

광기술 연구개발 현황

과학기술부 지정 국가지정 연구실

실리콘 광기술 연구실

신중훈
한국과학기술원 물리학과
jhs@mail.kaist.ac.kr

연구실 소개

본 연구실은 한국과학기술원 물리학과에서 지난 7여년 동안 실리콘 광 기술에 대하여 연구해 왔으며, 지난 2002년 서울대학교 물리학과 차세대 광 증폭기 연구실(박 남규 교수)와 함께 국가지정 연구실로 지정받아 실리콘 나노결정을 이용한 수직편광 광증폭기를 연구하고 있다. 본 글에서는 실리콘 광 기술과 이의 응용 예로 본 연구실이 개발한 수직편광 광 증폭 기술을 소개하고 실리콘 광 기술의 앞으로의 발전 가능성과 방향을 언급하고자 한다.

연구의 배경

정보혁명의 두 기둥은 실리콘 집적회로 기술과 광기술이라고 할 수 있다. 특히 광 기술의 발전 속도는 지난 20년 동안 무어의 법칙으로 대변되는 실리콘 기술의 발전속도를 능가해 왔으며, 비벌의 붕괴 후에도 꾸준한 성장을 보이고 있다. 그러나 광 기술은 아직도 대부분이 여러종류의 단위 부품을 조립하는 방식으로 소자제작을 이룩하고 있다. 이 때문에 광 기술의 대중화와 가격 절감은 아직도 어려움을 겪고 있으며, 이는 광 기술의 지속적인 발전에도 방해요소로 작용하고 있다. 이와는 달리 실리콘 기술은 표준화된 물질의 사용과 상대적을 단순한 표준 공정의 지속적인 반복을 통하여 집적된 소자들을 대량 생산하고, 이 과정을 지속적으로 개선하여 단가의 절감과 기술의 대중화를 이미 이룩하고 있다. 이를 비취볼 때 광 기술의 대중화와 앞으로의 지속적인 발전을 위해서는 광 기술 역시 표준화된 물질의 기반에서 집적화를 통한 대량생산 기술을 개발해야 할 것이라고 예측할 수 있다.

이의 해결책으로 최근 대두되고 있는 것이 실리콘 및 실리콘 기반 물질과 실리콘 공정을 사용하는 실리콘 광 기술이다^[1]. 실리콘은 화학적, 기계적으로 안정적이고 SiO_2 , SiN_x , Al_2O_3 등의 광학적 물질과 호환되며 광통신에서 중요한 적외선 영역에서는 실리콘 자체가 투명하기 때문에 광 소자 제작이 용이하다. 그러나 실리콘의 가장 큰 장점은 역시 실리콘 기술의 공정 및 인프라에 있어 타의 추종을 불허하는 절대적인 우위이다. 극한 예를 들자면 미국의 인텔이 2001년에 연구개발에만 투자한 자본

이 \$11 billion인데, 이는 전세계의 InP 시장과 맞먹는 크기이다. 이러한 저력이 뒷받침 하는 이상 광 집적회로의 저가의 대량 생산을 위해서 실리콘 광 기술의 개발은 절대 필수조건일 수 밖에 없다. 또한 앞으로 실리콘 집적회로가 계속 발전하면서 optical interchip connection의 필요가 도출되고 있는데, 이를 위해서라도 실리콘 광 기술은 개발되어야 한다.

그러나 현재까지 실리콘 광 기술은 실리콘의 indirect bandgap에 의한 낮은 발광효율 때문에 waveguide, mirror 등의 수동 소자에만 국한되어 왔다. 그러나 발광체가 없는 광 기술의 발전에는 한계가 있으며, 이 때문에 완전한 실리콘 광 기술의 구현을 위해서는 실리콘 기반의 발광물질의 개발이 핵심이라고 인정되고 있다.

Er-doped silicon-rich silicon oxide

지난 십 수년동안 이를 위해 연구되어 온 실리콘 기반 발광 물질로는 Er-doped silicon, Er-doped SiO₂, 그리고 실리콘 나노결정을 들 수 있다. 실리콘 나노결정의 경우 1990년 Canham이 porous silicon에서의 가시광선 영역에서의 고효율 발광을 보고하며서부터^[2] 폭발적인 관심을 얻어왔고, 최근에는 이를 이용한 LED^[3]와 optical gain^[4]까지 보고되고 있다. 그러나 실리콘 나노결정의 경우 아직도 발광효율이 낮고, 발광영역이 700-900 nm 대역으로 한정되어 있어 응용에 한계가 있는 단점이 있다. Er-doped SiO₂의 경우 희토류-doped 광섬유와 근본적으로 같기 때문에 광통신에서 중요한 1.5 μm 파장 대역에서 고효율의 발광을 얻는 장점이 있으나 이를 얻기 위해 고가의 레이저가 필요하다는 단점이 있다. Er-doped silicon은 Ennen 이 1983년과 1985년에 photoluminescence와 electroluminescence를 보고하면서 큰 관심을 끌기 시작했다^[5]. 특히 희토류 doped 반도체의 경우 희토류 원소들이 electron-hole pair들과의 강한 상호작용을 통해 Auger-excite 되기 때문에 effective excitation cross section이 SiO₂에서의 optical absorption에 비하여 백만배 이상 증가할 뿐만 아니라 광원의 파장에 거의 무관하기 때문에 고가의 레이저가 필요없는 장점이 있다. 그러나 이러한 강한 excitation mechanism은 곧 강한 de-excitation mechanism으로 연결되며, 이 때문에 Er-doped silicon의 실용적인 조건에서의 발광 효율은 응용이 불가능할 정도로 낮다는 단점이 있다.

본 연구실에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 Er-doped silicon-rich silicon oxide(SRSO)를 개발하였고^[6], 이의 지속적인 연구를 통하여 이를 실리콘 광 기술의 기반으로 사용할 수 있도록 개선하고 있다. Er-doped SRSO 박막은 Er-doped SiO₂ matrix 내부에 다수의 실리콘 나노결정이 박혀있는 구조로, 이의 도식적 구조와 TEM 사진은 그림 1에서 볼 수 있다. 이러한 Er-doped SRSO는 실리콘 나노결

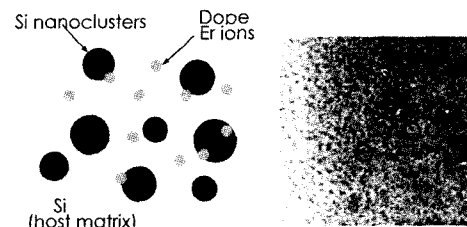


그림 1. Er-doped SRSO 박막의 도식적 구조와 TEM 사진

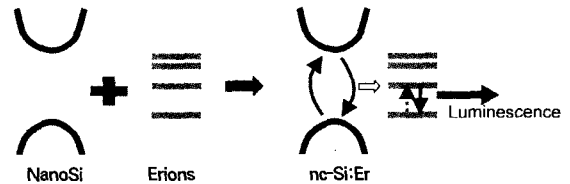


그림 2. Er-doped SRSO 박막에서의 Er 원자들의 여기와 발광의 도식적 과정

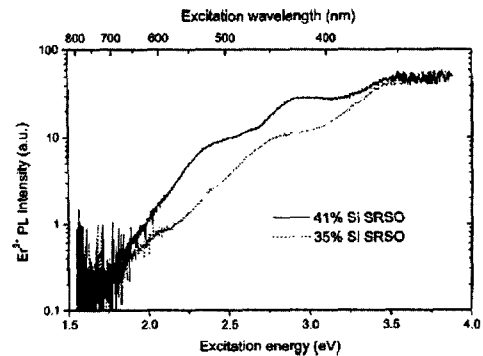


그림 3. Er-doped SRSO에서 1.54μm Er 발광의 photoluminescence excitation spectra

정, Er-doped SiO₂, 그리고 Er-doped silicon 장점만을 골라낸 복합체로 이해할 수 있다. 우선 Er-doped SRSO를 광 펌핑할 경우 절대 다수의 빛은 실리콘 나노결정에 흡수된다. 그러나 이 때 생성되는 electron-hole pair 들은 실리콘 나노결정의 발광을 일으키기 전에 SiO₂ matrix에 doping 되어 있는 Er 원자들에게 에너지를 Auger-type 상호작용을 통하여 우선적으로 전달하고, 이렇듯 여기된 Er 원자들은 Er-doped fiber와 비슷한 효율로 1.54 μm 파장의 빛을 내게 된다. 즉, Er-doped SRSO는 실리콘 나노결정의 높은 absorption cross section과 Er-doped silicon의 높은 excitation rate, 그리고 Er-doped SiO₂의 고효율의 emission cross section을 동시에 지니면서 이들의 단점은 모두 제거한 새로운 나노 복합체인 것이다. 그림 2는 이러한 Er-doped SRSO에서의 여기와 발광 과정을 도식적으로 나타내고 있다. 그림 3과 4는 본 연구실에서 electron-cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition 방식을 사용하여 증착한 Er-doped SRSO 박막의 1.54 μm 발광의 photoluminescence excitation spectra와 이 때 얻어지는 Er luminescence spectra 이다^[7]. 볼 수 있듯이 excitation wavelength와 무관하게 동일한 1.54 μm Er 발광을 얻을 수 있으며, 이는 그림 2와 같은 여기과정이 효율적으로 진행되고 있음을 보여준다.

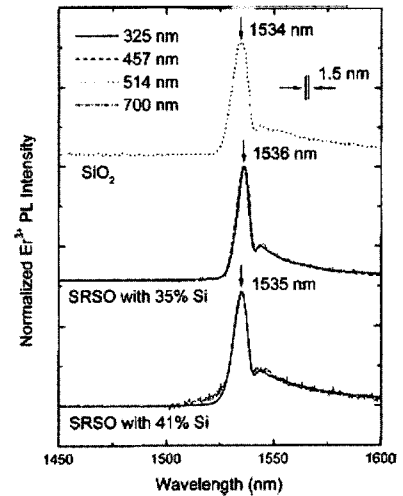


그림 4. Er-doped SRSO에서 펌핑 파장에 따른 1.54μm Er 발광 spectra

Er-doped SRSO를 이용한 수직편광 광 증폭기

신호의 증폭은 모든 network에서의 기본이다. 특히 Er-doped fiber amplifier(EDFA)는 광 신호의 all-optical 증폭과 wavelength-division multiplexing(WDM) 된 신호의 동시 증폭을 가능하게 함으로써 지난 십여년 동안의 광 통신망의 용량을 증가시키는데 획기적인 역할을 해 왔다. 그러나 EDFA는 단가와 부피가 너무 크기 때문에 현재까지는 backbone에서만 사용되고 있으며, metro/access network에서의 사용은 어렵다고 추정되고 있다. 그러나 앞으로 광 산업에서 가장 큰 성장을 보일 것으로 예측되는 시장이 바로 metro/access network이고, 광통신의 대중화를 위해서는 광 metro/access network의 구현이 필수라는 점 때문에 metro/access network에서 사용 가능한 광 증폭기의 개발에 많은 관심이 가고 있다.

이에 현재 대안으로 제안되고 있는 소자로 Er-doped waveguide amplifier(EDWA)가 있다. 그러나 EDWA를 도식적으로 나타낸 그림 5에서 알 수 있듯이 EDWA는 근본적인 목적이 광섬유를 광도파로로 대체하여 EDFA를 기판 위에 재생하는 것이기 때문에 pump laser, WDM, isolator 등의 EDFA의 단가를 결정하는 고가의 소자들을 똑 같이 필요로 하며, 이 때문에 부피와 단가의 절감에 한계가 있다. 또한 EDWA를 바탕으로 하는 집적 광소자를 구현할 경우(예: amplifying

신호의 증폭은 모든 network에서의 기본이다. 특히

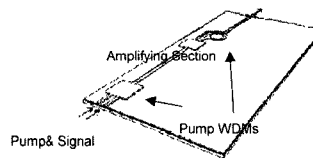


그림 5. 통상적인 EDWA의 도식적 구조 EDFA와 차이가 없음을 볼 수 있다.

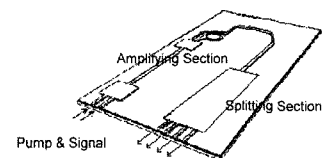


그림 6. 통상적인 amplifying splitter의 도식적 구조 집적대신 나열임을 볼 수 있다.

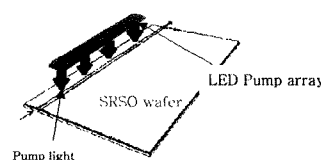


그림 7. Er-doped SRSO 수직편광 광 증폭기의 도식적 구조

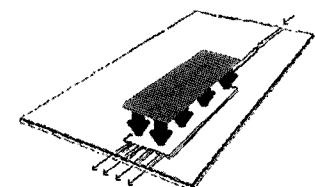


그림 8. Er-doped SRSO를 이용한 수직편광 amplifying splitter의 도식적 구조

splitter) pump 광원과 signal 광이 같은 평면에서 지나가는 구조 때문에 그림 6과 같이 여러 소자를 나열해야 할 뿐 여러가지의 기능을 한 개의 소자에 집적하는 것 역시 한계가 있다.

이러한 문제를 해결하고 광증폭기의 단가와 부피를 획기적으로 줄이기 위해 본 연구실에서는 Er-doped SRSO를 이용한 수직편광 광증폭기를 제안 하였고, 이의 개발에 전력을 기울이고 있다. Er-doped SRSO는 가시광선 영역에서의 absorption depth가 수 μm 밖에 되지 않기 때문에 pump 광원을 광 도파로에 couple 하지 않고 그림 7에서 도식적으로 나타낸것과 같이 단순히 위에서 수직으로 입사하는 것으로 충분히 Er 원자들을 여기 시킬 수 있고, 이 때 필요한 광원으로 고가의 레이저 대신 가시광선 영역의 LED 등의 저가의 광원을 사용할 수 있기 때문에 혁신적인 단가의 절감을 기대할 수 있다. 또한 Er-doped SRSO를 이용하여 광 소자를 제작할 경우 이 소자에 수직편광을 통하여 저가에 광증폭 기능을 부여할 수 있기 때문에 기능 집적화된 광소자의 구현이 가능해지고, 이는 단가와 부피의 절감으로 이어질 수 있다. 이는 Er-doped SRSO를 이용한 수직편광 amplifying splitter를 도식적으로 나타낸 그림 8을 그림 6과 비교할 경우 더 확연히 알 수 있다.

그러나 이러한 수직편광 광 증폭기를 구현하기 위해서는 단순한 발광을 넘어 광 이득을 보일 수 있을 정도의 고품질을 가진 Er-doped SRSO 박막의 제작이 필수이며, 이 때문에 해외의 수 많은 연구 그룹들도 Er-doped SRSO 박막을 이용한 광 증폭의 증명에는 실패하였다⁸⁾. 그러나 본 연구실에서는 수년 동안의 연구결과를 토대로 최적화된 나노결정 실리콘의 크기와 농도, 그리고 Er의 농도를 제시할 수 있었고, 이를 얻을 수 있는 공정의 개발을 통해 수직편광된 Er-doped SRSO 광 도파로에서의 1.54 μm 파장의 광 증폭을 세계에서 처음이자 유일하게 증명할 수 있었다^{9,10)}. 그림 9는 본 실험실에서 제작한 Er-doped SRSO waveguide의 현미경 사진과 이의 계산 및 측정된 mode profile이다. 그림 10은 이러한 waveguide를 477 nm 파장의 광원으로 수직편광 한 경우와 하지 않은 경우에 광 도파로를 통과한 1300 nm와 1535 nm 파장의 시그널 빛의 세기를 optical spectrum analyzer로 측정할 결과이다. 477 nm 파장의 빛은 Er 원자들이 흡수하지 않기 때문에 이러한 경우에 나타나는 변화는 모두 실리콘 나노결정을 통해 일어나게 된다. 볼 수 있듯이 1300 nm 파장의 시그널은 펌프 빔과는 전혀 무관하게 일정한 세기를 보여준다. 이와는 달리 1535 nm 파장의 시그널은 펌프 빔이 입사할 경우 입사하지 않은 경우보다 세기가 2배정도 더 크며, 이는 실리콘 나노결정을 통해 여기된 Er 원자들이 1535 nm 시그널을 광증폭 한다는 증거이다. 이러한 경우 그림 11에서 볼 수 있듯이 통과한 시그널의 세기는 fully dark에서 fully transparent까지 14dB/cm의 변화를 보이며, saturation은 200 mW/cm² 정도의 세기에서 일어난다.

이러한 결과를 바탕으로 예측할 수 있는 Er-doped SRSO 수직편광 광 증폭기의 성능은 상당히 고무적이다. 우선 이 경우 증폭은 Er를 통해 이루어 지므로 noise와 polarization에

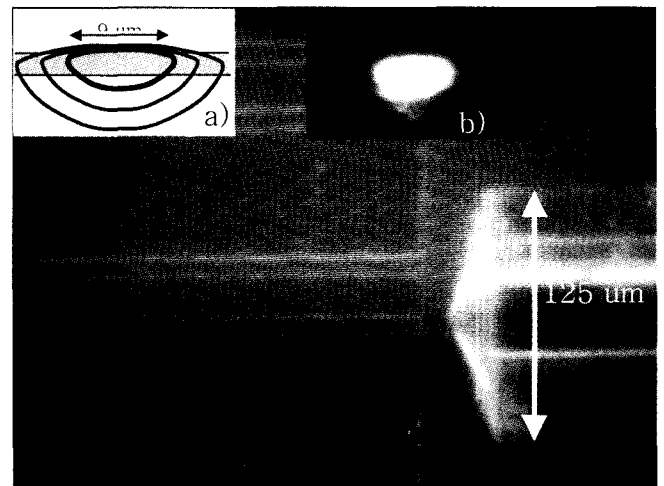


그림 9. 본 연구실에서 제작한 Er-doped SRSO 광 도파로의 현미경 사진과 도파로의 optical mode 사진

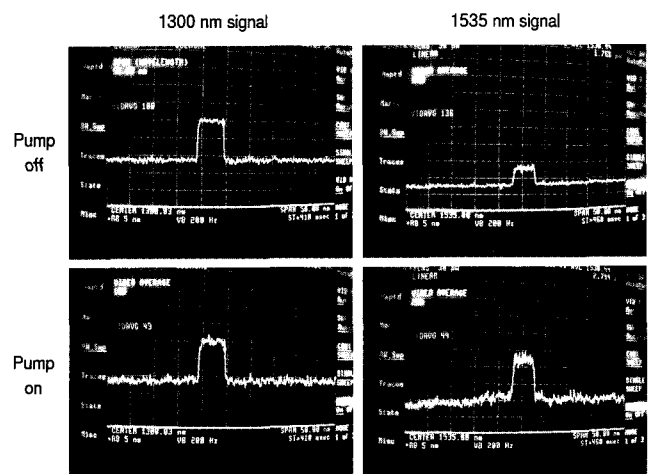


그림 10. Er-doped SRSO waveguide를 477 nm 파장의 광원으로 수직편광 한 경우와 하지 않은 경우에 광 도파로를 통과한 1300 nm와 1535 nm 파장의 시그널 빛의 세기를 optical spectrum analyzer로 측정할 결과

관한 성질은 EDFA와 비슷할 것이라고 전망할 수 있다. 그렇다면 metro/access network 에서 EDWA에 요구되는 10 dB 증폭을 만족시키기 위해서는 보수적으로 3dB/cm 광도파로 손실과 1 dB coupling 손실을 가정하더라도 3 cm 길이의 광도파로면 충분하다는 예측을 할 수 있다. 그렇다면 이러한 광 도파로를 수직펌핑하기 위해서는 600 mW의 펌프 광원이 필요한데, 이는 이미 상용화되어 팔리고 있는 GaN LED 30개(Cree, X-bright LED)로 충당할 수 있으며, 이러한 경우 광원의 단가는 몇 달러에 불과하다. 또한 GaN LED의 크기가 0.3×0.3 mm이기 때문에 하나의 pump LED 가 여러 개의 광도파로를 펌프 할 수 있다는 점과 앞으로 GaN LED의 성능 대 단가의 비율은 계속 증가할 것이라는 점을 감안한다면 Er-doped SRSO 수직펌핑 광증폭기는 광 증폭의 단가를 통상적인 EDWA나 EDFA에 비교가 불가능 할 정도로 낮출 수 있는 혁신적인 기술이라고 예측할 수 있다.

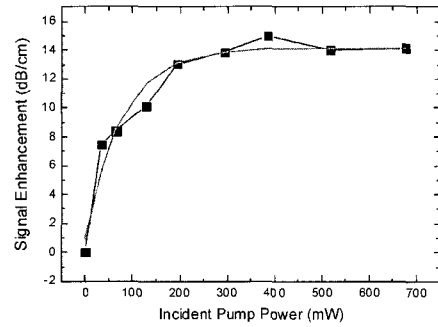


그림 11. Er-doped SRSO 광 도파로의 증폭기의 pump power에 따른 signal enhancement

미래발전 방향

Er-doped SRSO의 광 기능이 증명된 이상 이의 응용은 광도파로에 국한되지 않고 현재 연구중인 모든 미세 광소자에 응용될 수 있다. 그림 12는 Er-doped SRSO 박막을 이용한 광결정의 SEM 사진이고, 그림 13은 이러한 광 결정의 생성이 Er 발광에 미치는 영향을 보여주는 그래프이다. 볼 수 있듯이 이 광 결정은 TE-like mode에 대해 full bandgap을 가지며, 광 결정에서의 mode를 이용, Er 발광의 extraction efficiency를 100% 증가시키는 것이 가능하다. 물론 이러한 광 결정을 이용한 extraction efficiency의 증가 자체는 새로운 것이 아니다. 그러나 이러한 결과를 실리콘 기반 물질에서 보여주는 것은 이 결과가 처음이며, 또한 Er-doped SRSO 박막의 경우 발광이 doping된 희토류 원소의 core-level transition에 의해 일어나기 때문에 extraction efficiency가 온도와 pump power에 무관한 고유의 장점을 지니고 있다^[11].

그림 14는 Er-doped SRSO 박막을 이용한 microdisk cavity array의 SEM 사진이다. 이러한 microdisk는 cavity 손실이 적고 높은 Q를 가질 수 있기 때문에 실리콘 micro laser를 구현하기 위해 가장 유망한 후보로 여겨지고 있다. 현재 본 연구실에서는 이러한 microcavity에서의 발광과 이의 제어에 관한 연구가 진행되고 있다.

마지막으로 집고 넘어가야 할 점은 이러한 Er-doped SRSO의 기본 원리는 Er에 국한되어 있지 않고, 모든 희토류 원소에 비슷하게 적용될 수 있다는 점이다. 이 때문에 Er 외에 다른 희토류 원소를 doping 할 경우

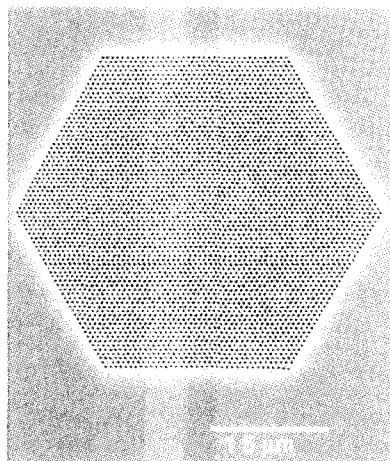


그림 12. Er-doped SRSO 박막을 이용한 광결정

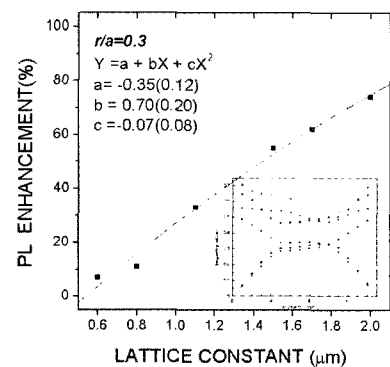


그림 13. 그림 12에서 보여진 광 결정효과에 따른 발광 extraction efficiency 증가

이 원소가 실리콘 나노결정을 통해서 여기 될 수 만 있다면 이 원소로부터의 발광을 얻을 수 있다. 더 나아가 여러가지 희토류 원소들을 함께 doping 할 경우 이들로부터의 발광을 한가지 광원을 사용하여 얻을 수 있다. 예를 들어 Er와 Tm을 동시에 SRSO 박막에 doping 할 경우 1.45 μm 에서 1.9 μm 까지의 광범위한 영역에서의 발광을 얻을 수 있다^[12]. 이 경우에는 Er 와 Tm의 상호작용 때문에 최적화된 발광을 얻지 못했으나 이는 박막의 구조를 미세 조정하여 제어 할 경우 해결할 수 있는 문제로 여겨지며, 현재 본 연구실의 연구 대상으로 남아 있다.

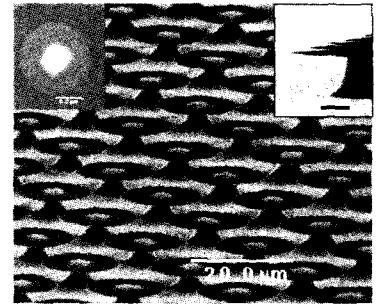


그림 14. Er-doped SRSO 박막을 이용한 microdisk cavity array

결론

Er-doped SRSO 박막은 십 수년동안 지속되어 왔던 실리콘 기반 발광 물질들의 장점을 조합한 나노 복합체이다. 본 연구실 에서는 이 물질을 개발, 개선하여 광 증폭과 광 소자의 제작을 증명하였고, 실리콘 광 기술의 가능성을 제시하였다. 필자는 실리콘 광 기술이야말로 광 기술은 물론 실리콘 기술까지 혁신시킬 수 있는 기술이라고 믿으며, 특히 실리콘 공정에 집중되어 있는 우리나라의 반도체 기술상황에서 주목해야 하는 신기술이라고 믿는다.

참고문헌

- (1) *Towards the First Silicon Laser* NATO Science Series, edited by L. Pavesi, S. Gaponenko, and L. Dal Negro (Kluwer, Dordrecht, 2003).
- (2) L. T. Canham, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1046 (1990).
- (3) G. Franzo, A. Irrera, E. C. Moreira, M. Mirtello, F. Iacona, D. Sanfilippo, G. Di Stefano, P. G. Fallica, and F. Priolo, *Appl. Phys. A*, **74**, 1(2002).
- (4) L. Pavesi, L. Dalnegro, C. Mazzoleni, G. Franzo, and F. Priolo, *Nature (London)* **408**, 440 (2000).
- (5) H. Ennen, J. Schneider, G. Pomrenke, and A. Axmann, *Appl. Phys. Lett.* **43**, 943 (1983).
- (6) J. H. Shin, M. Kim, S. Seo, and C. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1092 (1998).
- (7) Jung H. Shin, S-Y. Seo, S. Kim, and S. G. Bishop, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1999 (2000).
- (8) P. G. Kik and A. Polman *J. Appl. Phys.* **91**, 534 (2002).
- (9) Hak-Seung Han, S-Y. Seo, and Jung H. Shin, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 4568 (2001).
- (10) Hak-Seung Han, S-Y Seo, Jung H. Shin, and Namkyoo Park, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 3720 (2002).
- (11) Yong-Seok Choi, Joo Yeon Sung, Se-Heon Kim, Jung H. Shin, and Yong-Hee Lee, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3239 (2003).
- (12) S-Y. Seo, Jung H. Shin, B-S Bae, N. Park, J. J. Penninkhof, and A. Polman, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3445 (2003).