



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2013년10월04일
(11) 등록번호 10-1314929
(24) 등록일자 2013년09월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
GOIN 21/00 (2006.01) HO1L 21/26 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2008-7012266
(22) 출원일자(국제) 2006년10월25일
심사청구일자 2011년10월25일
(85) 번역문제출일자 2008년05월22일
(65) 공개번호 10-2008-0091085
(43) 공개일자 2008년10월09일
(86) 국제출원번호 PCT/US2006/041409
(87) 국제공개번호 WO 2007/050570
국제공개일자 2007년05월03일
(30) 우선권주장
11/586,403 2006년10월25일 미국(US)
(뒷면에 계속)
(56) 선행기술조사문헌
US6489801 B1
US6211961 B1
JP2006509190 A
JP평성01182739 A
전체 청구항 수 : 총 18 항

(73) 특허권자
지트로닉스 코포레이션
미국 텍사스주 78759 오스틴 수트 3.8041 웨스트
브레이커 레인 3925
(72) 발명자
치즘 윌리엄 더블류 2세
미국 텍사스주 78703 오스틴 뉴필드 레인 2100
(74) 대리인
신정건, 김태홍

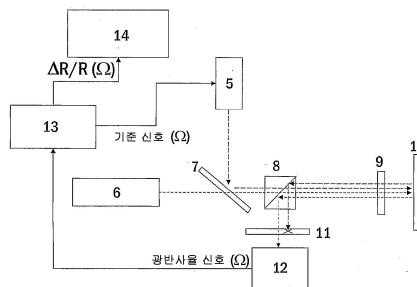
심사관 : 차영란

(54) 발명의 명칭 반도체 구조에서 변형 및 활성화 도펀트의 광반사율에 의한특성 기술 방법

(57) 요약

반도체 구조에서 물리적 속성의 특성기술을 위해, 반도체 구조에서 변형 및 활성화 도펀트의 광반사율에 의한 특성 기술의 신규한 방법이 개발되었다. 변형 및 활성화 도펀트 특성기술 방법의 기저 원리는, 반도체 대역구조에서 대역간 천이 에너지 근방에서 발생하는 광반사율 신호를 측정하는 것이다. 이 신호는 반도체 표면에서 유도된 나노미터 규모의 공간 전하 필드의 효과를 통해 변형 및/또는 활성화 도펀트에 대단히 민감하다. 이를 달성하기 위해, 본 발명은 강도 변조된 펄스 레이저 빔과 연속파 프로브 레이저 빔을 포함한다. 이들 2개 빔은 반도체 구조 상에 동시에 포커싱된다. 펄스 레이저는 NIR-VIS에서 약 15 mW의 광학적 전력을 제공한다. 펄스광은 100 kHz - 50 MHz 범위에서 동작하는 단일 제너레이터에 의해 진폭 변조된다. 프로브 빔은 VIS-UV 에서 동작하는 대략 5 mW이며, 대체로 반도체 구조에서 강한 광학적 흡수 근방의 파장이다. 펄스 및 프로브는 샘플상의 마이크로미터 규모의 스폿으로 동시 포커싱된다. 프로브 스펙큘러 반사가 수집되고 컬러 필터를 사용하여 펄스 파장광이 제거된다. 잔여 프로브 광은 광다이오드 상으로 향하고 전기 신호로 변환된다. 그 다음, 프로브 AC 신호는 반도체 재료 광학적 응답에서의 펄스 유도된 변화를 포함한다. 광다이오드 출력 상에 위상 감응성 측정이 수행되고, DC 반사 신호에 의해 AC 신호가 나누어진다. 그리하여, 광반사 정보는 프로브 파장, 변조 주파수, 펄스 강도, 및 펄스 및 프로브 편광의 함수로서 기록된다.

대표도



(30) 우선권주장

60/730,293 2005년10월27일 미국(US)

60/831,363 2006년07월17일 미국(US)

특허청구의 범위

청구항 1

반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법에 있어서,

a) 진폭 변조된 펄프 레이저 빔을 이용하여 상기 반도체 구조의 표면의 영역을 조사(illuminate)하는 단계로서, 상기 펄프 레이저 빔은 상기 반도체 구조 내의 반도체 재료의 최소 대역간 천이 에너지보다 큰 에너지를 갖는 적어도 하나의 파장을 포함함으로써, 상기 반도체 구조 내의 전계가 시간 주기적 변조를 얻도록 상기 반도체 구조 내의 전자적 전하 밀도에서의 시간 주기적 변화를 유도하고, 상기 반도체 구조 내의 상기 반도체 재료는 대역간 천이 에너지들의 시간 주기적 변조를 겪는 것인, 상기 진폭 변조된 펄프 레이저 빔을 이용하여 상기 반도체 구조의 표면의 영역을 조사(illuminate)하는 단계;

b) 상기 단계 a)의 상기 영역의 일부를 별개의 프로브 레이저 빔으로 조사하는 단계로서, 상기 별개의 프로브 레이저 빔은, 상기 반도체 구조 내의 반도체 재료의 대역간 천이 에너지 근방의 적어도 하나의 파장을 포함하며, 대역간 천이 에너지 근방에서 발생하는 반도체 재료 광학적 응답에서의 유도된 변화를 기록하기에 적합한 것인, 상기 단계 a)의 상기 영역의 일부를 별개의 프로브 레이저 빔으로 조사하는 단계;

c) 상기 반도체 구조의 조사로부터 반사된 교류 프로브 광을 기록하는 단계로서, 상기 교류 프로브 광은, 광반사율 신호라고 알려진, 상기 반도체 재료 광학적 응답에서의 유도된 변화를 포함하는 것인, 상기 반사된 교류 프로브 광을 기록하는 단계; 및

d) 상기 반도체 구조의 물리적 속성들을 판정하기 위해 상기 단계들 a), b), 및 c)에서 수집된 정보를 이용하는 단계

를 포함하는 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 정규화된 상기 광반사율 신호의 부호와 크기를 물리적 변형에 관련시키는 실험적으로 결정된 캘리브레이션 곡선에 따라 상기 물리적 변형이 모니터링되는 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 3

제1항에 있어서, 관계식 $\Delta R/R = m\chi + b$ 에 따라 물리적 변형이 모니터링되고, 여기서 $\Delta R/R$ 은 정규화된 광반사율 신호이고, χ 는 물리적 변형이며, m 은 실험적으로 결정된 선형 상관 계수이고, b 는 실험적으로 결정된 오프셋인 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 전자적 전하 밀도는, 정규화된 광반사율 신호를 상기 전자적 전하 밀도에 관련시키는 실험적으로 결정된 캘리브레이션 곡선에 따라 모니터링되는 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 전자적 전하 밀도는, 관계식 $\Delta R/R = mN_e + b$ 에 따라 모니터링되며, 여기서, $\Delta R/R$ 은 정규화된 광반사율 신호이고, N_e 는 전하 밀도이며, m 은 실험적으로 결정된 선형 상관 계수이고, b 는 실험적으로 결정된 오프셋인 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 6

제1항에 있어서, 상기 전계는 관계식 $\Delta R/R = mF^2 + b$ 에 따라 모니터링되고, 여기서, $\Delta R/R$ 은 정규화된 광반사율 신호이고, F 는 전계이며, m 은 실험적으로 결정된 선형 상관 계수이고, b 는 실험적으로 결정된 오프셋인

것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 7

제1항에 있어서, 정규화된 광반사율 신호를 전자적 전하 깊이 프로파일에 관련시키는 실험적으로 결정된 캘리브레이션 곡선에 따라 상기 전자적 전하 깊이 프로파일이 모니터링되는 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 프로브 레이저는, 상기 반도체 재료의 광학적 응답에서의 적어도 하나의 대역간 천이 에너지 근방의 복수의 파장을 제공하는 튜닝가능한 파장의 레이저이고, 상기 대역간 천이 에너지의 위치, 진폭, 스펙트럴 폭, 및/또는 스펙트럴 형상을 판정하기 위해 교류 프로브 광 파장 정보가 이용되는 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 9

제1항에 있어서, 상기 반도체 구조는 반도체-온-인슐레이터 필름구조를 포함하며, 상기 펄스 레이저 빔의 파장은 전기적으로 절연된 반도체층의 두께보다 작거나 그에 비례하는 흡수 깊이를 제공하도록 선택되고, 그에 따라 상기 절연된 반도체층 내의 전자적 전하 밀도에서의 시간 주기적 변화를 유도하기에 적합한 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 10

제1항에 있어서, 상기 반도체 구조는 전기적으로 절연된 반도체 재료를 포함하고, 상기 펄스 레이저 빔의 파장은, 상기 반도체 재료의 물리적 침투보다 작거나 그에 비례하는 흡수 깊이를 제공하도록 선택되고, 그에 따라 상기 절연된 반도체층 내의 전자적 전하 밀도에서의 시간 주기적 변화를 유도하기에 적합한 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 11

제1항에 있어서, 펄스 레이저 빔 강도의 함수로서 상기 광반사율 신호에서의 변화가 판정되는 것은, 반도체 구조의 물리적 속성을 판정하는 방법.

청구항 12

반도체 구조의 물리적 속성을 검출하기 위한 장치에 있어서,

반사성 표면을 갖는 반도체 구조;

100 kHz 내지 50 MHz 범위의 변조 주파수를 갖는 진폭 변조된 레이저 빔을 제공하며, 5 mW 이상의 광학적 전력에서 동작하고, 상기 반도체 구조 내의 반도체 재료의 최소 대역간 천이 에너지보다 큰 에너지를 갖는 적어도 하나의 파장을 포함하는 펄스 레이저 시스템;

연속파 레이저 빔을 제공하며, 10 mW 이하의 광학적 전력에서 동작하고, 상기 반도체 구조 내의 반도체 재료의 대역간 천이 에너지 근방의 적어도 하나의 파장을 포함하는, 프로브 레이저 시스템;

상기 레이저 빔들 중 어느 하나를 직경 50 마이크로미터 이하의 반도체 구조의 표면상의 공통 초점 스폿으로 포커싱하고, 샘플로부터 반사된 프로브 광을 분리하고 광수신기 내로 향하게 하는 광학 시스템;

입력 강도에 비례하는 전류를 발생하도록 구성된 광수신기;

상기 광수신기 출력을 기록하기 위해 접속된 위상 고정 신호 검출 시스템; 및

측정 및 시스템 제어 소프트웨어를 구비하는 컴퓨터

를 포함하는 반도체 구조의 물리적 속성을 검출하기 위한 장치.

청구항 13

제12항에 있어서, 상기 반도체 구조는 실리콘-온-인슐레이터 기판을 포함하고, 상기 펄스 레이저 파장은 500 nm

이하인 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 검출하기 위한 장치.

청구항 14

제12항에 있어서, 상기 프로브 레이저 시스템의 파장은 375 nm 인 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 검출하기 위한 장치.

청구항 15

제12항에 있어서, 상기 프로브 레이저 시스템은, 상기 반도체 구조 내의 반도체 재료의 대역간 천이 에너지 근방의 복수의 파장을 제공하는 외부 공동 튜닝가능한 파장의 레이저인 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 검출하기 위한 장치.

청구항 16

제12항에 있어서, 상기 펄스 레이저 시스템의 진폭 변조된 레이저 빔 및 상기 프로브 레이저 시스템의 연속파 레이저 빔은 2색 빔스플리터의 사용을 통해 공선화(collinear)되는 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 검출하기 위한 장치.

청구항 17

제16항에 있어서, 상기 공선화된 레이저 빔은 무색 대물 렌즈를 사용하여 반도체 구조의 표면상의 영역에 공통-포커싱되는 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 검출하기 위한 장치.

청구항 18

삭제

청구항 19

제12항에 있어서, 상기 펄스 레이저 시스템의 강도는 위상 고정 신호 검출 시스템의 내부적으로 발생된 기준 신호를 통해 직접 변조되는 것인, 반도체 구조의 물리적 속성을 검출하기 위한 장치.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 반도체 구조의 광학적 특성 기술에 관한 것으로, 더 구체적으로는, 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 특성을 기술하기 위해 광변조된 반사율의 사용에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 전자 소자의 제조에서 공정 제어를 위해 고감도 비파괴성 측정 기술들이 요구된다. 생산 동안에 조기의 피드백을 달성하기 위해 소자가 완성되기 이전에 전자적 속성들의 특성을 기술하는 것이 필요하다. 중요하게는, 장치 동작을 지배하는 물리적 현상이, 그 작은 체적 때문에 특성기술하기 어려운 대단히 얇은 활성층들에서 발생한다는 것이다. 예를 들어, 진보된 트랜지스터 구조는 얇은 변형된 실리콘층(strained silicon layer)을 포함하고, 여기서, 트랜지스터의 전기적 속성들은 실리콘 격자의 변형에 의해 제어된다. 엘립소메트리(ellipsometry)와 같은 종래의 계측 기술은 이와 같은 박막의 전자적 속성들을 효과적으로 특성기술할 수 없다. 다행히도, 박막의 전자적 속성들의 특성을 기술하기 위해 광반사율과 같은 광학적 기술이 사용될 수 있다. 종래의 광반사율 구성은, 관심대상의 박막에서 전자-홀 밀도에서의 주기적 변화를 유도하기 위해 진폭-변조된 레이저 펄스 빔을 채택하고 있다. 그 다음, 위상 고정된 검출을 이용하여 작은 샘플 반사율 변화를 모니터링하기 위해 변조된 펄스 빔과 부합하는 제2 광학 빔이 사용된다. 본 발명은, 나노미터 두께의 실리콘 막의 활성 전자적 속성들의 특성기술을 위해 새로운 광반사율 계측 기술을 적용하는 것에 관해 기술한다.

[0003] 본 명세서에서 공개되는 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술 방법은, 약 375 nm의 파장에서 발생하는, Si에서 첫번째의 강한 대역간 천이 에너지 부근에 있는 프로브 파장을 사용함으로써, Si 나노필름구조의 전자적 속성들에 대한 감도를 달성한다. 이와 같은 천이 부근에서, 광반사율(PR) 신호는 전형적으로 가파른 도함수형 형상을 보일 것이다. 일반적으로 PR 신호는 다음과 같은 형태, 즉 $\Delta R/R = \alpha \Delta \epsilon_1 +$

$\beta \Delta \epsilon_2$ 의 형태를 취한다. 여기서, α 및 β 는 필름스택(filmstack) 정보를 포함하는 "Seraphin 계수들"이고, $\Delta \epsilon_1$ 및 $\Delta \epsilon_2$ 은 각각 유전체 함수의 실수부와 허수부에서의 펄프 유도된 변화이다(Seraphin, 1965). 즉, $\Delta \epsilon_1$ 및 $\Delta \epsilon_2$ 은 박막 속성들의 펄프 유도된 속성들을 기술한다. 이들 유도된 변화는, 자유 캐리어의 에너지와, 반도체

유전체 함수의 제3 도함수의 곱으로서 다음과 같이 기술된다: $\Delta \epsilon_i = \partial^3(\omega \epsilon_i) / \partial \omega^3 \times U_p$. 여기서, U_p 는 자유 캐리어의 에너지이고, ω 는 광자 주파수이다(Aspnes, 1980). 따라서, Si에 대해 375 nm의 프로브 빔의 파장을 선택하는 동기는 $\Delta \epsilon_1$ 및 $\Delta \epsilon_2$ 에 대한 가파른 도함수 형태에 있다. 제3 도함수 항은, 알려진 반도체 광학 상

수들로부터 직접 계산될 수 있다. 따라서, 총 PR 신호는 $\Delta R/R = \text{Re}[(\alpha - i\beta) \times \partial^3(\omega \epsilon) / \partial \omega^3] \times U_p$ 이 된다. 제3 도함수 기능 형태는, 반도체 대역 구조에서 강한 광학적 흡수 부근에서만 크다. 따라서, 높은 정확도로 이들 특징들을 분리할 수 있다. 이것은, 예를 들어, 375 nm 부근에서 Si에서의 강한 광학적 흡수는 변형하에서 정확한 시프트를 겪기 때문에, PR 기술이 나노단위의 실리콘 층들에서 변형을 정확히 측정하도록 해준다. 이들 강한 광학적 흡수 부근에서, PR 응답의 진폭은 또한 활성화된 실리콘 트랜지스터 채널 영역에서의 전계에 대해 훌륭한

한 감도를 갖는다. he 자유 전자 에너지는 표현식 $U_p = e^2 h^2 F^2 / 24 m \omega^2$ 으로 주어짐을 주목해야 한다. 여기서, e 는 전자의 전하량이고, h 는 플랑크 상수이며, F 는 공간 전하 필드(space charge field)이고, m 은 전자의 유효 질량이다. 이 자유 전자 에너지도 역시, 유도된 캐리어 밀도에 비례한다. 이것은 썬와송 방정식: $N_e = \epsilon_0 F^2 / 2eV$ 로부터 알 수 있다. 여기서, N_e 는 유도된 캐리어 밀도이고, V 는 고유 표면 전압이며, ϵ_2 는 물질의 유전율이다(Shen, 1990).

[0004] 통상의 상용 반사율계기에서의 문제점은 프로브 빔의 파장이 조사대상 전자 재료에서의 강한 광학적 흡수와 부합하도록 선택되지 않는다는 점이다(Salnick, 2003; Borden, 2000). 따라서, 종래의 광반사율계기에서, PR 신호는, 유전체 함수의 제3 도함수가 작은 곳의 파장들에서 얻어지고, 그에 따라 대역 구조에 대한 어떠한 정보도 이용가능하지 않다. 따라서, 종래의 광반사율계기는 내부 전계나 변형을 대개 판정하지 못한다. 오히려, 이들 광반사율계기는 주입된 도펀트의 손상 프로파일에 민감하다(Salnick, 2003). PR 신호에 포함된 필름스택 정보는 그 중요성이 부차적이며, 주입 깊이의 함수로서의 PR 함수 응답에서 코사인형 곡선을 생성한다. 나아가, 주입 깊이 의존성은, 이들 종래의 광반사율계기에서 주입량 의존성으로부터 디커플링될 수 없다. 어쨌든, 종래의 상용 광반사율계기에 의해 제공되는 필름스택 정보는, 스펙트로스코피 엘립소메트리와 같은 표준의 선형 광학 기술을 통해 이용가능하다(Jellison, 1995).

[0005] 강한 광학적 천이 부근의 파장을 갖는 램프 기반의 스펙트로스코픽 프로브 빔을 채택하는 종래의 광반사율계기에서의 또 다른 문제점은, 이와 같은 빔을 이용할 때, 이들 계기들은 i) 각각의 희망하는 파장에서 순차적 위상 고정형 측정을 위해 모노크로미터를 이용해야 하거나, ii) 선형 포토다이오드 검출 어레이와 병렬로 동작하는 복수의 위상 고정형 검출 회로들을 이용해야 한다는 것이다. 모노크로미터를 이용하는 경우, 총 싱글 포인트 측정 시간은 전형적으로 5-10분 정도로서, 이것은 대량 생산에 사용하기에 만족스럽지 못하다. 병렬 위상 고정형 회로들을 이용하는 경우, 장치의 비용 및 복잡도가 최대화된다. 게다가, 램프 기반의 스펙트로스코픽 프로브 빔을 채택하는 종래의 광반사율계기들에서, 램프는 비간섭성 광(incoherent light)을 제공하므로, 레이저 빔과 같이 효율적으로 작은 점에 포커싱될 수 없다. 본 명세서에서 공개되는 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법에서, 이들 문제점들은 훌륭하게 해결된다. 먼저, 모노크로미터의 사용은 불필요한데, 이것은 레이저 프로브 파장이 관심대상의 알려진 파장에 프리셋되거나, 이와 같은 다수의 알려진 파장들에 걸쳐 신속하게 스캐닝하기 때문이다. 둘째, 병렬 위상 고정형 회로는 불필요한데, 이것은 단 하나의 검출 다이오드만이 요구되기 때문이다. 그리고, 마지막으로, 레이저 소스의 사용으로 인해, 대량 제조를 위한 공정 제어 요건에 부합하는 엄격한 포커싱 및 신속한 데이터 획득이 가능하다

[0006] 일반적인 상용의 광반사율계기에서의 또 다른 문제점은, 반도체 제조에서 흔히 사용되는 절연 기관의 효율적 펄핑에 적합한 흡수 깊이를 제공하도록 펄프 빔의 파장이 선택되지 않는다는 점이다. 예를 들어, 실리콘-온-인슐레이터 기관을 효율적으로 펄핑하기 위해, 펄프 레이저 파장은, 흡수 깊이가 최고 실리콘 두께보다 작거나 같아야 한다는 요건에 의해 제약된다. 이것은 적절한 펄프 파장이 약 500 nm보다 작다는 것을 의미한다. 이러한 조건은 통상의 상용 광반사율계기로는 만족할 수 없다(Salnick, 2003).

[0007] 따라서, 종래의 광반사율계기/스펙트로미터는 이들이 해결하는 특정 목적에 적합한 반면, 장치가 완성되기 이전

에 반도체 나노구조의 활성 전자 속성들의 특성기술에 대해서는 본 발명과 같이 적합하지 않다.

[0008] 이러한 점들에서, 본 명세서에서 공개되는 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법은, 종래의 개념과 종래 기술의 설계에서 벗어나 있으며, 대량 제조시에, 반도체 나노구조의 활성 전자적 속성들의 신속한 특성기술을 위주로 하여 개발된 장치를 제공한다.

발명의 상세한 설명

[0009] 종래 기술의 공지된 타입의 광학적 스펙트로스코피에 고유한 전술한 단점들에 비추어, 본 발명은 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 신규한 방법을 제공한다.

[0010] 후속해서 더 상세히 기술될 본 발명의 전반적인 목적은, 지금까지 언급된 많은 광학적 스펙트로스코피의 많은 잇점들과, 종래 기술들 단독에 의해 또는 이들의 임의의 조합에 의해 예측되지 않거나, 명시적으로 설명되지 않거나, 제시되지 않거나, 암시되지 않는 반도체 구조에서의 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법을 유도하는 많은 신규한 특징들을 갖는 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법을 제공하는 것이다.

[0011] 본 발명에 따른 변형 특성기술의 방법의 기저 원리는, 반도체 대역구조에서 강한 대역간 천이 에너지 근방에서 발생하는 광반사율 천이에서의 작은 파장 천이를 측정하는 것이다. PR 피크의 위치는 변형과 같은 박막의 물리적 속성들에 대한 직접적 관정을 허용한다. 본 활성 도펀트 특성기술의 방법의 기저 원리는, 반도체 대역구조에서 강한 대역간 천이 에너지 근방에서 발생하는 광반사율 신호를 측정하는 것과 유사하다. 이것은, 반도체 표면에서 유도되는 나노 규모의 공간 전하 필드의 효과를 통해 활성화된 도펀트에 대해 고도로 민감하다. PR 신호는 활성 도핑 농도와 같은 박막의 물리적 속성들의 직접적 관정을 허용한다. 따라서, 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법은, 반도체 나노구조의 활성 전자적 속성들에 관한 광반사율 정보를 발생하고 기록하는 능력을 제공한다.

[0012] 이를 달성하기 위해, 본 발명은, 한 가능성있는 실시예로서, NIR-VIS에서 동작하는 대략 15mW의 다이오드 레이저 펄스 빔을 포함한다. 이 펄스 빔은, 100 kHz - 50 MHz의 범위에서 동작하는 신호 발생기에 의해 진폭 변조된다. 펄스 레이저가 직접 변조되거나, 종래의 전기-광학적 또는 음향 광학적 변조 기술들을 통해 펄스 빔이 변조될 수 있다. 펄스 편광은 편광기를 고정함으로써 변동될 수 있다. 프로브 빔은, 한 가능성있는 실시예로서, VIS-UV에서 동작하는 약 5 mW의 다이오드 레이저 빔을 포함한다. 펄스 및 프로브는, 샘플 상의 마이크로미터 규모의 스폿으로 향하고 스펙클러 반사가 수집된다. 그 다음, 펄스 광은 컬러 필터를 사용하여 감쇠되고, 샘플의 변조된 반사율을 포함하는 잔여 프로브 광은 광다이오드 내에 포커싱되어 전기적 전류로 변환된다. 이 전류는 반사율 변화에서의 진폭과 위상을 측정하는 락인 증폭기(lock-in amplifier)에 전달된다. 그 다음, 이 PR 신호는 프로브 파장, 펄스 강도, 및 펄스 및 프로브 편광의 함수로서 저장된다. 따라서, 반도체 나노구조의 활성 전자적 속성들에 관한 광반사율 정보가 얻어진다.

[0013] 본 출원 발명의 대상이되는 반도체 재료는 임의의 반도체 재료일 수 있으며, II-VI 반도체 재료 또는 III-V족 반도체 재료를 포함하지만, 이에 한정되는 것은 아니다. 어떤 실시예들에서 이와 같은 재료들에는, 실리콘, 탄소, 게르마늄, 실리콘 탄화물, 실리콘 게르마늄, 붕소, 인, 비소, 또는 이들의 조합이 포함될 수 있다. 또는, 갈륨 비화물, 알루미늄 비화물, 갈륨 질화물, 알루미늄 질화물, 인듐 질화물, 갈륨 인화물, 인듐 인화물, 인듐 비화물, 또는 이들의 임의의 조합이 포함될 수도 있다.

[0014] 이하의 상세한 설명을 보다 잘 이해하고, 본 분야에 대한 본 발명의 기여도를 더욱 잘 이해하기 위해, 본 발명의 보다 중요한 특징들이, 비교적 넓게, 개괄적으로 설명되었다. 그러나, 이하에서 기술되는 바와 같이 본 발명에는 다른 특징들도 있다.

[0015] 이러한 점에서, 본 발명의 적어도 한 실시예를 상세히 설명하기 이전에, 이러한 실시예는 이하의 상세한 설명에서 개시되거나 도면에 예시된 구성요소들의 배열 및 구조상의 세부사항에 대해 제한을 두기 위한 것이 아님을 이해하여야 한다. 본 발명은 다른 실시예를 통해서도 가능하며 다양한 방법으로 실시되거나 수행될 수 있다. 또한, 본 명세서에서 사용되는 표현 및 용어는 설명을 위한 것이며 제한적 의미로 간주되어서는 안된다는 것을 이해하여야 한다. 본 발명은 첨부된 도면들에 예시된 형태로 구현될 수 있으나, 도면은 예시를 위한 것이며, 예시된 특정한 구조에서 많은 변경이 이루어질 수 있다는 점에 주목해야 한다.

[0016] 첨부된 도면들은 본 명세서의 일부를 형성하며 본 발명의 소정 양태들을 추가로 예시하기 위해 포함된 것이다. 본 발명은, 본 명세서에서 제시하는 특정한 실시예의 상세한 설명과 조합하여 이들 도면들을 하나 이상을 참조

함으로써, 더욱 잘 이해될 수 있을 것이다.

실시예

- [0042] 이하에서는, 실리콘 나노구조에서 변형 및 활성 도펀트의 특성기술을 위해 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법을 사용하는 것에 대해 논의될 것이다. 본 발명의 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법은 임의의 반도체 구조를 분석하는데 사용될 수 있으며, 실리콘 나노구조의 논의는 예시를 위한 것이지만 어떤 식으로든 제한하기 위한 것이 아님을 이해하여야 한다.
- [0043] 도 1을 참조하면, 도 1은, 본 발명의 광반사율 기술을 이용하여 특성기술될 수 있는, 다소 과장되게 도시된 예시적인 변형된 실리콘 필름구조를 포함하고 있다. 분자빔 에피택시, 및/또는 화학적 증기 피착, 및/또는 금속-유기 화학적 증기 피착법을 이용하여 성장될 수 있는 변형된 실리콘 필름구조는, 실리콘 기판(1)을 포함하고, 이 기판 상에서 (약 10~30% Ge에 이르기까지) 증가하는 Ge 함량의 점진적으로 변하는 조성비(graded composition)의 실리콘 게르마늄층(2)이 성장된다. 이에 후속하여, 균일한 조성비의 SiGe층(3)이 성장되고, 마지막으로, 상부 얇은 변형된 실리콘막(4)이 성장된다. SiGe층(2 및 3)은 가상 SiGe 기판을 형성하고, 상부 실리콘 막은 이 기판에 순응한다. 그리하여, 상부 실리콘층에 신장성 변형이 유도된다. 한 실시예에서, 상부 변형된 Si층(4)은 약 10.0 nm의 두께를 포함한다.
- [0044] 도 2에 도시된 바와 같은 본 발명의 배치에 따르면, 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법이, 대역간 천이 에너지, 활성 캐리어 농도, 및 표면 전계와 같은 반도체 구조의 물리적 속성들을 특성기술하기 위해, 변형된 실리콘 나노구조 또는 기타의 임의의 반도체 구조로부터 반사된 스펙트라를 측정하는데 사용될 수 있다. 도 2에 도시된 바와 같이, 펄스 레이저(5), 프로브 레이저(6), 2색 빔스플리터(7), 편광 빔스플리터(8), 무색 1/4파장 플레이트(9), 반사 샘플(10), 컬러 필터(11), 광다이오드(12), 락인 증폭기(13), 및 측정 파라미터들을 제어하고 반사율 변화를 기록하기 위한 컴퓨터(14)를 포함한다. 실시예에서, 펄스 레이저 강도는 락인 증폭기(13)로부터의 1볼트 피크-대-피크 사각파 기준 신호를 이용하여 직접 변조된다. 펄스 및 프로브 빔은 2색 빔스플리터(7)를 사용하여 공선화(collinear)된다. 그 다음, 공선빔들은 집속 렌즈를 무색 포커싱 렌즈를 이용하여 반사 샘플(10) 상에 포커싱되고, 집속 렌즈를 이용하여 집속된다. 그 다음, 펄스 광은 컬러 필터(11)를 이용하여 감쇠된다. 그 다음, 샘플의 변조된 반사율을 포함하는 잔여 프로브 광은 광다이오드(12)에 포커싱되고 전기 전류로 변환된다. 이 전류는 반사율 변화의 진폭과 위상을 측정하는 락인 증폭기(13)에 전달된다. 이 정보는 구동 주파수의 함수로서 반사율에서의 미분적 변화를 기록하는 컴퓨터(14)에 전달된다.
- [0045] 펄스 레이저(5)는 조사중인 반도체의 밴드갭 또는 그 이상의 광자 에너지를 갖는 연속파 레이저이다. 실리콘의 경우, 밴드갭은 약 1100 nm 파장에서 발생한다. 실시예에서, 펄스 파장은 약 488 nm이고 펄스 레이저 전력은 약 15 mW이다. 이 파장은 활성층이 실리콘-온-인슐레이터의 얇은 상부 실리콘층이어서, 캐리어 밀도를 변조하기 위해 펄스광이 상부 Si층 내에 흡수되어야만 하도록 할 때 특히 유용하다. 펄스 레이저 강도는 컴퓨터(14)에 의해 제어될 수 있다. 펄스 레이저(5) 실시예는, 약 5mW 이상의 전력에서 동작하는 NIR-VIS 파장 범위에서 방출하는 다이오드 레이저들을 포함한다. 펄스 레이저 빔은, 전기광학 또는 음향 광학적 진폭 변조 장치의 사용을 통해 외부적으로 변조되거나 직접 변조될 수 있다. 한 실시예에서, 펄스 레이저(5)는 락인 증폭기(13)로부터의 내부 기준 신호에 의해 고주파에서 직접 변조된다. 구동 주파수는 약 100kHz 내지 50 MHz로 변동한다. 펄스 레이저 빔은 또한, 그 각도 위치가 컴퓨터에 의해 제어될 수 있는 편광기에 전달된다. 이것은 진폭 변조되고, 가변 편광의, 펄스 빔을 제공한다. 프로브 레이저(6)는 조사중인 반도체의 대역간 천이 에너지 또는 그 부근의 광자 에너지를 갖는 연속파 레이저 다이오드를 포함한다. 실리콘의 경우, 제1 강한 대역간 흡수가 약 375 nm 파장에서 발생한다. 한 실시예에서, 프로브 파장은 약 375nm이고, 프로브 레이저 전력은 약 5 mW이다. 소정 실시예들에서, 프로브 레이저(6)는 그 중심 파장이 약 375 nm이고, 튜닝가능한 범위가 약 10 나노미터 이상인 외부 공동 튜닝가능 다이오드 레이저이다. 프로브 레이저(6) 실시예는, 약 10 mW 이하의 전력에서 동작하는 VIS-UV 파장 범위에서 방출하는 레이저 다이오드를 포함한다. 펄스 및 프로브 빔들은 2색 빔스플리터(7)의 사용을 통해 공선화된다. 공선 빔들은 높은 개구수의 포커싱 장치를 이용하여 샘플상에 포커싱되고, 스펙큘러 반사가 집속되어 컬러 필터(11)로 향한다. 포커싱 실시예들은, 각각의 레이저 빔이 직경 50 마이크로미터 이하로 포커싱되는 동시 빔 장치를 포함한다. 도 3은 프로브 레이저 빔과, 그 빔이 광학 시스템을 지나갈 때의 편광을 도시한다. 모든 광학 소자들은 각각의 소스 파장에 정합된다. 일단 프로브 빔이 반사 샘플(10)로부터 반사되면, 샘플 광학 속성들의 유도된 변조로부터 펄스 변조 주파수에서 진폭 변조를 가진다. 따라서, 프로브 빔은, $I_0[R(DC) + \Delta R(\Omega)]$ 형태의 신호를 포함한다. 펄스 빔으로부터의 광은 컬러 필터(11)로 감쇠되고, 잔여 프로브

광은 광다이오드(12)에 전달된다. 따라서, 광다이오드 출력은 프로브 신호에 비례하는 전기 전류를 포함한다.

[0046] 광다이오드로부터의 DC 신호는 I_0R 에 비례하는 반면, AC 신호는 $I_0\Delta R$ 에 비례한다. $\Delta R/R$ 을 측정하기 위해, 강도 I_0 는 정규화(normalize)되어야만 한다. 이것은 AC 신호를 DC 신호로 나눔으로써 달성된다. 실시예에 대한 $\Delta R/R$ 의 전형적인 진폭은 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 정도이다. 위상 감응성 측정은 광다이오드 출력 상에서 수행되고 컴퓨터(14)는 측정 광전류를 기록한다. 컴퓨터(14)는 프로브 파장, 변조 주파수, 및 펌프 레이저 강도, 및 빔의 편광을 제어한다. $\Delta R/R$ 은 프로브 파장, 변조 주파수, 레이저 강도 및 편광의 함수로서 기록된다. 실시예는 기본적인 PR 신호를 변경하지 않는 장치에 대한 변형을 포함한다.

[0047] 앞서 언급한 바와 같이, 변형 특성기술 방법의 기저 원리는, 반도체 대역구조에서 강한 대역간 천이 에너지 근방에서 발생하는 광반사율 신호에서의 작은 시프트를 측정하는 것이다. 도 4는 단일 프로브 파장을 이용하여 $\lambda \approx 375 \text{ nm}$ 에서 발생하는 실리콘 "E₁" 대역간 천이는 변형하에서 스플릿 및 시프트를 겪는 것으로 알려져 있다. 변형된 대역간 천이 에너지의 위치는

$E_{\pm} = E_1 + \Delta E_H \pm \Delta E_S$ 로 주어진다. 여기서, $\Delta E_H (< 0)$ 와 ΔE_S 는 각각 유체 정역학적 유도된 시프트 및 전단변형 유도된 시프트에 대응한다. 이들 항들은 변형에서 있어서 양자 모두 선형적이어서, 변형에 대해 선형적으로 비례하는 전반적 시프트를 야기한다. 도 4는, 약 1%의 실리콘 격자 변형에 대하여, 변형되지 않은 실리콘 E₁ 대역간 천이 에너지 및 적색시프트된 E₋ 대역간 천이 에너지에 대응하는 시뮬레이션된 PR 신호를 포함한다. 도시된 바와 같이, E₁ 대역간 천이 에너지 근방의 단색 프로브 빔에 대해, PR 신호는 변형의 존재에 부호 변화를 겪을 것이다. 따라서, 조사중인 변형되지 않은 반도체의 강한 대역간 천이 또는 바로 그 부근에 있는 하나의 프로브 파장을 선택함으로써, 변형의 존재는 PR 응답의 부호 변화에 의해 판정될 수 있다. 추가적으로, 도 4에 도시된 바와 같이, 이와 같은 대역간 천이 또는 그 부근에서, PR 신호는 변형의 선형 함수이다. 따라서, PR 신호는 대략적인 선형 방정식 : $\Delta R/R = m\chi + b$ 에 따라 변형의 크기를 간단히 모니터링하는데 사용될 수 있다. 여기서, χ 는 물리적 변형이고, m 은 실험적으로 결정된 선형 상관 계수이며, b 는 작은 오프셋이다.

[0048] 변형에 대한 PR 신호 $\Delta R/R$ 의 상관 관계에서, PR 신호 상에 미치는 필름스택의 영향을 아는 것이 중요하다. 이것은 구조적인 관계 $\Delta R/R = \alpha \Delta \epsilon_1 + \beta \Delta \epsilon_2$ 에 의해 제공된다. 여기서, α 및 β 는 필름스택 정보를 포함하는 세라핀 계수들이고, $\Delta \epsilon_1$ 및 $\Delta \epsilon_2$ 는 각각 샘플 의사-유전체 함수의 실수 및 허수부에서의 펌프 유도된 변화이다. 흡수 깊이는 PR 응답의 깊이를 설정하며, 그 범위에 걸쳐 필름스택이 PR 신호에 미치는 영향을 아는 것이 중요하다. $\delta \approx 22.6 \text{ nm}$ 이다. 이것은, 22.6 nm보다 큰 상부 실리콘 두께에 대해, 375 nm 프로브 빔은 기저 필름 구조에 대한 감도를 신속하게 소실한다. 도 5는 전형적인 SiGe(Ge 농도 10%, 20%, 및 30%)에 대해, 상부 실리콘 두께의 함수로서, 도 1에 도시된 예시적 필름 구조의 계산된 반사율을 포함한다. 이 반사율을 ϵ_1 및 ϵ_2 에 관해 수치적으로 미분함으로써, 세라핀 계수들을 계산하는 것이 가능하다. 즉,

$\alpha = \partial(\ln R) / \partial \epsilon_1$ 및 $\beta = \partial(\ln R) / \partial \epsilon_2$ 이다. 도 6 및 7은, 전형적인 SiGe Ge 농도 10%, 20%, 및 30%에 대해, 상부 실리콘 두께의 함수로서, 도 1에 도시된 예시적 필름 구조에 대한 세라핀 계수들을 포함한다. 세라핀 계수들은 관심대상의 파라미터 공간에 걸쳐 그 부호가 바뀌지 않는다는 사실은, 375nm에서의 PR 신호에서 관찰된 부호의 변화는 상부 실리콘 두께 또는 Ge 농도에서의 변동에 기인한 것일리가 없음을 예증한다. 따라서, $\Delta R/R$ 의 부호에서의 임의의 변화는 반드시 $\Delta \epsilon_1$ 또는 $\Delta \epsilon_2$ 의 부호 변화에 기인한 것이고, 이것은 변형의 존재를 가리킨다. 계산된 세라핀 계수들도 역시 필름스택 파라미터들 대한 $\Delta R/R$ 의 의존성을 예증한다.

[0049] 변형의 존재와 연관된 PR 신호 변화를 설명하기 위해, 도 1의 예시적 구조의 변형예들을 포함하는 2개 샘플 세트가 분석되었다. 관심대상의 기본적인 질문은, 이들 세트들 각각 내의 상부 실리콘 막들 중 어느 것이 변형되는가 하는 것이다. 샘플 세트 1은 5개 웨이퍼를 포함했다: 변형되지 않은 실리콘 기판; 실리콘 기판 상의 완화된 SiGe(~18.5% Ge)를 갖는 2개의 웨이퍼; 및 약 6 nm 두께의 추가의 상부 변형된 실리콘 막을 갖는 실리콘 기판 상의 완화된 SiGe(~18.5% Ge)를 갖는 2개의 웨이퍼. 샘플 세트 1은 이하의 표 1에 기술되어 있다.

	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
필름스택	Si Subs	상부 Si/SiGe/Sub	SiGe/Sub	상부 Si/SiGe/Sub	SiGe/Sub
%Ge	N/A	~18.5%	~18.5%	~18.5%	~18.5%
상부 Si 두께	N/A	~6 nm	N/A	~6 nm	N/A

[0050]

[0051]

표 1

[0052] 샘플 세트 2는 6개의 웨이퍼를 포함했고, 각각은, 상부 실리콘 두께 및 Ge 농도에서의 변화와 함께, 도 1의 전체 스택을 포함했다.

	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6
필름스택	상부 Si/SiGe/기판					
%Ge	~15%	~20%	~20%	~20%	~15%	~20%
상부 Si 두께	~20 nm	~10 nm	~10 nm	~10 nm	~20 nm	~30 nm

[0053]

[0054]

표 2

[0055] 도 8은 20 MHz의 고정된 변조 주파수에서, 샘플 세트 1 상에서 취해진 PR 데이터를 도시한다. 변형되지 않은 실리콘 기판 및 완화된 SiGe 웨이퍼들인, 웨이퍼 #1, #3, 및 #5는 약 $+1 \times 10^{-5}$ 의 PR 신호를 보여준다. PR 스펙트럼은 상부 실리콘 막 및 완화된 SiGe 층들로부터의 응답의 선형 중첩이기 때문에, 웨이퍼 #2 및 #4가 변형되지 않은 상부 실리콘을 포함했다면, 이들 웨이퍼들의 응답은 웨이퍼 #1, #3, 및 #5와 비슷하게, 포지티브였을 거라고 결론내릴 수 있다. 그러나, 상부 실리콘을 갖는 웨이퍼들인, 웨이퍼 #2 및 #4는 반대 부호의 PR 신호를 보인다. 또한, 도 6 및 7에 도시된 바와 같이, 웨이퍼 #2 및 #4에 대해 보여진 PR 응답의 부호 변화는, 도 4에 도시된 변형 측정 원리에 따른, 상부 실리콘에서의 변형에 기인한 것이다.

[0056]

도 9는 20 MHz의 고정된 변조 주파수에서, 샘플 세트 2 상에서 취해진 PR 데이터를 도시한다. 웨이퍼 #1, #5, 및 #6은 $\sim 1-2 \times 10^{-5}$ 의 PR 신호를 도시한다. 그러나, 웨이퍼 #2, #3, 및 #4는 반대 부호의 크기가 $\sim 3-4 \times 10^{-5}$ 인 PR 신호를 보여준다. 표 2의 검사에 의해, 네거티브 PR 신호는 약 10 nm의 상부 실리콘 막두께를 갖는 웨이퍼들에 대응하는 반면, 포지티브 신호는 약 20 nm 두께의 막에 대응한다. 그러나, 도 6 및 7에 도시된 바와 같이, 네거티브 PR 응답은 필름스택 효과일리는 없다. 이것은 샘플 세트 2상에서, 상부 실리콘 두께가 약 20 nm를 초과할 때 변형이 완화된다는 것을 보여준다. 이러한 결론은, (여기서 기재된 조건하에서) 약 15 nm 두께보다 더 두꺼운 상부 실리콘 막에 대하여 변형 완화를 예측하는 독립된 계산에 의해 지지된다. 샘플 세트 1의 결과와 유사하게, 샘플 세트 2의 웨이퍼 #2, #3, 및 #4는 변형되는 반면, 다른 것들은 변형되지 않는다고 결론내릴 수 있다.

[0057]

이제 다시, 활성 도펀트 특성기술 방법에 대한 설명으로 되돌아가면, 도 10은, 본 발명의 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법을 이용하여 분석될 수 있는 주입되고 어닐링된 실리콘 필름 구조를 포함한다. 주입되고 어닐링된 실리콘 나노필름구조는 집적회로의 제조에 사용되는 표준 실리콘 기판(15)을 포함한다. 이 기판에 균일한 층의 비소(As) 도펀트가 주입되고, 그 후에, 활성화와 어닐링이 수행된다. 실시예에서, 주입층(16)은 웨이퍼 표면 또는 그 부근에 위치한 약 10-40 nm의 두께를 포함한다. 실제적으로, 주입된 도펀트는 점진적으로 변하는 분포를 형성하므로 도 10은 주입되고 어닐링된 반도체 나노필름구조의 광학적 속성들을 모델링하기 위해 적절한 구조를 제공한다. 변동하는 주입량과 주입 에너지를 갖는 한 세트의 비소 주입된 실리콘 웨이퍼들이 발생되었다. 프로세스 매트릭스는, 적절한 전류 및 미래 제조 사양에 목표를 둔 주입량과 깊이를 가진 24개 웨이퍼를 이용했다. 주입된 에너지는 약 10 nm 내지 40 nm 범위의 깊이를 생성하도록 변동된 반면, 주입량은 약 10^{18} 원자/cc 내지 10^{20} 원자/cc의 공칭 도핑 밀도를 생성하도록 변동되었다. 각각의 주입 스펙트럼에 대해 어닐링된 웨이퍼 및 어닐링되지 않은 웨이퍼들이 생성되었다. 표 3은, 추정된 도핑 프로파일을 포함한, 매트릭스 상의 정보를 포함한다. 4개의 주입 에너지가 있다: 웨이퍼 #의 1-6, 7-12, 13-18, 및 19-24는 각각 주입 깊이 10, 20, 30, 40 nm에 대응한다. 이들 타겟 깊이들 각각은, 제곱 cm당 10^{12} , 10^{13} , 및 10^{14} 개 이온 정도의 3개 주입량 스펙트럼을 가진다. 가장 경량의 주입량은 대략 1×10^{18} 이온/cc 밀도에 대응한다. 마지막으로, 1000°C에서 5초의 단일 어닐링을 포함한 어닐링 스펙트럼이 수행되었다. 이 어닐링은 모든 주입량과 밀도 조건에 대해 최대의 도펀트 활성화를 초래하도록 의도되었다. 도펀트 확산을 최소화하는 어

떠한 시도도 없었다.

웨이퍼 번호	주입 에너지	타겟 길이 [nm]	스트레클 [nm]	주입량 [1/cm ²]	밀도 [1/cc]	어닐링 조건
1	7keV	10.2	3.6	1.00E+12	9.80E+17	XX
2	7keV	10.2	3.6	1.00E+12	9.80E+17	5s at 1000°C
3	7keV	10.2	3.6	1.00E+13	9.80E+18	XX
4	7keV	10.2	3.6	1.00E+13	9.80E+18	5s at 1000°C
5	7keV	10.2	3.6	1.00E+14	9.80E+19	XX
6	7keV	10.2	3.6	1.00E+14	9.80E+19	5s at 1000°C
7	20keV	20.3	7.2	2.00E+12	9.85E+17	XX
8	20keV	20.3	7.2	2.00E+12	9.85E+17	5s at 1000°C
9	20keV	20.3	7.2	2.00E+13	9.85E+18	XX
10	20keV	20.3	7.2	2.00E+13	9.85E+18	5s at 1000°C
11	20keV	20.3	7.2	2.00E+14	9.85E+19	XX
12	20keV	20.3	7.2	2.00E+14	9.85E+19	5s at 1000°C
13	35keV	30.6	10.8	3.00E+12	9.80E+17	XX
14	35keV	30.6	10.8	3.00E+12	9.80E+17	5s at 1000°C
15	35keV	30.6	10.8	3.00E+13	9.80E+18	XX
16	35keV	30.6	10.8	3.00E+13	9.80E+18	5s at 1000°C
17	35keV	30.6	10.8	3.00E+14	9.80E+19	XX
18	35keV	30.6	10.8	3.00E+14	9.80E+19	5s at 1000°C
19	50keV	40.6	13.9	4.00E+12	9.85E+17	XX
20	50keV	40.6	13.9	4.00E+12	9.85E+17	5s at 1000°C
21	50keV	40.6	13.9	4.00E+13	9.85E+18	XX
22	50keV	40.6	13.9	4.00E+13	9.85E+18	5s at 1000°C
23	50keV	40.6	13.9	4.00E+14	9.85E+19	XX
24	50keV	40.6	13.9	4.00E+14	9.85E+19	5s at 1000°C

[0058]

[0059]

앞서 언급한 바와 같이, 활성 도펀트 특성기술 방법의 기저 원리는 반도체 대역구조에서 강한 대역간 천이 에너지 근방에서 발생하는 광반사율 신호를 측정하는 것이다. 도 11은, 펌프 유도된 캐리어 밀도 10^{18} /cc에 대략 대응하는, $F = 430$ kV/cm의 유도된 공간 전하 필드에 대해, Si E₁ 광학적 흡수 부근에서 계산된 PR 신호를 보여준다. 이 캐리어 밀도는 상업용 주입 모니터링 애플리케이션에서 정형적으로 유도된다(Opsal, 1985). 도 11에 도시된 바와 같이, 대략 360-380 nm의 파장 범위에 걸쳐, 이 신호의 진폭은 꽤 크다. 사실상, 이것은 기존의 주입 모니터링 시스템에서 달성되는 PR 신호보다 적어도 100배 정도는 큰 것이다(Opsal, 1985). 게다가, 이하에서 설명되는 바와 같이, 활성 도펀트 특성기술 방법은 Si 트랜지스터 채널에서 활성 도펀트를 구분하고 측정하는데 이용될 수 있는 반면, 기존 시스템은 이러한 응용을 구현할 수 없는 것으로 판명되었다.

[0060]

PR 신호에 미치는 주입 손상의 영향을 이해하기 위해, 세라핀 계수를 평가하는 것이 다시 한번 필요하다. 손상 프로파일은 재료의 선형 광학적 응답을 담당하고, 역사적으로 주입 수단 그 자체로서 사용되어 왔다. 설명을 위해, 633 nm의 파장에서, 주입 손상된 Si에 대한 세라핀 계수를 고려해 보자. 이것은, 통상의 상용 주입 모니터링 PR 시스템의 파장이다(Opsal, 1985). 실리콘에서 임의의 의미있는 광학적 특징으로부터 멀리 위치한 프로브 파장 때문에, 광반사율 신호는 (Drude) 캐리어 밀도의 변조로부터 직접 발생한다. 633 nm 파장의 경우, 유전체 함수의 실수부에서의 변화만이 의미가 있다. 따라서, $\Delta R/R \cong \alpha \Delta \epsilon_1$ 이라 할 수 있고, 모든 필름스택 정

보는 α 에 포함된다. $\alpha = \partial(\ln R) / \partial \epsilon_1$ 를 계산하기 위해, 손상층의 굴절률, 기판, 손상층의 두께의 관점에서 R에 관한 분석적 표현식을 먼저 유도해야 한다. 이것은 임의의 입사각 또는 편광 조건에 대해 수치적으로 이루어질 수도 있다. 그 다음, R은 유전체 함수의 실수부에 관해 수치적으로 미분될 수 있다. 이렇게 α 가 구축된다.

일반적으로, 세라핀 계수는 $4\pi nd/\lambda$ 의 주기로 진동할 것이다. 여기서, n은 손상층에 관한 굴절 계수이고, d는 손상층의 두께이며, λ 는 프로브 빔 파장이다. 주기는 재료 내에서 광의 경로 길이에 의존하므로, 입사각에도 역시 의존한다. 또한, 진동은 광의 흡수 깊이에 의해 진동이 줄어들 수 있다. 그러나, 수직 입사에 대해, 그리고, Si가 상당히 투명한 경우의 파장에서, 이들 고려사항들은 중요하지 않다. 도 12는 633 nm 프로브 빔에 대해, 손상층 깊이 및 손상 비율에 대한 세라핀 계수 α 의 의존도를 도시한다. 상부, 중간, 및 하부 곡선은 각각 주입된 층의 10%, 30%, 및 50% 무정질(amorphization)에 대응한다. 이들 코사인형 곡선의 주기는 접합 깊이 감도를 추출하기 위한 시도에서 앞서 적합화되었다. 그러나, 실제로는, 633 nm 프로브는 약 15 nm 이하의 주입 깊이에 대한 감도를 소실하는데, 이것은, 알파에 포함된 $\Delta R/R$ 의 접합 깊이 의존성이 $\Delta \epsilon_1$ 에 포함된 주입량의

존성으로부터 디커플링될 수 없기 때문이다. 특히, 주입 깊이 및 주입량 양자 모두에서의 동시적 증가는 633 nm 프로브 신호에서 아무런 변화를 야기하지 않을 수 있다. 이것이 접합 깊이 프로세스 제어에 대해 기존의 틀들이 효과적이지 않은 이유이다. 게다가 기존의 틀들은, Drude 캐리어 분산에서의 본질적으로 작은 변환에 대한 민감성에 의존하기 때문에 저주입량 측정의 요건에 의해 심각하게 도전받는다.

[0061] 파장 375 nm에서 주입 손상된 Si에 대해 세라핀 계수를 고려해보면, 이 파장의 경우, 유전체 함수의 실수부 및 허수부 양자 모두에서의 변화는 의미있다. 따라서, $\Delta R/R$ 에 포함된 필름스택 정보를 결정할 때 α 및 β 양자

모두를 고려해야 한다. 375 nm 파장에서, 실리콘에서의 흡수 깊이 $\delta \approx 22.6 \text{ nm}$ 이다. 흡수 깊이는 PR 응답의 깊이를 설정하고, 따라서, 그 범위에 걸쳐 PR 신호에 미치는 필름스택의 영향을 아는 것이 중요하다. 이것은, 22.6 nm보다 큰 표면 필름 두께에 대해, 375 nm 프로브 빔은 기저 필름 구조에 대해 급속하게 둔감해진다. 도 13은, 375 nm 빔에 대해, 손상층 깊이 및 손상 비율에 관한 세라핀 계수 α 의 의존성을 보여준다. 상부, 중간, 및 하부 곡선은 각각 10%, 30%, 및 50% 무정질 손상에 대응한다. 이 파장에서의 흡수에 기인한 코사인형 곡선의 감쇠는 명백하다. 375 nm 프로브에서의 세라핀 계수들의 진동의 더 짧은 주기는, 이 파장은 약 10 nm 이하까지 접합 깊이에 대한 민감성을 보일 것임을 예시한다(이것은 633 nm 파장 프로브 보다 우수하다). 도 14는, 375 nm 빔에 대해, 손상층 및 손상 비율에 관한 세라핀 계수 β 의 의존성을 도시한다. 상부, 중간, 및 하부 곡선은 각각 10%, 30%, 및 50% 무정질 손상에 대응한다.

[0062] 활성 도펀트 특성기술 방법의 능력을 확립하기 위해, PR 장치는 공선 펌프 및 45°의 입사각을 갖는 프로브빔으로 구성되었다. 펌프와 프로브 파장은 각각 845 nm 및 374 nm 였다. 펌프 레이저 강도는, 라인 증폭기에 의해 발생된 2 MHz 사각파에 의해 직접 변조되었다. 펌프 레이저 강도는 약 15 mW였다. 공선 펌프 및 프로브는 무색 현미경 대물렌즈를 사용하여 약 6.5 마이크로미터 직경의 스폿에 포커싱되었다. 이들 조건들에 대해, 펌프에 의해 발생된 캐리어 밀도는 종래의 상용 시스템들에서 사용된 것 보다 적어도 100배 정도 작았다. 즉,

$\leq 1 \times 10^{16} / \text{cc}$. 그러나, 374 nm 프로브의 대단히 향상된 감도는 이러한 감소된 펌프 강도를 용이하게 보상해주며, 결과적으로 신호 레벨은 상용 시스템 레벨과 비례한다. 도 15는 웨이퍼 #2, #4, 및 #6에 대한 PR 신호를 보여준다. 이들 웨이퍼들은, 10 nm 깊이에서 접합을 형성하는 것을 목적으로 하는, 동일한 7 keV 에너지 As 주입을 가졌다. 웨이퍼 #2는 주입량 $1 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #4는 주입량 $1 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #6은 주입량 $1 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 를 받았다. 각각의 웨이퍼는 동일한 어닐링을 받았고 완전 활성화될 것으로 예상된다. PR 신호의 모듈러스 $|\Delta R/R|$ 는, 웨이퍼 #2로부터 #6에 이르기까지, $\approx 3 \times 10^{-6}$ 에서 $\approx 3 \times 10^{-5}$ 로 상승하였다. 즉, 약 10배 정도 상승하였다. 이것은, 10 nm 접합 깊이에 대해, 주입량에서의 20의 변화에 대해 신호 변화에서 약 10을 예증해 준다. 따라서, 이 PR 기술은, 미래의 제조 공정에서 요구되는 극히 얇은 접합 깊이에 대해 어닐링된 웨이퍼에서의 주입량에 대한 훌륭한 감도를 예증한다. 그 데이터는 고도로 재현가능하다는 것도 역시 알 수 있다, 즉 로드/언로드 이후의 데이터 포인트들은 거의 정확하게 서로를 재현한다. PR 신호에 대한 절대 측정 정확도는 $\approx 5 \times 10^{-7}$ 이다. 도 16, 17, 및 18은, 더 높은 주입 에너지에 대해 주입량과 더불어 유사하게 증가하는 신호를 도시한다. 도 16은 웨이퍼들 #8, #10, 및 #12에 대한 PR 신호를 보여준다. 이들 웨이퍼들은, 20 nm 깊이의 접합을 형성하는 것을 목적으로 하는, 동일한 20 keV 에너지 As 주입을 가진다. 웨이퍼 #8은 주입량 $2 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #10는 주입량 $2 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #12는 주입량 $2 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 를 받았다. 각각의 웨이퍼는 동일한 어닐링을 받았고 완전 활성화될 것으로 예상된다. PR 신호의 모듈러스는, 웨이퍼 #8로부터 #12에 이르기까지, $\approx 4 \times 10^{-6}$ 에서 $\approx 2.6 \times 10^{-5}$ 로 상승하였다. 즉, 약 10배 정도 상승하였다. 이것은, 다시 한번, 20 nm의 극히 얇은 접합 깊이에 대해 어닐링된 웨이퍼에서, 주입량에 대한 훌륭한 PR 감도와 훌륭한 신호 재현성을 예증한다. 도 17은 웨이퍼들 #14, #16, 및 #18에 대한 PR 신호를 보여준다. 이들 웨이퍼들은, 30 nm 깊이의 접합을 형성하는 것을 목적으로 하는, 동일한 35 keV 에너지 주입을 가진다. 웨이퍼 #14는 주입량 $3 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #16는 주입량 $3 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #18는 주입량 $3 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 를 받았다. 각각의 웨이퍼는 동일한 어닐링을 받았고 완전 활성화될 것으로 예상된다. PR 신호의 모듈러스 $|\Delta R/R|$ 는, 웨이퍼 #14로부터

#18에 이르기까지, $\approx 5 \times 10^{-6}$ 에서 $\approx 3 \times 10^{-5}$ 로 상승하였다. 즉, 약 10배 정도 상승하였다. 이것은, 다시 한번, 30 nm의 극히 얇은 접합 깊이에 대해 어닐링된 웨이퍼에서, 주입량에 대한 훌륭한 PR 감도와 훌륭한 신호 재현성을 예증한다. 도 18은 웨이퍼들 #20, #22, 및 #24에 대한 PR 신호를 보여준다. 이들 웨이퍼들은, 40 nm 깊이의 접합을 형성하는 것을 목적으로 하는, 동일한 50 keV 에너지 주입을 가진다. 웨이퍼 #20은 주입량 $4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #22는 주입량 $4 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #24는 주입량 $4 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 를 받았다. 각각의 웨이퍼는 동일한 어닐링을 받았고 완전 활성화될 것으로 예상된다. PR 신호의 모듈러스는, 웨이퍼 #20으로부터 #24에 이르기까지, $\approx 4 \times 10^{-6}$ 에서 $\approx 4 \times 10^{-5}$ 로 상승하였다. 즉, 약 10배 정도 상승하였다. 이것은, 다시 한번, 40 nm의 극히 얇은 접합 깊이에 대해 어닐링된 웨이퍼에서, 주입량에 대한 훌륭한 PR 감도와 훌륭한 신호 재현성을 예증한다.

[0063] 앞서 논의된 바와 같이, 접합 깊이와 더불어 PR 신호의 사인과 변화 예상된다. 도 19는 접합 깊이의 함수로서 어닐링된 웨이퍼들 각각에 대한 PR 신호의 모듈러스를 보여주고 있다. 도 19에서, $1 \times 10^{18}/\text{cc}$, $1 \times 10^{19}/\text{cc}$, 및 $1 \times 10^{20}/\text{cc}$ 의 대략 일정한 도핑 밀도에 대응하는, 3개의 "행들" 각각은 이와 같은 사인과 변화를 보여준다. 도 20은, 도 19의 최저 밀도의 행을 스케일링함으로써, 최저 주입량에 대한 PR 데이터의 이러한 특성들을 더 예시하고 있다.

[0064] 도 21은 웨이퍼들 #1, #3, 및 #5에 대한 PR 신호를 도시하고 있다. 이들은 어닐링이없는 "주입만" 이루어진 웨이퍼들이다. 이들은, 10 nm 깊이에서 접합을 형성하는 것을 목표로 하는, 동일한 7 keV 에너지 As 주입을 가진다. 웨이퍼 #1은 주입량 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #3은 주입량 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #5는 주입량 $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 를 받았다. PR 신호의 모듈러스 $|\Delta R/R|$ 는, 웨이퍼 #1로부터 #5에 이르기까지, $\approx 1.6 \times 10^{-5}$ 에서 $\approx 3 \times 10^{-6}$ 로 감소하였다. 즉, 약 10배 정도 감소하였다. 증가하는 주입량과 더불어 이러한 신호에서의 감소는, 어닐링된 웨이퍼들에 대해 관측된 바와는 정반대이며, 결정 Si E₁ 대역간 천이 에너지의 가파름을 저감시키는 주입으로부터의 손상에 기인한 것이다. 이것은, 10 nm의 극히 얇은 접합 깊이에 대해 "주입만" 이루어진 웨이퍼들에서의 주입량에 대한 훌륭한 PR 감도를 예시하고 있다. 도 22, 23, 및 24는 더 큰 주입 에너지에 대해 주입량과 더불어 유사하게 감소하는 신호를 보여주고 있다. 도 22는 웨이퍼들 #7, #9, 및 #11에 대한 PR 신호를 도시하고 있다. 이들 웨이퍼들은, 20 nm 깊이에서의 접합을 형성하는 것을 목표로 하는, 동일한 20 keV 에너지 As 주입을 가진다. 웨이퍼 #7은 주입량 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #9은 주입량 $2 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #11은 주입량 $2 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 를 받았다. PR 신호의 모듈러스 $|\Delta R/R|$ 는, 웨이퍼 #7로부터 #11에 이르기까지, $\approx 1.2 \times 10^{-5}$ 에서 $\approx 3 \times 10^{-6}$ 로 감소하였다. 즉, 약 4배 정도 감소하였다. 이러한 감소는, 20 nm의 극히 얇은 접합 깊이에 대해 "주입만" 이루어진 웨이퍼들에서의 주입량에 대한 양호한 PR 감도를 예시한다. 도 23은 웨이퍼들 #13, #15, 및 #17에 대해 PR 신호를 보여준다. 이들 웨이퍼들은, 30 nm 깊이에서 접합을 형성하는 것을 목적으로 하는, 동일한 35 keV 에너지 As 주입을 가진다. 웨이퍼 #13은 주입량 $3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #15은 주입량 $3 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #17은 주입량 $3 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 를 받았다. 각각의 웨이퍼는 어닐링없이 "주입만" 이루어졌다. PR 신호의 모듈러스 $|\Delta R/R|$ 는, 웨이퍼 #13으로부터 #17에 이르기까지, $\approx 1 \times 10^{-5}$ 에서 $\approx 2 \times 10^{-6}$ 로 감소하였다. 즉, 약 5배 정도 감소하였다. 이것은 다시 한번, 30 nm의 극히 얇은 접합 깊이에 대해 "주입만" 이루어진 웨이퍼들에서의 주입량에 대한 양호한 PR 감도를 예시한다. 도 24는 웨이퍼들 #19, #21, 및 #23에 대한 PR 신호를 보여준다. 이들 웨이퍼들은, 40 nm 깊이에서 접합을 형성하는 것을 목적으로 하는, 동일한 50 keV 에너지 As 주입을 가진다. 웨이퍼 #19는 주입량 $4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #21은 주입량 $4 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 를 받았고, 웨이퍼 #23은 주입량 $4 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 를 받았다. 각각의 웨이퍼는 어닐링없이 "주입만" 이루어졌다. PR 신호의 모듈러스 $|\Delta R/R|$ 는, 웨이퍼 #19으로부터 #23에 이르기까지, $\approx 6 \times 10^{-6}$ 에서 $\approx 2 \times 10^{-6}$ 로 감소하였

다. 즉, 약 3배 정도 감소하였다. 이것은, 40 nm의 극히 얇은 접합 깊이에 대해 "주입만" 이루어진 웨이퍼들에서의 주입량에 대한 적당한 PR 감도를 예시한다.

[0065] 도 25는, 주입된 웨이퍼들 각각에 대한 PR 신호를 접합 깊이의 함수로서 예시하고 있다. 도 25에서 도시된 각각의 "행"을 따라감으로써, 각각의 목표한 도핑 밀도(1×10^{18} /cc, 1×10^{19} /cc, 및 1×10^{20} /cc) 세트는 감쇠 사인파 변화를 따른다는 것을 알 수 있다. 관측된 바와 같이, 주입 깊이에 따라, 주입량에 대한 감소하는 감도는, 감소하는 결정성과, 손상층 내에서의 보다 큰 총 흡수와의 조합에 기인한 것이다.

[0066] 따라서, 본 명세서에서 공개된 바와 같이, 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법은, 반도체 나노구조에서 변형과 활성 도펀트를 구분하고 측정하는 신규하고 정확한 능력을 제공하며, 이에 있어서, 종래 기술의 개념과 설계와는 실질적으로 상이하다.

[0067] 본 발명의 사용법 및 동작의 방식에 대한 추가의 논의에 관하여, 전술한 바와 마찬가지로 명백해질 것이다. 따라서, 사용법 및 동작 방식에 관한 추가 논의는 없을 것이다.

[0068] 전술한 설명에 의해, 본 발명의 부분들에 대하여 크기, 재료, 형상, 형태, 기능 및 동작 방식, 조립 및 사용에 관한 다양한 변형이 당업자에게는 명백하며, 도면에 도시되고 명세서에 기술된 이들 모든 등가물들은 본 발명에 포함되는 것으로 의도되었다.

[0069] 따라서, 전술한 설명은 본 발명의 원리를 단지 설명하기 위한 것이다. 또한 당업자에게는 많은 수정과 변경이 용이하게 가능하므로, 본 발명을 도시되고 기술된 그대로의 구성과 동작만으로 제한하는 것은 바람직하지 않으며, 모든 적절한 수정 및 등가물들은 본 발명의 범위 내에 포함된다.

References

U.S. Patent Documents:

6,963,402 11/2005 Chism.....356/367
 6,195,166 2/2001 Gray.....356/477
 4,931,132 6/1990 Aspnes.....156/601

Other Publications:

"Dynamics of the plasma and thermal waves in surface-modified semiconductors (invited)," Alex Salmick and Jon Opsal, *Rev. Sci. Inst.* **74**, 545 (2003).
 "Nondestructive profile measurements of annealed shallow implants," P. Borden, *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**, 602 (2000).
 "Dielectric response of strained and relaxed Si_{1-x-y}Ge_xC_y alloys grown by molecular beam epitaxy on Si(001)," R. Lange *et al.*, *J. Appl. Phys.* **80**, 4578 (1996).
 "Optical functions of ion-implanted, laser-annealed heavily doped silicon," G.E. Jellison *et al.*, *Phys. Rev. B* **52**, 14 607 (1995).
 "Modulation Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Microstructures," F.H. Pollack, in *Handbook on Semiconductors*, Vol. 2, edited by M. Balkanski, pp. 527-635 (North-Holland, Amsterdam, 1994).
 "Photo-reflectance characterization of GaAs as a function of temperature, carrier concentration, and near-surface electric field," A. Badakhshan *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **11**, 169 (1993).
 "Photo-reflectance study of photovoltage effects in GaAs diode structures," V.M. Airaksinen and H.K. Lipsanen, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2110 (1992).
 "Photo-reflectance studies of silicon films on sapphire," A. Giordana and R. Glosser, *J. Appl. Phys.* **69**, 3303 (1991).
 "Correlation between the photo-reflectance response at E_1 and carrier concentration in *n*- and *p*-GaAs," A. Badakhshan, R. Glosser, and S. Lambert, *J. Appl. Phys.* **69**, 2525 (1991).
 "Dynamics of photo-reflectance from undoped GaAs," H. Shen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 321 (1991).
 "Photo-reflectance study of surface Fermi level in GaAs and GaAlAs," H. Shen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 2118 (1990).

[0070]

“Generalized Franz-Keldysh theory of electromodulation,” H. Shen and F.H. Pollak, *Phys. Rev. B* **42**, 7097 (1990).

“Photo-reflectance study of Fermi level changes in photowashed GaAs,” H. Shen, F.H. Pollak, and J.M. Woodall, *J. Vac. Sci. Technol. B* **8**, 413 (1990).

“Electric field distributions in a molecular-beam epitaxy Ga_{0.83}Al_{0.17}As/GaAs/GaAs structure using photo-reflectance,” H. Shen, F.H. Pollak, J.M. Woodall, and R.N. Sacks, *J. Vac. Sci. Technol. B* **7**, 804 (1989).

“Thermal and plasma wave depth profiling in silicon,” Jon Opsal and Allan Rosencwaig, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 498 (1985).

“Photo-reflectance characterization of interband transitions in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells and modulation-doped heterojunctions,” O. J. Glembocki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **46**, 970 (1985).

“Modulation Spectroscopy,” D. Aspnes, in *Handbook on Semiconductors*, Vol. 2, edited by M. Balkanski, pp. 109 (North-Holland, Amsterdam, 1980).

“Photo-reflectance Line Shape at the Fundamental Edge in Ultrapure GaAs,” J.L. Shay, *Phys. Rev. B* **2**, 803 (1970).

“Reflectance Modulation by the Surface Field in GaAs,” R.E. Nahory and J.L. Shay, *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1569 (1968).

“Band-Structure Analysis from Electro-Reflectance Studies,” B.O. Seraphin and N. Botka, *Phys. Rev.* **145**, 628 (1966).

“Optical Field Effect in Silicon,” B.O. Seraphin, *Phys. Rev.* **140**, A 1716 (1965).

“Optical-Field Effect on Thresholds, Saddle-Point Edges, and Saddle-Point Excitons,” J.C. Philips and B.O. Seraphin, *Phys. Rev. Lett.* **15**, 107 (1965).

“Field Effect of the Reflectance in Silicon,” B.O. Seraphin and N. Botka, *Phys. Rev. Lett.* **15**, 104 (1965).

[0071]

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1은 본 발명의 변형 특성기술 방법을 이용하여 분석될 수 있는 예시적인 변형된 실리콘 필름구조를 예시하는 도면이다.

[0018] 도 2는 본 발명에 따라 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술을 제공하기 위해 이용될 수 있는 광반사성 장치의 구조를 도시하는 도면.

[0019] 도 3은 본 발명에 따라 반도체 구조에서 변형 및 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술을 제공하기 위해 이용될 수 있는 광반사성 장치 프로브 빔 편광의 개략적 구조를 도시한 도면.

[0020] 도 4는, 2축 변형에 기인한 실리콘에서의 "E1" 대역간 천이의 개략적 시프트를 도시하며, 본 발명의 변형 특성기술 방법의 측정 원리를 도시하는 도면.

[0021] 도 5는, 상부 실리콘 두께와 SiGe층 Ge 농도의 함수로서, 광학적으로 두꺼운 실리콘 게르마늄층 상의 얇은 실리콘 막의 $\lambda = 375\text{nm}$ 에서 계산된 DC 반사율을 도시한 도면.

[0022] 도 6은 상부 실리콘 두께와 SiGe층 Ge 농도의 함수로서, 광학적으로 두꺼운 실리콘 게르마늄층 상의 얇은 실리콘 막의 $\lambda = 375\text{nm}$ 에서 계산된 세라핀 계수 $\alpha = \partial(\ln R)/\partial \epsilon_1$ 를 도시한 도면.

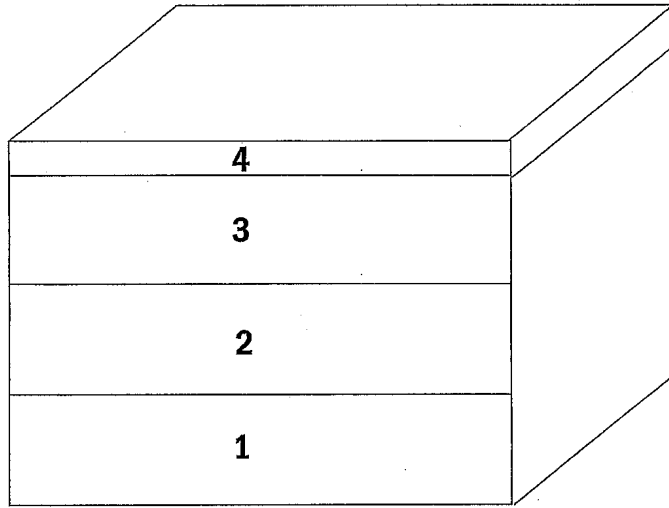
[0023] 도 7은 상부 실리콘 두께와 SiGe층 Ge 농도의 함수로서, 광학적으로 두꺼운 실리콘 게르마늄층 상의 얇은 실리콘 막의 $\lambda = 375\text{nm}$ 에서 계산된 세라핀 계수 $\beta = \partial(\ln R)/\partial \epsilon_2$ 를 도시한 도면.

[0024] 도 8은 샘플 세트1 내의 각각의 샘플에 대해 플롯팅된, 변조 주파수 20 MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.

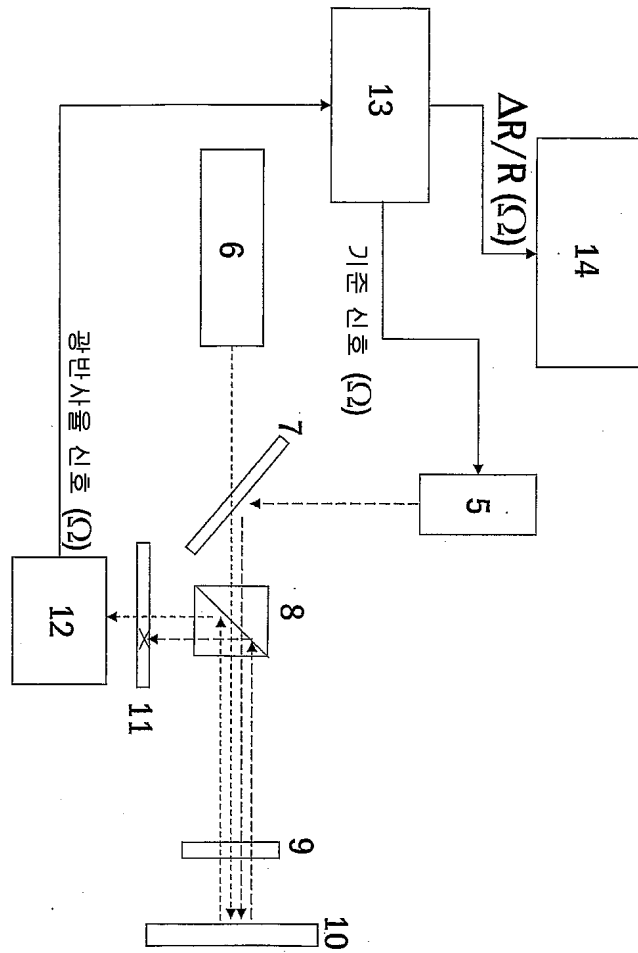
- [0025] 도 9는 샘플 세트2 내의 각각의 샘플에 대해 플롯팅된, 변조 주파수 20 MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0026] 도 10은 본 발명의 반도체 구조에서 활성 도펀트의 광반사율에 의한 특성기술의 방법을 이용하여 분석될 수 있는 예시적인 주입/어닐링된 실리콘 나노구조를 도시한 도면.
- [0027] 도 11은 펌프 유도된 공간 전하 필드 $F = 430 \text{ kV/m}$ 에 대해, Si E_1 대역간 천이 에너지 근방의 계산된 PR 신호를 도시한 도면.
- [0028] 도 12는 주입량 및 깊이의 함수로서, 광학적으로 두꺼운 실리콘 기판 상의 얇은 주입 손상층의 $\lambda = 633\text{nm}$ 에서 계산된 세라핀 계수 $\alpha = \partial(\ln R)/\partial \epsilon_1$ 을 도시한 도면.
- [0029] 도 13은 주입량 및 깊이의 함수로서, 광학적으로 두꺼운 실리콘 기판 상의 얇은 주입 손상층의 $\lambda = 375\text{nm}$ 에서 계산된 세라핀 계수 $\alpha = \partial(\ln R)/\partial \epsilon_1$ 을 도시한 도면.
- [0030] 도 14는 주입량 및 깊이의 함수로서, 광학적으로 두꺼운 실리콘 기판 상의 얇은 주입 손상층의 $\lambda = 375\text{nm}$ 에서 계산된 세라핀 계수 $\beta = \partial(\ln R)/\partial \epsilon_2$ 를 도시한 도면.
- [0031] 도 15는 목표된 접합 깊이 10nm를 갖는 As 주입되고 어닐링된 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0032] 도 16은 목표된 접합 깊이 20nm를 갖는 As 주입되고 어닐링된 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0033] 도 17은 목표된 접합 깊이 30nm를 갖는 As 주입되고 어닐링된 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0034] 도 18은 목표된 접합 깊이 40nm를 갖는 As 주입되고 어닐링된 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0035] 도 19는 접합 깊이의 함수로서 플롯팅된, 도 15-18에 도시된 바와 같은, As 주입되고 어닐링된 웨이퍼들에 대한 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0036] 도 20은 목표된 접합 깊이 10nm를 갖는 (저주입량) As 주입되고 어닐링된 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0037] 도 21은 목표된 접합 깊이 10nm를 갖는 As "주입만" 이루어진 (어닐링되지 않은) 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0038] 도 22는 목표된 접합 깊이 20nm를 갖는 As "주입만" 이루어진 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0039] 도 23은 목표된 접합 깊이 30nm를 갖는 As "주입만" 이루어진 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0040] 도 24는 목표된 접합 깊이 40nm를 갖는 As "주입만" 이루어진 웨이퍼에 대해 변조 주파수 2MHz에서의 실험적 PR 신호를 도시한 도면.
- [0041] 도 25는 접합 깊이의 함수로서 플롯팅된, 도 21-24에 도시된 바와 같은, As "주입만" 이루어진 웨이퍼들에 대한 실험적 PR 신호를 도시한 도면.

도면

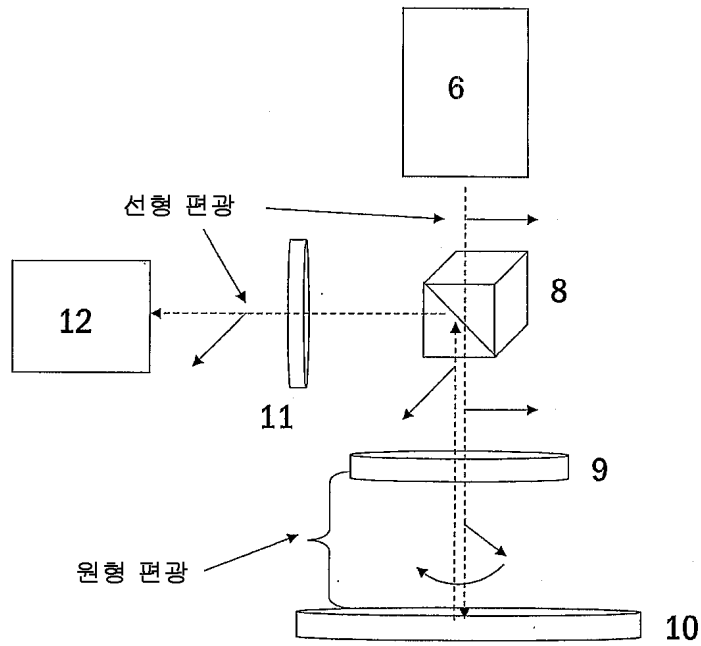
도면1



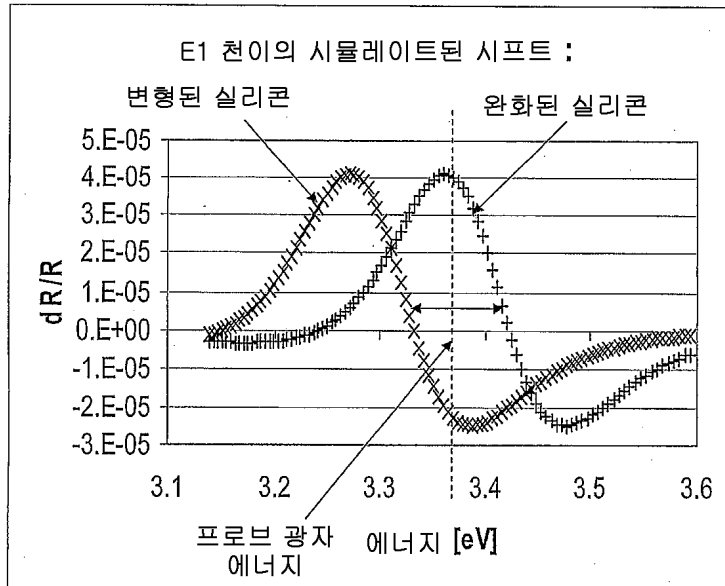
도면2



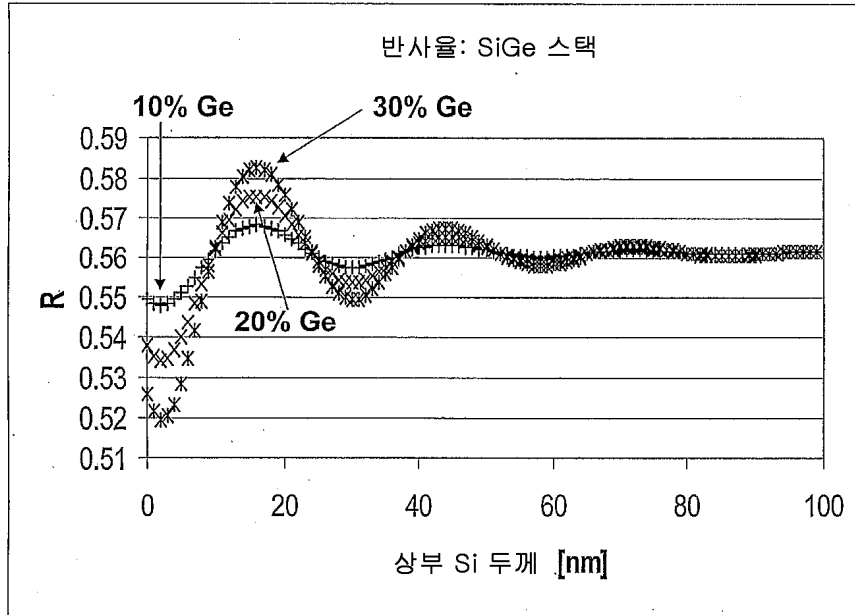
도면3



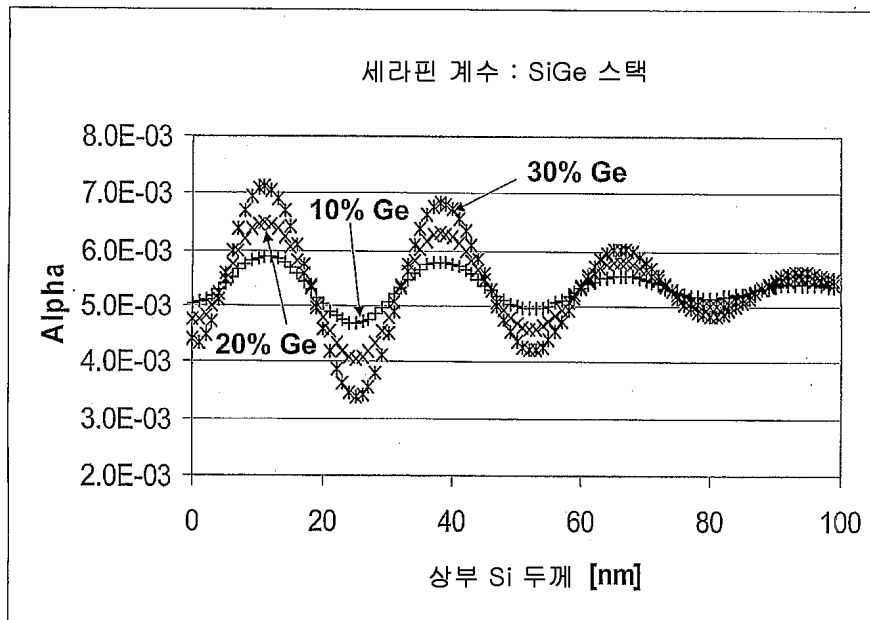
도면4



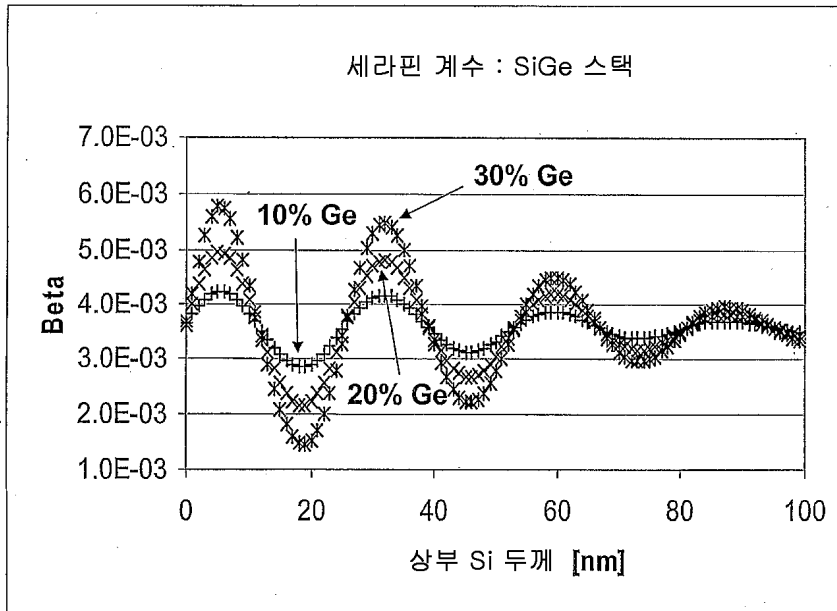
도면5



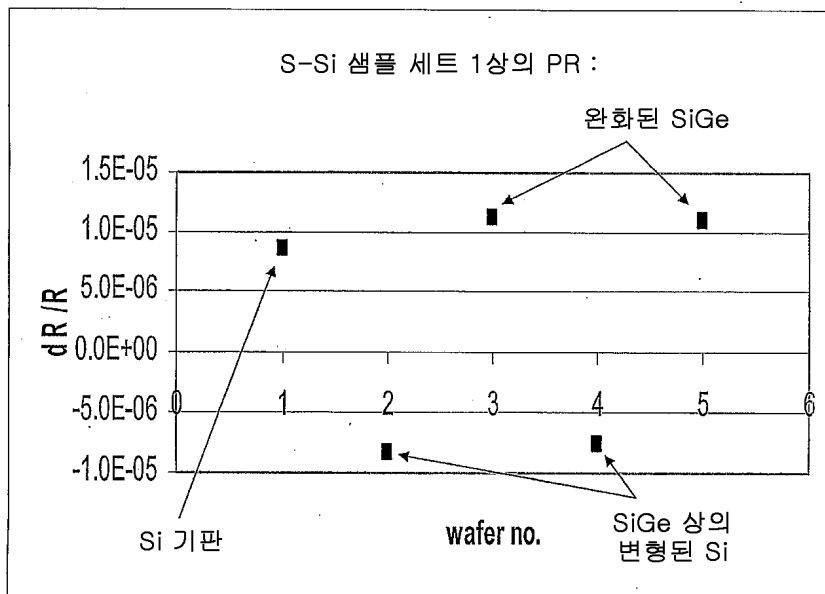
도면6



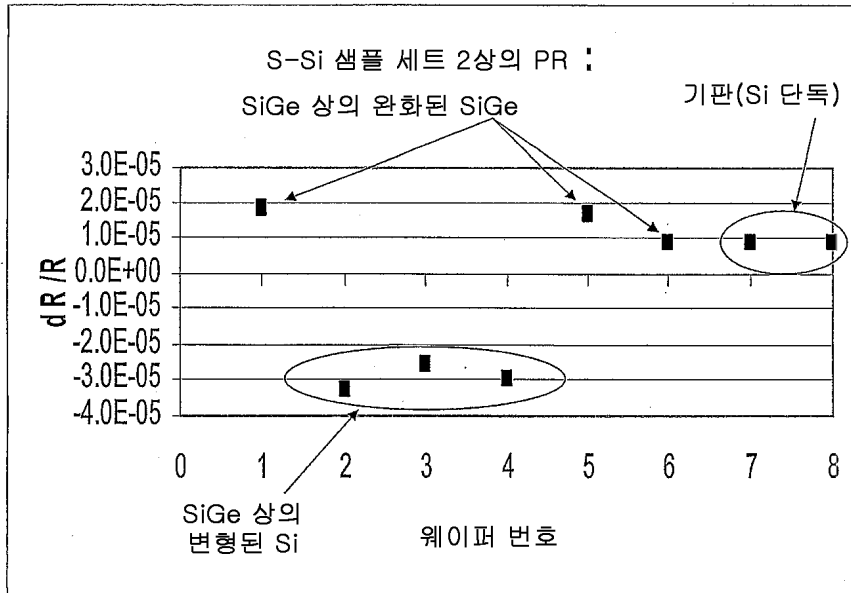
도면7



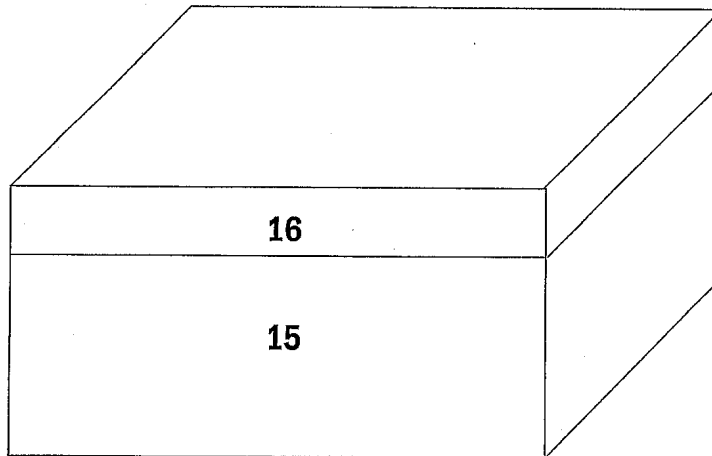
도면8



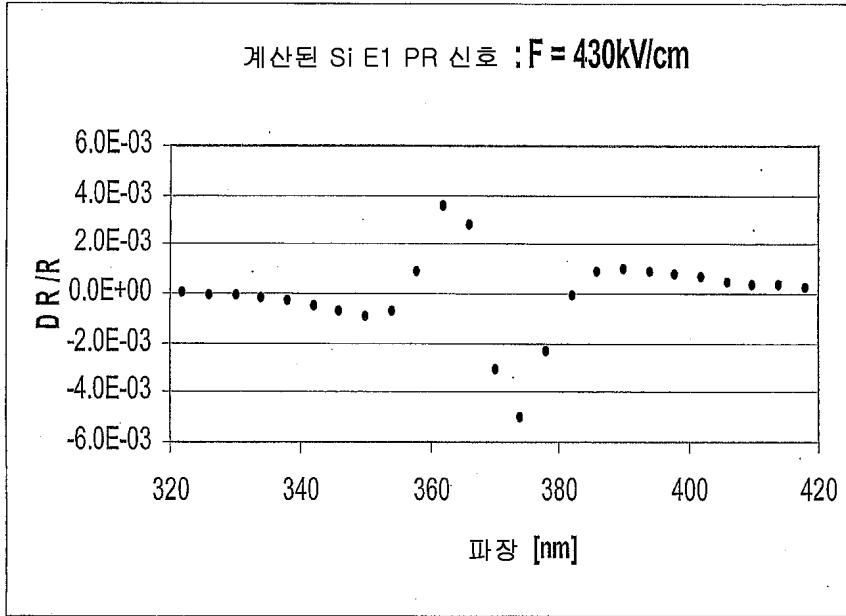
도면9



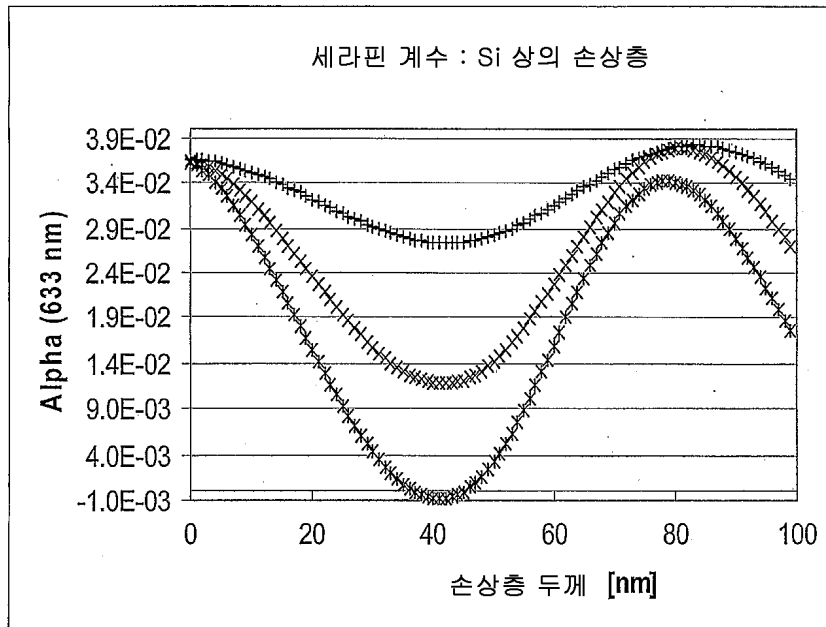
도면10



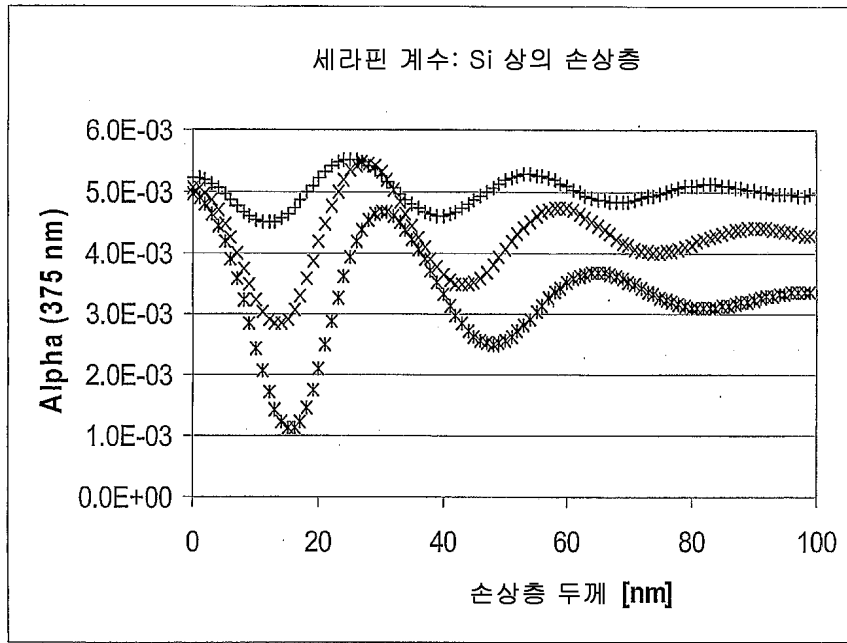
도면11



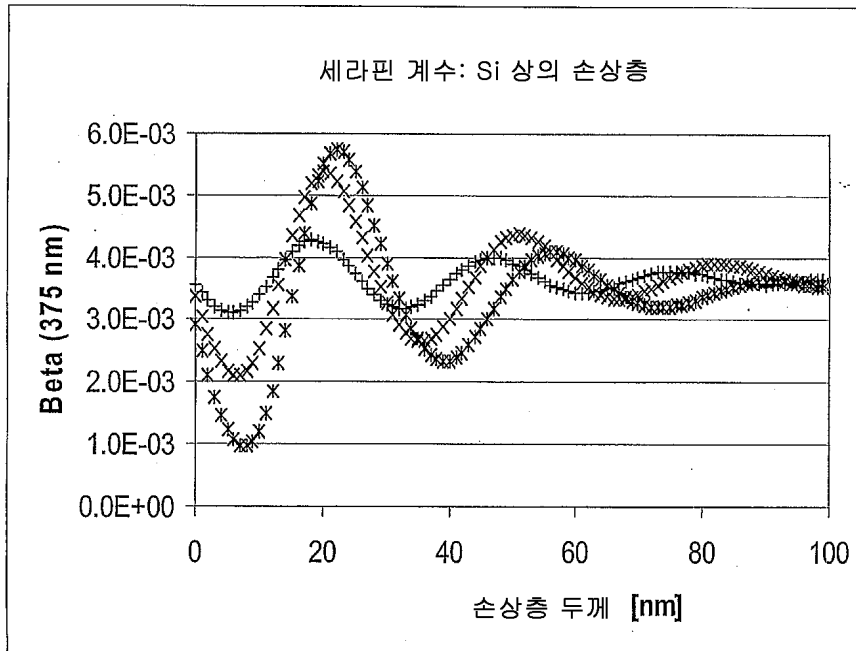
도면12



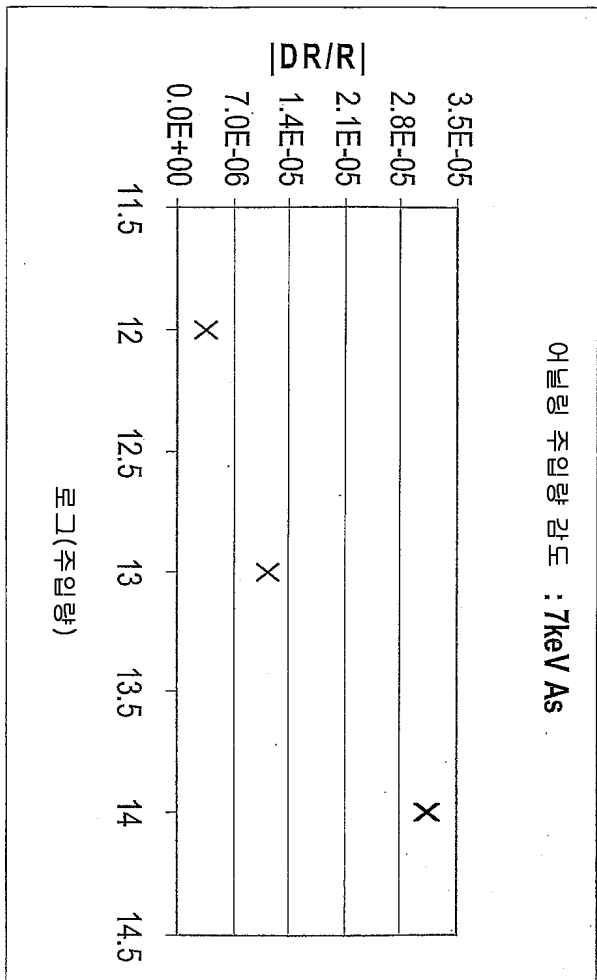
도면13



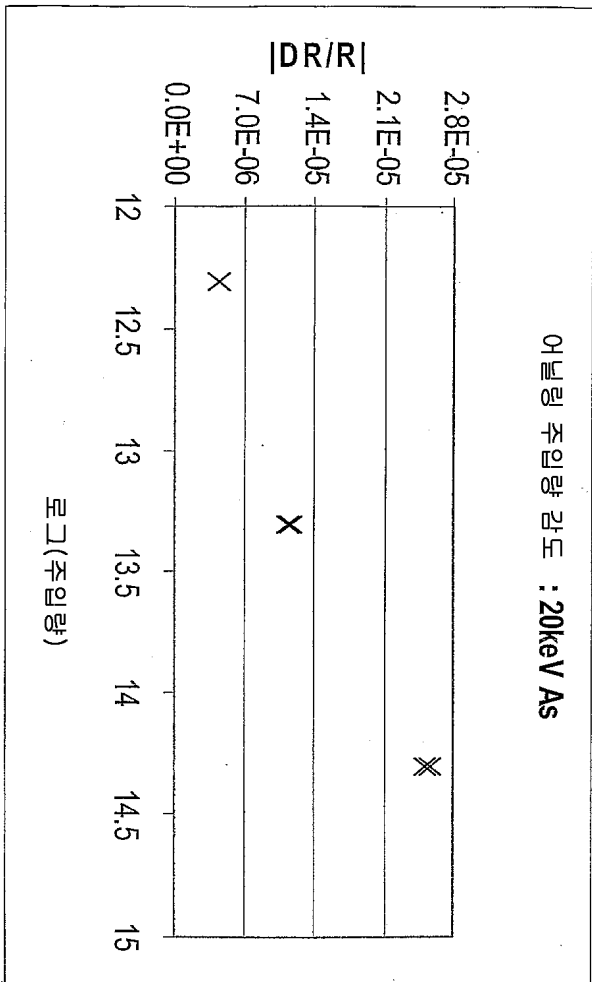
도면14



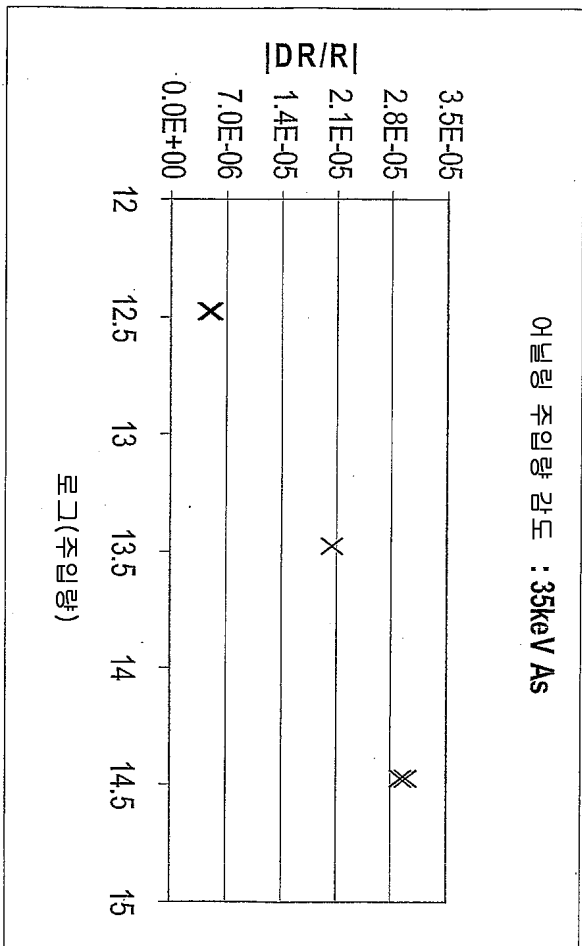
도면15



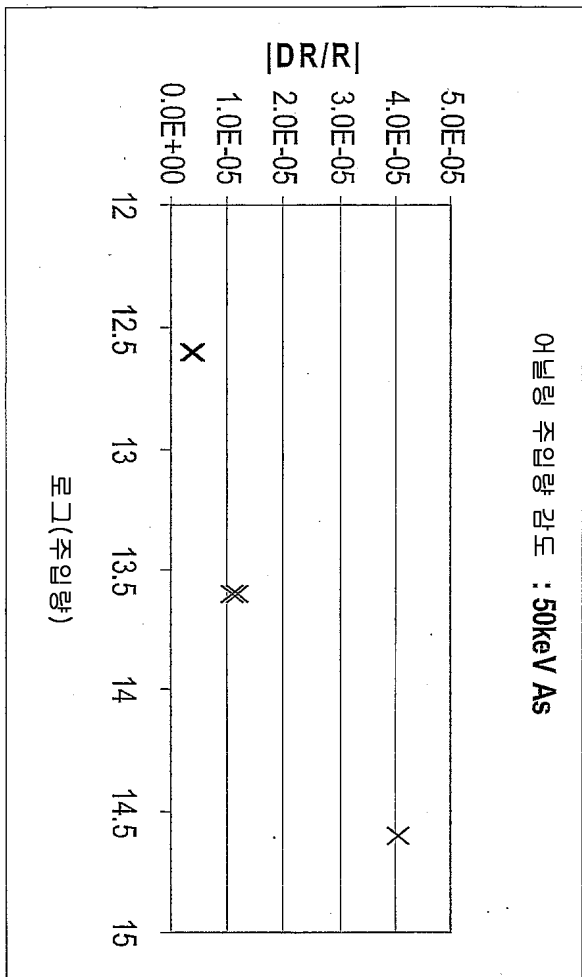
도면16



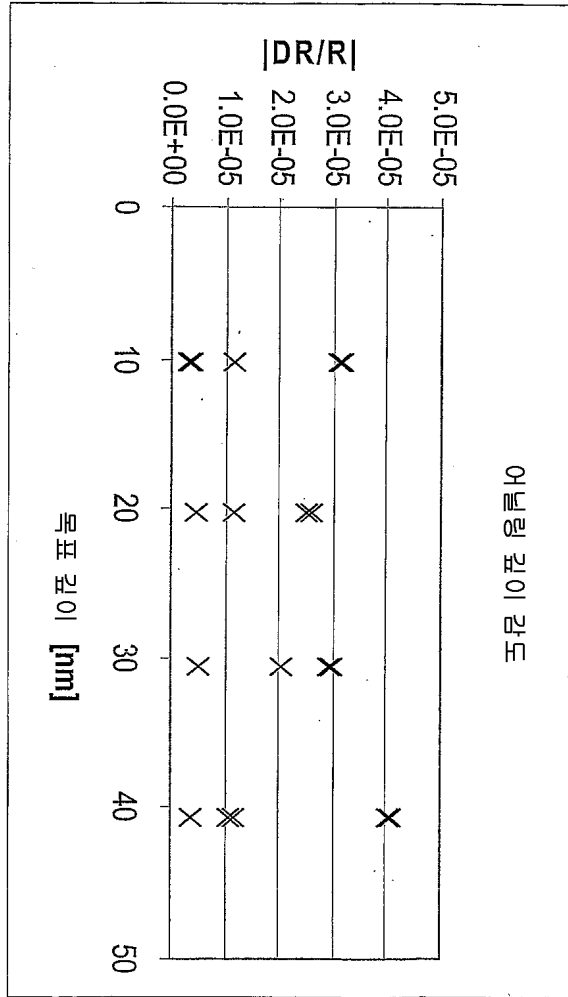
도면17



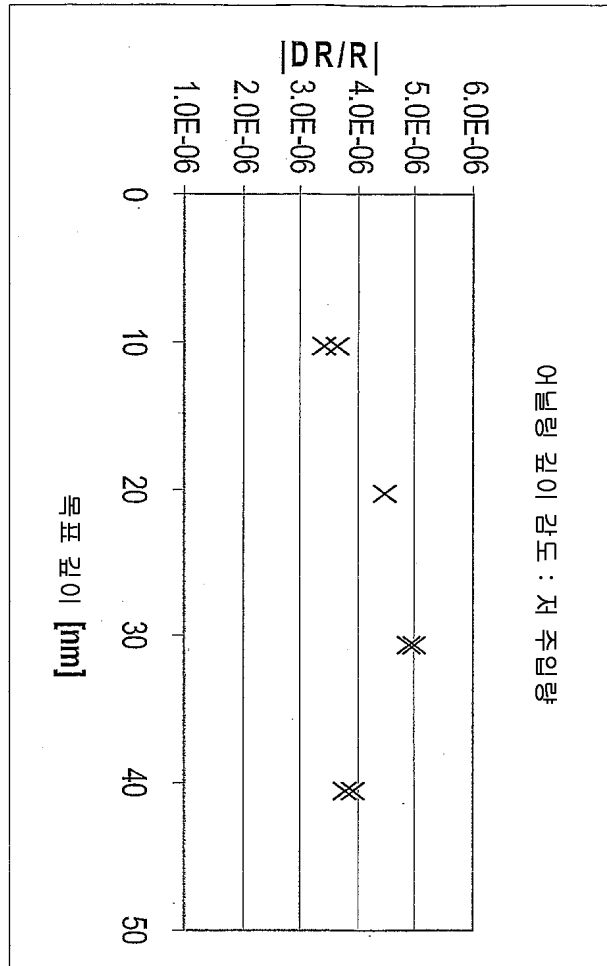
도면18



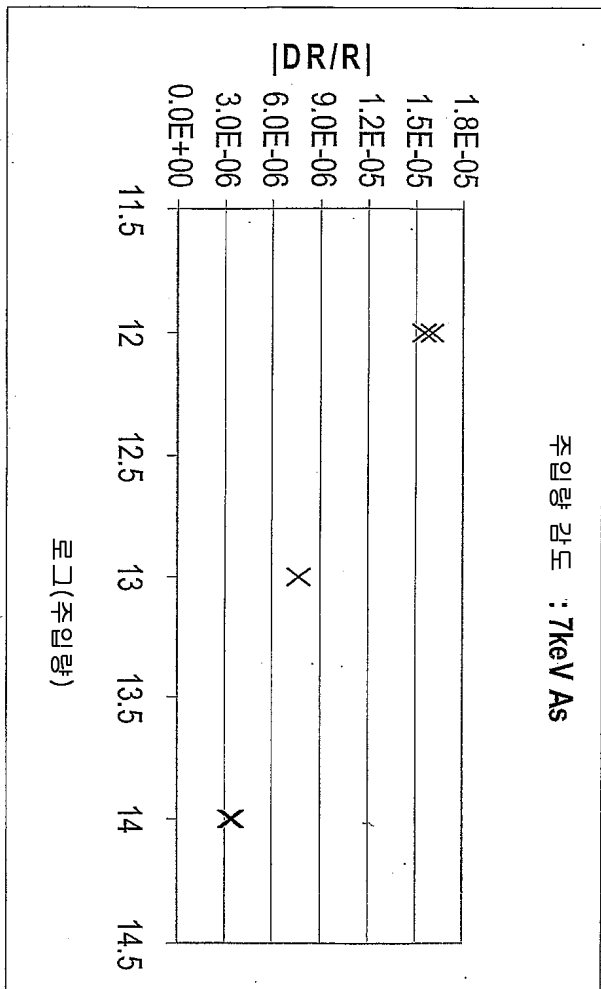
도면19



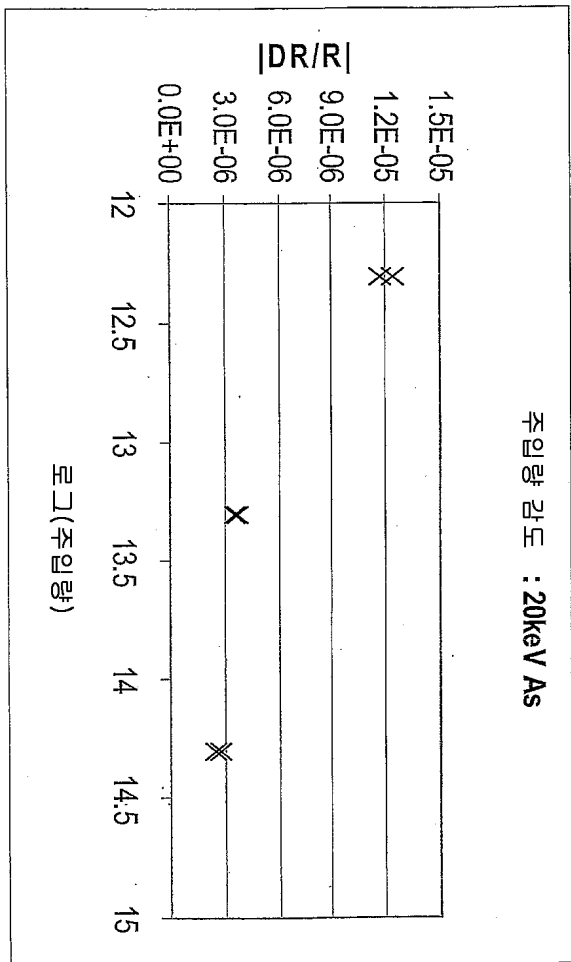
도면20



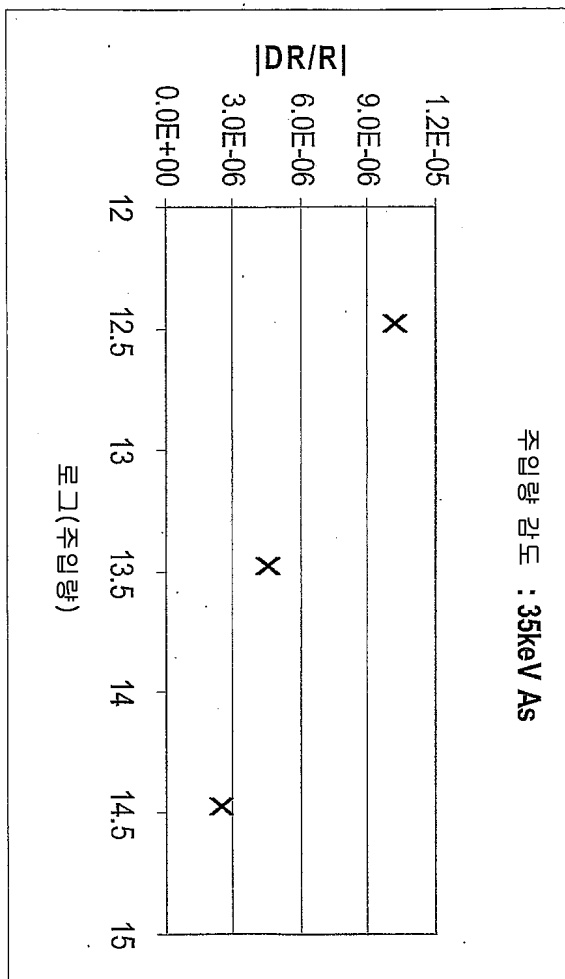
도면21



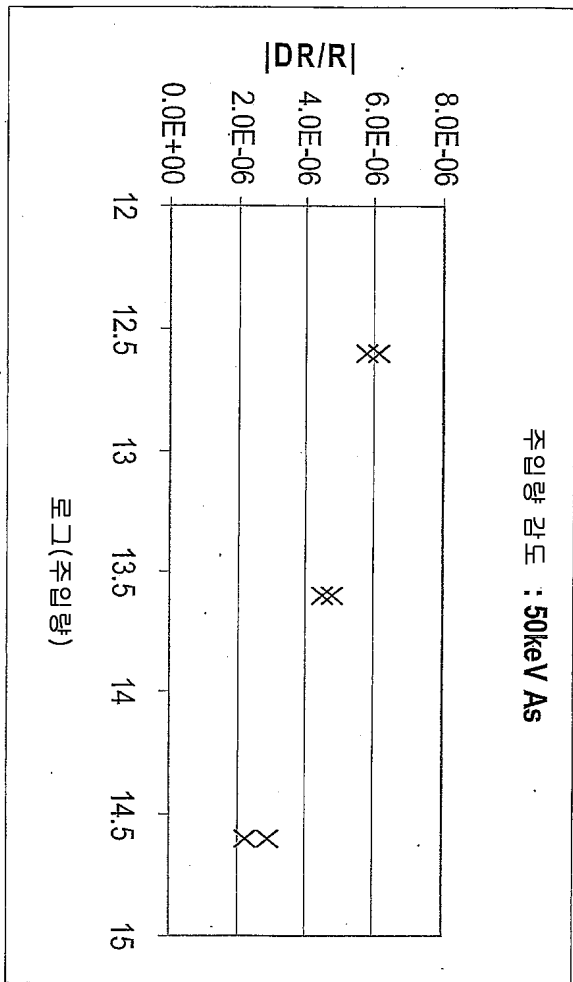
도면22



도면23



도면24



도면25

