

넓은 파장 가변영역을 가지는 반도체 레이저를 위한 Nonlinearly Chirped Grating의 설계

김덕봉 · 최안식 · 윤태훈 · 김재창

부산대학교 전자공학과

김 선 호

한국과학기술연구원 정보전자연구부

(1996년 6월 13일 받음)

Superstructure Grating Distributed-Bragg Reflector(SSG DBR) 레이저는 비교적 높은 Mode Suppression Ratio(MSR)을 가지면서 넓은 파장 대에서 불연속 파장가변 특성을 가진다. 그러나 SSG DBR 레이저는 출력파장을 가변 시킬 때, 파장가변 영역을 구성하는 채널 중 몇 개가 빠지는 현상이 실험을 통해 관찰되어 왔다. 우리는 수치해석적인 시뮬레이션을 통해 이 현상이 SSG DBR 거울을 구성하는 linearly chirped grating의 불균일한 반사 피크 높이에 의한 영향임을 발견했고, 반사율 피크 높이를 거의 균일하게 만들 수 있는 nonlinearly chirped grating을 제안한다. 그리고 이 거울을 가지는 파장 가변 레이저가 채널의 손실 없이 넓은 파장가변 영역에서 동작하는 것을 확인했다. 그러므로 nonlinearly chirped grating을 가지는 DBR 거울은 넓은 파장가변 영역을 가지는 가변 레이저에 적용할 수 있다.

I. 서 론

광통신에서 전송용량이 늘어남에 따라 기존의 Time Division Multiplexing(TDM)과 같은 전송방식보다 대용량의 정보를 전송할 수 있는 Wavelength Division Multiplexing(WDM) 혹은 Frequency Division Multiplexing(FDM)방식이 요구된다. WDM 통신방식의 신호 전송능력은 송신부 광원의 출력 파장가변 영역 내에서 분할되는 전송 채널 수에 비례한다. Sampled Grating Distributed Bragg Reflector(SG DBR) 레이저와 SSG DBR 레이저는 넓은 파장영역에서 비교적 높은 MSR을 유지하면서 불연속 파장가변 특성을 가진다.

SG DBR 거울은 전체 거울 구조에서 일부 구간에만 회절격자가 존재하는 Sampled Grating을 가지므로 반사율이 낮아진다. 그러므로 SG DBR 레이저는 높은 임계전류를 가지게 되어 Continuous Wave(CW)상태로 동작하기 힘들다.^[1] 이에 비해 SSG DBR 거울은 linearly chirped grating을 가져 회절격자가 전 거울에 분포하므로 같은 길이의 SG DBR 거울에 비해 높은 반사율을 가질 수 있다. 따라서 SSG DBR 레이저는 낮은 임계전류 특성을 가지고 CW 동작을 할 수 있다.^[2] 그러나 SSG DBR 레이저는 파장가변 영역의 범위와 파장가변 채널의

간격에 따라, 가변영역을 구성하는 채널 중 몇 개가 사라지는 현상이 실험을 통해 관찰되어 왔다.^[2] 이런 채널손실은 파장 가변 레이저의 동작을 불안정하게 하고, 이용할 수 있는 채널의 갯수를 줄이므로 레이저의 응용을 제한한다.

본 논문에서 수치해석학적인 시뮬레이션을 통해서 linearly chirped grating을 가지는 DBR 거울의 불균일한 반사 피크 높이가 파장가변 채널의 손실에 영향을 미치는 것을 발견했다. 그리고 거울의 반사율 스펙트럼을 균일하게 만들 수 있는 nonlinearly chirped grating을 제안하여, 반사율의 감소 없이 거울의 반사 피크의 높이를 균일하게 만들어 레이저가 파장가변 채널의 손실 없이 넓은 파장 영역에서 동작하는 것을 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

II. SSG DBR 레이저의 파장 가변 채널 손실

SSG DBR 레이저에서 사용되는 linearly chirped grating은 그림 1(b)처럼 회절격자 주기가 Λ_a 와 Λ_b 내에서 선형적인 값을 가지는 단위구조를 가진다. 이 단위구조는 각 회절격자의 길이의 합이 Λ_s 가 될 때마다 반복된다. 이때 Λ_s 를 피치(pitch)라고 하고 반사 피크의 간격을

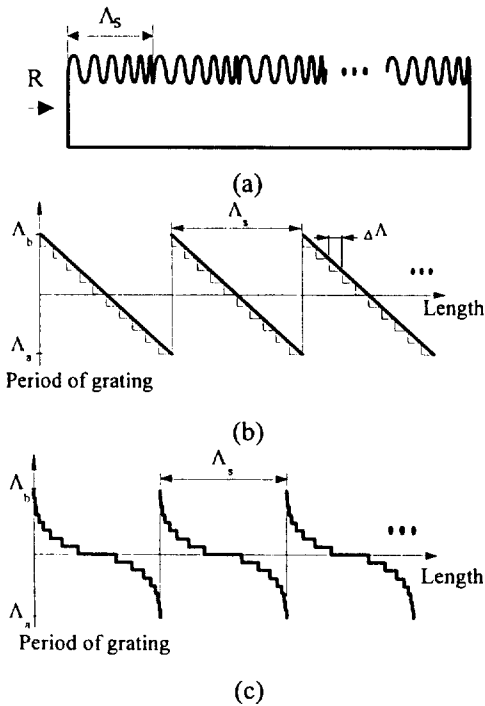


Fig. 1. (a) The schematic structure of an SSG DBR mirror. (b) The distribution of grating period in a linearly chirped grating. (c) The distribution of grating period in a nonlinearly chirped grating.

결정한다. 이 구조에 의해 SSG DBR 거울은 넓은 파장 영역에서 피크 간격 $\Delta\lambda_s$ 를 가지는 반사 피크 열을 만든다. 피크간격 $\Delta\lambda_s$ 는

$$\Delta\lambda_s = \frac{\lambda_0^2}{2n\Lambda_s}$$

으로 표현된다. 여기서 Λ_0 는 평균 Bragg 파장이고, n 은 매질의 유효굴절율을 나타낸다. Linearly chirped grating은 반사 피크 열을 얻기 위해서 회절격자의 일부를 제거하는 Sampled grating과 다르게 회절격자의 주기만 선형적으로 변화시키므로 같은 길이의 Sampled grating보다 높은 반사율을 가진다. 그러므로 SSG DBR 거울은 레이저가 낮은 임계전류를 가지고 CW 동작을 할 수 있도록 한다.

다층박막 구조의 해석이 용이한 특성행렬을^[3] 이용하여 $\Lambda_a = 1.5 \mu\text{m}$, $\Lambda_b = 1.6 \mu\text{m}$, $n = 3.0$, $\Lambda_s = 42.82 \mu\text{m}$, 그리고 $\Lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 의 파라미터를 가지는 linearly chirped grating의 반사율 스펙트럼을 계산하여 그림 2에 나타

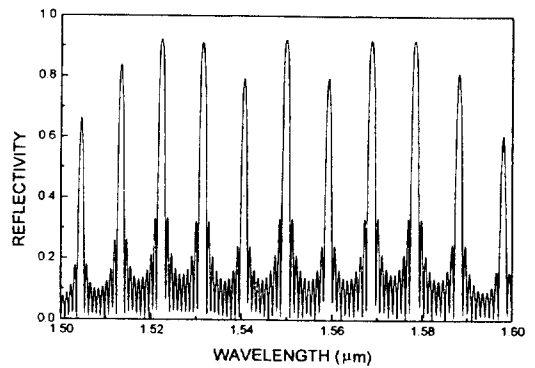


Fig. 2. Reflectivity spectrum of a linearly chirped grating with $\Lambda_a = 1.5 \mu\text{m}$, $\Lambda_b = 1.6 \mu\text{m}$, $\Lambda_s = 42.82 \mu\text{m}$, and $\Lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$. This was obtained by the characteristics matrix method.

냈다. 그런데 그림 1(b)에서 단위구조의 회절격자의 주기가 거울의 길이에 대한 연속함수로 표현되므로, 각 회절격자는 왜곡된 사인 함수 모양을 가져 수치해석학적 시뮬레이션을 하기가 복잡하다. 따라서 그림 1(b)에서 회절격자 주기함수를 각 회절격자의 주기가 $\Delta\Lambda$ 동안 일정한 값을 갖는 불연속함수로 바꾸었다. 따라서 각 회절격자들이 완전한 사인함수 모양을 가져 시뮬레이션이 용이하다. 실제 SSG DBR 거울을 제작할 때 E-beam lithography 장비의 해상도 문제를 해결하기 위해 이 방법이 이용된다. 이렇게 회절격자 주기함수를 변화시켜도 SSG DBR은 동일한 반사율 스펙트럼을 가진다.^[4] 그림 2에서 반사 피크들이 일정한 파장 범위 안에서 약 10 nm의 피크간격을 가지고 분포하는 것을 볼 수 있다. 그리고 각 반사 피크의 반사율이 균일하지 못한 것을 알 수 있다.

SSG DBR 레이저에서 전후방 거울은 서로 다른 피치 Λ_a 와 Λ_b 를 가진다. 따라서 식 (1)에 의해 두 거울의 반사 피크들의 간격이 달라져, 단지 중심에 위치하는 피크만 겹치고 나머지는 어긋나게 된다. 완전히 겹쳐지는 반사 피크에 존재하는 공진모드는 가장 낮은 거울 손실을 가지므로, 주변의 어긋난 피크에 존재하는 공진모드보다 낮은 임계이득을 가진다. 따라서 SSG DBR 레이저는 이 공진모드에서 높은 MSR을 유지하면서 단일모드로 발진한다. 레이저의 출력파장을 가변 시키기 위해, 한 쪽 거울에 가변전류를 인가하면 프라즈마 효과에 의해 거울을 구성하는 매질의 굴절율이 감소하게 된다. 굴절율의 감소는 optical length를 변화시켜 한 쪽 거울의 반사 피크를 단파장 쪽으로 이동시킨다. 따라서 겹쳐진 반사

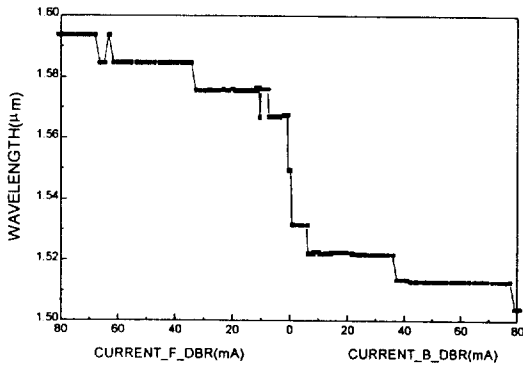


Fig. 3. Tuning characteristics of an SSG DBR laser with linearly chirped grating mirrors ($\Lambda_s=42.82 \mu\text{m}$, $\Lambda'_s=46.69 \mu\text{m}$). There are eight channels with 10 nm interval. Missing wavelengths at $1.54 \mu\text{m}$ and $1.56 \mu\text{m}$.

피크가 이동하게 되어, 출력파장이 가변 된다. 이런 원리에 의해 SSG DBR 레이저는 매우 넓은 불연속 가변 범위($\Delta\lambda$, \times 반사율 피크의 갯수)를 가진다.

SSG DBR 레이저를 Fabry-Perot 레이저로 모델링하여 인가되는 가변전류에 대한 레이저의 위상조건과 이득조건을 만족시키는 발진모드를 계산하여 파장가변 특성을 시뮬레이션 했다. 그런데 SSG DBR 레이저의 불연속 가변 영역을 이루는 채널 중 몇 개가 사라지는 현상이 나타났다.^[5] 그림 2의 SSG DBR 거울을 이용하여 계산한 레이저의 파장가변 특성을 그림 3에 나타냈는데, 발진 파장은 약 80 nm 정도의 넓은 파장범위에서 10 nm의 간격을 두고 채널을 형성하고 있다. 그림 3에서 각 채널은 그림 2의 반사 피크에 대응된다. 그러나 $1.54 \mu\text{m}$ 와 $1.56 \mu\text{m}$ 의 피크에 대응되는 채널이 없다. 즉 파장가변 채널이 손실되었음을 알 수 있다.^[6] 이런 현상은 파장 가변범위를 늘이기 위해 두 거울의 피치 Λ_s 의 차이를 줄일수록 잘 관찰된다. 채널의 손실은 SSG DBR 레이저의 전체 파장 가변영역에서 이용할 수 있는 파장가변 채널의 갯수를 줄이기 때문에 레이저의 응용에 제약을 준다.

SSG DBR 거울과 달리 비교적 일정한 반사 피크 높이를 가지는 SG DBR 거울을 이용하는 레이저는 채널의 손실 없이 출력파장을 가변시킬 수 있다. 따라서 채널 손실이 거울의 반사 피크 높이의 불균일성과 연관이 있다는 것을 알 수 있다. 그림 4에서 보듯이, SSG DBR 거울의 경우 반사 피크 높이의 불균일성 때문에 어떤 피크는 주위의 피크보다 낮은 반사율을 가진다. 그리고 반사율 피크는 임펄스가 아니라 어느 정도의 대역폭을

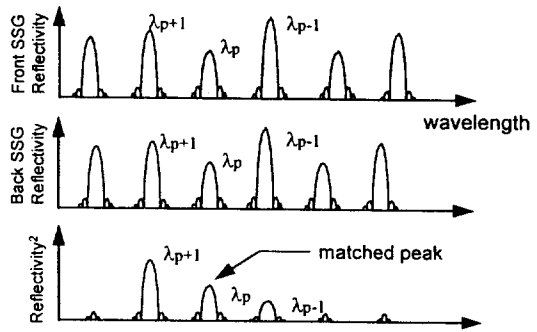


Fig. 4. The cause of Gap of channel. Laser operates still at an unmatched peak Λ_{p+1} .

가지므로, 높은 반사율을 가지는 피크에 있는 공진모드는 가변전류에 의해 피크가 어느 정도 어긋나더라도 비교적 낮은 거울손실을 가질 수 있다. 따라서 낮은 반사율을 갖는 피크가 완전히 겹쳐진 경우, 주변의 높은 반사율을 갖지만 조금 어긋난 피크에 존재하는 공진모드가 더 낮은 임계이득을 가질 수 있다. 이렇게 되면 SSG DBR 레이저는 낮은 반사율을 갖는 피크에 존재하는 공진모드에서 발진하지 못하거나 다중모드로 발진하게 되어 파장가변 채널이 손실된다. 그러므로 채널손실 없는 넓은 파장 가변영역을 갖기 위해서는 균일한 반사율 피크 높이와 적당한 피크 대역폭을 가지는 거울이 필요하다.

III. Nonlinearly Chirped Grating DBR Mirror의 반사율 특성

파장가변 레이저의 전후방 거울이 높은 반사율을 유지하면서 균일한 반사 피크 높이를 갖도록 하기 위해 거울의 길이와 회절격자 주기의 관계를 나타내는 함수의 모양을 바꾸면서 거울의 반사율 스펙트럼을 계산해 보았다. 여러 번의 시행착오를 거쳐 그림 1(c)와 같은 회절격자주기 함수를 가지는 거울이 비교적 균일한 반사율 스펙트럼을 가지는 것을 발견했다. 그림 1(c)의 구조는 단위구조에서 동일한 주기를 갖는 회절격자들이 차지하는 길이가 서로 다르다. 이것은 그림 1(c)처럼 회절격자의 주기와 거울 길이의 관계를 비선형적으로 만든다. 그래서 이 구조를 nonlinearly chirped grating이라 부른다. 그림 2에서 사용된 파라미터를 가지는 nonlinearly chirped grating의 반사율 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. 전체 반사율이 높은 값을 유지하면서 파장가변 채널의 손실에 영향을 주는 각 피크의 대역폭도 linearly chirped grating과 비슷한 값을 가진다. 그러나 중심 파장 근처에서

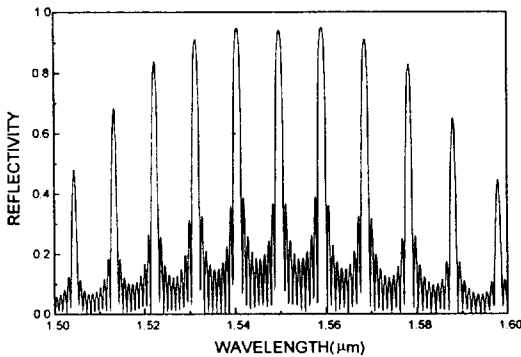


Fig. 5. Reflectivity spectrum of a nonlinearly chirped grating with $\Lambda_w=1.5 \mu\text{m}$, and $\Lambda_b=1.6 \mu\text{m}$, $\Lambda_s=42.82 \mu\text{m}$, and $\Lambda_0=1.55 \mu\text{m}$.

피크의 높이가 비교적 균일함을 알 수 있다.

이러한 직감적인 시행착오를 통한 방법은 임의의 피크간격을 갖는 균일한 반사율 스펙트럼을 구하는데 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 그러므로 보다 체계적인 방법이 필요하다. 이를 위해 먼저, linearly chirped grating에서 각 회절격자의 주기를 $\Delta\Lambda_N$ 만큼 변화시키면서 반사율 스펙트럼을 계산한다. 그리고 반사율 스펙트럼에서 각 피크의 반사율 R_k 를 계산하여 식 (2)에 대입하여, SSG DBR 거울이 균일한 반사 피크를 가질 때 반사율 R_i 와의 차이를 계산한다.

$$T = \sum_k^N (R_k - R_i)^2 \quad (2)$$

이고, N 은 반사율 스펙트럼에서 피크의 갯수이다. 다시 T 가 감소하는 방향으로 각 회절격자의 변화량 $\Delta\Lambda_N$ 을 결정하면서 반사율 스펙트럼을 반복하여 계산한다. 이런 과정을 되풀이 하여 임의의 피치 Λ 에 대해서 균일한 반사율 스펙트럼을 가지는 회절격자주기 함수를 구할 수 있다. 그러나 이 방법으로 구해진 회절격자는 규칙성이 없이 매우 복잡하여 제작하기가 힘들다.

일반적 linearly chirped grating을 제작할 때, 회절격자의 패턴을 그리기 위해 Electron-beam(E-B) lithography 방법을 이용한다. 이 방법은 홀로그래프 lithography 방법보다 속도는 느리지만 복잡한 구조 패턴을 그릴 수 있다는 장점이 있다. 그런데 nonlinearly chirped grating은 구조상으로 linearly chirped grating과 별다른 차이를 갖지 않는다. 오히려 여러 개의 같은 주기를 갖는 회절격자를 가지기 때문에 더 간단하게 E-B lithography 방법을 사용하여 구현할 수 있다. 그러므로 nonlinearly chirped grating은 제작공정에서 부가적인 공정 없이

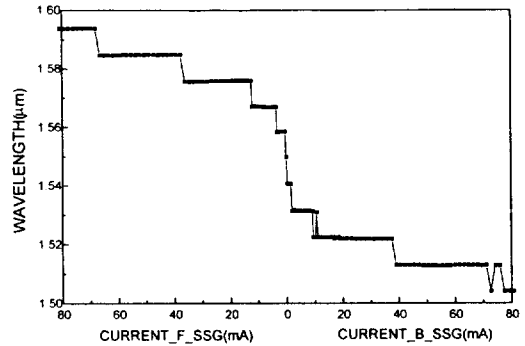


Fig. 6. Tuning characteristics of a tunable laser with nonlinearly chirped grating mirrors($\Lambda_s=42.82 \mu\text{m}$, $\Lambda'_s=46.69 \mu\text{m}$). There are ten channels with 10 nm interval.

균일한 반사율 스펙트럼을 구현할 수 있다.

비록 nonlinearly chirped grating을 가지는 거울의 전체 반사 피크 높이가 완전히 균일하지 않지만, 이 거울을 적용하여 레이저의 출력파장을 가변 시킬 때 파장가변 채널의 손실이 발생하지 않는다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 채널 손실을 발생시킨 그림 2의 파라미터 ($\Lambda_w=1.5 \mu\text{m}$, $\Lambda_b=1.6 \mu\text{m}$, $n=3.0$, $\Lambda_s=42.82 \mu\text{m}$, $\Lambda_0=1.55 \mu\text{m}$)를 가지는 nonlinearly chirped grating을 레이저에 적용시켜 파장 가변 특성을 계산하여 그림 6에 나타냈다. 그림 6에서 그림 3에서 없어졌던 $1.54 \mu\text{m}$, $1.56 \mu\text{m}$ 부근의 채널이 잘 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 초기의 가변전류에 대해 매질의 굴절율 변화율이 크기 때문에 $1.54 \mu\text{m}$ 과 $1.56 \mu\text{m}$ 에서 파장가변 채널의 폭이 좁게 나타난다. 그리고 파장가변 영역은 그림 3과 동일하고 가변 전류에 대한 파장 가변 정도도 비슷함을 알 수 있다. 그러므로 nonlinearly chirped grating을 가지는 파장 가변 레이저는 채널의 손실 없이 넓은 파장 가변영역에서 출력파장을 가변 시킬 수 있다

IV. 결 론

우리는 특성행렬을 이용한 시뮬레이션을 통해, SSG DBR 레이저의 파장 가변 특성 곡선에서 채널들이 손실되는 현상이 거울의 반사 피크 높이의 불균일성에 영향을 받는다는 것을 발견했다. 또한 파장 가변영역을 늘리기 위해 두 거울의 피치 Λ 차이를 줄일수록 이 현상이 잘 관찰된다는 사실도 발견했다. 우리는 거울의 균일한 반사율 스펙트럼을 얻기 위해서 nonlinearly chir-

ped grating을 제안한다. 수치해석학적인 시뮬레이션을 통해, 이 거울이 균일한 반사율 스펙트럼을 가지고, 또한, 이 거울을 사용하는 파장 가변 레이저가 채널의 손실 없이 출력파장을 가변 시킨다는 것을 확인했다. 그러므로 nonlinearly chirped grating은 낮은 임계전류에서 동작하고 채널손실 없는 파장 가변 특성을 가지는 넓은 파장 가변 반도체 레이저에 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] V. Jayaraman, Z.-M. Chuang, and L. A. Coldren, *IEEE J. Quantum electron.*, **29**, 1824(1993).
 [2] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T.

Tamamura, Y. Kondo, and M. Yamamoto, *IEEE J. Quantum electron.*, **29**, 1817(1993).
 [3] M. A. Macleod, *Thin-Film Optical Filter*, 2nd ed., (Macmillan, 1986).
 [4] H. Ishii, Tohmori, T. Tamamura, and Y. Yoshikuni, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 393(1993).
 [5] Dug-Bong Kim, Tae-Hoon Yoon, Jae Chang Kim, and Sun Ho Kim, 22nd International Symposium on Compound Semiconductors, Cheju Island, Korea, Aug. 28-Sept. 2(1995).
 [6] Tae-Hoon Yoon, Dug-Bong Kim, Jae Chang Kim, and Sun Ho Kim, 1995 OSA Annual Meeting, Portland, Oregon, Sept. 10-15(1995).

Design of the Nonlinearly Chirped Grating for Broadly Tunable Semiconductor Lasers

Dug-Bong Kim, An-Shik Choi, Tae-Hoon Yoon and Jae Chang Kim
Dept. of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Sun Ho Kim
Div. of Electronics and Information Tech. Korea Institute of Sci. and Tech., Seoul 136-791, Korea

(Received: June 13, 1996)

A Superstructure Grating(SSG) Distributed-Bragg-Reflector(DBR) laser has a broad tuning range with a good mode suppression ratio. However, gaps of channel are observed in the wavelength-tuning characteristics of an SSGDBR laser which employs linearly-chirped DBR mirrors. We found by numerical simulation that the gaps may be attributed to the nonuniform reflection-peak heights of a linearly-chirped DBR mirrors. We propose a nonlinearly chirped grating DBR mirror structure that makes reflection-peak heights almost uniform. Therefore a nonlinearly chirped grating structure can be employed in an extended tuning range semiconductor laser to achieve gap-free tuning and low threshold current operation simultaneously.