exp\left(-\frac{t'^2}{2\sigma^2}\right) dt' \quad (7)$$

와 같이 주어지며, $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t'^2) dt'$ 와 식 (4)에 의하여

$$\Delta G(t) = -\frac{aS_p}{2} \exp(\sigma^2/2\tau^2) \exp(-t/\tau) [1 + erf(x)] \quad (8)$$

로 주어진다. 여기에서 $x = \frac{t - \sigma^2/\tau}{\sqrt{2}\sigma}$ 로 주어진다.

Probe 펄스의 광자수 $S(t)$ 는

$$S(t) = \frac{S_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (9)$$

로 주어지며, 여기에서 S_0 는 probe 펄스의 총광자수이고, t_d 는 Hall의 실험에서 수행되었듯이 pump 펄스에 대해서 probe 펄스가 지연된 시간을 의미한다. Hall의 실험에서 pump 와 probe 펄스의 시간 지연의 함수로써 광증폭기의 출력에서 probe 펄스의 광자수의 변화비(fractional change) $\Delta S_{probe}(t_d)/S_{probe}$ (여기에서 S_{probe} 는 pump 펄스가 없을때의 광증폭기의 출력에서의 probe 펄스의 광자수이고, $\Delta S_{probe}(t_d)$ 는 pump 펄스로 인한 probe 펄스의 감소된 광자수이다.)를 구하는 실험을 수행했기 때문에 위의 식들로부터 $\Delta S_{probe}(t_d)/S_{probe}$ 를 구하는 작업이 필요하다. 식 (9)로부터

$$\frac{\Delta S_{probe}(t_d)}{S_{probe}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-(t-t_d)^2/2\sigma^2] [1 - \exp(-\Delta G(t)L)] dt \quad (10)$$

을 얻을수 있고, 여기에서 L 은 광증폭기의 공진기의 길이를 나타낸다. 식 (10)에서 spectral-hole burning 과 hot carriers 현상을 포함하면

$$\frac{\Delta S_{probe}(t_d)}{S_{probe}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-(t-t_d)^2/2\sigma^2] [1 - \exp(-\Delta G_T(t)L)] dt \quad (11)$$

와 같이 주어지며, 여기에서

$$\Delta G_T(t) = \frac{\Delta G_{spec}(t)}{\left(1 + \frac{\Delta G_{spec}(t)}{G_0}\right)} + \frac{\Delta G_{hot}(t)}{\left(1 + \frac{\Delta G_{hot}(t)}{G_0}\right)} \quad (12)$$

로 주어지며, $\Delta G_{spec}(t)$ 과 $\Delta G_{hot}(t)$ 은 spectral-hole burning과 hot carriers으로 인한 이득 감소(gain suppression)를 나타내며, 각각 식 (7)의 형태를 갖는다. 앞에서 언급된 진행과특성을 갖는 환형레이저를 이용하여 얻은 결과는 비선형이득과 관련된 물리적인 매카니즘은 spectral-hole burning 과 hot carriers가 관여하며 spectral-hole burning의 약 10-20%의 hot carriers가 관여한다는 것이다. 따라서 이결과를 적용하여 평균치를 취하면 $\Delta G_{hot} = 0.15\Delta G_{spec}$ 이다.

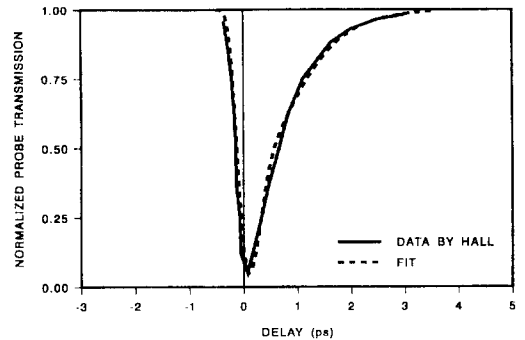


그림 5. 실선은 Hall의 실험결과이고, 점선은 펄스폭이 200fs 이고, $\tau_{spec} = 80\text{fs}$, $\tau_{hot} = 600\text{fs}$, $aS_p/2 = 300\text{cm}^{-1}$, $G_0 = 60\text{cm}^{-1}$ 일때를 나타낸다

Fig. 5. The dashed line is the fit with pulse width = 200fs , $\tau_{spec} = 80\text{fs}$, $\tau_{hot} = 600\text{fs}$, $aS_p/2 = 300\text{cm}^{-1}$, and $G_0 = 60\text{cm}^{-1}$.

Hall의 실험 데이터와 이론치를 비교 분석하기 위하여 식 (11)에 포함되어 있는 $aS_p/2$ 를 꺾맞추기를 시키기 위한 조정변수로 사용하고, $G_0 = 60\text{cm}^{-1}$ 의 일반

적인 값^[9]을 사용한다. 그림 5에서 점선으로 나타낸 그림은 펄스폭이 200fs이고, $\tau_{spec} = 80fs$, $\tau_{hot} = 600fs$, $aS_p/2 = 300cm^{-1}$ 일때 식 (11)을 그래프로 그린 것이고, 실선은 Hall의 실험에서 얻어진 데이터를 나타낸다.

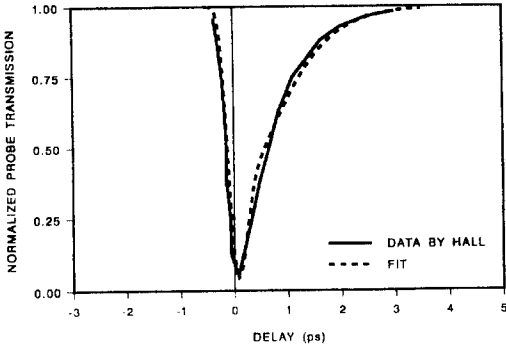


그림 6. 점선은 $\tau_{spec} = 80fs$ 대신에 $\tau_{spec} = 50fs$ 인 경우를 나타낸다

Fig. 6. The dashed line is the fit with same parameter values, except τ_{spec} is changed to 50fs from 80fs.

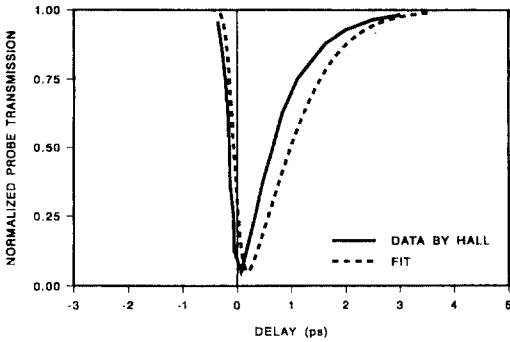


그림 7. 점선은 그림 5에서 사용된 파라미터값과 같고, hot carriers 항만 고려할때를 나타낸다

Fig. 7. The dashed line is the fit when only hot carriers term is considered with same parameter values as in Fig. 5.

그림 6은 $\tau_{spec} = 50fs$ 일때를 나타낸다. 그림 5와 그림 6에서 보듯이 계산치와 Hall의 실험치와 잘맞고 있음을 보여준다. 그림 5와 그림 6은 거의 같은 결과를 보이니 진행파특성을 갖는 환형레이저를 이용하여 얻은 결과^[21]를 고려할때 그림 5가 Hall의 실험치와 더욱 일치됨을 알수 있다. 만약 hot carriers만을 고려할때는 그림 7과 같이 나타나고, 만약 spectral-hole burning만을 고려할때는 그림 8과 같이 나타난

다. 그림 6(즉, spectral-hole burning 현상과 hot carriers 현상을 고려할때)과 그림 8(spectral-hole burning 현상만을 고려할때)을 비교할때 hot carriers 현상 즉, ΔG_{hot} 이 비록 ΔG_{spec} 의 15%임에도 불구하고 Hall의 실험 데이터에서 대단한 영향을 미친다는 것을 알수있다. 즉, 위의 그림들을 고찰해보면 Hall의 실험에서는 spectral-hole burning 현상의 감지는 잘되지 못하고(insensitive), hot carriers 현상은 잘 감지됨(sensitive)을 알수 있으며, 또한 이러한 결과가 Hall의 실험에서 spectral-hole burning이 잘 감지되지 못한 이유를 설명할수 있다.

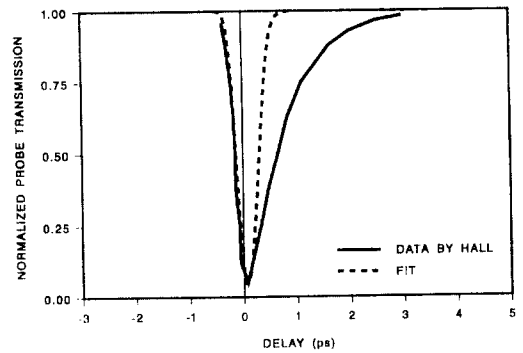


그림 8. 점선은 그림 5에서 사용된 파라미터값과 같고, spectral-hole burning 항만 고려할때를 나타낸다

Fig. 8. The dashed line is the fit when only spectral-hole burning term is considered with same parameter values as in Fig. 5.

III. 결론

반도체 레이저의 비선형 이득과 관련된 물리적인 매카니즘은 약 50 fs의 시정수를 갖는 spectral-hole burning 현상과 약 600 fs의 시정수를 갖는 hot carriers의 현상으로 이루어진다는 결론을 얻었고 그 크기의 기여도는 hot carriers의 크기는 spectral-hole burning의 약 15%에 해당된다는 결론을 얻었다. 위와 같은 결론을 검증하기 위하여 비선형 이득과 관련된 물리적인 매카니즘을 밝히기 위하여 180 fs의 펄스 폭을 갖는 pump-probe 레이저를 이용한 Hall의 실험에 대한 이론적인 분석을 하였다. Hall의 실험에서 얻어진 결과와 이론적인 결과를 비교 분석하여 Hall의 실험에서 spectral-hole burning 현상이 감지되지 못한 이유를 밝혔는데, 그 이유로서 i)그들의 실

험에서 사용되었던 pump 및 probe 레이저의 펄스폭이 180 fs로서 spectral-hole burning 현상과 관련된 시정수 50 fs 보다는 시간적으로 길기 때문에 더 짧은 시정수를 갖는 spectral-hole burning 현상을 감지하기가 어려웠다는 결론을 얻을 수 있으며, ii) 그들의 실험을 이론적으로 분석하여 얻은 계산치와 실험치를 분석한 결과 spectral-hole burning 현상은 감지하기가 어려운 반면, hot carriers의 현상은 감지하기가 쉬었고, hot carriers의 현상의 크기는 비록 spectral-hole burning 현상의 약 15%의 크기에 해당 하지만 그들의 실험에 지대한 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] C.B. Su, and V.A. Lanzisera, "Ultra-high speed modulation of 1.3 μm InGaAsP diode lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-22, pp. 1568, 1986
- [2] D.Marcuse, and T.P. Lee, "On approximate analytical solutions rate equations for studying transient spectra injection lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-19, pp. 1397, 1983
- [3] A.P. Bogatov, P.G. Eliseev, and B.N. Sverdlov, "Anomalous interaction of spectral modes in a semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-11, pp. 510, 1975
- [4] H.I. shikawa, H.Imai, and M.Takusagawa, "Longitudinal mode behavior of transverse mode-stabilized InGaAsP/InP double-heterostructure laser," Appl. Phys. Lett., vol. 38, pp. 962, 1981
- [5] J.Manning, R.Olshansky, D.M. Fye, and W.Powazinik, "Strong influence of non-linear gain on spectral and dynamic characteristics of InGaAsP lasers," Electron. Lett., vol. 21, pp. 496, 1985
- [6] B.Zee, "Broadening mechanism in semiconductor(GaAs) lasers: limitations to single mode power emission," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-14, pp. 727, 1978
- [7] M.J. Adams, "Influence of spectral hole-burning on quaternary laser transients," Electron. Lett., vol. 19, pp. 627, 1983
- [8] M.Yamada and Y.Suematsu, "Analysis of gain suppression in undoped injection lasers," J. Appl. Phys., vol. 52, pp. 2653, 1981
- [9] R.F. Kazarinov, C.H. Henry, and R.A. Logan, "Longitudinal mode selfstabilization in semiconductor lasers," J. Appl. Phys., vol.53, pp.4631, 1981
- [10] M.Asda and Y.Suematsu, "Density-matrix theory of semiconductor lasers with relaxation broadening model-gain and gain-suppression in semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-21, pp. 434, 1985
- [11] G.P. Agrawal, "Spectral-hole burning and gain saturation in semiconductor lasers: strong-signal theory," J. Appl. Phys., vol. 63, pp. 1232, 1988
- [12] M.Serenyi, E.O. Gobel, and J.Kuhl, "Inhomogeneous gain saturation in a mode-locked semiconductor laser," Appl. Phys. Lett., vol. 53, pp. 169, 1988
- [13] W.Streifer, R.D. Burnham, and D.R. Scifres, "Dependence of longitudinal mode structure on injected carrier diffusion in diode lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-13, pp. 403, 1977
- [14] K.Furuya, Y.Suematsu, and T.Hong, "Reduction of resonancelike peak in direct modulation due to carrier diffusion in injection laser," Appl. Opt., vol. 17, pp. 1949, 1978
- [15] M.P. Kesler and E.P. Ippen, "Subpicosecond gain dynamics in GaAlAs laser diodes," Appl. Phys. Lett., vol. 51, pp. 1765, 1987
- [16] K.L. Hall, J.Mark, E.P. Ippen, and G. Eisenstein, "Femtosecond gain dynamics in GaAsP optical amplifiers," Appl. Phys. Lett., vol. 56, pp. 1740, 1990
- [17] M.S. Stix, M.P. Kesler, and E.P. Ippen, "Observation of subpicosecond dynamics in GaAlAs laser diodes," Appl. Phys.

- Lett., vol. 48, pp. 1722, 1986
- [18] Y.Lai, K.L. Hall, E.P. Ippen, and G. Eisenstein, "Short pulse gain saturation in InGaAsP diode laser amplifiers," IEEE Photon. Technol., Lett., vol. 2, pp. 711, 1990
- [19] K.L. Hall and E.P. Ippen, "Bias-lead monitoring of ultrafast nonlinearities in InGaAsP diode laser amplifiers," Appl. Phys. Lett., vol. 57, pp. 129, 1990
- [20] J.Eom, C.B. Su, W.Rideout, R.B. Lauer, and J.S. LaCourse, "Determination of the nonlinearity time constant in $1.3 \mu\text{m}$ semiconductor lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 58, pp. 234, 1991
- [21] C.B. Kim, En T.Peng, C.B. Su, and W.Rideout, "Measurement of the non-linear gain time constant using a traveling-wave semiconductor ring laser," Conference on Lasers and Electro-Optics, pp. 524, paper#JTHF6, 1992

 저 자 소 개



金 昌 偉(正會員)

1957년 6월 6일생. 1983년 2월 고려대학교 공학사. 1988년 12월 Florida Tech 공학석사. 1992년 5월 Texas A&M 대학 공학박사. 1992년 2월 ~ 1993년 2월 삼성전자 근무. 1993년 3월 ~ 현재 공주대학교 전기전자

정보공학부 조교수. 주관심분야는 반도체 레이저의 비선형 이득, 반도체 레이저의 변조특성, 전광통신망 등임

嚴 震 燮(正會員) 第 34卷 D編 第 5號 參照

현재 강원대학교 전자공학과 조교수