



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2012년07월05일
(11) 등록번호 10-1163264
(24) 등록일자 2012년06월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/314 (2006.01) H01L 21/316 (2006.01)
H01L 21/31 (2006.01) H01L 21/28 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2007-7003092
(22) 출원일자(국제) 2005년08월11일
심사청구일자 2010년08월10일
(85) 번역문제출일자 2007년02월08일
(65) 공개번호 10-2008-0009675
(43) 공개일자 2008년01월29일
(86) 국제출원번호 PCT/US2005/028610
(87) 국제공개번호 WO 2006/023373
국제공개일자 2006년03월02일
(30) 우선권주장
10/920,990 2004년08월18일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
KR1020000011703 A*
US20040009642 A1*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
텍사스 인스트루먼트 인코포레이티드
미국 75251 텍사스주 달라스 메일 스테이션 3999
처칠 웨이 7839
도쿄엘렉트론가부시키가이샤
일본 도쿄도 미나토쿠 아카사카 5초메 3반 1고
(72) 발명자
니이미 히로아키
미국 텍사스주 75204 달라스 아파트먼트 샵621
시티 플레이스웨스트 블바드 2901
콜롬보 루이지
미국 텍사스주 75248 달라스 엘로우 록 트레일
6144
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
신정건, 김태홍

전체 청구항 수 : 총 51 항

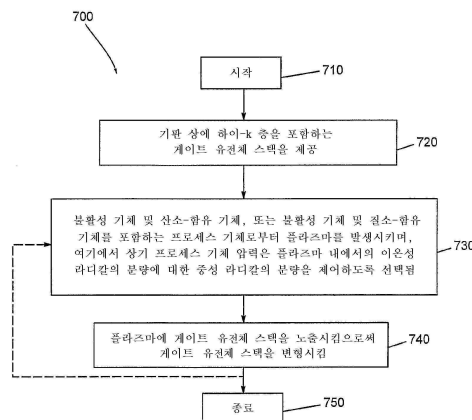
심사관 : 장지혜

(54) 발명의 명칭 플라즈마 프로세싱을 사용하여 하이-K 층을 포함하는 게이트 유전체 스택을 변형하는 방법

(57) 요약

본 발명은 플라즈마에 노출시킴으로써 게이트 유전체 스택 (1) 을 변형하는 방법 및 시스템에 관한 것이다. 상기 방법은, 하이-k 층 (30) 을 갖는 게이트 유전체 스택을 기판 (10, 125) 상에 형성하는 단계; 불활성 기체 및 산소-함유 기체 또는 질소-함유 기체 중 하나를 함유하는 프로세스 기체로부터 플라즈마를 발생시키는 단계로서, 상기 프로세스 기체압은 상기 플라즈마 내의 이온성 라디칼의 분량에 대한 중성 라디칼의 분량을 제어하도록 선택되어 있는, 상기 플라즈마 발생 단계; 및 상기 게이트 유전체 스택 (1) 을 상기 플라즈마에 노출시킴으로써 상기 게이트 유전체 스택 (1) 을 변형시키는 단계를 포함한다.

대표도 - 도7



(72) 발명자

시모무라 코지

일본 야마나시켄 나카코마군 시키시마초 나카시모
조 1423

수가와라 타쿠야

일본 야마나시켄 히가시야마나시 카즈누마 히시아
마 4999-1-207

마츠도 타츠오

일본 야마나시켄 야마나시 코바라니시 852-42

특허청구의 범위

청구항 1

게이트 유전체 스택을 변형시키는 방법으로서,

기판에 형성된 하이-k 금속 산화물층 또는 하이-k 금속 실리케이트층을 갖는 게이트 유전체 스택을 제공하는 단계로서, 상기 하이-k 금속 산화물층 또는 하이-k 금속 실리케이트층은 유효 유전 상수를 갖는 것인 게이트 유전체 스택 제공 단계;

제 1 불활성 기체 및 산소-함유 기체를 함유하는 제 1 프로세스 기체로부터, 중성 산소 라디칼의 분량과 이온성 산소 라디칼의 분량을 포함하는 제 1 플라즈마를 발생시키고, 상기 제 1 플라즈마 내의 이온성 산소 라디칼의 분량에 대한 중성 산소 라디칼의 분량을 증가시키는데 효과적인 상기 제 1 프로세스 기체의 압력을 선택하는 단계; 및

상기 게이트 유전체 스택을 상기 제 1 플라즈마에 노출시킴으로써 상기 게이트 유전체 스택을 변형시키는 단계

를 포함하는 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 상기 기판은, Si 기판, Ge-함유 Si 기판, Ge 기판, 또는 화합물 반도체 기판을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서, 상기 하이-k 층은 Ta_2O_5 , TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , Y_2O_3 , $HfSiO_x$, HfO_2 , $ZrSiO_x$, $TaSiO_x$, SrO_x , $SrSiO_x$, LaO_x , $LaSiO_x$, YO_x , 또는 $YSiO_x$ 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서, 상기 산소-함유 기체는 O_2 , O_3 , H_2O , 또는 H_2O_2 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 5

제 1 항에 있어서, 상기 제 1 불활성 기체는 He, Ar, Ne, Kr, 또는 Xe, 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 6

제 1 항에 있어서, 상기 제 1 프로세스 기체 압력은 0.5 Torr 내지 5 Torr 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 7

제 1 항에 있어서, 상기 제 1 프로세스 기체 압력은 1 Torr 내지 3 Torr 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 8

제 1 항에 있어서, 상기 산소-함유 기체에 대한 상기 제 1 불활성 기체의 비율은 20 내지 5 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 9

제 1 항에 있어서, 상기 제 1 프로세스 기체는 Ar 및 O_2 를 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서, Ar/O₂ 비율은 20 내지 5 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 11

제 1 항에 있어서, 상기 변형시키는 단계 동안 상기 기판을 150 °C 내지 450 °C 의 온도로 유지하는 단계를 더 포함하는 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 12

제 1 항에 있어서, 상기 변형시키는 단계는, 상기 게이트 유전체 스택을 상기 제 1 플라즈마에 5 초 내지 60 초의 기간 동안 노출시키는 단계를 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 13

제 1 항에 있어서, 상기 게이트 유전체 스택은, 상기 하이-k 층과 상기 기판과의 사이에 계면층을 더 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 14

제 13 항에 있어서, 상기 변형시키는 단계는, 상기 계면층을 최소화하는 것, 상기 하이-k 층 내의 결함을 감소시키는 것, 상기 하이-k 층에 산소를 포함시키는 것, 또는 상기 하이-k 층으로부터 탄소 불순물을 제거하는 것 중 하나 이상을 통해 상기 하이-k 층의 유효 유전 상수를 증가시키는데 충분한 시간 동안 수행되는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 15

제 13 항에 있어서, 상기 계면층은 산화물층, 질화물층, 또는 산질화물층을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 16

제 1 항에 있어서, 제 2 불활성 기체 및 질소-함유 기체를 함유하는 제 2 프로세스 기체로부터, 이온성 질소 라디칼의 분량과 중성 질소 라디칼의 분량을 포함하는 제 2 플라즈마를 발생시키고, 또한 상기 제 2 플라즈마 내의 중성 질소 라디칼의 분량에 대한 이온성 질소 라디칼의 분량을 증가시키는데 효과적인 상기 제 2 프로세스 기체의 압력을 선택하는 단계; 및

상기 변형된 게이트 유전체 스택을 상기 제 1 플라즈마 없이 상기 제 2 플라즈마에 노출시키는 단계를 더 포함하는 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 17

제 16 항에 있어서, 상기 질소-함유 기체는 N₂ 또는 NH₃, 또는 이들의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 18

제 16 항에 있어서, 상기 제 2 불활성 기체는 He, Ar, Ne, Kr, 또는 Xe, 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 19

제 16 항에 있어서, 상기 제 2 프로세스 기체 압력은 10 mTorr 내지 400 mTorr 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 20

게이트 유전체 스택을 변형시키는 방법으로서,

기판에 형성된 하이-k 층을 갖는 게이트 유전체 스택을 제공하는 단계;

제 1 불활성 기체 및 질소-함유 기체를 함유하는 제 1 프로세스 기체로부터, 이온성 질소 라디칼의 분량과 중성 질소 라디칼의 분량을 포함하는 제 1 플라즈마를 발생시키고, 상기 제 1 플라즈마 내의 중성 질소 라디칼의 분량에 대한 이온성 질소 라디칼의 분량을 증가시키는데 효과적인 상기 제 1 프로세스 기체의 압력을 선택하는 단계;

상기 게이트 유전체 스택을 상기 제 1 플라즈마에 노출시킴으로써 상기 게이트 유전체 스택을 변형시키는 단계;

제 2 불활성 기체 및 산소-함유 기체를 함유하는 제 2 프로세스 기체로부터, 중성 산소 라디칼의 분량과 이온성 산소 라디칼의 분량을 포함하는 제 2 플라즈마를 발생시키고, 상기 제 2 플라즈마 내의 이온성 산소 라디칼의 분량에 대한 중성 산소 라디칼의 분량을 증가시키는데 효과적인 상기 제 2 프로세스 기체의 압력을 선택하는 단계; 및

상기 변형된 게이트 유전체 스택을 상기 제 1 플라즈마 없이 상기 제 2 플라즈마에 노출시키는 단계

를 포함하는 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 21

제 20 항에 있어서, 상기 기판은, Si 기판, Ge-함유 Si 기판, Ge 기판, 또는 화합물 반도체 기판을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 22

제 20 항에 있어서, 상기 하이-k 층은 금속 산화물층 또는 금속 실리케이트층을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 23

제 20 항에 있어서, 상기 하이-k 층은 Ta_2O_5 , TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , Y_2O_3 , $HfSiO_x$, HfO_2 , $ZrSiO_x$, $TaSiO_x$, SrO_x , $SrSiO_x$, LaO_x , $LaSiO_x$, YO_x , 또는 $YSiO_x$ 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 24

제 20 항에 있어서, 상기 질소-함유 기체는 N_2 , 또는 NH_3 또는 이들의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 25

제 20 항에 있어서, 상기 제 1 불활성 기체는 He, Ar, Ne, Kr, 또는 Xe, 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 26

제 20 항에 있어서, 상기 제 1 프로세스 기체 압력은 10 mTorr 내지 400 mTorr 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 27

제 20 항에 있어서, 상기 제 1 프로세스 기체 압력은 50 mTorr 내지 300 mTorr 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 28

제 20 항에 있어서, 상기 질소-함유 기체에 대한 상기 제 1 불활성 기체의 비율은 20 내지 500 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 29

제 20 항에 있어서, 상기 제 1 프로세스 기체는 Ar 및 N_2 를 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 30

제 29 항에 있어서, Ar/ N_2 비율은 20 내지 500 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 31

제 20 항에 있어서, 상기 변형시키는 단계 동안에 상기 기판을 150 °C 내지 450 °C 의 온도로 유지하는 단계를 더 포함하는 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 32

제 20 항에 있어서, 상기 게이트 유전체 스택은, 상기 제 1 플라즈마에 60 초 내지 300 초의 기간 동안 노출되는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 33

제 20 항에 있어서, 상기 변형시키는 단계는 상기 하이-k 층의 질소 함량을 증가시키는데 충분한 시간 동안 수행되는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 34

제 20 항에 있어서, 상기 게이트 유전체 스택은, 상기 하이-k 층과 상기 기판과의 사이에 계면층을 더 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 35

제 34 항에 있어서, 상기 계면층은 산화물층, 질화물층, 또는 산질화물층을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 36

제 20 항에 있어서, 상기 산소-함유 기체는 O_2 , O_3 , H_2O 또는 H_2O_2 , 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 37

제 20 항에 있어서, 상기 제 2 불활성 기체는 He, Ar, Ne, Kr, 또는 Xe, 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 38

제 20 항에 있어서, 상기 제 2 프로세스 기체 압력은 0.5 Torr 내지 5 Torr 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 39

제 20 항에 있어서, 상기 제 2 프로세스 기체 압력은 1 Torr 내지 3 Torr 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 40

게이트 유전체 스택을 변형시키는 방법으로서,

기판 상에 형성된 하이-k 층을 갖는 게이트 유전체 스택을 제공하는 단계;

제 1 불활성 기체 및 산소-함유 기체를 함유하는 제 1 프로세스 기체로부터, 중성 산소 라디칼의 분량과 이온성 산소 라디칼의 분량을 포함하는 제 1 플라즈마를 발생시키고, 상기 제 1 플라즈마 내의 이온성 산소 라디칼의 분량에 대한 중성 산소 라디칼의 분량을 증가시키는데 효과적인 상기 제 1 프로세스 기체의 압력을 선택하는 단계;

상기 게이트 유전체 스택을 상기 제 1 플라즈마에 노출시킴으로써 상기 게이트 유전체 스택을 변형시키는 단계;

제 2 불활성 기체 및 질소-함유 기체를 함유하는 제 2 프로세스 기체로부터, 이온성 질소 라디칼의 분량과 중성 질소 라디칼의 분량을 포함하는 제 2 플라즈마를 발생시키고, 상기 제 2 플라즈마 내의 중성 질소 라디칼의 분량에 대한 이온성 질소 라디칼의 분량을 증가시키는데 효과적인 상기 제 2 프로세스 기체의 압력을 선택하는 단계; 및

상기 변형된 게이트 유전체 스택을 상기 제 1 플라즈마 없이 상기 제 2 플라즈마에 노출시키는 단계를 포함하는 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 41

제 40 항에 있어서, 상기 기판은, Si 기판, Ge-함유 Si 기판, Ge 기판, 또는 화합물 반도체 기판을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 42

제 40 항에 있어서, 상기 산소-함유 기체는 O_2 , O_3 , H_2O , 또는 H_2O_2 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 43

제 40 항에 있어서, 상기 제 1 불활성 기체와 상기 제 2 불활성 기체 각각은 He, Ar, Ne, Kr, 또는 Xe, 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 44

제 40 항에 있어서, 상기 제 1 프로세스 기체 압력은 0.5 Torr 내지 5 Torr 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 45

제 40 항에 있어서, 상기 산소-함유 기체에 대한 상기 제 1 불활성 기체의 비율은 20 내지 5 인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 46

제 40 항에 있어서, 상기 변형시키는 단계 동안 상기 기판을 150 °C 내지 450 °C 의 온도로 유지하는 단계를 더 포함하는 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 47

제 40 항에 있어서, 상기 변형시키는 단계는, 상기 게이트 유전체 스택을 상기 제 1 플라즈마에 5 초 내지 60 초의 기간 동안 노출시키는 단계를 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 48

제 40 항에 있어서, 상기 게이트 유전체 스택은 상기 하이-k 층과 상기 기판과의 사이에 계면층을 더 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 49

제 48 항에 있어서, 상기 계면층은 산화물층, 질화물층, 또는 산질화물층을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 50

제 40 항에 있어서, 상기 질소-함유 가스는 N_2 또는 NH_3 또는 이들의 조합물을 포함하는 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 51

제 40 항에 있어서, 상기 제 2 프로세스 기체 압력은 10 mTorr 내지 400 mTorr인 것인 게이트 유전체 스택의 변형 방법.

청구항 52

삭제

청구항 53

삭제

명세서

기술 분야

[0001] 본 발명은 반도체 프로세싱에 관한 것으로, 보다 구체적으로는, 하이-k(high-k) 층을 포함하는 게이트 유전체 스택을 변형시키는 플라즈마 프로세싱 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 반도체 산업에 있어서, 마이크로일렉트로닉 디바이스들의 최소 피쳐 사이즈 (feature size) 는 보다 빠르고, 또한 보다 낮은 전력의 반도체 디바이스에 대한 요구를 충족시키기 위해 딥 서브-마이크론 영역(deep sub-micron regime)에 적합되어 있다. 상보형 금속-산화물-반도체 (CMOS) 디바이스들의 다운스케일링은 게이트 유전 재료에 대한 스케일링을 구속한다. 종래의 SiO₂ 게이트 유전체 의 두께는 그것의 물리적인 한계에 근접하고 있다. 가장 진보된 디바이스들은 약 1 나노미터 (nm) 이하의 산화막 환산막 두께 (EOT) 에 근접하는 질화된 SiO₂ 게이트 유전체 를 사용하고 있으며 여기에서 누설 전류 밀도는 1 mA/cm² 일 수 있다. 디바이스 신뢰성을 향상시키고 디바이스의 동작시 게이트 유전체로부터 트랜지스터 채널로의 전기적인 누설을 저감시키기 위해, 낮은 산화막 환산막 두께 (EOT) 를 유지하면서 게이트 유전체 층의 물리적인 두께를 증가시킬 수 있는 높은 유전상수 (하이-k) 게이트 유전 재료를 사용하는 것에 반도체 트랜지스터 기술이 계획되고 있다. 산화막 환산막 두께는 대체의 유전 재료로부터 얻어진 것과 동일한 용량 전압 곡선을 생성할 것인 SiO₂ 의 두께로서 정의된다.

[0003] SiO₂ 의 유전상수 (k~3.9) 보다 큰 유전상수를 특징으로 하는 유전 재료는 공통적으로 하이-k 재료로 지칭된다. 하이-k 재료들은 SiO₂ 의 경우와 같이 기판의 표면 상에 성장되기 보다는 기판 상에 증착되어 있는 유전 재료들 (예를 들어, HfO₂, ZrO₂, HfSiO, ZrSiO, 등) 을 지칭할 수도 있다. 하이-k 재료는 금속 산화물층 또는 금속 실리케이트 층, 예를 들어, Ta₂O₅ (k~26), TiO₂ (k~80), ZrO₂ (k~25), Al₂O₃ (k~9), HfSiO (k~5-20), 및 HfO₂ (k~25) 를 포함할 수 있다.

[0004] 하이-k 재료의 게이트 스택으로의 일체화는 계면 상태 특성을 보존하고 양호한 전기적인 특성들을 갖는 계면을 형성하기 위해 Si 기판의 표면에 유전 계면층을 요구할 수 있다. 그러나, 산화물 계면층이 있으면 스택의 전체 유전상수를 낮추므로, 산화물 계면층은 얇아져야 한다. 계면 산화물 유전층의 품질은, 상기 산화물층이 트랜지스터의 채널에 밀착하여 접촉되기 때문에, 디바이스 성능에 영향을 줄 수 있다.

[0005] 증착 후 미처리된(as-deposited) 하이-k 게이트 유전층은 증착 프로세스 동안 하이-k 층에 포함되는 점결함, 베이컨시 (vacancy) 또는 불순물을 공통적으로 함유한다. 이들 결함은 유전층에서 높은 누설 전류의 원인일 수 있고 결국에는 유전층 및 마이크로일렉트로닉 디바이스의 조기 불량률 유발할 수 있다. 이들 점 결함을 감소시키기 위해 어닐링 절차가 개발되었지만, 최대한 향상을 위해 통상적으로 높은 온도가 요구되어, 계면 산화물층의 두께를 증대시킬 수 있다.

발명의 상세한 설명

[0006] 게이트 유전체 스택을 플라즈마에 노출시킴으로써 변형시키는 방법 및 시스템이 제공된다. 상기 방법은, 하이-k 층을 갖는 게이트 유전체 스택을 기판 상에 형성하는 단계; 불활성 기체 및 산소-함유 기체 또는 불활성

기체 및 질소-함유 기체를 함유하는 프로세스 기체로부터 플라즈마를 발생시키는 단계로서, 상기 프로세스 기체 압력은 상기 플라즈마 내의 이온성 라디칼의 분량에 대한 중성 라디칼의 분량을 제어하도록 선택되어 있는, 상기 플라즈마 발생 단계; 및 상기 게이트 유전체 스택을 상기 플라즈마에 노출시킴으로써 상기 게이트 유전체 스택을 변형시키는 단계를 포함한다.

[0007] 본 발명의 일 실시예에서, 상기 플라즈마는 불활성 기체 및 산소-함유 기체를 함유하는 프로세스 기체로부터 발생될 수 있고, 상기 프로세스 기체 압력은 플라즈마 내에서의 이온성 산소 라디칼의 분량에 대한 중성 산소 라디칼의 분량을 증가시키도록 선택된다. 플라즈마 프로세스는, 하이-k 층 내의 결함들을 감소시키는 것, 하이-k 층에 산소를 포함시키는 것, 또는 하이-k 층으로부터 탄소 불순물 또는 임의의 다른 불순물을 제거하는 것을 통해 하이-k 층의 유전 상수를 증가시킴으로써 게이트 유전체 스택을 변형시킨다.

[0008] 본 발명의 다른 실시예에서, 상기 플라즈마는 불활성 기체 및 질소-함유 기체를 함유하는 프로세스 기체로부터 발생될 수 있고, 상기 프로세스 기체 압력은 플라즈마 내에서의 중성 질소 라디칼의 분량에 대한 이온성 질소 라디칼의 분량을 증가시키도록 선택된다. 플라즈마 프로세스는 하이-k 층의 질소 함량을 증가시킴으로써 게이트 유전체 스택을 변형시킨다.

[0009] 플라즈마 프로세싱 시스템은, 불활성 기체와 산소-함유 기체, 또는 불활성 기체와 질소-함유 기체를 함유하는 프로세스 기체로부터 플라즈마를 발생시키는 플라즈마 소스로서, 상기 프로세스 기체 압력은 플라즈마 내에서의 이온성 라디칼의 분량에 대한 중성 라디칼의 분량을 제어하도록 선택된 것인 상기 플라즈마 소스; 기관 상에 하이-k 층을 갖는 게이트 유전체 스택을 포함하는 기관을 지지하도록 구성되고, 또한 게이트 유전체 스택을 플라즈마에 노출시킴으로써 게이트 유전체 스택을 변형시키도록 구성된 기관 스테이지; 기관을 기관 스테이지로부터 및 기관 스테이지로 전송하도록 구성된 기관 전송 시스템; 및 플라즈마 프로세싱 시스템을 제어하도록 구성된 컨트롤러를 구비한다.

실시예

[0020] 도 1a 는 본 발명의 일 실시예에 따른 하이-k 층을 포함하는 게이트 유전체 스택을 도시한다. 게이트 유전체 스택 (1) 은 기관 (10) 및 상기 기관 (10) 상의 하이-k 층 (30) 을 포함한다. 기관 (10) 은, 예를 들어, Si 기관, Ge-함유 Si 기관, Ge 기관, 또는 화합물 반도체 기관과 같은 반도체 기관일 수 있고, 다수의 능동 소자들 및/또는 격리 영역 (도시되지 않음) 을 포함할 수 있다. 기관 (10) 은 형성될 디바이스의 타입에 의존하여 n-형 또는 p-형일 수 있다. 하이-k 층 (30) 은 예를 들어, 금속-산화물 층 또는 금속 실리케이트 층, 예를 들어, Ta₂O₅, TiO₂, ZrO₂, Al₂O₃, Y₂O₃, HfSiO_x, HfO₂, ZrSiO_x, TaSiO_x, SrO_x, SrSiO_x, LaO_x, 또는 LaSiO_x, 또는 이들의 2 이상의 조합일 수 있다. 하이-k 층 (30) 은 예를 들어, 약 3 nm 두께일 수 있다.

[0021] 도 1b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 하이-k 층 및 계면층을 포함하는 게이트 유전체 스택을 도시한다. 게이트 유전체 스택 (1) 은 기관 (10) 및 유전층 (40) 을 포함하고, 상기 유전층은 기관 (10) 상의 계면층 (20) 및 상기 계면층 (20) 상의 하이-k 층 (30) 을 포함한다. 계면층 (20) 은 예를 들어, 산화물층 (예를 들어, SiO_x), 질화물층 (예를 들어, SiN_x), 또는 산질화물층 (예를 들어, SiO_xN_y) 을 포함할 수 있다.

[0022] 본 발명의 일 실시예에서, 발명자들은 게이트 유전체 스택 (1) 을 높은 프로세스 기체 압력 상태의 산소-함유 플라즈마 (고압 플라즈마) 에 노출시킴으로써 도 1a 및 도 1b 에서의 게이트 유전체 스택 (1) 을 변형시키는 플라즈마 프로세스를 식별하였다. 고압 플라즈마는, 저압 플라즈마에 비해, 이온성 산소 라디칼의 분량에 대해 증가된 분량의 중성 산소 라디칼 (여기된 산소종) 을 포함한다. 고압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 게이트 유전체 스택 (1) 을 변형시키는 단계는, 하이-k 층 (30) 의 유전상수를 증가시키는 것, 하이-k 층 내의 탄소 불순물의 분량을 감소시키는 것, 높은 누설 전류 또는 다른 전기적인 열화 양태를 야기하는 하이-k 층 내의 결함을 감소시키는 것, 또는 하이-k 층 (30) 의 산소-함량을 증가시키는 것을 포함할 수 있다. 또한, 고압 플라즈마 프로세스는 고온 열산화 프로세스 및 저압 플라즈마 프로세스에 비해 계면층 (20) 의 성장 (두께) 을 최소화하고, 또한 중성 산소 라디칼에 대해 보다 높은 농도의 이온성 산소 라디칼을 갖는다.

[0023] 산소계 플라즈마는 기본적으로 2 가지 종류의 산소 라디칼: 이온성 산소 라디칼 (예를 들어, O₂⁺) 및 중성 (중성) 산소 라디칼 (예를 들어, O^{*}) 을 포함할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에 따르면, 플라즈마 내의 이온성 산소 라디칼의 분량에 대한, 플라즈마 내의 중성 산소 라디칼의 분량은 높은 프로세스 기체 압력, 예를 들어, 약 0.5 Torr 내지 약 5 Torr 의 압력을 사용하여 증가될 수 있다. 본 발명의 다른 실시예에서, 기체 압력은 약 1 Torr 내지 약 3 Torr 일 수 있고, 2 Torr일 수 있다. 프로세스 기체는 O₂, O₃, H₂O, 또는 H₂O₂, 또

는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 산소-함유 기체, 및 He, Ne, Ar, Kr 또는 Xe, 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 불활성 기체를 포함할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서, 프로세스 기체는 Ar 및 O₂ 를 포함할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서, 산소-함유 기체에 대한 불활성 기체의 비율은 약 20 내지 약 5 일 수 있다. 다른 실시예에서, 불활성 기체는 Ar 일 수도 있고, 산소 함유 기체는 O₂ 일 수도 있고, Ar/O₂ 비는 약 20 내지 약 5 사이이다. 비교를 위해, 약 10 mTorr 내지 200 mTorr 의 프로세스 기체 입력을 사용하는 저압 플라즈마 프로세싱은 중성 산소 라디칼에 대해 보다 높은 분량의 이온성 산소 라디칼을 포함한다.

[0024] 본 발명의 다른 실시예에서, 발명자들은 게이트 유전체 스택 (1) 을 낮은 프로세스 기체 압력 (P ~ 200 mTorr) 상태의 질소-함유 플라즈마에 노출시킴으로써 도 1a 및 도 1b 에서의 게이트 유전체 스택 (1) 을 변형시키는 플라즈마 프로세스를 식별하였다. 상기 플라즈마는 높은 프로세스 기체 압력 플라즈마 (P ~ 800 mTorr) 에 비해, 중성 질소 라디칼 (예를 들어, N₂^{*}) 에 대해 증가된 분량의 이온성 질소 라디칼 (예를 들어, N₂⁺) 을 포함한다.

[0025] 저압 질소-함유 플라즈마를 사용하여 게이트 유전체 스택 (1) 을 변형시키면 하이-k 층 (30) 의 질소-함량은 증가되고 계면층 (20) 의 성장이 최소화되고, 그럼으로써 보다 좋은 유전 두께 스케일링을 허용한다. 또한, 하이-k 층 (30) 의 질소 함량은 플라즈마 노출 시간의 증가에 따라 증가한다. 저압 질소-함유 플라즈마는, N₂O 또는 NO 기체를 사용하고 계면을 질화시키지만 하이-k 층 (30) 의 질화는 제한적인 고온 열 질화 (질소-포함) 프로세스들에 비해 계면층 (20) 의 성장을 최소화한다. NH₃ 를 사용하는 열 질화 프로세스들도 또한 계면을 질화시키지만 하이-k 층 (30) 의 질화는 제한적이고, 또한 하이-k 층 (30) 의 수소 (H) 함량을 감소시키기 위해 부가적인 어닐링 단계들을 필요로 할 수 있다. 또한, 고압 질소 플라즈마를 사용하는 플라즈마 질화 프로세스들은 계면 질화를 증가시키고, 하이-k 층 (30) 은 덜 질화시킨다.

[0026] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 플라즈마 내의 중성 질소 라디칼의 분량에 대한, 플라즈마 내의 이온성 질소 라디칼의 분량은 저압 플라즈마를 사용하여 증가될 수 있다. 상기 프로세스 기체 압력은 예를 들어, 약 10 mTorr 내지 약 400 mTorr 일 수 있다. 대안으로, 상기 기체 압력은 약 50 mTorr 내지 약 300 mTorr 일 수 있고, 또한 200 mTorr 일 수 있다. 상기 프로세스 기체는 N₂ 또는 NH₃ , 또는 이들의 조합물을 포함하는 질소-함유 기체, 및 He, Ne, Ar, Kr, 또는 Xe, 또는 이들의 2 이상의 조합물을 포함하는 불활성 기체를 포함할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서, 프로세스 기체는 Ar 및 N₂ 를 포함할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서, 질소-함유 기체에 대한 불활성 기체의 비율은 약 20 내지 약 500 일 수 있다.

[0027] 본 발명의 다른 실시예에서, 도 1a 및 도 1b 의 게이트 유전체 스택 (1) 은 고압 산소-함유 플라즈마 (즉, 약 0.5 Torr 내지 약 5 Torr 의 압력) 에 노출됨으로써 변형될 수 있고, 후속으로, 얻어지는 변형된 게이트 유전체 스택이 저압 질소-함유 플라즈마 (즉, 약 10 mTorr 내지 400 mTorr 의 압력) 에 노출될 수 있다.

[0028] 본 발명의 또 다른 실시예에서, 도 1a 및 도 1b 의 게이트 유전체 스택 (1) 은 저압 질소-함유 플라즈마에 노출됨으로써 변형될 수 있고, 후속으로, 얻어지는 변형된 게이트 유전체 스택이 고압 산소-함유 플라즈마에 노출될 수 있다.

[0029] 도 2a 내지 도 2f 는 본 발명의 실시예들에 따른 게이트 유전체 스택을 변형시키는 플라즈마 프로세싱 시스템들의 개략적인 다이어그램이다. 구체적인 하드웨어의 많은 변동들이 본 발명이 실용화될 수 있는 프로세싱 시스템들을 실행시키는데 사용될 수 있으므로, 도 2a 내지 도 2f 에 도시된 플라즈마 프로세싱 시스템들은 예시적인 목적으로만 도시되어 있고, 또한 이들 변동은 당업계의 당업자에게 용이하게 명백할 것이다. 유사한 참조 번호는 유사한 부분들을 가리킨다.

[0030] 도 2a 에서, 플라즈마 프로세싱 시스템 (100) 은 기판 스테이지 (120) 를 탑재하기 위한 기둥(pedestal) (112) 을 갖는 프로세스 챔버 (110) 를 포함하고, 상기 기판 스테이지는 기판 (125) 을 지지하고 상기 기판 (125) 을 플라즈마 프로세싱 영역 (160) 에 노출시킨다. 기판 스테이지 (120) 는 기판 (125) 을 가열 또는 냉각시키도록 추가로 구성될 수 있다. 플라즈마 프로세싱 시스템 (100) 은 프로세스 기체를 원격 플라즈마 소스 (205) 에 도입하기 위한 기체 주입 시스템 (140) 을 더 포함하고, 여기에서 상기 프로세스 기체는 불활성 기체 및 산소-함유 기체, 또는 불활성 기체 및 질소-함유 기체를 포함한다. 기체 주입 시스템 (140) 은 외부 (ex-situ) 기체 소스 (도시되지 않음) 로부터 원격 플라즈마 소스 (205) 까지의 프로세스 기체의 전달에 대해 독립적인 제어를 허용한다.

- [0031] 여기된 프로세스 기체 (215) 는 원격 플라즈마 소스 (205) 로부터 플라즈마 프로세싱 영역 (160) 으로 도입된다. 여기된 프로세스 기체 (215) 는 기체 주입 플레넘 (도시되지 않음), 일련의 배플 플레이트 (도시되지 않음) 및 멀티-오리피스 샤워헤드 기체 주입 플레이트 (165) 를 통해 플라즈마 프로세싱 영역 (160) 으로 도입될 수 있다. 광학 모니터링 시스템 (220) 을 사용하여 플라즈마 프로세싱 영역 (160) 으로부터 발광을 모니터링할 수 있다. 프로세스 챔버 (110) 는 진공 펌프 시스템 (150) 에 접속되어 있고, 상기 진공 펌프 시스템은 약 5,000 리터/초 (및 이상) 까지 펌핑할 수 있는 터보-분자 진공 펌프 (TMP), 및 기체 압력을 제어하기 위한 게이트 밸브를 포함할 수 있다.
- [0032] 기관 (125) 은 로봇 기관 전송 시스템 (210) 을 거쳐 슬롯 밸브 (도시되지 않음) 및 챔버 피드-스루우 (feed-through) (도시되지 않음) 를 통해 프로세스 챔버 (110) 내로 전송되고 프로세스 챔버 (110) 로부터 전송되며, 상기 기관은 기관 스테이지 (120) 내에 수용된 기관 리프트 핀 (도시되지 않음) 에 의해 접수되고 기관 스테이지에 수용된 디바이스들에 의해 기계적으로 전송된다. 일단 기관 (125) 이 기관 전송 시스템 (210) 으로부터 접수되면, 기관은 기관 스테이지 (120) 의 상부 표면까지 낮아진다.
- [0033] 기관 (125) 은 정전 클램프 (도시되지 않음) 를 통해 기관 스테이지 (120) 에 부착될 수 있다. 또한, 기관 스테이지 (120) 는 히터 소자 (130) 를 포함하고 기관 스테이지 (120) 는 추가로 기관 스테이지 (120) 로부터의 열을 받아들이고 열을 열 교환 시스템 (도시되지 않음) 으로 전달하는 재-순환 냉각제 플로우를 포함하는 냉각 시스템을 포함할 수 있다. 또한, 기관 (125) 과 기관 스테이지 (120) 사이의 기체-겍 열 전도를 향상시키기 위해 기관의 배면으로 기체가 전달될 수 있다. 높여진 온도 또는 낮추어진 온도에서 기관의 온도 제어가 요구될 때 상기 시스템이 사용될 수 있다.
- [0034] 컨트롤러 (155) 는 마이크로프로세서, 메모리, 및 통신하는데 충분한 제어 전압을 발생시킬 수 있는 디지털 I/O 포트를 포함하고, 프로세싱 시스템 (100) 으로부터의 출력을 모니터링할 뿐만 아니라 프로세싱 시스템 (100) 에 대한 입력들을 활성화한다. 또한, 컨트롤러 (155) 는 프로세스 챔버 (110), 기체 주입 시스템 (140), 원격 플라즈마 소스 (205), 광학 모니터링 시스템 (220), 가열 소자 (130), 기관 전송 시스템 (210), 및 진공 펌프 시스템 (150) 에 결합되어 있고 이들과 정보를 교환한다. 예를 들어, 메모리에 저장된 프로그램은, 저장된 프로세스 레시피에 따라 프로세싱 시스템 (100) 의 상술된 컴포넌트들을 제어하는데 사용될 수 있다. 컨트롤러 (155) 의 일 예는 미국 텍사스주, 오스틴에 위치한 델 코퍼레이션 (Dell Corporation) 으로부터 입수할 수 있는, DELL PRECISION WORKSTATION 610TM 이다.
- [0035] 도 2b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택을 변형시키는 플라즈마 프로세싱 시스템을 도시한다. 플라즈마 프로세싱 시스템 (101) 은 마이크로웨이브 전송 윈도우 (240) 상에 탑재되어 있는 슬롯 안테나 (230) 를 포함한다. 상기 윈도우 (240) 는 외부 마이크로웨이브 플라즈마 소스 (250) 로부터 플라즈마 프로세싱 영역 (160) 내부로의 마이크로웨이브 방사의 효율적인 전송을 위해 Al_2O_3 를 포함할 수 있다. 마이크로웨이브 전력은, 예를 들어, 약 500 와트 (W) 내지 약 5000 와트 (W) 일 수 있다. 마이크로웨이브 주파수는 예를 들어, 2.45 GHz 또는 8.3 GHz 일 수 있다. 기체 주입 시스템 (140) 은 윈도우 (240) 와 기관 (125) 과의 사이에 위치한 기체 전달 링 (260) 을 사용하여 프로세스 챔버 (110) 의 내부로 프로세스 기체를 전달하도록 구성되어 있다. 기체 전달 링 (260) 은 마이크로파 전력 공급 플라즈마에 의한 여기를 위해 프로세스 기체 (115) 를 플라즈마 프로세싱 시스템 (160) 내부로 도입하기 위한 복수의 기체 주입 구멍 (270) 을 포함한다. 도 2b 에서, 컨트롤러는 프로세스 챔버 (110), 기체 주입 시스템 (140), 가열 소자 (130), 진공 펌프 시스템 (150), 기관 전송 시스템 (210), 광학 모니터링 시스템 (220), 및 외부 마이크로웨이브 플라즈마 소스 (250) 에 결합되어 있고 이들과 정보를 교환한다.
- [0036] 도 2c 는 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택을 변형시키기 위한 플라즈마 프로세싱 시스템을 도시한다. 도 2c 의 프로세싱 시스템 (102) 은 프로세스 챔버 (110) 내에 플라즈마를 형성하고 유지할 수 있다. 도 2c 에 도시된 실시예에서, 기관 스테이지 (120) 는 추가로 전극으로서 기능할 수 있고, 상기 전극을 통해 RF 전력이 플라즈마 프로세싱 영역 (160) 내의 플라즈마에 결합되어 있다. 예를 들어, 기관 스테이지 (120) 내의 금속 전극 (도시되지 않음) 은 임피던스 매치 네트워크 (135) 를 통해 RF 발생기 (145) 로부터 기관 스테이지 (120) 까지 RF 전력의 전송을 통해 RF 전압으로 전기적으로 바이어스될 수 있다. RF 바이어스는 전자들을 가열하고, 그럼으로써 플라즈마를 형성하고 유지한다. RF 바이어스를 위한 통상적인 주파수는 약 0.1 MHz 내지 100 MHz 의 범위일 수 있고 약 13.6 MHz 일 수 있다.
- [0037] 대안 실시예에서, RF 전력은 다수의 주파수로 기관 스테이지 (120) 에 인가될 수 있다. 또한, 임피던스 매치 네트워크 (135) 는 반사 전력을 최소화함으로써 RF 전력의 프로세싱 챔버 (110) 내의 플라즈마로의 전송을 최

대화하는 기능을 한다. 매치 네트워크 토폴로지 (예를 들어, L-형, π -형, T-형) 및 자동 제어 방법은 당분야에 주지되어 있다. 기체 주입 시스템 (140) 은, RF-전력 공급 플라즈마에 의한 여기를 위해 멀티-오리피스 샤워헤드 기체 주입 플레이트 (165) 를 통해 프로세스 기체 (115) 를 플라즈마 프로세싱 영역으로 전달하도록 구성되어 있다. 도 2c 에서, 컨트롤러 (155) 는 프로세스 챔버 (110), RF 발생기 (145), 임피던스 매치 네트워크 (135), 기체 주입 시스템 (140), 광학 모니터링 시스템 (220), 가열 소자 (130), 기관 전송 시스템 (210), 및 진공 펌프 시스템 (150) 에 결합되어 있고 이들과 정보를 교환한다.

[0038] 도 2d 는 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택을 변형시키는 플라즈마 프로세싱 시스템을 도시한다. 도 2d 의 프로세싱 시스템 (103) 은, 도 2c 를 참조하여 설명한 컴포넌트들에 부가하여, 플라즈마 밀도를 잠재적으로 증가시키고 및/또는 플라즈마 프로세싱 균일도를 향상시키기 위해 기계적으로 또는 전기적으로 회전하는 DC 자계 시스템 (170) 을 추가로 구비한다. 또한, 컨트롤러 (155) 는 회전 속도 및 자계 강도를 조정하기 위해 회전하는 자계 시스템 (170) 에 결합되어 있다.

[0039] 도 2e 는 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택을 변형시키는 플라즈마 프로세싱 시스템을 도시한다. 도 2e 의 프로세싱 시스템 (104) 은, 도 2c 를 참조하여 설명한 컴포넌트들에 부가하여, 멀티-오리피스 샤워헤드 기체 주입 플레이트 (165) 를 포함하고, 상기 멀티-오리피스 샤워헤드 기체 주입 플레이트는 또한 RF 전력이 RF 발생기 (180) 로부터 임피던스 매치 네트워크 (175) 를 통해 결합되어 있는 상부 플레이트 전극으로서 기능할 수 있다. 상부 전극에 대한 RF 전력의 인가 주파수는 약 10 MHz 내지 약 200 MHz 의 범위일 수 있고 약 60 MHz 일 수 있다. 부가적으로, 하부 전극 (기관 스테이지 (120)) 에의 전력 인가를 위한 주파수는 약 0.1 MHz 내지 약 30 MHz 의 범위일 수 있고 약 2 MHz 일 수 있다. 또한, 컨트롤러 (155) 가 RF 발생기 (180) 및 임피던스 매치 네트워크 (175) 에 결합되어 상부 전극 (165) 에의 RF 전력의 인가를 제어할 수 있다.

[0040] 본 발명의 일 실시예에서, 도 2e 에서의 기관 스테이지 (120) 는 전기적으로 접지될 수 있다. 대안 실시예에서, DC 바이어스가 기관 스테이지 (120) 에 인가될 수 있다. 또 다른 실시예에서, 기관 스테이지 (120) 는 프로세싱 시스템 (104) 으로부터 전기적으로 격리될 수 있다. 이러한 셋업 (setup) 에서, 플라즈마가 온(ON)일 때, 기관 스테이지 (120) 및 기관 (125) 상에 플로팅 전위가 형성될 수 있다.

[0041] 도 2f 는 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택을 변형시키는 플라즈마 프로세싱 시스템을 도시한다. 도 2c 를 참조하여 설명한 컴포넌트들에 부가하여, 도 2f 의 프로세싱 시스템 (105) 은, RF 전력이 임피던스 매치 네트워크를 통해 RF 발생기 (185) 를 거쳐 결합되어 있는 유도 코일 (195) 을 추가로 포함한다. RF 전력은 유도 코일 (195) 로부터 유전 윈도우 (도시되지 않음) 를 통해 플라즈마 프로세싱 영역 (160) 에 유도적으로 결합되어 있다. 유도 코일 (195) 에 대한 RF 전력의 인가를 위한 주파수는 약 0.1 MHz 내지 약 100 MHz 의 범위일 수 있고 약 13.6 MHz 일 수 있다. 유사하게, 기관 스테이지 (120) 에의 전력의 인가를 위한 주파수는 약 0.1 MHz 내지 약 100 MHz 의 범위일 수 있고 약 13.6 MHz 일 수 있다. 게다가, 슬롯 파라데이 실드 (도시되지 않음) 를 사용하여 유도 코일 (195) 과 플라즈마 사이의 용량 결합을 감소시킬 수 있다. 또한, 컨트롤러 (155) 가 RF 발생기 (185) 및 임피던스 매치 네트워크 (190) 에 결합되어 유도 코일 (195) 에 대한 전력의 인가를 제어할 수 있다.

[0042] 본 발명의 일 실시예에서, 도 2f 에서의 기관 스테이지 (120) 는 전기적으로 접지될 수 있다. 대안 실시예에서는, DC 바이어스가 기관 스테이지 (120) 에 인가될 수 있다. 또 다른 실시예에서, 기관 스테이지 (120) 는 프로세싱 시스템 (105) 으로부터 전기적으로 격리될 수 있다. 이러한 셋업에서는, 플라즈마가 온일 때 기관 스테이지 (120) 및 기관 (125) 상에 플로팅 전위가 형성될 수 있다.

[0043] 다른 실시예에서, 플라즈마는 ECR (electron cyclotron resonance) 을 사용하여 형성될 수 있다. 또 다른 실시예에서, 플라즈마는 헬리콘 파동의 런칭 (launching) 으로부터 형성될 수 있다. 다른 실시예에서, 플라즈마는 전파하는 표면 파동으로부터 형성될 수 있다.

[0044] 도 3a 및 도 3b 는 본 발명의 실시예에 따른 산소-함유 플라즈마에 대한 파장의 함수로서 발광 (OE) 강도를 도시한다. 도 2b 에 개략적으로 도시된 플라즈마 프로세싱 시스템 (101) 을 사용하여 O_2 및 Ar 을 함유하는 프로세스 기체로부터 플라즈마를 발생시켰다. 도 3a 는 플라즈마 내의 중성 O^* 라디칼로부터의 광 방출에 할당되어 있는 약 844.6 nm 의 파장에서 최대 강도를 갖는 OE 피쳐 (feature)(300) 를 도시한다. 곡선 (310) 은 2 Torr 의 프로세스 기체 압력에 대해 측정된 O^* 강도를 도시하고, 곡선 (320) 은 50 mTorr 의 프로세스 기체 압력에 대해 측정된 O^* 강도를 도시한다. 플라즈마 파라미터들은 2000 sccm 의 Ar 기체 유량, 200 sccm

의 O_2 기체 유량, 및 2000 W 의 플라즈마 전력을 추가로 포함했다. 도 3a 는 프로세스 기체 입력의 증가가 플라즈마 내의 중성 O^* 라디칼의 분량을 증가시킨다는 것을 도시한다.

[0045] 도 3b 는 플라즈마 내의 이온성 O_2^+ 라디칼로부터의 광 방출에 할당되어 있는 약 282 nm 내지 약 283 nm 의 파장에서 최대 강도를 갖는 OE 피쳐 (330) 를 도시한다. 곡선 (340) 은 2 Torr 의 프로세스 기체 압력에 대해 측정된 O_2^+ 강도를 도시하고, 곡선 (350) 은 50 mTorr 의 프로세스 기체 압력에 대해 측정된 O_2^+ 강도를 도시한다. 다른 플라즈마 파라미터들은 도 3a 에서와 동일하였다. 도 3b 는 프로세스 기체 입력의 증가가 플라즈마 내의 이온성 O_2^+ 라디칼의 분량을 감소시킨다는 것을 도시한다.

[0046] 요약하면, 도 3a 및 도 3b 는 산소-함유 플라즈마 내에서의 이온성 O_2^+ 라디칼에 대한 중성 O^* 라디칼의 상대적인 분량이 프로세스 기체 압력을 변화시킴으로써 넓은 범위에 걸쳐 제어될 수 있음을 도시한다. 구체적으로는, 프로세스 기체 압력이 높으면, 이온성 O_2^+ 라디칼의 분량에 대해 중성 O^* 라디칼의 분량이 증가된 산소-함유 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 약 50 mTorr 의 저압에서 O^*/O_2^+ 비율은 약 10 이고 약 2 Torr 의 고압에서 O^*/O_2^+ 비율은 약 114 임을 추정한다.

[0047] 도 4a 및 도 4b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 변형된 게이트 유전체 스택에 전기적인 특성을 도시한다. 도 4a 는 게이트 전압의 함수로서 플라즈마 변형된 게이트 유전체 스택의 게이트 전류 밀도를 도시한다. 곡선 (400) 및 곡선 (410) 은 높은 기체 압력 (2 Torr) 에서 발생된 산소-함유 플라즈마 및 낮은 기체 압력 (50 mTorr) 에서 발생된 산소-함유 플라즈마에 의해 $HfSiO_x$ 하이-k 층 (~ 3 nm 두께) 을 변형시킨 이후의 게이트 누설 전류 밀도 (Jg) 를 각각 도시한다. 도 4a 는 고압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 변형된 $HfSiO_x$ 하이-k 층이 저압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 변형된 $HfSiO_x$ 하이-k 층과 거의 일치하는 게이트 전류 밀도를 갖는다는 것을 도시한다.

[0048] 도 4b 는 게이트 전압의 함수로서 플라즈마 변형된 게이트 유전체 스택의 용량을 도시한다. 곡선 (420) 및 곡선 (430) 은 높은 기체 압력에서 발생된 산소-함유 플라즈마 및 낮은 기체 압력에서 발생된 산소-함유 플라즈마에 의해 $HfSiO_x$ 하이-k 층을 변형시킨 이후의 게이트 유전체 스택의 용량 (C) 를 각각 도시한다. 도 4b 는 고압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 변형된 $HfSiO_x$ 하이-k 층이 저압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 변형된 $HfSiO_x$ 층 보다 낮은 용량을 갖는다는 것을 도시한다.

[0049] 고압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 변형되었던 게이트 유전체 스택의 산화막 환산막 두께 (EOT; Equivalent oxide thickness) 는 약 1.5 nm 로 추정되었고, 저압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 변형되었던 게이트 유전체 스택의 산화막 환산막 두께 (EOT) 는 약 1.7 nm 로 추정되었다. 도 4a 및 도 4b 의 결과는, 저압 산소-함유 플라즈마는 하이-k 층의 유효 유전상수를 감소시킴으로써 하이-k 층을 변형시키는 반면, 고압 산소-함유 플라즈마는 계면 산화물층의 두께를 보존하고, 따라서 유전체 스택의 유효 유전상수를 유지한다는 것을 도시한다. 본 발명자들은 고압 플라즈마는 플라즈마 산화 동안 계면 층 두께 증가를 최소화하고, 층내의 결함을 감소시키고, 산소를 층내에 포함시키고, 층으로부터 탄소 불순물을 제거하고, 또한 저압 플라즈마에 노출된 막 보다 낮은 게이트 누설 전류 밀도를 산출한다라고 믿는다.

[0050] 또한, 도 4a 에서의 Jg 는 고온에서 어닐링되었던 하이-k 층들과 동등하다. 따라서, 본 발명의 실시예들은, 계면 산화물 층의 두께를 증가시킬 수 있는 고온 열 공급을 최소화할 수 있는 방법을 제공한다.

[0051] 도 5a 및 도 5b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 질소-함유 플라즈마에 대한 파장의 함수로서 발광 (OE; Optical emission) 강도를 도시한다. 도 2b 에 개략적으로 도시된 플라즈마 프로세싱 시스템 (101) 을 사용하여 N_2 및 Ar 을 함유하는 프로세스 기체로부터 플라즈마를 발생시켰다. 도 5a 는 플라즈마 내의 중성 N_2^* 라디칼로부터의 광 방출에 할당되어 있는 약 337 nm 의 파장에서 최대 강도를 갖는 OE 피쳐 (500) 를 도시한다. 곡선 (510) 은 800 mTorr 의 프로세스 기체 압력에 대해 측정된 N_2^* 강도를 도시하고, 곡선 (520) 은 200 mTorr 의 프로세스 기체 압력에 대해 측정된 N_2^* 강도를 도시한다. 플라즈마 파라미터들은 약 1000 sccm 의

Ar 기체 유량, 약 10 sccm 의 N₂ 기체 유량, 및 2000 W 의 플라즈마 전력을 추가로 포함했다. 도 5a 는 800 mTorr 에서 200 mTorr 로의 프로세스 기체 압력의 감소가 플라즈마 내의 중성 N₂^{*} 라디칼의 분량을 감소시킨다는 것을 도시한다.

[0052] 도 5b 는 플라즈마 내의 이온성 N₂⁺ 라디칼로부터의 발광에 할당되어 있는 약 427.2 nm 의 파장에서 최대 강도를 갖는 OE 피쳐 (530) 를 도시한다. 곡선 (550) 은 800 mTorr 의 기체 압력에 대해 측정된 N₂⁺ 강도를 도시하고, 곡선 (540) 은 200 mTorr 의 프로세스 기체 압력에 대해 측정된 N₂⁺ 강도를 도시한다. 다른 플라즈마 파라미터들은 도 5a 에서와 동일하였다. 도 5b 는 프로세스 기체 압력의 감소가 플라즈마 내의 이온성 N₂⁺ 라디칼의 분량을 증가시킨다는 것을 도시한다.

[0053] 요약하면, 도 5a 및 도 5b 는 질소-함유 플라즈마에서의 중성 N₂^{*} 라디칼에 대한 이온성 N₂⁺ 라디칼의 상대적인 분량은 프로세스 기체 압력을 변화시킴으로써 넓은 범위에 걸쳐 제어될 수 있다는 것을 도시한다. 구체적으로, 낮은 프로세스 기체 압력은 중성 N₂^{*} 라디칼의 분량에 대해 이온성 N₂⁺ 라디칼의 분량이 증가된 질소-함유 플라즈마의 발생을 허용한다.

[0054] 도 6a 는 플라즈마 조건의 함수로서 및 층 깊이의 함수로서 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택에서의 질소 농도 프로파일을 도시한다. 기판 상에 증착된 ~3 nm 두께의 HfSiO_x 하이-k 층을 포함하는 게이트 유전체 스택을 N₂ 및 Ar 을 함유하는 프로세스 기체로부터 발생된 질소-함유 플라즈마에 노출시켰다. Si-N 비율 (fraction) 은 질화된 계면층의 상대적인 분량을 나타낸다. Si-N 비율은 ToF-SIMS (time-of-flight secondary ion mass spectroscopy) 및 스퍼터 맵스 프로파일링 (sputter depth profiling) 에 의해 측정되었다. 곡선들 (610, 620, 630, 및 640) 은 상이한 플라즈마 조건에 대한 플라즈마 변형된 게이트 유전체 스택에서의 Si-N 비율을 도시한다. 플라즈마 내에서의 중성 질소 라디칼에 대한 이온성 질소 라디칼의 비율 (R) 은 곡선 (610) 으로부터 곡선 (640) 까지 감소한다.

[0055] 도 6a 는 플라즈마 내에서의 보다 높은 분량의 이온성 질소 라디칼 (즉, R₆₁₀) 이 게이트 유전체 스택 내부로의 질소 포함을 증가시키고 보다 얇은 질화된 계면층을 형성하였다는 것을 도시한다. 곡선들 (610, 620, 및 640) 의 최대 강도에 각각 대응하는 마커들 (612, 622, 및 642) 에 의해 도시된 바와 같이, 플라즈마 내에서의 이온성 라디칼의 분량의 증가에 따라 최대 질소 함량의 위치 (깊이) 가 감소되었다.

[0056] 도 6b 는 플라즈마 노출 시간의 함수로서 및 층 깊이의 함수로서 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택의 질소 함량을 도시한다. 게이트 유전체 스택의 질소 함량은 플라즈마 노출 시간의 증가에 따라 증가되었다.

[0057] 도 7 은 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택을 변형시키는 흐름도이다. 상기 방법은 기판 상의 계면층의 성장을 최소화하면서 게이트 유전체 스택을 변형시키고 하이-k 층의 특성들을 향상시키는 플라즈마 프로세스를 사용한다. 프로세스 (700) 은 710 에서 시작된다. 720 에서, 하이-k 층을 포함하는 게이트 유전체 스택이 기판 상에 제공된다. 본 발명의 일 실시예에서, 상기 기판은 기판과 하이-k 층 사이에 위치되는 계면층을 포함할 수 있다. 730 에서, 플라즈마는 불활성 기체 및 산소-함유 기체, 또는 불활성 기체 및 질소-함유 기체를 포함하는 프로세스 기체로부터 발생되고, 상기 프로세스 기체 압력은 플라즈마 내에서의 이온성 라디칼의 분량에 대한 중성 라디칼의 분량을 제어하도록 선택되어 있다.

[0058] 본 발명의 일 실시예에서, 플라즈마는, 730 에서, 불활성 기체 및 산소-함유 기체를 포함하는 프로세스 기체로부터 발생되고, 높은 프로세스 기체 압력은 플라즈마 내에서의 이온성 산소 라디칼의 분량에 대한 중성 산소 라디칼의 분량을 증가시키도록 선택되어 있다. 고압 산소-함유 플라즈마는, 하이-k 층의 결함을 감소시키고, 하이-k 층에 산소를 포함시키고, 또한 하이-k 층으로부터 탄소 불순물들을 제거하는 것을 통해 하이-k 층의 유전상수를 증가시킴으로써 게이트 유전체 스택을 변형시킬 수 있다.

[0059] 본 발명의 다른 실시예에서, 플라즈마는 730 에서 불활성 기체 및 질소-함유 기체를 포함하는 프로세스 기체로부터 발생되고, 낮은 프로세스 기체 압력은 플라즈마 내에서의 중성 질소 라디칼의 분량에 대한 이온성 질소 라디칼의 분량을 증가시키도록 선택되어 있다. 저압 질소-함유 플라즈마는 게이트 유전체 스택의 질소 함

량을 증가시킬 수 있고 얇은 질화된 계면층을 형성할 수 있다.

[0060] 740 에서, 게이트 유전체 스택을 고압 산소-함유 플라즈마 또는 저압 질소-함유 플라즈마에 노출시킴으로써 상기 게이트 유전체 스택이 변형된다. 플라즈마 노출을 소망하는 시간 동안 실시하여 게이트 유전체 스택을 변경시켰으면, 750 에서 프로세스가 종료된다. 일 실시예에서, 스택은 약 5초 내지 약 60초의 기간 동안 산소 함유 플라즈마에 노출된다. 다른 실시예에서, 스택은 약 60초 내지 약 300초의 기간 동안 질소 함유 플라즈마에 노출된다. 어느 실시예에서도, 기판은 변경동안 약 150℃ 내지 약 450℃의 온도에서 유지될 수도 있다.

[0061] 본 발명의 또 다른 실시예에서는, 게이트 유전체 스택이 고압 산소-함유 플라즈마에 노출됨으로써 변형될 수 있고, 여기에서 상기 플라즈마는 플라즈마 내에서의 이온성 산소 라디칼의 분량에 대해 증가된 분량의 중성 산소 라디칼을 포함하며, 후속으로, 얻어지는 게이트 유전체 스택이 저압 질소-함유 플라즈마에 노출됨으로써 추가로 변형될 수 있고, 여기에서 상기 플라즈마는 플라즈마 내에서의 중성 질소 라디칼의 분량에 대해 증가된 분량의 이온성 질소 라디칼을 포함한다. 달리 표현하면, 730 및 740 이 고압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 첫번째로 수행되고, 그 다음으로 730 및 740 이, 도 7 의 점선으로 나타낸 바와 같이, 저압 질소-함유 플라즈마를 사용하여 두번째로 수행되고, 그 다음으로 750 에서 프로세스가 종료된다.

[0062] 본 발명의 또 다른 실시예에서는, 게이트 유전체 스택이 저압 질소-함유 플라즈마에 노출됨으로써 변형될 수 있고, 여기에서 상기 플라즈마는 플라즈마 내에서의 중성 질소 라디칼의 분량에 대해 증가된 분량의 이온성 질소 라디칼을 포함하며, 후속으로, 얻어지는 게이트 유전체 스택이 저압 질소-함유 플라즈마에 노출됨으로써 추가로 변형될 수 있고, 여기에서 상기 플라즈마는 플라즈마 내에서의 이온성 산소 라디칼의 분량에 대해 증가된 분량의 중성 산소 라디칼을 포함한다. 달리 표현하면, 730 및 740 이 저압 질소-함유 플라즈마를 사용하여 첫번째로 수행되고, 그 다음으로 730 및 740 이, 도 7 의 점선으로 나타낸 바와 같이, 고압 산소-함유 플라즈마를 사용하여 두번째로 수행되고, 그 다음으로 750 에서 프로세스가 종료된다.

[0063] 당업자에 의해 용이하게 이해되는 바와 같이, 상술된 고압 산소-함유 플라즈마 프로세스 및 저압 질소-함유 플라즈마 프로세스는 클러스터 툴 (tool) 내의 동일한 플라즈마 프로세싱 시스템에서 순차적으로 수행될 수 있고, 또는 대안으로 이들 프로세스들은 동일한 클러스터 툴 내의 상이한 플라즈마 프로세싱 시스템에서 수행될 수 있다. 상기 클러스터 툴은, 상기 클러스터 툴 내에서 기관들을 전송하도록 구성된 기관 전송 시스템, 및 상기 클러스터 툴의 컴포넌트들을 제어하도록 구성된 컨트롤러를 추가로 포함할 수 있다.

[0064] 본 발명을 실행할 때 본 발명의 다양한 변형 및 변동이 사용될 수 있음에 유의해야 한다. 그러므로 첨부된 특허청구범위 내에서, 본 발명은 여기에 구체적으로 설명된 것과 달리 실행될 수 있음이 이해될 것이다.

도면의 간단한 설명

[0010] 첨부된 도면에서,

[0011] 도 1a 는 본 발명의 일 실시예에 따른 하이-k 층을 포함하는 게이트 유전체 스택을 도시하고;

[0012] 도 1b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 하이-k 층 및 계면층을 포함하는 게이트 유전체 스택을 도시하고;

[0013] 도 2a 내지 도 2f 는 본 발명의 실시예들에 따라 게이트 유전체 스택을 변형시키는 플라즈마 프로세싱 시스템들의 개략적인 다이어그램이고;

[0014] 도 3a 및 도 3b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 산소-함유 플라즈마에 대한 파장의 함수로서 발광 (OE) 강도를 도시하고;

[0015] 도 4a 및 도 4b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 변형된 게이트 유전체 스택의 전기적인 특성들을 도시하고;

[0016] 도 5a 및 도 5b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 질소-함유 플라즈마에 대한 파장의 함수로서 OE 강도를 도시하고;

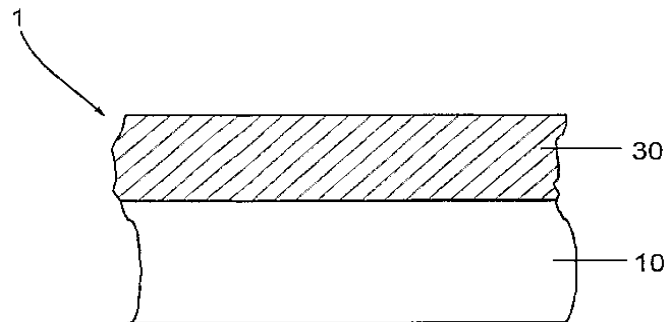
[0017] 도 6a 는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 조건의 함수로서 및 층 깊이의 함수로서 게이트 유전체 스택에서의 질소 농도 프로파일을 도시하고;

[0018] 도 6b 는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 노출 시간의 함수로서 및 층 깊이의 함수로서 게이트 유전체 스택에서의 질소 농도 프로파일을 도시하고; 또한

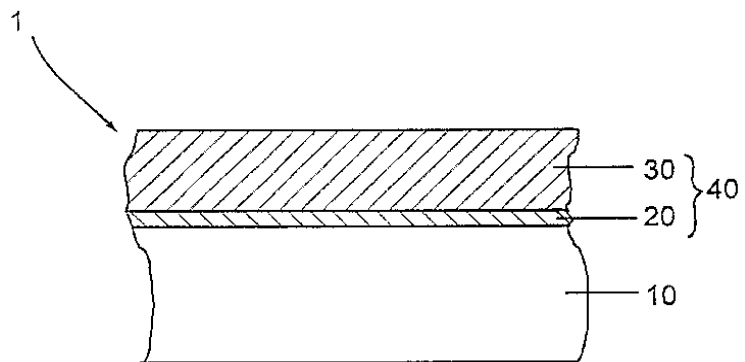
[0019] 도 7 은 본 발명의 일 실시예에 따른 게이트 유전체 스택을 변형시키는 흐름도이다.

도면

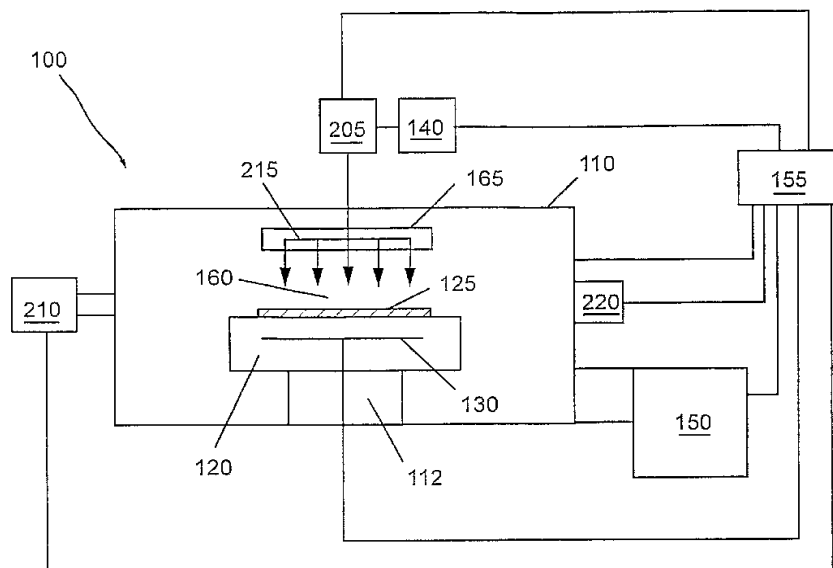
도면 1a



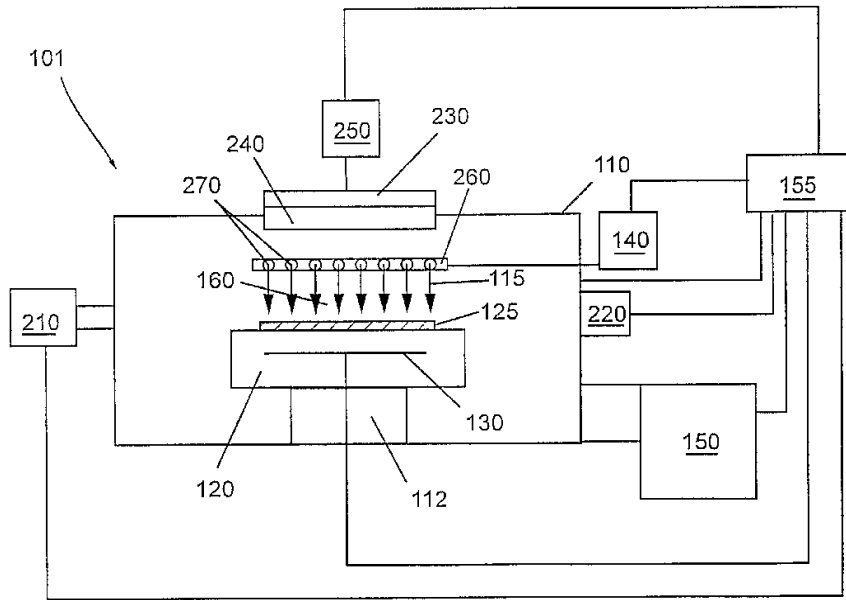
도면 1b



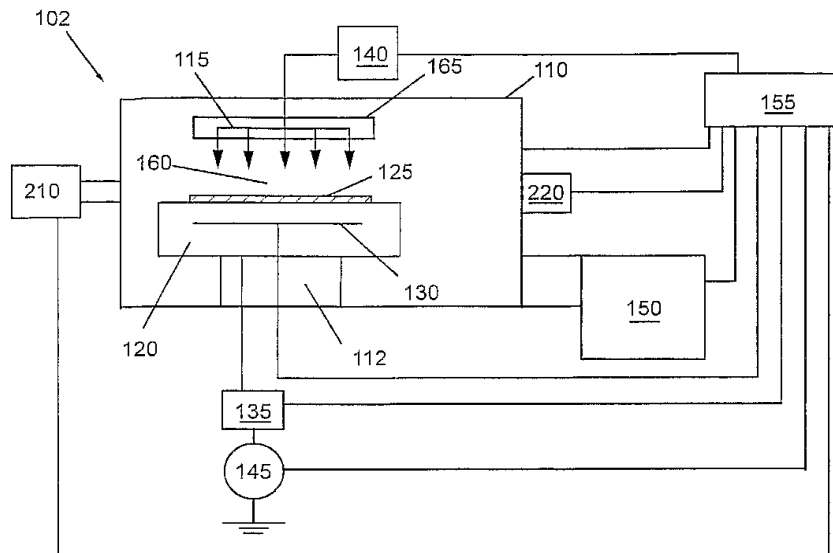
도면2a



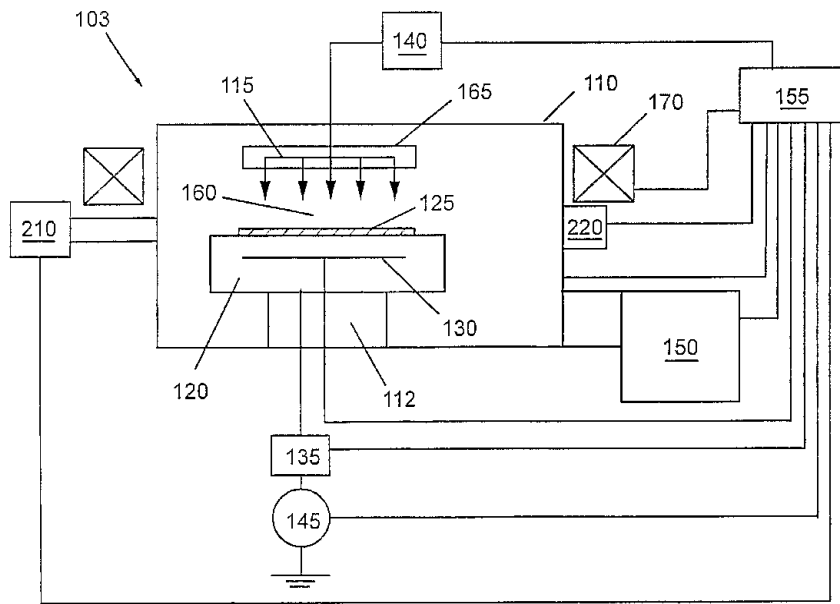
도면2b



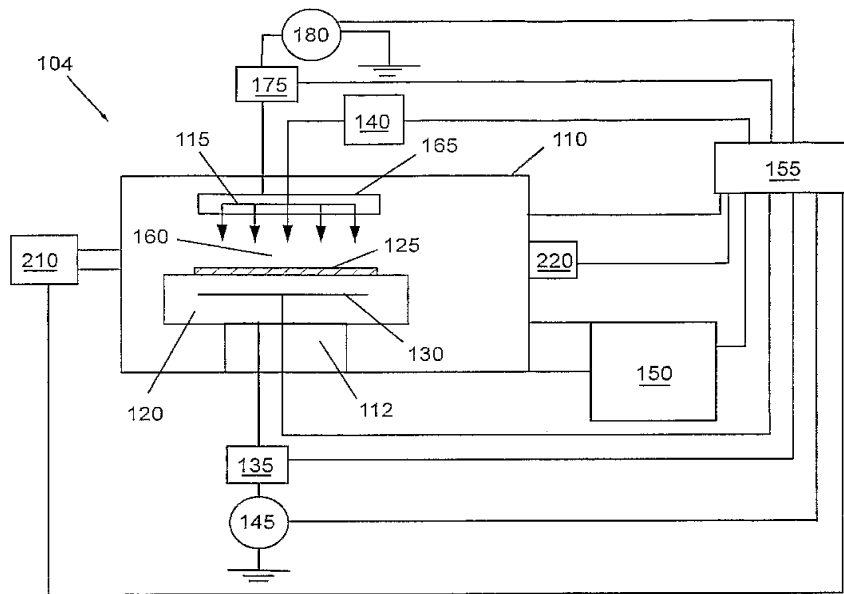
도면2c



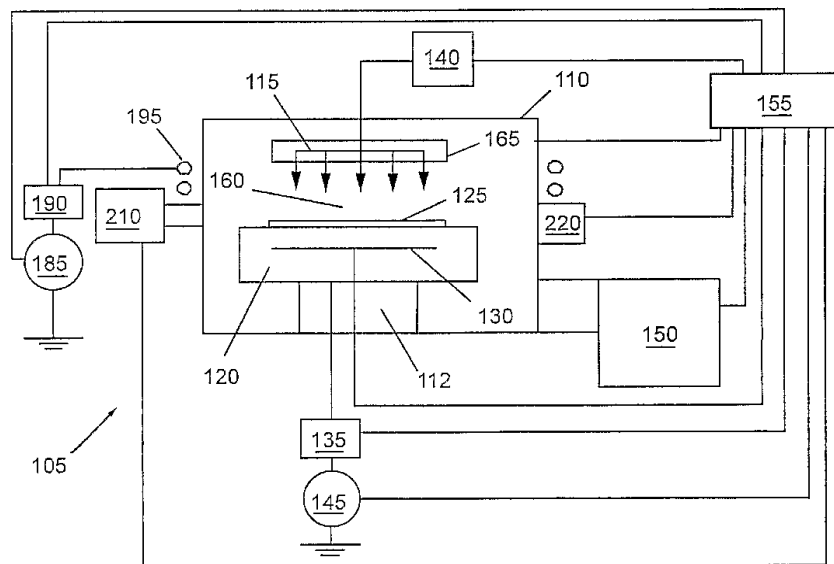
도면2d



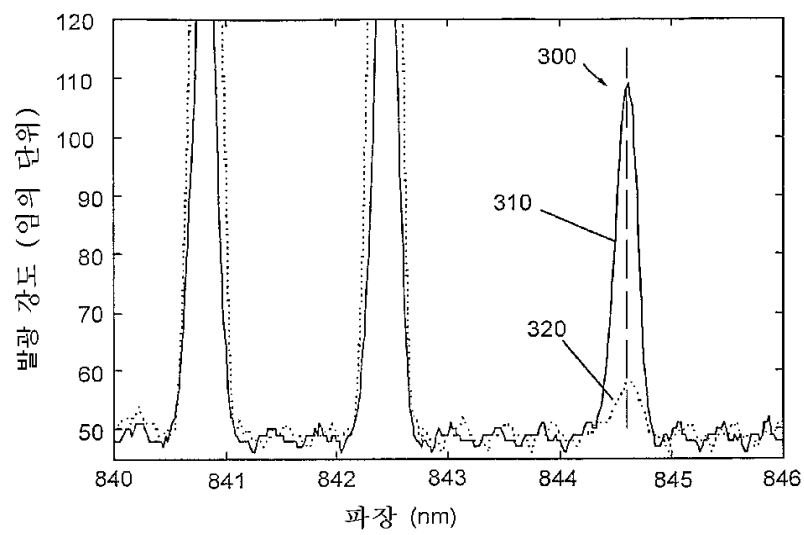
도면2e



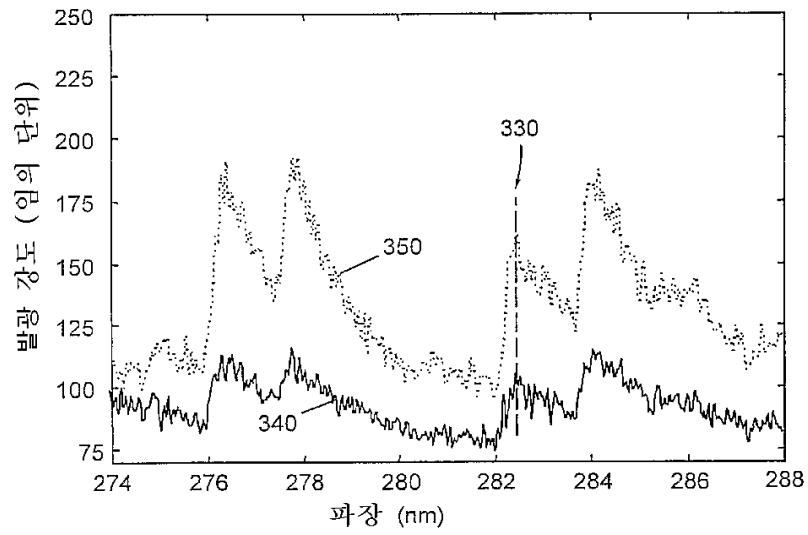
도면2f



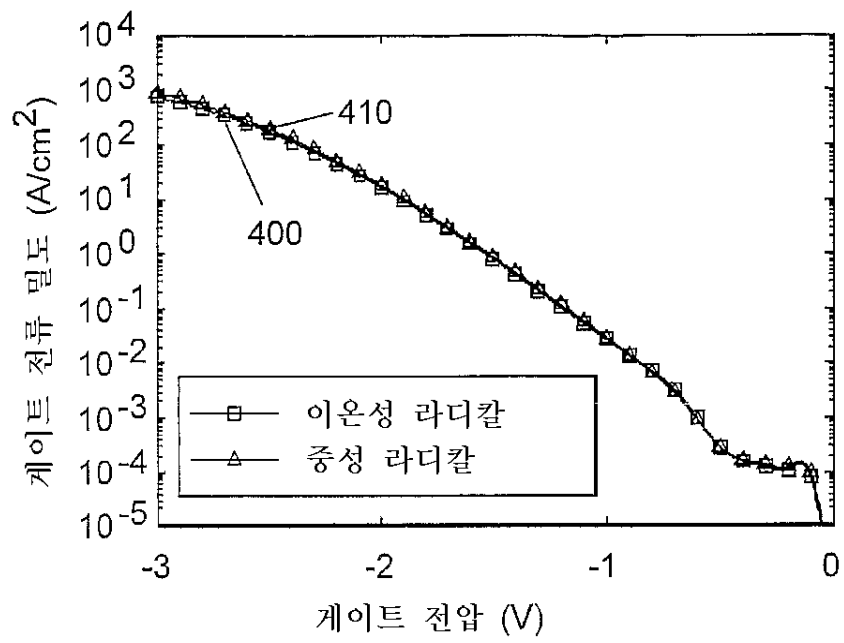
도면3a



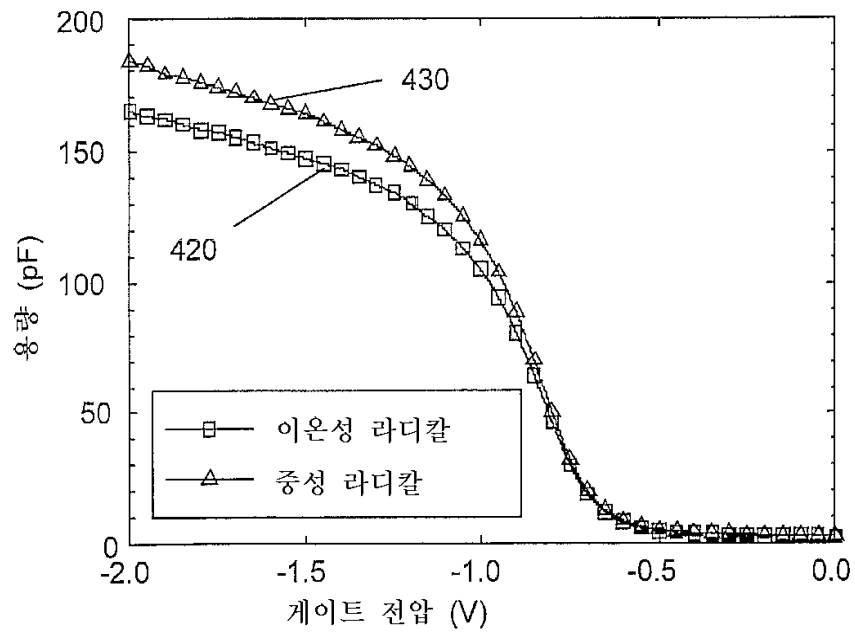
도면3b



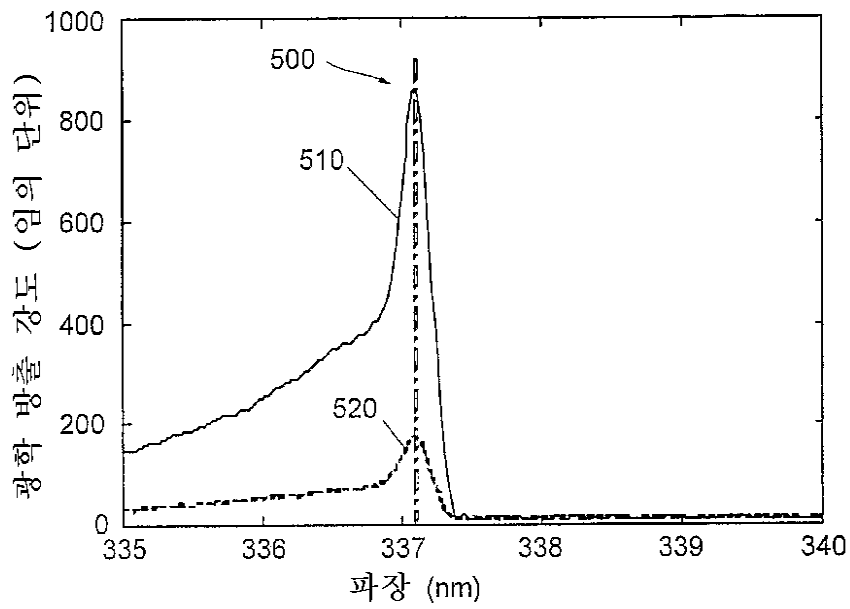
도면4a



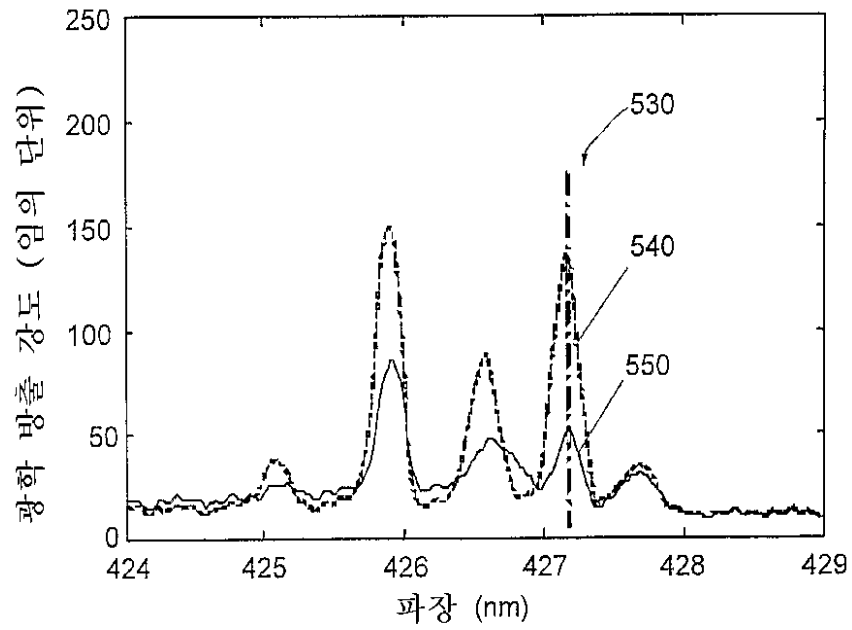
도면4b



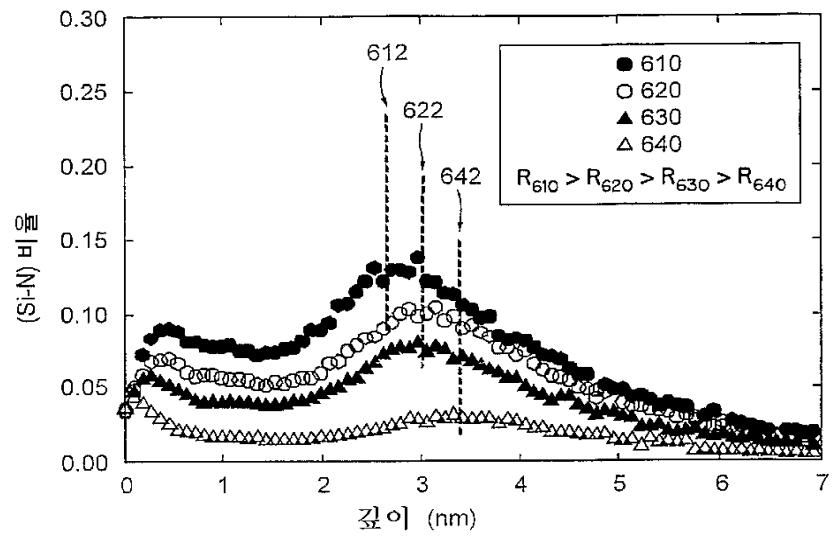
도면5a



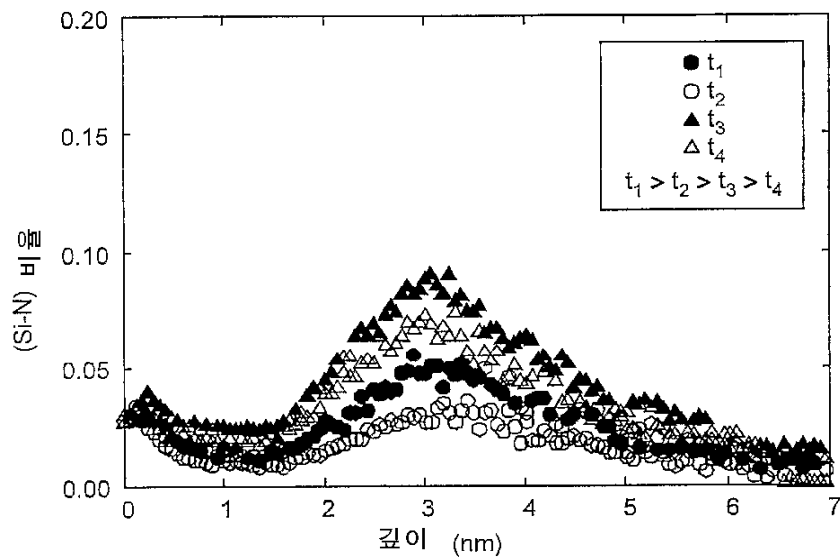
도면5b



도면6a



도면6b



도면7

