



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



博士学位論文

에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘박막의
제조공정에 관한 연구

濟州大學校 大學院

物理學科

高好正

2012年 2月



에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘박막의
제조공정에 관한 연구

指導教授 최 치 규

高 好 正

이 論文을 物理学 博士学位 論文으로 提出함

2011 年 10 月

高好正의 物理学 博士学位 論文으로 認准함

審査 委員長 _____

審査副委員長 _____

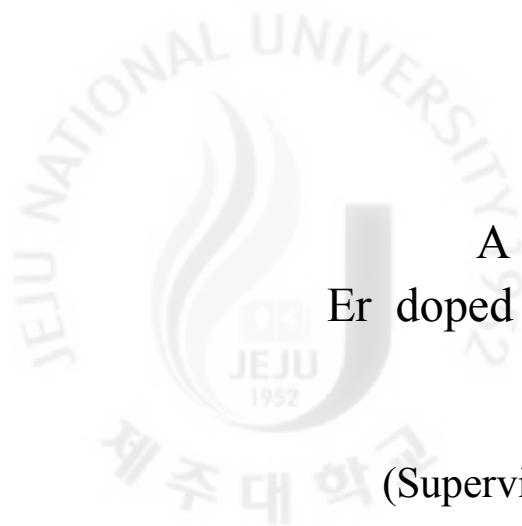
委 員 _____

委 員 _____

委 員 _____

濟州大學校 大學院

2011 年 12 月



A Study of Fabrication for Er doped nano-crystal Silicon Thin Films

Ho Jeong Ko
(Supervised by professor Chi Kyu Choi)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Doctor of Physics

2011 . 12 .

This thesis has been examined and approved

.....
.....
.....
.....
.....

.....
Date

Department of Physics
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY



목 차

List of figures	1
List of tables	5
초 록	6
I. 서 론	8
1. 집적회로 기술의 발전과 한계	8
2. 실리콘 포토닉스의 필요성	9
3. 실리콘 포토닉스의 연구 및 개발현황	10
II. 이 론	15
1. 나노결정형 실리콘의 양자 제한 효과	15
2. nc-Si:Er 발광 기구	16
3. 실리콘 나노클러스터 / 에르븀 사이의 에너지 전달 메카니즘	17
4. 도파로에 광의 전파 원리	19
5. McCumber 관계식	21
III. 실 험	23
1. 에르븀 첨가형 나노결정형 실리콘 박막증착	23
2. 급속열처리공정	27
3. Photoluminescence 및 lifetime 분석방법	29
4. RBS를 이용한 박막내 Si, Er의 조성비 분석방법	32
5. nc-Si:Er을 이용한 광도파로의 제작공정	34
6. nc-Si EDWA 증폭성능 측정 및 분석방법	39
IV. 결과 및 논의	43
1. 에르븀이 첨가된 nc-Si 박막의 물리적 특성	43
2. 박막내 결함의 분석	47
3. RBS를 통한 깊이에 따른 Er 분포 분석	52
4. PL 및 Lifetime 결과 및 분석	55

5. 후 열처리 공정 온도에 따른 PL 및 lifetime의 분석	60
6. 광도파로에서의 이득 및 잡음 특성 분석	62
7. 광증폭기 구조별 증폭특성의 수치해석적 분석	70
8. nc-Si:Er 광도파로 증폭기의 특성에 대한 수치해석적 분석	74
V. 결 론	80
참 고 문 헌	82
Abstract	95
감사의 글	97

List of figures

Fig. 1. Transistor count on integrated circuits, Moore's law.	8
Fig. 2. Energy band gaps of a Si nanocrystal and bulk Si.	15
Fig. 3. Model describing the light amplification process in ErSRSO and showing the schematic band structure of an erbium-doped silicon nanocrystal in a silica host matrix.	16
Fig. 4. Schematic of energy transfer of nc-Si to Er ³⁺	17
Fig. 5. 2-dimensional propagation model for pump and signal waves.	20
Fig. 6. Mode of propagation input signal on the rib type optical waveguide.	20
Fig. 7. absorption and emission cross section of erbium ion.	22
Fig. 8. Flow chart of Er doped nc - Si processor.	23
Fig. 9. Schematic of ECR-PECVD system.	25
Fig. 10. Schematic of ECR-PECVD chamber.	26
Fig. 11. Schematic of Rapid Thermal Annealer.	27
Fig. 12. RTP temperature profile.	28
Fig. 13. Schematic of PL and Lifetime measurements.	29
Fig. 14. Comparison of PL intensity of 200 um and 2000 um slit width. ...	31
Fig. 15. Time dependance PL by using optical chopper(chopper operation frequency ; 13 Hz).	32
Fig. 16. Example of Lifetime analysis.	32
Fig. 17. Result of RBS of ni-Si:Er.	33
Fig. 18. Calculation of effective refractive index by Maxwell Garnett and Bruggemann method for dependance of Si contents in nc-Si : Er.	35
Fig. 19. Results of single mode condition at ridge type optical waveguide.	35
Fig. 20. Optical waveguide structure on mask(adiabatic).	35

Fig. 21. Microscopy image of ridge type waveguide after lithography.	38
Fig. 22. Microscopy image of waveguide after lithography with polishing (show the ridge type waveguide in ellipsoidal).	38
Fig. 23. Schematic of gain measurement system of nc-Si:Er waveguide amplifier.	39
Fig. 24. Propagation mode at ridge waveguide observed by IR-CCD/ micro- scope(1535nm signal) and results of simulation.	42
Fig. 25. Input current vs. optical power of pump LED.	42
Fig. 26. Deposited sample at Ar/SiH ₄ /O ₂ = 5/2/2, Er evaporate temp. = 1300 °C and deposition time = 60 min.	43
Fig. 27. SEM image of nc-Si deposited during 60 min.	44
Fig. 28. PL spectrum of sample deposited conditions are Ar/SiH ₄ /O ₂ = 5/2/2 sccm, working pressure = ~10 ⁻³ torr, Er evaporate temp. = 130 0°C.	45
Fig. 29. Normalized 477nm pumped PL intensity of samples.	47
Fig. 30. 477nm pumped lifetime of samples.	47
Fig. 31. TEM image of estimation of defect in a nc-Si:Er.	47
Fig. 32. Results of EDS (a) O1 , (b) O2 and (c) O3 on the TEM image.	49
Fig. 33. Bright field image of sample. deposition conditions are Ar/SiH ₄ /O ₂ = 5/4.2/4.7, Working pressure = 2 mTorr, subs. Temp. = 450 °C, plasma power = 800 W , sputter voltage = 200 V.	51
Fig. 34. Dark field image of sample. deposition conditions are Ar/SiH ₄ /O ₂ = 5/4.2/4.7, Working pressure = 2 mTorr, subs. Temp. = 450 °C, plasma power = 800 W , sputter voltage = 200 V.	51
Fig. 35. Dark field image and the results is applied image processor tools at deposition conditions are Ar/SiH ₄ /O ₂ = 5/4.2/5.1, subs. temp. = 450 °C, 0.5 mTorr, plasma power = 1200 W, sputter voltage = 900 V.	51
Fig. 36. RBS results of various deposition conditions with Er doped	

evaporator.	52
Fig. 37. Distribution of Er concentrations according to depth of samples of Er doped by evaporator.	53
Fig. 38. RBS result of Er doped by sputtering(Si:O:Er = 35.1:64.9:0.08 at%, thickness=5600 Å).	54
Fig. 39. Si contents of sample according to SiH ₄ / O ₂ flow ratio.	55
Fig. 40. PL intensities of 477 nm pumping according to Si contents.	56
Fig. 41. Variation of lifetime of Si contents.	57
Fig. 42. 477 nm and 980nm pumped PL intensities according to Er contents.	58
Fig. 43. Variation of lifetime according to Er contents.	59
Fig. 44. PL intensities of annealing temperature.	60
Fig. 45. Lifetime of Er according to annealing temperature.	61
Fig. 46. Variation of signal spectrum of pump LED on-off.	62
Fig. 47. On-off gain by using pump LED.	62
Fig. 48. ASE power of pumped by 1480 nm laser diode.	65
Fig. 49. ASE peak power of input pump power.	66
Fig. 50. Various input signal level of pump power at 1480 nm.	66
Fig. 51. Various on-off gain according to signal level.	67
Fig. 52. Small signal data by estimated Er gain (1580 nm signal).	67
Fig. 53. Various signal level by input signal power.	69
Fig. 54. Various on-off gain by input signal power.	70
Fig. 55. Amplifier characteristics of 7x7 um nc-Si/Er core EDWA : (a) gain as a function of (a) active region length and pump power change(0 dBm input signal) and (b) input signal and pump power variations(for 5 cm waveguide, with and without bottom mirror: solid and dashed lines).	71
Fig. 56. Scheme of under layer mirror and adiabatic structure of TOP LED pumping.	71

Fig. 57. (a) waveguide structure of adiabatic (b) optical mode of propagation of adiabatic waveguide. 72

Fig. 58. (a) Calculated mode overlap factor and corresponding waveguide length for nc-EDWA (b) Small signal gain and saturation input power as a function of waveguide width. 72

Fig. 59. nc-EDWA gain with $7 \times 50 \text{ um}^2$ adiabatic active core, plotted as a function of input signal power and pump intensity (for waveguide length 5 cm). Solid and Dashed lines are the results with and without mirror, respectively. 74

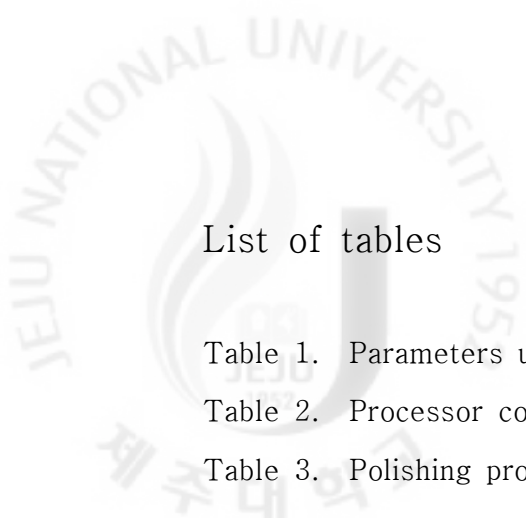
Fig. 60. Inversion distribution along the waveguide length for 5 cm waveguide length, 0 dBm input and 25 W/cm^2 pump intensity were assumed. 75

Fig. 61. Population inversion for various pump / signal intensity : (left) conventional Er in Silica, (right) Er with nc-Si in Silica. 75

Fig. 62. Population inversion distribution of cross section of nc-Si EDWA optical waveguide structures (a) $7 \text{ um} \times 7 \text{ um}$ (b) $7 \text{ um} \times 7 \text{ um}$ under layer mirror (c) $50 \text{ um} \times 7 \text{ um}$ (d) $50 \text{ um} \times 7 \text{ um}$ under layer mirror. 76

Fig. 63. Gain properties of nc-Si:Er various parameters. 79

Fig. 64. Noise figure of properties of nc-Si:Er. 79



List of tables

Table 1. Parameters used in the analysis	21
Table 2. Processor conditions	25
Table 3. Polishing processor conditions	38

초 록

본 연구에서는 전자자기공명(electron cyclotron resonance ; ECR)을 플라즈마원으로 하는 플라즈마 강화형 화학기상증착법(plasma enhanced chemical vapor deposition ; PECVD)과 동시 도핑법을 이용하여, 에르븀이 첨가된 실리콘 과다 실리콘 산화막(silicon rich silicon oxide ; SRSO)을 증착하였으며, 동시첨가원은 분산셀(effusion cell) 방법 이나 direct current (DC) 스퍼터 방법을 이용하였다.

SRSO의 증착을 위하여 SiH_4 와 O_2 가스를 이용 하였으며, 급속열처리(Rapid thermal annealing ; RTA)공정을 이용하여 SRSO을 나노결정형 실리콘화 하였다. 그리고 나노결정형 실리콘화 조건을 확인하기 위하여 투과전자현미경(transmission electron microscopy ; TEM), 전자분산형분광법(electron dispersive spectrometer ; EDS) 그리고 주사전자현미경(scanning electron microscopy ; SEM)을 이용하였다.

시료의 특성을 확인하기 위하여, 파장이 477 nm, 488 nm 그리고 980 nm인 펌핑광을 이용하여 포토루미네선스(photoluminescence ; PL)과 수명 (lifetime)을 측정하여 실리콘 함량이 34~36% 그리고 에르븀의 함량이 0.04~0.1 % 일 때 최적의 조건임을 보였으며 RTA 조건이 900~1000 °C 그리고 5~10분으로 열처리 하였을때 최적의 값을 갖는다는 것을 보였다.

최적 조건의 시료를 사용하여 상부 공기 클래딩 ridge형 광도파로를 구성하였으며, 광도파로에 488nm 파장의 레이저를 이용한 상부펌프 및 1480 nm 레이저 펌핑광을 이용하여 광특성을 분석하였다. 160 mW, 1480 nm 레이저를 순방향 펌핑 구조로 조사할 경우 대략 75 %의 밀도반전을 얻을 수 있었고, 1.1 dB/cm의 on-off 이득을 얻을 수 있음을 보였다. 그러나 33 W/cm^2 의 488 nm 아르곤 레이저를 상부펌프로 조사할 경우 80 %의 밀도반전을 얻을 수 있었고, 0.2 dB/cm의 on-off 이득을 얻을 수 있었다. 이러한 on-off 이득의 차이를 바탕으로 나노결정형 실리콘과 에르븀의 결합비율이 20 %임을 보였다.

발광다이오드(Light emitter diode ; LED)를 이용한 상부 펌핑이 가능한 에르

JEJU NATIONAL UNIVERSITY
제주대학교

름이 첨가된 나노결정 실리콘 광도파로형 증폭기(nc-Si erbium doped waveguide amplifier ; EDWA)의 수치해석 모델을 제안 하였으며, 이 모델을 바탕으로 최적화된 광도파로 구조를 설계하였다. 수치해석 결과로 부터 5 cm 길이의 nc-Si EDWA에 상부 LED 펌프를 조사하면, 0 dBm 입력신호에 대하여 1536 nm에서 대략 12 dB의 이득 및 4.5 dB의 잡음 지수를 얻을 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 나노결정형 실리콘과 에르븀간 상호결합효율, 신호 방출 단면적, 수명 (lifetime of meta-stable state of Er ions) 그리고, 펌프 흡수 단면적에 대한 최적 값을 제시하고 10 dB 이득 및 5.5 dB 잡음지수 요건을 만족하기 위한 최소 파라미터 값을 제안하여, 실제 nc-Si EDWA 개발을 위한 조건을 제시하였다.

I. 서론

1. 집적회로 기술의 발전과 한계

1960년에 페이차일드 반도체회사에서 실리콘기반의 집적회로 제조기술이 소개된 이후 실리콘기반 집적회로 제조기술은 1965년에 무어(G. Moore)에 의해 무어의 법칙이 제안되면서 폭발적인 발전을 하여 왔다[1]. 무어의 법칙은 집적회로 내의 소자의 집적도, 성능 그리고 저장용량이 매 2년마다 2배씩 늘어날 것이라는 실리콘기반 집적회로 제조에 관한 기술 발전 정도를 제시한 것으로, 실리콘기반 집적회로의 제조기술의 발전에 대한 예측을 가능하게 하였다[1]. 그림 1에서 보는바와 같이 1947년에 세계 최초로 트랜지스터가 개발된 이래 1960년에 실리콘기반 집적회로가 개발되었고, 1982년에 자외선레이저 사진식각 공정이 도입되면서, 2011년까지 실리콘 기반의 집적회로 제조기술은 무어의 법칙을 따라 발전되어왔다.

지난 50년간 집적회로내 트랜지스터의 집적도는 2개에서 20억개 이상으로 늘어날 정도로 폭발적인 기술 발전이 이루어졌으며, 이러한 실리콘기반 집적회로 제조기술의 발전은 저가의 고품질 전자소자 및 부품들을 대량으로 산업계에 공

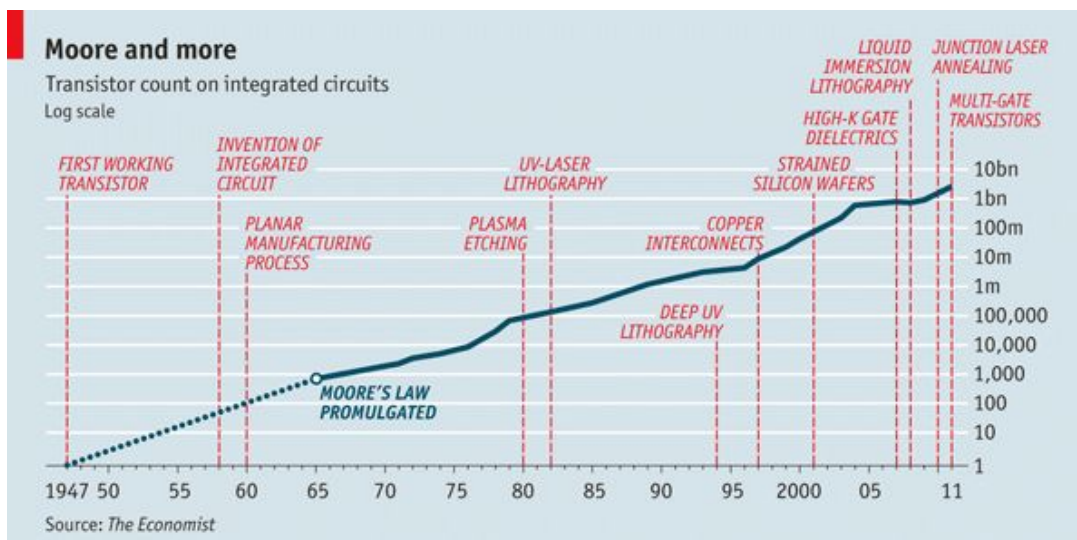


Fig. 7. Transistor count on integrated circuits, Moore's law.

급하며, 현재의 전자산업 발전을 이끌어왔다[2]. 2011년 기준으로 집적회로 제조기술은 22 nm 공정이 도입되고 있으며, 국제 반도체 기술 로드맵 (International Technology Roadmap for Semiconductor ; ITRS)의 2010년 보고에 의하면, 2015년에 이르면 집적회로 제조기술은 11 nm 까지 줄어들 것으로 예상되고 있다. 이로 인해 집적회로 내부의 소자간 인터커넥트의 총 길이는 수 킬로미터를 넘고 있으며, 이와 함께 마이크로프로세서의 전류밀도도 급격히 증가하고 있다. 이러한 배선 선포의 지속적으로 줄어드는 것과 인터커넥트 길이의 증가, 그리고 전류밀도의 급격한 증가는 배선간 누설전류의 문제, 전력사용량의 급격한 증가, 마이크로프로세서내의 발열과 이로 인해, 칩내 열적 열화 현상 등의 문제가 발생되고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 최근에 이를 위해 데이터의 전송에 전자가 아닌 광을 이용하려는 연구가 많은 그룹에서 진행되고 있으며, 특히 IBM, 인텔 등에서 나노사이즈의 광파이버 어레이와 하이브리드형 실리콘 광원과 같은 기술을 보이고 있다. 이런 새로운 연구분야의 주된 연구주제는 마이크로프로세서내의 정보전송뿐만 아니라 기존의 실리콘 집적회로내의 정보전송을 전자에서 광으로 대체하려는 것이다. 이러한 분야로 기존 실리콘 집적회로 제조기술과 기존의 포토닉스의 장점을 결합한 실리콘 포토닉스라는 분야가 최근 많은 관심을 받고 있다[4].

2. 실리콘 포토닉스의 필요성

실리콘은 기본적으로 간접띠간격(indirect band gap)을 가지는 물질이므로, 광 정보전송에 필수인 광원을 제작하기에는 발광효율이 낮아 적당하지 않은 물질로 알려져 있어 1980년대까지는 포토닉스분야에서 배제되어온 물질이다. 그러나 실리콘은 1.12 eV의 띠간격을 가지고 있어서 파장이 0.9 μm 이하인 빛만 흡수할 수 있고 광통신에 사용되는 1.3~1.6 μm 파장대의 빛은 흡수 할 수 없으므로 광 도파로로 사용할 수 있는 장점을 가진다. 반면 1.3~1.6 μm 파장대의 빛을 흡수 할 수 없으므로 이 파장대의 광검출기를 제작하는데 부적합하다는 단점을 가진

다. 그리고 전압이나 전류등을 인가 했을 때 굴절률의 변화가 크기 않아 광변조기로도 적합하지 않다. 실리콘은 지구지각의 25 %를 차지할 만큼 흔하게 얻을 수 있는 물질이라는 장점과 광범위한 실리콘기반 집적회로 제조기술을 이용할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 실리콘의 간접띠간격을 가지는 물질이라는 문제만 해결된다면, 포토닉스를 집적회로 제조기술에 적용하여 다양한 응용기술을 확보할 수 있다. 따라서, 실리콘의 낮은 발광효율과 같은 문제를 해결하기 위하여 실리콘을 나노결정화 하는 연구가 이루어지고 있다[5].

실리콘을 나노결정화 하면 양자구속으로 인해 나노결정형 실리콘(nano-crystal silicon ; nc-Si)의 띠간격이 일반 결정형 실리콘의 띠간격 보다 늘어나는 현상이 알려져 있다. 이로 인해 강한 발광을 하는데, 이를 실리콘기반 광원으로 활용하려는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 특히, 희토류원소가 첨가된 형태의 실리콘 기반 물질에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는데, 그 중에서도 에르븀을 첨가한 나노결정형 실리콘 실리카(Er doped nanocrystal silicon oxide ; nc-Si : Er) 물질에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다[6,7].

3. 실리콘 포토닉스의 연구 및 개발현황

현재 실리콘 포토닉스에 관한 연구는 미국, 유럽 그리고 아시아의 일부 국가의 연구그룹들이 각자 독자적인 연구를 진행하고 있으며, 많은 기업들이 실리콘 포토닉스분야에 경쟁적으로 연구 지원을 하고 있다. 2000년 중반부터 전세계 반도체 제조기업 및 연구소등에서 초고속 인터커넥트를 위한 실리콘 포토닉스 기술을 확보하기 위해 많은 투자가 이루어지고 있는데, Intel을 선두로 IBM, SUN, NEC등 반도체 제조 기업들이 미래의 초고속 정보전송 기술을 개발하기 위하여 많은 노력을 하고 있다[8]. 2002년에 UGent/IMEC에서 상보적 금속 산화물 반도체(Complementary Metal-Oxide Semiconductor ; CMOS) 제조기술을 이용한 최초의 실리콘 포토닉스 도파로를 선보인 후, 2004년에는 IBM에서 30 GHz SiGe 포토디텍터 제조기술을 선보였고, 이어 2005년에, Intel과 Luxtera에서 10 Gbps급 광변조기를 선보였다[8]. 2006년에는 Intel에서 하이브리드 타입 실리콘

레이저를 선보이며, 같은 해에 Luxtera에서는 CMOS 제조기술을 이용한 40Gbps 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiflex ; WDM)모듈을 선보이며, 실리콘 포토닉스 분야의 연구 및 개발은 매년 급속히 발전을 이루고 있다 [8]. IBM과 Intel과 같은 집적회로 제조업체들이 이 분야의 연구를 선도하고 있으며, 스탠포드대학, 메사추세츠공과대학 그리고 캘리포니아공과대학과 같은 대학에서 초고성능 컴퓨터를 구현하기 위한 목적으로 실리콘 포토닉스의 연구가 적극적으로 진행되고 있다[8].

유럽에서는 Interuniversity Microelectronics Centre(IMEC)을 중심으로 컴퓨터, 통신, 센서등과 같이 실리콘 포토닉스를 광범위하게 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 200mm 실리콘 온 인슐레이터 (Silicon On insulator ; SOI)를 사용한 실리콘 포토닉스 제조지원 서비스를 진행하고 있고, 2007년 HELIOS 프로젝트를 추진하며, 실리콘 포토닉스에 대한 전 유럽의 연구 자원을 집중시키고 있다. 아시아지역에서는 NTT등 일본내 전자 및 통신 관련 기업들이 연구를 진행하고 있으며, 싱가포르의 IME에서 상업적인 수준의 제품개발을 지원하기 위하여 제조공정 지원 서비스를 진행하고 있다[8].

현재 실리콘 포토닉스는 크게 기존의 중앙처리장치(Central Processor Unit ; CPU)의 성능을 개선하기 위한 연구 분야와 전자기기들 간의 인터페이스 효율을 올려 컴퓨터 및 정보기기들의 성능을 개선하기위한 연구로 나뉘어져 있다. 2010년에 Intel에서 50 Gbps 급의 실리콘 포토닉스 링크를 구현 하여, 향후 테라급 컴퓨터시스템을 구축하기 위한 계획을 진행하고 있으며, 2015년 정도에 이를 달성할 수 있을 것으로 예상하고 있다[2, 7]. IBM은 미래의 멀티 코어 프로세서를 위한 on-chip 광 인터커넥터 기술을 개발하였으며, 향후 슈퍼컴퓨터에 적용하기 위한 연구 및 개발을 수행하고 있고, Luxtera는 2011년에 100 Gbps 급 광 변조기를 선보이며, 현재 가장 빠른 전송기술을 확보하고 있다[7]. 특히 Intel에서는 테라비트급 컴퓨터시스템 구축에 필요한 실리콘 포토닉스를 활용한 다음과 같은 제조 기술이 확보되어야 한다고 제시 하였다[2].

- 1) 실리콘 기반 광원기술 확보
- 2) 실리콘 제조기술과 융합할 수 있는 광도파로 제조기술
- 3) 실리콘 기반의 광변조기

- 4) 실리콘 기반의 광검출기
- 5) 전자회로와의 집적기술
- 6) 소자간 연결을 위한 수동 광정렬 기술

광원과 관련된 기술은 크게 실리콘 기반과 III-V 화합물 반도체 기반으로 나눌 수 있는데, 실리콘 기반의 광원의 경우 기존 CMOS공정으로 광원을 실리콘 기판위에 집적시킬 수 있어 소자의 가격이나 크기를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있으나, 실리콘이 간접띠간격 물질이라 발광효율이 매우 낮은 문제로 실질적으로 현재의 기술 수준으로는 광원을 확보하기 위한 이득 물질로 쓰기에는 문제가 많다[4]. III-V화합물 반도체를 이용한 경우 발광효율 및 광원 제조기술등이 이미 확보되어있으나, 이로 인해 실리콘과의 공정호환문제가 발생하여, 제조비용 상승, 광결합에 의한 광손실등의 문제점을 가지고 있다. 따라서, 실리콘 기반의 광원을 확보 하기 위하여 최근에는 실리콘에 특정물질을 도핑하거나, 기공성실리콘, 나노결정형 실리콘의 형성등으로 실리콘의 발광효율을 높이려는 연구가 활발히 진행되고 있다[5].

Intel은 2005년도에 실리콘을 기반으로 한 라만레이저를 개발하여, 실리콘 기반 광원의 제작 가능성을 제시하였고, 2006년에는 하이브리드형 실리콘 레이저를 개발하였다[9]. 이와 함께 2007년에 40GHz의 실리콘 기반의 광모듈레이터를 개발함으로써 테라급 컴퓨터시스템을 구성하기 위한 기반연구를 진행하고 있다[9]. 이런 결과로 앞에서도 언급 했듯이 2010년 단일칩 형태의 50Gbps급 실리콘 포토닉스 링크를 시연해보이며, 상용 가능성을 제시하였다[2, 9]. 그러나 하이브리드형 실리콘 레이저의 효율이 III-V화합물 반도체를 활용한 광원보다 효율이 낮아, 실리콘을 기반으로 하는 광원을 제작하기 위한 실리콘 집적회로 기술을 적용하기에는 공정의 복잡성이 남아 있다[5]. 이러한 문제의 해결을 위하여 실리콘 기반 광원 제조기술에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 에르븀이 첨가된 나노 결정형 실리콘을 광 이득 매질로 사용한 광원을 개발하기 위하여 연구가 이루어지고 있다[10, 11].

실리콘 기반 나노광원소자의 연구에 있어서, 희토류 원소를 감응물질로 이용한 나노결정형 실리콘의 연구가 최근 많이 연구되고 있는데, 특히 에르븀이 첨가된

나노결정형 실리콘 실리카에 대한 연구가 차세대 레이저 및 증폭기로의 활용을 위하여 이루어지고 있다[10-13]. 희토류 원소가 첨가된 증폭기를 제작함에 있어서 가장 큰 문제중 하나는 희토류 원소의 농도에 따른 소광 (quenching)현상의 발생이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 방출 단면적이 매우 큰 것으로 알려져 있는 에르븀 첨가형 나노결정형 실리콘 실리카에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다[14-16].

에르븀이 첨가된 광증폭기(Erbium doped Fiber Amplifier ; EDFA)는 기본적으로 에르븀 3가(Er^{3+})이온의 4f 에너지 준위의 내부 에너지 천이에 의한 증폭 특성으로 인해 안정적이며, 낮은 잡음의 발광특성을 보인다. 그러나 에르븀 3가 이온의 좁은 영역의 에너지 천이와 에너지흡수 밴드의 낮은 흡수 때문에 증폭매질이 길어져야 하고, 또한 레이저와 같은 강한 파워와 잘 정렬된 광이 필요하다 [16]. 이러한 이유로 인해 광 인터커넥션, 특히 마이크로 프로세서간 광연결이나, 광버스 인터페이스등에 적용하기에는 적합하지 않다[5]. 따라서 이를 해결하기 위하여 에르븀이 첨가된 광도파로 증폭기(Erbium doped waveguide amplifier ; EDWA)에 대한 연구가 이루어지고 있다[17]. 그러나, EDWA도 EDFA와 같이 에르븀을 증폭매질로 사용하고 있어 낮은 에너지 흡수에 따른 문제가 발생한다[17]. 따라서, 에르븀 이온에 이터븀(Yb) 이온을 동시 첨가하는 방법, 호스트 물질인 실리콘의 형태를 바꾸려는 방법등을 이용하여 증폭광과 에르븀이온간의 상호작용효율을 높이고, 에르븀 3가이온에 의한 흡수 단면적을 넓히려는 연구가 이루어져 왔다[5, 17]. 이와 같은 연구중 나노결정형 실리콘에 의하여 에르븀 3가이온의 흡수단면적을 넓히려는 시도인데, 실리콘은 기본적으로 간접띠간격을 가지고 있어서 광매질로는 적당하지 않으나 에르븀과 같은 감광성 이온을 주입하여, 실리콘이 가지고 있는 광매질로써의 단점인 간접띠간격을 극복하고자 하는 연구가 진행되고 있다[6]. H. ennen 등에 의하여 극저온에서의 비정질 실리콘내의 에르븀 3가이온에 의한 발광을 보여, 실리콘을 광매질로 사용할 수 있는 가능성을 제시하였다[18].

J. Michel과 B.Zhen 등에 의해 에르븀이 첨가된 실리콘을 이용하여, 극저온이 아닌 상온에서의 에르븀 3가 이온에 의한 발광특성을 확인하였다[19-21]. 그러나 이러한 성과에도 불구하고 에르븀이 첨가된 실리콘의 낮은 광효율[22]과 에

르븀 3가 이온의 발광의 온도에 의한 소광현상[23]등이 문제가 대두되었다.

따라서, 이러한 문제를 해결하기 위하여 에르븀을 첨가할 때 산소를 같이 첨가하는 방법과 양자제한효과를 이용하기 위해 실리콘 산화막내에 나노결정형 실리콘을 형성하는 연구가 이루어지고 있다[10, 24]. 실리콘 산화막을 베이스로 하고 여기에 나노결정형 실리콘이 포함되는 형태인 SRSO는 나노결정형 실리콘에 의하여 직접적으로 에르븀 3가 이온으로의 에너지 전이가 나타나므로 상온에서도 효과적인 발광특성을 보이게 되어 다양한 광학적 응용이 가능하다[11-13, 25-27].

본 논문은 에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘 박막의 형성 기구를 확인하고 나노결정형 실리콘과 에르븀 이온간의 에너지 전달에 있어서 효과적인 발광을 위한 조건을 제시하고, 에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘 박막의 발광특성을 적용하여 광도파로형 광증폭기를 제작하였다. 제작된 광도파로형 광증폭기의 증폭특성을 확인하기 위하여, 신호광과 동일하게 펄핑광을 주입하는 동일면 펄핑광 증폭과 상부펄핑광 증폭 기구를 적용하였다. 그리고 그 결과로부터 에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘에서 발광 및 증폭이 제한되는 현상이 있음을 제시하고 이와 같은 현상의 발생 원인을 박막형성 기구와 내부 에너지 전달 기구를 적용하여 규명 하기 위하여 다음과 같이 진행된다. 1장에서 이 논문의 개요 및 연구 현황 및 목적에 대하여 언급하였으며, 2장에서는 연구와 관련된 박막형성기구와 비례방정식으로 알려져 있는 실리콘 나노결정에서 에르븀으로의 내부 에너지 전이에 대한 내용을 기술 하였다. 3장에서는 박막의 증착공정 및 광도파로 식각공정에 대한 내용 및 특성평가방법 그리고 연구에 사용된 장비에 대하여 설명하고 있으며, 4장에서는 실험의 결과에 대하여 기술 하였는데, 박막의 물리적 특성 및 결함의 분석과 제작된 시료의 PL 및 러더포트 후방산란 분광법(Rutherford Backscattering Spectrometer ; RBS) 결과를 통해 박막내 실리콘, 산소, 에르븀의 조성비 제시하고, 제시된 조건을 적용하여 광도파로를 제작하고 광증폭 특성에 대하여 수치해석을 포함하여 분석을 한다. 마지막으로 5장에서는 4장에서 언급한 분석을 토대로 이 연구의 결론을 언급하였다.

II. 이 론

1. 나노결정형 실리콘의 양자 제한 효과

나노결정형 실리콘에서 나노결정의 크기에 따른 양자제한효과가 발생하지만, 나노결정형 실리콘은 간접띠간격 전이를 한다. 그림 2에서 보이는것과 같이 나노결정의 크기가 줄어들면 강한 양자제한효과가 나타나고, 광학적 띠간격은 넓어진다. 이와같이 나노결정형 실리콘의 크기에 의존하는 띠간격은 나노결정의 크기가 작아지면 1.6 eV의 발광밴드에서 블루 쉬프트하여 광발광이 확인된다.

만약 길이가 각각 L_x , L_y , L_z 인 직육면체형태의 nc-Si를 가정하면 전자-홀 쌍은 3차원적으로 전개된다. 이때 나노결정형 실리콘과 실리콘 산화막의 경계면에서 포텐셜 장벽이 무한하다고 가정하면, 전자 1개의 전자 에너지는

$$E_{\alpha, \beta, \gamma}^e = E^c + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e^*} \left(\frac{\alpha^2}{L_x^2} + \frac{\beta^2}{L_y^2} + \frac{\gamma^2}{L_z^2} \right) \quad (1)$$

와 같이 주어지며, 홀의 에너지는

$$E_{\alpha, \beta, \gamma}^h = E^v - \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_h^*} \left(\frac{\alpha^2}{L_x^2} + \frac{\beta^2}{L_y^2} + \frac{\gamma^2}{L_z^2} \right) \quad (2)$$

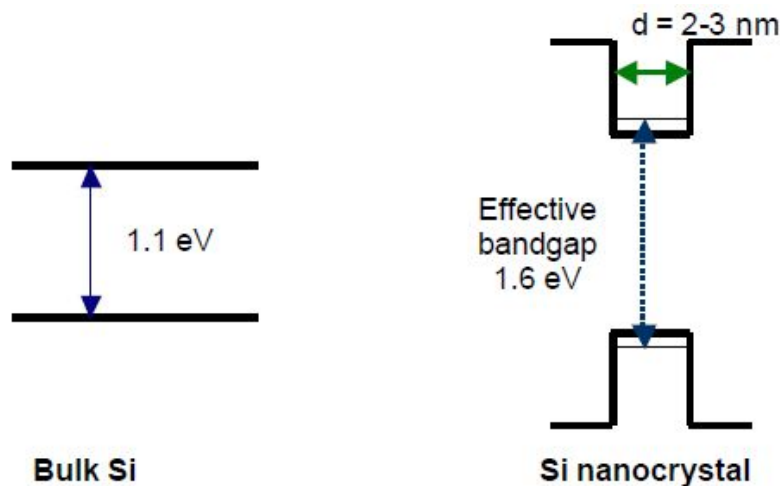


Fig. 8. Energy band gaps of a Si nanocrystal and bulk Si.

와 같이 주어진다. 여기에서 α, β, γ 는 0이 아닌 양의 정수, m_e^* , m_h^* 는 각각 유효전자질량과 유효 홀 질량, E^c , E^v 는 각각 전도대의 에너지와 전자대의 에너지이고 \hbar 는 플랑크 상수 이다.

여기서 유효질량을 적용하여 나노결정형 실리콘의 에너지 간격을 구하면

$$E_{gap} = E_{gap}^{(0)} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2} \left(\frac{1}{L_x} + \frac{1}{L_y} + \frac{1}{L_z} \right) \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (9)$$

와 같이 근사할 수 있는데 $E_{gap}^{(0)}$ 실리콘의 에너지 간격으로 1.12 eV 정도이며, L_x, L_y, L_z 은 나노입자의 x, y, z 방향의 크기 이며, m_e^* , m_h^* 는 각각 유효전자 질량과 유효 홀 질량이다[28].

2. nc-Si:Er 발광 기구

에르븀 첨가 광섬유에서는 에르븀 이온이 펌프광을 직접 흡수하여 여기 되지만 에르븀 첨가 SRSO 박막에서는 실리콘 나노클러스터가 감광제로 작용하여 먼저 펌프광의 광자를 흡수하고, 그 에너지를 Auger 재결합과 유사한 기작으로 에르븀 이온에 전달한다[32, 33]. 이렇게 여기된 에르븀 이온은 신호광을 받아 유

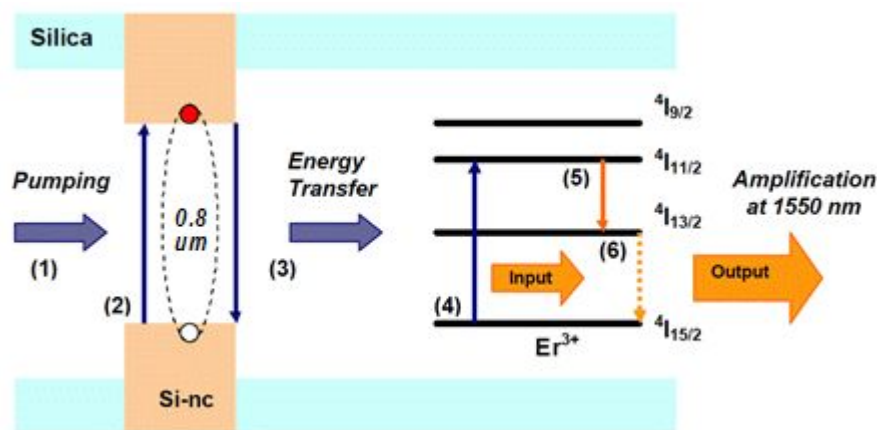


Fig. 9. Model describing the light amplification process in ErSRSO and showing the schematic band structure of an erbium-doped silicon nanocrystal in a silica host matrix.

도방출을 통해 1.54 μm 파장 대역의 빛을 방출함으로써 이득을 얻게 되는데, 그 과정을 그림 3에 나타내었다. 발광 과정은 펌핑광이 입사(1)되면 nc-Si의 크기에 의해 결정된 만큼의 제한된 엑시톤의 발생과 재결합과정이 수반되고(2) 이때 발생한 에너지가 근처의 에르븀 이온에 공명성 비발광 전이를 한다(3). 이렇게 전이된 에너지는 에르븀의 바닥준위인 $^4I_{15/2}$ 에서 $^4I_{11/2}$ 에너지 준위로 에너지 전이가 일어나고(4) $^4I_{11/2}$ 에너지준위에서 빠르게 준안정 준위인 $^4I_{13/2}$ 로 에너지 완화 발생하다(5). 이후 입사광에 의해 발광하여 1550nm의 광이 발광된다.

실리콘 나노클러스터의 효율적인 감광 작용과 높은 흡수단면적[51, 54, 55]에 의하여 에르븀 이온의 흡수단면적이 실리카 광섬유 안에 있을 때와 비교하여 약 $10^3 \sim 10^4$ 배 커지는 효과가 생기므로 짧은 반응 길이에서도 높은 이득을 얻을 수 있다[11, 34].

3. 실리콘 나노클러스터 / 에르븀 사이의 에너지 전달 메카니즘

이에 대해 나노결정형 실리콘과 에르븀간 증폭과정중 증폭기의 구조에 따른 증폭특성이나 에르븀의 농도에 따른 소광특성 그리고 여기상태흡수(excite state absorption ; ESA)등은 고려하지 않은 수정된 나노결정형 실리콘과 에르븀간의 상호작용에 대해 그림 4에 나타내었다.

1. 980nm 보다 큰 에너지 상태에 대한 PL은 무시할 수 있다[36, 52].
2. 나노결정형 실리콘에서의 자극발광은 980nm 흡수 밴드에서만 발생한다 [37, 38].
3. 나노결정형 실리콘에서 에르븀 3가 이온간의 준 공명성 에너지 전달은 $^4I_{11/2}$ 에너지 준위에서만 발생한다[39].

와 같은 제한 조건을 적용한 실리콘 나노크리스탈의 에너지 흡수와 방출에 대한 식은

$$\frac{dn_b}{dt} = \frac{\sigma_{ab} I_p^{eff}}{h\nu_p} n_b - \frac{n_b}{\tau_{ba}} - C_p n_b N_2 \quad (13)$$

$$\frac{dn_a}{dt} = -\frac{\sigma_{ab}I_b^{eff}}{h\nu_b} n_a + \frac{n_b}{\tau_{ba}} + C_p n_b N_2 \quad (14)$$

$$n_\tau = n_a + n_b \quad (15)$$

와 같이 표현되어지며, 에르븀이온의 에너지 흡수와 방출에 대한 식은

$$\frac{dN_3}{dt} = C_p n_b N_1 - \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_3}{\tau_{31}} \quad (16)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} - (\sigma_{21}N_2 - \sigma_{12}N_1) \frac{I_g^{eff}}{h\nu_g} - C_p n_b N_2 \quad (17)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -C_p n_b N_1 + \frac{N_2}{\tau_{21}} + \frac{N_3}{\tau_{31}} + (\sigma_{21}N_2 - \sigma_{12}N_1) \frac{I_g^{eff}}{h\nu_g} + C_p n_b N_2 \quad (18)$$

$$N_\tau = N_1 + N_2 + N_3 \quad (19)$$

와 같이 표현되어진다. 위의 식에서 나노결정형 실리콘과 에르븀 이온간에 에너지 전달상태를 알수 있는데 식(8)과 식(11)을 비율방정식이라고 하며 그 둘 사이의 에너지 전달은 Cp에 의해서 이루어진다. 이 식에서 주입된 펌프광이 나노결정형 실리콘에 흡수된 후 에르븀에 전달되고, 이로부터 신호광을 증폭하는 메커니즘을 수학적으로 설명할 수 있다. 식(6-12)에서 n_a , n_b , N_3 , N_2 , N_1 , σ_{ab} , σ_{12} , σ_{21} , τ_{ba} , τ_{32} , τ_{31} , τ_{21} , C_p 는 각각 나노결정형 실리콘의 여기상태, 바닥상태, 에

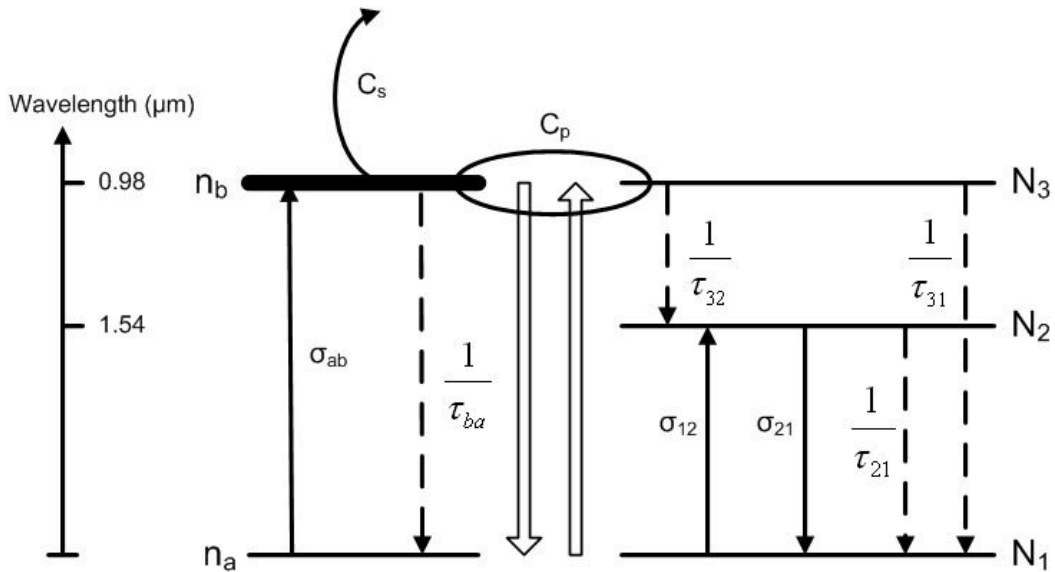


Fig. 10. Schematic of energy transfer of nc-Si to Er³⁺.

르븀의 2차여기상태 (980nm), 준안정화상태(1530nm), 바닥상태, 나노결정형 실리콘의 흡수단면적, 에르븀의 흡수단면적, 방출단면적, 나노결정형 실리콘의 수명, 에르븀의 3/2 레벨 수명, 3/1 레벨 수명, 2/1 레벨 수명 그리고 나노결정형 실리콘과 에르븀의 에너지 전달 비율 커플링 상수이다.

4. 도파로에 광의 전파 원리

일반적인 EDFA에서의 진행 방정식[40]은 신호광과 펌핑광의 방향이 같은 경우 적용된다. 따라서 일반적인 진행방정식을 펌핑광이 신호광에 수직하게 입사할 경우에도 적용이 가능하도록 진행방정식을 정리하면

$$\frac{dP_p^\pm}{dy} = -\sigma_{ab} n_a I_p^{eff\pm} - \alpha_p P_p^\pm \mp \gamma P_p^\mp \quad (20)$$

$$\frac{dP_s^\pm}{dz} = \pm(\sigma_{21} N_2 - \sigma_{12} N_1) \Gamma_s P_s^\pm \pm 2\sigma_{21} N_2 \Gamma_s h\nu_s \Delta\nu_{s\pm} \alpha_s P_s^\pm \mp \gamma_s P_s^\mp \quad (21)$$

와 같이 주어진다.

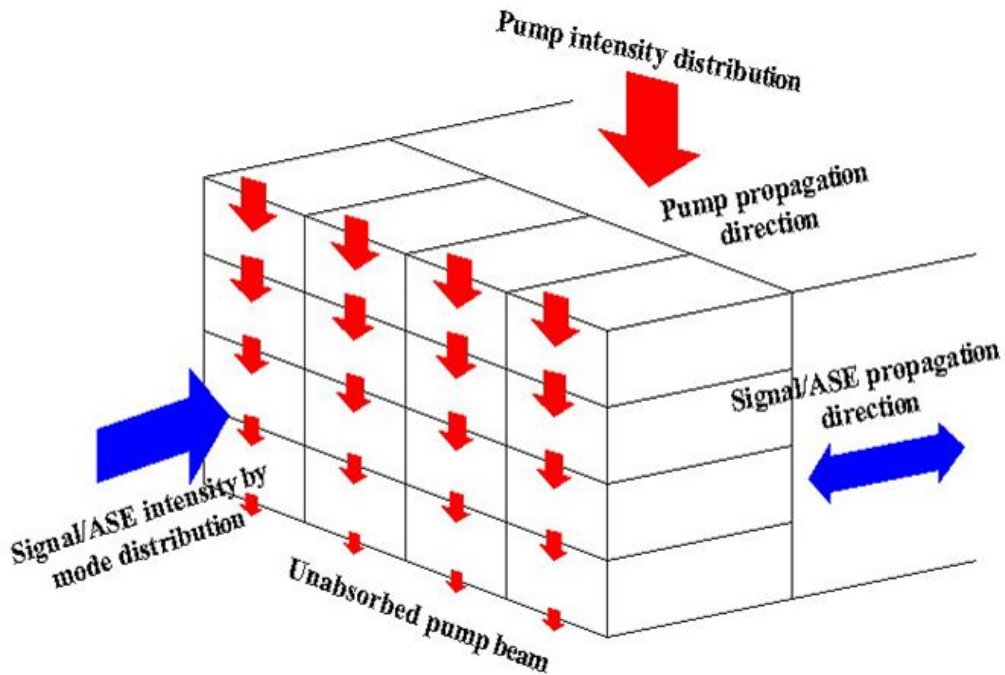


Fig. 11. 2-dimensional propagation model for pump and signal waves.

Table 1. Parameters used in the analysis

Er doping concentration : $N_r(\text{cm}^{-3})$	3.0×10^{19}	
nc-Si Concentration : $n_r(\text{cm}^{-3})$	3.0×10^{19}	
nc-Si excitation cross section : $\sigma_{ab}(\text{cm}^2)$	5.0×10^{-17}	
Signal emission cross section : $\sigma_{21}(\text{cm}^2)$	6.0×10^{20}	
Signal absorption cross section : $\sigma_{12}(\text{cm}^2)$	6.0×10^{20}	
nc-Si/Er coupling : $C_p(\text{cm}^3 \text{s}^{-1})$	7.0×10^{-16}	
Free electron absorption : $C_s(\text{cm}^3 \text{s}^{-1})$	3.0×10^{-19}	
(b->a) lifetime : $\tau_{ab}(\text{s})$	2.5×10^{-5}	
(3->2) lifetime : $\tau_{32}(\text{s})$	2.4×10^{-6}	
(3->1) lifetime : $\tau_{31}(\text{s})$	7.1×10^{-4}	
(2->1) lifetime : $\tau_{21}(\text{s})$	8.5×10^{-3}	
WG background loss in signal band(dB/m)	20	

여기에서 P_p^* 는 $\pm y$ 축 방향의 진행되는 펌핑광의 세기, α_p 는 펌핑광이 도파로 내에서 파장에 따른 배경 손실, γ_p 는 펌핑광의 파장에 따른 Rayleigh 후방 산란 계수이며, P_s^* 는 $\pm z$ 축으로의 신호광의 세기, α_s 는 신호광의 도파로내에서 파장에 따른 배경 손실, γ_s 는 신호광의 파장에 대한 Rayleigh 후방산란계수, $\Gamma_{\text{nc-Si:Er}}$ 와 신호광의 도파로내의 모드에 대한 결합상수 이다[76].

그림 5는 식(13)과 식(14)에서 기술한 진행방정식의 적용된 상부 펌핑 광도 파모델에 대한 개념도이다. 신호광의 진행은 일반적인 EDFA의 진행방정식과 동일하나 펌핑광의 진행 방향은 신호광의 진행방향과 수직임을 보이고 있다.

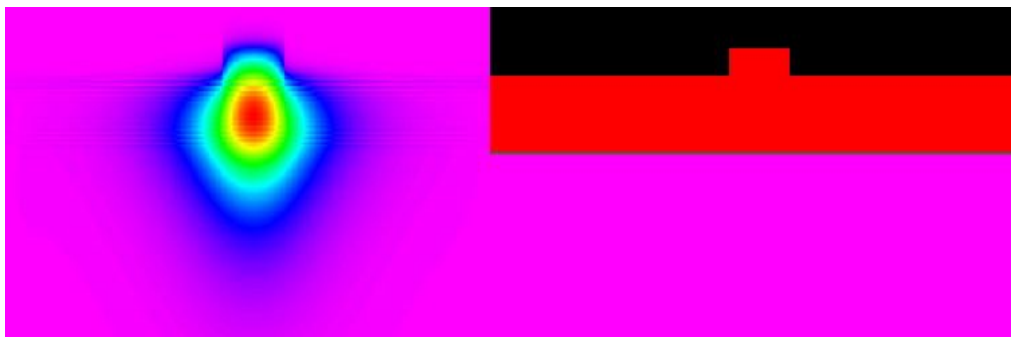


Fig. 12. Mode of propagation input signal on the rib type optical waveguide.

그림 6은 rib 광도파로에 대한 신호광의 모드분포를 보여주고 있다. 그림 6의 오른쪽은 rib형태의 광도파로를 나타낸 것이고 왼쪽은 광도파로에서의 모드 분포를 보여주고 있는 것이다. 이 결과는 그림 5의 모델과 식(13)과 식(14)를 적용하여 계산된 것이며, 펌핑광이 수직으로 입사하게 하여도 광도파가 이루어지고 있음을 보이는 결과이다. 실리콘 나노크리스탈과 에르븀의 흡수/방출 단면적 값이나 lifetime과 같은 파라미터 값은 표 1에 정리하였다 [36,41-44].

5. McCumber 관계식

McCumber 관계식은 특정매질이 주파수에 따른 흡수단면적과 방출 단면적과의 관계를 정의 한 식인데

$$\frac{\sigma_e(\omega)}{\sigma_a(\omega)} \exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)_T \exp\left(\frac{\hbar\omega_z}{k_B T}\right) \quad (29)$$

와 같다. 여기서 $\sigma_e(\omega)$ 와 $\sigma_a(\omega)$ 는 각각 주파수 ω 에서 유효 방출 단면적과 유효 흡수 단면적, $(N_1/N_2)_T$ 는 열적 안정상태의 대한 밀도의 비이며, ω_z 는

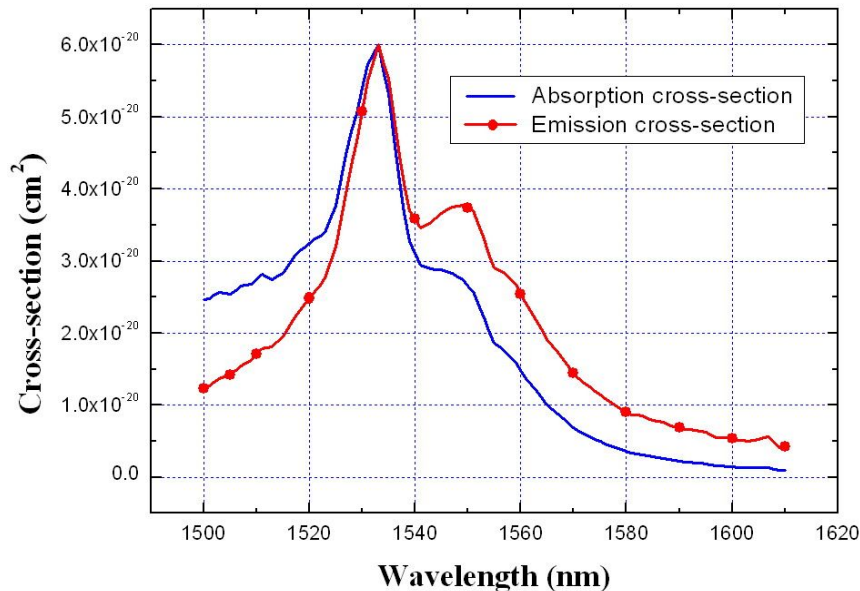


Fig. 13. absorption and emission cross section of erbium ion.

영준위(zero line)주파수, h 는 플랑크 상수 그리고 k_B 는 볼츠만 상수 이다.

이 McCumber 관계식은 특히, 준 세 준위(quasi-three-level) 이득 매질에서의 분광특성에 대해 해석할 때 유용한데, 예를 들어 희토류 원소가 첨가된 이득 매질의 경우에 적용할 수 있다.

또한 일반적인 증폭특성은 여기된 준위와 온도에 의해 결정되며, $\sigma_e(\omega)$ 와 $\sigma_a(\omega)$ 의 관계로 나타내어지는데

$$G(\omega) = N_2\sigma_e(\omega) - N_1\sigma_a(\omega) \quad (39)$$

와 같으며, 이식으로부터 이득을 구할 수 있다.

식 (16)은 이득매질내 방출 단면적과 흡수 단면적은 독립적인 요소가 아님을 나타내어주는 것이다[45].

그림 7는 실험에 사용된 에르븀의 흡수 및 방출 단면적을 보여주는데, 1500nm ~ 1610nm에 이르는 넓은 대역에 대해 흡수 방출 단면적을 이용하여 얻을 수 있다. 그림 에서 보여진 방출 스펙트럼의 경우 PL실험을 통해 얻은 파장별 측정치로부터 추정하였으며, 이러한 방출 스펙트럼을 바탕으로 McCumber 관계를 이용해서 흡수 스펙트럼을 얻었다.

III. 실험

1. 에르븀 첨가형 나노결정형 실리콘 박막증착

그림 8은 에르븀 첨가형 나노결정형 실리콘 박막을 증착하고 이를 이용해 광도파로를 제작, 특성을 확인하기 위한 전체 공정 순서도 이다. 순서도에 따라 Condition 항목에서는 에르븀이 첨가된 SRSO를 증착하기 위한 조건을 설정하고 Core deposition 항목에서는 에르븀이 첨가된 SRSO를 증착했다. 이렇게 증착된 샘플의 특성을 조사하기 위하여 PL을 이용하여 PL의 값이 기준값 보다 크면 RBS를 이용하여 그 조성을 확인하였다.

실리콘과 산소 그리고 에르븀의 조성이 증폭에 적합한 것을 선택하고 이를 광도파로로 제작했다. 이렇게 제작된 도파로는 이득실험을 진행하였다. 에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘 박막을 형성하기 위하여 사용한 기판은 p-type Si(100)에 10um로 산화막 처리 되어있는 SOI기판을 사용하였다. 기판의 세척은 아세톤과 이소프로필 알콜을 이용하여 순차세척한 후 DI(diluted ion) 워터를 이

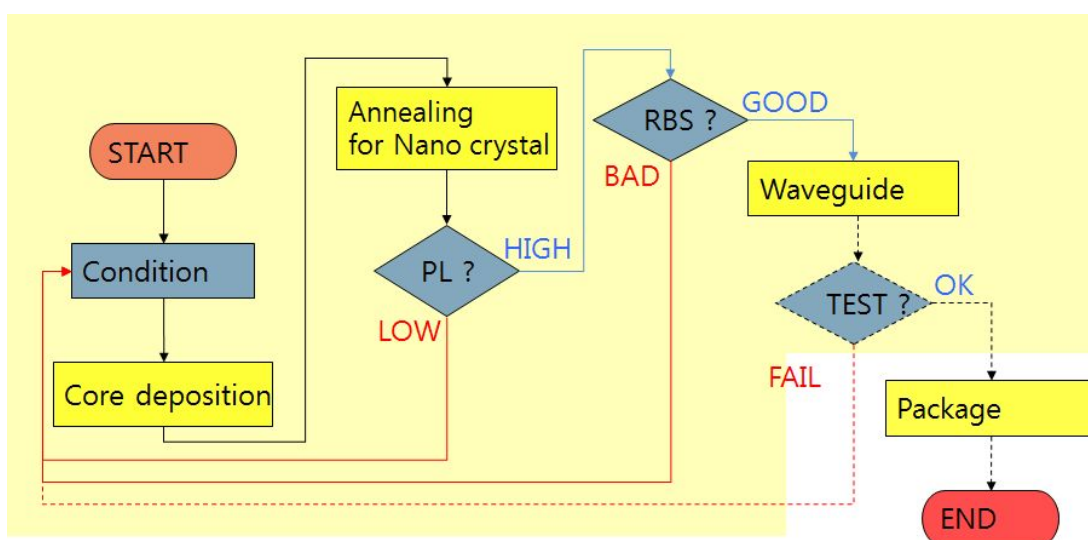


Fig. 14. Flow chart of Er doped nc - Si processor.

용하여 행구어 준비하였다. 에르븀 소스는 도핑 소스가 분산셀인 경우에는 헥산 오일에 보관되어있는 에르븀 알갱이를 아세톤과 이소프로필 알콜을 이용하여 세척한후 PBN(Pyrolytic Boron Nitride)도가니에 충전하여 준비하였으며, 도핑소스가 DC 스퍼터인 경우에는 1인치 x 1/4인치의 에르븀 디스크를 아세톤과 이소프로필 알콜을 이용하여 세척하여 sputter 건에 장착하여 준비하였다. 도핑용 에르븀 소스는 순도가 99.999%인 것을 사용하였다. 메인증착챔버는 터보분자펌프를 이용하여 진공도가 5×10^{-7} Torr 가 되도록 하였다. 장비와 기판이 준비되면 표 2의 공정조건을 사용하여 증착공정을 진행하였다.

플라즈마 점화용 가스는 Ar이며, ECR 발생용 챔버 내부에 가스 헤드를 두어

Table 2. Processor conditions

Description	condition(Sputter)	condition(Evaporator)
GAS flow(sccm)	Ar =5 SiH ₄ =4.2, 3 O ₂ = 4.3~5.3	Ar =5, 7 SiH ₄ = 2, 2.5, 3 O ₂ = 2, 3
Base Pressure(Torr)	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-7}$
Working Pressure(Torr)	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-5} \sim 10^{-3}$
ECR power(W)	600~1200	600~1200
substrate temperature(°C)	450	450
Sputter Voltage(V)	70~1000	-
Effusion Cell Temperature(°C)	-	1300, 1100, 900
Deposition Time(min)	720	1200

별도로 주입하였다. Ar 가스의 양은 5~7sccm으로 하였으며, MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 제어하였다.

SRSO의 증착에는 SiH₄와 O₂ 가스를 사용하였으며, SiH₄/O₂의 가스비를 ~1로 하였다. 증착시 공정진공도는 ~0.5 mTorr에서 진행하였으며, 증착시 기판온도는 450°C로 하였다. SRSO 증착시 에르븀을 동시에 첨가하게 되는데, 에르븀 첨가 방법은 effusion cell을 이용한 evaporation과 DC 전압을 이용한 sputtering 두가지 방법을 선택적으로 사용하였다. Evaporation 조건은 900, 1100, 1300°C로 하였으며, Sputter 조건은 70~1000V로 하였다.

에르븀이 도핑된 실리콘 나노결정형 실리콘박막을 증착하기 위하여 ECR (electron - cyclotron resonant) - PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)를 사용하였다. 그림 9는 ECR-PECVD 시스템의 전체 개략도이다. 그림에서 보면, 반응챔버가 가운데 있고 그 옆으로 로드챔버가 있다. 로드챔버에서 반응챔버로는 샘플이송장치를 이용하여 이송하도록 하였다. 그리고 ECR plasma 발생기, 진공배기 시스템과 반응후 남은 폐가스를 처리하기 위한 유틸리티로 구성되었으며, ECR plasma를 이용하여 반응기체들을 활성화시켜 실리콘 표면에 SRSO(silicon-riched silicon oxide)를 형성하는 과정에 에르븀을 소량 첨가하기 위하여 Effusion-cell 과 sputter를 사용할 수 있도록 하였다.

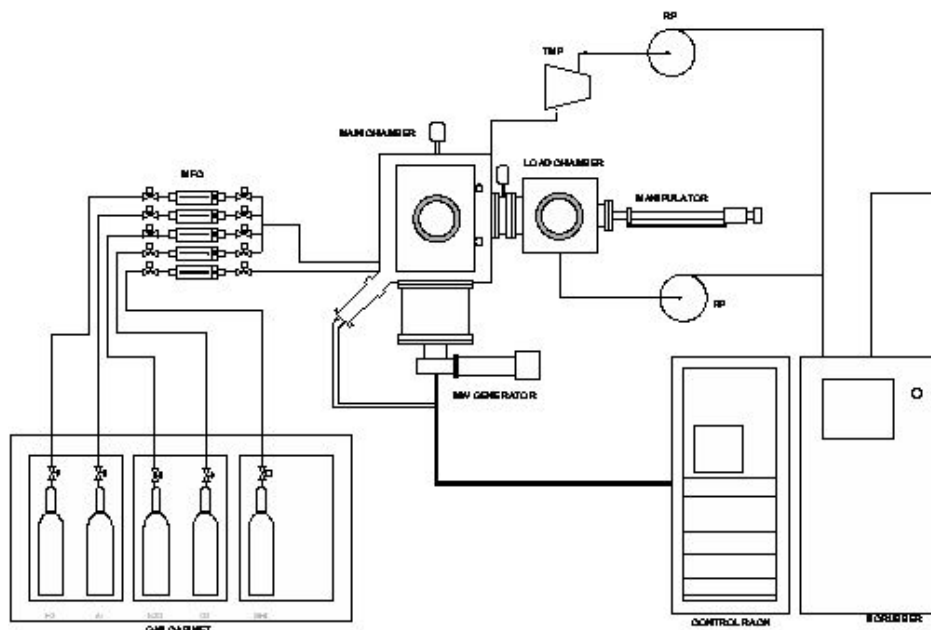


Fig. 15. Schematic of ECR-PECVD system.

그림 10는 ECR-PECVD의 반응챔버를 자세히 묘사한 개략도이다. 위쪽으로 회전이 가능한 샘플 홀더 및 기관가열을 위한 히터를 설치하였으며, 이때 샘플홀더는 40rpm까지 회전할 수 있게 하였고, 히터는 800℃까지 가열이 가능한 탄탈 선을 이용한 저항성 히터를 사용하였다. 왼쪽으로 effusion cell이나 DC sputter를 선택적으로 설치 할 수 있도록 하였는데, 설치된 effusion cell은 고온 cell로 1800℃까지 사용할 수 있으며, 도가니 크기는 5cc이며 도가니는 PBN(Pyrolytic Boron Nitride)을 사용하였다. sputter는 샘플홀더에 근접하게 설치 하였으며, DC 전압은 0~1000V 까지 가변할 수 있도록 하였다. ECR plasma를 위하여 Ar을 주입할 수 있는 가스샤워를 따로 설치하였으며, ECR 챔버의 위쪽으로 반응가스 공급용 가스헤드샤워를 2층으로 설치 하여 반응가스가 가스 공급라인 상에서 반응 하는 것을 막을 수 있도록 하였다. 반응챔버 뒤편으로는 진공 배기 시스템이 장치 되어있으며 배기된 가스는 중화장치(scrubber)를 통해 완전 중화된 뒤 배기 하도록 장치 하였다.

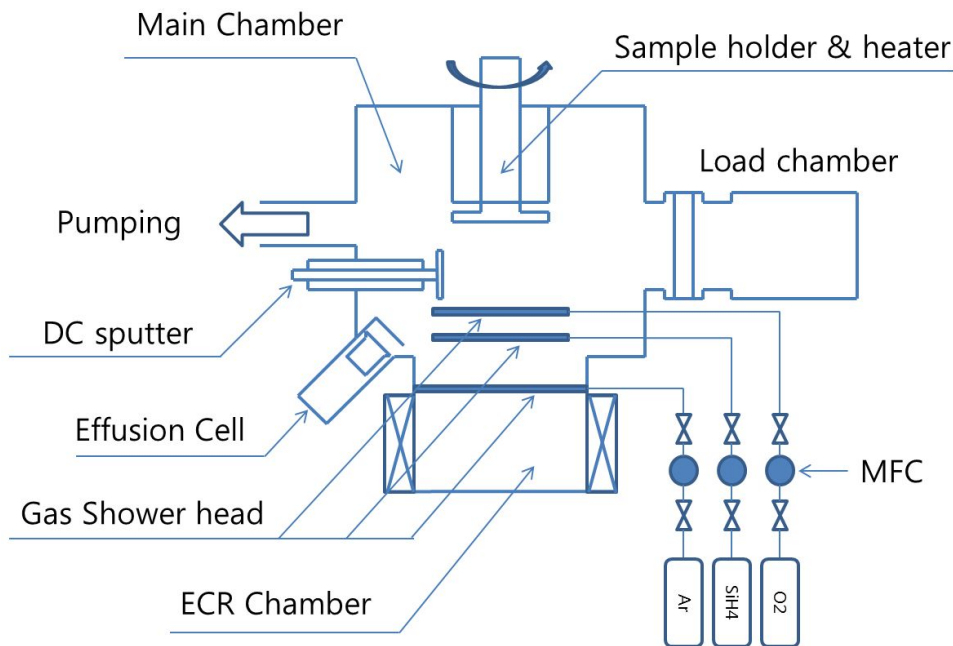


Fig. 16. Schematic of ECR-PECVD chamber.

2. 급속열처리공정

급속열처리(Rapid thermal annealing ; RTA) 공정은 SRSO:Er박막의 형성후 SRSO박막에서 nc-Si를 형성하는데 있어 가장 중요한 공정이며, 이를 위한 RTA의 개략도를 그림 11에 보였다. Ar, N₂, O₂를 분위기 가스로 사용할 수 있게 하였으며, 가스의 유량은 mass flow controller(MFC)를 이용하여 조절할 수 있도록 장치하였다. 가열은 급속열처리기의 상부에 장치한 할로젠 램프로 하였으며, 총용량은 10 kW로 하였다. 상압 급속열처리 공정을 하기 위하여 배기라인 중간에 차압밸브를 넣어 대기압 이상이 되면 자동으로 밸브가 열리도록 하였다. 샘플 홀더는 퀴즈를 이용하였으며, 4인치 까지 공정진행 할 수 있도록 제작하였다.

나노결정형 실리콘의 형성을 위하여 그림 12와 같은 온도 변화 곡선을 따라 RTA공정을 진행하였는데, 그림 12는 설정온도를 900℃로 한 예이다. RTA공정은 설정온도를 900~1100℃로 하여 진행하였으며 급속가열시간과 급속냉각시간은 설정온도에 상관없이 각각 5분으로 하였다. 급속열처리 공정을 진행 하기전 가열챔버는 진공을 하여 공기에 의한 샘플의 오염을 막도록 하였으며, 이때 진공압력은 2×10^{-3} Torr이하로 하였다. 진공을 확인한 후 대기압하에서 급속열처리 공정을 진행하기 위해 분위기 가스인 Ar을 20 sccm 흘려 주면서 진공펌프의 밸

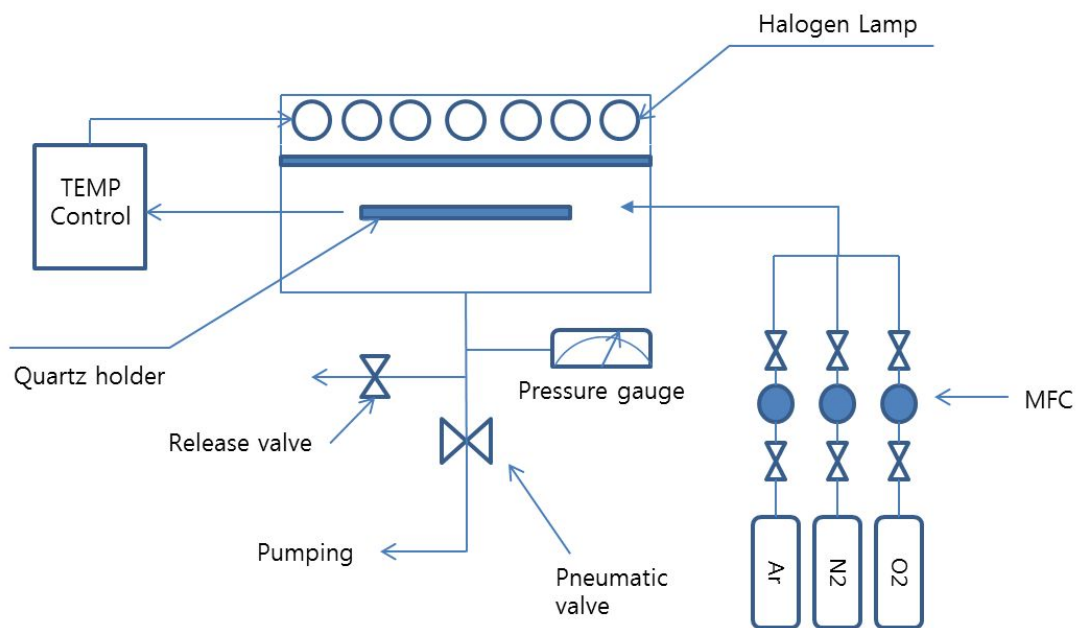


Fig. 17. Schematic of Rapid Thermal Annealer.

브를 닫아 Ar가스가 가열챔버내 차도록 하였다. 이때 압력게이지를 이용하여 대기압을 확인 하였다. 대기압이 확인되면, 히터를 켜 급속가열을 진행하였다. 급속가열시간이 완료되면 Ar가스를 다량으로 가열챔버내로 흘려보내 가스에 의하여 냉각될 수 있도록 하였다.

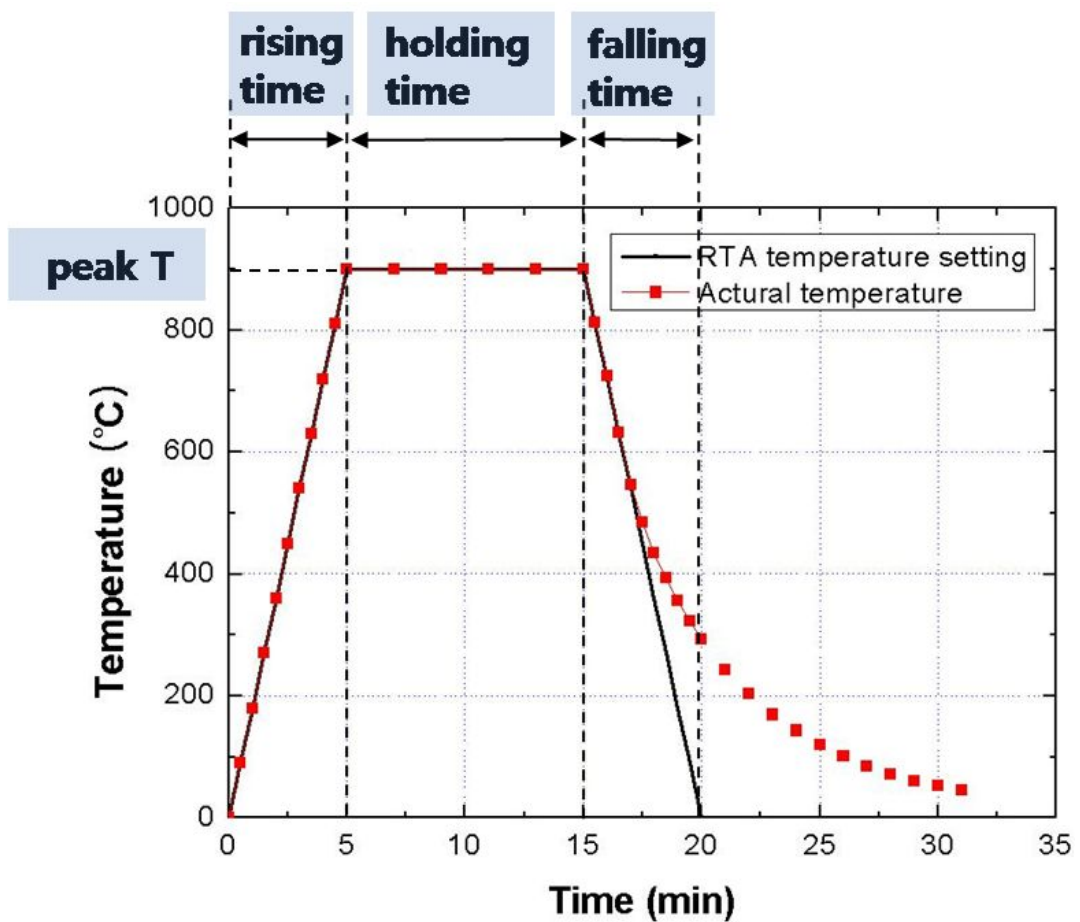


Fig. 18. RTP temperature profile.

3. Photoluminescence 및 lifetime 분석방법

본 연구에서는 photoluminescence(PL) 측정을 위하여 477 nm 및 980 nm 파장 대역의 펌프광을 이용하여 샘플을 여기시켰다. 이 두 파장은 에르븀 첨가 SRSO 박막 내부에 존재하는 한 가지 종류의 물질에만 각각 흡수된다. 477 nm 는 에르븀 이온의 흡수선이 아니기 때문에 에르븀과는 직접적인 상호작용을 하지 않고, 일단 실리콘 나노클러스터에 흡수된 뒤에 에르븀으로 에너지가 전달되어 PL이 관찰된다[48, 49]. 따라서 이 경우의 PL로부터는 실리콘 나노클러스터의 활성화 상태에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그리고 980 nm 는 실리콘 나노클러스터에는 흡수되지 않고 에르븀에만 흡수되므로, 박막내부의 에르븀 이온 활성화 상태를 알 수 있다. 이와 같이, 두 종류의 펌프광을 이용한 PL 관찰을 통하여 물질 내부에서 실리콘 나노클러스터 및 에르븀 이온이 어느 정도 활성화되어 있는지를 밝힐 수 있다.

PL 측정을 위한 실험 장치 구성은 그림 13과 같으며, 광원으로는 477 nm 대역의 펌프광 방출을 위한 아르곤 이온 레이저(Ar ion laser) 또는 473 nm DPSS 레이저(diode-pumped solid-state laser), 그리고 980 nm 펌프광 방출을

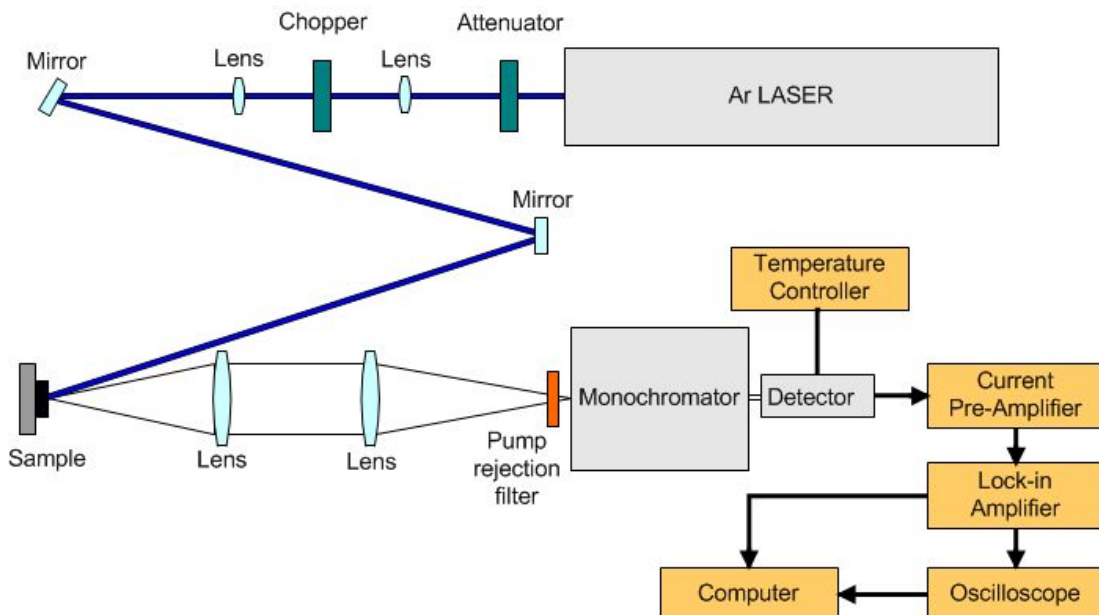


Fig. 19. Schematic of PL and Lifetime measurements.

위한 레이저 다이오드(laser diode)가 있다. 그 외의 구성요소는 optical chopper, monochromator, IR 통과 필터(infrared passfilter), InGaAs 광검출기(InGaAs photo diode), current pre-amplifier, lock-in amplifier 등이다. 이 중 current pre-amplifier는 InGaAs 광검출기에서 나온 전류 신호를 몇단의 lock-in amplifier에서 사용할 수 있도록 증폭시켜 줌과 동시에 전압 형태의 신호로 변환해준다. 특히 lock-in amplifier는 SNR(signal-to-noise ratio) 향상 효과로 인해 보다 정확한 PL 수치를 측정할 수 있도록 해주는 중요한 장비이다.

Lock-in amplifier는 기준 신호(reference signal)와 위상이 일치하는 분석 신호(analytical signal)만 증폭하는 원리로 동작하며, optical chopper가 기준신호와 분석신호를 동시에 만들어내는 역할을 한다. 또한 IR 통과 필터는 샘플 표면에서 반사되는 가시영역 파장대의 펌프광 등이 monochromator로 들어가는 것을 막아주어 IR 파장대인 1536 nm 근방의 PL만을 보다 정확히 측정할 수 있도록 도와준다. 본 연구에서 PL 스펙트럼은 2 nm 간격으로 각지점에서 3 회씩 측정

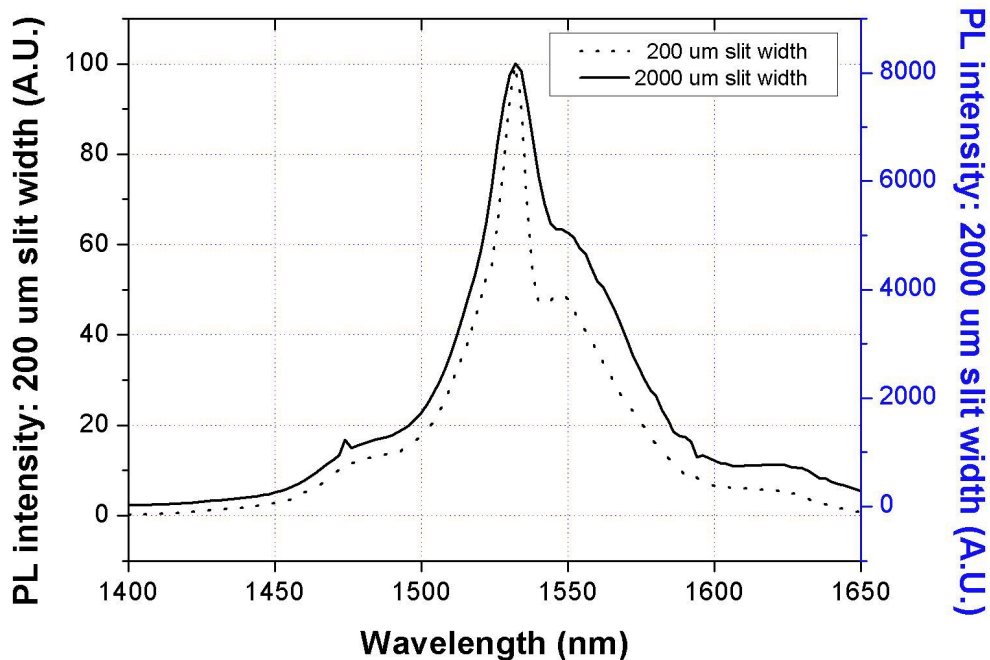


Fig 20. Comparison of PL intensity of 200um and 2000um slit width.

한 값을 평균하여 얻었으며, PL 수치는 측정된 스펙트럼 상에서 최대값을 나타내는 1536 nm 근방의 값을 박막 두께 정보로 보정하여 사용하였다. 이는 펌프 파장에 상관없이(477 nm 및 980 nm) 모두 동일하게 적용하였으며, PL 측정시 477 nm 아르곤 레이저의 파워는 약 350 mW, 980 nm 레이저 다이오드의 파워는 약 250 mW 였다.

그림 14에서 보인 PL 스펙트럼은 에르븀의 전형적인 방출스펙트럼과 비슷한 양상을 보이며, 에르븀 이온의 방출 파장인 1536 nm 근처의 PL 최대값의 상대적인 크기를 통해 실제로 이득을 얻기 위한 작용이 얼마나 잘 일어날지를 예측할 수 있다. 이는 PL에 해당하는 자발방출(spontaneous emission)이 더 우세하게 일어날수록 광증폭기의 이득에 해당하는 유도방출(stimulated emission) 또한 우세하게 일어난다. 이와 같이 증착조건에 따른 477 nm 및 980 nm PL의 상대적 크기를 통해서 나노결정형 실리콘과 에르븀의 상태를 파악할 수 있으며, PL이 커지는 조건을 찾으면 높은 이득을 얻을 수 있다. 한편, 본 연구에서 사용한 PL 장비의 monochromator의 슬릿간격은 200 μm ~ 2000 μm 사이에서 조절이

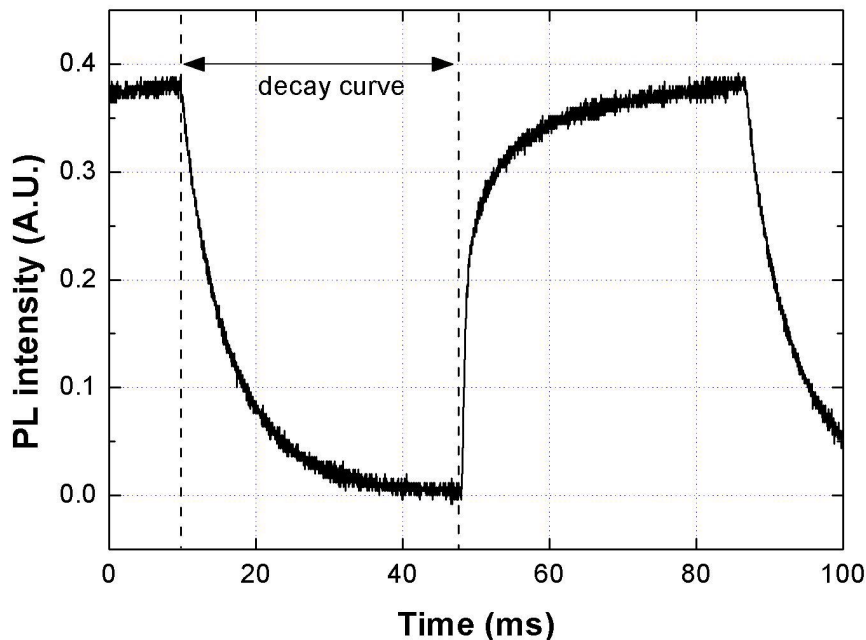


Fig. 21. Time dependence PL by using optical chopper(chopper operation frequency ; 13 Hz).

가능한데, 그림 14에 슬릿간격이 최소일 때와 최대일 때의 PL 스펙트럼을 함께 나타내었다. 슬릿간격이 작을 경우에는 보다 높은 해상도의 스펙트럼을 얻을 수 있지만 검출기에 도달하는 빛의 양이 감소하여 PL 세기가 낮은 시료의 측정이 어려워진다. 따라서 본 연구에서는 PL 스펙트럼의 관찰이 필요한 경우를 제외하고는 슬릿간격이 2000 μm 일 때 측정한 값을 이용하였다.

수명은 에르븀 이온의 준안정상태의 수명을 의미하는데, 펌프광이 광학적 초점을 통과하여 시료를 여기하도록 하여 얻을 수 있는 PL 수치의 시간에 따른 변화로부터 얻을 수 있다. 따라서 앞에서 기술한 PL 측정 장치를 그대로 이용하여 수명을 알 수 있다. 그림 15은 오실로스코프로부터 얻은 PL 수치의 시간에 따른 변화 파형이며, 이와 같은 파형의 감소 부분(decay curve)에 대해서 일차 지수 근사를 수행하여 그림 16과 같이 수명을 분석하였다. 일반적으로 lifetime이 길어질수록 증폭기의 잡음지수(noise figure)가 개선되고 이득도 커지므로, 수명이 긴 물질의 조성비를 알아야 한다.

4. RBS를 이용한 박막내 Si, Er의 조성비 분석방법

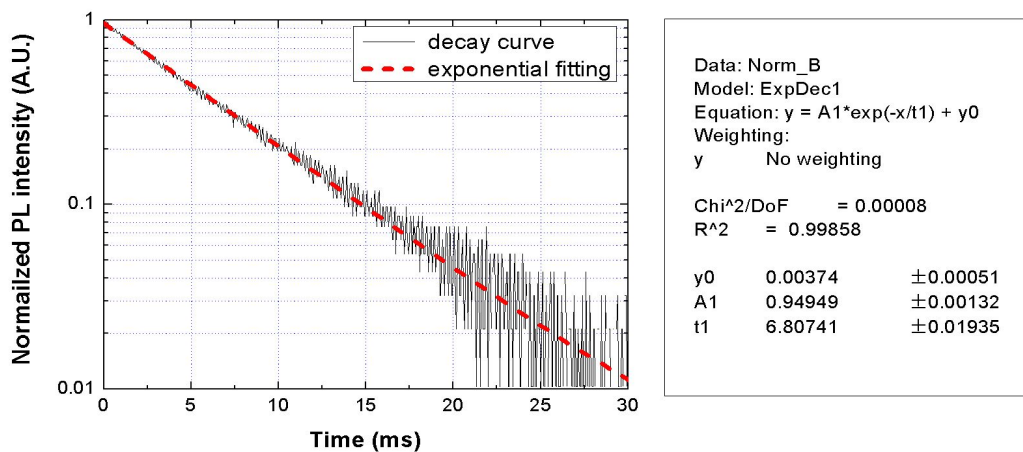


Fig. 22. Example of Lifetime analysis.

본 연구에서는 박막의 물질 조성비 측정 방법으로 광범위하게 사용되는 Rutherford backscattering spectrometry(RBS)을 사용하여 물질 조성비에 대하여 조사하였다. RBS는 수 MeV의 에너지를 가진 알파 입자를 시료에 입사시킨 후 시료 내부원자와의 쿨롱 상호작용에 의해 탄성산란을 일으킨 알파 입자의 에너지를 측정하여 시료의 깊이 방향에 대한 원소의 조성 및 두께 정보를 얻는 방법이다. 동일하게 물질 조성 분석에 사용되는 secondary ion mass spectrometry(SIMS) 등의 다른 방법과 달리, 시료의 손상이 없는 비파괴 방식이며, 비교를 위한 기준 시료가 필요 없는 정량 분석 방법이다.

RBS 측정은 한국과학기술연구원(KIST) 특성분석센터에 의뢰하여 약 2MeV의 알파입자 빔을 이용하여 수행하였으며, 측정된 데이터의 분석은 RBS 데이터 전용 분석 프로그램(RUMP)을 이용하여 직접 수행하였다. 프로그램은 박막의 두께 및 원소의 함량에 대한 추정치를 입력받아 물리모델에 따른 시뮬레이션을 통해 해당 조건에서 측정된 데이터를 계산하여 보여준다. 계산된 데이터와 실제 측정 데이터의 오차가 최소화되도록 박막 조성 관련 변수들을 조정하는 과정을 통해

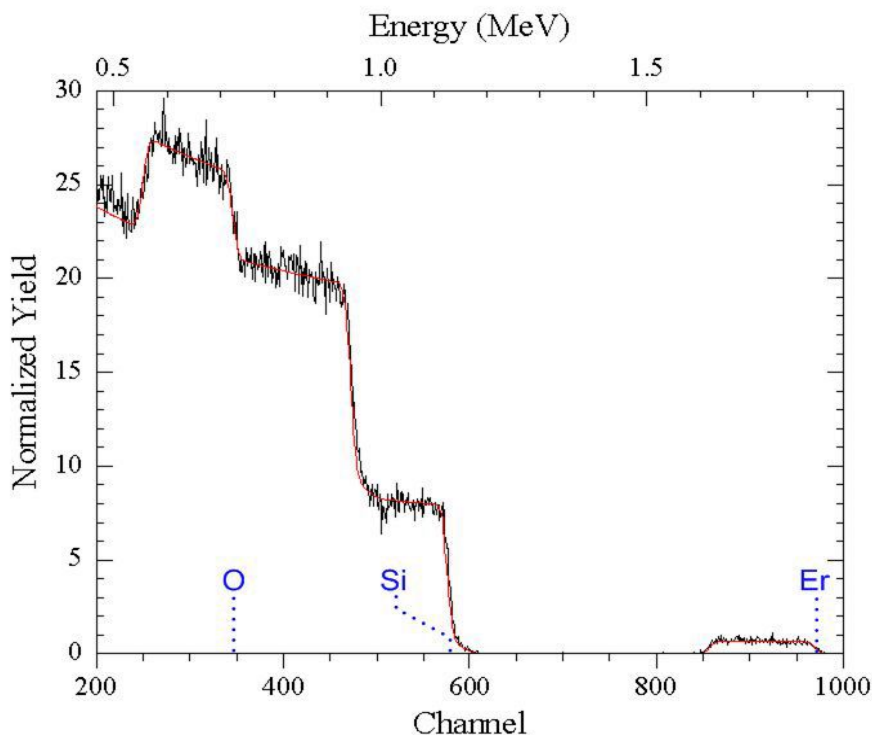


Fig. 23. Result of RBS of ni-Si:Er.

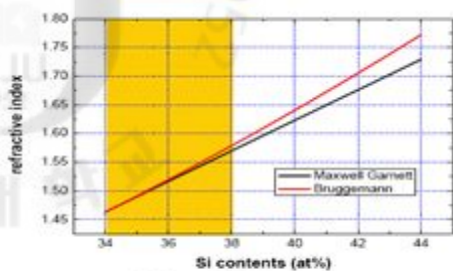
실제 박막의 조성비를 알 수 있다.

그림 17에서 한 박막 샘플에 대한 RBS 측정 데이터를 나타내었으며, 박막을 구성하는 원소인 실리콘(Si), 산소(O) 및 에르븀(Er)에 해당하는 에너지의 피크(peak) 위치를 표시하였다. 또한, 스퍼터링 방식으로 첨가한 에르븀이 박막내부에서 깊이에 따라 고르게 분포함을 알 수 있는데, 박막의 깊이에 따라 에르븀의 농도가 달라지는 경우, 광도파로를 통과하는 빛의 모드가 최적의 에르븀농도를 가진 부분과 정확히 겹치지 않으면 증폭이 효율적으로 이루어지지 않으므로 광증폭기의 성능을 감소시키는 요인이 된다.

5. nc-Si:Er을 이용한 광도파로의 제작공정

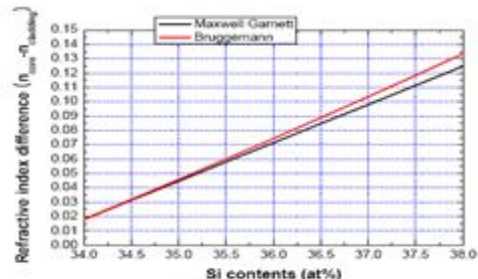
실리콘 산화막 웨이퍼 위에 nc-Si:Er 박막을 올려서 광도파로를 구성하는 과정에서 광도파로에서의 신호모드는 단일모드로 구성되어야만 실제 광통신용 증폭기로 사용될 수 있다. 따라서, 박막의 두께와 광도파로의 구조에 따른 모드개수의 변화 및 모드특성의 변화를 계산하였다. 박막에서의 유효굴절률을 클래딩에 해당하는 실리콘 산화막보다 다소 높게 유지되는데, 박막의 나노결정형 실리콘의 굴절률이 실리콘 산화막보다 매우 높기 때문이다[6, 47]. 즉, 박막에 첨가된 실리콘의 함량에 따라 유효굴절률이 변화하게 되며, 이러한 유효굴절률을 구하기 위해서, Maxwell Garnett과 Bruggemann[48] 기법을 이용하여 최대값과 최소값을 구하고 그 평균값을 통해서 대략적인 수치를 예측할 수 있었다. 그림 18은 실리콘 함량이 34~44% 변화할 때, 박막의 유효굴절률의 변화를 보여주는 그래프이며, 36% 근처의 실리콘 함량을 갖는 nc-Si:Er 이 최적화 되는 영역에 대해서 좀더 자세히 유효굴절률의 변화를 조사하여, 각 함량에 대해서 단일모드 조건을 만족하면서 모드의 특성이 상부펌핑 구조에 적합하게 나타나는 영역을 실질적인 광도파로 구성을 위한 박막의 두께로 설정하였다.

그림 19는 ridge의 구조 변화에 따른 모드 개수를 측정한 결과를 보여주



Maxwell Garnett

$$\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} = \sum_i \Phi_i \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2}$$



Bruggemann

$$0 = \sum_i \Phi_i \frac{m_i^2 - m^2}{m_i^2 + 2m^2}$$

Fig. 24. Calculation of effective refractive index by Maxwell Garnett and Bruggemann method for dependence of Si contents in nc-Si : Er.

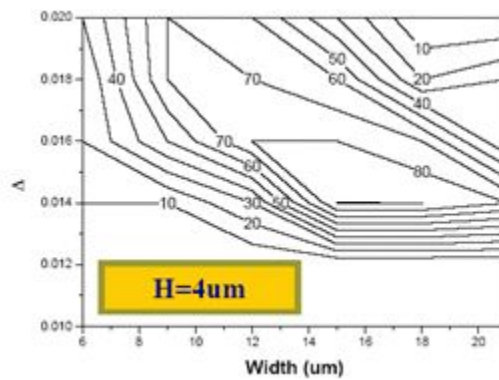
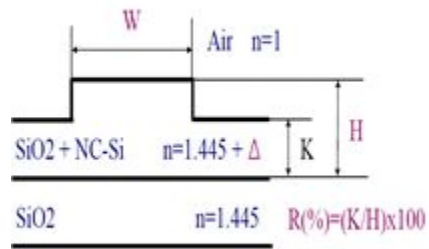


Fig. 25. Results of single mode condition at ridge type optical waveguide.

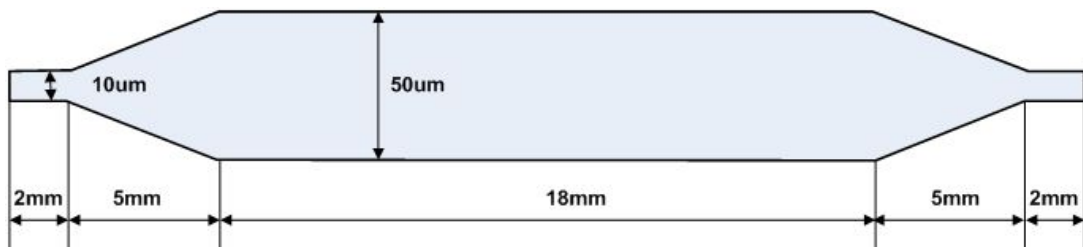


Fig. 26. Optical waveguide structure on mask(adiabatic).

는 그래프 이다. 그림 19에서 박막의 두께를 4um로 고정하고 ridge의 높이와 폭을 바꾸어가며 단일모드를 만족하는 영역을 조사하였다. 각 구조에서의 진행모드의 특성 중 겹침상수와 광세기 분포도와 같이 증폭기 성능에 직접적인 영향을 주는 특성을 조사하여, 증폭기를 설계하였다.

설계를 기초로 하여 에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘 박막에 대해 광도파로를 구성하여 이득 특성을 조사하였다. 마스크 상의 광도파로 구조 중 adiabatic한 경우는 그림 20과 같다. 식각에 사용된 박막의 두께는 2 um 였으며, 광섬유와 결합되는 부분의 광도파로 폭은 10 um였다. adiabatic이 아닌 경우는 광도파로 전체에 걸쳐 10um의 균일한 폭을 갖는 구조로 설계되었다. adiabatic 구조를 사용한 이유는 광커플링시 co-planar 방식이 아닌 상부 커플링 방식을 고려하여 최대한 광커플링 면적을 넓히기 위하여 사용하였다. nc-Si:Er 막의 두께는 2 um 이였으며, Single Mode Fiber(SMF)의 직경이 10 um이므로 nc-Si:Er의 단면적은 2 um x 10 um 로 20 um²이 되지만, 광파이버의 단면적은 직경이 10 um이므로 78.5 um²이 되어 (nc-Si:Er)/SMF의 면적비는 0.25정도가 된다. 따라서 면적비를 활용한 계산으로 광커플링 효율이 1/4이므로 구조적으로 광삽입 손실은 대략 6dB 정도임을 알 수 있다. 그리고, 광접속시 광도파로의 단면은 사각형 모양이지만 광파이버의 단면은 원이라는 차이로 인한 삽입손실이 추가적으로 발생하므로, 실제 삽입손실은 이보다 더 커지게 된다. 따라서 삽입손실을 보상하기 위하여 adiabatic 구조를 사용하여 제작하였다.

adiabatic구조로 광도파로를 제작할때 주의 할 부분은 10 um에서 50 um로 늘어나는 부분이 너무 짧으면, 삽입된 광의 mode 변화가 발생하여 이득손실의 원인이 된다. 따라서 설계의 치수를 보면 처음 커플링단의 길이는 2 mm로 커플링단의 폭에 비해 200배 이상 길게 설계되어있으며, taper 부분은 5 mm로 커플링단의 폭에 비해 500배 이상 길게 설계 하여, 최대한 mode의 변화를 억제하도록 하였다. 그리고 광커플링 손실을 최소화 하기 위하여 SMF는 lensed fiber를 사용하였다.

그림 21은 BOE 용액을 이용해 광도파로를 식각한 박막의 현미경 사진이다. 그림에서 보면 가운데에서 위와 아래로 희미한 선 4개가 보이는데 오른쪽의 절단면 부분은 polishing한 접속면이며, 광도파로는 좌에서 우로 두 개가 만들어져

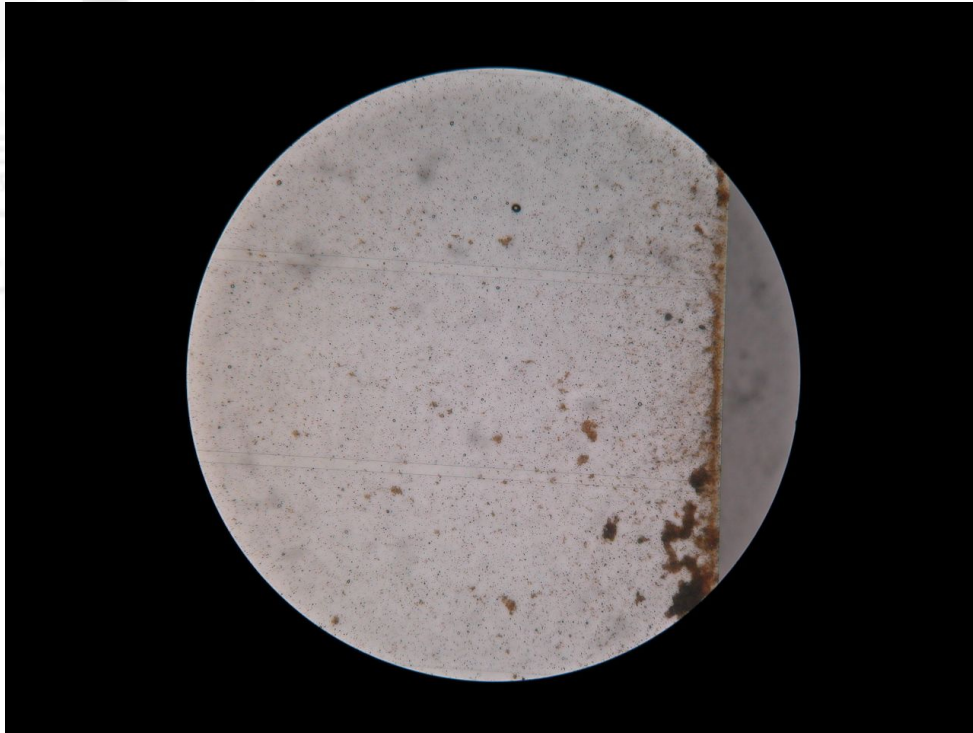


Fig. 27. Microscopy image of ridge type waveguide after lithography.



Fig. 28. Microscopy image of waveguide after lithography with polishing(show the ridge type waveguide in ellipsoidal).

Table 3. Polishing processor conditions

Step	1	2	3	4	5	6*
Abrasive Size	15 μm	6 μm	3 μm	1 μm	0.5 μm^*	0.05 μm
Abrasive Type	Diamond	Diamond	Diamond	Diamond	Diamond	Colloidal Silica
Carrier	Lapping Film	Lapping Film	Lapping Film	Lapping Film	Lapping Film	Suspension
Item Number	50-30045	50-30055	50-30060	50-30065	50-30070	180-20015
Polishing Cloth	-	-	-	-	-	Red Final C
Item Number	-	-	-	-	-	90-150-350
Lubricant	H20	H20	H20	H20	GreenLube	-
Item Number	-	-	-	-	90-209010	-
Platen Speed	75 RPM CCW	50 RPM CCW	50 RPM CCW	50 RPM CCW	30 RPM CCW	200 RPM CW
Sample Rotation	-	-	-	-	-	Full (Speed 1)
Sample Oscillation	1" (Speed 6)	1" (Speed 6)	1" (Speed 6)	1" (Speed 6)	1" (Speed 6)	1" (Speed 6)
Sample Load	300 g	Full	Full	Full	Full	100 g
Time/ Material Removal	Until Planar	50 μm	25 μm	10 μm	5 μm	1-2 minutes

*Wipe the film with a paper towel to collect debris while polishing. Bury the sample 30 μm into the cloth for polishing. Water should be flushed on the cloth for the final 10 seconds of the polishing step.

있는 것을 확인 할 수 있는데 그림에서 보이는 4개의 선은 인접한 2개가 하나의 광도파로 이다. 식각된 깊이는 400nm 이다. 광도파로 구조가 식각된 샘플은 신호광과의 결합을 위해서 광접속면을 연마하는 작업을 하였다.

연마공정의 조건은 표 3에 표시 하였으며, 표에서 보는것과 같이 스텝 6까지 진행 하였으며, 최종 연마단면의 크랙의 사이즈는 0.05um정도가 되었다. 공정을 마친후 cleaning공정을 진행하였으며, 샘플은 일단 열을 이용하여 더미 웨이퍼를 분리하고 아세톤을 이용하여 깨끗하게 제거한다.

그림 22는 옆면을 연마한 샘플의 연마된 면을 관찰한 현미경 사진이다. 그림에서 ridge 타입 광도파로의 ridge에 해당하는 부분을 붉은색 동그라미로 표시하였는데, 그 주변의 다른 표면들보다 상당히 솟아있는 것을 관찰할 수 있다. 이

부분에 렌즈타입의 광섬유를 접속하게 되며, 신호광이 박막으로 전과 된다.

6. nc-Si EDWA 증폭성능 측정 및 분석방법

nc-Si:Er 시료 위에 형성한 광도파로에 펌핑광의 파워와 파장을 변화시켜가면서 광이득 측정실험을 하였다. 펌핑 방식은 순방향과 역방향의 펌프방식과 LED를 이용한 상부펌핑을 이용하였다. 그림 23은 이득 측정실험에 사용된 실험셋업을 보여준다. 셋업에서 TLD는 신호광원에 해당하는 파장가변레이저를, T Att는 입력신호의 파워를 조절하기 위한 가변 광감쇠기를, ISO는 광단속기를, PC는 편광조절기를 OSA는 광스펙트럼분석기를 의미한다. 광도파로 샘플은 입-출력부에 6축 이송스테이지를 이용해서 광섬유로 접속되며, 접속여부는 상부의 현미경을 통해서 관찰되고 동시에 신호광의 접속 손실을 실시간으로 테스트하여 최적의 접속상태를 유지한 채로 펌프를 주입하여 이득 및 잡음을 측정하였다.

그림 23에서 Pump LED array를 통해서 펌프광원이 주입되며 LED는 410 nm를 중심으로 20 nm 정도의 반치폭을 갖는 것을 이용하였다. 신호광원으로는 파장가변 레이저 다이오드를 이용하였으며 가변 광감쇠기를 지나면서 광의 파워를 조정할 수 있게 하였다. 반사된 광원이 파장가변 레이저 다이오드와 광감쇠기에 영향을 줄 수 있기 때문에 아이솔레이터를 달아서 광원이 한방향으로 흐르도록 했으며 신호광원의 편광을 조절해 광도파로와 잘 결합될 수 있도록 편광 조절기를 두었다. 99:1 결합기를 통해 주입되는 신호광원과 펌프광원의 파워를 각각 알 수 있도록 하였으며 펌프광원은 1400/1500 WDM 필터를 통해 신호광원과 함께

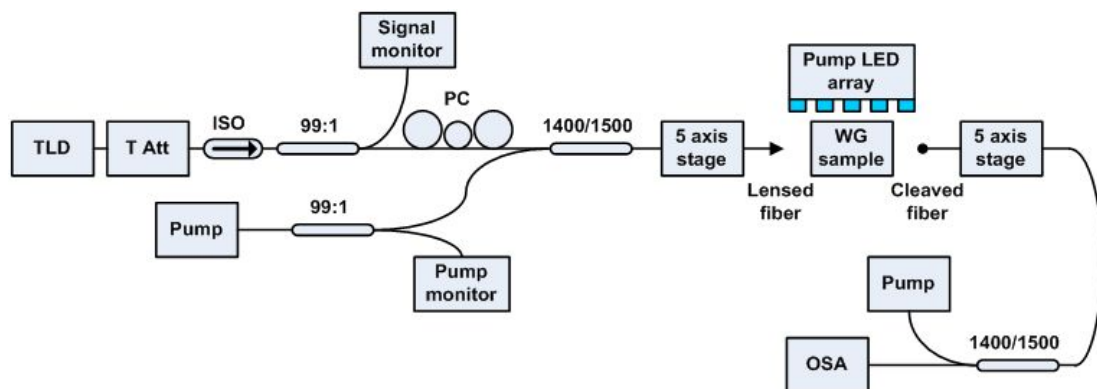


Fig. 29. Schematic of gain measurement system of nc-Si:Er waveguide amplifier.

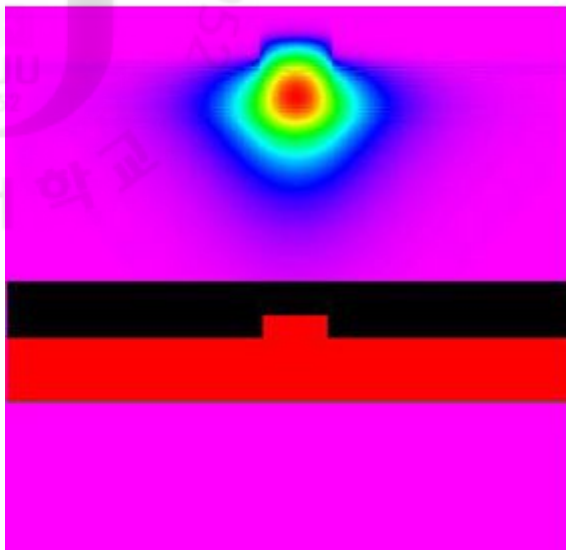
저 광도파로로 보내지도록 설치하였다. 1400/1500 WDM 필터를 통과한 빛은 렌즈형 광섬유를 통해 광도파로와 광결합 하였다. 렌즈형 광섬유는 X, Y, Z의 수직 이동이 가능한 3축 스테이지 위에 피치(PITCH)와 요(YAW) 두 개 축이 회전 운동을 할 수 있는 틸트를 부착해 총 5축으로 조정되며, 30nm미만의 정밀한 스텝으로 움직임이 가능하도록 피코모터를 사용하여 조절할 수 있도록 설치하였다. 샘플 표면과 렌즈형 광섬유는 스테이지 상단에 위치한 현미경을 통해 Cathode Ray Tube(CRT) 모니터로 관찰할 수 있도록 하였으며, 진공척을 이용하여 이득 실험 시에 흔들리지 않도록 하였다.

광도파로를 지난 빛은 다시 5축의 스테이지의 렌즈형 광섬유를 통해 모아지며 50:50 광결합기를 지나 광스펙트럼 분석기와 파워미터를 통해 빛의 세기와 파장에 따른 특성을 관찰 하였다. 순방향으로 펌프광원을 넣어주는 것뿐만 아니라 역방향으로 펌프광을 넣어줄 수 있게 구성하였다.

또한 LED배열을 시료위에서 접근시킬 수 있는 장치가 마련되어 있으므로 광섬유를 통한 펌핑(pumping)뿐만 아니라 광도파로 위에서 펌프광을 입사시키는 상부 펌핑(top pumping)도 가능하도록 하였다.

렌즈형 광섬유와 광도파로의 결합 모습은 그림 24과 같다. 일반적인 광섬유코어의 지름은 약 10 μm 으로 광도파로의 폭과 비슷하지만 박막의 두께는 2 μm 정도로 얇아 삽입손실이 크다. 그림 24에서 왼편의 렌즈형 광섬유를 보면 일반 광섬유와 달리 끝이 렌즈 형태로 되어 있어 빛이 퍼져서 생기는 삽입손실을 줄여주고 초점거리를 예측할 수 있어 광도파로와의 결합을 용이하게 한다. 그림 24의 오른편이 샘플이며, 한 가운데 밝게 보이는 선부분이 광도파로이다. 그림에서 왼쪽의 광파이버의 크기가 오른쪽의 광도파로 보다 크게 보이는 것은 실제 SMF의 core의 직경은 10 μm 이며, cladding까지 포함한 직경은 125 μm 인 반면, 광도파로의 높이는 2 μm 정도가 되는데 정확히 도파로 부분은 0.4 μm 만이 도파로이며, 나머지 1.6 μm 는 nc-Si:Er의 이득 매질이다. 본연구에서 사용한 광도파로는 도파로의 외부 클래딩층이 없는 간단한 형태의 도파로이다. 이것은 신호광을 증폭하기 위하여 펌프광을 도파로에 접속할 때 도파로의 수직방향인 위에서도도 접속이 가능하도록 하기 위하여, 즉 상부펌핑을 사용하기 위하여 공기층 클래딩

Simulation



CCD / Scope

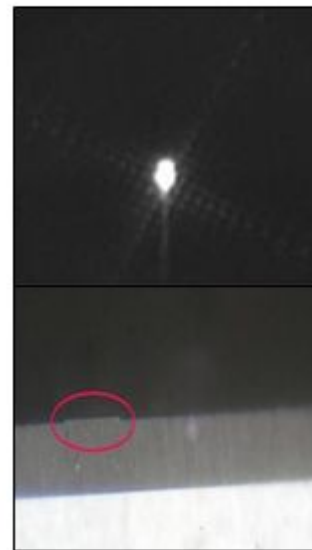


Fig. 30. Propagation mode at ridge waveguide observed by IR-CCD / microscope(1535nm signal) and results of simulation.

방법의 ridge 형 광도파로를 사용하였다. 그림 24는 적외선 카메라로 광도파로의 모드를 관찰한 사진이며, 시뮬레이션 결과와 일치하는 ridge형 광도파로의 모드 모습을 확인하였다. 이를 통해 제작된 광도파로를 통해 입사한 광이 진행함을 알 수 있다.

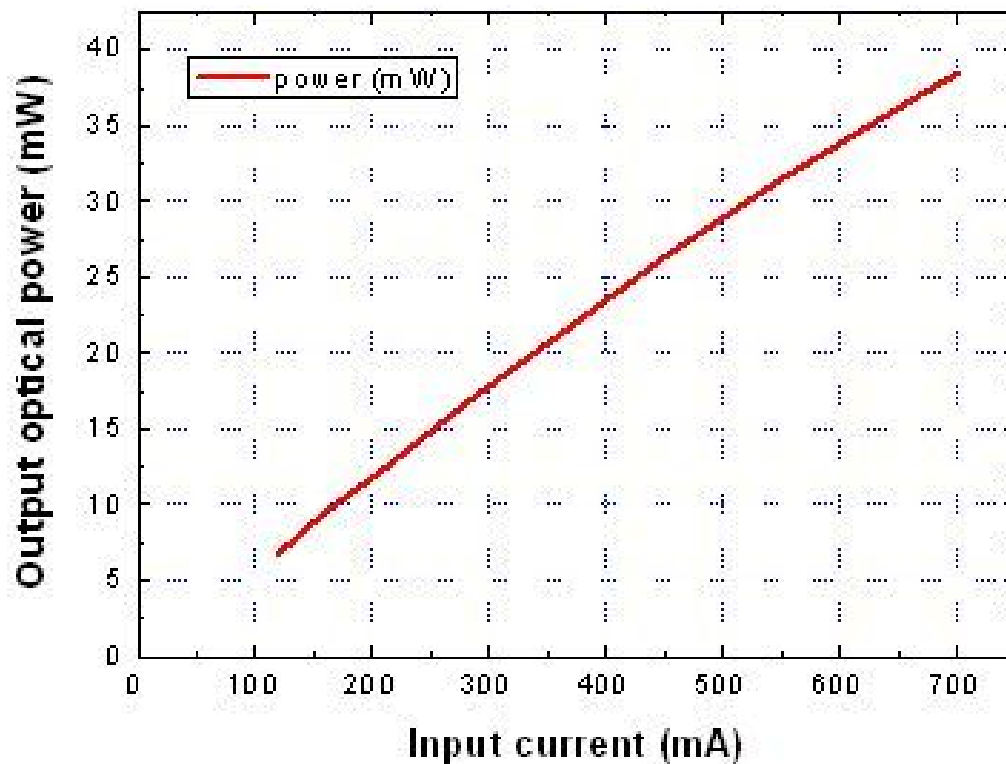


Fig. 31. Input current vs optical power of pump LED.

그림 25은 실험에 사용된 펌프 LED 모듈의 입력 전류에 따른 광출력 파워를 보여주는 그래프이다. 실제적으로 실험에 사용된 전류는 650 mA 정도이므로, 펌프 파워가 대략 35 mW 정도임을 알 수 있다. LED 소자의 폭이 약 300 μm 정도이고 광도파로의 증폭부 선폰이 50 μm 정도임을 감안하면 실제 도파로로 집속되는 펌프광의 파워는 6 mW 정도임을 알 수 있다.

IV. 결과 및 논의

1. 에르븀이 첨가된 nc-Si 박막의 물리적 특성

에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘 박막을 증착하기 위하여 플라즈마 생성용 가스로 Ar을 5 sccm로 하고 SiO₂ 형성용 가스인 SiH₄와 O₂를 각각 2 sccm씩 반응챔버로 주입하였으며, 이때 에르븀을 첨가하기 위하여 Evaporator의 온도를 1300 °C로 설정하고 1시간동안 증착한 시료의 결과를 그림 26에 보였다. Evaporator는 effusion cell을 사용하였으며 시료의 사이즈는 5 cm x 2 cm 로 하였다. 증착된 막은 육안 확인시 시료홀더부분을 제외한 부분에서 전체적으로 균일한 색상을 띄고 있어 막의 균일성을 좋은 것으로 확인되었다. 증착 1시간이 내에 증착된 시료에서는 육안으로 확인할 수 있는 먼지나 결함은 없었다. 시료의 두께를 확인하기 위하여 같은 조건에서 증착하여 얻어진 샘플의 SEM 단면 사진은 그림 27과 같다. 측정된 두께는 약 210 nm 였으며, 증착률은 3.5 nm/min이

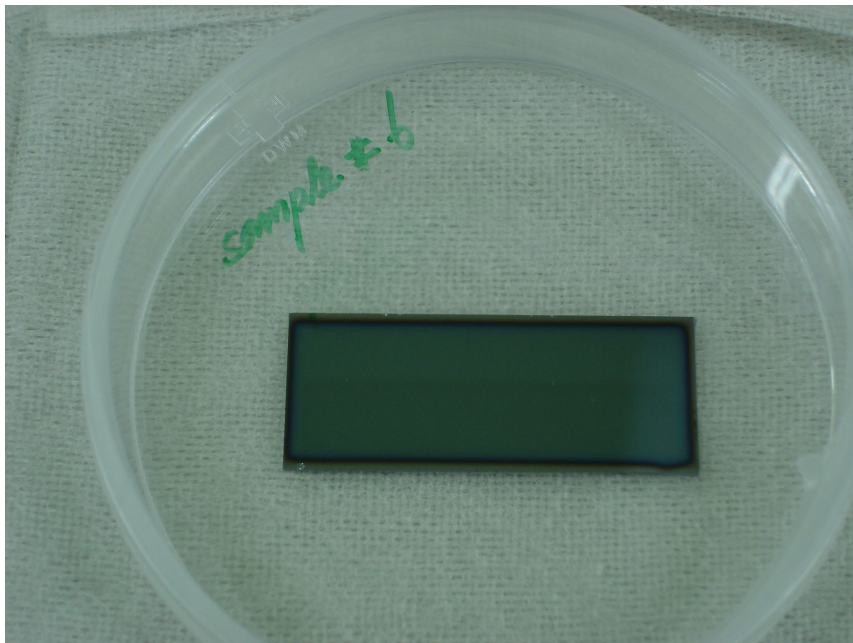


Fig. 32. Deposited sample at Ar/SiH₄/O₂ = 5/2/2, Er evaporate temp. = 1300 °C and deposition time = 60 min.

였다. 에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘 박막은 시료내 실리콘과 산소의 구성비 및 에르븀의 함량비가 중요한 변수인데, 증착률을 올리기 위하여 공정가스의 총량을 늘려도 승화되는 에르븀의 양은 변하지 않으므로 박막내 증착률을 올리면 에르븀의 함량비가 너무 낮아질 수 있어 본 연구에서는 낮은 증착률을 적용하였다.

그림 27과 같은 조건으로 증착된 시료의 발광특성을 확인 하기 위하여 PL을 측정하였다. PL을 측정하기 위하여 사용된 펌핑광의 파장은 477nm와 488nm였으며 그 결과는 그림 28과 같다.

그림 28에서 보이는 것과 같이 1530 nm 부근의 피크가 선명하게 나타나고 있는데 이는 증착된 박막내 에르븀이 함유되어있다는 것을 의미한다. 이것은 실리카 글라스내에 에르븀을 첨가한 EDF에서의 결과와 일치하며, 전형적인 에르븀 3가 이온의 PL 값과도 일치한다. 이 결과로부터 에르븀이 첨가된 실리콘 나노결정화된 실리콘 박막이 형성된 것을 알 수 있다. 이에 따라 가스의 유량비, 증착

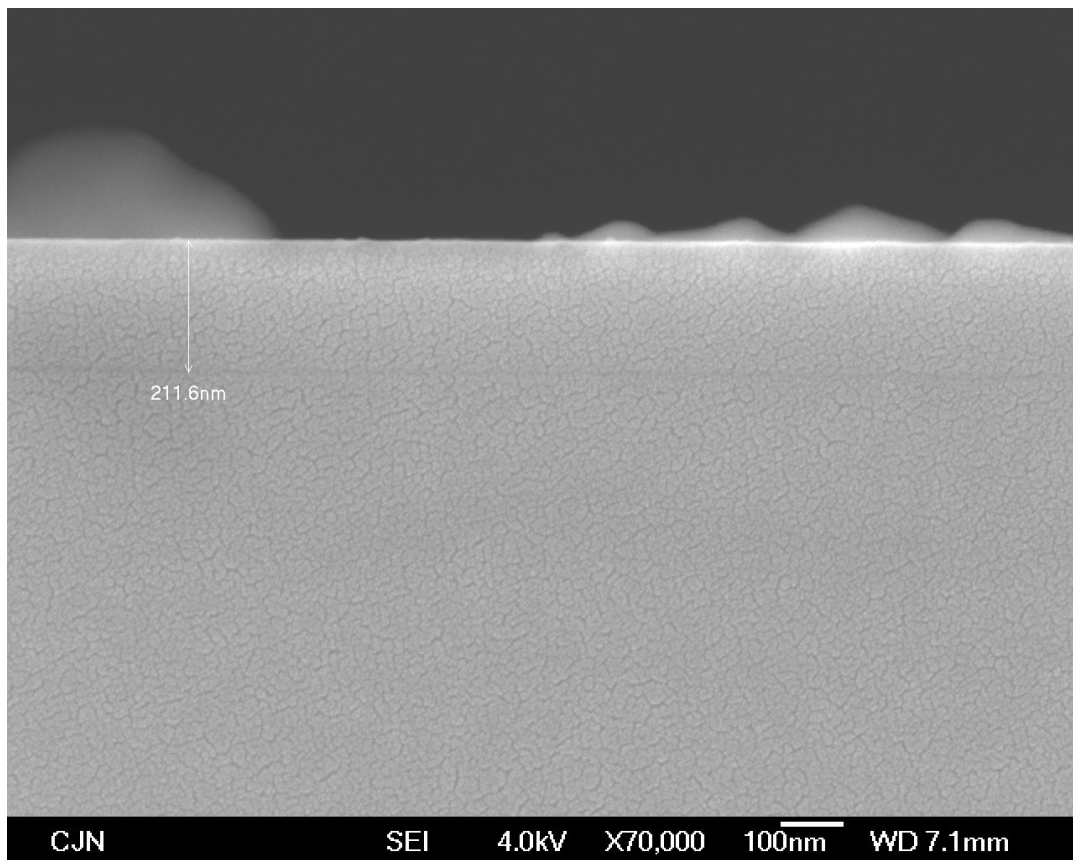


Fig. 33. SEM image of nc-Si deposited during 60 min.

압력, 플라즈마 파워, 에르븀의 첨가량에 변화를 주면서 실험을 진행 하였으며 그 결과를 그림 29와 30에 보였다. 그림 29는 증착된 시료의 477 nm의 펌핑광에 의한 PL 수치를 시료의 두께로 나눈 값으로 나타낸 것이다.

Evaporation과 Sputtering라고 구분되어있는 것은 에르븀의 첨가 방법을 기술한 것이다. 그림 29에서 나타낸 것과 같이 전반적으로 sputtering 방법으로 에르븀을 첨가할 때가 Evaporation 방법으로 첨가한 경우보다 PL의 값들이 높게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 PL 뿐만 아니라 lifetime의 경우에도 해당된다. 그림 30은 증착된 샘플의 477nm 펌핑 시의 PL lifetime을 나타낸 것이다. 그림 30에서 에르븀의 lifetime은 2 ms에서 11 ms 에 이르기까지 매우 다양한 값을 갖는다. 일반적으로 에르븀의 lifetime은 에르븀 밀도와 에르븀 주변의 환경에 의해서 결정된다. 에르븀의 밀도가 너무 낮아서 PL이 낮게 나오는 경우는 lifetime이 길어도 광증폭이 되지 않으므로 그림 30에서 PL이 상대적으로 10 이상으로 나오는 경우에 대해 원형마크로 도시하였다. PL의 결과와 마찬가지로

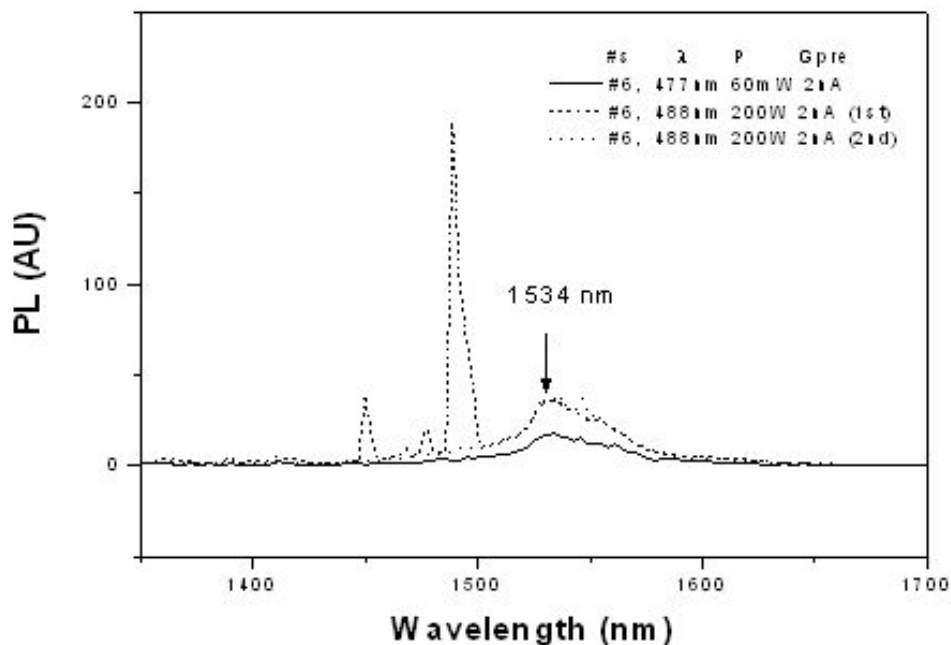


Fig. 34. PL spectrum of sample deposited conditions are Ar/SiH₄/O₂ = 5/2/2 sccm, working pressure = $\sim 10^{-3}$ torr, Er evaporate temp. = 1300°C.

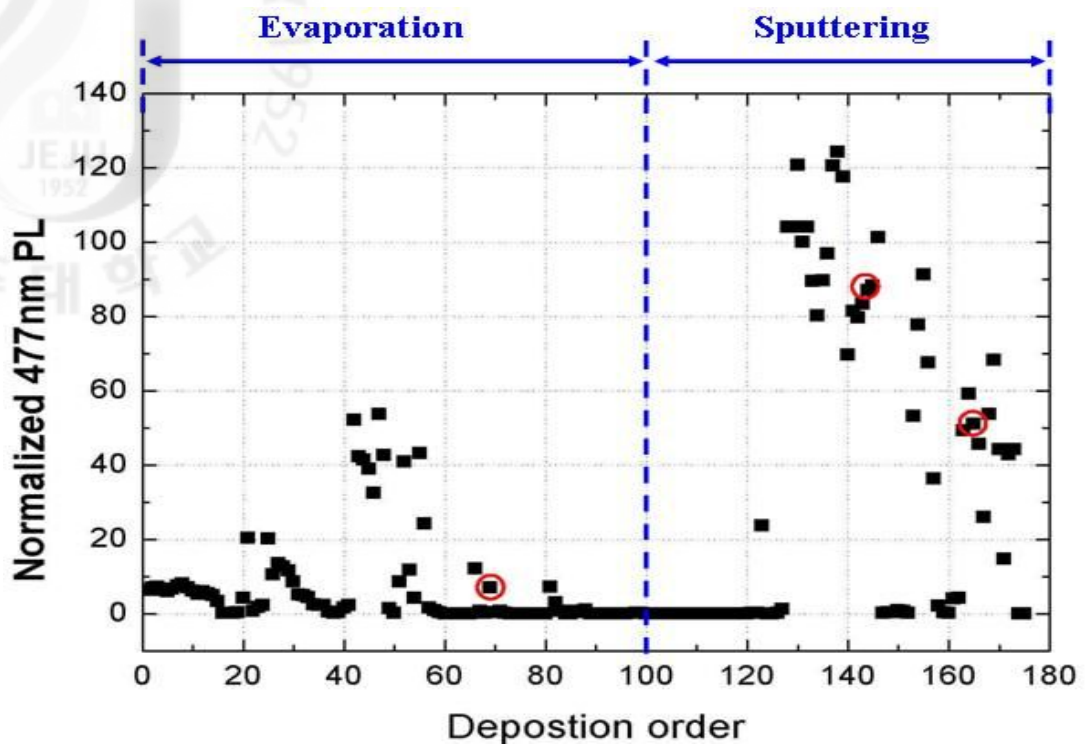


Fig. 35. Normalized 477nm pumped PL intensity of samples.

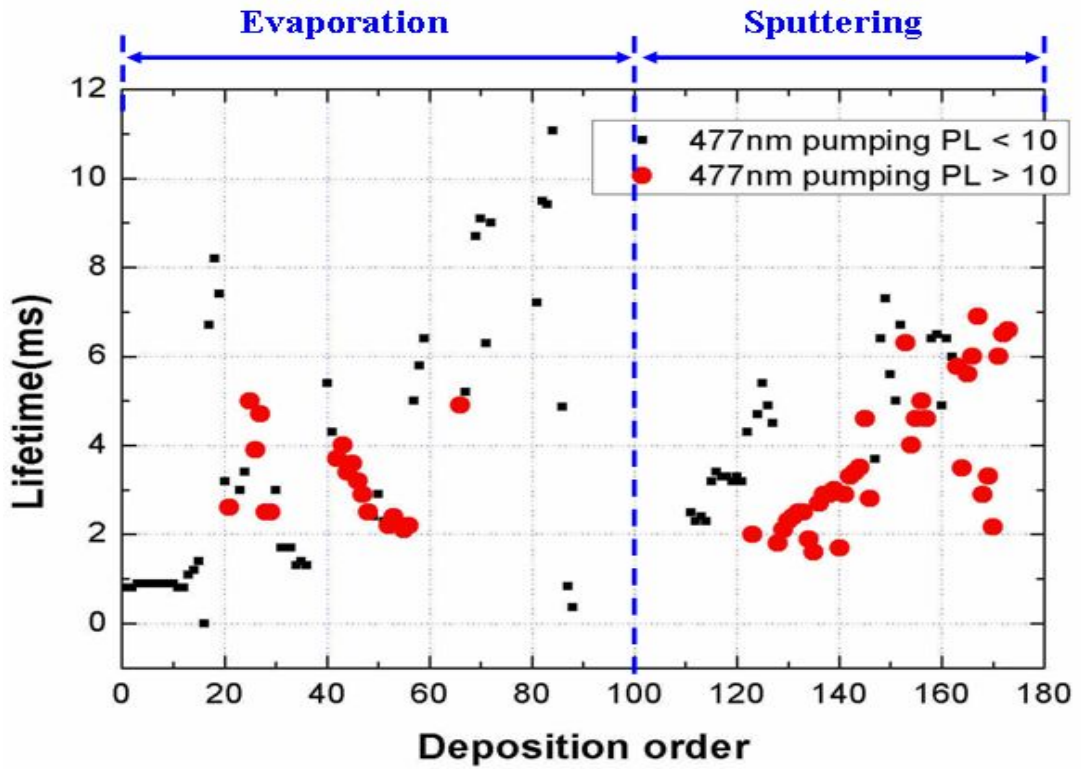


Fig. 36. 477nm pumped lifetime of samples.

lifetime의 결과에서도 sputtering 기법으로 에르븀을 첨가한 시료가 Evaporator로 첨가한 시료보다 높게 나오고 있다.

2. 박막내 결함의 분석

에르븀이 첨가된 나노결정형 실리콘 박막 시료에서 결함의 성분 및 원인을 확인하기 위하여 Ar/SiH₄/O₂의 유량은 5/4.2/5.1 sccm으로 하고, ECR 플라즈마 파워는 1200 W, 작업진공도는 2 mTorr로 그리고 기판 가열 온도는 450 °C, 총 증착시간은 180분의 조건으로 시료를 증착하였다. 증착 후 측정된 박막의 두께는 790 nm 였으며, 에르븀 첨가원은 DC sputter를 사용하였으며, sputter 전압은 600V 로 하였다. 시료의 단면을 TEM 과 EDS를 이용하여 시료내의 결함을 조사하였다. 그림 31은 위의 조건으로 제작된 시료의 단면을 찍은 TEM 사진이

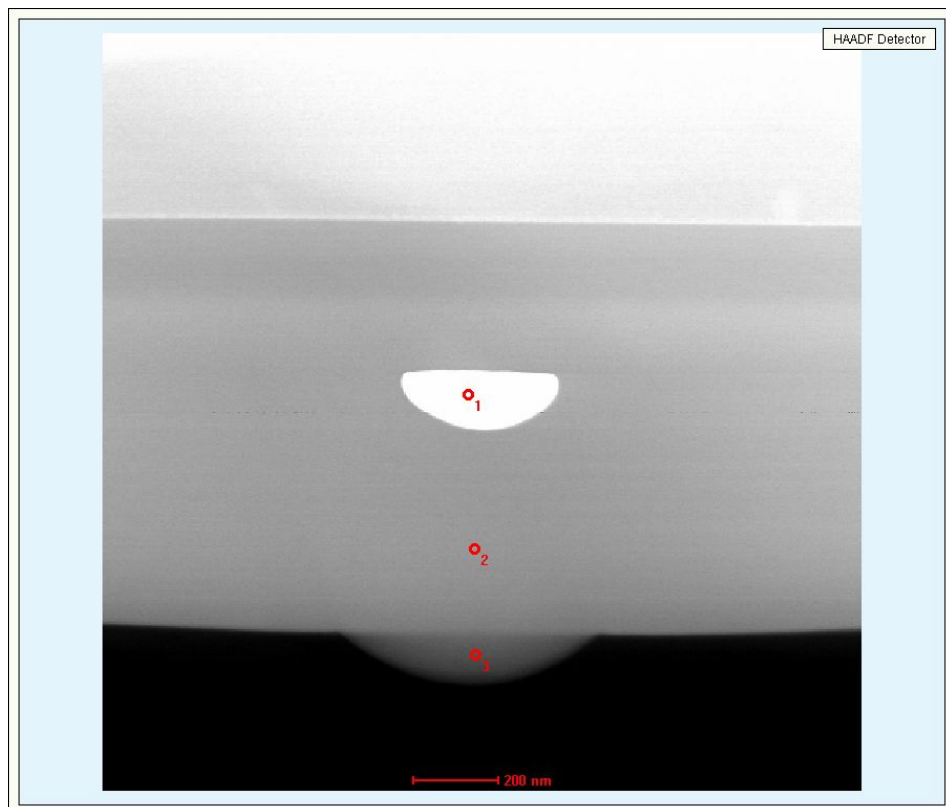


Fig. 37. TEM image of estimation of defect in a nc-Si:Er.

다. 단면사진에서 O1, O2 그리고 O3는 EDS를 측정된 위치이다. 그 결과는 그림 32에 나타내었는데 그림 32(a)는 결합물질의 내부에서 얻어진 분광정보 데이터이고 그림 32(b)는 결합물질 주위에 대한 것이며, 그림 32(c)는 그 주변에서 얻어진 값이다. 그림 32에서 결합물질 내부에서만 에르븀에 대한 피크가 나타남을 알 수 있는데 이것은 박막 공정중 성장된 것이 아닌 즉 막이 형성되는 동안 Er이 다른 기체혹은 공정 활성종들과의 결합으로 발생한 것이 아닌 sputter에서 발생하는 에르븀 입자들이 막에 흡착되고 이들 주변에 SiO_x 막이 형성되면서 이 결합을 감싸버리는 것으로 보인다.

그 원인은 이미 다른 연구의 결과와 동일한 것으로 첫째 sputter시 sputter 타겟에 강한 포텐셜이 걸리면서 강한 포텐셜의 활성종 입자가 타겟 표면에 강하게 부딪히게 되면서 타겟 표면의 에르븀입자들의 크기가 일정하지 않게 튀어 오르게 된다. 이 결과로 성막 되는 과정중에 에르븀의 입자들이 기관에 흡착되고 그대로 기관에서 성막 되므로 시료내에 크기가 균일하지 않는 에르븀의 분포가 생긴다.

둘째는 타겟이 공정 중 산화문제를 들 수 있다. 에르븀 타겟과 공정가스 중에 O₂ 포함되어 있으므로 타겟의 오염도는 박막 공정중 지속적으로 증가하게 된다. 이렇게 생성된 오염물질은 에르븀산화물질이 되는데 이 물질은 sputtering 시 타겟에서 분리되면서 성장중인 박막내에 흡착될 수 있다. 이렇게 흡착된 산화물은 그대로 박막내 포함되고, 성막후 결합으로 남아 있게된다[50]. 박막내의 결합입자에 의한 문제는 sputter를 이용할 시 나타나는 일반적인 현상으로 알려져 있으며, 이를 줄이기 위해서는 sputter power를 줄이고, 타겟을 항상 깨끗한 상태로 유지되어야 하며, 또 진공챔버 내의 증착 부산물들에 대해서도 항상 깨끗한 상태를 유지하여야 한다. 일반적으로 플라즈마를 이용하여 플라즈마 크리닝을 할 수 있으나, 이때 사용되어지는 가스가 불소화 가스들이어서 광 기능성 박막을 제작할 때에는 시료내에 불소가 첨가되는 경우 굴절율의 급격히 감소하여 광도파로 제작시 광이 가이드 되지 않는다. 따라서 불소가스를 이용한 플라즈마 크리닝후 반응챔버내에 남아 있는 불소성분은 치환 가스를 이용하여 제거할 수 있다. 그러나 치환가스를 이용한 불소성분의 제거과정은 반응챔버에서 완전하게 불소성분을 제거할 수 없다. 이런 sputter의 문제를 해결하기 위하여 Evaporator를 이용

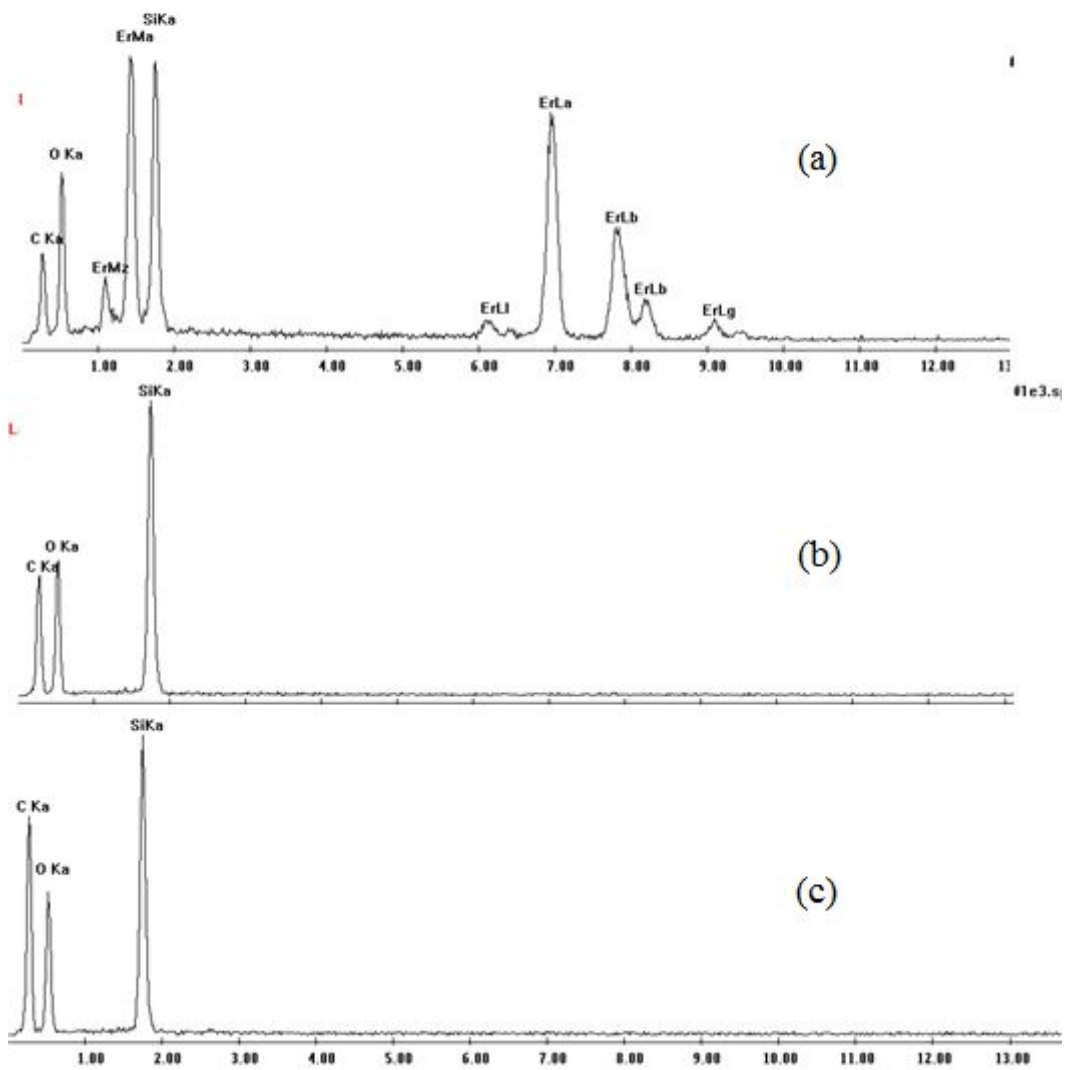


Fig. 38 Results of EDS (a) O1 , (b) O2 and (c) O3 on the TEM image.

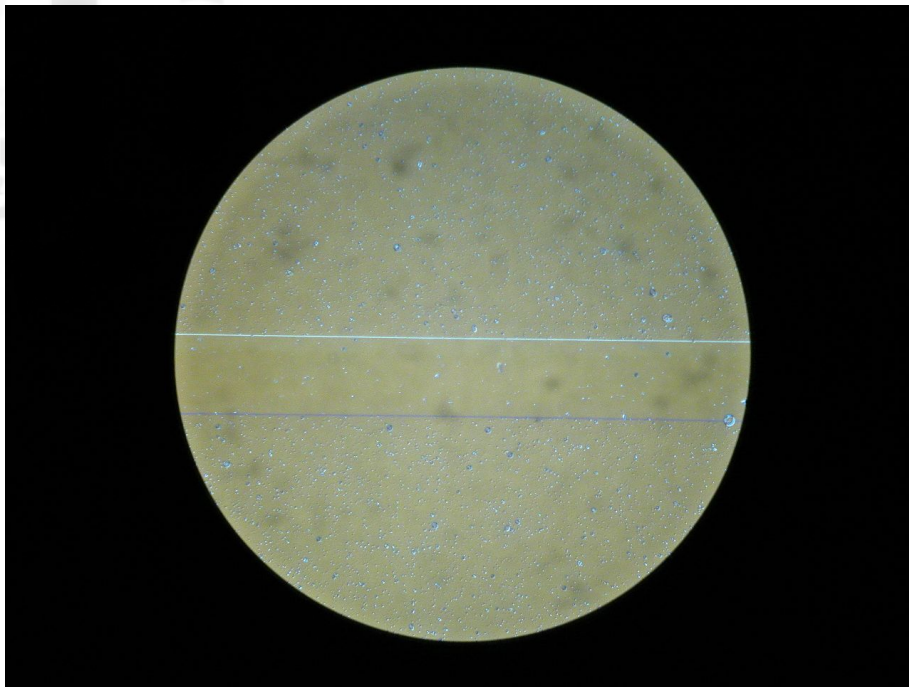


Fig. 39. Bright field image of sample. deposition conditions are Ar/SiH₄/O₂ = 5/4.2/4.7, Working pressure = 2mTorr, subs. Temp. = 450°C, plasma power = 800W , sputter voltage = 200V.

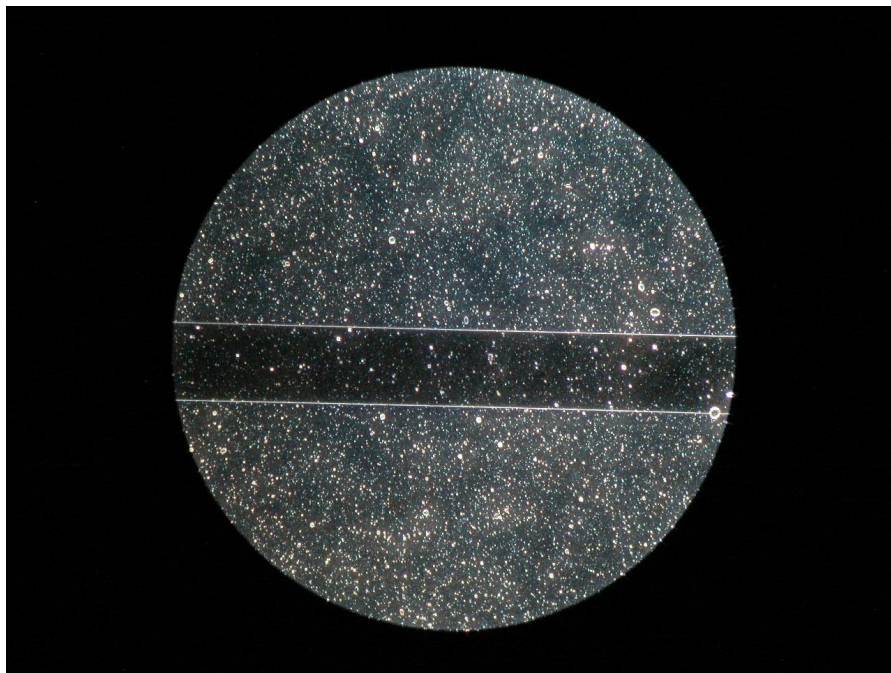


Fig. 40. Dark field image of sample. deposition conditions are Ar/SiH₄/O₂ = 5/4.2/4.7, Working pressure = 2mTorr, subs. Temp. = 450°C, plasma power = 800W , sputter voltage = 200V.

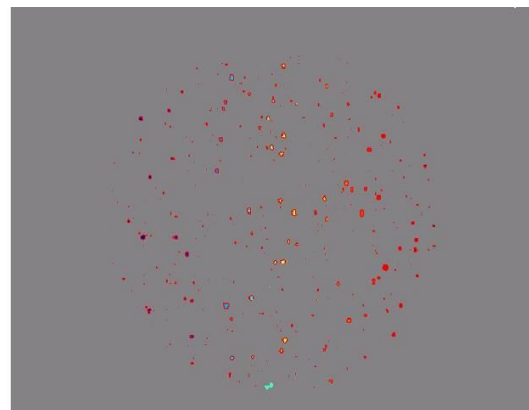
할수 있는데 증발장비를 이용하면 상대적으로 텅어리채 박막내 들어가는 결함을 줄일 수 있지만, 에르븀의 녹는점이 높아 기본적으로 증발이 잘 안되는 물질이므로 에르븀의 양을 조절하기가 어렵다. 특히 증착률을 올리기 위하여 공정가스의 유량을 늘리면, 에르븀의 열분자들이 평균자유행로가 상대적으로 짧아져, 기판에 도달할 수 있는 입자가 제한된다.

최적화된 조건의 시료를 얻기 위해서 박막 제조후 실시간으로 시료의 물성상태를 확인 할 수 있는 방법이 필요하다. 박막내 결함입자에 의한 결함은 광학현미경을 이용하여 쉽게 검증할 수 있는데 dark field 이미지를 이용하면 광학이미지의 대비를 더욱 크게 하여 백그라운드와 박막내 결함입자들을 쉽게 구분할 수 있으며, 이에 대한 결과를 그림 33, 34, 35에 나타내었다.

그림 33과 34은 Ar/SiH₄/O₂의 가스 유량을 각각 5/4.2/4.7 sccm으로 하고, 공정진공도를 2 mTorr, 기판온도를 450 °C로 하였으며, 플라즈마파워를 800 W, sputter 전압을 200 V로 하여 제작한 샘플의 bright field 이미지와 dark field 이미지를 각각 나타내고 있다. 그림 33에서 보는것과 같이 bright field, 즉 일반적인 광원을 이용한 광학 이미지는 전반적으로 고르게 보이나 결점 또한 주변의 이미지와 대비가 안되어 구분하기가 힘들다. 반면 dark field 이미지는 그림 34에서 보는것과 같이 배경과 결점이 확연히 구분됨을 알 수 있다. 따라서 dark field 이미지를 이용하면 박막내 결함입자에 의한 결함을 쉽게 확인 가능하다. 여



현미경 Dark Field Image 분석 예시 (원본 사진)



현미경 Dark Field Image 분석 예시 (defect 추출 후)

Fig. 41 Dark field image and the results is applied image processor tools at deposition conditions are Ar/SiH₄/O₂ = 5/4.2/5.1, subs. temp. = 450°C, 0.5mTorr, plasma power = 1200W, sputter voltage = 900V.

기에 컴퓨터를 이용한 이미지 프로세싱을 이용하면, dark field로 확인된 결함입자의 개수와 크기등을 손쉽게 구할 수 있어 샘플의 불량여부를 빠르게 특별한 처리과정 없이 확인할 수 있어 매우 유용하게 사용될 수 있는데, 이와 같이 이미지 처리 알고리즘을 도입하여 각 광산란결점들을 정량적으로 표시할 수 있도록 하였다. 이로써 시료내의 박막의 결함상태를 시각적으로 확인할 수 있다. 그림 35는 Dark field 이미지와 이를 이미지처리 알고리즘을 이용하여 처리한 결과를 나타내고 있다

3. RBS를 통한 깊이에 따른 Er 분포 분석

그림 36은 에르븀을 effusion cell을 사용하여 evaporation 한 박막의 RBS의 결과중 에르븀의 스펙트럼을 자세히 살펴본 것이다. 이 결과로 부터 박막의 깊이에 따른 에르븀의 분포가 일정하지 않음을 알 수 있다. 기판과 박막의 계면부근의 에르븀의 수치가 높게 나타나다가 박막의 표면으로 갈 수록 서서히 감소하여

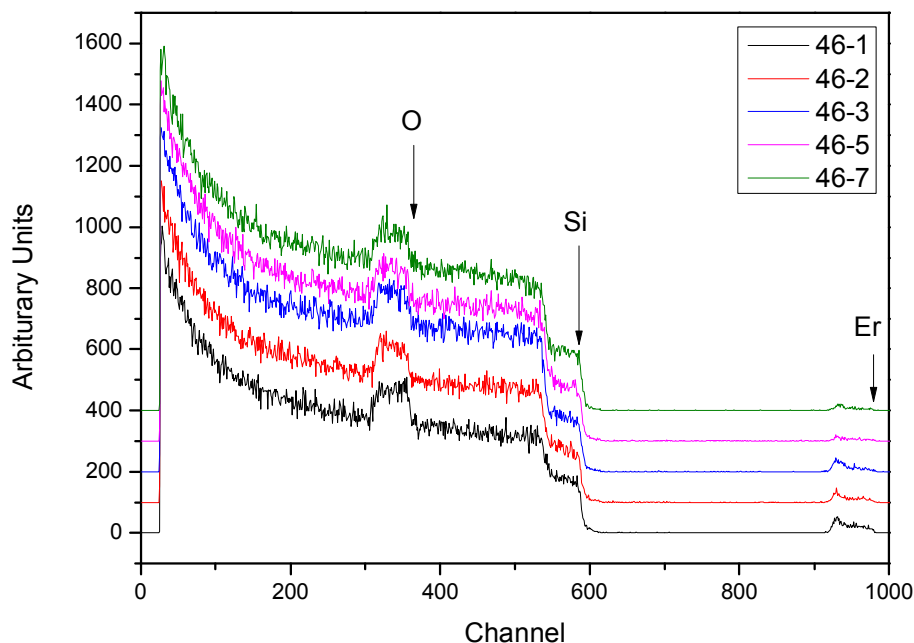


Fig. 42. RBS results of various deposition conditions with Er doped evaporator.

중간 지점부터는 어느정도 일정하게 유지되는 것을 그림에서 확인할 수 있는데, 이것은 플라즈마증착공정과 evaporation을 이용한 첨가공정을 동시에 진행함으로써 생기는 현상으로 설명되어진다. 그림 37은 특정 샘플에서의 깊이별 에르븀의 농도변화를 RBS 측정결과로부터 추정한 그래프이다. 박막의 기판쪽이 표면쪽보다 상대적으로 에르븀의 함량이 매우 높은 것을 확인할 수 있다. 즉 샘플내 에르븀의 함량이 두께에 따라 변하고 있다는 것을 알 수 있다.

Evaporation이 여러 가지 장점, 특히 플라즈마와의 간섭현상 등과 같은 문제가 없어 보다 품질 좋은 박막을 얻을 수 있는 장점이 있지만, 증착된 박막내 이득물질의 분포가 일정하지 않은 단점을 가지고 있어, 첨가방법으로 evaporation을 이용하는 것은 적합하지 않음을 확인하였다. 반면 첨가방법을 sputtering으로 한 것은 evaporation에 비해 샘플이 두께에 따른 에르븀의 함량이 변화가 크지 않다. 이 결과는 그림 38에서 보였는데 에르븀의 스펙트럼을 보면, 그림 36과 다르게 일정함을 알 수 있다. 이로써 동시첨가원으로는 적어도 RBS의 데이터만 적용한다면, sputter가 좀더 나은 방법임을 알 수 있다.

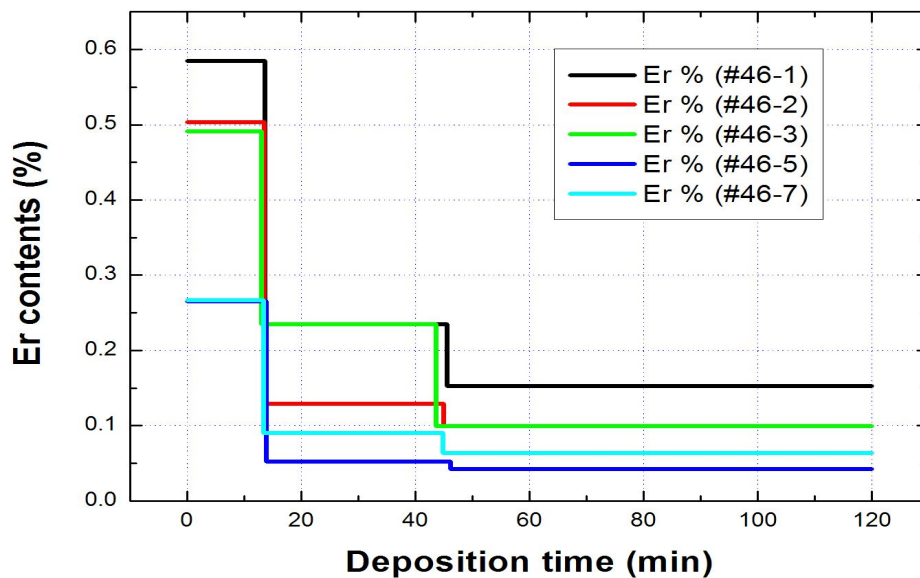


Fig. 43. Distribution of Er concentrations according to depth of samples of Er doped by evaporator.

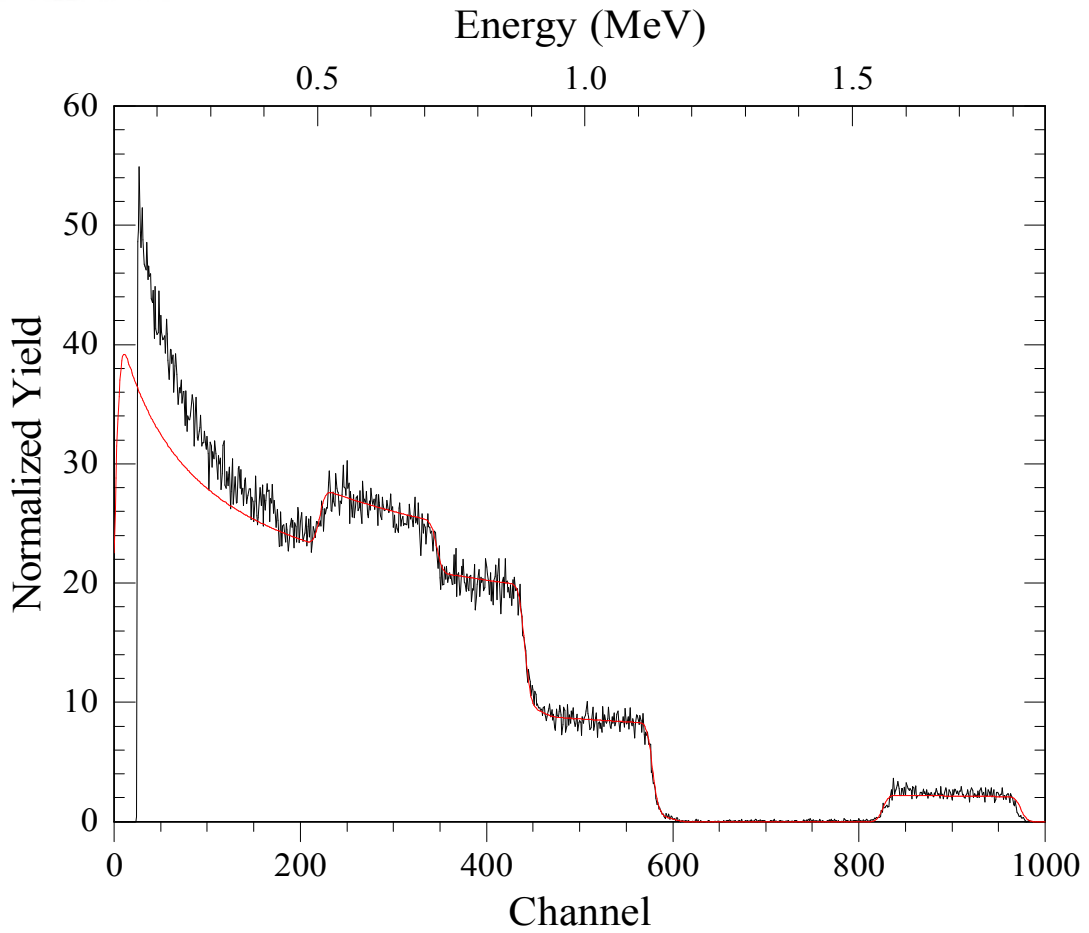


Fig. 44. RBS result of Er doped by sputtering(Si:O:Er = 35.1:64.9:0.08 at%, thickness=5600 Å).

4. PL 및 Lifetime 결과 및 분석

시료 증착조건 및 나노결정형 실리콘의 형성을 위한 온도조건에 대한 연구를 하기 위하여 PECVD 증착조건에 따른 박막내 실리콘 함량의 변화를 알아보기 위해 SiH_4 와 O_2 의 비율을 달리하여 증착한 샘플들에 대해 RBS로부터 박막내 Si의 함량을 구하였으며 그 결과 중 일부를 그림 39에 도시하였다. 그림 39의 결과에 따라 시료의 제작시 반응 챔버내 주입된 SiH_4 가스의 비율이 증가할수록 Si 함량이 증가함을 보이고 있다. 또한 SiH_4 의 비율이 43%이하로 떨어질 경우에도 Si 함량이 33%이하로 줄어들지는 않음을 확인 할 수 있는데 이 결과는 SiH_4/O_2 의 비를 이용한 증착 조건에서는 SiO_2 가 쉽게 생성될 수 있는 조건이라는 것을 알 수 있다.

$\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{O}_2)\times 100$ 의 값이 43%이라는 것은 SiH_4/O_2 의 유량비로 환산해보

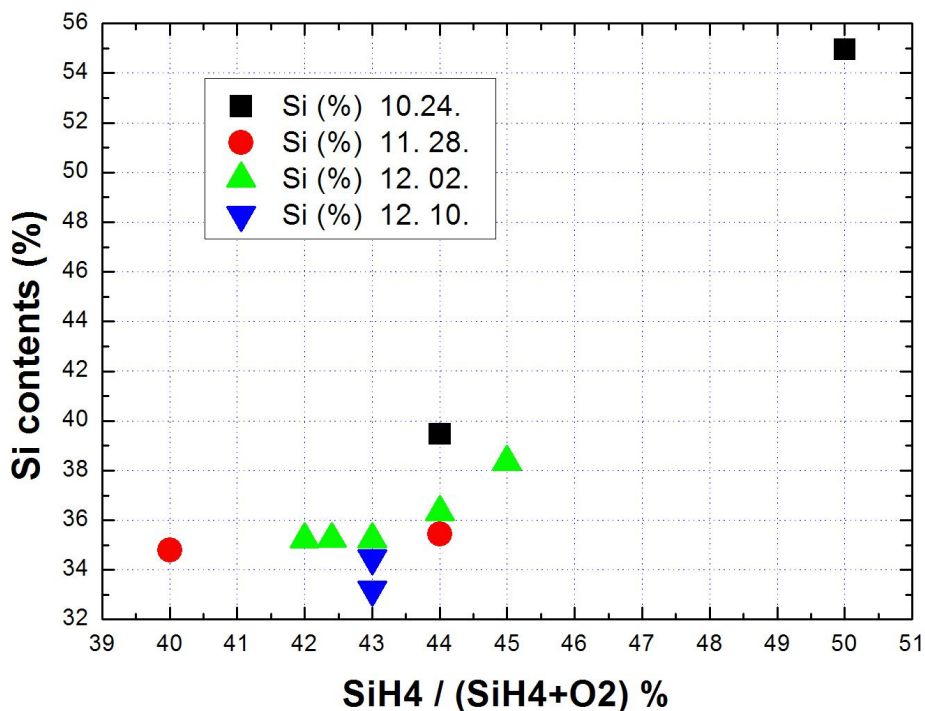


Fig. 45. Si contents of sample according to $\text{SiH}_4 / \text{O}_2$ flow ratio.

면 0.7544 가 되는데, 이는 O_2 가 25 %정도 더 주입되고 있는 것이며, 이론에서 소개한 내용과는 맞지 않음을 알 수 있다. 이론대로라면, SiH_4/O_2 가 1일 때 SiO_2 가 형성되어야 하는데, 실험에서는 O_2 가 25 %정도 더 들어가야 SiO_2 가 되고 있음을 이 결과에서 알 수 있다. 이것은 에르븀 타겟의 표면에서 에르븀이 산화되면서 일부 O_2 가 소모되고 있고, 박막내 첨가된 에르븀중 일부가 에르븀산화물로 존재하게 되면서 다시 O_2 를 소모하게 되므로, 실제 SiO_2 를 위해서는 이론보다 더 많은 O_2 를 주입해주어야 SiO_2 가 될 수 있다. 그리고 O_2 가 25 %보다 더 많이 들어가는 경우는 반응하고 남은 O_2 가 그대로 배기 되므로 SiH_4/O_2 유량비가 0.7 이하 에서는 Si함량의 변화가 없을 수 있다.

그림 40는 477 nm 레이저 펌핑시의 PL 세기의 변화를 실리콘 함량비로 나타낸 것이다. 그림 40의 결과와 같이 실리콘 함량비가 34~36 %일 때 가장 큰 PL 값이 나타남을 보였다. 실리콘 함량이 34~36 %보다 크면, SiO 의 형태로 존재하게 되어 결국 나노결정화 할 Si가 상대적으로 적어지는 상태가 되어 PL이 낮아진다. 다만 1536 nm 파장의 광자는 에르븀이온에 의해 발생하므로 에르븀의 함

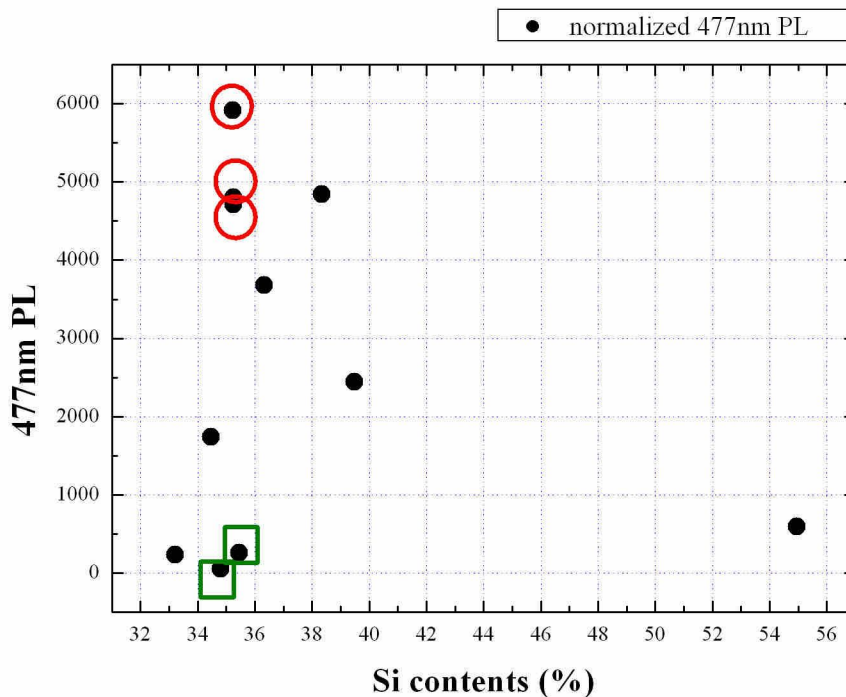


Fig. 46. PL intensities of 477nm pumping according to Si contents.

량비에 따라 PL의 크기가 변하는데 Er이 함량이 너무 적거나 너무 많아도 PL의 크기는 작아진다. 그림 40에서 초록색 사각형은 실리콘의 함량비는 34~36 %이 내의 값을 가지고 있지만 에르븀의 함량이 너무 크거나 작아서 PL 값이 낮게 나온 것을 표시한 것이다. 그림 40과 같은 조건으로 증착된 시료에 lifetime도 조사하였으며, 그림 41에 나타내었다. lifetime의 경우 실리콘 함량이 35 % 부근에서 가장 큰 값이 나타나는 것을 알 수 있는데, 그림 40과 41의 결과로부터 PL의 세기와 lifetime을 모두 고려하였을 때, 35 % 근처의 실리콘 함량을 갖는 박막을 증착할 경우 가장 좋은 특성의 샘플을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 PL과 lifetime이 크면, 결국 이득이 높게 나타나는데, 이는 증폭기를 구성하였을 때 높은 증폭율을 얻을 수 있다는 것이다.

그림 42은 박막내 에르븀의 함량에 따른 477 nm 와 980 nm 펌핑 PL의 변화를 보여주는 그래프이다. 980 nm 펌프광은 에르븀에 직접적으로 흡수되기 때문에 에르븀의 함량이 증가함에 따라 PL도 거의 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 반면에 477 nm 의 펌프광은 나노클러스터를 통해서 흡수된 후에 에르

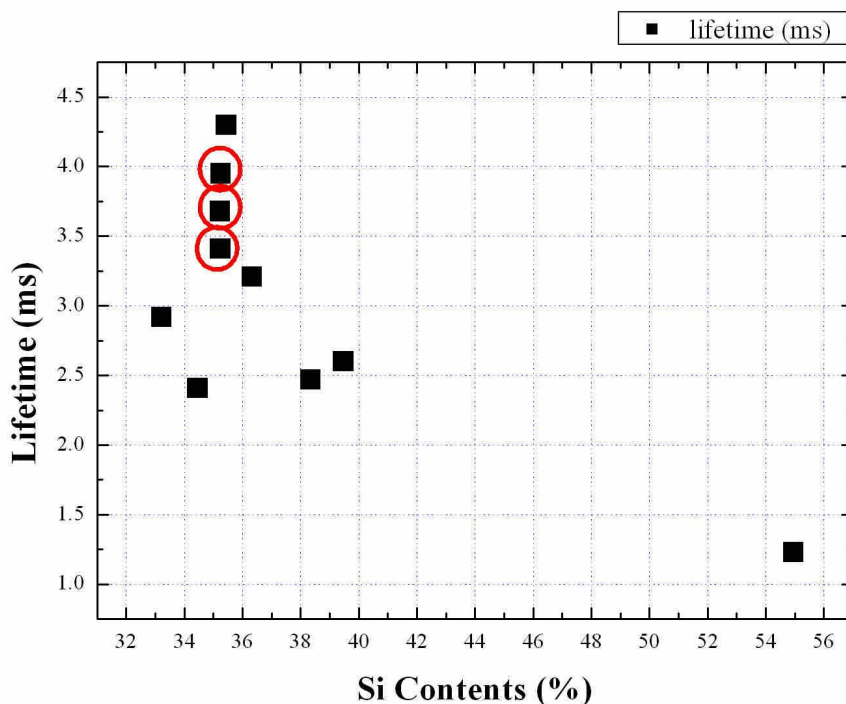


Fig. 47. Variation of lifetime of Si contents.

477 nm로 전달되어 다시 방출된 값이므로, 980 nm의 경우와는 다른 특성을 보이고 있는데, 에르븀의 함량이 0.1 % 이상 커지면 PL의 증가율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 나노결정형 실리콘이 외부에서 에너지를 전달받아 여기된 후 에너지를 에르븀 3가 이온으로 내부 전이를 할 때, 나노결정형 실리콘 주변의 에르븀이온 중 에너지를 전달받지 못하는 경우가 있다는 것을 생각해 볼 수 있다. 즉 나노결정형실리콘에서 에르븀이온으로 에너지를 전달하는데 물리적으로 에너지의 전달거리가 제한되어 있다는 것이다. 980 nm 파장의 에너지는 실제 에르븀 3가이온의 여기준위에너지와 일치 하므로 에르븀 3가이온 함량의 증가는 곧 PL의 증가로 나타나게 된다. 그러나 477 nm는 에르븀 3가이온이 여기준위 에너지보다 훨씬 커서 에르븀 3가이온을 여기 시키기 이전에 나노결정형실리콘을 먼저 여기 시키게 되는데, 이렇게 여기된 에너지가 에르븀 3가이온으로 전이된다. 이렇게 전이된 에너지가 1530nm 파장대의 광자를 방출하게 되므로 나노결정형 실리콘에서 에르븀 3가이온으로의 에너지전이가 제한을 받는다면, PL의 크기도 제한될 수 밖에 없다. 이 그림 43은 에르븀함량에 대한 lifetime의 변화를 보여주는 그래프로서, 에르븀의 함량이 0 %일때를 제외하면 기본적으로 에르븀의 함량이 증가할 수록 lifetime도 늘어나고 있다. 이는 일반적으로 에르븀의 함량이 높을수록 lifetime이 급속하게 짧아지는 EDF의 경우에 비해서 상당히 다른 결과이다. EDF인 경우 에르븀의 함량이 증가하면, 농도소광(concentration quenching)이라고 알려져 있는 현상이 나타나는데, 이것은 실리카나 글래스 내의

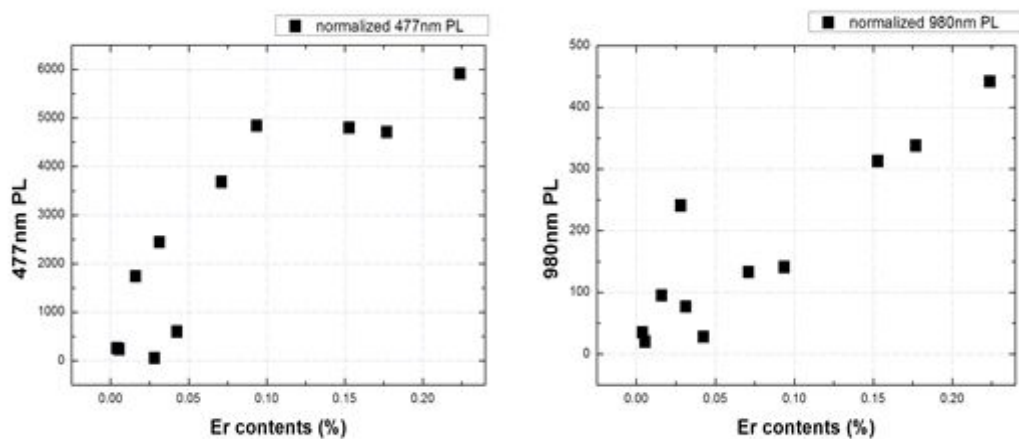


Fig. 48. 477 nm and 980nm pumped PL intensities according to Er contents.

에르븀의 농도 혹은 함량이 증가하면, 발광특성이 나빠지는 현상 이다. 그러나 그림 43은 에르븀의 함량을 늘려도 농도소광현상이 일어나지 않는 것 같이 보이는데, 이것은 에르븀이 직접 발광하는 것이 아닌 나노결정형 실리콘에 의해 에너지가 전달된 에르븀들만이 발광을 할 수 있으므로 lifetime이 에르븀의 함량에 따라 증가 한다고 할 수 있다. 다만 실리콘 함량과 에르븀의 함량에 따른 PL과 lifetime등을 비교하였을 때 가장 적합한 조성은 실리콘의 함량이 35 % 근처 에르븀의 함량이 0.1~0.2 % 사이임을 알 수 있다.

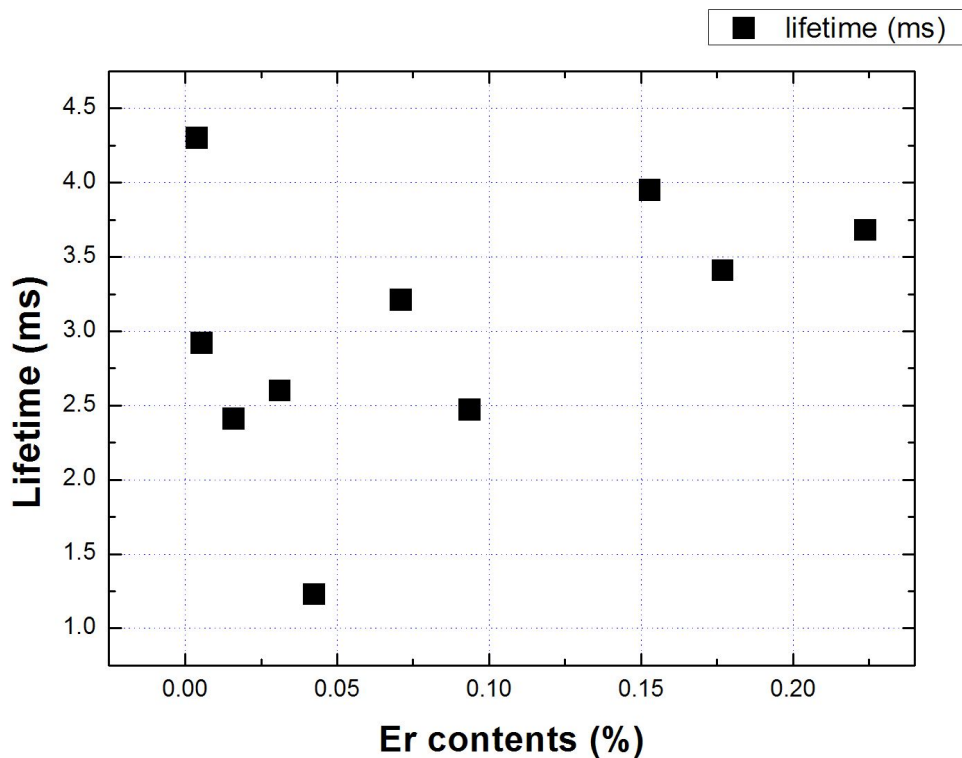


Fig. 49. Variation of lifetime according to Er contents.

5. 후 열처리 공정 온도에 따른 PL 및 lifetime의 분석

나노결정형실리콘 나노클러스터의 형성을 위하여 열처리공정을 진행하였는데, 35at% 정도의 실리콘함량과 0.05 % 정도의 Er 함량을 갖는 박막을 여러 조각으로 나누어, 열처리 조건을 다르게 하여 PL의 경향을 측정하는 실험을 통해 열처리 조건을 얻었다. 그림 44은 증착된 샘플을 900 °C에서 1200 °C까지 50 °C 간격으로 5분과 10분 동안 열처리를 한 박막에 대해 PL을 측정한 결과이다. 그림 44에서, 열처리 온도가 점점 상승함에 따라 PL 수치가 증가하지만 1100 °C 이상에서는 오히려 PL이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 5분 열처리 한 샘플보다 10분 열처리한 샘플에서 PL의 급격한 감소를 관찰할 수 있다. 박막에 열에너지가 가해지면 박막 표면이 이동 현상이 발생하면서 박막내 원소들이 재결합이 진행 된다. 즉, 박막내의 분자들이 쉽게 이동할 수 있는 상태가 되는데, 이때 SRSO/Er 샘플내의 실리카 내에서 불규칙하게 생성되어있는 실리콘들이 재결합을 하면서 결정화되기 시작한다. 열에너지의 크기에 따라 실리콘의 결정화 정도

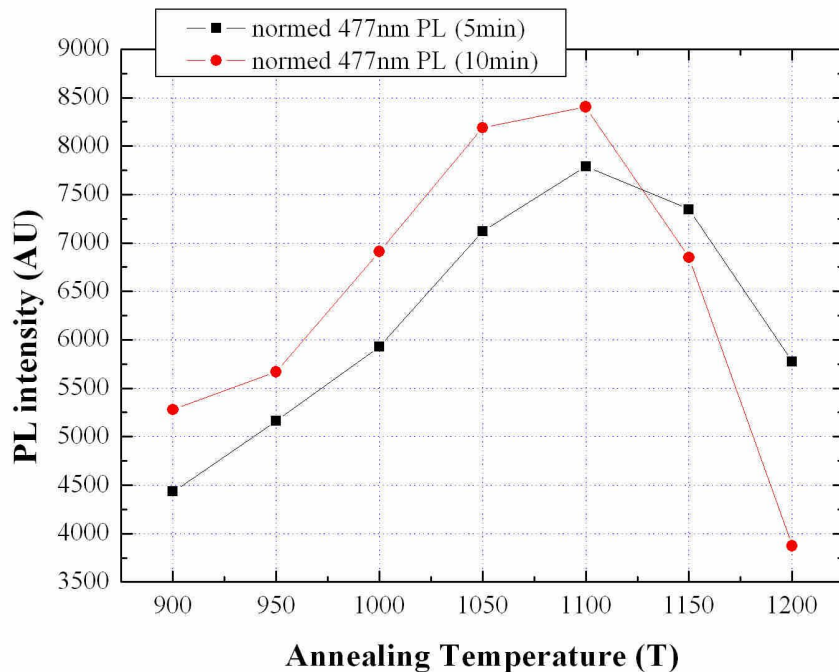


Fig. 50. PL intensities of annealing temperature.

와 시간이 정해지는데, 박막내에서 형성된 나노결정형실리콘의 크기에 따라 양자 제한에 의한 효과가 다르게 되므로, 적절한 에너지를 주어야 한다. 그림에서 확인할 수 있는 것은 PL의 크기가 특정 온도에서 크게 나온다는 것인데, 즉 이때가 나노결정형 실리콘이 에르븀이온에 에너지를 전달하기에 적합한 상태에 노이게 됨을 알 수 있다.

이론에서 언급한대로 나노결정형 실리콘의 크기가 2nm 정도일 때[87,88], 에너지 밴드갭이 1.6 eV가 되는데, 만약 크기가 이보다 더 커지면 점점 벌크형태의 실리콘으로 변하게 되므로 밴드갭이 1.1 eV 정도로 떨어지게 되고 또한 실리콘의 간접적 에너지 천이 특성이 나타나므로, 에르븀을 여기 시키기에 부족하게 된다. 2 nm 내외의 나노결정형실리콘이 생성되었을 때, 가장 좋은 발광효율이 발생하는데, 시료의 조건에서는 1100 °C 부근에서 최적의 나노결정형 실리콘이 형성되었음을 확인 할 수 있으며, 5분이 아닌 10분을 동안 열처리 과정을 적용했을 때, 에르븀으로 에너지를 전이 해줄 나노결정형 실리콘이 크기가 가장 적합한 상태가 됨을 알 수 있다. 다만, 더 장시간 열에너지를 가했으므로 1100 °C

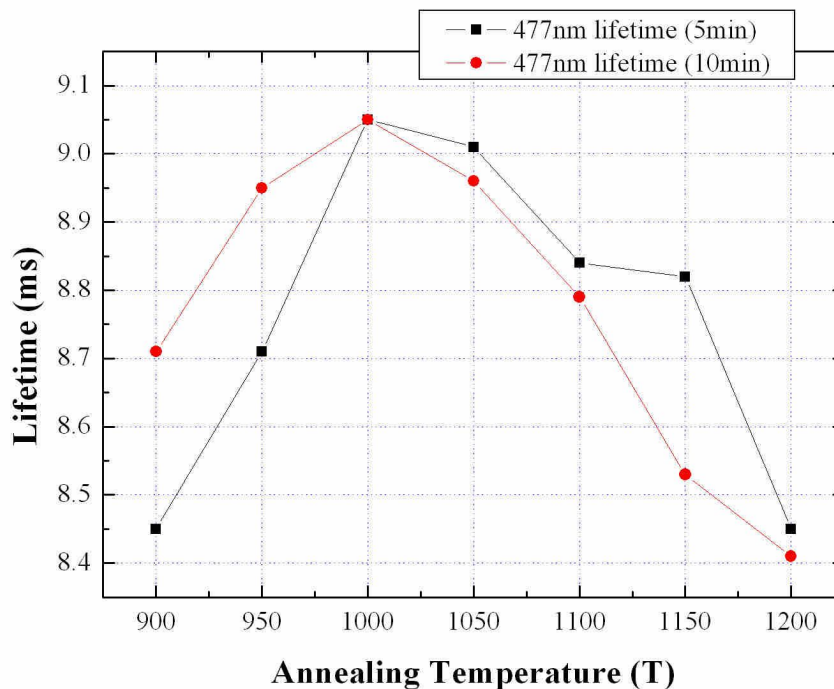


Fig. 51. Lifetime of Er according to annealing temperature.

이상에서는 나노결정형 실리콘의 크기가 급격히 늘어나 결국 PL이 낮게 나온 것으로 생각할 수 있다. 일반적으로 실리콘 농도가 높아질수록 나노클러스터를 형성하기 쉽기 때문에 열처리 온도가 감소한다는 특징은 이미 보고된 바 있다 [89].

후속 열처리 조건에 따른 에르븀의 lifetime 또한 상당한 변화를 보였는데, 이 결과는 그림 45에 보이고 있다. lifetime의 경우 PL 보다는 약간 낮은 온도인 1000 °C 부근에서 최대화 되는 것을 관찰할 수 있다. 전체 그래프의 경향은 PL의 경우와 동일 하다. 즉 박막내 나노결정화실리콘의 크기가 에너지에 의해 어느 정도 제어가 가능하다는 것을 보이는 것이고, 특정온도 이상이 되면, PL과 Lifetime이 급격히 낮아지는 것으로 부터 나노결정형실리콘의 크기가 그 온도 이상에서 급격히 커지고 있다는 것을 알 수 있다.

6. 광도파로에서의 이득 및 잡음 특성 분석

습식식각에 의해 구성된 광도파로를 렌즈 타입 광섬유로 접속할 경우 약 14.6 dB의 삽입손실을 관찰할 수 있었는데, 이는 입력과 출력단의 렌즈와 광도파로 사이의 손실, 광도파로의 진행손실, 광도파로 내부의 Er의 흡수에 의한 손실이 모두 포함된 수치이다. 광도파로의 편광방향에 따른 손실은 최대손실 편광과 최소손실 편광일때의 손실차가 약 4.3 dB 였으며, 이는 광도파로의 구조가 정사각형이 아닌 납작한 형태이기 때문에 발생하는 것이다. 박막의 두께를 4~6 um 정도로 늘리고, 폭을 4~6 um 정도로 줄여서 구성할 경우 이러한 편광별 손실은 제거할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 46은 광도파로에 -54.5 dBm의 입력신호가 입사된 경우에 펌프광원을 주입했을 때와 주입하지 않았을 때의 스펙트럼의 변화를 보여준다. 신호광의 파장은 Er의 방출스펙트럼이 가장 큰 부분에 해당하는 1535nm이다. 그림에서 검은 부분은 펌프광이 입사하지 않을 때이며, 붉은색은 펌프광원이 입사하는 경우이다. 펌프광이 입사함에 따라 신호의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있으며, Er의 방출스펙트럼에 해당하는 영역에서의 Amplified Spontaneous Emission

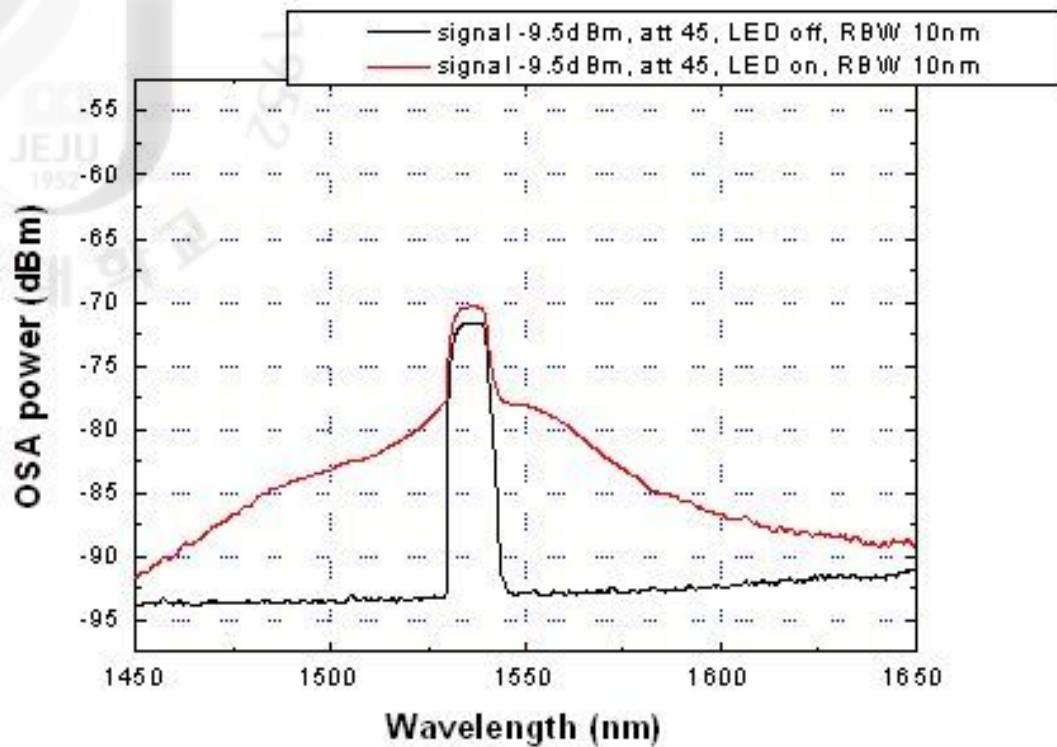


Fig. 52. Variation of signal spectrum of pump LED on-off.

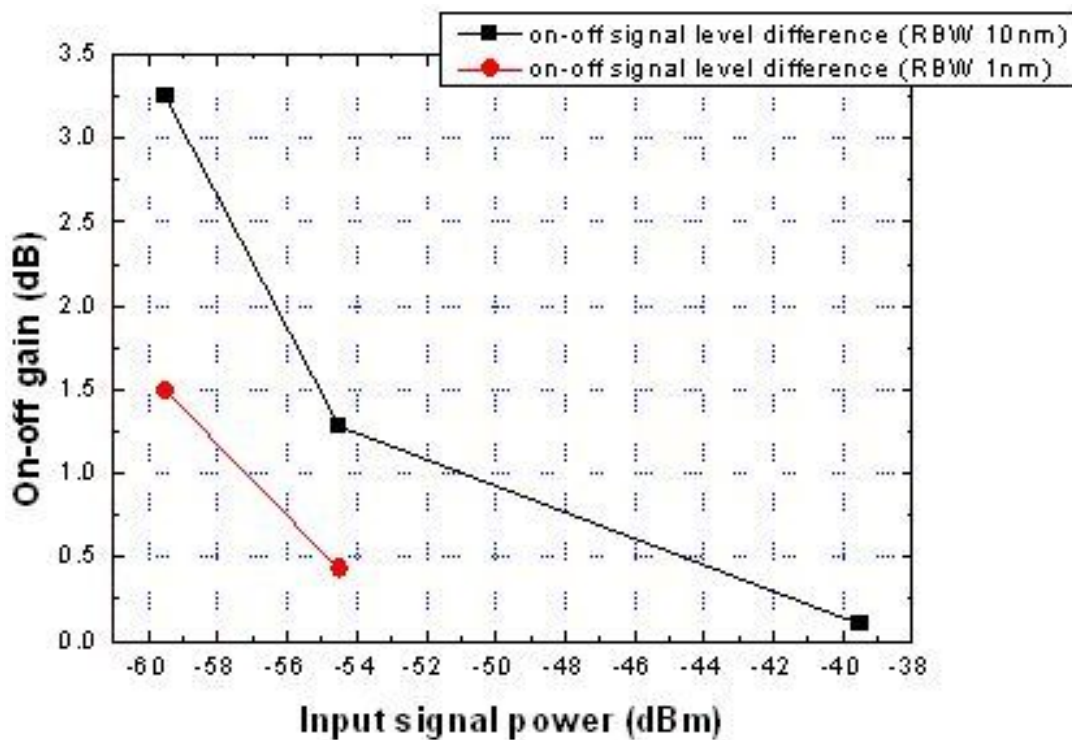


Fig. 53. On-off gain by using pump LED.

(ASE)을 관찰할 수 있다. LED의 파장인 410 nm에 해당하는 영역에서의 에르븀의 흡수선이 없으므로, 나노결정형 실리콘을 통해서 펌프광이 흡수되어 에르븀을 통해서 방출되었음을 확인할 수 있다.

입력신호의 크기가 너무 작은 경우 ASE가 신호에 더해져서 이득으로 잘못 측정되는 경우가 발생하며, 입력신호의 크기가 너무 큰 경우는 소신호 이득이 아닌 포화영역 이득이 구해지거나 또는 에르븀의 양에 비해 신호 광자의 개수가 상대적으로 많아져서 블리칭 현상으로 인해 제대로된 on-off 이득을 측정하기가 불가능하기 때문에, 다양한 입력 신호에 따라 on-off 이득을 측정하였으며, 그 내용은 그림 47에 보였다. 그래프에서, 입력신호가 커질 경우 대략 0.1~0.2 dB의 on-off 이득이 관찰되는 것을 확인할 수 있으며, 이와 같이 낮은 on-off 이득을 가지는 이유는 앞서 언급했듯이 펌프 LED의 파워가 매우 낮은 수준이기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 그림 23의 실험셋업에서와 같이 신호광과 함께 펌프광을 입사하도록 하였다.

1480 nm의 파장은 나노결정형 실리콘과 상호작용을 하지 않기 때문에, 펌프 광원의 흡수 및 신호광의 방출이 전적으로 Er를 통해서만 이루어지며, 이러한 실

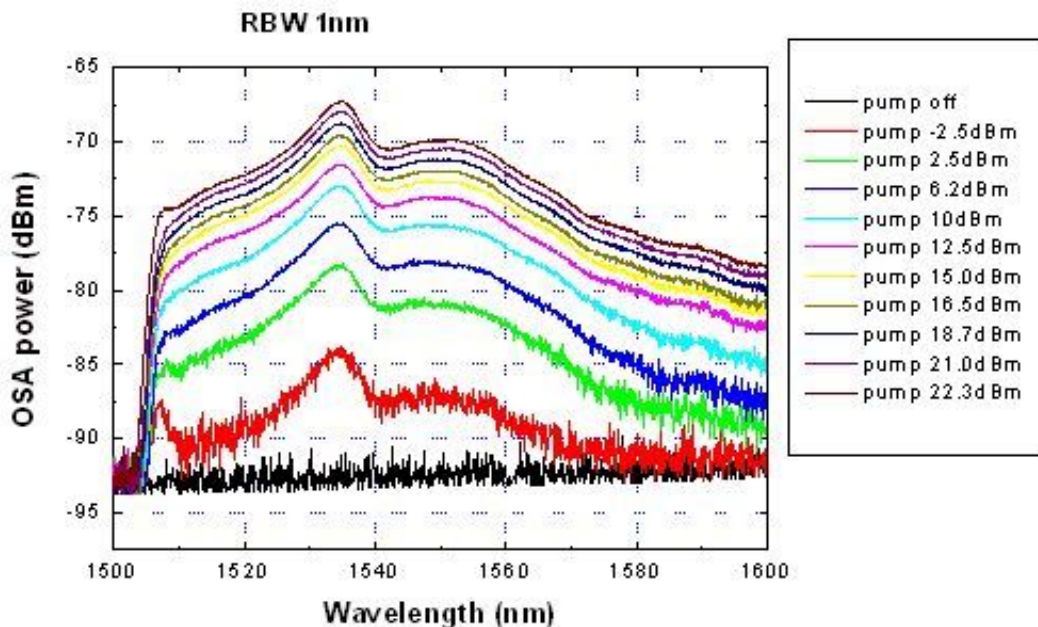


Fig. 54. ASE power of pumped by 1480nm laser diode.

험을 통해서 나노결정형 실리콘의 특성을 얻을 수는 없으나, 나노결정형 실리콘에서 에르븀 이온으로의 에너지 전이를 가정하여 에르븀의 방출단면적 및 lifetime이 변화함으로써 나타나는 이득의 변화를 관찰할 수 있다.

그림 48은 신호를 입사하지 않은 상태에서의 1480 nm 레이저의 파워를 상승시켰을 때, 광도파로 출력단과 연결된 OSA에 관찰된 출력 스펙트럼이다. 1535 nm에서 최고점을 보이며, 1550 nm에서 평탄한 대역을 갖는 전형적인 에르븀의 ASE 스펙트럼을 확인할 수 있으며, 이것은 광도파로로 입사된 1480 nm 파장의 레이저에 의해 에르븀이온의 여기되고 있음을 알 수 있는데, 펌프파워가 증가함에 따라 그 값이 같이 증가한다는 것은 에르븀이온의 농도 혹은 함량이 적정하다는 것이며, 에르븀에 충분한 에너지가 전이되면, 증폭이득을 얻을 수 있음을 말하는 것이다. 그림 49은 입력 펌프 파워 증가에 따라 ASE 스펙트럼의 최고값의 변화를 보여주는 그래프로서, 20dBm 이상의 입력 펌프파워를 사용할 경우, 앞서 LED를 사용한 실험에 비해서 ASE의 레벨이 상당히 높은 것을 확인할 수 있다. 해당 샘플의 PL 실험에 있어서, 동일한 펌프 파워를 입사 하였을 때, 나노

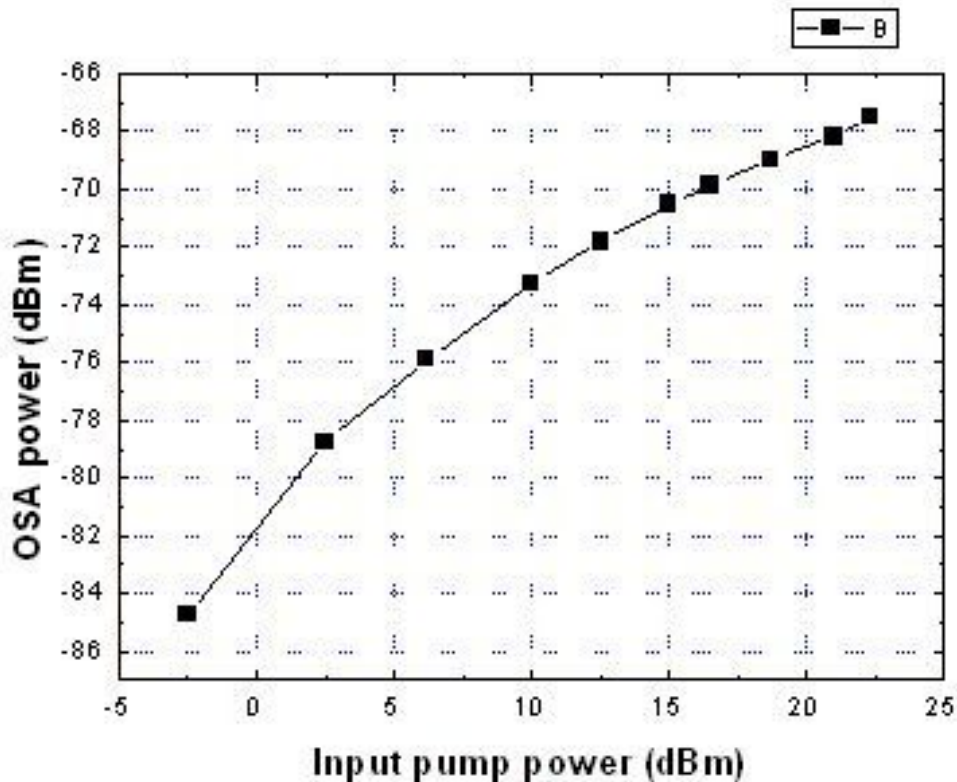


Fig. 55. ASE peak power of input pump power.

결정형 실리콘에 흡수되는 477 nm, 488 nm의 펌프광원으로 여기 시켰을 때의 PL 이 에르븀과 작용하는 980 nm 펌프로 여기 시켰을 때의 PL보다 대략 30배 정도 더 높은 값을 가졌다는 점을 볼 때, 1480 nm 펌프 다이오드와 동일 파워를 제공할 수 있는 LED 어레이를 구성한다면, 훨씬 높은 레벨의 ASE 및 on-off 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

1480 nm 펌프 다이오드를 이용해서 신호광의 on-off 이득을 측정하였는데, 그림 50는 1400 nm에서 1600 nm에 걸친 넓은 대역에서 신호 및 펌프광의 변화를 관찰한 그래프이다. 그래프에서 1480 nm의 펌프광을 입사 하였을때, 1535 nm의 신호광 주변으로 ASE가 발생하는 것을 관찰할 수 있으며, 신호의 레벨이 약간 상승하는 것을 관찰할 수 있었다. 그래프에서, 펌프광이 입사하지 않을 경우의 신호광 주변 파워는 신호레이저의 잡음이다.

신호 근처의 좁은 영역에 대해서 다양한 입력신호 파워에 대해 펌프의 on-off 에 따른 레벨 변화를 살펴보았다. 그림 51는 해당 실험의 데이터 중 일부를 보여준다. 그림 51에서 입력신호레벨이 -45 dBm 정도일 때에는 펌프에 의한

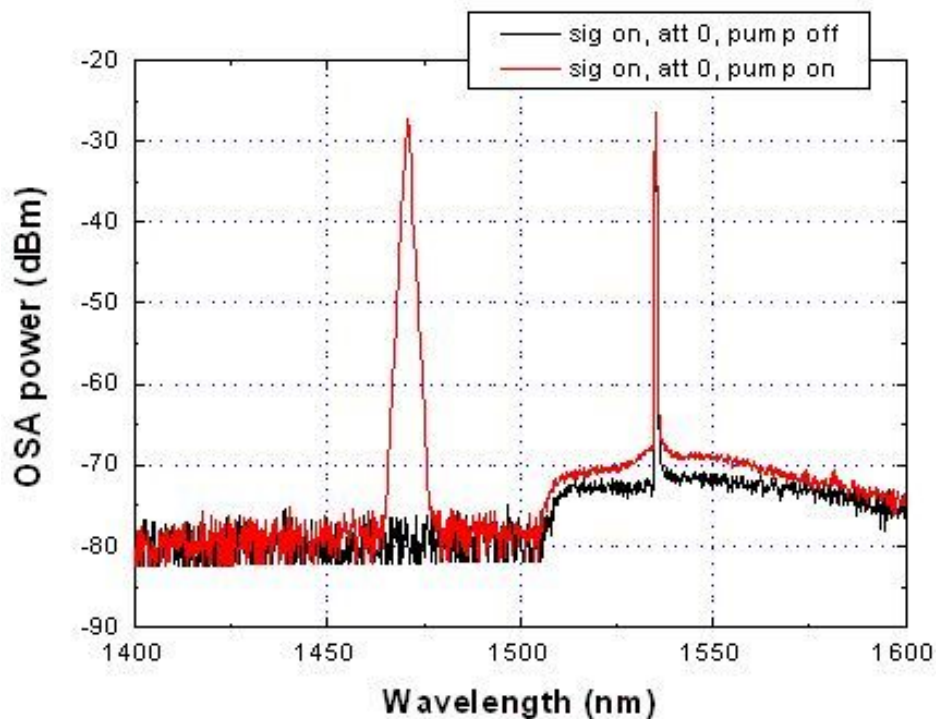


Fig. 56. Various input signal level of pump power at 1480nm.

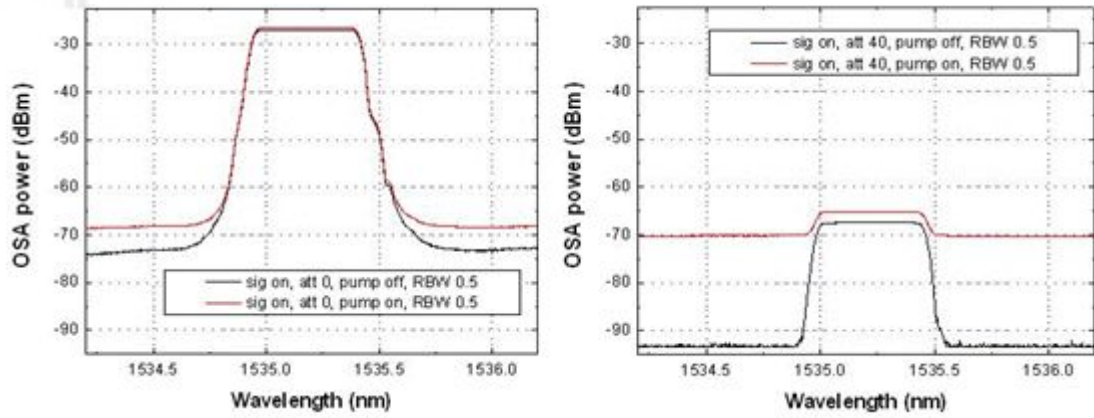


Fig. 57. Various on-off gain according to signal level.

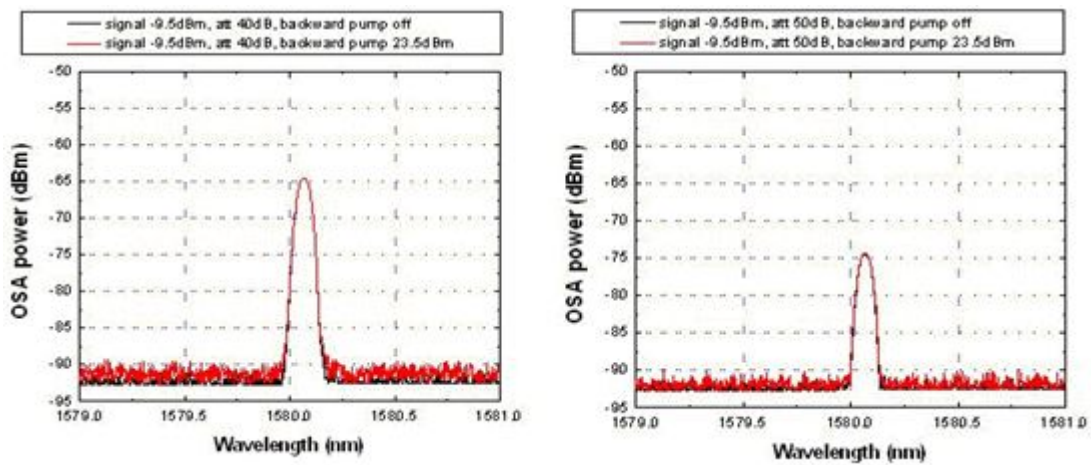


Fig. 58. Small signal data by estimated Er gain (1580nm signal).

신호레벨의 증가가 확연히 눈에 띄지만, 입력신호레벨이 -5 dB 정도로 증가함에 따라 신호레벨 증가가 거의 눈에 띄지 않음을 확인할 수 있다.

펌프광원 주입에 의한 출력 신호광 세기의 증가가 에르븀에 의한 것임을 확인하기 위해서, 1535 nm가 아닌 다양한 파장의 신호를 넣은 후 펌프광 삽입에 따라 신호레벨이 증가하는 것을 관찰하였다. 그림 52은 1580 nm의 신호를 넣은 후 펌프광을 주입하였을 때의 레벨 변화를 관찰한 그래프이다. 에르븀의 방출스펙트럼은 1580 nm을 포함하는 넓은 영역에 걸쳐있지만, 최고치에 해당하는 1535 nm보다 매우 작은 값을 가지기 때문에 해당 영역에서 신호의 레벨이 펌프광의 유무에 따라 거의 변하지 않음을 확인함으로써, 신호레벨의 상승이 에르븀의 광파워 방출에 의한 것임을 확인할 수 있었다. 실제적인 on-off 이득을 구하기 위해서, 앞서 LED 펌프를 이용한 실험과 마찬가지로 다양한 신호파위에 대해서 신호레벨의 변화를 관찰하였으며, 그 결과를 그림 53에 도시하였다.

입력신호가 너무 낮은 영역에서는 ASE가 신호에 더해져서, 마치 이득이 커 보이는 듯한 현상이 발생될 수 있으므로, 신호에서 ASE 레벨을 제외하고 실제적인 on-off 이득을 구하였으며, 그 결과를 그림 54에 정리하였다. 잡음에 의한 신호레벨의 상승을 제외할 경우, 입력신호가 -50 dBm 이하의 낮은 영역이라고 해도 1 dB 이하의 on-off 이득을 가짐을 확인할 수 있으며, 이러한 on-off 이득이 신호레벨 증가에 따라 점차 감소함을 확인할 수 있다.

실제로서 입력신호의 파워가 펌프광의 파워에 비교될 정도로 커지게 되면, 소신호 on-off 이득을 구하기 어려우므로, -30 ~ -40 dBm 근처의 적당한 영역에 해당하는 값을 소신호 on-off 이득으로 분석하였으며, 그래프에서 노란색 영역으로 표시하였다. 실험에 사용된 샘플의 길이가 3 cm 정도이므로, 단위길이당 0.2 dB 정도의 on-off 이득을 확인하였다.

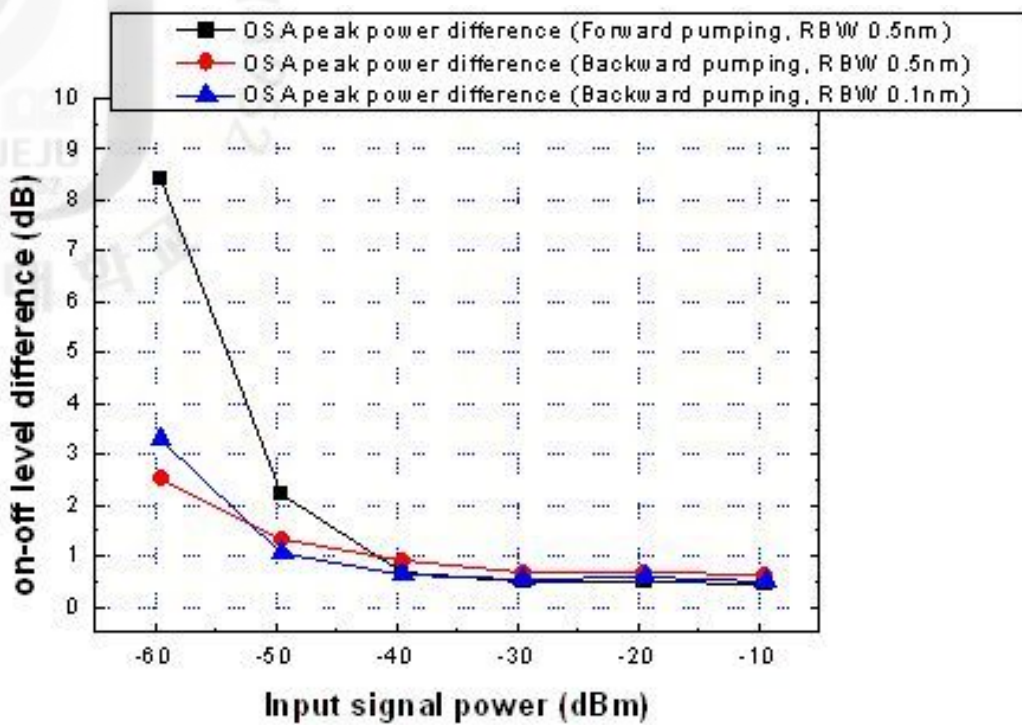


Fig. 59. Various signal level by input signal power.

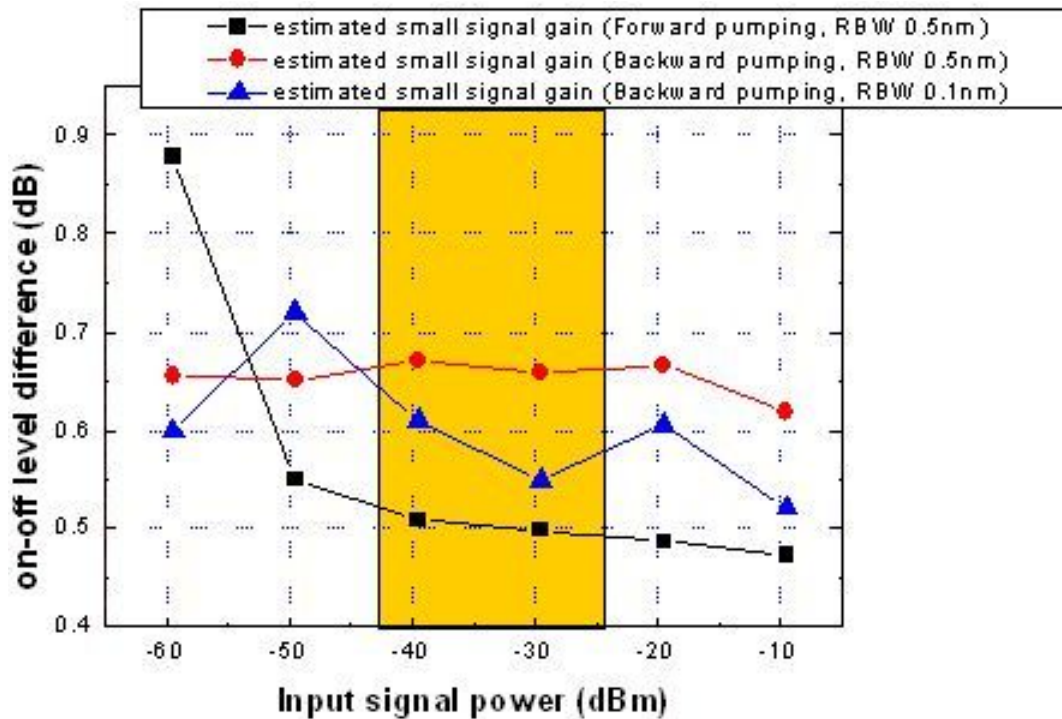


Fig. 60. Various on-off gain by input signal power.

7. 광증폭기 구조별 증폭특성의 수치해석적 분석

수치해석 모델을 바탕으로 다양한 구조를 갖는 광증폭회로의 증폭특성을 조사하였다. 우선 가장 기본적인 구조로서, 광도파로의 코어가 $7 \times 7 \text{ um}^2$ 의 정사각형 형태를 갖는 경우에 대하여 조사하였다. 이때, 나노결정형 실리콘과 에르븀은 광도파로의 코어에만 일정한 농도로 첨가되었다고 가정하였으며, 상부에서 펌핑에 사용된 펌프광의 파장은 477 nm , 신호광의 파장은 1530 nm 를 가정하였다. 그림 55의 점선은 0 dBm 입력 신호에 대해서, 광도파로의 길이에 따른 이득값의 변화를 보여준다. 일반적으로 메트로 네트워크에서 주로 요구되는 광증폭기의 성능은 0 dBm 정도 크기의 입력신호들에 대해 10 dB 정도의 이득정도가 요구된다. 5 cm 정도의 광도파로 길이면, 초소형 광증폭기를 구성하는데 충분하기 때문에 5 cm 를 기준으로 그래프를 분석하면, 이러한 10 dB 의 이득을 얻기 위해서는 약 100 W/cm^2 정도 세기의 펌프광원이 요구됨을 확인할 수 있으며, 이는 현재 상용화된 고성능 LED의 세기가 약 27 W/cm^2 정도임을 감안할 때, 상당히 높은 값임을 알 수 있다.

그림 55(a) 같은 펌프세기를 통해 얻을 수 있는 이득은 약 6 dB 정도에 불과하며, 광도파로의 길이를 10 cm 이상으로 하여야 10 dB 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 55(b)의 점선은 5 cm 길이의 광도파로에 대해 다양한 입력 신호파워에 대한 증폭기 특성을 도시한 그래프이다. 그림에서 -20 dBm 이하의 소신호가 입력될 경우 20 dB 이상의 높은 이득을 보여주지만, 신호광이 커질수록 이득이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 이러한 문제점을 개선하기 위해서, 광도파로의 하부에 금속을 코팅하여 미러의 역할을 하는 구조를 제안하였다.

이러한 구조를 도입할 경우의 증폭기의 성능은 그림 55에서 실선으로 표시되어 있다. 수직으로 입사된 펌프의 일부가 코어에서 흡수되지 못하고 버려지게 되는데, 미러를 사용할 경우 버려지는 펌프의 양을 최소화하여 증폭기의 성능이 좋아지게 되며, 이는 그림 55에서 동일 펌프 및 신호광세기에 대해 이득이 증가하는 것으로 확인할 수 있다. 하지만, 이러한 증가만으로는 목적했던 성능에 미치지 못하기 때문에, 그림 56과 같은 구조를 적용하였다.

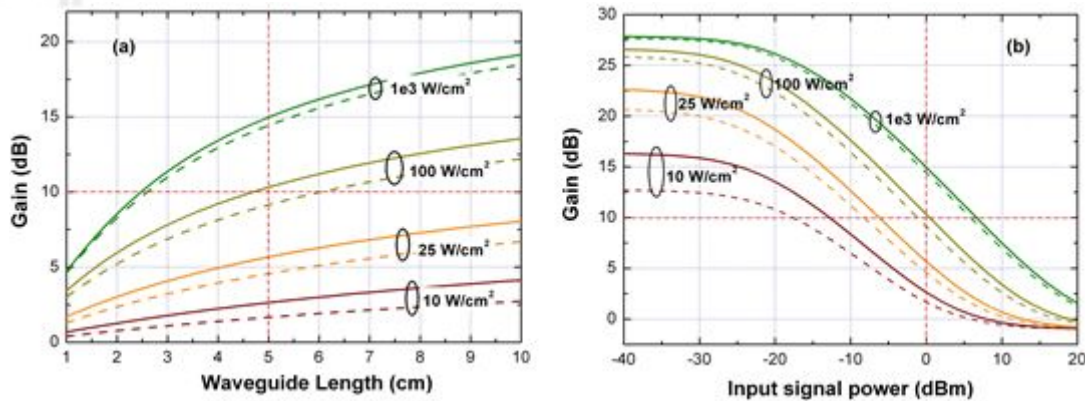


Fig. 61. Amplifier characteristics of 7x7um nc-Si/Er core EDWA : (a) gain as a function of (a) active region length and pump power change(0dBm input signal) and (b) input signal and pump power variations(for 5 cm waveguide, with and without bottom mirror: solid and dashed lines).

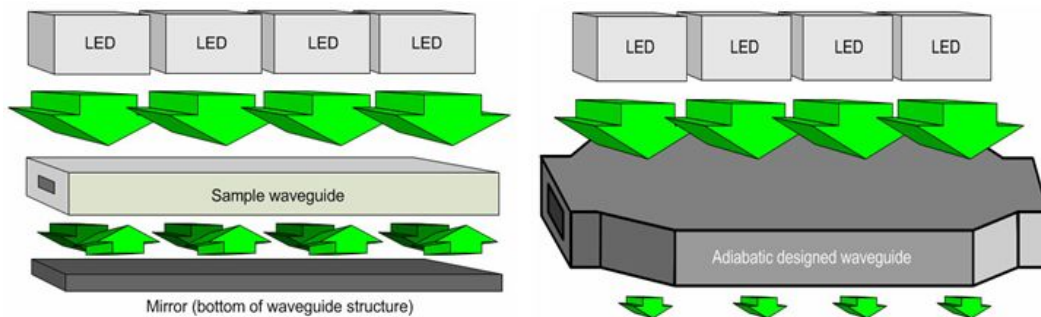


Fig. 62. Scheme of under layer mirror and adiabatic structure of TOP LED pumping.

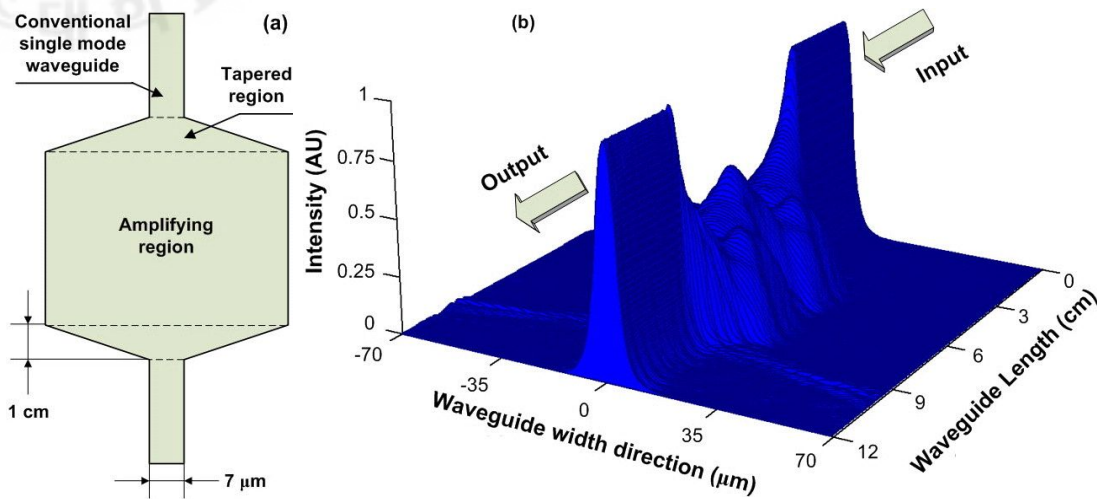


Fig. 63. (a) waveguide structure of adiabatic (b) optical mode of propagation of adiabatic waveguide.

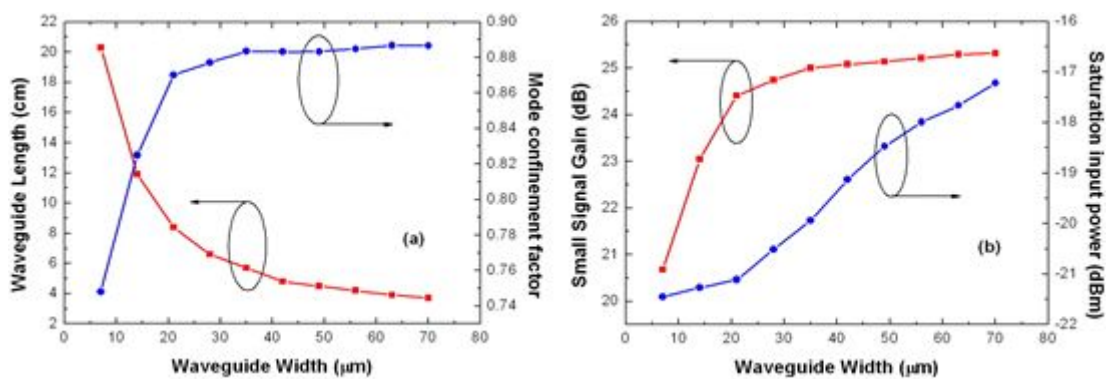


Fig. 64. (a) Calculated mode overlap factor and corresponding waveguide length for nc-EDWA (b) Small signal gain and saturation input power as a function of waveguide width.

그림 57은 adiabatic 구조의 광도파로를 보여준다. adiabatic 기술은 단일모드 광도파로와 다중모드 광도파로를 효과적으로 연결하기 위해서 제안된 구조로서, 이러한 구조를 이용할 경우, 거의 무시할 만한 수준의 손실만을 유발하면서 광도파로의 폭을 넓힐수 있다. 따라서, 그림 57(a) 처럼 LED 펌핑 광이 입사하는 영역의 폭을 넓힘으로써, 입사되는 펌프의 파워를 증가시킬 수 있고, 이는 마치 여러개의 펌프를 병렬로 연결하여 증폭기시스템을 구성하는 것과 같은 효과를 거둘 수 있게 된다. 실제로 일반적인 상용 LED의 발광면적을 고려할 경우 그 폭이 대개 200 um 정도에 이르기 때문에, 광도파로의 폭을 어느 정도 넓히더라도 추가적인 펌프 LED를 설치할 필요가 없이 광도파로의 양옆으로 버려지는 펌프광을 이용 가능하다는 장점이 있다.

그림 58(a)는 이러한 adiabatic 구조의 폭을 증가시킴에 따라, 신호 모드의 제

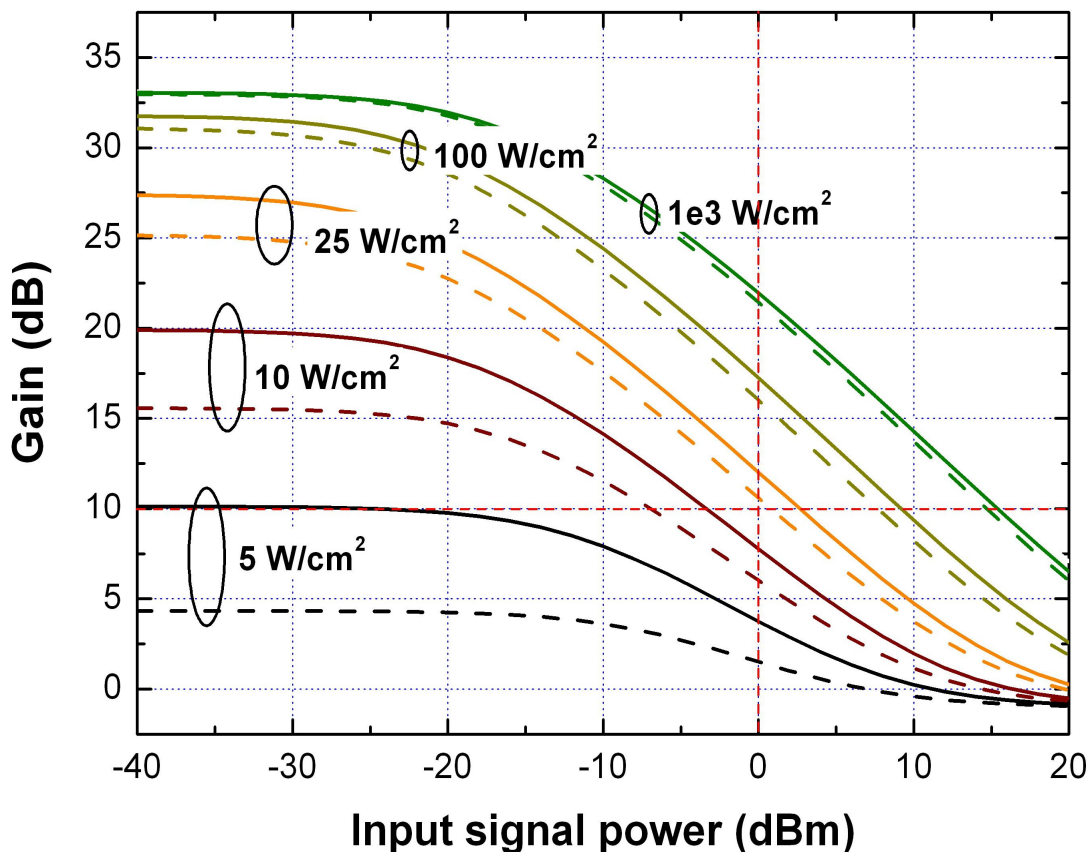


Fig. 65. nc-EDWA gain with $7 \times 50 \mu\text{m}^2$ adiabatic active core, plotted as a function of input signal power and pump intensity (for waveguide length 5cm). Solid and Dashed lines are the results with and without mirror, respectively.

한 지수가 변화하는 정도를 보여주며, 25 W/cm^2 의 펌프 LED를 사용했을 경우 0 dBm 입력신호에 대한 10 dB 이득을 얻기 위한 광도파로의 길이를 보여주는 그래프이다. 그래프에서, adiabatic 구조의 폭이 넓어짐에 따라 타겟 성능을 얻기 위한 광도파로의 길이가 급격하게 짧아짐을 관찰할 수 있다. 광도파로의 폭을 50 μm 이상으로 넓힐 경우 그 후로부터 얻어지는 이득이 미미하고, 50 μm 정도에서는 adiabatic 구조의 도입으로 인한 추가 손실이 거의 없으므로 50 μm 의 폭을 갖는 adiabatic 구조를 도입하는 것이 적절하다는 것을 확인할 수 있다.

그림 58(b)는 그림 58(a)와 마찬가지로 adiabatic 구조의 폭을 증가시킴에 따라 소신호이득과 포화입력파워의 변화 추이를 보여주는 그래프이다. 소신호 이득의 경우 광도파로 폭이 증가함에 따라 급격하게 증가하게 되는데 이는 그림 58(a)의 모드 제한 지수가 증가하는 양상과 일치한다.

포화 입력신호의 경우 증폭기의 대신호 영역 성능을 나타내는 것으로, 광도파로의 폭이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가함을 확인할 수 있으며, 이는 동일한 증폭기를 병렬로 연결하여 사용하는 것과 같은 효과에서 기인한 것이다. 이와 같은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 $7 \times 50 \mu\text{m}^2$ 의 코어 구조를 갖는 광도파로를 도입한 adiabatic 구조를 사용할 경우 증폭기의 성능이 향상됨을 확인할 수 있으며, 이러한 구조에 대해 증폭기의 성능을 측정한 것이 바로, 그림 59이다. 그림에서 5 cm 길이의 증폭기를 구성할 경우 25 W/cm^2 의 펌프세기 만으로도 충분한 소신호 이득 및 대신호 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

8. nc-Si:Er 광도파로 증폭기의 특성에 대한 수치해석적 분석

실제 네트워크에 적용가능한 광증폭기를 구성하기 위해서는 선로에서 요구하는 광증폭기의 특성을 만족시킬 필요가 있다. 이러한 특성들 중 대표적인 것으로는 소신호 이득, 대신호 이득, 잡음지수 특성을 들 수 있다. 앞에서 최적 설계된 광증폭기를 도입할 경우 메트로 네트워크에서 일반적으로 요구되는 0 dBm 입력신호에 대한 10 dB의 이득을 만족시킴을 보였다. 잡음지수 특성의 경우 일반

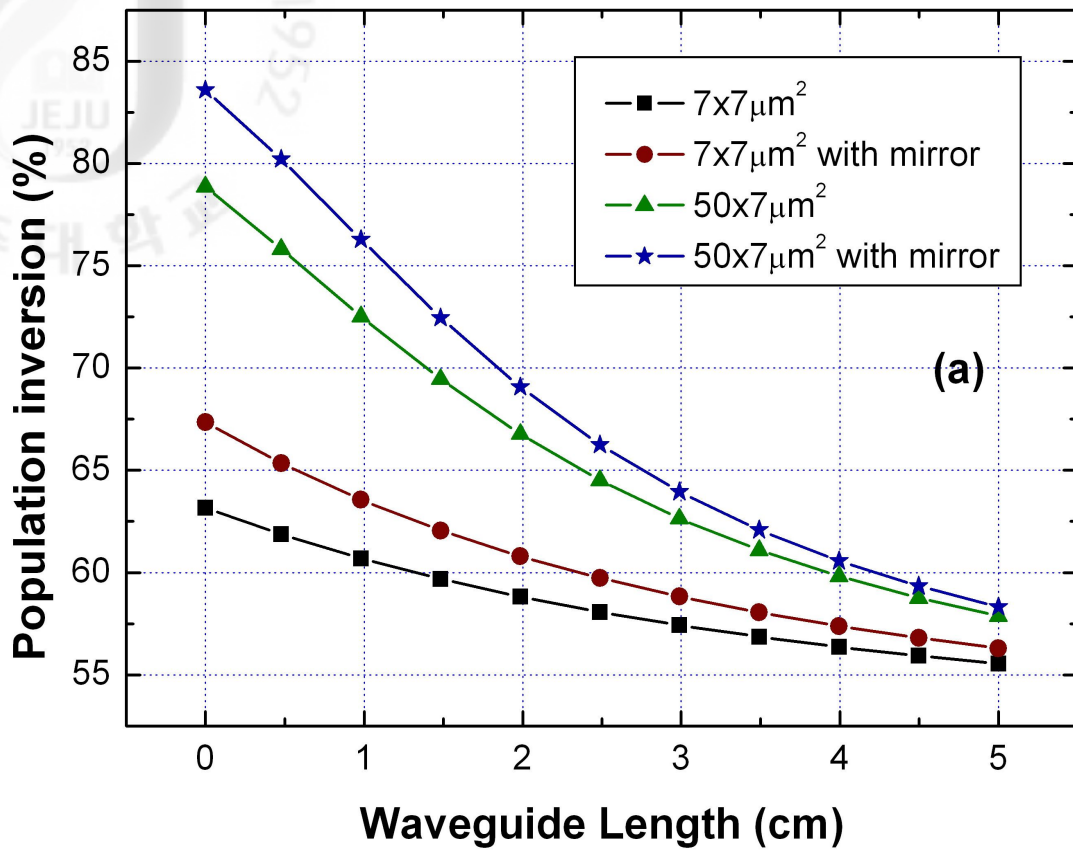


Fig. 66. Inversion distribution along the waveguide length for 5 cm waveguide length, 0 dBm input and 25 W/cm² pump intensity were assumed.

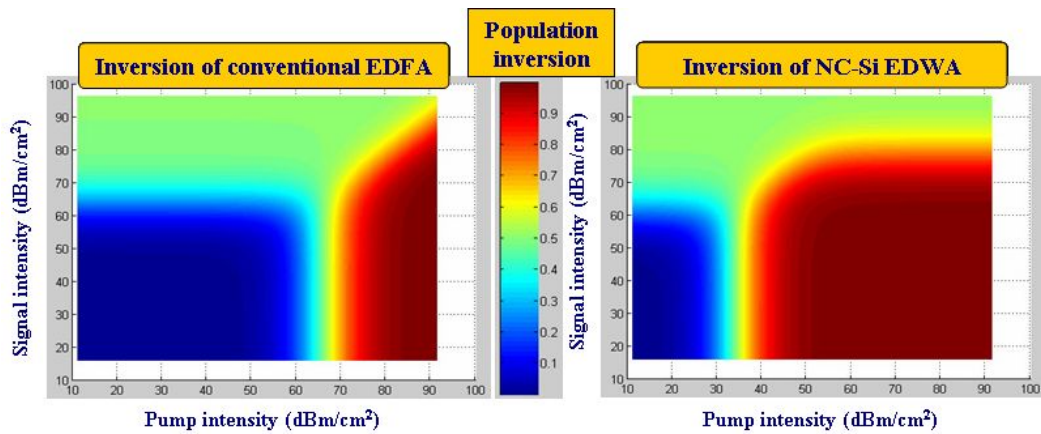


Fig. 67. Population inversion for various pump / signal intensity : (left) conventional Er in Silica, (right) Er with nc-Si in Silica.

적인 초소형 광증폭기에 대해 대개 5~6 dB 이하의 특성을 요구하게 된다. 앞서 언급했던, 7x7 코어크기의 광도파로의 경우 5 cm 길이, 25 W/cm² 펄스를 사용할 경우 이득 조건을 만족시키지 못함은 물론 12.02 dB의 잡음지수를 보이는 반면에, 하부 미러 구조를 추가할 경우 10.59 dB의 잡음지수를, 7x50 μm²의 adiabatic 구조의 경우는 5.67 dB의 잡음지수를, 마지막으로 하부미러구조를 도입한 adiabatic 구조의 경우는 4.86 dB의 잡음지수를 보이는 것을 확인한 수 있었다. 이는 최종적으로 제안된 구조를 사용할 경우, 네트워크에서 요구하는 잡음 지수 조건 또한 만족시킬 수 있음을 의미한다. 이러한 잡음 지수 개선의 메커니즘은, 증폭기 내부의 밀도반전을 끌어올리는 데에서 기인한 것으로, 그림 60은 각 구조에 대한 증폭기 내부의 밀도반전 분포를 보여준다. 일반적으로 광증폭기

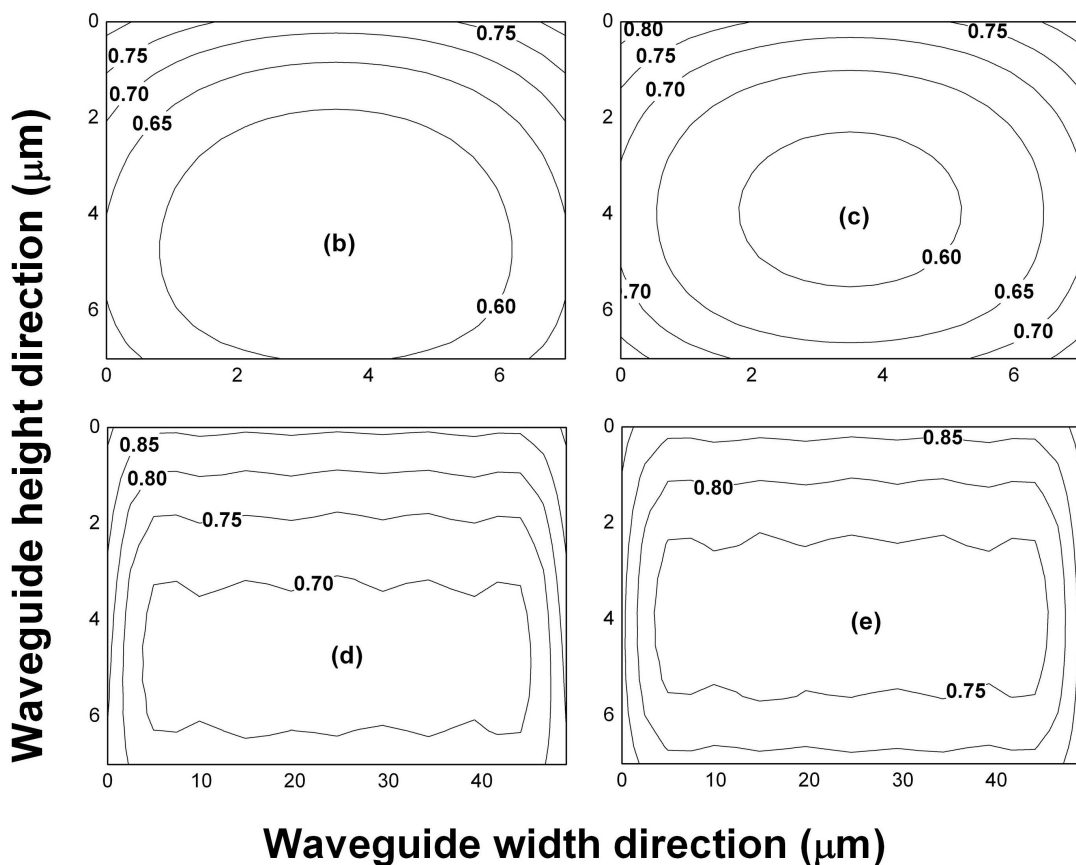


Fig. 68. Population inversion distribution of cross section of nc-Si EDWA optical waveguide structures (a) 7μm x 7μm (b) 7μm x 7μm under layer mirror (c) 50μm x 7μm (d) 50μm x 7μm under layer mirror.

는 밀도반전이 높을수록 우수한 잡음지수 특성을 보여주는데, 제안된 adabatic의 하부미러 구조 광도파로의 경우 다른 구조에 비해서 가장 높은 밀도반전 분포를 보여줌을 확인할 수 있으며, 이로부터, 앞에서 얻은 일반적인 네트워크에서의 잡음지수 요구를 만족시키는 4.86 dB의 비교적 낮은 잡음지수가 비롯됨을 알 수 있다. nc-Si EDWA의 밀도반전 분포는 일반적인 EDFA와는 달리 낮은 펌프 파워에서 상당히 높은 수준을 유지하게 되는데, 입력펌프 대 신호 파워에 대해서 일반적인 EDFA의 경우와 nc-Si EDWA의 경우에 대해 각각 밀도반전 분포를 계산한 그림 61로부터 그 차이를 명확히 파악할 수 있다.

그림 61에서 nc-Si EDFA는 동일한 신호 파워에 대해서 높은 밀도반전 (붉은 색 부분)을 얻기 위해 일반적인 EDFA보다 훨씬 더 적은 펌프 파워를 필요로 하는데, 이는 실리콘 나노클러스터의 펌프 흡수계수가 Er에 비해서 훨씬 더 크기 때문이다. 실제로 상부펌프 구조로 일반적인 EDWA를 설계할 경우, 본 연구에서 제안한 nc-Si EDWA에 비해 거의 밀도반전이 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 nc-Si EDWA에 대해서 하부미러구조 및 adiabatic 광도파로 구조를 도입해서 밀도반전을 더욱 향상 시킬수 있음을 그림 17에서 보였는데, 구조변경에 대해 이러한 성능향상이 일어나는 원리를 좀더 구체적으로 설명하는 것이 그림 62이다.

그림 62에서 일반적인 7 um x 7 um의 구조에 비해 50 um x 7 um 의 구조에서 전반적인 밀도반전의 수치가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 광도파로의 중심부에서 밀도반전이 가장 낮게 나타나는 이유는 신호 모드의 세기가 해당 영역에서 가장 큰데 반해 펌프광은 상부에서 균일한 세기로 입사하기 때문이다. adiabatic 구조의 경우 모드의 분포가 일반적인 구조에 비해 바뀌기 때문에 사각에 가까운 밀도반전 분포 등고선을 확인할 수 있다. 하부미러구조를 도입할 경우, 광도파로 하부의 밀도반전 수준이 상당히 향상되는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 하부에서 사용되지 못하고 외부로 유출되는 펌프광이 하부 미러에 의해 다시 광도파로 내부로 유입되므로써 전반적인 펌프 크기가 커지는 효과를 가져오기 때문이다.

그림 63은 실리콘 크리스탈 에르븀 첨가 광증폭기의 핵심 파라미터에 해당하는 크리스탈/에르븀 커플링 상수, 에르븀의 여기준위 라이프타임, 에르븀의

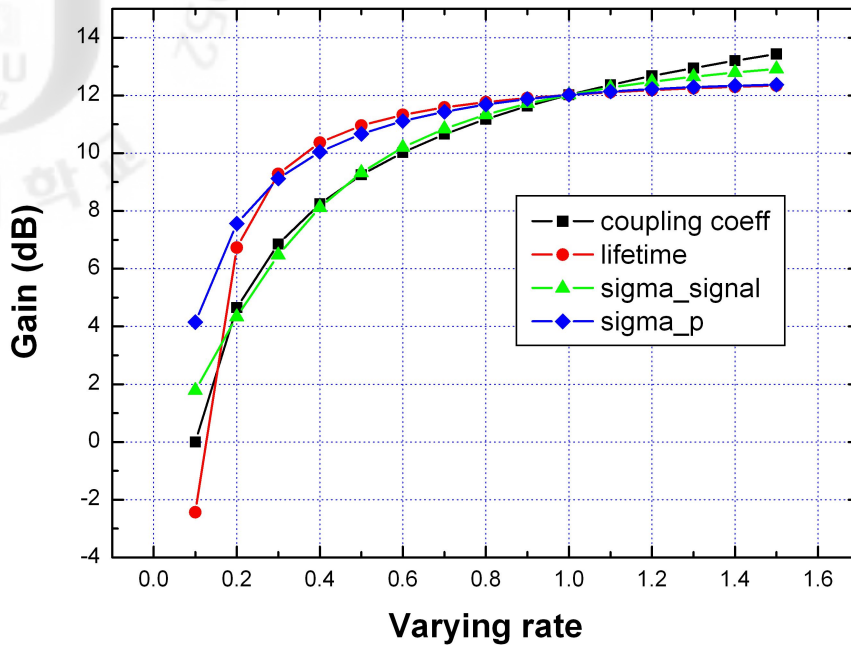


Fig. 69. Gain properties of nc-Si:Er various parameters.

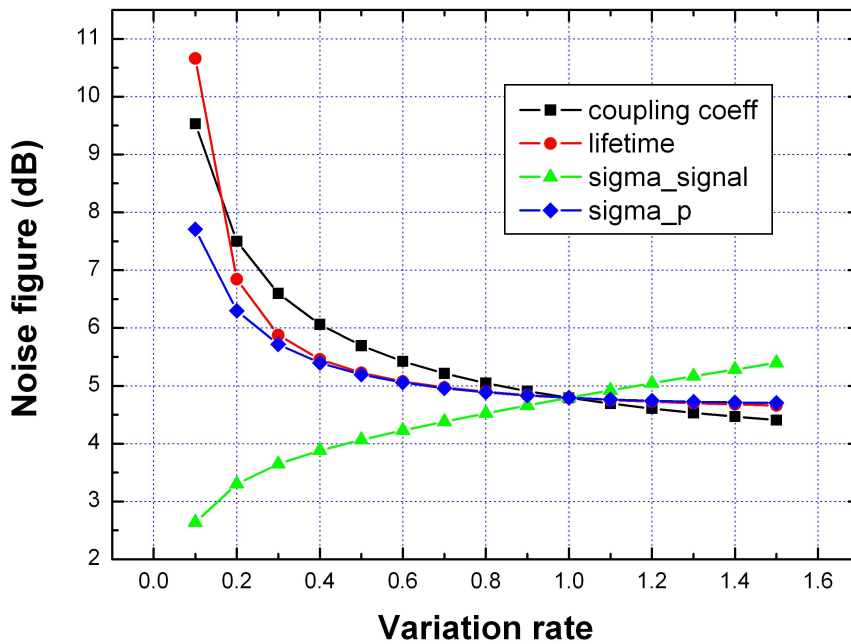


Fig. 70. Noise figure of properties of nc-Si:Er.

신호대역 방출 크로스섹션, 실리콘 나노크리스탈의 펌프광 흡수 크로스섹션 각각에 대해 기존의 최적화된 샘플로부터 추출한 값으로부터 감쇄가 일어날 경우 증폭기의 이득 특성이 변화하는 양상을 보여준다. 50 um 폭의 adiabatic 광도파로에 하부 미러구조를 도입하여, 25 W/cm²의 상부 LED 을 펌프광원으로 사용할 경우 0 dBm의 입력 신호광에 대해 약 12 dB 이득을 보이던 것이, 각 파라미터들의 값이 감쇄됨에 따라 점차 이득 특성이 나빠지는 것을 확인 할 수 있다. 하지만, 커플링 상수와 신호 방출 크로스섹션의 경우 원래값의 60 %정도로 감쇄가 일어나도 10 dB의 이득은 제공되며, 라이프타임과 펌프 흡수 크로스섹션의 경우에는 원래값의 40 % 정도로 감쇄가 일어날 경우에도 10 dB의 이득 제공이 가능함을 그래프에서 확인할 수 있다.

그림 64의 각 파라미터의 감쇄에 따른 잡음 지수의 변화를 관찰함으로써 이를 확인할 수 있다. 그림 64에서 커플링 상수의 경우 80 %정도까지 감쇄되어야 비로서 5 dB의 잡음지수가 됨을 확인할 수 있으며, 다른 파라미터의 경우는 60 % 감쇄까지는 5 dB 이하의 잡음지수를 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다.

V. 결 론

ECR-PECVD를 이용하여 SRSO를 증착하고 이 증착중에 동시 도핑 방법으로 에르븀을 SRSO박막내 첨가하기 위해 분산셀(effusion cell)을 이용한 증발증착법이나 DC 스퍼터를 이용한 스퍼터링을 이용하여, 에르븀이 첨가된 SRSO를 형성하였다.

SRSO의 형성시 동시 도핑법으로 에르븀의 농도를 0.01~0.5 %까지 조절할 수 있었으며, 특히 DC 스퍼터를 동시도핑원으로 사용하면 에르븀의 농도가 DC 스퍼터의 인가 전압에 비례하여 증가함을 보였다.

SRSO내의 에르븀의 농도가 0.1 % 까지는 에르븀의 농도가 증가함에 따라 1535nm 파장의 발광세기도 증가하였으며, 0.1 % 이상에서는 발광세기가 더 이상 증가하지 않음을 보였다. 그리고 에르븀이 첨가된 SRSO를 후 열처리 하여 SRSO에서 나노결정형 실리콘 실리카로 전이 되는 과정에 대해서도 샘플의 PL과 수명 측정을 통하여 확인 하였다.

최적의 PL 및 수명을 갖는 조성은 실리콘 함량이 34~36 %이고, 이때 에르븀의 첨가정도는 ~0.1 % 라는 것을 보였으며, 또한 후 열처리 조건은 950 °C, 5분일때가 최적의 조건임을 보였다. 최적조건일때의 PL값은 다른 조건들보다 대략 3~5배 정도 더 높게 나왔으며, 수명은 대략 최고값의 80 %정도의 값을 보였다. 이와 같은 결과로, PL과 lifetime의 관계가 서로 반비례함을 알 수 있는데, 이의 원인은 나노결정형 실리콘에서 에르븀으로의 에너지 전이에 제한 요소가 있기 때문인데, 이 제한 요소는 에르븀의 농도와 나노결정형 실리콘의 크기에 의한 것임을 보였다.

980 nm의 펌핑광을 사용한 PL의 값은 에르븀의 함량이 0.3 %이내에서는 에르븀의 함량이 증가함에 따라 PL 값도 증가함을 보였는데, 이것은 에르븀에 의한 직접 발광에 의한 것으로 이해될 수 있으며, 477 nm의 펌핑광을 이용한 PL의 값은 에르븀의 함량이 0.1 % 부근에서부터 포화되고 있음을 보였는데, 이것은 나노결정형 실리콘 주변에 아무리 에르븀의 농도를 높여도 나노결정형 실리

론에서 에르븀으로 에너지를 전이 시키는데는 제한이 있음을 보이는 결과이다.

477 nm를 펌핑광으로 사용한 PL은 SRSO에 1100 °C, 10분, Ar 분위기, 상압으로 열처리한 조건에서 가장 높은 값을 보였으며, 1100 °C이후로 급격하게 PL 값이 감소하고 있는데, 이것은 시료의 나노결정형 실리콘의 크기와 관련된 것임을 보였다.

또한 수치해석을 이용하여 설계, 제작된 광증폭기의 광 이득 특성을 측정하여 실제 광증폭기로서의 적용가능성을 보였으며, 160 mW, 1480 nm의 순방향 펌핑을 통해 이득을 관찰하였으며 이때 이득값은 1.1 dB/cm 였으며, 33 W/cm²의 488 nm 파장의 아르곤 레이저를 이용한 상부 펌핑에서는 0.2 dB/cm의 이득을 보였다.

순방향 펌핑시 광원의 세기가 충분함에도 에르븀의 밀도반전이 75 % 정도로 낮은 것과 상부펌핑시의 이득이 0.2 dB/cm로 낮아지는 것은 confined carrier absorption(CCA)에 의한 것과 에르븀의 응집에 의한 pair-induced quenching에 의한 것임을 보였다.

나노결정형실리콘의 크기와 첨가된 에르븀의 분포 및 함량은 증착조건과 열처리과정으로 조절이 가능함을 보였으며, 이렇게 조절된 조건으로 CCA의 의한 손실을 줄이고, 또한 박막생성시 동시첨가 조건과 열처리 조건을 조절하여 에르븀이 시료내에서 응집되는 정도를 감소 시키면 paired-induced quenching이 감소시킬 수 있음을 확인하였으며, 이와 같은 결과로 실리콘 나노결정에서 에르븀으로의 에너지 전달효율을 충분히 높여줄 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] G. E. Moore, Electronics, 38, 1965
- [2] J. Rattner and M. Paniccia, “50Gbps Si photonics link: Tech Overview”, Intel., 2010.
- [3] The Economist, “Pluggin the leaks”, Aug. 20th 2011.
- [4] 장선호, 이민경, 김경옥, “Silicon Photonics”, IT Soc Magazine, Vol. 23, pp.10, 2008
- [5] 박정우, 백용순, 김경옥, “초고속 인터커넥션을 위한 실리콘 기반 광소자 기술”, 전자부품, 2006
- [6] A. J. Kenyon, “Erbium in silicon”, Semicond. Sci. Technol. 20, R65–R84, 2005.
- [7] Lars Zimmermann, “State of the art and trends in silicon photonics packaging”, Silicon photonics workshop, Munich, May 23, 2011.
- [8] Ir. Danae Delbeke, “Silicon Photonics: Miniature, integrated, optical solutions for complex optical functionalities”, Silicon photonics workshop, Munich, May 23, 2011
- [9] “The hybrid Silicon Laser”, white paper, Intel, 2006
- [10] A. G. Cullis and L. T. Canham, “Visible light emission due to quantum size effects in highly porous crystalline silicon,” Nature, 353, pp. 335–338, 1991.
- [11] A. J. Kenyon, P. F. Trwoga, M. Federighi, and C. W. Pitt, “Optical

properties of PECVD erbium-doped silicon-rich silica: Evidence for energy transfer between silicon microclusters and erbium ions,” J. Phys. Condens. Matter, vol. 6, p. L319, 1994.

[12] T. Kimura, A. Yokoi, H. Horiguchi, R. Saito, T. Ikoma, and A. Sato, “Electrochemical Er doping of porous silicon and its room-temperature luminescence at 1.54 μm ,” Appl. Phys. Lett., vol. 65, p. 983, 1994.

[13] M. Fujii, M. Yoshida, Y. Kanzawa, S. Hayashi, and K. Yamamoto, “1.54 μm photoluminescence of Er^{3+} doped into SiO_2 films containing nanocrystals: Evidence for energy transfer from Si nanocrystal to Er^{3+} ,” Appl. Phys. Lett., vol. 71, p. 4525, 1997.

[14] P. G. Kik, M. L. Brongersma, and A. Polman, “Strong exciton-erbium coupling in Si nanocrystal-doped SiO_2 ,” Applied Physics Letters, vol. 76, p. 2325, 2000.

[15] F. Di Pasquale and M. Federighi, “Modelling of uniform and pair-induced upconversion mechanisms in high-concentration erbium-doped silica waveguides,” Journal of Lightwave Technology, vol. 13, p. 1858, 1995.

[16] Emmanuel Desurvire, “Erbium-doped fiber amplifier - principles and applications,” John Wiley & Sons Inc, 1994.

[17] D. Barbier, F. Maylan, “The present and future of EDWA technology”, OFC2002, 2002ind

[18] H. ennen, J. Schneider, G. Pomrenke, and A. Axmann, “ 1.54 μm luminescence of erbium-implanted III-V semiconductors and silicon”, Appl. Phys. Lett., Vol. 43, p.943, 1983.

[19] J. Michel, J. L. Benton, R. F. Ferrante, et al, "Impurity enhancement of the 1.54 μ m Er³⁺ luminescence in silicon", J. Appl. Phys., Vol. 70, p.2627, 1991.

[20] B. Zheng, J. Michel, F. Y. G. Ren, et al, "Room-temperature sharp line electroluminescence at $\lambda=1.54\mu$ m from an erbium-doped, silicon light-emitting diode", Appl. Phys. Lett., Vol. 64, p.2842, 1994.

[21] G. Franz`o, F. Priolo, S. Coffa, et al, "Room temperature electroluminescence from Er-doped crystalline Si", Appl. Phys. Lett., Vol. 64, p.2235, 1994.

[22] A. Polman, G. N. van den Hoven, J. S Custer, J. H. Shin, R. Serna, and P. F. A. Alkemade, "Erbium in crystal silicon: Optical activation, excitation, and concentration limits", J. Appl. Phys. vol. 77, P. 1256, 1995.

[23] F. Priolo, G. Franz`o, S. Coffa, A. Polman, S. Libertino, R. Barklie, and D. Carey, "The erbium - impurity - interaction and its effects on the 1.54. μ m luminescence of Er³⁺ in crystalline silicon", J. Appl. Phys., Vol. 78, p,3874, 1995.

[24] P. N. Favennec, H. L`Haridon, M. Salvi, et al, "Luminescence of erbium implanted in various semiconductors: IV, III-V, and II-VI materials", Electron. Lett. Vol. 25, no. 11, pp. 718-719, 1989.

[25] J. H. Shin, M.-J. Kim, S.-Y. Seo, and C. Lee, "Composition dependence of room temperature 1.54 μ m Er luminescence from erbium-doped silicon: oxygen thin films deposited by electron cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition," Appl. Phys. Lett., vol. 72, p. 1092, 1998.

[26] M. Stepihova, W. Jantsch, G. Kocher, L. Palmetshofer, M. Schoisswohl, and H. J. von Bardeleben, "Direct excitation spectroscopy of Er centers in porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, p. 2975, 1997.

[27] G. Franzò, V. Vinciguerra, and F. Priolo, "The excitation mechanism of rare-earth ions in silicon nanocrystals," *Appl. Phys. A*, vol. 69, p. 3, 1999.

[28] Frederic LUCARZ, "Silicon nanocrystals in erbium-doped silica for optical amplifiers", 2003

[29] Percival, R.M. Cole, S. Cooper, D.M. Craig-Ryan, S.P. Ellis, A.D. Rowe, and C.J. Stallard, W.A., "Erbium-doped fiber amplifier with constant gain for pump wavelengths between 966 and 1004nm," *Electronics Letters*, vol. 27, p. 1266.

[30] W. L. Barnes, R. I. Laming, E. J. Tarbox, and P. R. Morkel, "Absorption and emission cross-section of Er³⁺ doped silica fibers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, no. 4, 1004, 1991.

[31] G. Nykolak, P. C. Becker, J. Shmulovich, Y. H. Wong, D. J. DiGiovanni, and A. Bruce, "Concentration-dependent 4I_{13/2} lifetimes in Er³⁺-doped fibers and Er³⁺-doped planar waveguides," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, p. 1014, 1993.

[32] S. Schmitt-Rink, C. M. Varma, and A. F. J. Levi, "Excitation mechanisms and optical properties of rare-earth ions in semiconductors," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 66, p. 2782, 1991.

[33] I. N. Yassievich and L. C. Kimerling, "The mechanisms of electronic

excitation of rare earth impurities in semiconductors," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 8, p. 718, 1993.

[34] F. Priolo, G. Franzo, D. Pacifici, et al., "Role of the energy transfer in the optical properties of undoped and Er-doped interacting Si nanocrystals," *Journal of Applied Physics*, vol. 89, no. 1, pp. 264–272, January 2001.

[35] A. J. Kenyon, C. E. Chryssou and C. W. Pitt, "Indirect excitation of 1.5 μm emission from Er^{3+} in silicon-rich silica," *Applied Physics Letters*, vol. 76, no. 6, pp. 688–690, February 2000.

[36] Jinku Lee, Jung H. Shin, and Namkyoo Park, "Optical Gain at 1.5 μm in Nanocrystal Si-Sensitized Er-Doped Silica Waveguide Using Top-Pumping 470nm LEDs," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, No. 1, pp.19–25, 2005.

[37] F. Priolo, [Giorgia Franzò](#), [Domenico Pacifici](#), [Vincenzo Vinciguerra](#), [Fabio Iacona](#), and [Alessia Irrera](#), "Role of the energy transfer in the optical properties of undoped and Er-doped interacting Si nanocrystals," *J. Appl. Phys.* 89, pp. 264–272, January (2001).

[38] Fabio Iacona, [Giorgia Franzò](#), and Corrado Spinella, "Correlation between luminescence and structural properties of Si nanocrystals," *J. Appl. Phys.* 87, pp. 1295–1303, February (2000).

[39] Kei Watanabe, Minoru Fujii, and Shinji Hayashi, "Resonant excitation of Er^{3+} by the energy transfer from Si nanocrystals," *J. Appl. Phys.* 90, pp. 4761–4767, November (2001).

[40] C. Randy Giles and Emmanuel Desurvire, " Modeling Erbium-Doped

Fiber Amplifiers,” J. Lightwave Technol. 9, pp. 271–283, February (1991).

[41] P. G. Kik, “Towards an Er-doped Si nanocrystal sensitized waveguide laser - the thin line between gain and loss,” in Towards the First Silicon Laser, NATO Science Series II 93.

[42] P. G. Kik and A. Polman, “Gain limiting processes in Er-doped Si nanocrystal waveguides in SiO₂,” J. Appl. Phys. 91, pp. 534–536, January (2002).

[43] Domenico Pacifici, Giorgia Franzo, Francesco Priolo, Fabio Iacona, and Luca Dal Negro, “Modeling and perspectives of the Si nanocrystals-Er interaction for optical amplification,” Phys. Rev. B. 67, 245301 (2003).

[44] F. Gourbilleau, [M. Levalois](#) , [C. Dufour](#) , [J. Vicens](#) , and [R. Rizk](#) , “Optimized conditions for an enhanced coupling rate between Er ions and Si nanoclusters for an improved 1.54- μ m emission,” J. Appl. Phys. 95, pp. 3717–3722, April (2004).

[45] P. C. Beker, N. A. Olson, J. R. Simpson, “Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and theory”, academic, 1999.

[46] Dietrich Marcuse, “Theory of Dielectric optical waveguides - 2nd edition,” Academic Press Inc., 1991.

[47] Gary S. May and Simon M. Sze, “ Fundamentals of semiconductor fabrication,” John Wiley & Sons Inc., 2004.

[48] R. Ruppin, “ [Evaluation of extended Maxwell-Garnett theories](#) ,” [Optics Communications](#) , pp. 273–279, 2000.

[49] C. J. Oton, W. H. Loh and A. J. Kenyon, "Er³⁺ excited state absorption and the low fraction of nanocluster-excitable Er³⁺ in SiO_x," Applied Physics Letters, vol.89, p.031116, 2006.

[50] D. perry, "Handbook of Inorganic Compounds", CRC Press, 1995.

[51] Hak-Seung Han, Se-Young Seo, and Jung H. Shin, "Optical gain at 1.54μm in erbium-doped silicon nanocluster sensitized waveguide," Appl. Phys. Lett. 79, pp. 4568-4570, December (2001).

[52] Hak-Seung Han, Se-Young Seo, Jung H. Shin, and Namkwoo Park, "Coefficient determination related to optical gain in erbium-doped silicon-rich silicon oxide waveguide amplifier," Appl. Phys. Lett. 81, pp. 3720-3722, November (2002).

[53] N. Daldosso, D. Navarro-Urrios, M. Melchiorri, L. Pavesi, F. Gourbilleau, M. Carrada, R. Rizk, C. Garcia, P. Pellegrino, B. Garrido, and L. Cognolato, "Absorption cross section and signal enhancement in Er-doped Si nanocluster rib-loaded waveguides," Applied Physics Letters, vol. 86, p. 261103, 2005.

[54] Jinku Lee, Jung H. Shin, and Namkyoo Park, "Optical gain at 1.5μm in nanocrystal Si sensitized, Er-doped silica waveguide using top-pumping 470 nm LED(Post Deadline)," OFC 2004, Paper PDP19, Los Angeles, February 2004

[55] P. G. Kik, M. L. Brongersma, and A. Polman, "Strong exciton-erbium coupling in Si nanocrystal-doped SiO₂," Appl. Phys. Lett., vol. 76, p. 2325, 2000.

[56] S.-Y. Seo, M.-J. Kim, and J. H. Shin, "The Nd-nanocluster coupling strength and its effect in excitation/de-excitation of Nd³⁺ luminescence in Nd-doped silicon-rich silicon oxide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, p. 2778, 2003.

[57] D. Kovalev, G. Poliski, M. Ben-Chorin, J. Diener, and F. Koch, "The temperature dependence of the absorption coefficient of porous silicon," *Journal of Applied Physics*, vol. 80, p. 5978, 1996.

[58] M. Fujii, K. Imakita, K. Watanabe, and S. Hayashi, "Coexistence of two different energy transfer processes in SiO₂ films containing Si nanocrystals and Er," *J. Appl. Phys.*, vol. 95, p. 272, 2004.

[59] D. Pacifici, L. Lanzan`o, G. Franz`o, and F. Priolo, "Revealing the sequential nature of the Si-nanocluster-Er interaction by variable pulse duration excitation," *Phys. Rev. B*, vol. 72, p. 045349, 2005.

[60] Ivan Kaminow and Tingye Li, "Optical Fiber Telecommunications IV addation," Academic Press, 2002.

[61] H. S. Han, S. Y. Seo, J. H. Shin, and D. S. Kim, "1.54 μm Er photoluminescent and waveguiding properties of erbium-doped silicon-rich silicon oxide," *Journal of Applied Physics*, vol. 88, p. 2160, 2000.

[62] J. Palm, F. Gan, B. Zheng, J. Michel, and L. C. Kimerling, "Electroluminescence of erbium-doped silicon," *Phys. Rev. B*, vol. 54, p. 17603, 1996.

[63] S.-Y. Seo and J. H. Shin, "Carrier-induced Er³⁺ luminescence quenching of erbium-doped silicon-rich silicon oxide," *Appl. Phys. Lett.*,

vol. 75, p. 4070, 1999.

[64] P. G. Kik and A. Polman, "Gain-limiting processes in Er-doped Si nanocrystal waveguides in SiO₂," J. Appl. Phys., vol. 91, p. 534, 2001.

[65] D. Pacifici, G. Franz`o, F. Priolo, F. Iacona, and L. Dal Negro, "Modeling and perspectives of the Si nanocrystals-Er interaction for optical amplification," Phys. Rev. B, vol. 67, p. 245301, 2003.

[66] D. J. Lockwood, "Optical properties of porous silicon," Solid State Communications, vol. 92, p. 101, 1994.

[67] A. G. cullis, L. T. Canham, P. D. J. Calcott, "The structural and luminescence properties of porous silicon," Journal of Applied Physics, vol. 82, p. 909, 1997.

[68] L.C. Kimerling, K.D. Kolenbrander, J. Michel and J. Palm, H. Ehrenreich and F. Spaepen (Editors), Solid State Physics. Advances in Research and Applications, Academic Press, New York, 1997

[69] Lorenzo Pavesi and David J. Lockwood, "Silicon Photonics," Springer, Topics in Applied Physics vol. 94, 2004.

[70] H. Merterns, A. Polman, I. M. P. Aarts, W. M. M. Kessels, and M. C. M. van de Sanden, "Absence of the enhanced intra-4f transition cross section at 1.5 μ m of Er³⁺ in Si-rich SiO₂," Applied Physics Letters, vol.86, p.241109, 2005.

[71] Jung H. Shin, S-Y. Seo, S. Kim, and S. G. Bishop, "Photoluminescence excitation spectroscopy of erbium-doped silicon-rich silicon oxide," Appl. Phys. Lett. Vol. 76, pp. 1999-2001, April (2000).

[72] G. Franzo, V. Vinciguerra, and F. Priolo, "The excitation mechanism of rare-earth ions in silicon nanocrystals," *Appl. Phys. A.* 69, pp. 3–12 (1999).

[73] A. J. Kenyon, C.E. Chryssou, C. W. Pitt , T. Shimizu-Iwayama, D. E. Hole, N. Sharme , and C. J. Humphreys, "Luminescence from erbium doped silicon nanocrystal in silica: excitation mechanisms, " *J. Appl. Phys.* 91, pp. 367–374, January (2002).

[74] Hak-Seung Han "Optical gain using nanocrystal sensitized erbium," NATO Science Series II, 2003, 93, Kluwer Academic Publishers Netherland.

[75] Fabio Iacona, [Giorgia Franzò](#) , and Corrado Spinella, "Correlation between luminescence and structural properties of Si nanocrystals," *J. Appl. Phys.* 87, pp. 1295–1303, February (2000).

[76] O. Lumholt, T. Rasmussen, A. Bjarklev, "Modeling of extremely high concentration Erbium-doped silica waveguides," *Electron. Lett.* 29, pp. 495–496, March (1993).

[77] Jung H. Shin, Jinku Lee, Hak-seung Han, Ji-Hong Jhe, Se-Young Seo, Hansuek Lee, and Namkyoo Park, "Si nanocluster sensitization of Er-doped silica for optical amplifier using top-pumping visible LEDs," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* (to be published).

[78] Hansuek Lee, Jung H. Shin, and Namkyoo Park, "Performance analysis of nanocluster-Si sensitized Er-doped waveguide amplifier using top-pumped 470nm LED," *Optics Express*, vol. 13, No. 24, pp.9881–9889, November 2005

[79] Hansuek Lee, Jung H. Shin, and Namkyoo Park, "Amplification characteristics of nanocluster-Si sensitized Er-doped waveguide amplifier using top-pumped blue-green LED," Paper 6352-106, APOC 2006, Gwangju, September 2006

[80] Hansuek Lee, Namkyoo Park, Se-Young Seo and Jung H. Shin, "Performance Optimization of nanocrystal-Si sensitized Er-doped Waveguide Amplifier," Paper OWF2, OFC 2005, Anaheim, March 2005

[81] L. Tsybeskov, S. P. Duttagupta, K. D. Hirshman, P. M. Pauchet, K. L. Moore, and D. G. Hall, "Room-temperature photoluminescence and electroluminescence from Er-doped silicon-rich silicon oxide," Applied Physics Letters, 70, 1790, 1997.

[82] G. Frazo, F. Priolo, S. Coffa, A. Polman, and A. Carnera, "Room-temperature electroluminescence from Er-doped crystalline Si," Applied Physics Letters, 64, 2235, 1993.

[83] M. Matsuoka and S. Tohno, "1.54 μm wavelength emission of erbium-doped silicon films grown by ion beam epitaxy using sputtering-type metal ion source," Applied Physics Letters, 66, 1862, 1995.

[84] P. Pellegrino, B. Garrido, J. Arbiol, C. Garcia, Y. Lebour, and J. R. Morante, "Site of Er ions in silica layers codoped with Si nanoclusters and Er," Applied Physics Letters, 88, p121915, 2006.

[85] J. H. Shin, M. Kim, "Deposition and 1.54 μm Er³⁺ luminescent properties of erbium-doped hydrogenated amorphous silicon thin films by electron cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition of SiH₄ with concurrent sputtering of erbium," J. Vac. Sci. Technol. A. 17,

3230, 1999.

[86] Hansuek Lee, Hojung Ko, Soomin Cho, Seung-kyu Ha, Kyoungmin Kim, Jae-Oh Byun, Jung H. Shin and Namkyoo Park, "Optimization of the material parameters for Silicon nanocluster sensitized Er-doped waveguide amplifier (Invited Talk)," Paper TuB2-1, COIN-ACOFT, Melbourne, June 2007.

[87] V. Yu. Timoshenko, M. G. Lisachenko, et al, "comparative study of photoluminescence of undoped and erbium-doped size-controlled nanocrystalline Si/SiO₂ multilayered structures," Journal of Applied Physics, vol. 96, p. 280, 2004.

[88] Jee Soo Chang, Ji-Hong Jhe, et al, "Effects of silicon nanostructure evolution on Er³⁺ luminescence in silicon-rich silicon oxide/ Er-doped silica multilayers," Applied Physics Letters, vol. 89, p.181909, 2006.

[89] F. Gourbilleau, R. Rizk, C. Dufour, and R. Madelon, " Effects of the Si-nanocluster size on the sensitizing role towards Er ions," Eur. Phys. J., B51, pp. 341-344, 2006.

[90] A. Nazarov, J. M. Sun, et al, "Light emission and charge trapping in Er-doped silicon dioxide films containing silicon nanocrystals," Applied Physics Letters, vol. 86, P. 151914, 2005.

[91] D. Navarro-Urrios ^a, M. Melchiorri ^a, N. Daldosso ^a, et al, "Optical losses and gain in silicon-rich silica waveguides containing Er ions," Journal of Luminescence, vol. 121, p. 249, 2006.

[92] B. Garrido, C. Garcia, P. Pellegrino, et al, "Distance dependent interaction as the limiting factor for Si nanocluster to Er energy transfer in

silica,” Applied Physics Letters, vol. 89, p. 163103, 2006.

[93] M. P. Hehlen, N. J. Cockroft, T. R. Gosnell, et al, “Uniform upconversion in high-concentration Er³⁺-doped soda lime silicate and aluminosilicate glasses,” Optics Letters, vol. 22, p. 772, 1997.

[94] C. Bonafos, B. Garrido, M. Lopez, et al, “An electron microscopy study of the growth of Ge nanoparticles in SiO₂,” Applied Physics Letters, vol. 76, p. 3962, 2000.

[95] F. Iacona, C. Bongiorno, C. Spinella, “Formation and evolution of luminescent Si nanoclusters produced by thermal annealing of SiO_x films,” Journal of Applied Physics, vol. 95, p. 3727, 2004.

[96] F. Gourbilleau, R. Madelon, C. Dufour and R. Rizk, “Fabrication and optical properties of Er-doped multilayers Si-rich SiO₂/SiO₂: size control, optimum Er-Si coupling and interaction distance monitoring,” Optical Materials, vol. 27, p. 868, 2005

[97] J. H. Jhe, J. H. Shin, K. J. Kim and D. W. Moon, “The characteristic carrier-Er interaction distance in Er-doped a-Si/SiO₂ superlattices formed by ion sputtering,” vol. 82, p. 4489, 2003.

Abstract

In this study, we were deposited erbium doped silicon rich silicon oxide by using electron cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition and co-doping method, which, effusion cell and DC sputter.

We were used SiH_4 and O_2 gases to the deposition of silicon rich silicon oxide (SRSO). SRSO were transformed to a nano-crystal silicon by using RTA processor. It was investigated for deformation condition of nano-crystal silicon by used to transmission electron microscopy (TEM), electron dispersive spectrometer (EDS) and scanning electron microscopy (SEM).

We showed that the optimum conditions, the wavelength of 477 nm, 488 nm and 980 nm by optical pumping of photoluminescence (PL) and lifetime (lifetime) characteristics of the samples was confirmed by measuring the condition of the silicon content from 34 to 36 % and the content of erbium from 0.04 to 0.1%. And, RTA heat treatment conditions were optimal value of 900 ~ 1000 °C, and 5 to 10 minutes.

It was used the sample of optimal condition for configure of ridge type waveguide with upper air cladding. It was analyzed to optical properties of waveguide by a 488nm upper pump laser and the a 1480nm pump. 160 mW, 1480 nm co-propagating pump gave 75% population inversion and 1.1 dB/cm on-off gain. In contrast, only 0.2 dB/cm on-off gain was achieved at 80% population inversion by 33 W/cm² at 488nm Ar top pump. Comparing these two on-off gain values by different pumping scheme, we estimated about 20% coupled Er ratio.

We suggested numerical model to analyze and estimate the performance of nc-Si sensitized EDWA with top pump LED array. Based on the numerical analysis, optimum device structure for the top pump scheme

was provided. For optimally designed 5 cm nc-Si EDWA with the commercially available high intensity LED, 12 dB optical gain and 4.5 dB noise figure was estimated.

In the dissertation, It was estimated that the coupling coefficient, signal cross-section, lifetime and pump absorption cross-section could be allowed to satisfy 10 dB gain and 5.5 dB noise figure. and It was suggested to development condition for commercial nc-Si EDWA.

감사의 글

무모한 자신감과 막연한 호기심을 앓고, 세상의 이치에 대하여 좀더 알아보고 싶다는 열망으로 시작한 대학원 생활에서 많은 동료와 선·후배 그리고 교수님들의 도움으로 미진하나마 연구내용들을 모아 이렇게 결과를 내놓게 되었습니다.

때로는 즐겁고, 때로는 후회하던 시간들이 지금 이 글을 쓰고 있는 동안 제 머릿속을 스쳐지나갑니다. 누구든 배우길 원하는 사람들에게는 조건없이 자기가 알고 있는 내용을 열어 주어야 한다고 그것이 연구자의 도리임을 가르쳐주시고, 언제나 연구를 함에 있어서 열정을 다해야 한다고 말씀하시던 지도교수님의 가르침을 가슴속에 담아 언제나 기억하고 실천하려고 노력하는 모습의 연구자가 될 것을 이 글을 빌어 감히 약속드리며, 다시한번 지도교수이신 최치규 교수님께 감사드립니다. 또한 바쁜 와중에도 시간을 내주시어 부족한 저의 논문을 심사해주신 유영훈 교수님과 이광만 교수님께 감사의 말을 전합니다. 역시 먼 거리를 마다않고 제주도까지 직접 오셔서 저의 논문에 대해 의견을 주시고 심사를 아끼지 않으셨던 박남규 교수님과 신중훈 교수님께도 감사하다는 말을 전합니다.

소속을 달라도 같은 목표를 가지고 4년 동안 동고동락하며, 항상 열정적인 모습으로 연구를 진행하며 많은 도움을 주었던 이한석 박사에게도 이 글을 빌어 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 4년 동안 각고의 노력과 지원으로 얻어진 결과를 선 듯 제 논문에 쓰일 수 있도록 허락해 주신 렉스퍼트의 변재오 사장님을 비롯한 임직원 여러분들에게도 글로나마 감사하다는 말을 전합니다.

언제나 부지런함을 몸소 보여주시고, 제가 바른길로 가기만을 바라시며 언제나 저의 곁에서 저를 지켜주셨던 어머니, 그리고 지나침도 모자람도 없이 제가 하는 일에 관심을 가져주시고 혹여 제가 부담을 가질까봐 조용히 지켜봐주신 아버지에게도 이 글을 빌어 감사한 마음을 전해드립니다. 그리고 형으로써 부족했던 나를 믿고 따라 주었던 삼정과 문정내외에게도 이 글을 빌어 고맙다는 말을 전합니다.

또한 집안에 장손으로써의 책무를 다하지 못함에도 큰 공부 한다며 질책보다는 따스함으로 감사주신 할아버지와 할머니께도 감사하다는 말을 올리고 싶습니다.

다. 더불어 숙부들과 숙모들께도 감사하다는 말을 올리며, 혹여 제 변변찮은 기여력으로 인해 빠지거나 잘못된 이름이 쓰여질까봐 두려운 마음에 이름을 일일이 쓰지 못한 것은 넓은 아량으로 이해해 주실 것으로 저는 믿습니다.

귀한 딸을 저에게 주셔서 제가 안정된 마음으로 연구 및 생활을 할 수 있게 하여 주신 장인과 장모께도 감사하다는 말을 전해드립니다. 그리고 저를 형과 같이 따르며 믿어주었던 처남에게도 고맙다는 말을 전합니다.

그리고 저를 알고 있고 제가 알고 있는 많은 동료 선 후배들에게도 이 글을 빌어 감사하다는 말을 전합니다.

끝으로, 저에게 인생의 즐거움을 알게 해주고, 가족의 따스함을 느끼게 해주었으며 일, 연구 그리고 집안의 일을 혼자 다하느라 힘들었을 것임에도 불구하고 제가 논문작성에만 전념할 수 있도록 물심양면으로 지원을 아끼지 않았던, 제 삶의 이유이며, 제 행복의 이유인 사랑하는 나의 아내 혜영에게 이 논문을 드립니다.