

論文95-32A-1-24

전자선 묘화를 이용한 장파장 DFB-LD 용 격자 구조의 제작 및 특성 분석

(Fabrication & Characterization of Grating Structures for Long Wavelength DFB-LD Using Electron Beam Lithography)

宋允圭*, 金成俊*, 尹義峻**

(Yoon-Kyu Song, Sung June Kim, and Euijoon Yoon)



요약

전자선 묘화(Electron Beam Lithography)와 반응성 이온 식각(Reactive Ion Etch, RIE) 기술을 이용하여 장파장 DFB-LD를 위한 1차 및 2차 격자를 InP 기판 위에 형성하였으며, 이중 2차 격자에 대해 격자의 회절 특성을 이용하여 감광막이 제거되지 않은 상태에서 비파괴적으로 분석하였다. 전자선 묘화용 감광막인 PMMA는 InP의 반응성 이온 식각에 적합하지 않으므로, lift-off 기술을 사용하여 산화막 위에 Cr 패턴을 형성, 식각 마스크로 사용하였다. 그리고, PMMA 2차 격자 패턴에 대해 격자의 회절 무늬 분석이 duty-cycle의 예측을 가능하게 한다는 것을 실험을 통해 확인하였는데, 이는 격자 구조의 비파괴적 on-line 테스트에 이용되어, 불완전한 격자가 계속적인 공정을 거치는 비효율성을 막을 수 있을 것이다.

Abstract

The 1st and 2nd-order grating structure for long wavelength DFB(Distributed FeedBack) laser diodes are successfully fabricated on InP substrates by using electron beam lithography and reactive ion etch techniques, and also characterized non-destructively by diffraction analysis without removal of photo-resist layer. A new composite layer made by lifted-off Cr layer on thin SiO₂ film is developed and used as an etch mask, because PMMA, the e-beam resist, is unsuitable for reactive ion etch of InP. In addition, it is experimentally confirmed that diffraction analysis makes it possible to predict the grating parameters, and the analysis can be used as a non-destructive on-line test to prevent incomplete gratings from being successively processed.

* 正會員, 서울대학교 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., & Inter-Univ. Semiconductor Research Center Seoul National Univ.)

** 正會員, 서울대학교 無機材料工學科 및 半導體 研究所

所

(Dept. of Inorganic Materials Eng., & Inter-Univ. Semiconductor Research Center Seoul National Univ.)

接受日字 : 1994年 8月 5日

I. 서 론

1.55 μ m 장파장 DFB(Distributed FeedBack) LD(Laser Diode)는 높은 bit rate의 광통신 시스템이나 CMC(Coherent Multichannel Communication) 시스템 등을 구현하기 위한 핵심 소자로 여겨지고 있는데, 이는 DFB-LD가 집적이 가능하고, 파장을 선택할 수 있으며, 온도에 대한 파장의 변화가 적고, 길이 방향의 모드가 안정적인 장점을 가지기 때문이다^[1]. DFB-LD의 이러한 장점들은 길이 방향으로 형성되어 있는 distributed feedback 구조에 기인하는데, 대부분의 경우 이는 LD의 도파로에 격자 구조를 형성함으로써 구현할 수 있다^[2].

이 논문에서는 DFB-LD의 제작에 가장 큰 영향을 주는 distributed feedback 구조, 즉 격자 구조를 형성하기 위하여, 미세 패턴 형성의 특성이 좋고, 특히 비주기적인 구조의 도입이 가능한 전자선 묘화(Electron-beam Lithography)와 비등방성 식각으로서 깊은 홈의 형성이 가능한 반응성 이온 식각(RIE, Reactive Ion Etch)을 이용하여, 높은 결합 계수(Coupling Coefficient, κ)를 얻을 수 있는 격자 구조를 구현하였다. 또한, PMMA(Poly Methyl MethAcrylate) 격자 패턴에 대한 비파괴적인 광학적 분석을 통해, 형성될 격자의 duty-cycle을 예측할 수 있었는데, 이는 계산 결과와 잘 부합하였다.

II. 전자선 묘화를 이용한 격자 패턴의 형성

장파장 DFB-LD 용 격자구조를 구현하기 위해서는 1차 격자의 경우, 약 0.25 μ m 정도의 주기를 갖는 선/간격 패턴이 요구되므로, 0.1 μ m 정도의 미세한 선폭을 밀집되게 구현하는 묘화기술이 필요하게 된다. 이러한 미세 패턴의 구현은 일반적인 광 마스크 작업으로는 불가능하기 때문에 홀로그래피 묘화, 전자선 묘화 등의 기술이 요구된다. 이들 중 전자선 묘화는 높은 해상도와 프로그래밍을 통한 자유로운 패턴 형성 등의 장점 때문에 낮은 생산성과 전자 산란 등의 단점에도 불구하고 많은 연구가 이루어져 왔다^{[3][4]}. 특히, 지금까지 가장 널리 사용되었던 홀로그래피 묘화 기술은 격자 패턴 내에 위상 변화를 도입하기가 매우 어렵고, 격자패턴이 다양한 식각 단면을 구현하기에 부적절하기 때문에, 전자선 묘화 기술로 패턴을 형성하는 경우가 점차 많아지는 추세이다^[5].

이 논문에서는 Cambrige EBMF 10.5 시스템을 이용해서 1.55 μ m 파장의 DFB-LD에 대한 1차 격자에 준하는 0.25 μ m 주기와 2차 격자에 준하는 0.5 μ m

주기의 격자 패턴을 2000Å 두께의 PMMA 위에 형성하였다. 그림 1 에 위의 실험에 대한 공정 흐름도 및 공정 조건이 보여지며, 표 2 에는 실험에 의한 PMMA 패턴 형성의 노출 조건이 나와있다. 또한, 그와 같은 공정 과정과 공정 조건에 의해 구현된 PMMA 격자 패턴의 형성 결과가 그림 2 에 보여지고 있다.

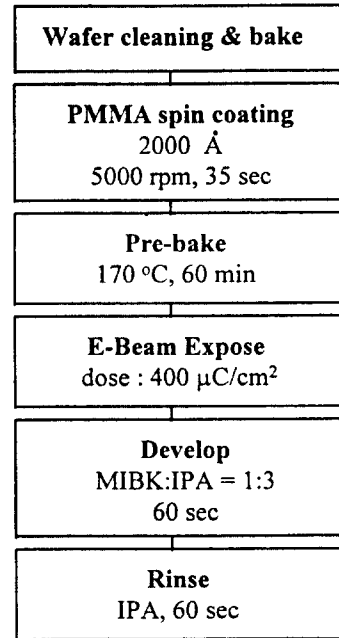


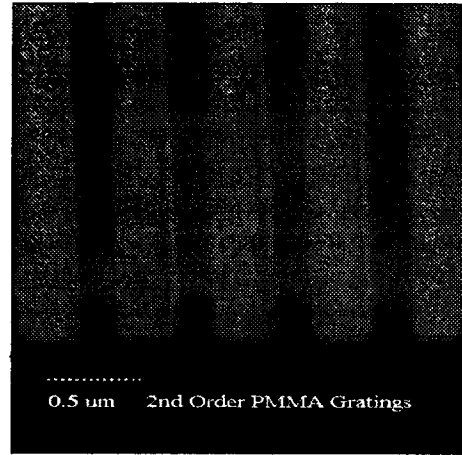
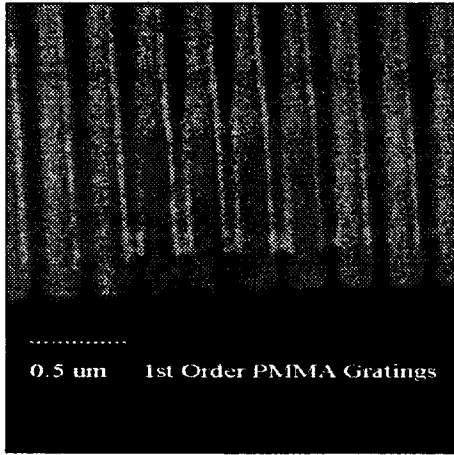
그림 1. 공정 흐름도 및 공정 조건
Fig. 1. Processing procedure and conditions.

표 1. 1·2차 격자 패턴에 대한 노출 조건
Table 1. Expose conditions for the 1st and 2nd order gratings.

	Dose [μ C/ cm^2]	EHT [KV]	Beam Current [nA]	Beam Diameter [nm]
1차격자	400	30	0.5	~ 40
2차격자	350	30	1.0	~ 60

III. RIE를 이용한 격자 패턴의 식각

InP 혹은 그 계열의 화합물 반도체에 대한 건식 식각은 장파장용 광통신 소자의 제작에 있어서 매우 큰 비중을 차지하는 기술이다. 특히, DFB 레이저의 제작에서는 0.2~0.25 μ m의 주기를 갖는 격자의 비등방성 식각 뿐만 아니라, 수 μ m의 폭에 불과한 능동 영역



(a) 1차 격자 패턴
(a) 1st-order grating pattern.

(b) 2차 격자 패턴
(b) 2nd-order grating pattern.

그림 2. 1·2차 PMMA 격자 패턴의 SEM 사진
Fig. 2. SEM photographs of the 1st and 2nd order PMMA grating patterns.

(active region)의 구현에도 중요한 역할을 한다¹⁶⁾. 건식 식각 중에서도 반응성 이온 식각(RIE, Reactive Ion Etch)은 압력, RF 전력, bias 전압, 가스 유량, 기판 온도등 여러가지 공정 변수가 복잡하게 얽혀서 식각이 이루어지는 만큼, 식각율, 비등방성, 표면 상태 등을 고루 만족시키는 식각이 가능하다. 따라서, 이 논문에서는 DFB 레이저용 격자의 식각에 반응성 이온 식각을 도입하였으며, 식각 가스로는 CCl₂F₂와 Ar의 혼합 가스를 이용하였다.

CCl₂F₂와 같은 할로젠 계열의 가스는 III-V 족 화합물 반도체의 식각에 널리 쓰이는 가스이기는 하지만, InP를 식각할 때에는 일반적으로 오버 컷 형태의 측면을 갖고, 식각율이 낮으며, 표면이 거칠고, InP은 1000Å/min미만의 식각률을 보이는 반면 PMMA, 산화막, 질화막은 1000Å/min 이상의 식각률을 보여 적당한 식각 마스크가 없다는 문제점을 가진다¹⁶⁾. 이는 식각 생성물인 InCl_x의 증기압이 매우 낮아서, 반응 후에 기화가 어렵기 때문이다¹⁷⁾. 위와 같은 단점을 최소화 하기 위해, 앞에서 언급된 여러가지 공정 변수 중, 가스 유량비, RF 전력, 압력의 세 가지를 변수로 식각 조건을 최적화 하였다. 최적 조건은 기본적으로 높은 식각율을 목표로 하였으며, 표면 상태와 비등방성도 고려되었다.

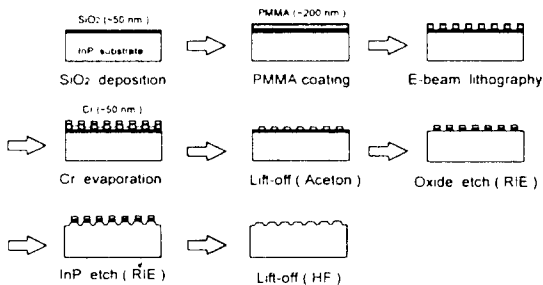


그림 3. 격자 구조 제작 과정
Fig. 3. Fabrication procedure of grating structure.

실험 결과, CCl₂F₂ 15sccm, Ar 25sccm의 유량과, 상온, 200W의 RF 전력에서 식각율 1150Å/min과 좋은 표면 상태를 얻을 수 있었으므로, 이 조건이 InP의 식각에 적합함을 알 수 있었지만, 이 조건에서 PMMA의 식각 선택도가 매우 나쁘기 때문에 PMMA를 마스크로 InP를 식각하여 격자 구조를 형성할 수는 없었다. 따라서, 새로운 마스크층이 필요하였는데, CCl₂F₂의 경우 산화막이나 질화막에 대한 선택도 역시 나빠서, 새로운 식각 마스크를 찾아본 결과, 금속층이 식각마스크로 적합함을 실험적으로 알 수 있었다.

따라서, PMMA 패턴에 위에 금속을 증착하고, lift-off 작업에 의해 금속 패턴을 형성하여, 이를 식각 마스크로 사용하였다. 그런데, 금속 마스크층은 InP 식각 후에 제거하는 데 문제점을 발생시킬 수 있으므로, 금속과 InP 기판 사이에 약 500Å 정도의 얇은 산화막을 넣어, 패턴의 전이 후에 금속을 lift-off 할 수 있도록 하였다. 여기에서, 금속층은 lift-off 특성-step coverage, adhesion 등 을 고려하여 Cr 층을 사용하였는데, Cr은 InP의 기판의 최고 식각율인 조건에서 2분의 식각시간 동안 100Å 미만의 식각을 보임으로서, InP의 식각에 적합하였다.

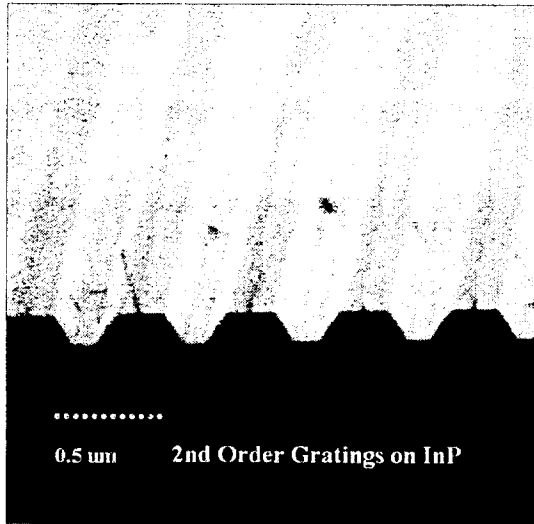


그림 4. 완성된 2차 격자 구조의 SEM 사진
Fig. 4. SEM photograph of a completed 2nd-order grating structure.

그림 3 에 격자 구조 식각 공정의 개략도가 보여지고 있으며, 그림 4 에는 완성된 2차 격자의 전자 현미경 사진이 보여지고 있다. 1차 격자의 경우는 PR profile 이 좋지 않은 이유로 lift-off가 어려워서, 보다 얇은 (~300Å) Cr 층을 도입하였으며, 이에 의해 성공적인 격자의 형성을 관찰할 수 있었다. 그림 5 에 얇은 Cr 층에 의해 형성된 1차 격자 구조가 보여지고 있다.

반응성 이온 식각에 의한 InP 격자 구조의 형태는 사다리꼴 모양의 경사면을 갖는 오버컷 형태였는데, 이는 식각시 식각 사면에 폴리머가 형성되었기 때문으로 생각된다. 이러한 폴리머의 형성은 격자 패턴의 식각율이 넓은 패턴을 이용한 식각을 실험에서보다 상당히 낮아지는데에도 큰 영향을 끼친 것으로 생각된다. 하지만, Cr 마스크층은 낮은 식각율에 따르는 긴 식각 시간 동안 충분히 견디었으며, 2차 격자의 경우 3분 30초의 식각으로 약 2000Å 깊이의 격자를 구현할 수 있

었다.

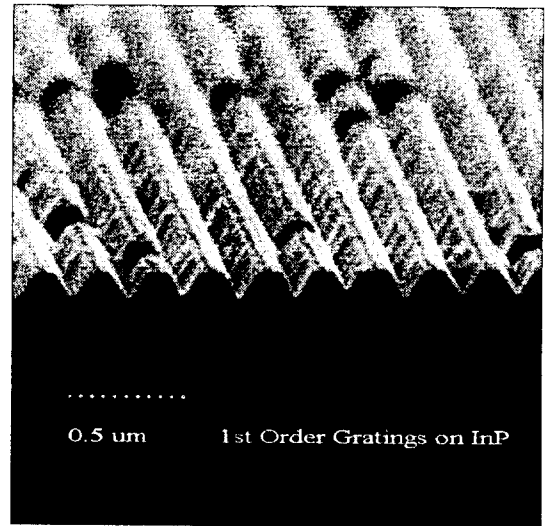


그림 5. 1차 격자 구조에 대한 SEM 사진
Fig. 5. SEM photograph for the 1st order grating structure.

IV. 격자 구조의 광학적 분석

격자 구조에 대한 회절 분석은 식각 깊이의 실시간 조절, 식각 경사 및 선평의 비파괴 측정, 홀로그래피 격자의 노출 시간 조절 등을 통해서 반도체 공정에 응용되고 있으며, 이 방법은 완전히 비파괴적이고, 간단한 실험 장치에 의해 짧은 시간에 수행할 수 있다는 장점을 갖는다.^{[8][9]}

이 논문에서는 6328Å의 파장을 갖는 HeNe 레이저와 Si PIN detector를 이용하여, InP 기판 위에 형성된 PMMA 격자 패턴에 대한 회절 실험을 하였다. 실험 장치는 그림 6 에 보여지고 있으며, 반사광(0차 회절광)과 1차 회절광의 광도비를 측정할 실험 결과는 이론적인 계산값과 함께 그림 7 에 보여진다.

실험 결과, 격자 패턴의 duty-cycle은 간단한 기하광학적 방법에 의한 계산에 잘 부합하였으며, 격자의 duty-cycle은 DFB-LD의 결합계수에 큰 영향을 미치지므로, 결국 회절 분석은 제작될 DFB-LD에 대한 간접적인 성능 예측 방법이 될 수 있다. 또한, PMMA 감광막 격자는 30분 이상 HeNe 레이저에 노출되었음에도 불구하고 회절 광도가 변하지 않았는데, 이 사실은 회절 분석 방법이 완전히 비파괴적인 검사임을 증명한다. 이 방법이 격자 위에 에피층이 올라가기 전에 적용된다면, 제작된 격자가 공정 후 적당한 결합 계수를 가질 수 있는가의 판단을 통해 잘못된 격자가 계속적으로 다음 단계의 공정을 받게되는 비능률성을 막는데에

도 공헌을 할 것이다.

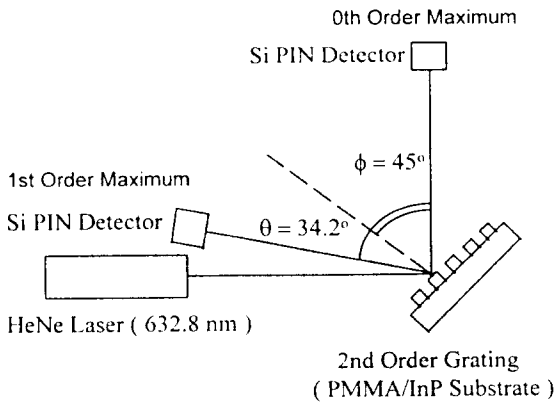


그림 6. 회절 분석 실험 장치

Fig. 6. Experimental setup for diffraction analysis.

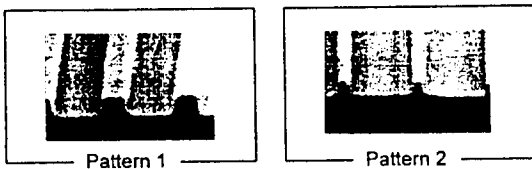
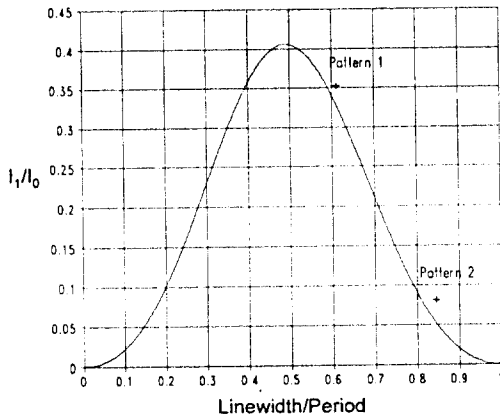


그림 7. 회절 실험 결과

Fig. 7. Experimental results for diffraction analysis.

V. 결론

장파장 DFB 레이저 다이오드의 제작을 위해, 높은 결합 계수를 구현할 수 있는 격자 구조가 형성되었다.

이는 전자선 묘화 기술과 반응성 이온 식각을 이용해 구현되었으며, 우수한 성능의 DFB-LD 소자를 제작하는데 뿐만 아니라, 여러가지 다른 구조의 소자를 제작하는 데에도 적절하게 이용될 수 있으리라 기대된다.

실험 결과, 전자선 묘화에 의한 감광막의 형성 조건과 반응성 이온 식각에 의한 패턴의 형성 조건을 구하였고, 특히 식각 선택도가 나쁜 InP 기판의 식각을 위해 lift-off 방법으로 형성된 Cr과 산화막의 이중 마스크층을 도입하였다. 이 방법에 의해 2차 격자에 대한 비교적 깊은 홈의 격자를 구현할 수 있었으며, 1차 격자의 경우도 부분적인 성공을 보임으로써 실현 가능성을 충분히 보여주었다. 또한, 회절 분석에 의한 결합 계수의 예측에 대한 가능성을 제시하였으며, 이 분석 방법이 완전한 비파괴 검사임을 확인하였고, 따라서 실제 소자 제작에 매우 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] W. Streifer, Semiconductor Lasers : Tutorial Lecture, 7th Int'l Conf. on Integrated Optics & Optical Fiber Comm., July 18, 1989, Kobe, Japan, p. 79.
- [2] S. Wang, "Proposal of Periodic Layered Waveguide Structures for Distributed Lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, 1973, pp. 767-780.
- [3] H. Smith, "Fabrication Techniques for Surface-Acoustic-Wave and Thin-Film Optical Devices," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 10, 1974, pp. 1361-1387.
- [4] T. Kjellberg, S. Nilsson, T. Klinga, B. Broberg, and R. Schatz, "Investigation on the Spectral Characteristics of DFB Lasers with Different Grating Configurations Made by E-Beam Lithography," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 9, 1993, pp. 1405-1415.
- [5] A. S. Gozdz, P. S. Lin, A. Scherer, and S. F. Lee, "Fast Direct E-beam Lithographic Fabrication of First-order Gratings for 1.3 μ m DFB lasers," *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 2, 1988, pp. 123-125.

- [6] T. R. Hayes, M. A. Dreisbach, P. M. Thomas, W. C. Dautremont-Smith, and L. A. Heimbrook, "Reactive ion etching of InP using CH₄/H₂ mixtures: Mechanisms of etching and anisotropy," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 7, no. 5, 1989, pp. 1130-1140
- [7] A. Katz, *Indium Phosphide and Related Materials: Processing, Technology, and Devices*, Artech House, 1992, pp. 277-289.
- [8] H. Kleinknecht and H. Meier, "Optical Monitoring of the Etching of SiO₂ and Si₃N₄ on Si by the Use of Grating Test Patterns," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 125, no. 5, 1978, pp. 798-803
- [9] E. Yoon, C. Green, R. Gottscho, T. Hayes, and K. Giapis, "Latent Image Diffraction from Submicron Photoresist Gratings," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 10, no. 5, 1992, pp. 2230-2233.

저 자 소 개

宋 允 圭(正會員)

1970년 서울 출생 1972년 서울대 전자공학과 B.S.
1994년 서울대 전자공학과 M.S. 현재 미국 Brown
대학사과장. 관심분야: 반도체 레이저의 제작 및 측정

金 成 俊(正會員)

1954년 10월 24일 생. 1978년 서울대학교 전자공학과 학사. 1981년 미국 Cornell 대학교 전기전자공학과 석사. 1983년 Cornell 대학교 전기전자공학과 박사. 1983년 ~ 1989년 미국 AT & T Bell Labs MTS(연구소). 1989년 ~ 1993년 서울대학교 전자공학과 조교수. 1993년 ~ 현재 서울대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 광전자 집적 회로(OEIC), 광집적회로(PIC), 반도체레이저, 수량 다이오드, 광연결 및 광계산시스템, 신경생체센서 등임.

尹 義 峻(正會員)

1983년 서울대 금속공학과 학사. 1985년 동대학원 석사. 1990년 M.I.T 재료공학과 Ph.D. 1990년 ~ 92년 AT&T Bell Labs. PMTS(연구소). 1992년 ~ 서울대 무기재료 공학과 및 반도체 공동연구소 조교수. 주관심분야는 SiGe, GaN 및 III-V족 화합물 반도체 epi 성장연구.