

SOI 응용을 위한 반도체-원자 초격자 다이오드의 광전자 특성

서 용 진

대불대학교 전기전자공학과

Optoelectronic Properties of Semiconductor-Atomic Superlattice Diode for SOI Applications

Yong-Jin Seo

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Daebul University

초 록: 증착온도와 어닐링 조건에 따른 반도체-원자 초격자 구조의 광전자 특성이 연구되었다. 나노 결정의 Si-O 초격자 구조는 MBE 시스템에 의해 형성되었다. 다층의 Si-O 초격자 다이오드는 매우 안정한 포토루미네스스 특성과 높은 브레이크다운 전압을 갖는 양호한 절연 특성을 나타내었다. 이러한 결과는 미래의 초고속 및 저전력 CMOS 소자에서 SOI 구조의 대체 방안으로 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 실리콘계 광전자 소자 및 양자 전자 소자에도 응용될 수 있을 것이다.

Abstract: The optoelectronic characteristics of semiconductor-atomic superlattice as a function of deposition temperature and annealing conditions have been studied. The nanocrystalline silicon/adsorbed oxygen superlattice formed by molecular beam epitaxy(MBE) system. As an experimental result, the superlattice with multilayer Si-O structure showed a stable photoluminescence(PL) and good insulating behavior with high breakdown voltage. This is very useful promise for Si-based optoelectronics and quantum devices as well as for the replacement of silicon-on-insulator (SOI) in ultra-high speed and lower power CMOS devices in the future, and it can be directly integrated with silicon ULSI processing.

Keywords: Superlattice, Nanocrystalline, Optoelectronics, Molecular beam epitaxy(MBE), Photoluminescence, Silicon-on-insulator(SOI), Quantum, Raman scattering

1. 서 론

반도체 소자는 현대 전자 시스템에서 빠질 수 없는 매우 중요한 요소이다. 실리콘과 III-V 족 화합물 반도체 계열인 GaAs 등은 가장 널리 사용되고 있는 반도체 물질이다. 이들 중에서 실리콘은 오늘날 우리의 일상생활에 지대한 영향을 주고 있는 마이크로-나노일렉트로닉스 혁명을 지배하고 있는 IC 전자산업에서 괄목할 만한 위치를 차지하고 있다. 그 이유는 MOS 소자의 기본이 되는 SiO₂막을 Si 웨이퍼 위에 쉽게 성장할 수 있고, 또한 실리콘은 비교적 값이 싸며, CMOS-ULSI 회로 공정

과 잘 호환되며, 공정이 용이하여 새로운 소자 개발을 위한 중요한 잠재력을 갖고 있기 때문이다.

따라서 차세대 나노 CMOS 소자에도 적용하기 위해서는 무엇보다도 현재의 실리콘 집적기술과 호환되어야 한다는 것이다. 실리콘은 GaAs와 같은 화합물 반도체보다 더 느린 이동도를 갖고 있을 뿐만 아니라 기존의 III-V족 고속 소자의 기본이 되는 헤테로접합 장벽(hetero-junction barrier)이 없으며, 간접 천이형 밴드 갭 구조를 가지고 있어서 광학 소자에 중요한 역할을 하지 못했었다. 그러나 1990년 다공성 실리콘(porous silicon)으로부터 가시광선 영역의 포토루미네스스(photolumi-

nescence) 발견¹⁾은 광전자 산업에 커다란 자극을 주어 실리콘 집적회로 공정과도 호환이 될 수 있는 새로운 공정이 가까운 장래에 광소자에도 적용될 수 있을 것으로 보인다. 최근 광전자공학(optoelectronics) 및 포토닉스(photronics) 분야에서 Si의 응용 가능성에 대한 연구가 시도되었다^{2,4)}. 따라서 Si 계의 광전자공학(Si-based optoelectronics)을 구현하기 위해서는 광방출 소자들이 Si으로 만들어져야 하며, 또한 모든 광학 및 전자 소자 성분들이 Si 집적회로 제조공정과 호환되어 Si 기판 위에 제조될 수 있어야 할 것이다. 본 논문에서는 실리콘 계의 광전자 소자 개발을 향한 몇 가지 가능성을 조사하기 위해 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy) 시스템으로 형성된 다층의 나노결정(nano-crystalline) Si-O 초격자의 전기적 특성과 포토루미네스스 특성에 대해 연구하였다. 실험 결과, 다층의 Si-O 초격자 구조는 안정된 포토루미네스스 특성과 우수한 절연 특성을 나타내었다. 이는 실리콘계 광전자 소자의 제작이 가능하며, 기존의 Si ULSI 공정으로도 쉽게 집적될 수 있음을 보여주는 것이다. 따라서, 본 연구는 향후 3D-IC(3-dimensional integrated circuits)를 위한 SOI(silicon-on-insulator)의 대체 가능성뿐만 아니라, 고속과 저전력을 필요로 하는 MOSFET 소자에도 적용될 수 있을 것이다.

2. 실험

결정방향이(100)이고, 저항율이 $\rho \approx 0.01 \sim 0.1 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 n형 단결정 실리콘 기판을 사용하였다. 시료들은 성장 챔버의 베이스 압력이 $\sim 10^{-10}$ Torr인 UHV(Ultra High Vacuum)-MBE(Molecular Beam Epitaxy) 시스템을 사용하여 준비하였다.

기판온도는 $550 \sim 600^\circ\text{C}$ 를 유지해주었으며, Si의 성장 속도는 비교적 낮은 $\sim 0.5 \text{ nm/s}$ 이었다. 전기적인 측정을 위해 10^{17} cm^{-3} 의 Sb가 20 nm의 버퍼(buffer)층에 도핑되었다. 9층의 Si-O 초격자를 만들기 위해 10^{-7} Torr의 성장 챔버에서 Epi-Si를 증착하였고, 분석 챔버에서 산소노출(oxygen exposure)이 수행되었다. 마지막으로 Sb가 도핑된 4-5 nm의 Si 캐핑(capping)층이 초격자(superlattice)를 캐핑 하고, 전기적인 콘택(contact)을 용이하게 하기 위해 9층 위에 증착되었다. MBE 증착이 완

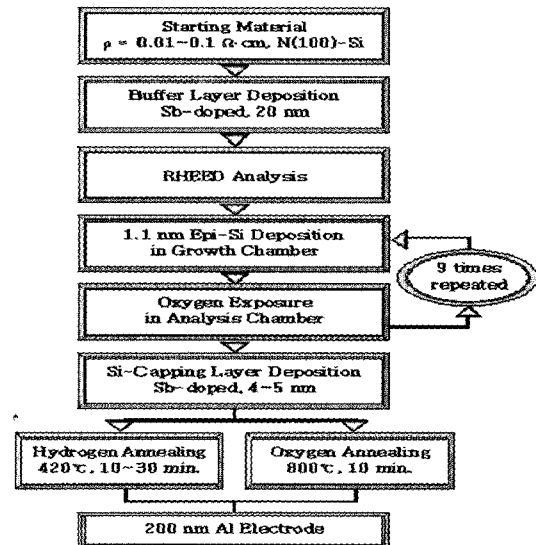


Fig. 1. Flow chart for manufacture of nc-Si/O superlattice device.

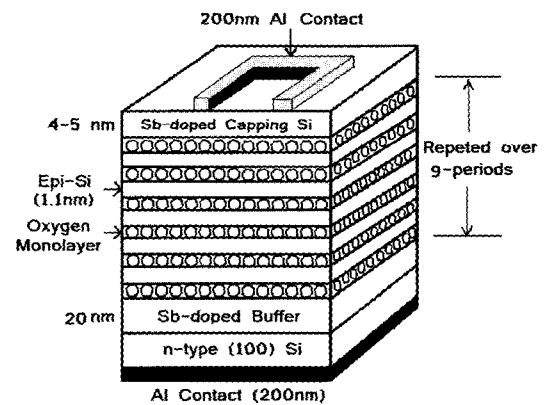


Fig. 2. Schematic cross sectional structure of nc-Si/O superlattice device.

료된 후에 시료는 여러 조각으로 나뉘어 $\text{H}_2 + \text{N}_2$ (1:10), 420°C , 10, 20, 30분 동안 어닐링 되었고, 나머지 샘플은 $\text{O}_2 + \text{N}_2$ (2:1), 800°C , 10분 동안 어닐링 되었다. 마지막으로 10^{-7} Torr에서 200 nm의 Al 전극이 증착되었다. Fig. 1은 본 실험의 공정 흐름도를 개략적으로 나타낸 것이고, Fig. 2는 I-V와 G-V 특성 측정을 위해 제작된 소자의 개략도를 보인 것이다.

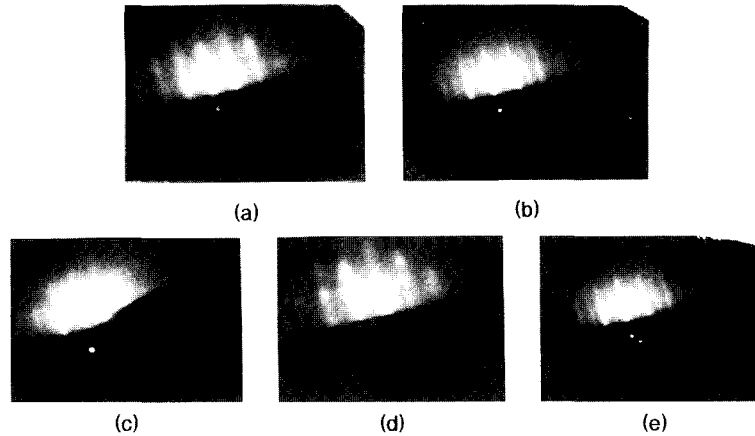


Fig. 3. Typical RHEED patterns as function of different conditions, (a) after loading, (b) after in-situ annealing 850°C for 20 min., followed by 20 nm buffer layer deposited at 550°C and growth rate of 0.05 nm/sec, (c) after the first oxygen exposure, at room temperature, (d) after 1.2 nm Si deposition at 550°C and growth rate of 0.05 nm/s, (e) after 10 nm Si deposition at 550°C and growth rate of 0.05 nm/s.

3. 결과 및 고찰

3.1. Si-O 초격자 구조의 RHEED 패턴

Fig. 3은 에피택시를 in-situ로 모니터링하기 위해 사용된 RHEED (reflection high energy electron diffraction) 패턴을 나타낸 것이다. 550°C에서 증착된 Si 나노층은 in-situ RHEED 실험에서 나타낸 바와 같이 에피택셜 상태로 남아 있음을 확인하였다. Fig. 3(a)는 RCA 클리닝과 수소 안정화(hydrogen stabilization)시키고 나서 로딩한 후의 RHEED 패턴이다. Fig. 3(b) 패턴은 20 nm의 버퍼층이 550°C에서 0.05 nm/s의 성장 속도로 증착된 후 850°C에서 20분동안 in-situ 어닐링된 직후의 RHEED 패턴을 보인 것이다. 또한 Fig. 3(c)의 패턴은 실온에서 첫번째 산소 흡착 후의 RHEED 결과이다. 또한 Fig. 3(d)는 0.05 nm/s의 성장속도로 550°C에서 1.2 nm의 Si 증착된 후의 RHEED 패턴을 보인 것이다. 여기서 Si 증착 후에 2D 패턴에서 3D 패턴으로 전환됨을 알 수 있다. 그리고 연속적인 산소 흡착은 RHEED 패턴을 크게 변화시키지 않았다. Fig. 3(e)는 550°C와 0.05 nm/s의 조건에서 10 nm의 Si이 증착된 후의 RHEED 패턴을 보인 것으로 거의 모두 복구되었음을 볼 수 있다. RHEED 외에도 HR-TEM(high resolution Transmission Electron Microscopy) 측정 결과 흡착된 산소층을 넘어서 에피택셜층이 계속 성장되고 있으며 시료가 나노구

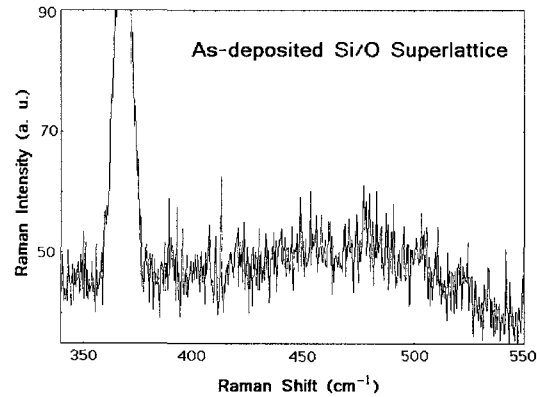


Fig. 4. Raman scattering spectrum of as-deposited Si/O superlattice sample.

조임을 확인하였다⁴⁾.

3.2. Si-O 초격자 구조의 포토루미네스스 특성

as-deposit된 시료의 포토루미네스스를 확인한 결과, 매우 약한 포토루미네스스 특성을 보이거나, 그 특성이 전혀 나타나지 않았다. 또한, 실온에서 증착된 실리콘은 여전히 비정질 상태로 남아있음을 라만 산란(raman scattering) 특성을 통해 관찰하였다. Fig. 4는 as-deposit된 시료의 457.9 nm의 Ar 이온 레이저를 사용한 라만 산란 특성을 보인 것이다. 비정질 실리콘의 대표적인 라만 스펙트럼은 480 cm⁻¹에서 넓은 피크가 관찰되었다. 따라서

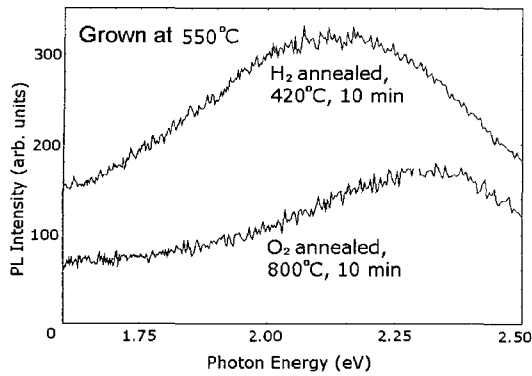


Fig. 5. Photoluminescence spectra of Si/O superlattice samples grown at 550°C, annealed in hydrogen and oxygen, respectively.

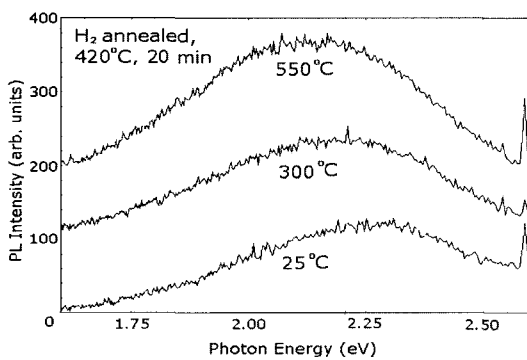


Fig. 6. Photoluminescence spectra of three nine period nc-Si/O superlattice samples grown at 550°C, 300°C, and 25°C respectively. All samples were annealed in hydrogen and nitrogen, at 420°C for 20 minutes.

시료들은 420°C의 수소 분위기와 800°C의 산소 분위기에서 각각 어닐링 되었다.

Fig. 5는 550°C에서 성장되고, 1.1~1.2 nm 두께의 Si 층을 갖는 시료의 포토루미네스스 스펙트럼을 나타낸 것이다. 시료는 수소 분위기에서 420°C, 산소 분위기에서 800°C로 각각 10분씩 어닐링 되었다. 수소 어닐링된 시료로부터 측정된 포토루미네스스는 매우 강한 특성을 나타내었다. 이는 수소 어닐링이 산소 어닐링보다 더 효과적인 패시베이션(passivation) 역할을 하였음을 나타낸다. 또한, 산소 어닐링된 시료의 포토루미네스스 스펙트럼이 대략 250 meV 정도 청색 영역으로 변위(blue-shift)함을 보였는데, 이는 산소 어닐링의 결과 입자 크기가 더 감소했음을 지적하는 것이다.

Fig. 6은 1.2 nm 두께의 Si 층을 가지며, 실온

(RT), 300°C, 550°C의 각기 다른 온도에서 증착된 3개의 시료에 대한 포토루미네스스 스펙트럼을 나타낸다. 모든 시료는 420°C의 수소 분위기에서 20분 동안 어닐링되었다. 실온에서 증착되고, 420°C에서 수소 어닐링을 수행한 실리콘은 주로 비정질 상태로 남아있음을 알 수 있다. 라만 산란은 부분적인 결정화만을 나타내었다. 그러므로, 포토루미네스스 스펙트럼이 청색 영역으로 변위될 것으로 예상되었다. 실제로 2.3 eV의 광자 에너지에서 포토루미네스스 피크는 참고문헌⁵⁾에서 보고되었던 것과 거의 비슷하였다. 또한 550°C에서 증착되었던 시료의 포토루미네스스는 적색 영역으로 변위(red-shift)되었다. 이 변위는 클러스터 크기의 연속적인 증가와 증가된 결정화에 의한 것으로 설명될 수 있다. 이 시료에서의 라만 산란은 상당한 결정화를 보였다. 또한, 550°C에서 성장된 시료의 포토루미네스스 세기는 다른 두 시료의 것보다 눈에 띄게 더 높음을 알 수 있다. 이는 결정화로 인해

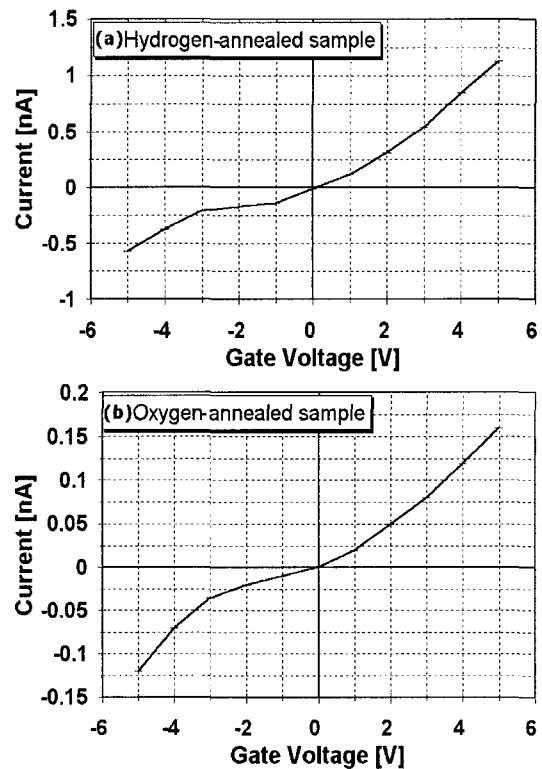


Fig. 7. Current vs. bias voltage for two samples with (a) hydrogen annealing (420°C, 30 minutes) and (b) oxygen annealing (800°C, 10 minutes).

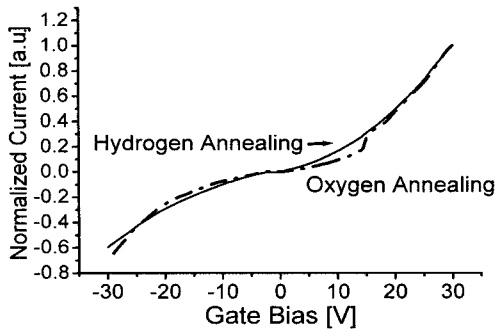


Fig. 8. I-V curve for the same type of samples with a larger range of bias voltage.

더 강한 루미네스스를 유도했음을 지적하는 것이다. 300°C에서 성장된 시료의 포토루미네스스 스펙트럼은 포토루미네스스 세기와 광자 에너지 피크에서 둘 다 중간 정도로 나타났다.

3.3 Si-O 초격자 다이오드의 전기적 특성

Fig. 7은 (a) 수소 어닐링과 (b) 산소 어닐링된 시료의 I-V 특성을 보인 것이다. I-V 특성은 종래에 보고되었던 전형적인 비대칭형의 쇼트키 다이오드 특성^{6,7)}과는 다른 대칭적인 특성을 나타내었다. 종래의 단일장벽을 갖는 다이오드의 경우에는 Si 위의 Al 전극에 의해 형성된 쇼트키 장벽 때문에 비대칭 특성을 보이지만, 본 연구에서 제작된 Si-O 초격자 다이오드는 Fig. 2의 제작된 소자의 개략도에 보인 바와 같이 Al 콘택과 초격자 구조 사이에

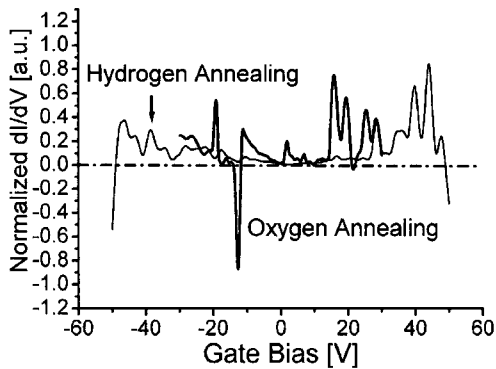


Fig. 9. Conductance for the two types of samples with hydrogen annealing (420°C, 30 minutes) and oxygen annealing (800°C, 10 minutes). There is a negative resistance for the oxygen-annealed sample. Instability sets in beyond 40 V for the hydrogen-annealed sample.

비교적 고농도로 도핑된 Si 캐핑 영역에 기인하여 대칭 특성을 갖는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 -30 V에서 +30 V 이상까지 전압을 인가한 경우 각각 (a) 수소 어닐링과 (b) 산소 어닐링된 시료의 I-V 특성을 정규화(normalization)시켜 비교한 결과이다. 소자는 30 V 이상에서도 브레이크다운 현상은 발생하지 않고 여전히 안정함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 (a) 수소 어닐링과 (b) 산소 어닐링된 시료의 컨덕턴스(dI/dV)를 정규화시켜 비교한 것이다. 여기서 산소 어닐링된 시료의 경우 네가티브 컨덕턴스(negative conductance)가 관찰되었는데 이는 Si 버퍼 층에서 애발란치 증배(avalanche multiplication)가 일어나 Si 캐핑 영역으로 핫캐리어(hot carrier)의 주입에 기인한 것으로 생각된다. 아마도 일부 불안정한 결합들을 통한 공명 터널링(resonant tunneling)에 의한 이유도 있겠지만 더 명확한 컨덕턴스(dI/dV) 특성의 분석을 위해서는 트래핑(trapping) 메커니즘을 포함하는 공명 터널링 모델 및 Esaki와 Chang 등에 의해 처음 제안되었던 도메인(domain) 형성 모델이 포함되어야 할 것으로 보인다⁸⁾.

4. 결 론

As-deposit된 Si-O 초격자 구조의 포토루미네스스 특성은 약하고, 라만 산란 결과 실온에서 증착된 실리콘은 여전히 비정질 상태로 남아 있음을 확인하였다. 그러나 수소 어닐링된 시료로부터 측정된 PL은 매우 강한 특성을 나타내었으며, 산소 어닐링된 시료의 포토루미네스스 스펙트럼은 대략 250 meV 정도의 blue shift를 보였다. 또한 실온에서 증착되고 420°C에서 수소 어닐링된 시료는 부분적인 결정화만 진행되었다. 550°C에서 증착된 시료로부터 얻은 PL은 red shift를 나타내었으며, 라만 산란은 상당한 결정화를 보였다. 게다가 550°C에서 성장된 시료의 포토루미네스스 세기는 매우 높은 값을 나타내었다. 결론적으로, 550°C에서 증착된 후에 수소 어닐링한 결과가 가장 양호한 특성을 나타내었고, PL 피크에서의 blue shift는 더 작은 결정질을 갖고 있음을 의미하는 것이다.

본 연구에서 제작된 Si-O 초격자 다이오드의 전계는 30 V 이상까지 $\sim 3 \times 10^7$ V/cm에 도달하였으나

브레이크다운 현상은 나타나지 않았다. 따라서 차세대 3D-IC를 위한 SOI로의 응용 가능성을 제시해 주었다. 그러나 컨덕턴스 특성에서 나타난 점프(jump)와 네가티브 저항(negative resistance)은 전기적으로 활성화된 결함들과 트랩의 존재를 의미하는 것이다. 이는 산소노출 뿐만 아니라 박막의 에피-실리콘의 두께와 같은 파라미터의 최적화와 새로운 패시베이션 공정과 같은 지속적인 연구를 통해 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 제안하는 Si-O 초격자 구조가 실리콘계 집적회로 소자를 위한 절연층 뿐만 아니라 양자전자소자의 장벽으로 이용될 수 있음 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00565-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. L. T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrica-

- tion by electrochemical and chemical dissolution of wafers", *Appl. Phys. Lett.* 57, 1046 (1990).
2. A. Loni, A.J. Simons, T.I. Cox, P.D.J. Calcott, L.T. Canham, *Electron. Lett.* 31, 1288 (1995).
3. L. Tsybeskov, S. P. Dutttagupta, K. D. Hirschman, P.M. Fauchet, "Stable and efficient electroluminescence from a porous silicon-based bipolar device", *Appl. Phys. Lett.*, 68, 2058 (1996).
4. K. Dovidenko, J. C. Lofgren, F. de Freitas, Y. J. Seo, and R. Tsu, "Structure and optoelectronic properties of Si/O superlattice", *Physica E*, 16(3-4) pp. 509-516 (2003).
5. Z. H. Lu, D. J. Lockwood, and J. M. Baribeau, *Nature* 378, 258 (1995).
6. J. Ding and R. Tsu, "The determination of activation energy in quantum wells", *Appl. Phys. Lett.* 71, 2124 (1997).
7. R. Tsu, A. Filios, J. C. Lofgrene, J. L. Ding, Q. Zhang, J. Morais, and C.G. Wang, *Electrochem Soc. Proc.* 97(11), 341 (1997).
8. Z. Y. Han, S. F. Yoon, K. Radhakrishnan, and D. H. Zhang, "High-field domain formation in GaAs/AlGaAs superlattices", *Appl. Phys. Lett.* 66(9), pp. 1120-1122 (1995).