

나노구조 실리콘의 제조 및 응용

한규호, 김대암, 이정석, 박명범, 조남희
인하대학교 재료공학부

1. 서 론

나노 기공성 실리콘(nanoporous silicon: NPS)은 1950년대 Uhlir와 Turner에 의해 HF 수용액에서 Si 웨이퍼의 전기 화학적 에칭 중 발견되어 처음으로 발표되었다.¹⁻²⁾ 특히, 영국의 Canham이 p형 실리콘 웨이퍼를 HF 수용액에서 전기 화학적 에칭을 행하여 NPS를 만든 후, Ar 레이저를 조사하여 가시광선 영역인 400 ~ 800 nm 파장 범위의 발광 현상을 확인한 이래 NPS의 발광 현상에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.²⁻⁴⁾ 또한 나노 결정 실리콘(nc-Si, nanocrystalline silicon)에서도 NPS와 같이 나노 구조에 기인한 발광 특성을 나타내는 것이 일부 연구자들에 의하여 확인되었다.⁵⁻⁸⁾

기존의 반도체 집적회로는 Si를 바탕으로 제조되어 왔다. 따라서 나노 구조 Si은 현재 반도체 산업에서 상용되는 VLSI 구조 및 CMOS 공정과의 부합성에 의하여 손쉽게 접목시켜 광소자 제조에 이용될 수 있다는 장점을 가지고 있다. 최근에 미국과 유럽에서 nc-Si을 이용한 광소자 부품의 개발 및 기존의 Si 집적회로와의 부합에 관한 많은 관심과 연구노력이 모아지고 있다. 특히 집적화의 정도가 커짐에 따라 최소 단위의 칩 크기가 작아지면서 칩들 사이의 정보교환을 위한 전선이 차지하는 분율이 커지며, 이에 따른 칩들간 통신교란 등의 문제가 대두될 것으로 여겨지고 있다. 따라서 기존의 Si 반도체 공정 라인과 공정 부합성이 뛰어난 NPS 및 nc-Si 박막을 이용한 광소자를 개발하여 칩들간 광통신에 이용함으로써 이러한 문제의 예방 및 반도체 시스템의

기능 향상을 모색할 가능성과 필요성이 있다.

국내에서는 NPS 및 nc-Si 박막에 대한 연구가 미흡한 편이지만 선진 외국에서는 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 박막의 광학적 특성이 박막의 나노 구조 및 화학적 특성에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 많은 연구자들이 박막 내 나노 결정으로 인한 양자제한 효과, 계면구조, 계면화학, 그리고 도핑물질 등에 의해 발생하리라 여겨지는 광학적 성질에 큰 관심을 가지고 있으며, 이러한 나노 구조 및 화학적 특성을 제어하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 미국, 일본, 독일, 프랑스, 캐나다 등의 nc-Si 합성 및 반도체 산업에의 응용에 대한 연구를 수행하는 연구자들로 구성된 NSRI(nanoscale silicon research initiative)에서는 주기적인 모임을 가지면서 nc-Si 박막의 구조적 물성적 특성제어 및 광소자의 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다.

이러한 nc-Si 박막의 나노 구조 및 화학적 특성을 제어하기 위해 nc-Si 박막제조시 사용되는 원료물질, RF power, 증착후 열처리, 회도류 원소의 도핑 등 많은 기법들에 관한 연구들이 수행되어지고 있다. 그러나 나노 구조를 제어하는 것은 다양한 시행착오를 요구하고, 박막 내 나노 구조와 박막의 계면 구조 및 화학상태를 균일하게 재현하는 것이 어렵기 때문에, 나노 구조와 광학적 특성과의 상관관계에 대한 이해가 미흡한 편이다.

나노 기공성 Si을 이용한 EL, LED, waveguide, photodiode 등의 제조⁹⁻¹¹⁾는 기존의 반도체 전자산업의 시장을 고려할 때 기술 및 경제적 파급효과가 매우 큰 분

야로 여겨지지만 아직 연구 단계에 있다. 특히, 다양한 형태 및 구조를 갖는 기공성 반도체의 제조 기법 확립은 그 응용과 관련하여 많은 실험적 연구가 필요하다. 이러한 반도체 기공의 형태 및 분포와 Si 골격구조에 따른 전자에너지구조의 변화와 발광 기구와의 관계 규모도 이들의 응용에 매우 필수적이다. 따라서 현시점에서 이러한 나노 기공성 또는 나노 결정질 Si 반도체 제조기법 및 관련된 발광 기구 등에 대한 이해를 확립하는 것은 매우 필요하다.

2. 나노 구조 실리콘 발광 원리

2-1. 양자 제한 원리

나노 실리콘(Si)의 발광 현상은 크게 두 가지 모델로 설명되고 있으며 그 중 하나가 양자 제한 원리(quantum confinement effect)이다. 양자 제한 효과 또는 양자 구속 효과라고도 하며 결정이 수 나노미터(nm)의 크기가 될 때 나타나는 현상으로서 벌크(bulk) 상태와는 다른 성질을 갖게 된다.

벌크 상태 Si의 에너지 간극(energy band gap)은 약 1.1 eV 이고 간접전이형(indirect transition) 물질로서 상온에서는 빛을 방출 할 수 없다. 그러나 벌크 Si에 나노 기공을 생성 시키거나 비정질 Si 박막 내 Si 나노 결정을 생성시키면 그 나노 구조에 의해 에너지 간극은 1.1 eV보다 넓어지고(wide band gap) 광 흡수 조건 중 $k = 0$ selection rule의 이완 현상(relaxation)이 발생한다. 즉 $\Delta P * \Delta x \geq h$ 에서 Δx 가 나노 결정의 크기에 의해서 한계를 가지게 되며, 결과적으로 운동량의 불확실성(uncertainty)은 증가하여 $\Delta k \approx \pi/2 \Delta x$ 가 된다. 이러한 값은 전도대 최저점에 해당하는 파동 벡터를 포함하는 범위를 갖는다. 따라서 이러한 나노 Si 결정에서 전자 전이가 가능하며 이와 상관되는 발광 현상이 나타난다. 이것을 양자 제한 효과라 한다.¹²⁾

2-2. 표면 및 계면 효과

나노 구조 실리콘이 가시광 영역에서 발광 현상을 나타내는 것은 양자 제한 효과와 더불어 표면 및 계면 효과에 기인하는 것으로 여겨지고 있다. 나노 결정 실리콘

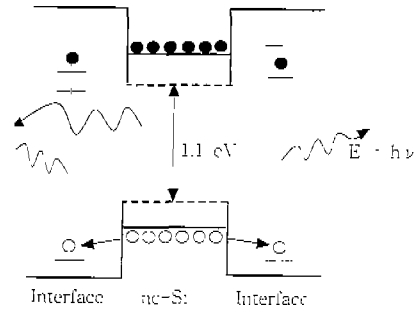


Fig. 1. Schematic diagram of the quantum confinement effect and interface/surface effect-related light emission mechanism of nanostructural Si.

박막은 비정질 모체 안에 다량의 균일한 나노 Si 결정 (Si nanocrystallites)을 포함한다. 이들 결정과 비정질 모체 사이의 계면의 독특한 전자구조는 발광 현상을 나타내는 요인이 된다.

나노 구조 실리콘은 나노미터 크기의 실리콘 결정에 의해 에너지 밴드갭 폭이 벌크 실리콘의 1.1 eV 보다 더 넓은 상태로 변하면서 가시광 영역에서 발광 현상을 나타낸다. 또한, 나노 구조 Si의 발광 현상이 이들 밴드 갭에 상관되는 양자제한 효과뿐만 아니라, 계면 화학상태에 따라 발광 특성이 변화됨이 보고되었다. 한 예로서, PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) 기법에 의해 제조된 Si:H 박막의 경우, 증착 후 산소 분위기에서 열처리 시 발광 피크는 적색 영역으로 이동하며, 피크의 세기는 커진다고 한다. 최근에는 나노 결정의 존재에 기인한 양자 제한 효과와 더불어 나노 결정 실리콘과 비정질 모체 간 계면의 화학상태에 의존하여 이와 상관되는 독특한 발광특성이 나타남이 보고되고 있다¹³⁾.

Fig. 1은 이러한 발광 기구를 보여주는 모식도이다. Fig. 1에서 보이듯이 나노 결정 실리콘이 비정질 SiO_x 내 존재할 때 나노 결정 실리콘의 넓어진 에너지 밴드 (>1.1 eV)는 비정질 SiO_x 모체의 에너지 밴드사이에 존재하게 된다. 비정질 모체는 열처리 조건에 따라 화학상태(수소 및 산소와의 결합상태)가 변하게 되어 나노 결정 실리콘과 비정질 모체간에 다양한 계면 에너지 준위를 가지게 된다. 즉, 나노 결정 실리콘 내부에서 여기된 전자가 계면 에너지 준위에 트랩(trap)되며 전자-정공의 재결합(recombination)을 하게 되어 발광 현상을 일으킨다. 이런 결과에 의해 양자 제한 효과만 가지고 설

명할 수 없는 독특한 발광의 요인으로 이해되고 있다.

2-3. 도핑효과

최근에 nc-Si에 희토류 원소(Er, Tb) 등을 첨가함으로써 나타나는 발광 현상에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 나노 결정 실리콘에 첨가된 희토류 원소의 4f 오비탈에 기인한 독특한 전자구조 때문에 특정 파장에서 예리하고 강한 발광 현상이 나타난다. Er의 경우 1.54 μm 의 파장 영역에서 예리한 발광 현상을 나타내는데, 이미 기존의 광 증폭제 또는 웨이브 가이드(wave guide)로 광섬유 내에 도핑되어 이용되고 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾ Tb의 경우에는 545 nm의 파장 영역에서 예리한 발광 현상을 나타내는데 이것은 전형적인 녹색광과 거의 일치하는 파장대로서 녹색광원의 재료로서의 가능성에 주목받고 있다.¹⁸⁻¹⁹⁾

희토류 원소에서의 발광 특성은 4f 오비탈 내 전자 전이에 의해 나타난다. Er의 경우, 1.54 μm 의 발광 현상은 여기되어 $^4I_{13/2}$ 에너지 준위에 머물러 있는 전자들이 $^4I_{15/2}$ 준위로 전자-정공의 재결합을 형성하면서 나타난다. 4f 오비탈 내 전자 전이는 외부의 $5s^25p^6$ 전자에 의한 가로막음(screen) 효과에 의해 모체 물질에 영향을 받지 않고 나타난다. 그러나 Er 도핑된 Si 박막의 경우 Si 나노 결정이 생성되었을 때 1.54 μm 에 해당하는 발광 특성은 향상되며, 나노 결정이 생성되지 않은 박막에 비해 그 발광 효율이 200배 이상 된다는 보고가 있다. 이는 나노 결정 실리콘 전자구조에서 여기된 전자들이 우선적으로 Er의 $^4I_{13/2}$ 준위로 전달되면서 4f 오비탈 내 전자 전이의 확률을 증가시키며 이로 인해 1.54 μm 영역의 발광 특성이 증가하게 된다. 실제적으로, Si 나노 결정이 생성되면 나노 결정 Si에 의해 나타나는 발광 세기는 줄어들고 Er에 의해 나타나는 발광 특성은 향상된다.¹⁵⁻¹⁷⁾

Tb의 경우 545 nm 영역의 발광 특성도 Er에 의해 나타나는 발광 기구와 유사하다. Si 박막에 Tb이 도핑된 경우 약 490, 545, 587, 611, 그리고 628 nm의 영역에서 발광 특성을 나타내는데 이는 Er의 경우와 같이 4f 오비탈 내 전자 전이에 의해 나타나며, 각각 $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$, 그리고 $^5D_4 \rightarrow ^7F_2$ 에 의해 나타난다. 그 중에서 545 nm 영역, 즉 녹색광에 해당

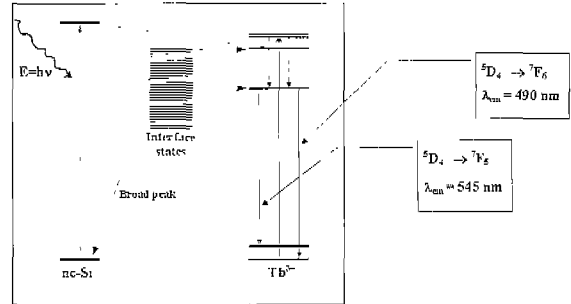


Fig. 2. Schematic diagram of the light emission mechanism of Tb-doped nc-Si.

하는 파장에서 그 발광 특성이 가장 현저하게 나타난다. Tb 도핑된 Si 박막의 경우 박막 증착후 열처리 과정을 통해 나노 결정 Si을 형성시킨 경우 Tb의 전자구조에 의해 나타나는 특정 파장 영역에서의 발광 세기는 모두 증가하는 경향을 보인다. 나노결정 실리콘 내에서 여기된 전자들이 Tb 이온의 4f 오비탈로 전달되고, 이로부터 4f 오비탈 내 전자 전이의 사건(event)을 증가시키는 것으로 이해되고 있다. Fig. 2는 Tb이 도핑된 나노 결정 Si 박막의 발광 기구에 대한 모식도를 나타낸다.

3. 나노 구조 실리콘 제조

나노 구조 Si 박막을 제조하는 기법으로는 크게 세가지로 나누어 볼 수 있다. 즉, 물리 기상 증착(PVD, physical vapor deposition)과 화학 기상 증착(CVD, chemical vapor deposition), 전기적 화학 에칭 (anodic chemical etching) 기법이 있으며 원하는 박막의 나노 구조에 따라

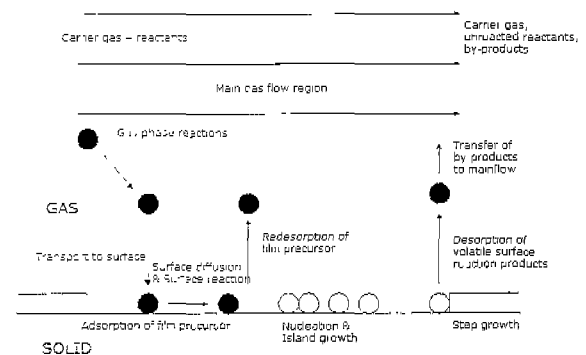


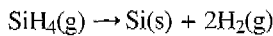
Fig. 3. Schematic diagram of the transport and reaction on the surface in the CVD.

독립적으로 이용될 수 있다. 여기서 전기적 화학 에칭 기법의 경우에는 나노 기공성 Si 박막 제조에 이용된다.

3-1. 화학 기상 증착

PVD와 CVD의 가장 뚜렷한 차이점은 화학반응의 유무(有無)이다. 즉 PVD 기법은 화학반응을 포함하지 않는다. 그러나 CVD 기법은 화학반응을 포함하며, PVD에 비해 스텝 커버리지가 우수하고, 넓은 범위의 박막 증착이 가능하다는 장점이 있다.²⁰⁻²²⁾

CVD 공정의 이해를 돕기 위해 Fig. 3에 CVD 챔버 내에서의 가스 이동 및 반응 과정을 나타내었다. 반응기 튜브의 벽면은 온도 T_w 를 유지한다. 웨이퍼(wafer)는 튜브 중심에 있는 지지대 위에 놓여진다. 이 지지대는 T_s 의 온도로 유지되며 일반적으로 $T_s \gg T_w$ 이다. CVD를 이용한 나노 결정질 Si 제조는 일반적으로 SiH_4 가스의 분해를 통해 이루어진다. Fig. 3에서, 가스는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐른다고 가정한다. SiH_4 가스가 가열된 웨이퍼 위를 지날 때 분해가 일어나며, 그러므로 튜브를 지나가면서 SiH_4 가스의 농도는 줄어들고 튜브의 길이를 따라 증착 속도는 줄어들게 된다. 박막 증착의 균일도(uniformity)를 향상시키기 위해 SiH_4 가스는 캐리어(carrier) 가스와 혼합된 형태로 주입된다. 혼합 가스로 주로 사용되는 것은 수소이다. 반응 부산물과 미반응 SiH_4 가스는 튜브의 오른쪽으로 나가게 된다. 챔버 내 압력이 일정할 수 있도록 가스의 흐름은 매우 느리다. 전체적인 반응식은 다음과 같으며, 실제적으로 일어나는 반응은 이것보다 더 복잡하다.²²⁾



일반적으로 CVD 공정이 일어나는 동안 다음 단계들



Fig. 4. TEM image of the (Tb):Si films grown on Si substrates. (a) Bright-field image pattern of the nc-Si films prepared by PECVD. (b) High-resolution image of a dark spot observed in Tb:nc-Si films prepared by sputter techniques.

을 포함한다. (1) 가스 주입구로부터 웨이퍼에 매우 근접하게 전구체(precursor)가 이동한다. (2) 이 가스들은 여러 가지 라디칼(radical)을 형성하며 웨이퍼의 표면으로 이동한다. (3) 표면과 반응하며 부산물들이 탈착된다. (4) 웨이퍼의 표면으로부터 부산물들이 이동해 반응기 외부로 배출된다.

CVD의 종류에는 APCVD(atmosphere pressure CVD), LPCVD(low pressure CVD), LECVD(laser enhanced CVD), PECVD(plasma enhanced CVD), RTCVD(rapid thermal CVD) 등이 있으며, 이 가운데 나노 결정질 Si 제조에 적합한 CVD 기법은 PECVD이다. 즉 반응기 내에 DC 또는 RF 전력을 공급하고 Ar 가스를 플라즈마 가스로 주입시켜, 스퍼터 기법과 마찬가지로 플라즈마를 형성시키며, 화학 기상 증착을 하는 기법이다. APCVD 또는 LPCVD 기법은 박막을 제조하기 위해서 기판을 고온으로 가열해야 하는 단점이 있지만, PECVD는 플라즈마에 의해 생성된 에너지를 이용해 비교적 낮은 온도에서, 심지어는 상온에서도 박막 제조가 가능하다. nc-Si 박막의 경우도 주로 PECVD 기법에 의해 제조되며, 증착 후 열처리 과정 또는 레이저 등을 이용한 구조 변화에 의해서 Si 나노 결정의 크기, 양, 분포 등을 제어한다.

Fig. 4은 본 연구 그룹에서 PECVD법을 이용하여 제조한 나노 결정질 Si 박막의 TEM 사진이다. 5nm 정도의 크기를 가지는 나노 결정질이 존재함을 알 수 있다. Fig. 5는 반응가스 분율(S%) 변화에 따라 제조된 박막에서 얻어진 XRD 회절 패턴이다. 이 그림에서 S는 반

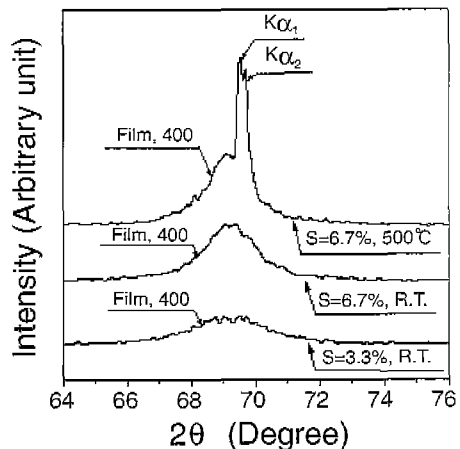


Fig. 5. XRD patterns of the Si films prepared by PECVD.

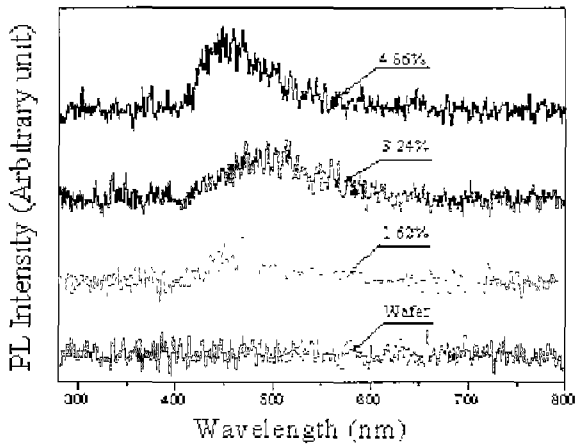


Fig. 6. PL spectra of the Si films grown on Si substrates by PECVD techniques.

용 가스(SiH₄)의 분압(SiH₄/(SiH₄+H₂+Ne))이다. Scherrer 관계식을 이용하여, S %를 변화시킴에 따라서 이들 결정의 크기가 약 3.2 ~ 5.3 nm임을 파악 할 수 있으며, 이는 TEM결과와 비료적 잘 일치하였다(Fig. 4).²³⁾ Fig. 6은 이들 박막으로부터 기록된 PL 결과이다. Si wafer로부터는 발광 현상이 목격되지 않았으나, 박막 증착시 S값이 1.62 %로부터 4.86 %로 증가함에 따라서 450 ~ 500 nm 파장영역에서 PL특성이 뚜렷이 증가함을 알 수 있다. 이는 S %변화에 따라서 박막 내 결정 크기가 변화하기 때문인 것으로 여겨진다(Fig. 5).

3-2. 전기 화학 에칭

Uhlir와 Turner가 불산용액(hydrofluoric acid)에 단결

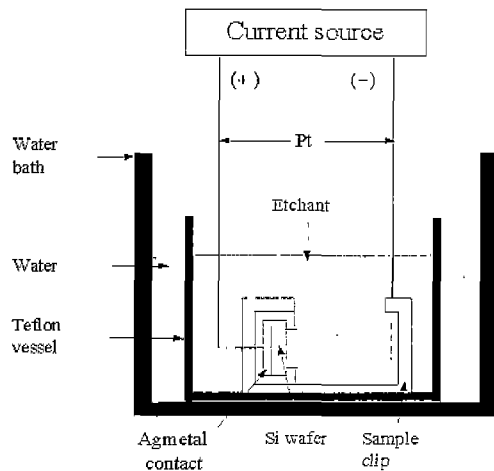


Fig. 7. Schematic diagram of anodic etching system.

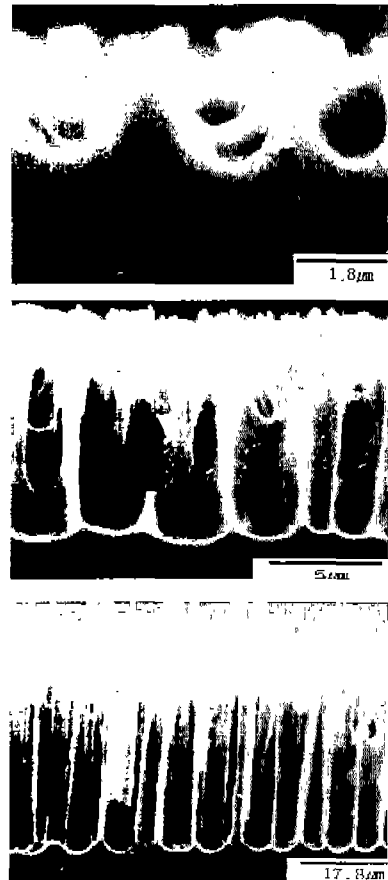
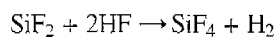
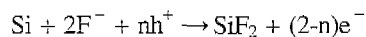


Fig. 8. SEM images of the cross-section views of the NPS

정 실리콘을 전기 화학적으로 식각하는 과정에서 스폰지와 같은 다공성 Si 층이 형성되는 것을 최초로 발견한 이후 1990년대에 Canham 등이 다공성 Si로부터 상온에서 가시광 영역의 강한 PL(photoluminescence) 현상이 나타나는 것을 발견하면서 다공성 실리콘은 차세대 광소자로서 주목받기 시작하였다. 벌크형 실리콘은 밴드갭이 1.1 eV인 간접전이형 물질로서 내부 양자 효율이 10⁻⁴ 10⁻⁵이며 따라서 가시광 영역에서 발광 소자로 이용될 수 없는 물질이다. 그러나 전기 화학 에칭으로 제조된 다공성 실리콘은 상온에서도 1~10%의 양자 효율을 갖고 있다.²⁴⁾

Fig. 7은 실리콘 에칭을 위한 반응기의 모식도를 나타내며 다음의 과정을 통하여 에칭이 일어난다.²⁵⁻²⁶⁾



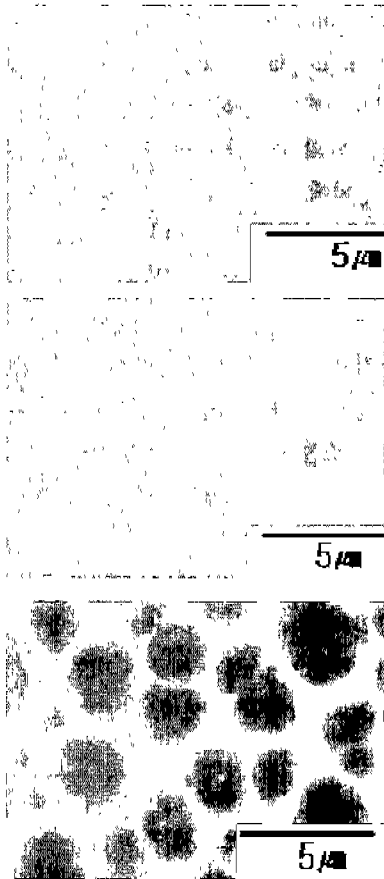
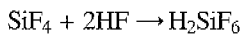


Fig. 9. SEM images of flat-on views of the NPS.



가해진 전압에 의해서 정공이 실리콘 표면으로 이동하고, 정공에 의해 편극화 된 Si-H 결합에 F 이온이 구핵 반응을 일으켜 H 가 F로 치환된다. 이어서 Si-F 결합에 영향을 받아 이웃의 Si-H결합이 편극되고 F 이온의 구핵 반응으로 Si-F로 바뀐다. 이러한 반응이 연속적으로 일어나고 실리콘 표면이 수용성인 SiF_6^{2-} 로 되어 전해질에 용해되며, 결과적으로 다공질 실리콘이 형성된다. Si의 다공성은 에칭용액의 온도, 인가전압, 전류밀도, 전해질의 농도, 그리고 Si 내 도핑 물질의 농도 등 여러가지 공정변수에 의해 영향받으며, 이들 변수 등을 이용하여 조절하면서 나노 구조를 제어할 수 있다. 다공질 Si 제조에서 이러한 공정 변수들은 다양한 유형의 기공을 형성 가능하게 하며 물리적 성질뿐만 아니라 광전자적 특성을 제어 할 수 있다.

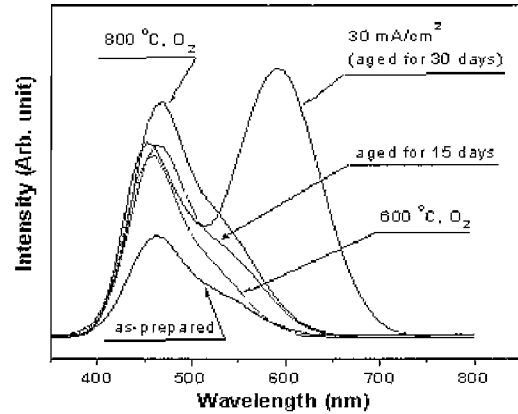


Fig. 10. PL spectra of the NPS.

Fig. 8과 9는 본 연구 그룹에서 전기 화학 에칭법을 이용하여 제조한 다공질 Si의 SEM 사진이다. 이들 시편은 전류 밀도를 10 mA/cm^2 , 50 mA/cm^2 , 100 mA/cm^2 로 각각 변화하면서 30분 동안 에칭하여 제조되었다. 이들 사진에서 보여주듯이 에칭 전류 밀도에 따른 기공 크기의 변화가 뚜렷이 나타나며 에칭 속도도 다를 수 있다. 단면 사진은 Si 웨이퍼가 에칭에 의하여 표면으로부터 수 m 깊이의 기공이 생성됨을 보여준다. 마치

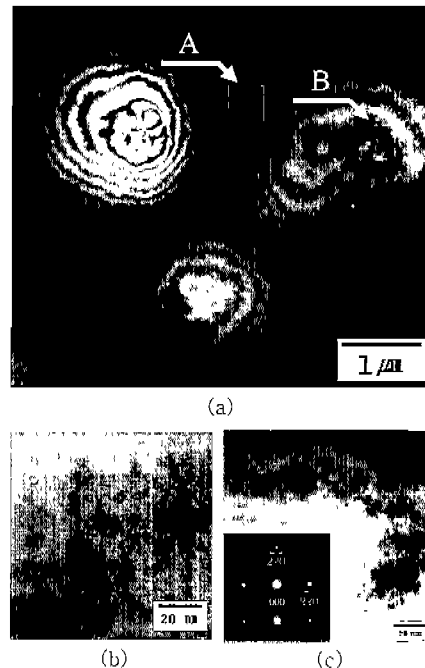


Fig. 11. TEM plane-view images of the porous silicon.

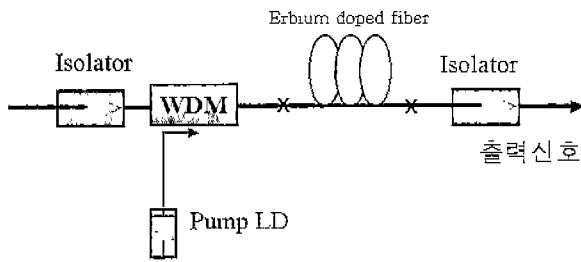


Fig. 12. Schematic diagram of EDPA(Erbium Doped Fiber Amplifier).

속이 빈 대나무 모양의 기공이 웨이퍼 표면에 수직 방향으로 서로 평행하게 놓여있다. 이들 사이에 100 ~ 200 nm 폭의 Si-벽이 놓여 있음을 보여준다(Fig. 9). Fig. 10 은 기공성 실리콘의 PL 결과이다. 시편은 as-prepared, 공기 중 aging, 산소분위기 열처리하였다. aging 된 시편은 100 mA/cm²의 전류 밀도에서 제작된 as-prepared 시편을 공기 중에서 일정 시간동안 자연 산화 처리 하여 제작하였고 열처리 시편은 as-prepared 시편을 산소분위기에서 일정 온도로 열처리하여 제작하였다. 100 mA/cm²의 전류 밀도에서 제작된 as-prepared 시편은 450 nm 의 파장에서 최대 PL peak를 나타내고 있다. Fig. 11 는 5일 동안 aging된 기공성 실리콘의 평면 명시야상 TEM 이미지이다. (a)에 기공과 관련된 두께 줄무늬가 3개 보이고, (b)와 (c)에 약 5 nm의 나노 기공이 균일하게 분포하는 것을 볼 수 있다. (c)에 기공성 실리콘의 전자 회절 패턴이 첨가되어 있다. 회절 패턴을 분석하여 기공성 실리콘은 단결정 상태임을 알 수 있으나, 격자 크기는 벌크 상태의 값으로부터 미량의 변화가 발생되었음이 목격되었다.

4. 나노 구조 실리콘 응용

4-1. 디스플레이

디스플레이(displays)란 전자 기기로부터 다양한 정보를 시각을 통해 인간에 전달하는 전자 장치를 말한다. 전자 디스플레이 분야는 발전을 거듭하여 다양화하는 정보화 사회의 요구에 적합한 새로운 고기능의 전자 디스플레이 장치가 계속 개발되고 있다. 그 종류로는 브라운관(CRT, cathode ray tube), 전계 발광 디스플레이

(ELD, electroluminescent display), 플라즈마 디스플레이(PDP, plasma display panel), 발광다이오드(LED, light emitting diodes)등 다양하다.

나노 구조 Si의 독특한 발광 특성을 이용하여 현재 디스플레이 장치에 이용되고 있는 발광 소자를 일부 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 나노 구조 Si은 Si을 기반으로 이루어진 기존의 시스템을 이용할 수 있기 때문에 낮은 비용 및 기존의 Si-공정과의 부합성 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 또한 앞 절에서 언급되었듯이 Si의 나노 구조 변화에 따른 발광 특성 제어의 용이성 때문에 발광 파장의 조절, 특정 파장영역에서의 강한 발광 효율 등을 보이게 되며, 이로 인해 반도체 산업에 쉽게 적용 가능할 것으로 여겨진다.

최근에 나노 구조 실리콘에서 공정 변수의 변화를 통해 삼색광인 적색, 녹색, 그리고 청색광을 모두 얻었다고 보고된 바 있으며, 소자 제조의 재현성과 발광 효율 향상이 이슈(issue)가 되고 있다.²⁷⁾

4-2. 광통신

나노 구조 Si의 응용으로서 광통신과 관련된 분야가 있다. 여기서, 광통신이라 함은 전자 부품 내부의 소자와 소자 사이의 신호 전달을 의미한다.

현재 광케이블을 통한 광통신에 주로 이용되고 있는 파장은 1.54 μm 영역이다. 최근 1.54 μm 영역에서 발광 특성을 보이는 Er이 광통신과 연관되어 많은 연구단체 및 기업에서 연구되고 있다. Er 도핑된 광 증폭기(EDFA, erbium doped fiber amplifier)는 광섬유에 Er을 도핑하고 펌핑 광을 가함으로써, 입력되는 광신호를 전기 신호로 바꾸지 않고 직접 증폭시키는 장치이다.

광통신에서 이용되는 재생 증계기는 수신광을 전기 신호로 변환한 후 증폭, 등화, 식별재생, 파형 정형 등의 조작을 행한 후 다시 광 신호로 변환하여 광섬유 내로 송출한다. 이와 같은 복잡한 조작을 거치지 않고 수신광을 그대로 증폭하여 증계할 수가 있다면 증계기는 극히 간단히 구성될 수 있다. EDFA는 광대역 정보 서비스를 위한 광통신 시스템을 구현할 때 전송용 광신호를 직접 증폭시키므로 광신호의 검출, 재생, 재송출 과정을 위해 고속 전자회로와 고속 광소자가 있어야만 하는 기존의

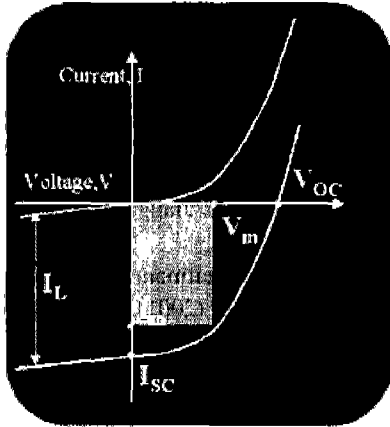


Fig. 13. Relation between current(I) and voltage(V) for solar ccell.

광 증계기와 비교해 광섬유의 결합만으로 쉽게 광신호를 증폭할 수 있어, 경제성이 우수하고 유지 보수도 간단하며, 광전송 신호의 변조방식 및 변조속도에 무관하게 광전송에 활용할 수 있다는 장점을 갖고 있다. Fig. 12에 EDFA의 광 증폭 과정에 관한 모식도를 나타내었다.

나노 결정 Si의 광 증폭기에 있어서의 응용 가능성으로는 실리카 광섬유 내 실리콘 나노결정을 생성시킴으로써 Er이 가지는 광신호 증폭 효과를 높일 수 있다는 점이다. 또한 Si을 기반으로 한 전자 산업에서 실리콘 박막은 쉽게 제조할 수 있으며, 나노 구조 실리콘 박막에서의 EL(electroluminescence) 특성을 이용해 소자간의 신호를 전자가 아닌 광 신호로 직접 전달할 수 있으므로, 기존의 전자 부품 체계에서보다 그 작동 속도가 100배 이상 빨라지게 된다.

4-3. 태양전지

최근에 Si을 이용한 태양전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 결정질 Si, 비정질 Si이 태양전지에 이용되고 있으며, 결정질 Si 태양전지에는 단결정 형태와 다결정 형태의 재료로 나뉜다. 단결정은 순도가 높고 높은 효율을 가지나 다결정 재료는 상대적으로 저렴하게 제조가 가능하다는 이점을 가지고 있다. 비정질 Si 태양전지는 상업적으로 성공한 최초의 박막형태의 태양전지이다. 그러나, 이 태양전지는 아직은 그리 높은 효율을 보이지 않고 있다.

태양전지의 효율을 특징 지워주는 변수로는 open-circuit voltage(V_{oc}), short-circuit current(I_{sc}), 그리고 fill factor(FF) 등이다. V_{oc} 는 회로가 개방된 상태, 즉 무한대의 임피던스가 걸린 상태에서 빛을 받았을 때 태양전지의 양단에 형성되는 전위차이다(Fig. 13). 동종접합(homojunction)의 경우를 예로서 설명하자면, 얻을 수 있는 최대한의 V_{oc} 값은 p-형 반도체와 n-형 반도체 사이의 일함수 값(work function)의 차이로 주어지며, 이 값은 반도체의 밴드갭에 의해 결정되므로 밴드갭이 큰 재료를 사용하면 대체로 높은 V_{oc} 값이 얻어진다.

I_{sc} 는 회로가 단락된 상태, 즉 외부저항이 없는 상태에서 빛을 받았을 때 나타나는 역방향(음의 값)의 전류이다. 이 값은 우선적으로 입사광의 세기와 파장분포(spectral distribution)에 따라 달라지지만, 이러한 조건이 결정된 상태에서는 광흡수에 의해 여기된 전자와 정공이 재결합(recombination)하여 손실되지 않고 얼마나 효과적으로 전지 내부에서 외부회로 쪽으로 보내어지는가에 의존된다. 이 때 재결합에 의한 손실은 재료의 내부에서나 계면에서 일어날 수 있다. 또한 I_{sc} 를 크게 하기 위해선 태양전지 표면에서의 태양 빛의 반사를 최대한으로 감소 시켜야 한다. 이를 위해 무반사 코팅(antireflection coating)을 해주거나 금속 전극(metal contact)을 만들 때 태양 빛을 가리는 면적을 최소화 해주어야 한다. 가능한 모든 파장의 빛을 흡수하기 위해선 반도체의 밴드갭 에너지가 작을수록 유리하지만 그렇게 되면 V_{oc} 도 감소하게 되므로 적절한 밴드갭을 가진 재료가 필요하다. 따라서 최대크기의 V_{oc} 와 I_{sc} 값을 얻기 위해 계산된 이론적인 최적의 밴드갭 에너지는 1.4 eV 가 된다.²²⁾

앞서 언급한 바와 같이 비정질 실리콘은 그 효율이 낮은 단점을 가지고 있지만, 나노 결정질 Si은 공정변수의 변화에 따라 밴드갭 조절이 가능하며, 그 효율을 높은 수준까지 향상시킬 수 있으므로, 나노 구조 Si의 태양전지 응용에 대한 가능성은 매우 크다.

5. 맺음말

광전자 산업에서 응용 가능성이 매우 큰 나노 구조 Si의 발광 특성, 제조 기법 및 응용 가능성에 대해 간단히

살펴보았다. 이와 같이 나노 구조 Si은 그 독특한 발광 원리로 인하여 가시광 영역에서 우수한 발광 특성을 보이며, 기존의 반도체 박막 제조기법을 이용해 쉽게 제조가 가능하다. 여러 가지 물질을 박막 내 도핑함으로써 원하는 파장 영역에서 발광 특성을 얻을 수 있기 때문에 그 응용 범위 또한 넓다고 하겠다. 그러나 아직까지 이론적으로 그 발광 원인이 명확하게 규명되지 않았으며, 나노 구조 및 박막의 화학 상태를 제어하는데 많은 어려움이 따르기 때문에 실용 단계에 이르기까지는 많은 연구가 요구된다.

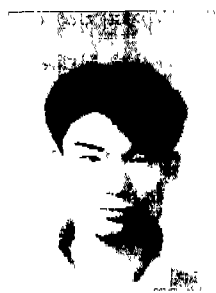
최근에 국외에서는 나노 구조 Si에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국내에서도 나노 구조 Si에 대한 관심이 조금씩 모아지고 있다. 나노 구조 Si이 상용화되기 위해서 발광 현상의 원인에 대한 명확한 규명이 필요하며 특정 파장에서의 발광 특성을 위한 나노 구조의 제어가 재현성 있게 가능하여야 한다. 그리고 실제적으로 광전자 소자로 이용되기 위해서는 충분한 발광 효율을 보여야 할 것으로 여겨진다.

최근의 문헌들을 통해 알 수 있듯이 이러한 문제점은 조금씩 해결되어 나가고 있으며, 나노 구조 Si의 광소자에의 상용화가 한 발 앞으로 다가왔음을 알 수 있다. 나노 구조 Si을 이용한 소자의 개발은 21세기 반도체와 광전자 산업에 획기적인 사건이 될 것이다.

참고 문헌

1. A. Uhlir, *Bell System Tech J.*, **35**, 333 (1956).
2. D. R. Turner, *J. Electrochem. Soc.*, **105**, 402 (1958).
3. L. T. Canham, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1046 (1990).
4. A. G. Cullis, L. T. Canham, P. D. J. Calcott, *J. Appl. Phys.*, **82** (3), 909 (1997).
5. O. Schoenfeld, X. Zhao, J. Christen, T. Hempel, S. Nomura and Y. Aoyagi, *Solid State Electron.*, **40**, 605 (1996).
6. S. Hayashi, K. Yamamoto, *J. Lumin.*, **80**, 352 (1996).
7. J. Costa, P. Roura, G. Sardin, J. R. Morante, and E. Bertran, *Appl. Phys. Lett.*, **64** (4), (1994).
8. K. A. Littau, P. J. Szajowski, A. J. Muller, A. R. Kortan, and L. E. Brus, *J. Phys. Chem.*, **97**, 1224 (1993).
9. M. Zacharias, S. Richter, P. Fischer, M. Schmidt, E. Wendler, *J. Non-Cryst. Solids*, **266**, 608 (2000).

10. L. M. Liu, F. Q. Liu, H. Q. Guo, Z. H. Zhang, Z. G. Wang, *Phys. Lett.*, **A 271**, 128 (2000).
11. M. Zacharias, J. Heitmann, M. Schmidt, P. Streitenberger, *Physica E*, **11**, 245 (2001).
12. S. M. Prokes, *J. Mater. Res.*, **11** (2), 305 (1996).
13. Stan Veprek, *Thin Soild Films*, **297**, 145 (1997).
14. M. Liu, Y. He, and X. Jiang, *Nanostruct. Mater.*, **10** (2), 257 (1998).
15. M. Zacharias, J. heitmann, M. Schmidt, P. Streitenberger, **11**, 245 (2001).
16. M. Fujii, M. Yoshida, S. Hayshi, K. Yamamoto, *J. Appl. Phys.*, **84**, 4525 (1998).
17. Frederick G. Anderson, *J. Lumin.*, **72**, 618 (1997).
18. M. RAukas, K.C. Mishra, C. Peters, P.C. Schmidt, K.H. JAohnson, J. Choi, U. Happek, *J. Lumine.*, **87**, 980 (2000).
19. K.J.B.M. Nieuwestecg, R. Raue, *J. Soild state chem.*, **37**, 267 (1981).
20. C. Y. Chang, S. M. Sze, *ULSI Technology*, McGraw-Hill Book Co., (1996).
21. D. L. Smith, *Thin-Film Deposition: Principles And Practice*, McGraw-Hill Book Co. Singapore, (1997).
22. G. Bruno, P. Capezzuto, A. Madan, *Plasma Deposition of Amorphous Silicon-Based Materials*, Academic press, Inc., (1998).
23. B. D. Cullity, *Elements of X-Ray Diffraction*, (1990).
24. K. H. Jung, S. Shil, and D.J. Kwong, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 3046 (1993).
25. S. A. Campbell, *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford University Press, Inc., (1996).
26. A. G. Cullis, *J. Appl. Phys.*, **82**, 3 (1997).
27. N. M. Park, T. S. Kim, S. J. Park, *Appl. Phy. Lett.*, **78**, 17 (2001).

	<p style="text-align: center;">한규호</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2001년 인하대학교 공과대학(학사) • 2001년 현재 인하대학교 대학원 석사 과정
--------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



김 대 압

- 2001년 인하대학교 공과대학(학사)
- 2001년 현재 인하대학교 대학원 석사 과정



이 정 석

- 2000년 인하대학교 공과대학(학사)
- 2001년 현재 인하대학교 대학원 석사 과정



박 명 범

- 1998년 인하대학교 공과대학(학사)
- 2001년 인하대학교 대학원(공학박사수료)
- 2001년 현재 인하대학교 대학원 박사 과정



조 남 희

- 1981년 서울대학교 공과대학(학사)
- 1983년 서울대학교 대학원(공학석사)
- 1989년 미국 코넬대학교(공학박사)
- 1989-1991년 미국 로렌스버클리 연구소 연구원
- 1991-1994년 한국과학기술연구원, 선임연구원
- 1994-현재 인하대학교 공과대학, 부교수

세라믹 용어집

세라미스트들에게 유용하게 쓰일 세라믹 용어집이 발간되었습니다.

학생회원	10,000원
정·평생회원	12,000원
일 반	15,000원

구입하실 분은 한국세라믹학회로 문의 바랍니다.