(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0005919
(43) 공개일자 2020년01월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01B 11/06 (2006.01) *G01J 3/44* (2006.01)
G01N 21/65 (2006.01) *G01N 21/84* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01B 11/0616 (2013.01)
G01J 3/4412 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0079521
(22) 출원일자 2018년07월09일
심사청구일자 2018년07월09일

(71) 출원인
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
서강대학교산학협력단
서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)
(72) 발명자
안종현
서울특별시 서대문구 연세로 50(신촌동)
정현식
서울특별시 강남구 압구정로 321, 35동 1005호(압구정동, 한양아파트)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김연권

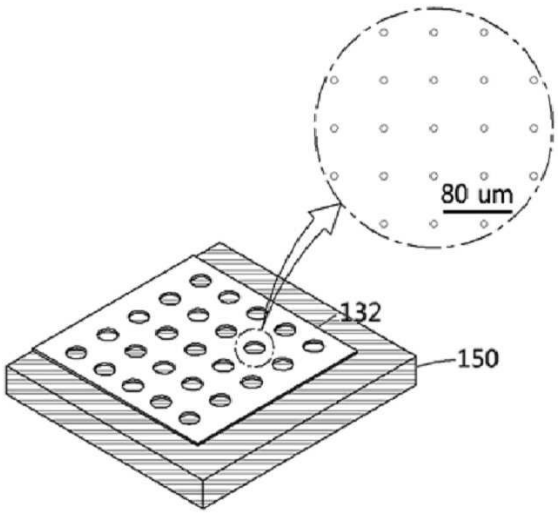
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 **실리콘 나노박막의 두께 측정 방법**

(57) 요 약

본 발명은 실리콘 나노박막의 두께 측정방법 및 그 제조 방법을 개시한다. 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정방법은 제1 실리콘막, 상기 제1 실리콘막 상에 형성된 제1 실리콘 산화물막 및 상기 제1 실리콘 산화막 상에 형성된 제2 실리콘막을 순차적으로 포함하는 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼를 준비하는 단계; 상기 제2 실리콘막의 표면을 열산화(thermal oxidation)를 진행하여 열 산화막을 형성하는 동시에 실리콘 나노박막(silicon nanomembrane)을 형성하는 단계; 상기 열 산화막을 제거하는 단계; 상기 실리콘 나노박막을 투명 기판 상에 전사하는 단계; 및 초저주파 라만 산란 분광법(ultralow frequency Raman spectroscopy)으로 상기 실리콘 나노박막의 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 측정하여 상기 실리콘 나노박막의 두께를 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

대 표 도 - 도1e



(52) CPC특허분류
G01N 21/65 (2013.01)
G01N 21/8422 (2013.01)
G01B 2210/56 (2013.01)
G01N 2021/8427 (2013.01)
(72) 발명자
이선우
서울특별시 동작구 여의대방로 22, 5동 301호(신대방동, 우성아파트)

김강원
경기도 용인시 기흥구 언남로29번서길 22, 202동 6호(언남동, 코팩테크노타운)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2015066337
부처명 과학기술정보통신부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 리더연구자지원사업
연구과제명 변형 제어 고성능 전자 소자 연구단(2/3, 1단계)
기 여 율 1/3
주관기관 연세대학교 산학협력단
연구기간 2016.12.01 ~ 2017.11.30
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2014060933
부처명 과학기술정보통신부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 글로벌프론티어사업
연구과제명 2차원 전자 소재 기반 생체신호 감지용 유연 전자 소자 개발(1/4, 2단계)
기 여 율 1/3
주관기관 연세대학교 산학협력단
연구기간 2016.07.01 ~ 2016.09.30
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711073444
부처명 과학기술정보통신부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 글로벌프론티어지원사업
연구과제명 소프트 광소자용 이차원 하이브리드 소재 기술 개발
기 여 율 1/3
주관기관 한국과학기술원
연구기간 2018.03.01 ~ 2018.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

제1 실리콘막, 상기 제1 실리콘막 상에 형성된 제1 실리콘 산화물막 및 상기 제1 실리콘 산화막 상에 형성된 제2 실리콘막을 순차적으로 포함하는 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼를 준비하는 단계;

상기 제2 실리콘막의 표면을 열산화(thermal oxidation)를 진행하여 열 산화막을 형성하는 동시에 실리콘 나노박막(silicon nanomembrane)을 형성하는 단계;

상기 열 산화막을 제거하는 단계;

상기 실리콘 나노박막을 투명 기판 상에 전사하는 단계; 및

초저주파 라만 산란 분광법(ultralow frequency Raman spectroscopy)으로 상기 실리콘 나노박막의 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 측정하여 상기 실리콘 나노박막의 두께를 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼은 광학 포논 모드(Optical Phonon Mode) 및 종파 음향 포논 모드(Longitudinal Acoustic Phonon Mode)에 의한 산란광의 라만 신호인 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 실리콘 나노박막의 라만 강도(Raman intensity)는 상기 실리콘 나노박막의 두께에 의존하여 변화되는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 실리콘 나노박막의 흡수율(absorption rate)은 상기 실리콘 나노박막의 두께에 의존하여 변화되는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼의 가장 강한 피크(intense peak)는 상기 실리콘 나노박막의 두께가 감소함에 따라 청색 쉬프트(blue-shifted)되는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 실리콘 나노 박막의 두께는 상기 열산화 시간(Thermal oxidation time)에 따라 조절되는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 실리콘 나노박막의 두께는 2㎚ 내지 18㎚인 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 실리콘 나노박막을 투명 기판 상에 전사하는 단계는,

상기 실리콘 나노박막을 패터닝하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

초저주파 라만 산란 분광법(ultralow frequency Raman spectroscopy)으로 상기 실리콘 나노박막의 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 측정하여 상기 실리콘 나노박막의 두께를 검출하는 단계는,

상기 실리콘 나노박막 상에 레이저를 조사하는 단계; 및

상기 조사된 레이저에 대응하여 상기 실리콘 나노박막으로부터 출사된 산란광을 분광하여 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 수득하는 단계; 및

상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 기초로 상기 실리콘 나노박막의 두께를 도출하는 단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 실리콘 나노박막의 라만 강도(Raman intensity)는 상기 조사된 레이저의 여기 에너지에 의존하여 변화되는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 11

제9항에 있어서,

상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 기초로 상기 실리콘 나노박막의 두께를 도출하는 단계는,

광탄성 모델(photoelastic model)에 기초하여 계산되는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방법.

청구항 12

제9항에 있어서,

상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 기초로 상기 실리콘 나노박막의 두께를 도출하는 단계는 다중 반사 모델(multiple reflection model)에 기초하여 계산되는 것을 특징으로 하는 실리콘 나노박막의 두께 측정방

법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명의 실시예는 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 초저주파 라만 산란 분광법을 이용한 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 벌크 실리콘(Bulk Silicon, Si)은 전자 장치 및 광자 응용 분야에서 가장 널리 사용되는 반도체이다. 최근 소자의 크기가 수 나노 미터로 감소됨에 따라 광학, 기계 및 전기 응용 분야에 초점을 맞춘 실리콘 나노박막(nanosembranes, Si NM)에 대한 광범위한 연구가 수행되고 있다.

[0004] 기재 면에 형성된 실리콘 박막의 두께를 측정하는데 있어서, 광의 진폭과 위상차를 구하여 두께를 측정하는 엘립소미터(ellipsometer) 장치 또는 광의 파장에 대한 반사율을 구하여 두께를 측정하는 스펙트로미터(spectrometer) 장치가 사용될 수 있다.

[0005] 그러나, 이 장치들을 이용하여 상기 박막의 두께를 측정하는 경우에는, 수학적 모델에 필요한 변수를 얻어야 하기 때문에 박막의 수가 많거나, 막의 두께가 광의 파장보다 작은 경우에는 편광 변화에 대한 추가 분석이나, 입사각에 대한 추가 측정이 필요하다.

[0006] 또한, 엘립소미터 장치를 이용할 경우에는 10 nm 이하 단위의 초박막 두께에서 측정정확도가 떨어지는 단점이 있다. 이러한 엘립소미터 분석 방법 이외에 두께 측정을 위해 주로 이용하는 투과전자현미경(TEM) 분석 방법은 엘립소미터 분석 방법에 비해 측정이 정확하지만, 시료(sample)를 소모해야 하는 단점이 있다.

[0007] 따라서, 라만 분광법을 이용하여 실리콘 나노박막의 두께를 측정하는 기술이 연구되었으나, 대부분은 상업적으로 입수 가능한 SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼(즉, 얇은 상부 실리콘층(Si)/ 절연층(SiO_2)/ 베이스 실리콘(Si) 기판)에서만 수행되었다. 이 경우, 베이스 실리콘 기판으로부터의 광학 신호가 상부 실리콘층의 라만 스펙트럼을 간섭하는 문제가 발생한다.

[0008] 또한, 라만 산란 측정은 여기 레이저 광의 파장에 따라 투과 깊이가 다르다. 예를 들어, 325 nm, 532 nm 및 784.8 nm의 레이저 여기 파장은 단결정 실리콘에 대해 각각 5 nm, 1,000 nm 및 12,000 nm의 투과 깊이를 갖는다. 이 중, 325 nm의 UV 레이저는 비교적 투과 깊이가 작기 때문에 베이스 실리콘 기판의 간섭을 감소시키기 위해 주로 사용되었다.

[0009] 그러나, 325 nm 레이저는 투과 깊이가 약 5 nm이기 때문에, 5 nm 미만의 상부 실리콘층의 두께를 측정하는 경우, 실리콘 나노박막의 하부에 형성된 베이스 실리콘 기판과 원하지 않는 간섭을 초래하게 된다. 따라서, 초박형(ultrathin)(< 5 nm)의 실리콘 나노박막의 두께 측정 정확도가 감소하는 문제가 있다.

[0010] 따라서, 초저주파(Ultralow-frequency) 라만 산란에 대한 연구가 요구되고 있다. 초저주파 라만 산란 분광법(Ultralow-frequency Raman scattering spectroscopy)은 기존 라만 산란 분광법으로 볼 수 있는 진동 포논 모드(vibrational phonon mode) 뿐만 아니라, 100 cm^{-1} 이하의 초저주파 영역의 신호를 검출할 수 있기 때문에, 진동 포논 모드의 가두기(confinement) 효과를 직접 실시(examining)하기 위한 유용한 방법 중의 하나이다.

[0011] 그러나, 초저주파 라만 분광법에서 라만 신호 검출을 방해하는 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 차단하는데 필요한 노치 필터 (Notch filter)는 UV 영역에서 사용할 수 없어, 레이저의 투과 깊이가 Si 두께의 거의 두 배였음에도 불구하고, SOI 웨이퍼에서 29 nm 내지 33 nm 두께의 상부 실리콘층으로부터의 초저주파 라만 산란에 관한 연구는 가시광 레이저 여기(413.1 nm)에 제한되었다.

[0012] 따라서, 실리콘 나노박막의 하부에 형성된 베이스층과의 간섭없이 실리콘 나노박막의 두께를 정확성 있게 측정하는 기술에 대한 연구가 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0014] (특허문헌 0001) 한국공개특허 제10-2015-0089310호, "실리콘 박막의 두께 측정방법"

(특허문헌 0002) 한국등록특허 제10-0845778호, "광투과 에지영역에서의 광투과율을 이용한 실리콘 웨이퍼두께 측정장치 및 그 방법"

발명의 내용

해결하려는 과제

[0015] 본 발명의 실시예의 목적은 초저주파 라만 산란 분광법을 이용하여 실리콘 나노박막의 두께를 정확하게 측정하고자 한다.

[0016] 본 발명의 실시예의 목적은 실리콘 나노박막을 사파이어 기판으로 전이시킨 다음, 두께를 측정함으로써, 두께 측정 정확도를 향상시키고자 한다.

[0017] 본 발명의 실시예의 목적은 초저주파 영역을 포함한 라만 산란 분광법을 이용한 실리콘 나노박막의 두께 측정 시, 라만 신호의 크기 변화와 초저주파 라만 신호의 피크 위치 변화를 이용하여 실리콘 나노박막의 두께 측정 정확도를 향상시키고자 한다.

[0018] 본 발명의 실시예의 목적은 열산화 시간을 제어하여 실리콘 나노 박막의 두께를 조절하여 용이하게 실리콘 나노박막을 형성하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0020] 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 제1 실리콘막, 상기 제1 실리콘막 상에 형성된 제1 실리콘 산화물막 및 상기 제1 실리콘 산화막 상에 형성된 제2 실리콘막을 순차적으로 포함하는 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼를 준비하는 단계; 상기 제2 실리콘막의 표면을 열산화(thermal oxidation)를 진행하여 열산화막을 형성하는 동시에 실리콘 나노박막(silicon nanomembrane)을 형성하는 단계; 상기 열 산화막을 제거하는 단계; 상기 실리콘 나노박막을 투명 기판 상에 전사하는 단계; 및 초저주파 라만 산란 분광법(ultralow frequency Raman spectroscopy)으로 상기 실리콘 나노박막의 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 측정하여 상기 실리콘 나노박막의 두께를 검출하는 단계를 포함한다.

[0021] 상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼은 광학 포논 모드(Optical Phonon Mode) 및 종파 음향 포논 모드(Longitudinal Acoustic Phonon Mode)에 의한 산란광의 라만 신호일 수 있다.

[0022] 상기 실리콘 나노박막의 라만 강도(Raman intensity)는 상기 실리콘 나노박막의 두께에 의존하여 변화될 수 있다.

[0023] 상기 실리콘 나노박막의 흡수율(absorption rate)은 상기 실리콘 나노박막의 두께에 의존하여 변화될 수 있다.

[0024] 상기 초저주파 영역의 라만 신호 중 가장 강한 피크(intense peak)는 상기 실리콘 나노박막의 두께가 감소함에 따라 청색 쉬프트(blue-shifted)될 수 있다.

[0025] 상기 실리콘 나노 박막의 두께는 상기 열산화 시간(thermal oxidation time)에 따라 조절될 수 있다.

[0026] 상기 실리콘 나노박막의 두께는 2㎚ 내지 18㎚일 수 있다.

[0027] 상기 실리콘 나노박막을 투명 기판 상에 전사하는 단계는, 상기 실리콘 나노박막을 패터닝하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0028] 초저주파 라만 산란 분광법(ultralow frequency Raman spectroscopy)으로 상기 실리콘 나노박막의 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 측정하여 상기 실리콘 나노박막의 두께를 검출하는 단계는, 상기 실리콘 나노박막 상에 레이저를 조사하는 단계; 및 상기 조사된 레이저에 대응하여 상기 실리콘 나노박막으로부터 출사된 산란광

을 분광하여 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 수득하는 단계; 및 상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 기초로 상기 실리콘 나노박막의 두께를 도출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0029] 상기 실리콘 나노박막의 라만 강도(Raman intensity)는 상기 조사된 레이저의 여기 에너지에 의존하여 변화될 수 있다.

[0030] 상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 기초로 상기 실리콘 나노박막의 두께를 도출하는 단계는, 광탄성 모델(photoelastic model)에 기초하여 계산될 수 있다.

[0031] 상기 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 기초로 상기 실리콘 나노박막의 두께를 도출하는 단계는 다중 반사 모델 (multiple reflection model)에 기초하여 계산될 수 있다.

발명의 효과

[0033] 본 발명의 실시예들에 따르면 초저주파 라만 산란 분광법을 이용하여 실리콘 나노박막의 두께를 정확하게 측정할 수 있다.

[0034] 본 발명의 실시예들에 따르면 실리콘 나노박막을 사파이어 기판으로 전이시킨 다음, 두께를 측정함으로써, 두께 측정 정확도를 향상시킬 수 있다.

[0035] 본 발명의 실시예들에 따르면 초저주파 영역을 포함한 라만 산란 분광법을 이용한 실리콘 나노박막의 두께 측정 시, 라만 신호의 크기 변화와 초저주파 라만 신호의 피크 위치 변화를 이용하여 실리콘 나노박막의 두께 측정 정확도를 향상시킬 수 있다.

[0036] 본 발명의 실시예들에 따르면 열산화 시간을 제어하여 실리콘 나노 박막의 두께를 조절하여 용이하게 실리콘 나노박막을 형성할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0038] 도 1a 내지 도 1e는 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정을 위한 투명 기판 상에 실리콘 나노박막을 제조하는 방법을 도시한 입체도이다.

도 2a는 종래의 SOI 웨이퍼를 이용한 실리콘 박막 두께 측정을 도시한 단면도이다.

도 2b는 파장(Wavelength)에 따른 실리콘 투과 깊이(Penetration depth)를 도시한 그래프이다.

도 3a는 실리콘 나노 박막 두께에 따른 브릴루앙 영역의 변화를 도시한 그래프이다.

도 3b는 사파이어 기판 상에 형성된 실리콘 나노박막의 다중 반사 간섭을 도시한 개략도이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법에 따라 제조된 사파이어 기판 상에 전사된 실리콘 나노박막의 두께에 따른 광학 이미지를 도시한 것이다.

도 5a는 내지 도 5c는 실리콘 나노박막의 두께에 따른 단면 투과전자현미경(transmission electron microscopy; TEM) 측정 이미지를 도시한 것이다.

도 6a는 열산화 시간(Thermal oxidation time)에 따른 실리콘 나노박막의 두께를 도시한 그래프이다.

도 6b는 사파이어 기판 상에 형성된 실리콘 나노박막의 투과율 스펙트럼(Transmittance spectra)을 도시한 그래프이다.

도 7은 벌크 및 표면 브릴루앙 대역(Brillouin zone)을 도시한 이미지이다.

도 8a 내지 도 8e는 실리콘 나노박막(2D Brillouin zone)의 두께에 따른 밴드 구조를 도시한 그래프이고, 도 8f는 벌크 실리콘의 밴드 구조(3D Brillouin zone)를 도시한 그래프이고, 도 8g는 E_1 엣지와 관련된 흡수 피크(absorption peak)를 계산한 흡수 스펙트럼(absorption spectra)을 도시한 그래프이다.

도 9a 내지 도 9e는 여기 에너지(excitation energies)에 따른 2nm 내지 18nm 두께의 실리콘 나노박막의 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이고, 도 9f는 여기 에너지(excitation energies)에 따른 2nm 내지 18nm 두께의 실리

콘 나노박막의 라만 강도의 이론적 값(선) 및 실험 값(도트)을 비교하여 도시한 그래프이다.

도 10a는 2.81eV 여기에서 측정한 실리콘 나노박막 두께에 따른 초저주파 영역 라만 스펙트럼(Ultralow-frequency Raman spectra)을 도시한 그래프이고, 도 10b는 2.33eV 여기에서 측정한 실리콘 나노박막 두께에 따른 초저주파 영역 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이며, 도 10c는 실리콘 두께에 따른 이론적으로 계산된 초저주파 영역 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이고, 도 10d는 실리콘 나노박막의 두께에 따른 측정된 라만 피크(실선) 및 이론적으로 계산된 라만 피크(점선)를 도시한 그래프이며, 도 10e 및 도 10f는 실리콘 나노박막의 두께에 따른 단축 인장 변형률(Uniaxial tensile strain) 의존 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이다.

도 11은 측정된 라만 강도를 이론적으로 계산된 라만 강도로 나눔으로써 표준화된 라만 강도를 도시한 그래프이다.

도 12는 동일 ± 0.543nm 두께 변화, 즉 두께가 실리콘의 격자 상수 정도만큼 변할 때에 따른 라만 피크 위치의 민감도를 도시한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0039] 이하 첨부 도면들 및 첨부 도면들에 기재된 내용들을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세하게 설명하지만, 본 발명이 실시예에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다.

[0040] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 "포함한다(comprises)" 및/또는 "포함하는(comprising)"은 언급된 구성요소, 단계, 동작 및/또는 소자는 하나 이상의 다른 구성요소, 단계, 동작 및/또는 소자의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

[0041] 본 명세서에서 사용되는 "실시예", "예", "측면", "예시" 등은 기술된 임의의 양상(aspect) 또는 설계가 다른 양상 또는 설계들보다 양호하다거나, 이점이 있는 것으로 해석되어야 하는 것은 아니다.

[0042] 또한, '또는' 이라는 용어는 배타적 논리합 'exclusive or'이기보다는 포함적인 논리합 'inclusive or'를 의미한다. 즉, 달리 언급되지 않는 한 또는 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 'x가 a 또는 b를 이용한다'라는 표현은 포함적인 자연 순열들(natural inclusive permutations) 중 어느 하나를 의미한다.

[0043] 또한, 본 명세서 및 청구항들에서 사용되는 단수 표현("a" 또는 "an")은, 달리 언급하지 않는 한 또는 단수 형태에 관한 것이라고 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 일반적으로 "하나 이상"을 의미하는 것으로 해석되어야 한다.

[0044] 아래 설명에서 사용되는 용어는, 연관되는 기술 분야에서 일반적이고 보편적인 것으로 선택되었으나, 기술의 발달 및/또는 변화, 관례, 기술자의 선호 등에 따라 다른 용어가 있을 수 있다. 따라서, 아래 설명에서 사용되는 용어는 기술적 사상을 한정하는 것으로 이해되어서는 안 되며, 실시예들을 설명하기 위한 예시적 용어로 이해되어야 한다.

[0045] 또한, 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 설명 부분에서 상세한 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 아래 설명에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌 그 용어가 가지는 의미와 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 이해되어야 한다.

[0046] 한편, 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 구성 요소들은 용어들에 의하여 한정되지 않는다. 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.

[0047] 또한, 막, 층, 영역, 구성 요청 등의 부분이 다른 부분 "위에" 또는 "상에" 있다고 할 때, 다른 부분의 바로 위에 있는 경우뿐만 아니라, 그 중간에 다른 막, 층, 영역, 구성 요소 등이 개재되어 있는 경우도 포함한다.

[0048] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 공통적으로 이해될 수 있는 의미로 사용될 수 있을 것이다. 또 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 용어들은 명백하게 특별히 정의되어 있지 않는 한 이상적으로 또는 과도하게 해석되지 않는다.

[0049] 한편, 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는, 그 상세한 설명을 생략할 것이다. 그리고, 본 명세서에서 사용되는 용어(terminology)들은 본 발명의 실시예를 적절히 표현하기 위해 사용된 용어들로서, 이는 사용자, 운용자의

의도 또는 본 발명이 속하는 분야의 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 본 용어들에 대한 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.

[0051] 도 1a 내지 도 1e는 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정을 위한 투명 기판 상에 실리콘 나노박막을 제조하는 방법을 도시한 입체도이다.

[0052] 도 1a는 SOI 웨이퍼를 도시한 입체도이다.

[0053] 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼를 준비한다.

[0054] SOI 웨이퍼는 제1 실리콘막(110), 제1 실리콘막(110) 상에 형성된 제1 실리콘 산화물막(120) 및 제1 실리콘 산화막(120) 상에 형성된 제2 실리콘막(130)을 순차적으로 포함한다.

[0055] SOI 웨이퍼는 실리콘 기판에 이온주입공정에 의해 산소이온을 주입하여 실리콘 기판 내부에 과량의 산소를 함유하는 산소이온주입층을 형성한 다음, 비교적 고온에서의 열처리 공정에 의해 산소와 실리콘을 반응시켜 실리콘 기판(제1 실리콘막(110) 및 제2 실리콘막(130)) 내부에 형성된 매몰 산화막(제1 실리콘 산화막(SiO_2))을 형성하여 제조할 수 있으나, 이에 제한되지 않는다.

[0056] SOI 웨이퍼는 반도체 소자를 집적하게 되면 벌크(bulk) 실리콘의 단결정 실리콘 웨이퍼에 비해 작은 접합용량 및 낮은 문턱전압 확보가 가능하여 소자의 고속화 및 저전압화가 용이할 뿐만 아니라 완전한 소자분리에 의해 래치업(latch-up)을 제거할 수 있다.

[0057] 도 1b는 실리콘 나노박막 및 제2 실리콘 산화물막이 형성된 SOI 웨이퍼를 도시한 입체도이다.

[0058] 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 제2 실리콘막(130)의 표면을 열산화(thermal oxidation)를 진행하여 열 산화막(140)을 형성하는 동시에 실리콘 나노박막(silicon nanomembrane; 131)을 형성한다.

[0059] 제2 실리콘막(130)의 표면에 열산화를 진행하면, 제2 실리콘막(130)의 표면이 산화되어, 제2 실리콘막(130)의 두께(T1)가 감소됨과 동시에 열 산화막(140)이 성장될 수 있다.

[0060] 또한, 열 산화막(140)은 실리콘(Si)과 산소(O_2) 가스의 결합 반응(combination reaction)을 통해 성장될 수 있고, 열산화 공정으로 제2 실리콘막(130)의 두께(T1)를 감소시켜 실리콘 나노박막(131)을 형성할 수 있다.

[0061] T1의 두께를 갖는 제2 실리콘막(130)에 열 산화 공정을 진행하여 T3의 두께를 갖는 실리콘 나노박막(131)을 제조하는 경우, 제2 실리콘막(130)은 1000℃에서 0.55 nm/min정도의 두께 감소 정도를 나타낼 수 있다.

[0062] 또한, 제2 실리콘막(130)에서 실리콘 나노박막(131)으로 감소된 두께(T1-T3)와 열산화 공정에 의해 생성된 열산화막(140)의 두께(T2)는 특정 비율을 가질 수 있고, 바람직하게는, 제2 실리콘막(130)에서 실리콘 나노박막(131)으로 감소된 두께(T1-T3)와 열 산화막(140; T2) 사이의 비율은 46%:100%(T1-T3 : T2 = 46%:100%)일 수 있다.

[0063] 따라서, 열 산화막(140)의 두께(T2)는 제2 실리콘막(130)에서 실리콘 나노박막(131)으로 감소된 두께(T1-T3) 대비 217(100/46)% 정도 증가된 두께를 가질 수 있다.

[0064] 예를들면, 1 nm 제2 실리콘막(130; T1)이 열산화되면, 대략 2.17 nm의 열 산화막(140; T2)이 형성될 수 있다.

[0065] 또한, 실리콘 나노박막(131)의 두께(T3)는 2㎚ 내지 18㎚일 수 있다.

[0066] 또한, 열 산화막(140)의 두께(T2)는 열산화 시간(thermal oxidation time)에 비례하여 증가되기 때문에, 실리콘 나노 박막(131)의 두께(T3)는 열산화 시간에 따라 조절될 수 있다. 따라서, 열산화 시간을 조절하여 실리콘 나노 박막(131)의 두께(T3)를 정밀하게 제어할 수 있다.

[0067] 즉, 실리콘 나노박막(131)의 두께(T3)는 열산화 시간에 따라 2㎚ 내지 18㎚로 조절될 수 있다.

[0068] 열산화는 산화성 가스 분위기에서 열처리를 진행하는 방법이라면 특히 한정되지 않고, 예를 들면, 열산화는 수평 오븐(horizontal oven, TEL에 의해 시판중인 장비) 내에서 800℃ 내지 1150℃의 온도 범위에서 수행될 수 있다.

[0069] 도 1c는 제2 실리콘 산화물막이 제거된 SOI 웨이퍼를 도시한 입체도이다.

[0070] 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 열 산화막(140)을 제거한다.

[0071] 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 열 산화막(140)을 제거함으로써, 제2 실리콘막(130)보다 감소된 두께를 갖는 실리콘 나노박막(131)을 형성(박막화)할 수 있다.

[0072] 열 산화막(140)은 실리콘 나노박막(131)의 표면으로부터 플루오르화수소산(hydrofluoric acid, HF), BOE 및 이들의 조합 중 적어도 어느 하나를 이용한 습식 식각으로 제거될 수 있으나, 이에 제한되지 않고, 예를 들면 황산과 같은 다른 강산을 사용하여 식각될 수 도 있다.

[0073] 예를 들면, 열 산화막(140)은 플루오르화수소산(HF) 용액이 10 vol% 내지 50 vol%의 농도로 물에 희석되어 사용될 수 있고, 플루오르화수소산(HF) 용액은 20℃ 내지 30℃의 온도 범위에서 적용될 수 있으며, 식각은 30초 내지 500초의 시간 동안 수행될 수 있다.

[0074] 만약, 플루오르화수소산(HF) 용액을 물에 10 vol%의 농도로 희석시키고, 20℃ 내지 30℃의 온도에서 100초 내지 500초 동안 적용하는 경우, 열 산화막(140) 100nm를 제거할 수 있다.

[0075] 열 산화막(140)의 식각 시간은 열산화에 의해 생성된 열 산화막(140)의 두께에 비례하나. 열 산화막(140)을 완전히 제거하기 위해 식각 시간을 약간 증가시킬 수 있다.

[0076] 또한, 실시예에 따라, 열 산화막(140)을 제거한 다음, 실리콘 나노박막(131)을 세정시킬 수 있고, 세정은 실리콘 나노박막(131)을 포함하는 SOI 기판을 탈이온수에 담궈 진행될 수 있으나, 이에 제한되지 않는다.

[0077] 예를 들면, 세정은 실리콘 나노박막(131)을 포함하는 SOI 기판을 탈이온수와 수산화암모늄(ammonium hydroxide, NH_4OH), 과산화수소(hydrogen peroxide, H2O2) 및 탈이온수의 혼합물을 포함하며 "SC1(Standard Clean 1)"으로 알려진 용액과 염산(hydrochloric acid, HCl), 과산화수소(hydrogen peroxide, H_2O_2) 및 탈이온수의 혼합물을 포함하며 "SC2(Standard Clean 2)"으로 알려진 용액에 순차적으로 담궈 진행될 수 있다.

[0078] 도 1d는 패터닝된 실리콘 나노박막을 도시한 입체도이다.

[0079] 실시예에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 실리콘 나노박막(131)을 패터닝할 수 있다.

[0080] 패터닝된 실리콘 나노박막(132)은 형성하고자 하는 패턴을 갖는 포토레지스트 패턴을 마스크로 하여 실리콘 나노 박막(131)을 패터닝할 수 있다.

[0081] 패터닝된 실리콘 나노박막(132)의 패턴은 형성하고자 하는 소자에 따라 다양하게 선택될 수 있기에, 패턴의 형상은 특별히 제한되지 않는다.

[0082] 도 1e는 투명 기판 상에 전사된 실리콘 나노박막을 도시한 입체도이다.

[0083] 도 1e는 패터닝된 실리콘 나노박막(132)을 도시하고 있으나, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 패터닝되지 않은 실리콘 나노박막을 투명 기판 상에 전사할 수 있다.

[0084] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법의 실리콘 나노박막은 패터닝되지 않은 실리콘 나노박막(131) 및 패터닝된 실리콘 나노박막(132) 중 어느 하나일 수 있기 때문에, 이하에서는, 패터닝된 실리콘 나노박막(132)을 실리콘 나노박막(132 또는 131)으로 명시하기로 한다.

[0085] 보다 구체적으로, 실리콘 나노박막(132 또는 131)을 투명 기판(150) 상에 전사하는 기술은 HF를 이용하여 제1 실리콘 산화막(120)을 녹여 실리콘 나노박막(132)을 제1 실리콘막(110)으로부터 분리시켜야만 PDMS를 이용하여 실리콘 나노박막(132 또는 131)을 전사시킬 수 있다.

[0086] 따라서, 패터닝된 실리콘 나노박막(132)의 경우에는, HF가 제1 실리콘 산화막(120)에 도트(dot)을 통하여서 전면에 닿기 때문에 제1 실리콘 산화막(120)을 전체적으로 식각하기 용이하여 패터닝된 실리콘 나노박막(132)이 전체적으로 PDMS로 전사될 수 있다.

[0087] 패터닝되지 않은 실리콘 나노박막(131)의 경우에는, HF가 제1 실리콘 산화막(120)의 바깥쪽 부분만 식각하여 HF가 침투할 수 있는 엣지(edge) 부분의 일부 실리콘 나노박막(131)만이 PDMS로 전사될 수 있다. 따라서, 패터닝되지 않은 실리콘 나노박막(131)을 사용하는 경우, 실리콘 나노박막(131)을 부분적으로 전사시킬 수 있다.

[0088] 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 실리콘 나노박막(131 또는 132)을 투명 기판

(150) 상에 전사한다.

[0089] 실리콘 나노박막(132 또는 131)은 표면에 폴리머 스탬프를 부착하여 간단하게 투명 기판(150)으로 전사될 수 있다.

[0090] 폴리머 스탬프는 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane; PDMS), 과불소화 폴리에테르(perfluorinated polyethers; PFPE), 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate; PUA), 폴리메틸메타크릴레이트(polymethylmethacrylate; PMMA), 폴리비닐알콜(polyvinylalcohol; PVA), 폴리비닐클로라이드(polyvinyl chloride; PVC), 폴리카보네이트(polycarbonate; PC), 폴리테트라플루오로에틸렌(polytetrafluoroethylene; PTFE), 벤질메타-아크릴레이트(benzylmetha-acrylate), 열박리 테이프(thermal release tape; TRT), UV 박리 테이프 및 이들의 조합 중 적어도 어느 하나가 선택될 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0091] PDMS 및 PFPE는 점탄성(viscoelasticity)을 이용하고, PUA의 경우 표면에너지 차이를 이용하며, TRT의 경우 TRT에 코팅되어 있는 접착제의 온도 변화에 따른 접착력 및 열팽창계수의 차이를 이용하여 전사할 수 있다.

[0092] 바람직하게는, 점탄성을 이용하는 PDMS가 사용될 수 있다.

[0093] 투명 기판(150)으로는 유리, 사파이어, SiC, MgO, Si, SiO_2, Ge, GaN, AlN, GaP, InP, GaAs, SiC, Al2O3, LiAlO3, MgO, 그래파이트, 그래핀, 플라스틱, 세라믹 및 고무 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있으나, 바람직하게는 사파이어 기판이 사용될 수 있다.

[0094] 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 실리콘 나노박막(132 또는 131)을 SOI 기판이 아닌 사파이어 기판과 같은 투명 기판(150)으로 전사하여 두께를 측정함으로써, 가시광 및 근적외선 레이저(Vis-NIR laser)을 사용하는 경우에도 베이스(base) 실리콘 기판(Si Substrate)인 제1 실리콘막으로 인한 광학적 간섭을 방지할 수 있다.

[0095] 이후, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 초저주파 라만 산란 분광법(ultralow frequency Raman spectroscopy)으로 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 측정하여 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 검출한다.

[0096] 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께의 변화는 라만 강도(Raman intensity)의 변화 및 초저주파 라만 피크 위치(ultralow-frequency Raman peak position)의 변화로 측정 할 수 있다.

[0097] 먼저, 라만 강도 변화는 $520cm^{-1}$ 에 위치한 실리콘 라만 피크(silicon Raman peak)의 두께에 따른 강도(intensity) 변화를 일반적인 라만 산란 분광법으로 측정할 수 있다. 이때, 실리콘 나노박막(132 또는 131)에서 측정된 라만 강도를 벌크(bulk) 실리콘에서 동일한 방식으로 측정된 참조 라만 강도(reference Raman intensity)로 나눠준 값을 이용한다면, 이 값은 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 알기 위한 비교 지표가 될 수 있다($520cm^{-1}$ 위치한 라만 피크(Raman peak)는 두께에 따라 변화가 없다).

[0098] 초저주파 라만 피크 위치의 변화는 < $100cm^{-1}$ 영역의 실리콘 초저주파 라만 피크(silicon ultralow-frequency Raman peak)의 위치 변화를 초저주파 라만 산란 분광법으로 알 수 있다.

[0099] 따라서, 본 발명에서 명시하고 있는 초저주파 라만 산란 분광법(ultralow frequency Raman spectroscopy)은 라만 산란 분광법(Raman spectroscopy) 및 초저주파 라만 산란 분광법(ultralow frequency Raman spectroscopy)을 포괄하는 의미로 사용된다.

[0100] 라만 산란 분광법은 강력한 단색의 여기광을 이용하여 분자의 진동 에너지(포논 에너지)만큼의 차이가 있는 산란광이 생기는 현상인 라만 효과를 이용하여, 분자의 진동 에너지를 구하는 분광법이다.

[0101] 라만 산란 신호를 관찰하기 위해서는, 상대적으로 매우 큰 레일리 산란(Rayleigh scattering) 신호를 광학 필터를 이용하여 제거하는 기술이 중요하다.

[0102] 초저주파 라만 산란 분광법은 좁은 영역의 빛을 필터링해주는 노치(Notch) 필터를 이용하여, 기존 라만 산란 분광법의 라만 신호 관찰 한계 영역인 100 cm^{-1} 보다 낮은 영역까지의 라만 신호를 관찰할 수 있다. 실리콘의 경우, 주파수 영역별로 관찰되는 신호의 해당하는 포논의 종류가 다르다.

[0103] 일반적인 라만 산란 측정을 통해 관찰되는 신호는 실리콘의 광학 포논(optical phonon)에 의한 신호인데 반해,

초저주파 영역에서 관찰되는 신호는 실리콘의 음향 포논(acoustic phonon)에 의한 신호이다.

[0104] 따라서, 일반적인 라만 산란 분광법 및 초저주파 라만 산란 분광법 발생하는 원리는 동일하나, 검출되는 영역 및 관찰하는 포논이 다르다. 실리콘의 광학 포논(optical phonon)에 의한 신호는 라만 산란 분광법으로, 실리콘의 음향 포논(acoustic phonon)에 의한 신호는 초저주파 라만 산란 분광법으로 관찰될 수 있다.

[0105] 라만 분광법으로 측정 시에는 실리콘 나노박막의 두께 및 여기 레이저 에너지에 따라 라만 강도가 변화(도9a 내지 도 9f 참조)되기에, 이러한 라만 강도 변화를 일반적인 라만 분광법으로 측정한 벌크 실리콘 라만 강도로 나누어준다면, 그 값을 이용하여 실리콘 나노박막의 두께를 측정하는데 사용할 수 있다.

[0106] 이러한 라만 강도의 변화는 공진 라만 산란(resonant Raman scattering) 및 간섭 효과(interference)에 의해 초래될 수 있다.

[0107] 특히, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법에 사용되는 초저주파 라만 산란 분광법(초저주파 라만 분광법; Ultralow-frequency Raman spectroscopy)은 일반적인 라만 분광으로 얻을 수 없는 진동 모드(vibration mode)에 정보를 제공할 수 있다.

[0108] 예를 들면, 종래의 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼은 SOI 웨이퍼 상에 형성된 29 nm 내지 33 nm 두께의 실리콘 나노박막의 두께를 측정하였으나, 이론적으로 0 cm^{-1} 내지 5 cm^{-1}의 범위에 있어야 하는 음향 포논(acoustic phonon)에 의한 P_1 피크는 강한 레일리(Rayleigh) 산란 때문에 확인되지 않았다.

[0109] 또한, 5 cm^{-1} 내지 10 cm^{-1} 범위의 웨이퍼의 베이스 실리콘으로부터의 신호는 실리콘 나노박막 피크를 정확도를 감소시켰다.

[0110] 그러나, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 사파이어 기판(150) 상에 전사된 실리콘 나노박막(132 또는 131)을 사용하여 두께를 측정함으로써, 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼의 정확도를 향상시킬 수 있다.

[0111] 초저주파 라만 산란 분광법으로 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 검출하는 공정은 실리콘 나노박막(132 또는 131) 상에 레이저를 조사하는 단계 및 조사된 레이저에 대응하여 실리콘 나노박막(132 또는 131)으로부터 출사된 산란광을 분광하여 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 수득하는 단계 및 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 기초로 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 도출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0112] 물질에 레이저를 조사할 경우 주파수 천이된 산란광이 발생하는 현상을 라만 효과라고 하는데, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 실리콘 나노박막(132 또는 131)에 레이저를 조사하고, 조사된 레이저에 의해 발생하는 산란광의 스펙트럼을 분석할 수 있다.

[0113] 따라서, 실리콘 나노박막(132 또는 131)에 레이저 광원으로부터 레이저를 조사하고 조사된 레이저에 의해 산란된 빛을 라만 분광기에 의해서 분석한다.

[0114] 그러나, 실리콘 나노박막(132 또는 131)에 레이저를 조사하는 경우, 라만 산란이 실리콘 나노박막(132 또는 131)에서만 일어나는 것이 아니라, 사파이어 기판(150)에서도 일어나기 때문에, 산란된 스펙트럼에는 사파이어 기판(150)에 의해 산란된 광도 포함될 수 있다.

[0115] 따라서, 실시예에 따라, 산란광의 스펙트럼으로부터 사파이어 기판(150)에서 산란된 광의 스펙트럼을 제거할 수 있다. 사파이어 기판(150)에서 산란된 광의 스펙트럼을 제거하는 방법은 표면에 실리콘 나노박막(132 또는 131)이 형성되지 않는 사파이어 기판(150)으로부터 라만 산란광(이하 참조 산란광)을 획득한 후 참조 산란광의 스펙트럼에 해당하는 스펙트럼을 실리콘 나노박막(132 또는 131) 산란광의 스펙트럼으로부터 제거함으로써 제거할 수 있다.

[0116] 보다 구체적으로, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 실리콘 나노박막(132 또는 131)과 투명 기판(150) 사이의 음향 불일치(acoustic mismatch)를 계산하고, 이를 통하여서 두께에 따른 선형 분산 영역의 고유 모드(q_m) 계산 값을 알 수 있다. 결과적으로 두께에 따른 초저주파 라만 피크의 위치를 예상할 수 있고, 이를 측정값과 비교 시 실리콘 나노 박막(132 또는 131)의 두께를 알 수 있다.

[0117] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법에 따라 측정되는 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께는 광탄성 모델(photoelastic model)에 기초하여 계산될 수 있다.

[0118] 또한, 초저주파 라만 산란 분광법을 이용하여 수득된 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼은 광학 포논 모드(Optical Phonon Mode) 및 종파 음향 포논 모드(Longitudinal Acoustic Phonon Mode)에 의한 산란광의 라만 신호일 수 있다.

[0119] 수득된 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼에 의한 산란광의 라만 신호는 일반적인 라만 스펙트럼(~520 cm^{-1})에 의한 광학 포논 모드(Optical Phonon Mode) 및 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼에 의한 종파 음향 포논 모드(Longitudinal Acoustic Phonon Mode)일 수 있다.

[0120] 또한, 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 라만 강도(Raman intensity)는 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께에 의존하여 변화될 수 있다.

[0121] 도 3a는 실리콘 나노 박막 두께에 따른 브릴루앙 영역의 변화를 도시한 그래프이다.

[0122] 도 3a를 참조하면, 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께가 줄어들수록 브릴루앙 영역의 크기(q = ± ð / d, d: 두께)가 증가하게 되어, d가 감소할 때, 초저주파 라만(ultralow frequency Raman) 신호와 관련된 q = 0에서 가장 낮은 위치에 있는 종파 음향 포논모드의 '접힌 가지(folded branch)'가 증가 하게 된다.

[0123] 이로 인해 초저주파 라만 피크들이 청색 쉬프트(blue-shifted)될 수 있다(도 3a의 k를 q로 참조).

[0124] 따라서, 초저주파 영역의 라만 신호 중 가장 강한 피크는 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께가 감소함에 따라 청색 쉬프트(blue-shifted)될 수 있다.

[0125] 또한, 라만 강도(Raman intensity) 변화는 520cm^{-1}에 위치한 실리콘 라만 피크(silicon Raman peak)의 두께에 따른 강도(intensity) 변화를 라만 산란 분광법으로 알 수 있다. 이때, 실리콘 나노박막(132 또는 131)에서 측정된 라만 강도를 벌크 실리콘에서 동일한 방식으로 측정된 라만 강도로 나눠준 값을 참조(reference)로 이용한다면, 이 값은 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 알기 위한 비교 지표가 될 수 있다(520 cm^{-1} 위치한 라만 피크는 두께에 따라 위치의 변화가 없는 반면, 나노 미터 수준의 얇을 경우, 두께에 민감하게 강도(intensity)가 변화된다).

[0126] 또한, 다중간섭모델(MRM)을 이용하여 분석하였을 때 라만 강도는 다층 구조(실리콘 나노박막/투명 기판)를 통한 광의 다중 반사, 광학적 간섭 효과 및 공명 라만 산란 효과에 강하게 의존할 수 있다.

[0127] 따라서, 측정된 초박막형의 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 라만 신호 세기 값을 벌크 실리콘의 라만 신호 세기 값으로 나눈 값을 참조로 이용한다면 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 도출하거나 검증하는데 사용할 수 있다.

[0128] 따라서, 실리콘 나노박막(132 또는 131)은 10nm 이하의 두께에서 저주파 라만 신호가 급격하게 변화되기 때문에 보다 정확하게 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 측정할 수 있다.

[0129] 다시, 도 6b를 참조하면, 또한, 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 흡수율(absorption rate)은 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께에 의존하여 변화될 수 있다.

[0130] 보다 구체적으로, 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 기초로 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 도출하는 단계는 다중 반사 모델 (multiple reflection model)에 기초하여 계산될 수 있다.

[0131] 라만 스펙트럼에서 라만 강도를 기반으로 두께를 알고자 하는 경우에는 다중 반사 모델(multiple reflection model, 도 3b 참조)을 이용하여 계산 할 수 있다. 계산 결과 라만 신호(예; 520cm^{-1})는 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께 및 조사된 레이저의 여기 에너지에 의존할 수 있다(도 9f 참조).

[0132] 따라서, 라만 강도의 변화는 간섭 효과(interference effect)에 의한 것을 알 수 있으나, 자외선 레이저(3.81eV)를 사용할 경우, 2 nm에서 이론적 값보다 실험값이 높게 측정될 수 있다. 이는 공진 라만 산란(resonance Raman scattering) 때문에 초래되는 것이기에, 라만 강도의 변화에 간섭 효과 및 공진 라만 산란이 관여하고 이러한 강도 변화를 이용하면 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 측정할 수 있다.

[0133] 또한, 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 경우, 두께 및 여기된 레이저 에너지에 따라 라만 신호가 조절되기 때문에, 라만 신호의 크기를 벌크 실리콘의 라만 신호 크기 값으로 나누고 그 결과를 참조로 이용한다면 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 도출하거나 검증하는데 이용될 수 있다.

[0134] 또한, 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께가 두꺼워질수록 광학 투과도(optical transparency)가 감소되기 때문에, 흡수율(absorption rate)이 증가될 수 있다.

[0135] 실시예에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 초저주파 영역을 포함한 라만 산란 스펙트럼을 측정한 다음, 캘리브레이션된 라만 산란 스펙트럼과 측정된 라만 산란 스펙트럼을 비교하여 실리콘 나노박막의 두께를 검증할 수 있다.

[0136] 보다 구체적으로, 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께 별로 계산된 초저주파 영역을 포함한 라만 스펙트럼을 캘리브레이션(calibration)할 수 있다. 따라서, 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 측정하는 경우, 실제 측정된 초저주파 영역을 포함한 라만 산란 스펙트럼과 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께 별로 캘리브레이션된 라만 산란 스펙트럼과 비교함으로써, 실리콘 나노박막(132 또는 131)의 두께를 도출하거나 검증할 수 있다.

[0137] 이하에서는, 도 2a 내지 도 12를 참조하여 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법의 특성에 대해 상세히 설명하기로 한다.

[0139] **제조예**

[0140] 실리콘 나노박막 제조

[0141] 제1 실리콘막(Si Substrate)/제1 실리콘 산화막(SiO_2)/제2 실리콘 막(Si)으로 이루어진 SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼(wafer)의 제2 실리콘막의 두께를 감소시키기 위해, (100) SOI 웨이퍼 [top Si (100 nm)/SiO_2 (200 nm)/base Si]에 고온(1,000℃)의 열 산화(Thermally Oxidize)를 진행하였다. 열산화 후, 실리콘 나노박막의 두께는 분광타원법(Spectroscopic Ellipsometry)(alpha SE, Woollam co.)를 사용하여 측정하였다.

[0142] 먼저, 열 산화 공정을 통해 SOI 웨이퍼 상에 제2 실리콘막의 두께를 100 nm에서 22 nm로 감소시킨 후, 열 성장된(Thermally grown) 제2 실리콘 산화막(SiO_2)을 BOE(Buffered Oxide Etchant)로 에칭하여 제거(Remove)하였다.

[0143] 또한, 실리콘 나노박막은 열산화 시간을 조절하여 7개의 두께(2 nm, 4 nm, 6 nm, 8 nm, 10 nm, 14 nm 및 18 nm)를 갖도록 정밀하게 조절하였다. 열 산화 속도는 1,000℃에서 ~ 0.55 nm / 분(min)이었다. 실리콘 나노박막의 두께는 단면 투과전자현미경(TEM, JEM-F200, JEOL)을 통해 2.2nm 6.3nm 및 18.1인 것을 알 수 있었다.

[0144] 그 다음, 실리콘 나노박막 상에 열성장된 열 산화막을 BOE로 제거한 다음, 포토레지스트(AZ 5214)를 이용하여 홀 패터닝(Hole Patterning)을 진행하여 홀 패턴을 형성하였다.

[0145] 실리콘 나노박막의 패턴화된 홀을 통해 불화 수소산(HF)으로 매립시켜(buried) 제1 실리콘막(SiO_2)을 제거함으로써, SOI 웨이퍼로부터 실리콘 나노박막을 릴리즈시킨(released) 후, 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane; PDMS) 스탬프를 사용하여 사파이어 기판으로 전사하여 사파이어 기판 상에 전사된 실리콘 나노박막(Si NM)을 형성하였다.

[0147] 라만 산란 측정

[0148] 각 두께의 실리콘 나노박막은 자외선 레이저(3.81eV), 가시광선 레이저(2.81, 2.33 및 1.96eV) 및 근적외선 레이저(1.58 eV)의 다섯 가지 에너지의 레이저 소스를 사용하여 여기되었다.

[0149] 다섯 가지 다른 소스로는 He-Cd 레이저의 325 nm 및 441.6 nm (3.81 eV 및 2.81 eV) 라인, 다이오드-펌프된 (diode-pumped) 고체-상태(solid-state) 레이저의 532 nm (2.33 eV) 라인, He-Ne 레이저의 632.8 nm (1.96 eV) 라인, 다이오드 레이저의 784.8 nm (1.58 eV) 라인이 사용되었다.

[0150] 또한, 모든 라만 스펙트럼은 레이저 유도 가열을 피하기 위해 50 μW의 레이저 출력을 사용하여 측정되었다. 노치 필터 (Notch filter)(OptiGrate)는 원치 않는 레일리(Rayleigh)-산란광이 분광계로 들어오는 것을 차단하는데 사용되었다. 대물 렌즈(50x, 0.8 개구수(N.A.))는 UV 대물 렌즈(40x, 0.5 N.A.) 대신에 325 nm 여기를 제외한 모든 여기 파장에 대해 레이저를 집속시키기 위해 사용되었다.

[0152] 도 2a는 종래의 SOI 웨이퍼를 이용한 실리콘 박막 두께 측정을 도시한 단면도이다.

[0153] 종래의 실리콘 나노박막(131)의 두께 측정은 제1 실리콘 산화막(120)이 형성된 제1 실리콘(110) 상에서, 즉, SOI 기판에서 측정되었다.

[0154] 그러나, 투과 깊이가 비교적 큰 레이저를 사용하는 라만 분광법으로 실리콘 나노박막(131)의 두께를 측정하는 경우, 실리콘 나노박막(131)의 하부에 형성된 제1 실리콘(110)의 신호로 인해 간섭이 발생되어 검출 신뢰도가 감소되는 문제가 있다.

[0156] 도 2b는 파장(Wavelength)에 따른 실리콘 투과 깊이(Penetration depth)를 도시한 그래프이다.

[0157] 도 2b를 참조하면, 784.8nm의 파장을 갖는 레이저를 사용하는 경우 실리콘의 투과 깊이는 12,000nm이고, 532nm의 파장을 갖는 레이저를 사용하는 경우 실리콘의 투과 깊이는 1,000nm이며, 325nm의 파장을 갖는 레이저를 사용하는 경우 실리콘의 투과 깊이는 5nm이다.

[0158] 따라서, 325nm의 파장을 갖는 레이저를 이용하여 실리콘 나노박막의 두께를 측정하더라도, 5nm 이하의 초박형의 실리콘 나노박막에서는 깊은 투과 깊이로 인해 간섭이 발생될 수 있다.

[0160] 도 3b는 사파이어 기판 상에 형성된 실리콘 나노박막의 다중 반사 간섭을 도시한 개략도이다.

[0161] 입사된 레이저(Incident laser)은 사파이어(Sapphire) 기판(150) 상에 형성된 실리콘 나노박막(Si NM; 131)에 충돌되어 라만 산란(raman scattering)되게 된다.

[0162] 도 3b는 두께 및 여기된 레이저 에너지에 따른 이론적인 라만 강도를 계산하고자 사용된 다중 반사 간섭모델(multiple reflection model)이다.

[0163] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 두께에 따른 이론적인 라만 강도를 계산하기 위하여 다중 반사 간섭모델(multiple reflection model)을 사용할 수 있다.

[0165] 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법에 따라 제조된 사파이어 기판 상에 전사된 실리콘 나노박막의 두께에 따른 광학 이미지를 도시한 것이다.

[0166] 도 4를 참조하면, 2 nm 간격으로 2 nm부터 18 nm까지의 두께를 갖도록 제조된 실리콘 나노박막이 사파이어 기판 상에 잘 전사된 것을 알 수 있다.

[0168] 도 5a는 내지 도 5c는 실리콘 나노박막의 두께에 따른 단면 투과전자현미경(transmission electron microscopy; TEM) 측정 이미지를 도시한 것이다.

[0169] 도 5a를 참조하면, 2.2nm의 두께를 갖는 실리콘 나노 박막이 잘 형성된 것을 알 수 있고, 도 5b를 참조하면, 6.3nm 의 두께를 갖는 실리콘 나노 박막이 잘 형성된 것을 알 수 있고, 도 6c를 참조하면, 18.1nm 의 두께를 갖는 실리콘 나노 박막이 잘 형성된 것을 알 수 있다.

[0171] 도 6a는 열산화 시간(Thermal oxidation time)에 따른 실리콘 나노박막의 두께를 도시한 그래프이다.

[0172] 도 6a를 참조하면, 1,000℃의 산화 온도(Oxidation Temperature)에서 0.55 nm/분(min)의 열 산화 속도를 가지고, 실리콘 나노박막의 두께는 열산화 시간에 따라 조절되는 것을 알 수 있다.

[0173] 따라서, 열 산화 시간을 조절함으로써 열산화 속도를 최적화하여 실리콘 나노박막의 두께를 정밀하게 조절할 수 있다.

[0174] 즉, 22 nm의 두께를 갖는 실리콘 나노박막이 실리콘 산화물막으로 대체되는 열 산화 속도는 1,000℃의 산화 온도(Oxidation Temperature)에서 0.55 nm/분(min)인 것을 알 수 있다.

[0176] 도 6b는 사파이어 기판 상에 형성된 실리콘 나노박막의 투과율 스펙트럼(Transmittance spectra)을 도시한 그래프이다.

[0177] 도 6b는 실리콘 나노박막의 두께에 따른 1.5eV 내지 5eV의 에너지 범위(energy range)에서의 실리콘 나노박막의 광학 흡수 갭(optical absorption gap)을 알 수 있다.

[0178] 도 6b를 참조하면, 광학 투과도(optical transparency)는 실리콘 나노박막이 두꺼울수록 흡수율(absorption rate)이 높아 지기 때문에, 실리콘 나노박막의 두께가 18nm에서 6nm, 2nm로 감소함에 따라. 532nm(2.33 eV)에서 광학 투과도는 45%에서 67%, 82%로 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

[0179] 또한, 투과율 스펙트럼은 약 3.5 eV 및 4.5 eV에서 2개의 강한 광 흡수 밴드(light absorption band)가 나타나고, 특히, 3.4 eV 및 3.7 eV 사이의 광 흡수 밴드에서 실리콘 나노박막의 두께에 대한 의존성을 나타내는 것을 알 수 있다.

[0180] 또한, 도 6b의 광 흡수 밴드는 실리콘 밴드의 구조에서 다이렉트 광학 밴드 갭 전이(direct optical band gap transition)의 E_1 엣지(E_1 edge)에 해당한다.

[0181] 따라서, 실리콘 나노박막의 두께가 8nm에서 2nm로 두께가 감소함에 따라, 실리콘 나노박막의 두께가 이차원(2D) 한계로 감소하기 때문에, E_1 엣지는 수직 양자 기계적 구속 효과(quantum-mechanical confinement effects, QCE)으로 인해 3.4 eV 및 3.67 eV로 더 높은 에너지로 점진적으로 쉬프트(shift)되는 것을 알 수 있다.

[0182] 또한, 투과율 피크(transmittance peak)는 두께에 따라 변화되기 때문에 얇은 두께의 실리콘 나노박막에서 3.81 eV레이저와 공명 라만 산란 현상 (resonant Raman scattering)이 발생된다.

[0183] 따라서, 실리콘 나노박막의 투과율 피크(transmittance peak)가 두께에 따라 쉬프트(shift)되기에, 이에 기인하여 공명 라만 산란 현상 (resonant Raman scattering)이 발생 할 수 있다.

[0184] 보다 구체적으로, 실리콘 나노박막의 두께가 감소할수록, 실리콘의 E1 엣지가 자외선 레이저(3.81eV)에너지와 점점 가까워짐에 따라 다른 레이(ray)를 사용하였을 경우와 달리 자외선 레이저(3.81eV)에 의한 여기 시에 공명 라만 산란(resonant Raman scattering)이 발생할 수 있음도 알 수 있다.

[0185] 또한, 실리콘 나노박막의 두께에 따른 전자 밴드 구조(electronic band structure)의 변화는 일반화된 기울기 근사(Generalized Gradient Approximation; GGA)+U에서의 제1 원리 계산을 사용하여 계산될 수 있다.

[0186] 도 7은 벌크 및 표면 브릴루앙 대역(Brillouin zone)을 도시한 이미지이다.

[0187] 도 7을 참조하면, 시뮬레이션은 VASP(Vienna ab-initio simulation package) 코드에서 구현된 PAW(augmented wave)법을 이용한 제1 원리(first-principles)로 계산될 수 있다. 전자 간의 교환(Exchange) 및 상호 관계(correlation) 상호 작용은 Perdew 등이 제안한 GGA(gradient approximation)로 설명될 수 있다.

[0188] 또한, 원자의 위치는 공액구배법(conjugate gradient method)을 이용하여 최적화되었다.

[0189] 제1 원리 계산이 비록 실제 측정된 값보다 반도체의 밴드 갭이 적게 계산(underestimate)되더라도 실리콘 나노박막의 두께에 따른 밴드 갭 변화의 경향을 예측할 수 있다. 제1 원리 계산은 벌크 실리콘(Bulk Si)과 실리콘 나노박막(100)을 두께의 함수로 계산될 수 있다.

[0190] (100) 방향을 따라 실리콘의 층의 수를 증가시킴으로써, 2.05 nm (16층(16L)), 4.24 nm (32층(32L)), 6.45 nm (48층(48L)), 8.66 nm (64층(64L)) 및 10.85 nm (80층(80L))의 실리콘 나노박막을 모델을 만들고, 표면에 댕글링 본드(dangling bond)는 산소 원자에 의해 부동태화(passivated)되었다.

[0191] 초박형(ultrathin)의 실리콘 나노박막은 2D와 같은 구조로 볼 수 있기 때문에, 벌크 Si의 브릴루앙 영역(Brillouin zone) 대신 표면 브릴루앙 영역이 계산에 사용되었다. 즉, 벌크 브릴루앙 영역의 Γ, L 및 W 대칭점 대신 표면 브릴루앙 영역에서 Γ, J 및 K 대칭 점을 사용하였다.

[0192] 도 8a 내지 도 8e는 실리콘 나노박막(2D Brillouin zone)의 두께에 따른 밴드 구조를 도시한 그래프이고, 도 8f는 벌크 실리콘의 밴드 구조(3D Brillouin zone)를 도시한 그래프이고, 도 8g는 E_1 엣지와 관련된 흡수 피크(absorption peak)를 계산한 흡수 스펙트럼(absorption spectra)을 도시한 그래프이다.

[0193] 도 8a 내지 도 8f를 참조하면, 실리콘 나노박막의 두께에 따른 밴드 구조가 벌크 실리콘 밴드 구조와 오비탈이 동일하게 배치됨을 알 수 있다.

[0195] 구체적으로, Γ 지점에서의 벌크 및 표면 밴드 구조의 가전자대 최대(valence band maximum; VBM)는 p 오비탈에 의하고, 전도대 최소(conduction band minimum; CBM)는 전도대 최소 상의 p 및 s 오비탈에 의한 것을 알 수 있다.

[0196] 또한, 벌크 브릴루앙 영역의 L 지점에서 p 오비탈은 가전자대에 강하게 분포하고 s 오비탈은 전도대에 분포하는 것을 알 수 있고, 벌크 브릴루앙 영역의 L지점에 해당하는 표면 브릴루앙 영역의 J 지점에서도 가전자대의 p 오비탈로부터 전도대의 s오비탈이 분포함을 알 수 있다.

[0197] 이때, E1 피크는 벌크 브릴루앙 영역의 L 지점 근처에서의 전이로부터 비롯된 것임을 고려한다면, 실리콘 나노박막에서 E1전이는 J 지점에서 가전자대의 p 오비탈로부터 전도대의 s오비탈로 여기되는 과정임을 알 수 있다.

[0198] 또한, 도 8g는 실리콘 나노박막의 두께에 따른 광 흡수를 도출하기 위해 J 지점에 기초하여 흡수 스펙트럼을 계산하였다.

[0199] 도 8g을 참조하면, 실리콘 나노박막은 두께가 감소함에 따라, 3.75 eV에서 3.96 eV로 E_1의 청색 쉬프트(Blue Shift)가 나타나는 것을 알 수 있다.

[0201] 도 9a 내지 도 9e는 여기 에너지(excitation energies)에 따른 2nm 내지 18nm 두께의 실리콘 나노박막의 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이고, 도 9f는 여기 에너지(excitation energies)에 따른 2nm 내지 18nm 두께의 실리콘 나노박막의 라만 강도의 이론적 값(선) 및 실험 값(도트)을 비교하여 도시한 그래프이다.

[0202] 도 9a 내지 도 9f는 사파이어 기판 상에 실리콘 나노박막을 전사한 다음, 1.58 eV 내지 3.81 eV 범위의 여기 에너지를 이용하여 실리콘 나노박막의 라만 스펙트럼을 측정하였다.

[0203] 도 9f의 y축은 실리콘 나노박막의 라만 강도를 벌크 실리콘 라만 강도로 나눈 값을 의미한다.

[0204] 보다 구체적으로, 각 두께의 실리콘 나노박막은 자외선 레이저(3.81eV), 가시광선 레이저(2.81, 2.33 및 1.96eV) 및 근적외선 레이저(1.58 eV)의 다섯 가지 에너지의 레이저 소스를 사용하여 여기되었다.

[0205] 도 9a 및 도 9c에서의 왼쪽 그래프는 라만 스펙트럼을 도시한 것이고, 오른쪽 이미지는 라만 매핑 이미지(스케일 바: 20㎛)를 도시한 것이다.

[0206] 도 9a 내지 도 9e를 참조하면, 모든 라만 스펙트럼에서 실리콘 나노박막의 피크의 위치는 520 cm^{-1} 내지 522 cm^{-1}의 벌크 값에서 약간 청색 쉬프트(Blue Shift)되었고, 이것은 실리콘 나노박막을 사파이어 기판으로 전사시키는 공정 동안 발생된 2축 인장 변형(약 0.29%)에 의한 것이다.

[0207] 도 9a를 참조하면, 3.81 eV 여기에서 측정된 라만 강도는 2 nm 두께의 실리콘 나노박막에서 가장 높았고, 라만 강도는 2 nm 두께에서 18 nm 두께로 갈수록 점차 감소하였다. 또한, 라만 매핑 이미지의 균일성(uniformity)을 통해 실리콘 나노박막의 두께가 라만 강도 변화의 주된 원인임을 알 수 있다.

[0208] 도 9c를 참조하면, 2.33 eV 여기에서 측정된 라만 강도는 도 9a와 반대의 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 보다 구체적으로, 라만 강도는 2 nm 두께의 실리콘 나노박막에서 가장 낮았고, 라만 강도는 실리콘 나노박막의 두께가 2 nm에서 10 nm가 될 때까지 서서히 증가하다가 약간 감소하였다.

[0209] 도 9b, 도 9d 및 도 9e를 참조하면, 가시광선/근적외선 영역(2.81eV, 1.96eV 및 1.58eV)에서 측정된 라만 스펙트럼은 2.33eV 여기에서 측정된 것과 유사한 경향을 나타냈다.

[0210] 6nm 두께의 실리콘 나노박막 및 14nm 두께의 실리콘 나노 박막의 최대 강도는 각각 2.81eV 및 1.58eV였고, 최대 강도를 나타내는 실리콘 나노박막의 두께는 레이저의 여기 에너지가 감소함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

[0211] 일반적으로 라만 스펙트럼의 강도는 실리콘 나노박막의 두께가 증가함에 광 산란의 증가를 야기하여 따라 증가할 것으로 예상되나, 도 9b 내지 도 9e를 참조하면, 1.58eV 및 2.81eV 의 여기 에너지에 대한 실리콘 나노박막의 두께에 따른 라만 강도는 다층 구조를 통한 광의 다중 반사 및 광학적 간섭 효과를 고려한 다중 반사 모델

(multireflection model; MRM, 도 3b 및 표 1 참조)에 따른다.

[0212] 표 1은 사파이어 기판 상에 형성된 실리콘 나노박막의 다중 반사 간섭을 계산하기 위한 파라미터를 도시한 표이다.

[0213] [표 1]

		3.81 eV (325 nm) excitation	2.81eV (441.6 nm) excitation	2.33 eV (532 nm) excitation	1.96 eV (632.8 nm) excitation	1.58 eV (784.7 nm) excitation
$E_{incident\ light}$		3.815 eV	2.808 eV	2.331 eV	1.960 eV	1.580 eV
$E_{phonon\ of\ Si\ NM}$		0.0647 eV ($522\ cm^{-1}$)				
$E_{scattered\ light}$		3.815 eV - 0.06472 eV = 3.7502 eV **(330.6 nm)**	2.808 eV - 0.06472 eV = 2.7432 eV **(452 nm)**	2.331 eV - 0.06472 eV = 2.2663 eV **(547.1 nm)**	1.960 eV - 0.06472 eV = 1.8953 eV **(654.2 nm)**	1.580 eV - 0.06472 eV = 1.515 eV **(818.5 nm)**
Refractive index (incident light)	n_0 (air)	1	1	1	1	1
	n_1 (Si)	5.1535 - 3.2015i	4.7999 - 0.1049i	4.1432 - 0.0325i	3.8740 - 0.0161i	3.6878 - 0.0062i
	n_2 (sapphire)	1.8047	1.78038	1.7717	1.7659	1.7605
	n_3 (air)	1	1	1	1	1
Refractive index (scattered light)	n_0 (air)	1	1	1	1	1
	n_1 (Si)	5.2014 - 3.0926i	4.6702 - 0.0833i	4.0868 - 0.0286i	3.8376 - 0.0140i	3.6624 -0.0047i
	n_2 (sapphire)	1.8028	1.7792	1.7706	1.7650	1.7597
	n_3 (air)	1	1	1	1	1

[0214]

[0215] 도 9f를 참조하면, 두께와 여기 에너지가 다른 실리콘 나노박막의 라만 강도의 변화를 비교하기 위해 다중 반사 모델(MRM)을 적용하였고, 다중 반사 모델(MRM)을 통해 이론적으로 계산된 값(실선)은 실제 측정된 값(도트)과 일치하는 것을 알 수 있다.

[0216] 보다 구체적으로, 라만 강도는 다층 구조를 통한 광의 다중 반사 및 광학적 간섭 효과에 강하게 의존함을 확인할 수 있다.

[0217] 그러나, 도 11을 참조하면, 3.81 eV의 여기를 가진 2 nm 두께의 실리콘 나노박막의 경우, 측정된 라만 강도 값과 이론적 라만 강도 값에서 다소 차이(도 11 참조)를 나타내었다.

[0218] 도 11은 측정된 라만 강도를 이론적으로 계산된 라만 강도로 나눔으로써 표준화된 라만 강도를 도시한 그래프이다.

[0219] 다시 도 9f를 참조하면, 보다 구체적으로, 2nm 두께의 실리콘 나노박막의 측정된 라만 강도는 이론적 라만 강도보다 약간 높게 측정되었으고, 이는 다층 구조를 통한 광의 다중 반사 및 광학적 간섭 효과 외에도 실리콘 나노박막의 두께 감소로 인한 밴드 구조 변조(band-structure modulation)로 인한 공명 효과(resonance effect)에 의한 것이다.

[0220] 벌크 실리콘의 공명 라만 산란은 E1의 엣지에 가까운 3.35 eV 여기 부근에서 관찰되었으나, 실리콘 나노박막의 두께가 2 nm로 감소함에 따라 실리콘 나노박막의 전자 전이 에너지(electronic transition energy)가 증가하였고, 3.81 eV의 여기 레이저 에너지에 접근하여 라만 산란의 공명 강화를 나타냈다.

[0221] 따라서, 실리콘 나노박막의 경우 라만 신호의 세기가 다중 반사 및 광학적 간섭 효과를 주로 의존함을 알 수 있다. 특히, 자외선 레이저로 여기될 경우, 공명 라만 산란에 의해 2 nm 두께의 초박막 실리콘 나노박막에서 라만 신호가 더욱 향상되는 것을 알 수 있다.

[0222] 따라서, 측정된 초박막 실리콘의 라만 신호 세기 값을 벌크 실리콘의 라만 신호 세기 값으로 나눈 값을 참조로 이용한다면 실리콘 나노박막 두께를 도출하거나 검증하는데 이용될 수 있다.

[0224] 도 10a는 2.81eV 여기에서 측정한 실리콘 나노박막 두께에 따른 초저주파 영역 라만 스펙트럼(Ultralow-frequency Raman spectra)을 도시한 그래프이고, 도 10b는 2.33eV 여기에서 측정한 실리콘 나노박막 두께에 따른 초저주파 영역 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이며, 도 10c는 실리콘 두께에 따른 이론적으로 계산된 초저주파 영역 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이고, 도 10d는 실리콘 나노박막의 두께에 따른 측정된 라만 피크(실선) 및 이론적으로 계산된 라만 피크(점선)를 도시한 그래프이며, 도 10e 및 도 10f는 실리콘 나노박막의 두께에 따른 단축 인장 변형률(Uniaxial tensile strain) 의존 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이다.

[0225] 도 10a 내지 도 10f의 초저주파 라만 신호는 양자 구속 효과(QCE)로 인한 LA 포논 분지(LA phonon branch)의 영역-폴딩(zone-folding)에 기인한 것으로, 실리콘 나노박막(100)에 수직인 진동, 즉 z 축을 따른 실리콘 나노박막의 종파 음향 모드(Longitudinal Acoustic Mode)(LA 모드)에 기인한다.

[0226] 도 10a 및 도 10b를 참조하면, 2.81 eV 및 2.33 eV 두 가지 레이저 에너지에 따라 초저주파 영역 라만 스펙트럼이 변하지 않는 것으로 보아, 브릴루앙 산란(brillouin scattering)이 아닌 초저주파 라만 산란 (ultralow-frequency Raman scattering)에 의한 것을 알 수 있다.

[0227] 도 10a 내지 도 10c를 참조하면, 실리콘 나노박막의 두께가 18 nm에서 2 nm로 감소함에 따라, 강한 피크는 8.9 cm^{-1}에서 44.1 cm^{-1}로 청색 쉬프트(Blue Shift)되는 것을 알 수 있다. 또한, 2.33 eV 여기에서도 유사한 결과가 갖는다.

[0228] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 실리콘 나노박막의 두께 측정 방법은 초저주파 라만 분광법을 사용하여 실리콘 나노박막의 두께로 인해 라만 활성되는 제한된 LA 모드의 청색 쉬프트(Blue Shift)를 나타내는 것을 알 수 있다.

[0229] 구체적으로, 실리콘 나노박막에서 z 축에 해당하는 첫 번째 브릴루앙 영역은 방정식($q = \pm \pi / d$)(d는 실리콘 나노박막의 두께)으로 정의할 수 있다. 따라서, 벌크 실리콘의 LA 포논 분지(branch)는 새로이 정의된 첫 번째 브릴루앙 영역으로 다시 폴드(fold)되고 q = 0에서의 새로운 모드가 나타난다.

[0230] 따라서 두께(d)가 감소할 경우, 브릴루앙 영역 크기($q = \pm \delta / d$)가 증가하게 된다. 이때 Raman active mode와 관련된 q = 0에서 가장 낮은 '접힌 가지(folded branch)'에 해당하는 진동수가 증가하게 되기 때문에, 결과적으로 청색 쉬프트가 발생하게 된다. 이를 통하여 5 cm^{-1} 내지 70 cm^{-1} 의 범위에서의 초저주파 라만 모드 청색 쉬프트(Blue Shift)를 예상 할 수 있다.

[0231] 또한, 다른 여기 에너지(2.81 eV 및 2.33 eV)에서 초저주파 라만 모드가 변하지 않는 것은 브릴루앙 산란이 여기 에너지에 의존하기 때문에 이 신호가 브릴루앙 산란에서 비롯된 것이 아니라는 것을 알 수 있다.

[0232] 초박형의 실리콘 나노박막에서의 LA 모드의 청색 쉬프트(Blue Shift)는 광탄성 모델(Photoelastic Model)로 설명될 수 있다. 사파이어 기판 상에 형성된 실리콘 나노박막의 경우, 실리콘 나노박막의 경계 조건은 자유 표면이고 단단한 사파이어 기판이다.

[0233] 그러므로 실리콘 나노박막과 사파이어 기판 사이의 음향 불일치(acoustic mismatch) ($\Delta = Z_{sub} / Z_{si} - 1$)를 고려하여 z 방향에서 제한된 음향 모드를 계산해야 한다.

[0234] 층 μ의 음향 임피던스는 $Z_{\mu} = \rho_{\mu} \upsilon_{\mu}$ (질량 밀도 ρ_{μ} 및 음속(sound velocity) υ_{μ})에 의해 주어진다. 관련 파라미터는 벌크 Si(즉, 8430 ms^{-1}) 및 실리콘 나노박막(즉, 10 nm Si NM 이하의 ~ 6500 ms^{-1})의 음속에서의 큰 불일치를 고려하여 $\rho_{Si\ NM}$ = 2.33 gcm^{-3}, $\upsilon_{Si\ NM}$ = ~ 6500 ms^{-1}, $\rho_{sapphire}$ = 3.98 gcm^{-3} 및 $\upsilon_{sapphire}$ = 11913 ms^{-1}이다.

[0235] 실리콘 나노박막과 사파이어 사이의 계산된 음향 불일치는 Δ = 2.13이고, 이는 $q_m = \pi (m + 1 / 2) / d$에서 음향 공명을 생성하기에 충분히 크며, 여기서 모드 지수 m은 정수이고, d는 실리콘 나노박막 두께이다. 또한, 선형 분산 영역의 고유 모드 (q_m)는 $\omega_m = \upsilon q_m$에 따라 이격되며, 여기서 υ는 실리콘 나노박막에서의 음속($\upsilon_{Si\ NM}$)이다.

[0236] 도 10c는 광탄성 모델을 이용하여 2.33 eV 여기에 대한 18 nm에서 2 nm까지 실리콘 나노박막의 두께에 대한 라

만 스펙트럼을 이론적으로 계산한 결과이다. 또한, 이때 초저주파 라만 피크의 너비는 측정 분해능을 고려한 가우시안 함수(Gaussian function)을 이용한다.

[0237] 도 10d를 참조하면, m = 0 모드에서의 측정(Experimental result) 및 계산된(Theoretical result) 라만 피크 위치(Raman peak position)는 두께 d(Si NM thickness)에 반비례하는 것을 알 수 있다.

[0238] 실제 측정된 값 및 계산된 값 사이의 불일치는 측정 및 계산에 사용된 실리콘 나노박막의 정확한 두께 값의 차이 및 두께의 함수로서 실리콘 나노박막에서의 음속(sound velocity)의 변화에 기인한 것일 수 있다.

[0239] 실리콘 나노박막의 P_1 피크는 두께가 18 nm에서 2 nm로 감소함에 따라 8.9 cm^{-1}에서 44.1 cm^{-1}로 가파르게 쉬프트 되었다. 그러나, 실리콘 나노박막의 두께가 29 nm보다 큰 경우, 피크는 0 cm^{-1} 내지 5 cm^{-1}의 범위에서 변하지 않았다.

[0240] 두께에 대한 P_1 피크의 큰 의존성은 수 나노 미터의 초박형의 실리콘 나노박막의 정확한 두께를 결정하는 데 유용한 지표(indicator)가 될 수 있는 것을 알 수 있다.

[0241] 도 10e 및 도 10f는 라만 스펙트럼에 대한 단축 인장 변형의 영향은 사파이어 기판 대신 유연한 폴리머 기판에 전사된 4 nm 및 10 nm 두께의 실리콘 나노박막을 사용하여 굽힘 방법으로, 단축 인장 변형을 측정하였다.

[0242] 도 10e 및 도 10f를 참조하면, 변형이 점진적으로 증가함에 따라, 고주파 광학 모드(520 cm^{-1})는 두 시료 모두에 대해 점차적으로 적색 쉬프트(red-shifted)되었다. 2.3 cm^{-1} 및 2.8 cm^{-1}의 최대 적색 쉬프트 값은 4 nm 및 10 nm 두께의 실리콘 나노박막에 대해 각각 0.82% 및 1.04% 단축 인장 변형되었다.

[0243] 그러나, 초저주파 라만 신호는 무시할만한 변화를 보였고, 이는 변형에 의한 쉬프트 정도가 변형되지 않은 상태의 초기 라만 피크 위치에 비례 하기 때문이다. 이로 인해 < 100cm^{-1} 영역의 초저주파 모드와는 달리 ~520cm^{-1}에서의 고주파 모드에서는 변형에 의해 크게 쉬프트 함을 알 수 있다. 따라서, 초저주파 라만은 두께에만 의존 하고 변형에 의한 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.

[0245] 도 12는 동일 ± 0.543nm 두께 변화, 즉 두께가 실리콘의 격자 상수 정도만큼 변할 때에 따른 라만 피크 위치의 민감도를 도시한 그래프이다.

[0246] 도 12를 참조하면, 보다 얇은 실리콘 나노박막에 대한이 피크의 확장은 두께 변화가 더 얇은 층에서 상대적으로 큰 변화를 줄 수 있기 때문에 얇은 층의 두께 변화에 대한 민감도 증가로 인해 주로 발생된다.

[0248] 이상과 같이 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형률이 가능하다.

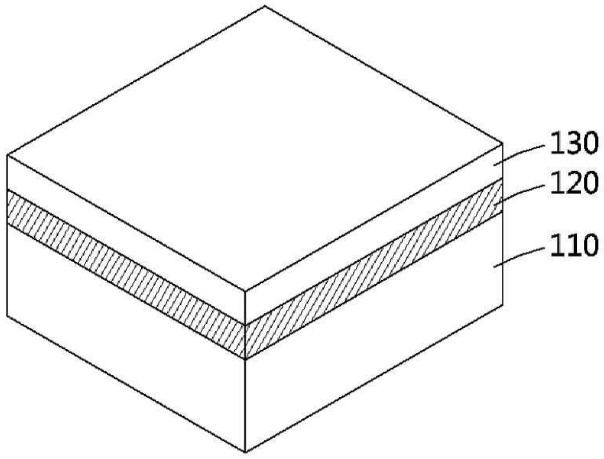
[0249] 그러므로, 본 발명의 범위는 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

부호의 설명

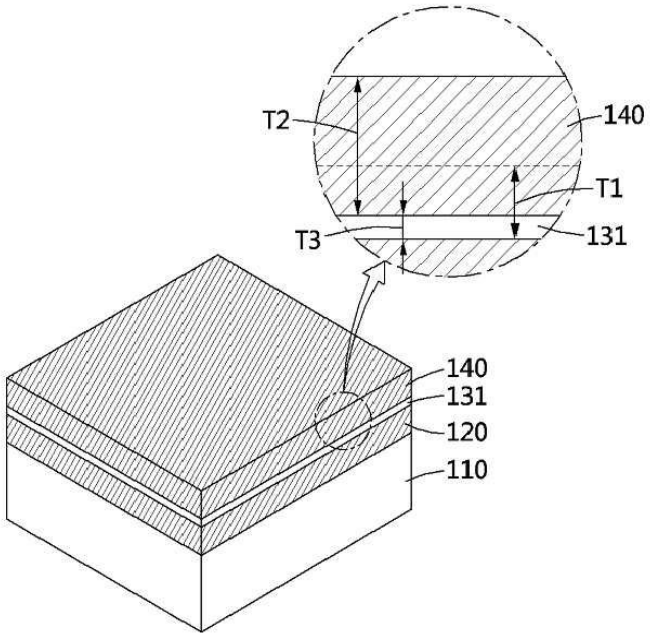
[0251]
110: 제1 실리콘막
120: 제1 실리콘 산화막
130: 제2 실리콘막
131: 실리콘 나노박막
132: 패턴화된 실리콘 나노박막
140: 열 산화막
150: 투명 기판

도면

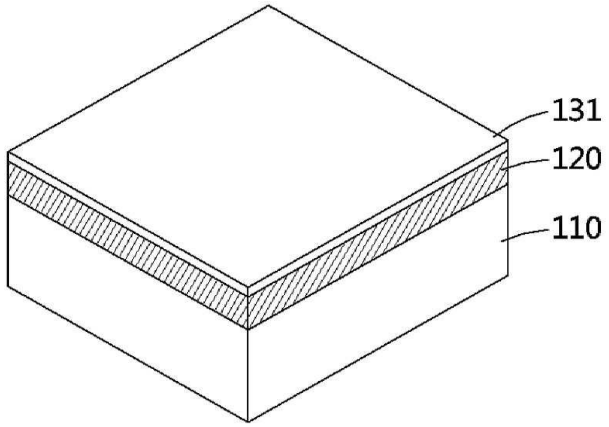
도면1a



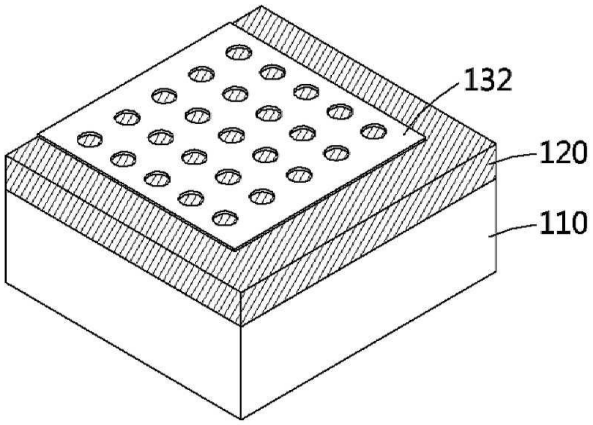
도면1b



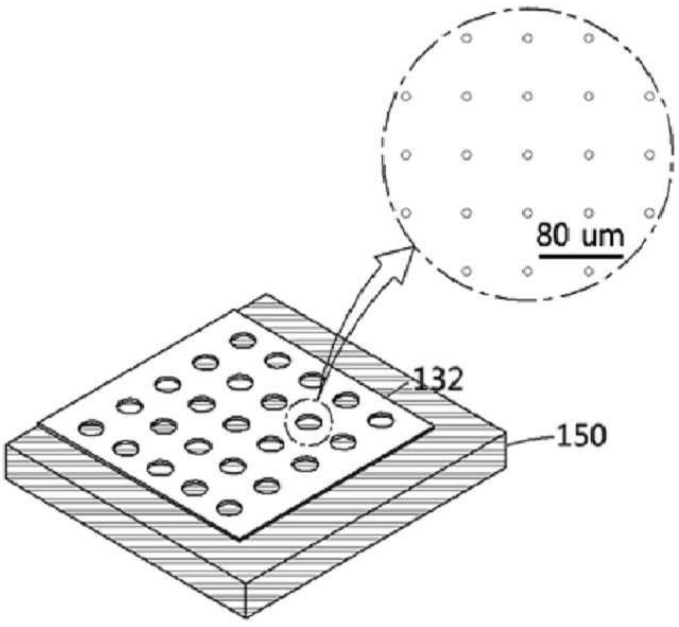
도면1c



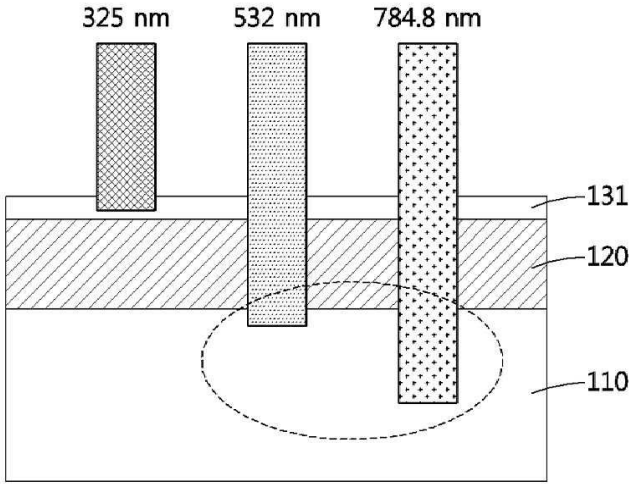
도면1d



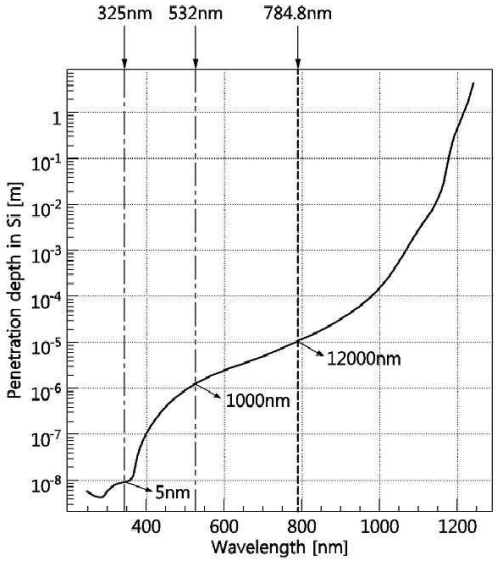
도면1e



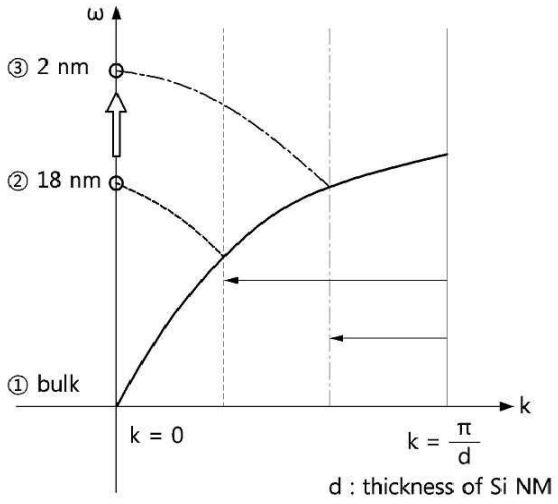
도면2a


325 nm
532 nm
784.8 nm
131
120
110

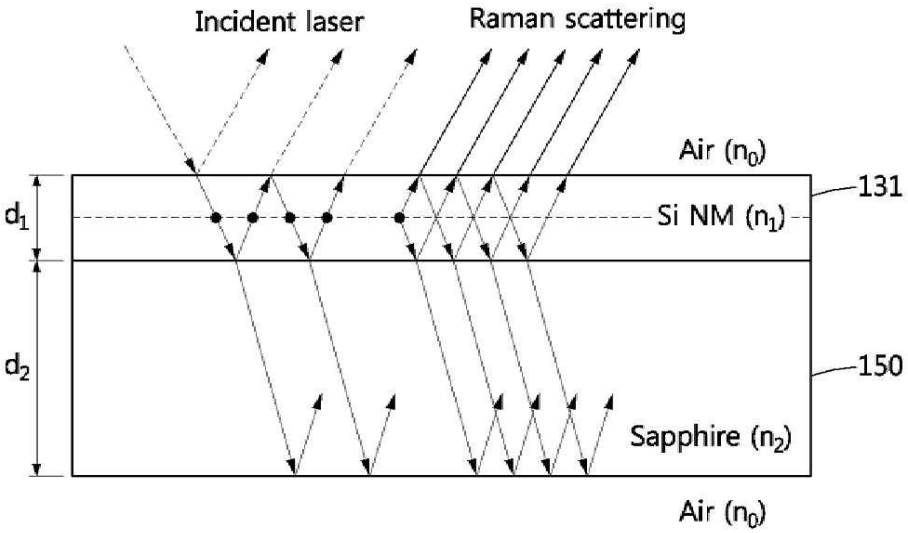
도면2b


325nm
532nm
784.8nm
Penetration depth in Si [m]
1
10-1
10-2
10-3
10-4
10-5
10-6
10-7
10-8
12000nm
1000nm
5nm
400
600
800
1000
1200
Wavelength [nm]

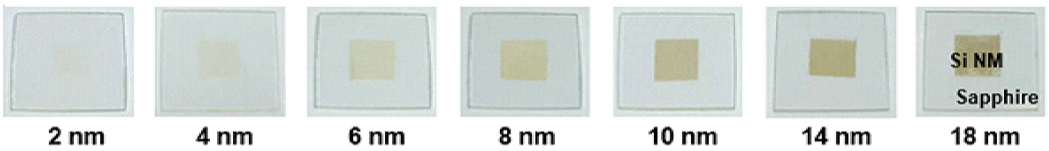
도면3a



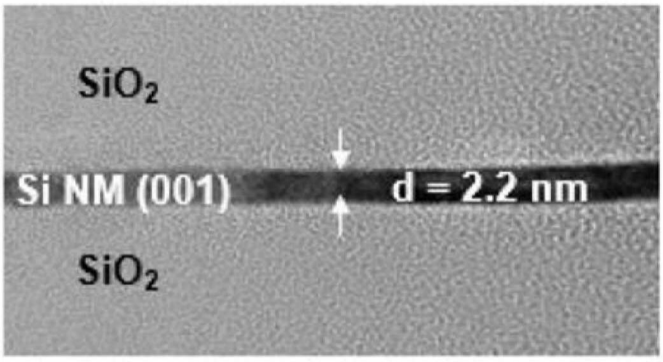
도면3b



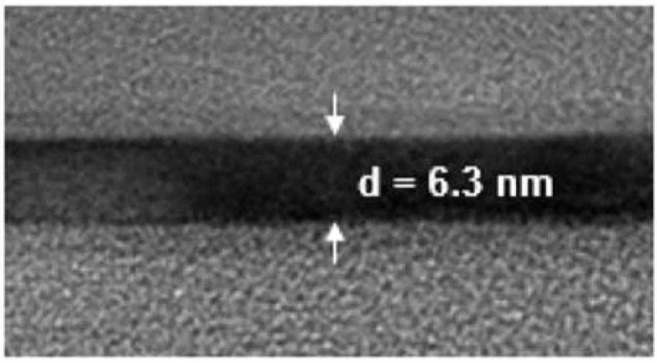
도면4



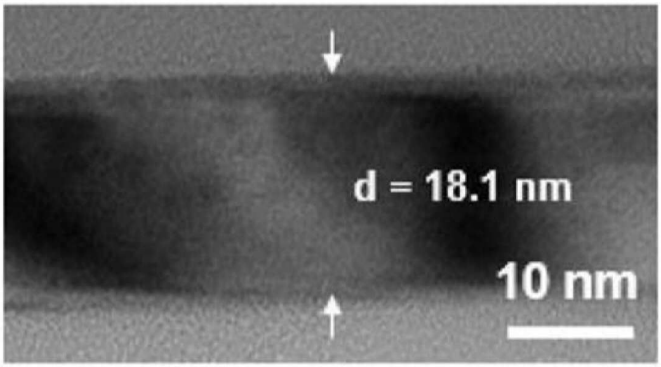
도면5a



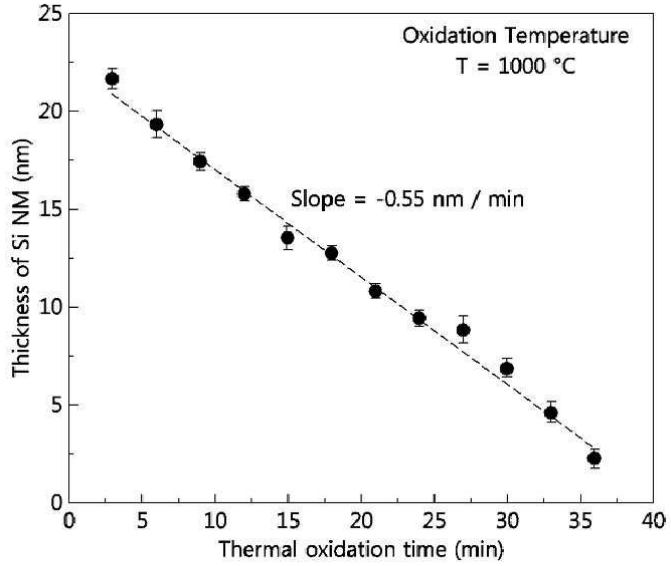
도면5b



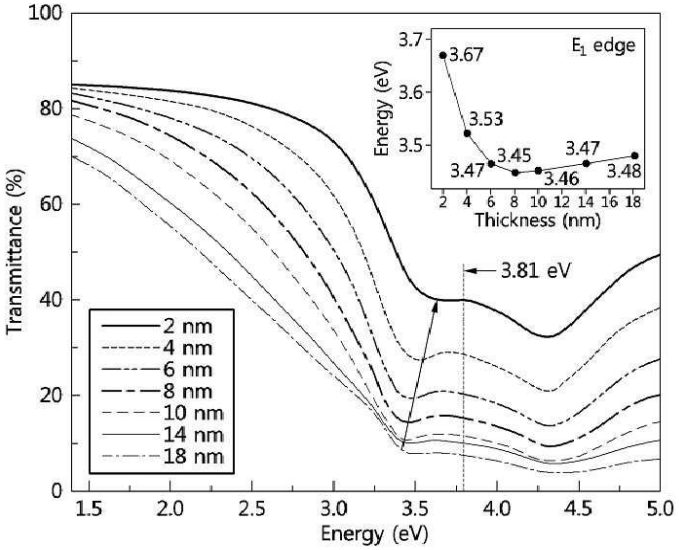
도면5c



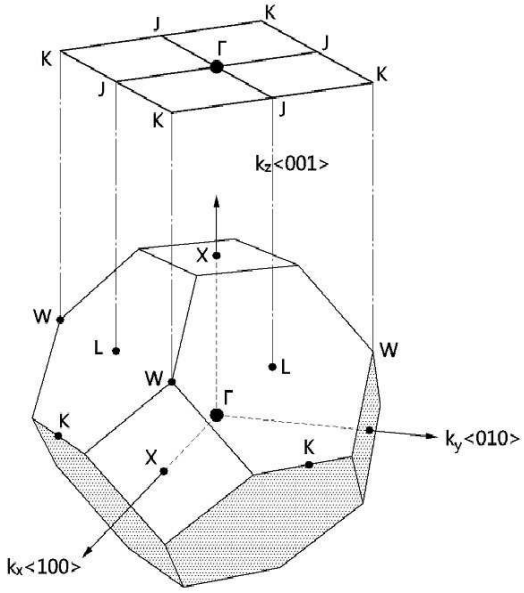
도면6a


Oxidation Temperature
T = 1000 °C
Slope = -0.55 nm / min
Thickness of Si NM (nm)
Thermal oxidation time (min)
0
5
10
15
20
25
30
35
40

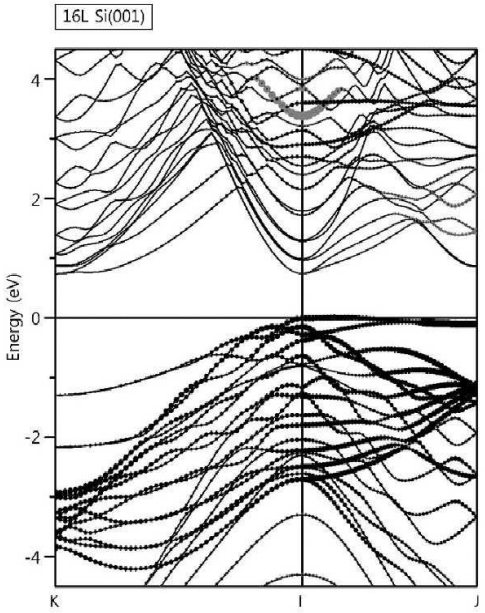
도면6b


Transmittance (%)
Energy (eV)
2 nm
4 nm
6 nm
8 nm
10 nm
14 nm
18 nm
3.81 eV
E1 edge
Energy (eV)
Thickness (nm)
3.67
3.53
3.47
3.45
3.46
3.47
3.48

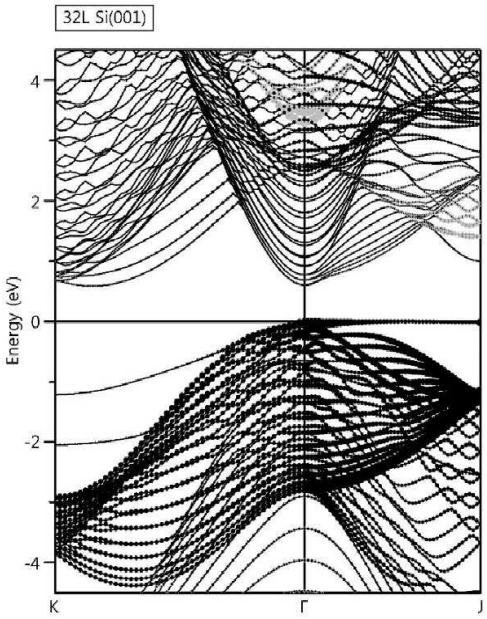
도면7


J
K
Γ
J
K
J
K
J
K
kz<001>
X
W
L
W
L
W
Γ
K
X
K
ky<010>
kx<100>

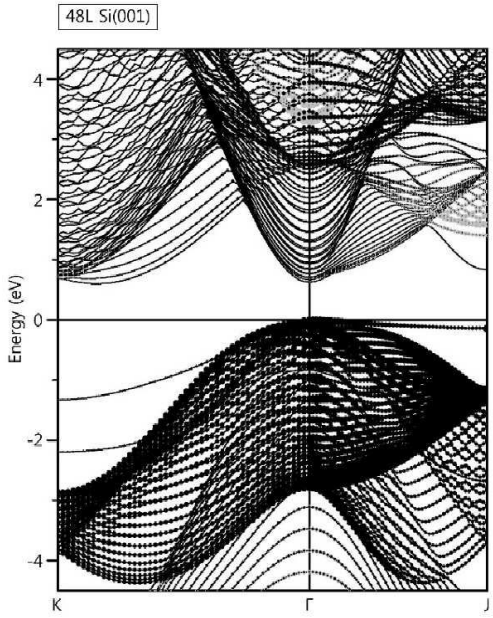
도면8a


16L Si(001)
4
2
0
-2
-4
Energy (eV)
K
Γ
J

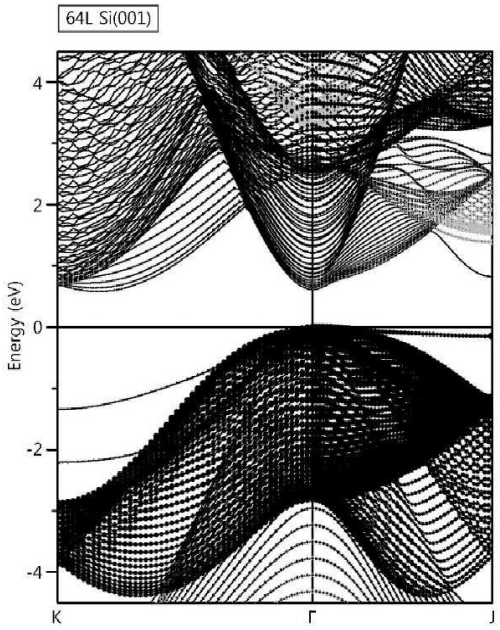
도면8b



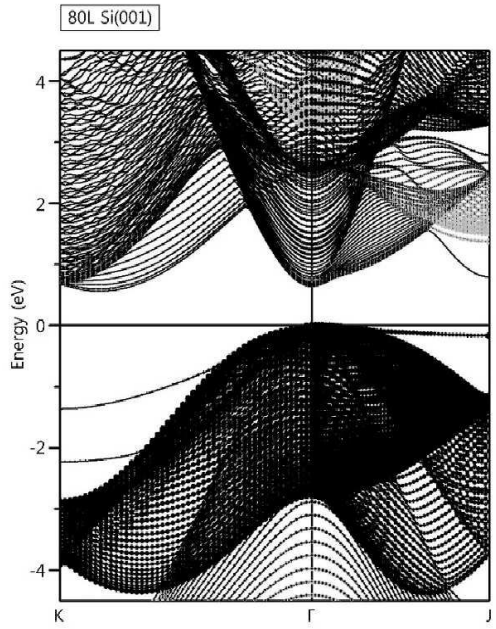
도면8c



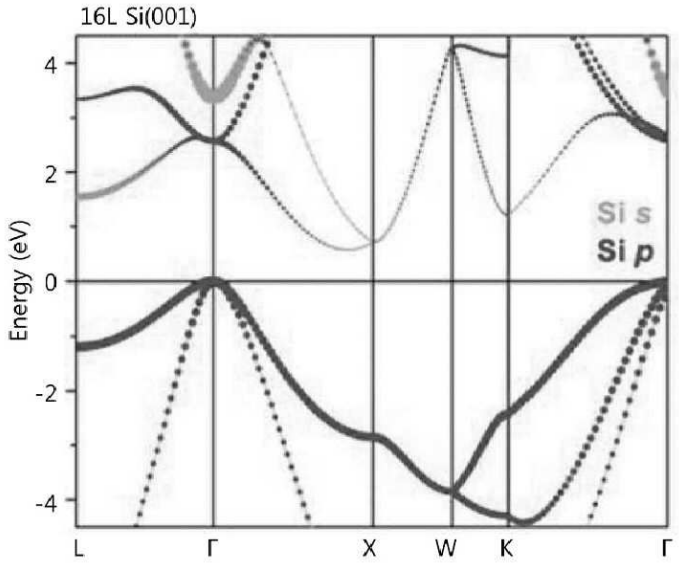
도면8d



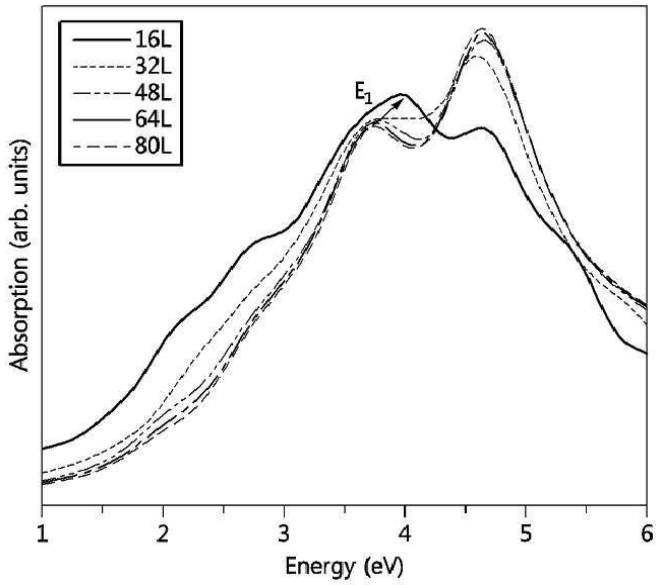
도면8e



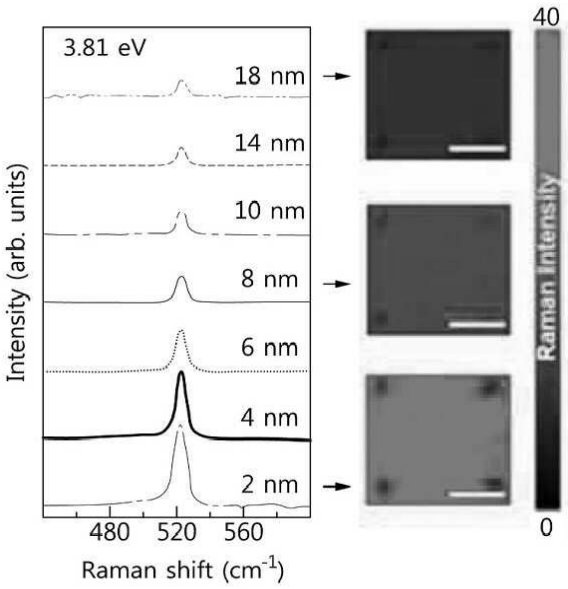
도면8f


16L Si(001)
Energy (eV)
4
2
0
-2
-4
L
Γ
X
W
K
Γ
Si s
Si p

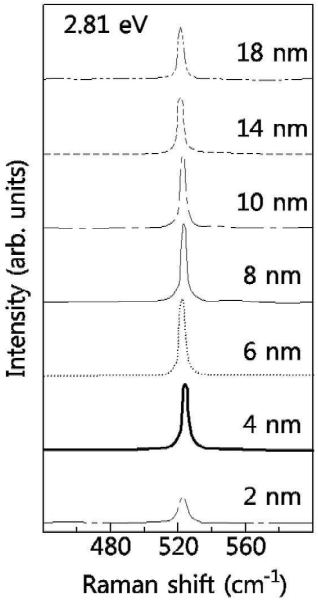
도면8g


16L
32L
48L
64L
80L
E1
Absorption (arb. units)
1
2
3
4
5
6
Energy (eV)

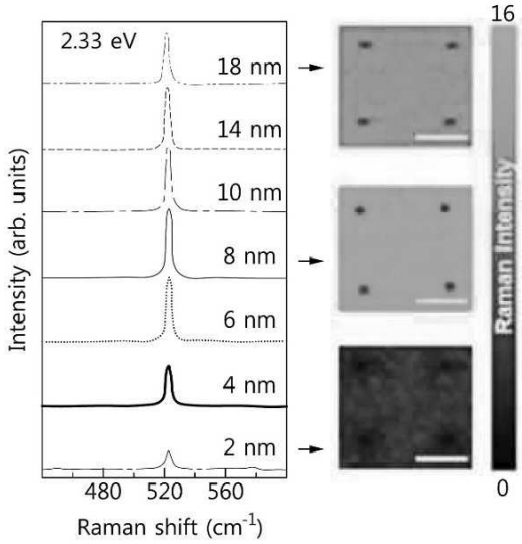
도면9a


3.81 eV
18 nm
14 nm
10 nm
8 nm
6 nm
4 nm
2 nm
Intensity (arb. units)
480 520 560
Raman shift (cm-1)
40
Raman Intensity
0

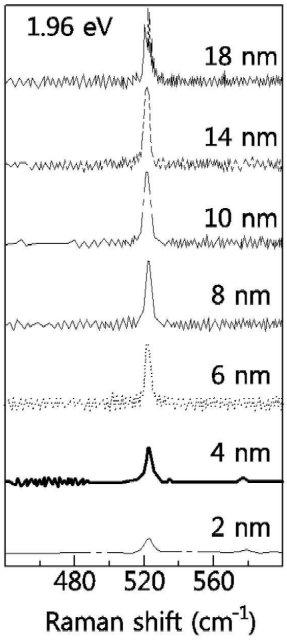
도면9b


2.81 eV
18 nm
14 nm
10 nm
8 nm
6 nm
4 nm
2 nm
Intensity (arb. units)
480 520 560
Raman shift (cm-1)

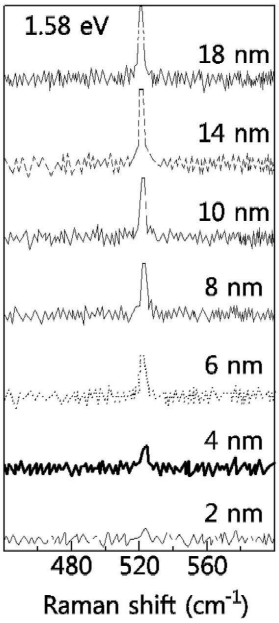
도면9c


2.33 eV
18 nm
14 nm
10 nm
8 nm
6 nm
4 nm
2 nm
Intensity (arb. units)
480 520 560
Raman shift (cm-1)
16
Raman Intensity
0

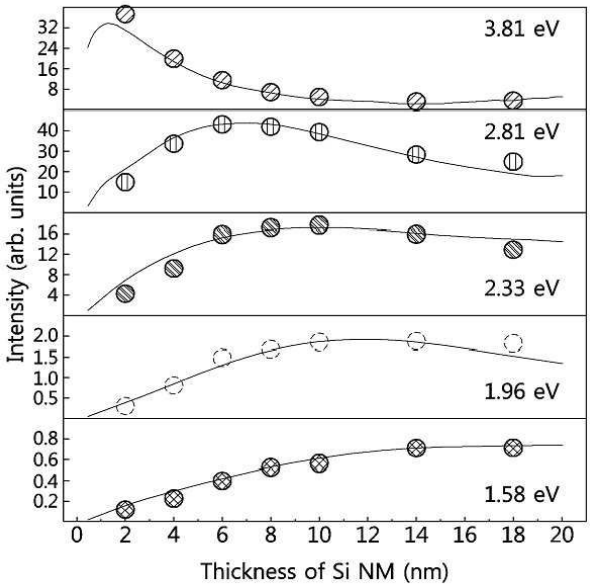
도면9d


1.96 eV
18 nm
14 nm
10 nm
8 nm
6 nm
4 nm
2 nm
480 520 560
Raman shift (cm-1)

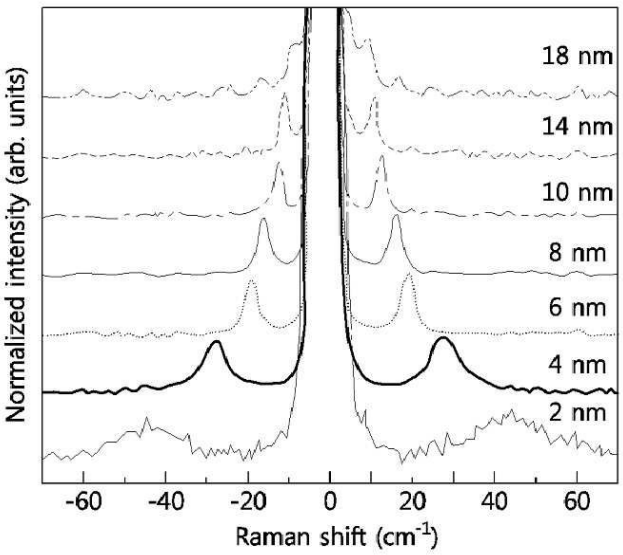
도면9e


1.58 eV
18 nm
14 nm
10 nm
8 nm
6 nm
4 nm
2 nm
480 520 560
Raman shift (cm-1)

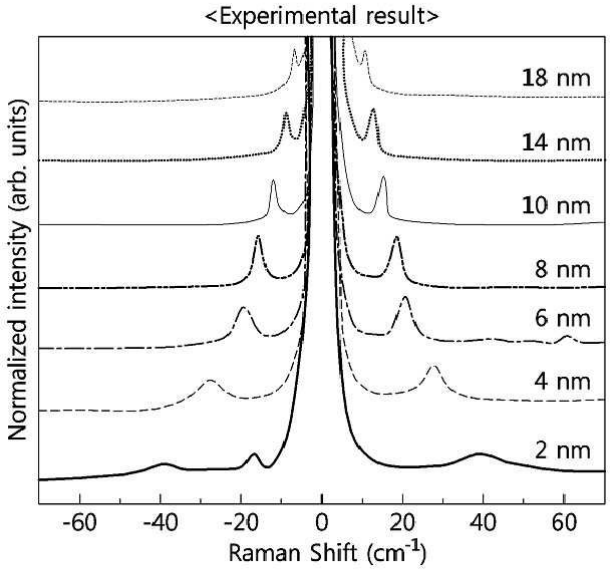
도면9f


3.81 eV
2.81 eV
2.33 eV
1.96 eV
1.58 eV
Intensity (arb. units)
Thickness of Si NM (nm)

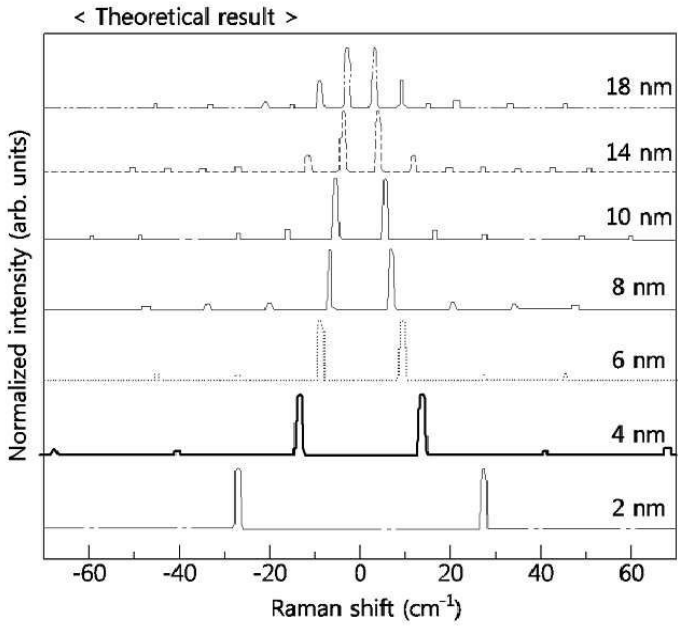
도면10a


18 nm
14 nm
10 nm
8 nm
6 nm
4 nm
2 nm
Normalized intensity (arb. units)
-60
-40
-20
0
20
40
60
Raman shift (cm-1)

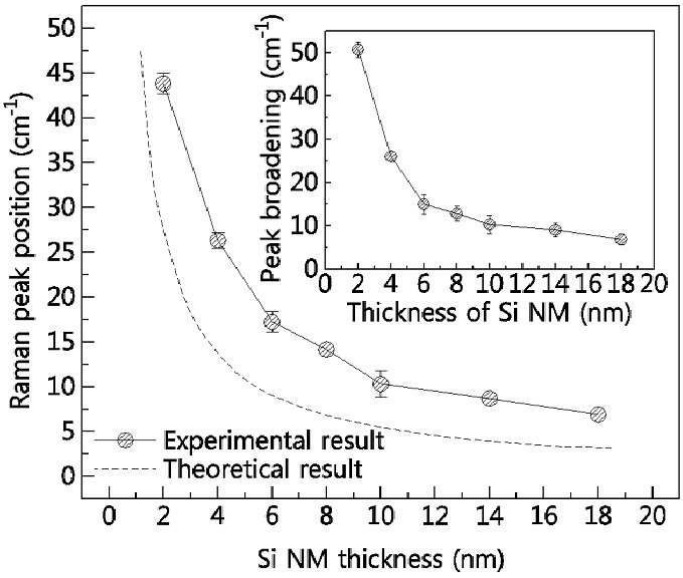
도면10b


<Experimental result>
18 nm
14 nm
10 nm
8 nm
6 nm
4 nm
2 nm
Normalized intensity (arb. units)
-60
-40
-20
0
20
40
60
Raman Shift (cm-1)

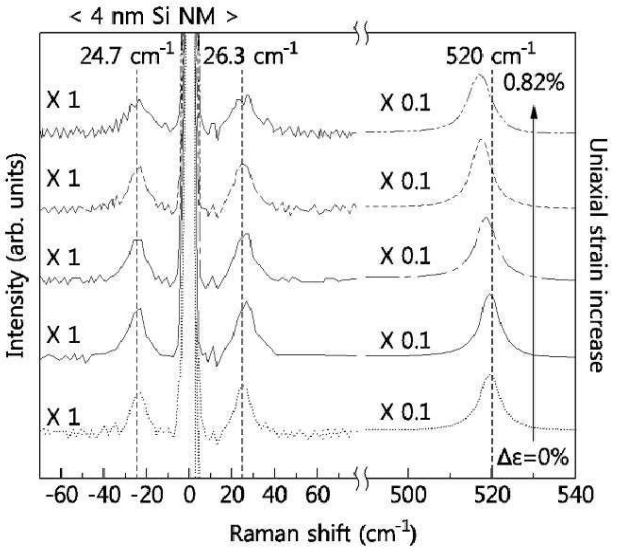
도면10c


< Theoretical result >
18 nm
14 nm
10 nm
8 nm
6 nm
4 nm
2 nm
Normalized intensity (arb. units)
-60
-40
-20
0
20
40
60
Raman shift (cm-1)

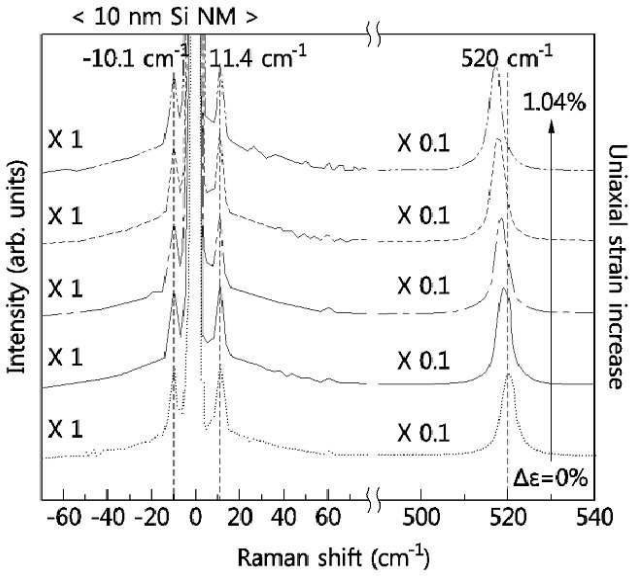
도면10d


Raman peak position (cm-1)
Si NM thickness (nm)
Experimental result
Theoretical result
Peak broadening (cm-1)
Thickness of Si NM (nm)

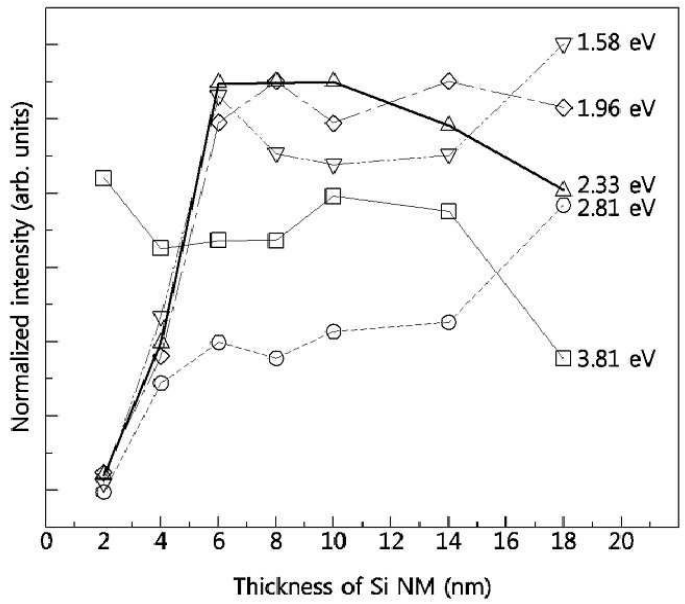
도면10e


< 4 nm Si NM >
24.7 cm-1
26.3 cm-1
520 cm-1
0.82%
X 1
X 0.1
Intensity (arb. units)
Uniaxial strain increase
Δε=0%
-60 -40 -20 0 20 40 60 500 520 540
Raman shift (cm-1)

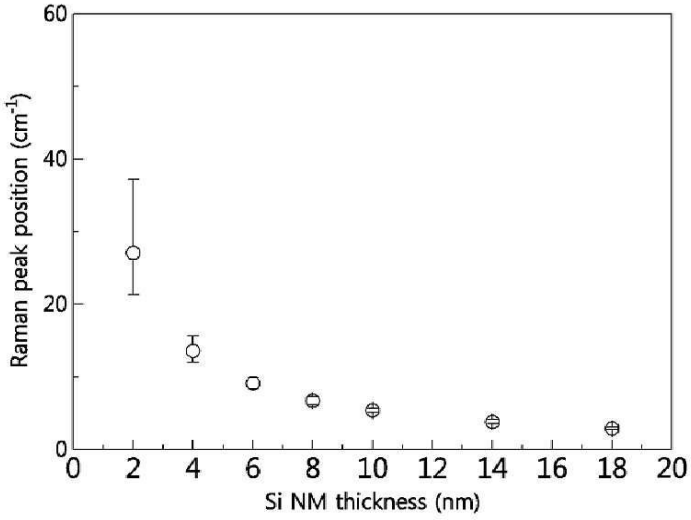
도면10f


< 10 nm Si NM >
-10.1 cm-1
11.4 cm-1
520 cm-1
1.04%
X 1
X 0.1
Intensity (arb. units)
Uniaxial strain increase
Δε=0%
-60 -40 -20 0 20 40 60 500 520 540
Raman shift (cm-1)

도면11


1.58 eV
1.96 eV
2.33 eV
2.81 eV
3.81 eV
Normalized intensity (arb. units)
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
Thickness of Si NM (nm)

도면12


60
40
20
0
Raman peak position (cm-1)
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
Si NM thickness (nm)