

논문 2002-11-3-08

실리콘 이온주입 SiO₂층의 나노결정으로 부터의 광루미네센스

김광희*, 오항석**, 장태수**, 권영규***, 이용현*

**Photoluminescence from silicon nanocrystals
in silicon ion implanted SiO₂ layers**

Kwang-Hee Kim*, Hang-Seok Oh**, Tae-Su Jang**,

Young-Kyu Kwon***, and Yong-Hyun Lee*

요 약

실리콘 기판 위에 형성한 열산화막에 실리콘이온을 주입하고 열처리를 수행한 후, 광루미네센스(photoluminescence:PL) 스펙트럼을 조사하였다. 실리콘 이온도즈의 변화와 열처리 온도의 변화에 따른 PL스펙트럼을 조사하고, 이를 TEM과 XRD 데이터와 비교하여 분석한 결과, 광루미네센스 특성은 산화막내의 실리콘 나노결정으로부터 기인함을 알 수 있었다. 또 산화막을 1분 간격으로 습식 식각하면서 매 식각 시마다 PL스펙트럼을 관측하여 그 변화를 조사하였다. 이러한 실험을 통하여 산화막내에 분포하고 있는 실리콘 나노결정의 크기와 그 수가 PL피크 파장과 강도에 직접적으로 영향을 줌을 알 수 있었다.

Abstract

Photoluminescence(PL) properties of Si⁺-implanted SiO₂ film, which was thermally grown on c-Si substrate, is reported. We have compared room temperature photoluminescence (PL) spectra of the samples which was made in several kinds of implantation, subsequent annealing and SiO₂ film thickness. XRD data was correlated with the PL spectra. Silicon nanocrystals in SiO₂ film is considered as the origin of the photoluminescence.

PL spectra was investigated after wet etching of the SiO₂ film by using BOE (Buffered Oxide Etchant) at every one minute. PL peak wavelength was varied as the etching is proceeded. These results indicate that the quantity and the distribution of dominant size of Si nanocrystals in SiO₂ film seem to have a direct effect on PL spectrum.

1. 서 론

실리콘은 간접천이 밴드구조를 가지는 반도체

* 경북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kyungpook National University)

** 포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*** 위덕대학교 전자공학과 (Department of Electronics, Uiduk University)

<접수일자 : 2002년 3월 9일>

재료로서 발광소자에는 응용될 수 없다고 알려져 왔으나, 다공질 실리콘의 상온PL이 관측된 후⁽¹⁾, 실리콘을 광전자(optoelectronics)분야에 응용할 수 있다는 잠재력에 고무되어 실리콘 나노결정(Si nano-crystals)의 광학적 특성에 관한 연구가 수년 전부터 활발히 수행되고 있다⁽²⁾. 다공질 실리콘은 많은 양자 점(quantum dot)과 양자 선(quantum wire)을 포함하고 있으므로 이를 이용한 발광소자 개발에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다^(3,4). 그러나, 다공질 실리콘은 그 제작 상태에 따른 광학적 특성의 의존성이 크며⁽⁵⁾, 기계적 강도가 약하여 잘 부서진다

는 점 때문에 실용적인 광전자 분야에 적용함에 있어 적절하지 못함이 지적되고 있다. 다공질 실리콘의 이러한 단점을 극복하기 위하여 산화막 내에 실리콘을 과량 분포시킨 후 열처리를 통하여 실리콘 나노결정을 형성시키는 방법이 제안되었다.

이온주입 방법은 주입 에너지와 도즈(dose)를 변화시킴에 따라 주입 깊이와 주입량을 정확하게 조절할 수 있고 또 재현성이 있으므로, 최근 많은 연구그룹들이 실리콘을 산화막내에 과량 분포시키는 방법으로써 이온주입 방법^[6]을 사용하고 있다. 그러나, 이온주입 방법에 의해 산화막내 형성된 실리콘 나노결정의 PL현상에 대한 많은 연구결과가 발표되고 있지만^[7-11], 아직 그 메커니즘이 정확하게 규명되지는 못하고 있다.

본 연구에서는 산화막 내에 여러 가지 조건으로 실리콘 이온(Si^+)을 주입하여 열처리 한 후, PL특성을 조사하였다. 이온도즈와 열처리 조건에 따른 PL스펙트럼의 변화를 관찰하고 이를 TEM 관측 결과와 XRD 데이터와 비교하였다. 그리고, 실리콘 이온주입되어 열처리된 산화막을 매 분마다 식각하여 그 식각량에 따른 PL스펙트럼의 변화를 조사하였다. 이러한 실험 결과들로부터, 산화막내에 실리콘 이온주입되어 열처리된 후 형성된 실리콘 나노결정의 크기와 수가 PL스펙트럼 특성을 결정하는 요인임을 알 수 있었다.

II. 실험

p형 (100)단결정 실리콘 기판에 560 nm, 1000 nm의 열산화막을 성장한 후, 130 keV와 200 keV의 가속에너지로 실리콘 이온을 주입하였다. 이때 이온주입 도즈는 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$, $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 및 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 3가지였다. 이온주입한 후 1000 °C부터 1300 °C의 온도범위에서 질소(N_2)분위기로 열처리하였다. 열처리를 한 각각의 시료들에 대해서 PL특성을 조사하였다. 그리고, 실리콘 나노결정의 분포를 조사하기 위하여 이온주입 후 열처리한 시료를 BOE (Buffered Oxide Etchant: 34.6%(wt.) NH_4F , 6.8%(wt.) HF , 58.6% H_2O)로 산화막을 매 1 분마다 식각하고 PL스펙트럼을 관찰하는 실험을 반복하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 1은 1000 nm의 열산화막에 200 keV의 에너지로써 실리콘이온을 각각 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$, $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$, $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 이온주입하여, 질소분위기에서 1100 °C로 2시간 열처리한 시료의 상온에서의 PL스펙트럼이다. PL의 여기소스는 파장이 488 nm인 아르곤 레이저였다. 그림 1을 보면 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 의 경우는 730 nm 부근에서 피크가 나타나고, 830 nm 부근에서 두번째 피크가 나타났다. $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 경우는 770 nm에서 피크를 보이고, 850 nm 부근에서 두 번째 피크를 나타내었다. 도즈가 가장 높은 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 경우는 820 nm 부근에서 피크를 나타내고, 730 nm 부근에서도 약한 강도의 피크가 나타났다.

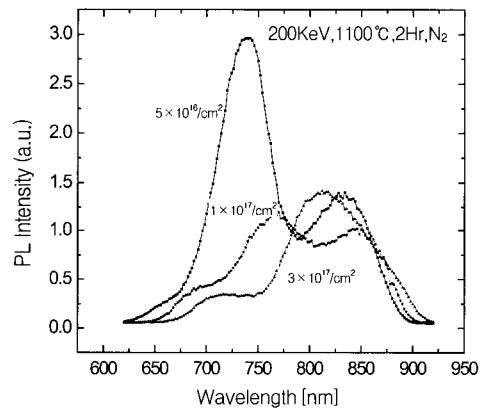


그림 1. 실리콘 이온도즈에 따른 PL스펙트럼 변화.
Fig. 1. PL spectra with various ion doses.

이온도즈가 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$, $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$, $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 로 증가해 감에 따라 가장 큰 강도를 나타내는 PL피크 파장이 730 nm, 770 nm, 820 nm로 이동되어 갔다. 즉 도즈의 증가에 따라 장파장 쪽으로 PL피크가 이동하였다. 이온주입량이 증가함에 따라 PL피크가 장파장대로 이동하는 것은 실리콘 미립자의 크기와 상관이 있다는 것을 다음과 같이 설명할 수 있다. 산화막내로 주입된 실리콘 이온은 가우시안 분포를 한다. 열처리된 후에도 R_p (projected range)지점 부근에서의 높은 농도로부터 그 양쪽으로 갈수록 농도가 낮아진다. 이온주입되어 형성된 실

리콘 원자들은 열에너지에 의해 이동하여 서로 이웃한 원자들끼리 결합에 참여하여 실리콘 미립자를 형성하게 될 것이다. 이 때 열처리 조건이 같은 경우, 주입된 실리콘 이온의 도즈가 많을수록, 결합에 참여하는 실리콘 원자 수가 많아서 도즈가 작은 경우에 비해, 쉽게 더 큰 크기의 실리콘 미립자를 형성하게 될 것이다. 이러한 결과는, 실리콘 나노결정의 크기가 변화 할 때 에너지 갭(energy gap)이 변하여 PL스펙트럼의 피크 파장도 변한다고 설명하는 양자구속효과(Quantum Confinement Effect)이론과 일치한다. 강도가 큰 피크와 강도가 작은 피크가 함께 나타나는 것은, 가우시안 분포로 부터 출발하여, 열에너지를 받은 실리콘 원자들이 산화막 내에서 이동하여 나노결정을 형성할 때, 특정크기를 dominant하게 가지는 나노결정 군(群)의 첫 번째 군과 두 번째 군이 함께 분포하여, 그 중 수가 더 많은 군이 큰 강도의 피크를 나타내고 수가 작은 군이 작은 강도의 피크를 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 이온도즈와 열처리 조건에 따라 나노결정의 크기와 수의 분포가 변화하게 되므로, 강도가 큰 피크와 강도가 작은 피크에 있어서, 그 강도의 상대적인 크기는 일정하게 정해지는 것이 아니고, 피크 파장의 이동과 함께 달라지게 될 것이다.

그림 2는 1000 nm의 산화막에 200 keV, $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 실리콘 이온주입하여, 질소분위기에서 1100 °C와 1300 °C의 온도로 각각 30분간 열처리한 시료의 PL스펙트럼이다. 1100 °C에서 가장 큰 강도를 나타낸 파장은 770 nm 부근이었으나, 1300 °C에서는 큰 강도가 870 nm에서 나타났다. 피크 파장이 770 nm로 부터 870 nm로 이동한 것이다. 한편 강도는 1100 °C에서 보다 1300 °C에서 상대적으로 작아 졌다. 이러한 변화는 그림 1에서의 이온도즈의 증가에 따른 PL스펙트럼의 변화와 일치하는 경향이다. 열처리 온도의 현격한 변화가 실리콘 나노결정의 크기와 수의 분포의 변화를 초래하여, 온도가 높아짐에 따라 작은 크기의 나노결정이 점점 큰 크기의 나노결정으로 성장하여 피크 파장은 장파장으로 이동하고, 그 강도는 점차 감소하게 되는 것이다. 1000 nm의 산화막에 200 keV의 에너지와 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 실리콘 이온주입하여 1100 °C로 열처리한 경우는 열처리 시간이 각각 30분, 2시간, 4시간, 12시

간에서 모두 PL스펙트럼이 나타났으나, 1300 °C로 열처리한 경우는 그림 2에 나타나 있는 열처리 시간이 30분인 경우에만 PL이 관측되고, 2시간, 4시간, 12시간 열처리한 경우는 PL이 나타나지 않았다.

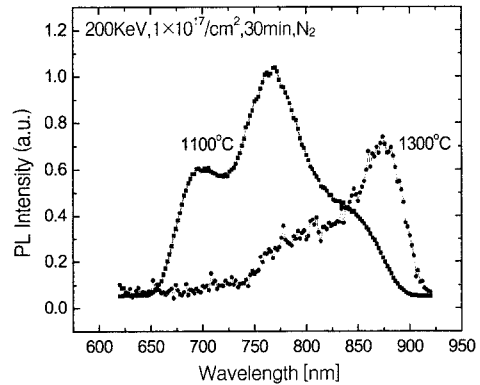


그림 2. 1100 °C 와 1300 °C 열처리한 경우의 PL스펙트럼 비교: $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 30분 경우.

Fig. 2. PL spectra of the samples annealed at 1100 °C and 1300 °C : dose of $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ and annealing time of 30 minutes.

한편, $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 이온주입하여 1300°C로 열처리한 경우는 2시간, 4시간, 12시간의 시료 뿐만 아니라 30분 열처리한 시료에서도 PL이 관측되지 않았다. 이러한 사실은 이온주입량이 어떤 기준량 이상으로 많고 열처리 온도도 높은 경우, 실리콘 원자들이 모여 형성되는 나노결정의 크기가, 더 이상 PL스펙트럼을 나타내지 않을 정도의 큰 크기로 성장되어 벌크 실리콘(bulk silicon)의 특성이 나타나기 때문인 것으로 생각한다.

그림 3은 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 이온주입하여 1300 °C로 각 시간별 열처리한 시료의 XRD 데이터이며, 그림 4는 같은 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 이온주입하여 1100 °C로 각 시간별 열처리한 시료의 XRD 데이터이다. 1300 °C의 온도에서 열처리 시간이 2시간 이상인 경우는 28.4°에서 발생하는 Si(111)피크가 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 앞서 논한 바와 같이 1300 °C로 30분 열처리한 경우에도 PL피크가 나타나지 않은 것으로 미루어보아, $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈인 경우는, 30분 열처리에서 이미 벌크 특성을 나

타넬 만큼의 큰 크기의 실리콘 미립자 들이 형성되기 시작할 것이다. Si(111)피크가 나타난다는 사실은 산화막내에 형성된 실리콘 미립자가 결정 형태임을 의미한다.

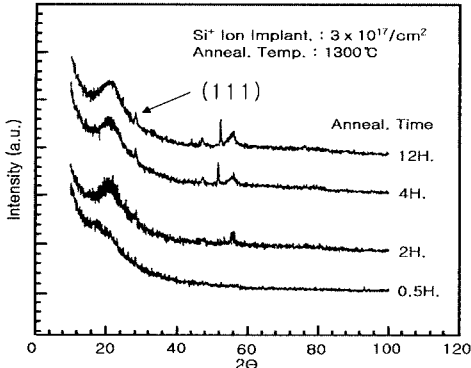


그림 3. $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈, 1300°C 로 열처리한 시료의 XRD 데이터.

Fig. 3. XRD data of samples at dose of $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ and annealed at 1300°C for 0.5, 2, 4, 8 and 12 hours.

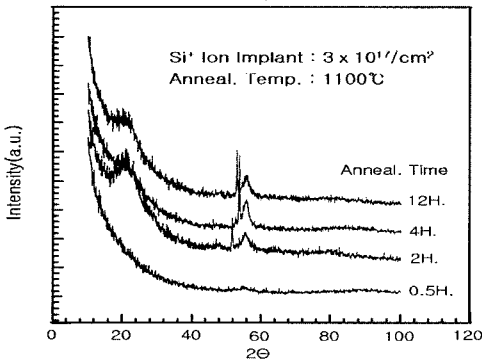


그림 4. $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈, 1100°C 로 열처리한 시료의 XRD 데이터.

Fig. 4. XRD data of samples at dose of $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ and annealed at 1100°C for 0.5, 2, 4, 8 and 12 hours.

즉, 실리콘 미립자는 실리콘 나노결정인 것이다. 한편, 그림 4에 나타난 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 1100°C 에서 열처리한 시료들의 XRD 데이터에서는 열처리 시간이 30분, 2시간, 4시간, 12시간의 어떤 경우에도 Si(111)피크가 관찰되지 않았다. 이는 1100°C 에서는 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 높은 도즈이더라도 30분에서 12시간에 이르는 동안의 열에너지로는 (111)면의 벌크 실리콘의 특성을

나타낼 만큼의 큰 크기의 실리콘 나노결정이 형성되지 않았음을 의미한다. 따라서 이 시료들에서는 모두 PL이 나타난 것일 것이다.

그림 5는 p형 (100)단결정 실리콘 기판에 560 nm의 열 산화막을 성장한 후, 130 keV의 주입 에너지로, $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 실리콘 이온을 주입한 후, 1000°C 부터 1300°C 까지의 온도 범위에서 각각 2시간 동안 질소분위기에서 열처리한 시료들의 PL스펙트럼이다. 그림 6은 이들 PL스펙트럼을 강도와 피크 파장의 변화로써 나타낸 것이다. 열처리를 하지 않은 시료에서는 PL이 나타나지 않았고 1000°C 에서 1200°C 사이의 온도에서는 PL이 나타났다. $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 1300°C 에서 2시간이상 열처리한 시료에서는 PL이 관측되지 않는 것은 앞서 논한 바와 같다. 1050°C 와 1100°C 의 온도 구간에서는 PL 피크 파장의 변화가 없이 705 nm에서 피크를 나타내면서 PL강도가 증가하였다. 1150°C 에서는 3 nm만큼 장파장으로 이동하면서 강도는 감소하였다. 1000°C 에서는 680 nm부근에서 피크를 나타내었고, 1200°C 에서는 1150°C 에서의 피크인 708 nm보다 장파장으로 이동한 720 nm 부근에서 피크를 나타내었다.

$1050^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$ 의 열처리 온도에서는 열 에너지의 증가에 의해, 나노결정의 크기가 성장하기보다는 dominant 크기의 나노결정의 수가 증가하게 되어, PL강도만 증가하게 되고, 열처리 온도가 그 보다 낮아지면 나노결정의 크기가 작아져, 양자구속효과에 의거하여, 단파장의 PL피크를 나타내고, 열처리 온도가 그 보다 높아지면, 나노결정의 크기를 성장시켜, 장파장의 PL피크를 나타내게 된다고 볼 수 있다.

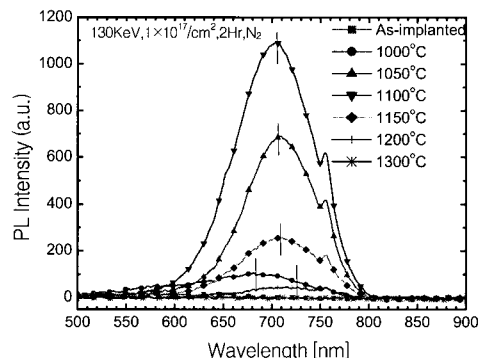


그림 5. 열처리 온도에 따른 PL스펙트럼의 변화.

Fig. 5. PL spectra with annealing temperature.

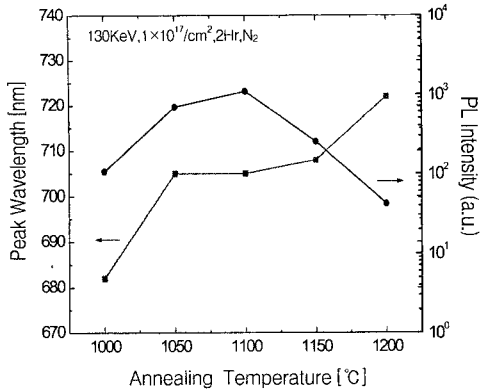
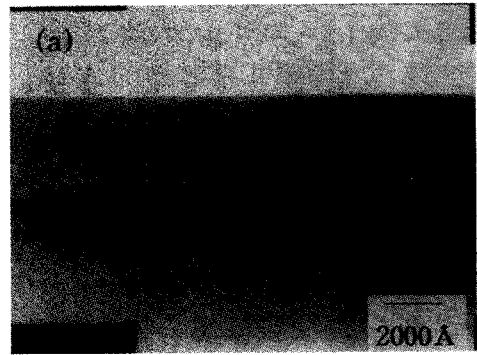


그림 6. 열처리 온도에 따른 PL피크와 강도 변화.

Fig. 6. Variation of PL peak wavelength and intensity with annealing temperature.

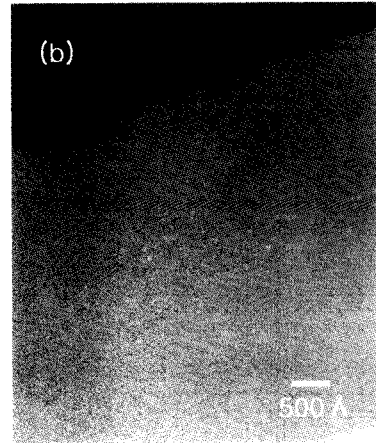
그림 7은 TEM 단면사진으로서 (a)는 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 1300 °C에서 30분 열처리한 시료의 사진이고 (b)는 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 1150 °C에서 2시간 열처리한 시료의 사진을 dark field 로 촬영한 사진이다. 그러므로 사진(a)에서는 검은 점이 실리콘 미립자이고 사진(b)에서는 흰점이 실리콘 미립자이다. (a)시료에서는 가장 작은 크기의 실리콘 미립자가 7 nm정도이고 (b)시료는 가장 큰 크기의 실리콘 미립자가 7 nm였다. 이로써 시료(b)는 7 nm이하의 실리콘 나노결정으로 분포되어 있고, 시료(a)는 7 nm이상 크기의 실리콘 나노결정으로 구성되어 있음을 추정할 수 있다. 한편, 시료(a)에서는 PL이 관측되지 않았고 시료(b)의 PL은 그림 5의 1150 °C로 나타나 있다. 실리콘 나노결정의 크기와 PL스펙트럼에 있어서 이러한 상관성을 보이는 것은 PL현상이 양자구속효과에 의한 것일 수 있음을 반영한다. 시료(b)를 200만 배로 확대한 사진에서 관찰한 가장 작은 크기의 실리콘 미립자는 약 1.5 nm였다.

실리콘 이온이 주입된 후 열처리되어 실리콘 나노결정을 함유하고 있는 산화막에 매 1분마다 습식 식각하였다. 매 1분마다 식각한 후, 남아 있는 산화막으로 부터의 PL스펙트럼을 관측하였다. 통상의 열산화막의 BOE에서의 식각율은 약 [100 nm/분]이고, p형 벌크 실리콘의 분당 식각율은 1 Å 미만으로서 열산화막의 식각율과 매우 큰 차이가 있다. 산화막내에 실리콘 미립자가 있는 경우 그 분포량에 따라 통상의 열산화



(a) 도즈가 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 이고, 1300 °C로 30분 열처리한 시료

(a) Sample at dose of $3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ and annealed at 1300 °C for 30 minutes



(b) 도즈가 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 이고, 1150 °C로 2시간 열처리한 시료 (명암 반전)

(b) Sample at dose of $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ and annealed at 1150 °C for 2Hr (dark field image)

그림 7. 실리콘미립자의 TEM 관찰.

Fig. 7. TEM observation of the si-nanoparticles.

막의 식각율과 달라질 것이다.

그림 8은 560 nm의 산화막에 130 keV의 에너지와 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 도즈로 실리콘 이온 주입한 후, 1100 °C에서 질소분위기로 2시간 열처리한 시료를 BOE로 1분 간격으로 식각한 경우의 분당 식각율의 변화를 측정하는 것이다. 처음 1분 동안의 식각율은 [88 nm/분]으로서 통상의 열산화막의 식각율 보다 조금 느린 식각율을 나타내었다. 그 후, 실리콘 원자의 농도가 높은 지점에 가까이 갈수록 식각율은 점점 감소하다가

R_p 지점 부근에서 가장 낮은 식각율을 나타낸다. R_p 지점을 지나면서 식각율은 다시 증가하여 9분 식각시는 처음 1분 식각율과 같아지는 경향으로서 약 (80 nm/분)의 식각율을 나타내었다.

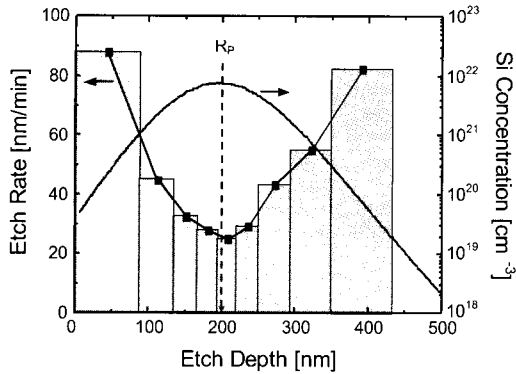


그림 8. 산화막내 실리콘 이온의 분포 시뮬레이션 결과와 산화막 깊이에 따른 식각률 변화.

Fig. 8. Simulated distribution of silicon ions in SiO_2 film and etch rate variation as SiO_2 film was being etched in every one minute.

이와 같이 R_p 지점 부근에서의 식각율이 가장 작고 그 양편으로 갈수록 식각율이 증가하여 통상의 열산화막의 식각율에 근접해 가는 사실로부터, 이온주입에 의해 열산화막 내에 과량 분포하는 실리콘 원자들이 열처리되어 형성된 실리콘 나노결정들이 기본적으로 가우시안 분포를 하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 그림 8에 나타난 시뮬레이션에 의한 농도 분포와 달리, 식각율의 변화가 R_p 지점을 기준하여 완전히 대칭이 되지 않는 것은 이온 주입에 의한 실제의 실리콘 원자의 농도 분포가 완전한 대칭의 가우시안 분포가 아니고 약간의 비대칭성을 띠고 있음을 말해 준다. 그림 9는 그림 8의 시료에 대해 매 1분마다 식각한 후의 PL스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. PL강도는 식각 시간이 증가할수록 점점 감소하였다. PL피크 파장은 처음 1분 식각한 후는 식각 실시 전에 비하여 장파장 쪽으로 이동한 후, 식각 시간이 증가할수록 다시 단파장 쪽으로 이동하였다. 이러한 결과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 그림 7의 TEM 단면 사진에서 본 바와 같이 R_p 지점으로 갈수록 더 큰 크기의 실리콘 나노결정이 많아지고 작은 크기의 실리콘 나노결정은 점차 그 수가 감소한다.

처음에는 산화막 표면 쪽에 있는 작은 크기의 실리콘 나노결정들이 먼저 식각된다. 따라서 피크를 결정하는 dominant 크기의 실리콘 나노결정의 크기가 커짐으로써, 양자구속효과에 의해, PL피크가 장파장 쪽으로 이동하게 된다. 한편, 식각에 의해 실리콘 나노결정의 수가 줄어들어 PL강도는 감소하게 된다. 식각이 산화막 안쪽으로 진행될수록, 큰 크기의 실리콘 나노결정들이 식각되어 산화막 내에 더 이상 분포하지 않게 됨으로써, 다시 작은 크기의 나노결정들이 dominant하게 된다. 이에 따라 PL피크는 단파장 쪽으로 이동하게 된다.

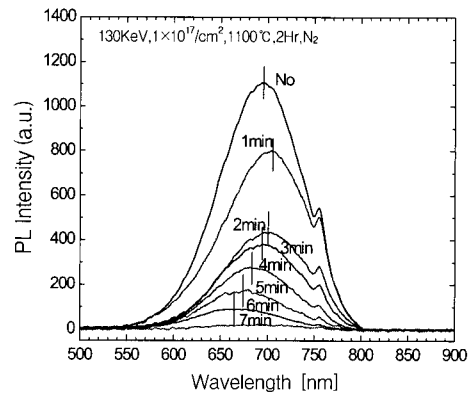


그림 9. 산화막 식각에 따른 PL스펙트럼 변화.

Fig. 9. PL spectra after every one minute of etching of SiO_2 film.

그림 8의 시료에서 식각 2분 후, 즉 표면으로 부터 약 130 nm의 산화막 지점부터 단파장으로 이동하기 시작하는 것으로 보아, 실리콘 원자의 농도 분포로 인하여, 이 지점부터 더 이상 PL현상을 나타내지 못할 만큼의 큰 크기의 실리콘 나노결정이 현저히 증가하기 시작함을 의미한다. 산화막 식각에 의해 나타난 이러한 PL스펙트럼의 변화는 산화막내에 분포하는 실리콘 나노결정의 크기와 수의 변화를 직접 반영하여 나타난 것이라고 볼 수 있다.

IV. 결 론

열산화막에 실리콘 이온을 주입하여 열처리한 시료들로부터의 PL스펙트럼의 변화를 관찰하였다. 이온도즈를 변화시켜 이온주입하고 열처리 온도와 시간을 일정하게 한 시료에서는, 도즈가

많을 수록 장파장 쪽에서 PL피크를 나타내었다. 동일한 이온도즈와 동일한 열처리 시간하에서는 열처리 온도가 높을수록 장파장 쪽에서 피크를 보이고, 강도는 감소하였다. 도즈의 변화와 온도의 변화에 따른 이러한 PL스펙트럼의 변화는 실리콘 나노결정의 크기와 수가 변화하였기 때문이다. XRD 데이터에 있어서는, PL이 나타나지 않는 시료에서는 Si(111)피크가 나타난 반면, PL이 나타난 시료에서는 Si(111)피크가 나타나지 않았다. 이러한 결과도 실리콘 나노결정의 크기가 PL스펙트럼 특성에 직접 연관됨을 말해준다. TEM 관측을 통해, Rp 지점으로 갈수록 실리콘 미립자의 크기가 커지는 것을 볼 수 있었다. 또, 열처리 온도가 낮고 이온도즈가 작은 시료에서 더 작은 크기의 실리콘 미립자가 발견되었다.

습식 식각을 실시하여 PL스펙트럼의 변화를 조사한 결과, 초기 식각시에는 장파장 쪽으로 이동하였다가 그 후는 단파장 쪽으로 이동하였다. 이러한 PL스펙트럼의 변화는 Rp 지점으로 갈수록 실리콘 나노결정의 크기가 증가하여, PL 현상을 나타낼 수 없는 큰 크기의 나노결정의 수가 점점 많아지기 때문이다. 실리콘 나노결정의 크기가 PL 피크 파장을 결정함은 양자구속 효과 이론에 합치된다.

참 고 문 헌

- [1] L. T Canham, "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers", *Appl. Phys. Lett.* vol 57, p.1046, 1990.
- [2] S. S. Iyer, R. T. Collins, and L. T. Graham, *Master. Res. Soc. Symp. Proc.* vol 256, p.1, 1991.
- [3] F. Buda, J. Kohanoff, and M. Parrinello, *Phys. Rev. Lett.* vol 69, p. 1272, 1992.
- [4] K. Molnar, T. Mohacsy, M. Adam, I. Barsony, *Optical Materials* vol 17, p. 111, 2001.
- [5] M. A. Tichler, R. T. Collins, J. H. Satish, and J. C. Tsang, *Appl. Phys. Lett.* vol 63, p.1648, 1993.
- [6] Tsutomu Shimizu-Iwayama, Yoichi Terao, Atsushi Kamiya, Motonori Takeda, Setsuo Nakao, Kazuo Saitoh, "Novel approach for synthesizing of nanometer-sized Si crystals in SiO₂ by ion implantation and their optical characterization", *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B.* vol 112, p. 214, 1996.
- [7] M. S. Hyberstan, "Absorption and emission of light in nanoscale silicon structures", *Phys. Rev. Lett.* vol 72, no.10, p.1514, 1994.
- [8] Hiroyuki Nishikawa, Eiki Watanabe, Daisuke Ito, Makoto Takiyama, Akihito Ieki and Yoshimichi Ohki, "Photoluminescence study of defects in ion-implanted thermal SiO₂ films", *J. Appl. Phys.* vol.78, no.2, p.842, 1995.
- [9] Y. Ishikawa, N. Shibata, and S. Fukatsu, "Fabrication of highly oriented Si:SiO₂ nanoparticles using low energy oxygen ion implantation during Si molecular beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* vol.68, no.16 p. 2249, 1996.
- [10] Yoshihiko Kanemitsu and Shinji Okamoto, "Visible luminescence from silicon quantum dots and wells", *Matter. Sci. And Eng. B.* vol.48, p. 108, 1997.
- [11] S. Y. Ma, Z. C. Ma, W. H Zong, H. X. Han Z. P. Wang, G. H. Li, G. Qin, and G. C. Qin, "Photoluminescence from nanometer Ge particle embedded Si oxide films", *J. Appl. Phys.*, vol.84, no.1, p.559, 1998.

 著 者 紹 介

김 광 희(金光熙)

1961년 1월 15일생
 1983년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1991년 경북대학교 산업대학원 반도체 전공(석사)
 1994년 경북대학교 대학원 전자공학과 박사 수료
 1983년~1997년 한국전자(주)연구소 BJT소자 개발그룹장, 공정소재파트장, SAW SBU장
 1998년~2001년 광전자(주) 미국사무소장, 오피스 테스크팀장, 영업개발 부장, LED연구실장
 2002년 1월~현재 경북대학교 전자공학과 박사 학위 준비 중
 주관심 분야 : 반도체소자설계, 공정설계, 개발, 상품화, 양자 점(QD)

오 항 석(吳恒錫)

1977년 7월 22일생
 1999년 충남대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 2001년 포항공과대학교 전자전기공학과(석사)
 2001년 3월~ 현재 하이디스 재직 중

장 태 수(張太洙)

1974년 10월 5일생
 2000년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 2002년 포항공과대학교 전자전기공학과(석사)
 2002년 3월~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정 재학 중

권 영 규(權英規)

1955년 3월 11일생
 1981년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1985년 일본 게이오 대학 이공학부 전기공학과(석사)
 1989년 일본 게이오 대학 이공학부 전기공학과(박사)
 1989년~1997년 2월 (재)산업과학기술연구소 전력전자 연구팀 팀장, 책임연구원
 1997년 3월 ~ (현)위덕대학교 교수
 주관심 분야 : 실리콘 물성 및 평가, 마이크로머시닝 공정개발

이 용 현(李龍鉉)

1946년 3월 17일생
 1975년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1977년 경북대학교 대학원 전자공학과(석사)
 1991년 충남대학교 대학원 전자공학과(박사)
 1979년~현재 경북대학교 전자전기공학부 교수
 주관심 분야 : 반도체 재료 및 공정, GaN 결정 성장 및 소자, 적외선 검지기 및 공진기 등임.