



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2016년01월15일  
 (11) 등록번호 10-1586122  
 (24) 등록일자 2016년01월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
**H01L 21/265** (2006.01)  
 (21) 출원번호 10-2013-0130863  
 (22) 출원일자 2013년10월31일  
 심사청구일자 2014년10월22일  
 (65) 공개번호 10-2014-0127135  
 (43) 공개일자 2014년11월03일  
 (30) 우선권주장  
 13/869,456 2013년04월24일 미국(US)  
 (56) 선행기술조사문헌  
 KR1020120127512 A\*  
 KR1020060114324 A\*  
 KR1020060072163 A\*  
 US20020100876 A1\*  
 \*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자  
**프랙스에어 테크놀로지, 인코포레이티드**  
 미국 06810-5113 코네티컷 데인베리 올드 리지베리 로드 39  
 (72) 발명자  
**싱하 애쉬위니 케이**  
 미국 14051 뉴욕주 이스트 애머스트 아파트먼트-에이치 어텀 크릭 레인 105  
**리 칭 아이**  
 대만 701 타이난 시티 이스트 디스트릭트 유신 로드 엘엔 232 넘버 13  
 (74) 대리인  
**양영준, 백만기**

전체 청구항 수 : 총 20 항

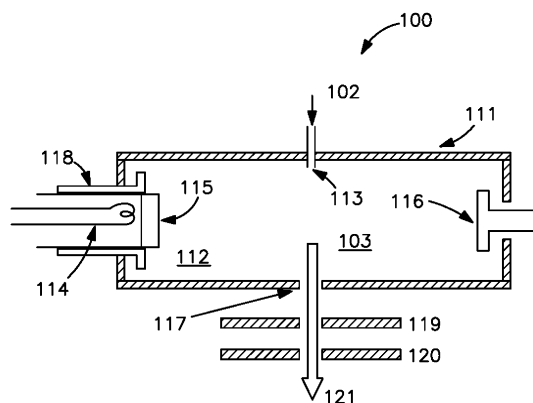
심사관 : 박부식

(54) 발명의 명칭 **동위원소로 농축된 레벨의 도펀트 기체 조성물의 이온 주입 공정에서의 사용 방법**

**(57) 요약**

농축된 및 고농축된 도펀트 기체를 사용하는 신규한 공정이 본 명세서에 제공되어 이러한 도펀트 기체를 이온 주입하는 것과 연관된 공정 이점을 실현할 수 있게 되면서 최종 사용자가 현재 마주하고 있는 문제들을 해소한다. 규정 범위 내의 소정 유량으로, 감소된 이온 소스 총 전력 레벨로 작동시키는 것은 농축된 도펀트 기체의 이온화 효율을 그 대응하는 비농축 또는 덜 농축된 도펀트 기체에 비해 감소시키도록 설계된다. 소스 필라멘트의 온도 또한 감소함으로써, 플루오린 함유 농축된 도펀트 기체를 활용하는 경우에서 역효과로 발생하는 플루오린 예칭 및 이온 소스 쇼팅(shorting)을 완화시킨다. 더 낮은 이온화 효율 및 더 낮은 이온 소스의 온도와 함께 감소된 레벨의 총 전력이 시너지를 일으키며 상호작용하여 이온 소스 수명을 개선 및 연장시킬 수 있으면서도, 유리하게 이전에 검정한 레벨로부터 비허용적으로 벗어나지 않는 빔 전류를 유지시킨다.

**대표도 - 도1**



이온 소스 기기의 개략도

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

한 동위원소가 자연 존재량 레벨의 90 % 이상인 농축 레벨을 가지는 농축된 도펀트 기체를 이온 소스의 안정성을 유지시키기 충분한 유량으로 도입하는 단계;

상기 농축된 도펀트 기체보다 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 활용된 총 전력 레벨에 비해 감소된 이온 소스 총 전력 레벨로 작동시키는 단계; 및

상기 유량으로 상기 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 사용하여 생성된 것과 같은 빔 전류를 생성하고 유지시키도록 상기 농축된 도펀트 기체를 이온화하는 단계를 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 2**

제1항에 있어서,

상기 유량으로 상기 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 비해 감소된 이온 소스 온도에서 작동시키는 단계; 및

아크 전압(arc voltage), 아크 바이어스(arc bias), 필라멘트 전력 또는 이들의 조합을 감소시킴으로써 상기 감소된 총 전력 레벨로 작동시키는 단계를 더 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 3**

제1항에 있어서, 1 sccm 이상의 유량으로 상기 농축된 도펀트 기체를 도입함으로써 이온 소스의 안정성을 유지시키는 단계를 더 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 4**

제3항에 있어서, 상기 농축된 도펀트 기체는 72Ge를 적어도 55 %의 농축 레벨로 함유하는 72GeF4를 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 5**

제1항에 있어서, 상기 유량을 5 sccm 이하로 유지시킴으로써 재조합 반응을 피하는 단계를 더 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 6**

제1항에 있어서, 상기 감소된 총 전력 레벨에서 작동시키는 단계는 제어된 양으로 상기 농축된 도펀트 기체의 이온화 효율을 낮추어 상기 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체로 이전에 검정한 것과 동일한 이온 빔 전류를 유지시키는 것을 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 7**

제1항에 있어서,

72Ge를 적어도 75 % 농축으로 포함하는 농축된 72GeF4로 이온 소스를 작동시키는 단계;

이온 소스 챔버 벽의 온도 범위가 400 °C 내지 900 °C이고, 상기 유량으로 상기 덜 농축된 또는 미농축된 72GeF4 도펀트 기체에 비해 감소된 온도에서 작동시키는 단계; 및

이온 소스의 캐소드와 필라멘트 사이의 바이어스를 감소시키는 단계를 더 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 8**

제1항에 있어서, 상기 감소된 총 전력 레벨로 작동시키는 단계는 기결정된 양만큼 이온 챔버 내에서 더 낮은 아크 전압으로 작동시킴으로써 발생하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 9**

동위원소  $^{72}\text{Ge}$ 가 55 % 초과인 농축 레벨을 가지는  $^{72}\text{GeF}_4$ 를 필수적으로 포함하는 농축된 도펀트 기체를 1 내지 5 sccm 범위의 유량으로 도입하는 단계;

상기 농축된 도펀트 기체보다 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 활용된 총 전력 레벨에 비해 감소된 총 전력 레벨로 작동시키는 단계;

상기 유량으로 상기 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 비해 감소된 이온 소스 온도로 작동시키는 단계; 및

상기 유량으로 상기 덜 농축된 또는 미농축된  $\text{GeF}_4$ 를 사용하여 생성된 것과 같은 빔 전류를 유지시키도록 상기 농축된 도펀트 기체를 이온화하는 단계를 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 10**

제9항에 있어서, 이온 소스의 캐소드와 필라멘트 사이의 바이어스 전압을 감소시킴으로써 이온 챔버 벽이 상기 유량으로 상기 덜 농축된 또는 미농축된  $\text{GeF}_4$ 에 비해 감소된 온도인 400 °C 내지 900 °C의 온도를 가지게 이온 소스를 작동시키는 단계를 더 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 11**

제9항에 있어서, 상기 감소된 전력 레벨로 작동시키는 단계는 더 낮은 아크 전압, 더 낮은 아크 바이어스, 더 낮은 필라멘트 전력 또는 이들의 조합으로 작동시킴으로써 발생하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 12**

제9항에 있어서, 상기 농축된 도펀트 기체는  $^{72}\text{Ge}$  동위원소를 75 % 이상으로 고농축된 레벨을 가지는  $^{72}\text{GeF}_4$ 를 필수적으로 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법.

**청구항 13**

웨이퍼에 주입될 원자 종을 가지는 농축된 도펀트 기체를 선택하는 단계;

자연 존재량 레벨의 적어도 90 %가 넘게 농축될 상기 원자 종의 질량 동위원소를 선택하는 단계;

상기 농축된 도펀트 기체의 농축된 질량 동위원소를 감압 저장장치(sub-atmospheric storage) 및 전달 용기에 제공하는 단계;

상기 농축된 도펀트 기체의 농축된 질량 동위원소를 이온 소스의 안정성을 유지시키기 충분한 유량으로 도입하는 단계;

상기 농축된 도펀트 기체보다 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 활용된 총 전력 레벨에 비해 감소된 이온 소스 총 전력 레벨로 작동시키는 단계; 및

상기 유량으로 상기 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 사용하여 생성된 것과 같은 빔 전류를 유지시키도록 상기 농축된 도펀트 기체의 농축된 질량 동위원소를 이온화하는 단계를 포함하는, 동위원소로 고농축된 도펀트 기체의 이온 주입 공정에의 사용 방법.

**청구항 14**

제13항에 있어서, 상기 유량은 재조합 반응이 발생하는 상한선을 초과하지 않는, 동위원소로 고농축된 도펀트 기체의 이온 주입 공정에의 사용 방법.

**청구항 15**

제13항에 있어서, 이온 소스는 상기 유량으로 상기 미농축된 도펀트 기체에 비해 감소된 온도를 가지는, 동위원소로 고농축된 도펀트 기체의 이온 주입 공정에의 사용 방법.

**청구항 16**

제13항에 있어서, 상기 농축된 도펀트 기체는 72Ge가 55 내지 60 %로 농축된 72GeF4인, 동위원소로 고농축된 도펀트 기체의 이온 주입 공정에서의 사용 방법.

**청구항 17**

제13항에 있어서, 상기 농축된 도펀트 기체는 72Ge가 55 내지 70 %로 농축된 72GeF4이고 상기 감소된 총 전력 레벨은 1 내지 3 sccm의 유량으로 상기 덜 농축된 또는 미농축된 72GeF4 도펀트 기체에 활용된 총 전력 레벨에 비해 5 내지 20 % 감소한, 동위원소로 고농축된 도펀트 기체의 이온 주입 공정에서의 사용 방법.

**청구항 18**

제13항에 있어서, 상기 농축된 도펀트 기체는 72Ge가 70 내지 80 %의 범위로 농축된 72GeF4이고, 상기 감소된 총 전력 레벨은 상기 덜 농축된 또는 미농축된 72GeF4 도펀트에 활용된 전력 레벨보다 20 내지 30 % 더 낮은, 동위원소로 고농축된 도펀트 기체의 이온 주입 공정에서의 사용 방법.

**청구항 19**

제13항에 있어서, 상기 농축된 도펀트 기체는 72Ge가 58 % 이상으로 농축된 72GeF4이고, 감소된 필라멘트 전력 레벨은 200 내지 500 W 범위이고, 챔버 벽은 400 °C 내지 900 °C의 범위인 감소된 온도를 가지고 상기 유량은 1 sccm 내지 3 sccm의 범위인, 동위원소로 고농축된 도펀트 기체의 이온 주입 공정에서의 사용 방법.

**청구항 20**

제19항에 있어서, 상기 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 활용된 총 전력 레벨에 비해 총 전력 레벨을 감소시키기 위해, 필라멘트에 입력된 전력 및 아크 바이어스를 변하지 않게 유지하면서, 이온 챔버 내에서 더 낮은 아크 전압으로 작동시키는 단계를 더 포함하는, 동위원소로 고농축된 도펀트 기체의 이온 주입 공정에서의 사용 방법.

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 농축된 및 고농축된 레벨의 도펀트 기체(dopant gas)를 이온 주입 공정에 활용하기 위한 신규한 공정에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0002] 이온 주입은 반도체/마이크로전자소자 제조에서 중요한 공정이다. 이온 주입 공정은 집적 회로 제조에서 반도체 웨이퍼에 도펀트 불순물을 도입하기 위해 사용된다. 이온 소스는 도펀트 기체(dopant gas)로부터 다양한 이온 종에 대해 잘 규정된(well-defined) 이온 빔을 생성하기 위해 사용된다. 도펀트 기체의 이온화를 통해 차후에 소정 워크피스(workpiece)에 주입될 수 있는 이온 종을 생성한다.

[0003] 동위원소로 농축된 도펀트 기체는 반도체 산업에서 널리 사용되는 도펀트 기체 전구체로서 출현했다. 본 명세서 전반적으로 여기에서 사용되는, "동위원소로 농축된(isotopically enriched)" 및 "농축된(enriched)" 도펀트 기체라는 용어는 자연적으로 발생하는 동위원소 분포와 상이한 분포의 질량 동위원소를 함유하는 도펀트 기체라는 의미로 상호교환적으로 사용되고, 여기서 질량 동위원소들 중 하나는 자연적으로 발생한 레벨로 존재하는 것보다 더 높은 농축 레벨을 가진다. 예컨대, 58 % 72GeF4는 질량 동위원소 72Ge를 58 % 농축으로 함유하는 동위원소로 농축된 또는 농축된 도펀트 기체를 지칭하고, 반면 자연적으로 발생하는 GeF4는 질량 동위원소 72Ge를 27 % 자연 존재량 레벨로 함유한다.

[0004] 주입될 바람직한 원자 종으로 농축된 도펀트 기체를 소정 유량에서 사용함으로써, 동일한 유량에서 활용되는 대응하는 미농축된 도펀트 기체의 경우에 비해 더 높은 빔 전류를 갖는 이온 빔이 생성된다. 예컨대, 소정 유량에 대해, 질량 동위원소 72Ge가 58 % 농축으로 농축된 58% 72GeF4는 질량 동위원소 72Ge를 27 % 자연 존재량 레벨로 가지는 자연적으로 발생한 GeF4로 생성된 빔 전류보다 2배 높은 빔 전류를 생성할 수 있다. 즉, 자연적으로 발생한 GeF4에 비해 58 % 72GeF4를 활용할 경우 유량의 단위 부피당 2배 많은 72Ge 이온이 이온 챔버 내에

생성된다. 더 높은 빔 전류뿐만 아니라, 농축된 도펀트 기체는 대응하는 미농축된 도펀트 기체에 비해 더 적은 도펀트 기체를 활용하여 바람직한 원자 종의 필요한 주입 투여량을 달성하는 것을 가능하게 한다.

[0005] 이러한 공정 이점은 농축된 도펀트 기체가, 텅스텐 이온 챔버의 벽을 에칭하여 텅스텐이 침착될 수 있는 뜨거운 소스 필라멘트로 이동할 수 있는 텅스텐 플루오라이드(WFx) 종을 형성하는 것으로 잘 알려진, 플루오린-함유 기체인 경우 특히 유리하다. 텅스텐 침착물(deposits)은 글리칭(glitching) 또는 아크 방전(arc discharge)으로 알려진 빔 전류가 순간적으로 강해지는 현상을 일으킬 수 있다. 궁극적으로 글리칭 및/또는 글리칭의 빈도수가 상한 임계값에 도달하여 이온 기기가 허용가능한 효율로 작동할 수 없게 되는 경우 이온 소스 성능이 시간이 지남에 따라 악화 및 저하될 수 있다. 이러한 시나리오에서, 사용자는 주입 작업을 중단하고 침착물을 청소하거나 이온 소스를 교체하여 유지보수를 수행해야 한다. 이러한 중단시간은 이온 주입 시스템의 생산성 손실을 초래한다. 따라서, 대응하는 농축된 플루오린-함유 도펀트 기체를 사용함으로써 바람직한 원자 종의 필요한 주입 투여량을 달성할 수 있는 능력을 통해 이온 소스 챔버로 더 적은 플루오린을 도입할 수 있고, 그럼으로써 텅스텐 침착물을 감소시키고 이온 소스 수명을 잠재적으로 연장시킬 수 있다.

[0006] 나아가, 미농축된 도펀트 기체에서의 경우와 동일한 유량으로 다양한 농축된 도펀트 기체를 사용하는 것은 처리량 및 수율의 증가라는 장점을 제공한다. 미농축된 도펀트 아날로그(analog)에 비해, 농축된 도펀트 기체에서 단위 유량당 더 많은 도펀트 원자 종이 주입 가능하다. 결과적으로, 농축된 도펀트 기체를 활용하는 경우 생산성 및 수율에 대한 잠재력이 증가한다.

[0007] 또한, 바람직한 원자 종을 필요한 이온 주입 투여량을 생성하기 위한 충분한 레벨로 동위원소 농축함으로써 다른 종과의 교차오염 문제를 해소할 수 있다. 오늘날, 이온 소스 도구의 다수는 비전용적이고, 이는 여러 상이한 원자 종들이 동일한 도구를 사용하여 주입된다는 것을 의미한다. 예컨대, 자연적으로 발생한 또는 미농축된 게르마늄 테트라플루오라이드(GeF4)가 74Ge 이온 종을 주입하는 데 사용되어왔는데, 이는 GeF4의 다른 안정적인 동위원소(즉, 70Ge, 72Ge, 73Ge 및 76Ge)에 비해 자연적으로 발생한 GeF4(즉, GeF4)에서 37 %로 가장 풍부한 것이었기 때문이었다. 이러한 소스 도구의 대부분은 또한 75As도 가공하고 주입하고, 이는 74Ge와의 교차오염 문제를 발생시키는데, 이는 75As와 74Ge 중 사이의 차이가 고작 1 원자질량단위(a.m.u.) 밖에 나지 않아서 이온 자기 분리기(ion magnetic separator)가 두 원자 종 사이의 차이를 인식하지 않기 때문이다. 즉, 이온 소스 챔버는 이전 생산 공정을 진행하여 그 결과로 발생한 이온 빔 내의 잔여 75As를 분해 또는 필터링할 수 없는데, 이는 기존 빔의 질량 분해능이 74Ge와 75As 원자 종의 차이를 인식하지 못하기 때문이다. 그 결과로, 74Ge 및 75Ge 중 양자 모두가 워크피스에 부주의로 잘못 주입될 수 있고, 그럼으로써 마이크로전자소자 장치가 오염되어 의도된 목적에 맞지 않게 될 가능성을 가질 수 있다. 이는 의도된 게르마늄 투여량의 6 % 이상까지 오염될 수 있는 것으로 나타났다.

[0008] 이러한 교차 오염을 완화시키기 위해, a.m.u.가 75As와 2 이상 차이나는 동위원소로 농축된 Ge 원자 종이 활용될 수 있다는 것이 인식되었다. 이러한 것으로서, 자연적으로 발생한 GeF4를 72Ge로 동위원소 농축하는 것은 72GeF4의 농도를 상승시킬 수 있고 그럼으로써 질량 72 게르마늄 동위원소가 자연적으로 풍부한 레벨인 27 %에서 약 52 % 이상으로 농축되어 75 As 교차 오염 없이 필요한 Ge 투여량을 발생시킬 수 있게 된다. 농축된 레벨의 72GeF4는 전체 기체를 더 적게 도입하는 방식으로 필요한 투여량을 달성한다. 그리고, 농축된 72GeF4를 덜 소비하는 것은 또한 챔버 구성요소를 에칭하고 소스 필라멘트에 텅스텐을 침착시키는 데 더 적은 플루오린 이온이 이용될 수 있다는 것이라고도 말할 수 있다.

[0009] 이러한 공정의 이점은 반도체 랩 및 공장과 같은 사용자들이 이온 주입 공정에서 기존의 미농축된 도펀트 기체를 대응하는 농축된 및 고농축된 도펀트 기체 아날로그로 대체하도록 유도한다. 일반적으로, 마이크로전자소자 산업에서, 이온 소스 도구는 필요한 주입 투여량으로 정확하게 그리고 안정적으로 허용가능한 웨이퍼를 생산하는 능력을 보여주는 설정된 공정 파라미터로 작동되도록 이전에 검정되었기 때문에, 이온 주입 공정 파라미터는 바람직하게는 대응하는 농축된 도펀트 기체를 활용하는 경우에 변하지 않은 채로 있게 된다.

[0010] 그러나, 상술한 공정의 이점에도 불구하고, 반도체 랩 및 공장은 이전에 검정한 이온 소스 도구의 작동 파라미터에서 유의하게 벗어나지 않는 방식으로 농축된 도펀트 기체 아날로그를 사용하는 것에 있어 어려움을 겪고 있다. 특히, 미농축된 또는 덜 농축된 도펀트 기체로 이전에 사용한 것과 동일한 유량의 농축된 도펀트 기체로 이온 소스 도구를 작동시키는 것은 검정된 이온 빔 전류로부터 벗어난 것으로 보이는 레벨로 빔 전류를 증가시킨다. 결과적으로, 전체 이온 주입 공정이 재검정되어야 하는데, 이는 사실상 시간을 소비하는 과정으로서 허용할 수 없는 생산 중단을 가져온다. 또한, 증가한 이온 빔 전류는 특히, 텅스텐 플루오라이드(WFx)의 다양한 이온 종을 형성할 수 있는 상당량의 유리 유효 플루오라이드 이온들이 농축된 도펀트 기체의 이온화를 통해 생

성되는, 농축된 플루오린 함유 도펀트 기체에 있어서 문제가 된다. 언급한 바와 같이, Wfx 종은 케소드 또는 소스 필라멘트를 포함하는 이온 소스 챔버 내의 더 뜨거운 표면으로 이동하려고 하고, 여기서 그들은 텅스텐을 침착시켜 글리칭 및 이온소스 쇼트를 발생시킬 가능성이 있다. 텅스텐이 침착하면서, 원자 또는 분자 플루오린이 방출되어 추가적인 텅스텐 벽을 에칭하는 소위 "할로겐 사이클(halogen cycle)"이 계속될 수 있다. 그 결과로서, 최종 사용자는 플루오린 함유 농축된 기체를 사용하는 것이 일부 경우에서 할로겐 사이클을 가속화함으로써 소스 수명을 단축시킬 수 있다는 것을 관찰하고 있다.

[0011] 더 높은 레벨의 농축된 도펀트 기체를 활용하는 경우 앞서 언급한 문제들을 악화시킬 가능성이 있다. 따라서, 이온 주입 사용자는 원래 의도된 동위원소로 농축된 도펀트 기체의 공정 이점을 달성하지 못할 수 있다. 앞서 언급한 문제들을 해결하는 농축된 도펀트 기체를 활용하는 공정 이점을 실현할 수 있는 이온 주입 공정의 필요성이 미해결된 채로 있다.

**발명의 내용**

[0012] 제1 양태로, 동위원소가 자연 존재량 레벨의 90 % 이상인 농축 레벨을 가지는 농축된 도펀트 기체를 이온 소스의 안정성을 유지시키기 충분한 유량으로 도입하는 단계; 해당 유량으로 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 대해 활용된 전력 레벨에 비해 감소된 이온 소스 총 전력 레벨로 작동시키는 단계; 및 도펀트 기체를 이온화하여 해당 유량으로 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 사용하여 생성된 것과 같은 빔 전류를 생성하고 유지시키는 단계를 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법이 제공된다.

[0013] 제2 양태로, 동위원소 72Ge가 55 % 초과인 농축 레벨을 가지는 72GeF4를 필수적으로 포함하는 농축된 도펀트 기체를 1 내지 5 sccm 범위의 유량으로 도입하는 단계; 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체 W에 대해 활용된 총 전력 레벨에 비해 감소된 이온 소스 총 전력 레벨로 작동시키는 단계; 해당 유량으로 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 비해 감소된 이온 소스 온도로 작동시키는 단계; 및 농축된 도펀트 기체를 이온화하여 해당 유량으로 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 사용하여 생성된 것과 같은 빔 전류를 달성하고 유지시키는 단계를 포함하는, 농축된 도펀트 기체의 사용 방법이 제공된다.

[0014] 제3 양태로, 웨이퍼에 주입될 원자 종을 가지는 도펀트 기체를 선택하는 단계; 자연 존재량 레벨의 적어도 90 %가 넘게 농축된 도펀트 기체의 질량 동위원소를 선택하는 단계; 도펀트 기체의 질량 동위원소를 감압 저장장치(sub-atmospheric storage) 및 전달 용기에 제공하는 단계; 도펀트 기체의 질량 동위원소를 이온 소스의 안정성을 유지시키기 충분한 유량으로 도입하는 단계; 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 대해 활용된 전력 레벨에 비해 감소된 이온 소스 전력 레벨로 작동시키는 단계; 및 도펀트 기체를 이온화하여 해당 유량으로 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 사용하여 생성된 것과 같은 빔 전류를 유지시키는 단계를 포함하는, 동위원소로 농축된 도펀트 기체를 이온 주입 공정에 사용하는 방법이 제공된다.

**도면의 간단한 설명**

[0015] 본 발명의 상기 및 다른 양태, 특징, 및 장점이 다음의, 더 상세한 설명을 통해 더 명백해질 것이고, 이는 다음 도면과 함께 나타난다.

도 1은 본 발명의 원리를 통합하는 이온 소스 기기를 도시; 및

도 2는 빔 라인 이온 주입 시스템에 통합된 도 1의 이온 소스 기기를 도시.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0016] 달리 지시하지 않는 한, 본 명세서에서 사용되는 모든 농도는 부피 백분율("부피%")로서 표현된다.

[0017] 동위원소 농축된 도펀트 기체를 사용할 때의 장점 중 하나는 미농축된 도펀트 기체에 비해 유사한 빔 전류를 달성하기 위한 기체의 전체 유량이 감소한다는 것이라는 점을 인식하고 있지만, 농축된 도펀트 기체의 활용에 있어 제한이 존재한다. 도펀트 기체 유량이 필연적으로 감소하는 것이 이온 소스를 불안정하게 하여 플라즈마가 유지될 수 없기 때문에, 검정된 이온 빔 전류 레벨을 유지시키기 위해 농축된 도펀트 기체의 유량을 감소시키려는 시도가 불가능할 수 있다. 따라서, 감소된 유량으로 농축된 도펀트 기체 아날로그를 활용하는 경우 이온 빔 전류 레벨은 허용 가능한 검정 범위 내로 유지될 수 없다.

[0018] 본 발명은 또한, 동위원소로 농축된 도펀트 기체의 유량을 기결정된 임계값 너머로 낮추는 것은 이온 도구를 불안정하게 하고, 그럼으로써 챔버 내의 압력을 중요 임계값 너머로 감소시킨다는 것을 인식한다. 감소된 압력은

전자들과 도펀트 기체 사이의 불충분한 충돌이 발생하여 플라즈마를 유지하고 아크 방전 모드에서 이온 소스를 작동시킨다는 것을 의미한다. 즉, 전자들, 이온들 및 중성자들 사이의 충돌에 대한 평균 자유 경로가 증가한다. 예컨대, 대응하는 덜 농축된 버전인 51 %에 비해 58 % 72GeF4의 유량을 30 % 이상 감소시키는 것은 이온 소스 도구 내의 압력 감소의 결과로 이온 소스 도구를 불안정하게 한다는 것이 밝혀졌다. 플라즈마가 유지되더라도, 사용자는 감소된 플라즈마 효율로 인해 빔 전류가 상당히 하락하는 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로, 어떤 유형의 농축된 도펀트 기체를 사용하는 경우라도 유량에 대한 하한선은 약 0.5 sccm 미만으로 떨어지면 안 된다는 것이 관찰되었다.

[0019] 추가적으로, 감소된 압력 하의 농축된 도펀트 기체의 감소된 유량은 아크 챔버의 벽을 더 뜨겁게 만들었다. 공정 중 어떤 소정 시간에서도 아크 챔버를 차지한 기체가 더 적었고, 그럼으로써 기체의 냉각 효과를 감소시켰다. 결과적으로, 할로젠 사이클의 반응 속도가 유의하게 증가하여, 활성 플루오린이 더 높은 온도에서 보다 빠르게 텅스텐 챔버 벽을 에칭하고 침식할 수 있게 되었다.

[0020] 본 발명은 이온 주입에 농축된 도펀트 기체를 사용하는 고유의 솔루션을 제공하기 위해 상기 공정의 한계를 인식하고 고려했다. 이제 다양한 실시양태들에서 자세히 설명하는 바와 같이, 본 발명은 다양한 접근방법을 활용하여, 농축된 및 고농축된 도펀트 기체를 이온 주입하는 경우에 이온 소스에 입력되는 총 전력 레벨을 제어된 양만큼 낮춘다.

[0021] 본 발명의 제1 실시양태에서, 이온 주입 공정은 이온 소스에의 총 입력 전력을 감소시킴으로써 작동될 수 있다. 감소된 총 입력 전력 레벨은 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체와 함께 사용된 총 전력 레벨에 비해 더 낮다. 본 명세서에 전반적으로 걸쳐 사용된, "감소된 총 전력 레벨"이라는 문구는, 소정 유량으로 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 사용하여 생성된 것과 실질적으로 유사한 빔 전류를 생성하기 위해 동일한 유량으로 농축된 도펀트 기체를 이온 주입하는 것과 연관된, 이온 소스에 입력된 총 전력 레벨을 의미한다. 농축된 도펀트 기체의 유량이 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체의 유량과 실질적으로 동일하게 유지하도록 의도되어, 이온 주입 공정에 걸쳐 플라즈마를 유지하기에 충분한 적어도 최소한의 압력을 달성하고 유지하는 것을 보장한다. 이러한 방식으로, 기체 유량을 유지하는 것은 이온 소스의 불안정성을 방지한다. 일반적으로, 총 전력 레벨이 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체와 함께 사용된 전력 레벨과 비교해 감소한 비율은 5 내지 30 % 범위일 수 있다. 농축된 도펀트 기체에 이용가능하게 되는 알짜 총 전력 입력이 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 활용하는 경우와 실질적으로 동일한 양의 생성된 도펀트 이온을 유지하는 레벨로 감소하도록, 감소된 총 전력 레벨을 선택한다. 특정한 감소된 총 전력 레벨은, 특정한 도펀트 기체의 이온화 효율, 그 농축 레벨 및 유량을 포함하는, 수많은 변수의 함수로 결정된다.

[0022] 감소된 총 전력 레벨에서 작동시킴으로써, 농축된 도펀트 기체의 이온화 효율이 제어된 양으로 낮아져서 미농축된 도펀트 기체로 이전에 검정했던 경우와 실질적으로 동일한 이온 빔 전류를 유지한다. 즉, 이온 소스에 입력된 감소된 총 전력 레벨은 직접 또는 간접적으로 농축된 도펀트 기체의 이온화 효율을 의도적으로 감소시키도록 설계된다. 이온화 효율은 농축된 도펀트 기체와 충돌하고 상호작용하는 캐소드로부터 방출된 전자의 수 및 전자의 에너지에 따라 달라진다. 농축된 기체는 단위 유량 부피당 더 많은 도펀트 원자 종을 함유하기 때문에, 감소된 이온화 효율로 생성된 농축된 도펀트 이온의 수는 덜 농축된 또는 미농축된 기체를 사용하는 경우와 동일하거나 실질적으로 유사하게 유지된다. 이러한 방식으로, 미농축된 또는 덜 농축된 도펀트 기체로 이전에 검정된 것과 같은 빔 전류가 유지된다.

[0023] 일부 적용분야에서는, 평균 이온화 효율이 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 비해 3배만큼 감소할 수 있다. 정확한 이온화 효율은 도펀트 기체의 유형 및 그 도펀트 기체의 농축 레벨에 따라 적어도 부분적으로 달라질 것이다. 본 발명은 농축된 도펀트 기체가 플루오린 함유 기체인 경우 특히 유리한데, 이는 챔버에 유리 플루오린(free fluorine)이 덜 도입됨으로써, 할로젠 사이클에서 발생하는 역효과를 감소시키기 때문이다. 예컨대, 질량 72 게르마늄 동위원소가 자연 존재량 레벨인 27 %에서 70 %의 농축된 레벨로 농축된, 72GeF4와 같은 플루오린 함유 도펀트 기체를 활용하는 이온 주입 공정은, 2.5배로 감소한 이온화 효율을 가질 수 있지만 여전히 미농축된 GeF4로 검정한 것과 같은 빔 전류를 유지할 수 있다.

[0024] 이온 소스에 대한 입력 총 전력을 감소시키기 위한 많은 수단들이 고려된다. 일 실시양태에서, 소스 필라멘트 자체에 입력된 전력이 감소한다. 본 발명의 원리에 따라, 더 낮은 전력 레벨에서는, 더 적은 전자가 캐소드로부터 방출됨으로써, 농축된 도펀트 기체가 덜 이온화되는 결과를 가져온다. 사용자는 바람직하게는 이온 주입이 수행되는 기결정된 필라멘트 전력을 선택함으로써 공정 중에 생성되는 소정 이온의 양을 제어할 수 있다. 농축된 도펀트 기체의 유량이 미농축된 또는 덜 농축된 도펀트 기체의 유량과 실질적으로 동일하게 유지되어 플

라스마를 유지하기에 충분한 최소 압력을 보장한다. 필라멘트 전력이 감소하여 농축된 도펀트 기체의 이온화 효율을 감소시킴으로써, 고농축된 도펀트 기체로부터 생성된 도펀트 이온의 수를 미농축된 또는 덜 농축된 도펀트 기체의 그것과 유사하게 유지시킨다. 그 결과로서, 빔 전류는 변하지 않은 채로 유지된다. 전형적인 필라멘트 전력 레벨은 100 내지 1000 W, 바람직하게는 200 내지 500 W 그리고 더욱 바람직하게는 150 내지 350 W의 범위일 수 있다. 최적의 필라멘트 전력 레벨은 이온 주입 공정에서 활용된 특정 도펀트 기체 및 도펀트 기체의 농축 정도에 따라 적어도 부분적으로 달라질 것이다. 예컨대, 일 실시양태에서, 감소된 전력으로 작동하는 중에는, 덜 농축된 또는 미농축된 아날로그의 경우에서와 변하지 않은 유량으로 58 내지 75 %로 농축된 동위원소로 고농축된 도펀트 기체  $^{72}\text{GeF}_4$ 를 이온 주입한 경우, 필라멘트 전력은 175 내지 350 W의 범위로 유지될 수 있다.

[0025] 나아가, 본 발명의 원리에 따라, 캐소드의 온도 및 대응하는 캐소드로부터 방출된 전자의 수를 감소시키기 위해 바람직하게는 기결정된 더 낮은 전력에서 필라멘트를 작동시키는 것이 수행된다. 더 낮은 필라멘트 작동 및 캐소드 온도는 직접적으로 이온 챔버의 텅스텐 챔버 벽의 온도를 낮춘다. 텅스텐 챔버 벽의 온도가 더 낮아져서 할로겐 사이클의 반응 속도를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 특히, 더 낮은 온도에서는 휘발성 WFx 종을 형성하는 활성 플루오린의 반응에 의해 발생하는 텅스텐 벽 에칭속도가 감소된다. 챔버 벽 부식이 유의하게 감소함으로써 플라즈마 상(phase)에서 생성된 휘발성 WFx 종의 알짜량이 감소한다. 이렇게 감소된 필라멘트 및 캐소드 온도에서는, 캐소드의 표면상에서 WFx가 환원하여 W가 재침착하는 속도가 감소한다. 따라서, 할로겐 사이클의 더 느린 반응 속도는 필라멘트 상의 텅스텐 침착을 최소화함으로써, 미농축된 또는 덜 농축된 도펀트 기체의 경우에서 이전에 검정된 것과 동일한 빔 전류를 여전히 유지하면서, 이온 소스 수명을 연장시킨다. 챔버 벽의 플루오린 공격 및 캐소드 상의 W 재침착은 이온 소스 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서, 작동 필라멘트 온도를 감소시키고 감소된 이온화 효율을 생성하기에 충분한 낮은 전력으로 작동시키는 것을 통해, 이점으로서 미농축된 또는 덜 농축된 도펀트 기체의 경우에서 검정된 것과 동일한 빔 전류를 여전히 제공하면서, 이온 소스 수명을 개선 및 연장시킬 수 있다.

[0026] 본 발명은 소스 필라멘트의 온도와 캐소드로부터 방출된 전자의 수의 관계를 활용하여 생성된 도펀트 이온의 전체 수를 제어한다. 특히, 소스 필라멘트는 열전자 방출 온도(thermionic emission temperature)로 온도를 높이기 위해 캐소드 또는 캐소드 컵(cup)을 향해 가속되는 전자를 생성하는 것과 관계된다. 캐소드에서 생성된 전자는 아르 챔버로 도입된 동위원소로 농축된 도펀트 기체와 상호작용하고 충돌하여 여러 이온들 및 중성자들을 생성한다. 예컨대, 특정한 안정 동위원소 중 하나로 농축된 GeF4의 경우, 생성된 이온들 및 중성자들은  $\text{Ge}^+$ ,  $\text{F}^+$ ,  $\text{GeF}_2^+$ ,  $\text{GeF}^+$ ,  $\text{F}_2^+$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{GeF}_2$  등을 포함할 수 있다. 뜨거운 캐소드로부터의 방출 전류 밀도(즉, 캐소드로부터 생성되어 방출될 수 있는 전자의 수)는 그 온도와, 아래와 같은, 리처드슨-더쉬먼 방정식(Richardson-Dushman equation)에 의해 관련지어진다:

[0027] 
$$J_e = AT^2 \exp(-\phi/kT) \text{-----} (1)$$

[0028] 여기서  $J_e = \text{amps/cm}^2$  단위의 전자 방출 전류 밀도;

[0029]  $A = \text{상수}(120 \text{ amps/cm}^2/\text{K}^2)$ ;

[0030]  $T = \text{K}$  단위의 캐소드 온도;

[0031]  $\phi = \text{eV}$  단위의 캐소드 일함수; 및

[0032]  $k = \text{볼츠만 상수}(11,600 \text{ eV/K})$ .

[0033] 위 방정식은 캐소드로부터 생성되어 방출될 수 있는 전자의 수(즉, 방출 전류 밀도)가, 소스 필라멘트에 의해 가열되는, 캐소드의 온도와 직접적으로 관련된다는 것을 보여준다. 캐소드의 온도를 낮춤으로써, 더 적은 수의 전자가 위에 보여진 방식으로 생성되고, 이는 캐소드로부터 생성된 전자와의 상호작용 및 충돌로 생성될 전체 농축된 도펀트 기체 이온이 더 적어진다는 것이라고 할 수 있다. 이러한 방식으로, 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체로 생성된 것에 비해 동일한 빔 전류를 유지하기 위해, 본 발명은 소스 필라멘트의 온도 및 전력 레벨을 감소시키는 것이 더 적은 도펀트 기체 이온을 생성하는 것이라는 점을 인식한다.

[0034] 캐소드 온도가 감소한다는 것은 이온 소스 챔버 벽의 작동 온도가 더 낮아진다는 것이라고 할 수 있다. 가장 차가운 지역 및 가장 뜨거운 지역에서의 이온 소스 챔버 벽의 작동 온도에 대한 전형적인 범위는 어디서든지 각각 500 °C 내지 1100 °C의 범위일 수 있다. 다른 실시양태에서, 온도는 400 °C 내지 900 °C의 범위일 수 있다.

일반적으로, 고농축 레벨의 도펀트 기체는 이전에 검정된 것과 같은 빔 전류를 유지하기 위해 더 낮은 이온화 효율(즉, 소정 유량의 농축된 도펀트 기체를 이온화시키기 위한 에너지가 더 적다)을 필요로 할 것이고, 그럼으로써 이온 소스의 온도를 감소시킨다. 최적의 온도는 이온 주입 공정에서 활용되는 특정 도펀트 기체, 도펀트 기체의 농축 정도 및 할로겐 사이클에 대해 알려진 반응 속도에 따라 적어도 부분적으로 달라질 것이다. 예컨대, 일 실시양태에서, 대응하는 덜 농축된 레벨의 도펀트 기체를 활용하는 경우로부터 변하지 않은 소정 유량에 대해 약 75 % 농축된 동위원소로 고농축된 도펀트 기체  $72\text{GeF}_4$ 를 이온 주입하는 경우, 상술한 바와 같은 기결정된 감소된 전력 설정 하에, 가장 추운 곳에서 가장 뜨거운 지역으로의 감소된 작동 온도는 각각  $400\text{ }^\circ\text{C}$  내지  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 의 범위로 유지될 수 있다. 텅스텐 챔버 벽의 더 낮은 온도는 할로겐 사이클의 속도를 감소시킴으로써, 이온 소스 수명을 연장시킨다.

[0035] 이온 소스에 대한 총 전력을 감소시키기 위한 다른 수단들이 본 발명에 의해 고려된다. 예컨대, 다른 실시양태에서, 더 낮은 캐소드 온도 하에 작동시키는 것과 유사한 효과가 필라멘트와 캐소드 사이의 바이어스(bias) 전압을 감소시킴으로써 달성될 수 있다. 농축된 도펀트 기체의 유량은 플라즈마를 유지하기에 충분한 최소 압력을 보장하기 위한 미농축된 도펀트 기체의 유량과 실질적으로 동일하게 유지된다. 바이어스 전압은  $100\text{ V}$  내지  $600\text{ V}$  사이의 범위일 수 있다. 다른 실시양태에서 바이어스 전압은  $100\text{ V}$  내지  $575\text{ V}$ , 또는, 다르게는  $100\text{ V}$  내지  $550\text{ V}$ 의 범위로 감소될 수 있다.

[0036] 본 발명의 또 다른 실시양태에서, 이온 챔버 내의 아크 전압이 기결정된 양으로 낮춰져서 이온 소스에 입력된 총 전력을 감소시킬 수 있다. 본 명세서에서 사용된 "아크 전압"은 캐소드와 챔버 벽 사이의 전위차로서 정의된다. 기결정된 양만큼 아크 전압을 감소시킴으로써, 캐소드로부터 생성된 전자에 가해지는 에너지가 감소한다. 기결정된 양만큼 아크 전압을 적절히 감소시키는 것은 바람직하게는 플라즈마의 이온화 효율을 낮춘다. 본 실시양태에서, 플라즈마의 더 낮은 이온화 효율은 더 적은 이온의 생성 및 생성된 이온 각각에 대한 에너지의 감소라는 결과를 가져온다. 고농축된 도펀트 기체로부터 생성된 도펀트 이온의 양이 대응하는 미농축된 또는 덜 농축된 도펀트 기체로부터 생성된 대응하는 도펀트 이온의 수와 실질적으로 동일하게 유지되는 반면, 생성된 활성 플루오린의 알짜량(이온 및 중성자 포함)은 더 적다. 플루오린이 할로겐 사이클의 발생에 있어서 전구체에 해당하기 때문에, 플라즈마 상(phase)에서의 더 낮은 플루오린 농도는 할로겐 사이클이 덜 발생하는 결과를 가져오고, 그럼으로써 이온 소스의 수명을 개선 및 연장시킨다. 본 발명의 아크 전압은  $50\text{ V}$  내지  $150\text{ V}$ 의 범위일 수 있다. 다른 실시양태에서, 아크 전압은  $50\text{ V}$  내지  $140\text{ V}$  범위일 수 있다. 또 다른 실시양태에서, 아크 전압은  $50\text{ V}$  내지  $120\text{ V}$  또는  $70\text{ V}$  내지  $110\text{ V}$  범위일 수 있다. 도펀트 기체의 유형 및 그 농축 레벨에 적어도 부분적으로 기초하여 적절한 아크 전압이 결정될 것이다. 일반적으로, 더 낮은 작동 아크 전압이 고농축 레벨의 도펀트 기체에서 가능하다.

[0037] 본 발명의 원리에 따르면, 소정 유량에 대해서, 농축된 도펀트 기체에 공급된 알짜 총 전력은 아크 전압, 아크 바이어스 및 필라멘트 소스의 입력 전압으로부터 결정된다. 본 발명에 따른 소정 유량에 대한 세 가지 작동 파라미터 각각의 신중한 선택을 통해 다양한 농축된 도펀트 기체를 활용하여 연장된 이온 소스 수명을 달성할 수 있게 한다. 예컨대, 세 가지 파라미터 중 하나가 감소되어 전체 총 전력을 낮출 수 있다. 또는, 세 가지 파라미터 각각이 약간 감소되어 전체 총 전력을 낮출 수 있다. 두 실시예들 모두에서, 총 전력 레벨이 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 대해 활용되는 총 전력 레벨에 비해 감소될 수 있다. 알짜 총 전력을 감소시키는 것은 농축된 도펀트 기체의 이온화 효율을 감소시켜 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체를 사용하여 생성되는 것과 같은 빔 전류를 유지함으로써, 미농축된 및 농축된 도펀트 기체의 유량이 두 경우 모두에서 변하지 않은 채로 있게 된다.

[0038] 다양한 도펀트 기체가 본 발명을 수행하는 데 사용될 수 있다. 설명된 도펀트 기체는  $\text{BF}_3$ ,  $\text{GeH}_4$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$  및  $\text{BCl}_3$ 을 포함한다. 다수의 안정한 동위원소들을 함유하는 다른 도펀트 기체도 또한 사용할 수 있다. 바람직한 실시양태에서, 도펀트 기체는 Ge 이온을 주입하기 위한,  $\text{GeF}_4$ 와 같은, 플루오린 함유 기체이다. Ge 도펀트 종의 임의의 농축 레벨이 고려된다. 가능한 농축 레벨의 예들에는, 50 % 초과, 55 % 초과, 60 % 초과, 70 % 초과, 80 % 초과 또는 90 % 초과인  $72\text{GeF}_4$ 를 포함하지만, 위에 열거된 예에 제한되지 않는다. 농축된  $\text{GeF}_4$  및 다른 동위원소로 농축된 도펀트 기체는, 유렌코®(Urenco®)와 같은, 다양한 제조 공급업체로부터 상업적으로 입수 가능하다. 사용된  $\text{GeF}_4$  또는 다른 도펀트 기체의 농축 레벨은 파라미터의 조합에 기초하는데, 그 중 일부는 도펀트 기체의 유량, 필요한 주입 투여량 레벨, 이온 소스의 안정성을 유지하는 데 필요한 최소 유량뿐만 아니라 작동 총 전력 레벨 및 캐소드의 온도를 포함할 수 있다.  $\text{GeF}_4$ 의 소정 농축 레벨에 대해, 이전에 검정된 레벨에서 벗어나지 않는 빔 전류를 유지하기 위해, 총 전력 및 이온 소스 온도가 바람직하게는 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체로 작동시키는 경우에 활용되는 레벨에 비해 기결정된 양으로 감소되어야 한다.

- [0039] 농축된 GeF<sub>4</sub> 및 다른 플루오린 함유 기체에 대해서, 더 낮은 온도에서 필라멘트 또는 캐소드를 작동시키는 것은 텅스텐 챔버 벽의 온도를 낮추고, 그럼으로써 활성 플루오린 이온을 통한 챔버 벽의 공격을 감소시킨다. 그 결과로서, 더 적은 WF<sub>x</sub> 종이 플라즈마 상으로 생성된다. 또한 감소된 캐소드 온도에서, 캐소드 상에서 WF<sub>x</sub>가 환원하여 W를 재침착하는 반응 속도 또한 감소한다. 더 적은 전체 WF<sub>x</sub>가 캐소드 소스 필라멘트 상에 원소 W로서 재침착하고, 그럼으로써 이온 소스의 수명을 연장시키게 한다.
- [0040] 일 실시양태에서, 72GeF<sub>4</sub>는 55 % 내지 70 %의 농축 레벨로 선택된다. 55 % 내지 70 %의 농축 레벨인 72GeF<sub>4</sub>를 감안하면, 그리고 대응하는 미농축된 도펀트 기체를 활용하는 경우와 동일한 범위의 유량(예컨대, 1 내지 3 sccm 범위의 유량)을 유지하면, 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 도펀트 기체에 활용된 입력 총 전력 레벨에 비해 5 내지 20%의 비율로 전력 레벨이 감소할 수 있다. 일반적으로, 더 높은 농축 레벨에서는 농축된 도펀트 기체의 이온화 효율을 감소시키기 위해 전력 레벨의 더 큰 감소를 필요로 할 것이다. 또는, 유량이 1 내지 3 sccm 범위인 경우에서 대응하는 덜 농축된 또는 미농축된 72GeF<sub>4</sub> 도펀트 기체에 대해 활용된 입력 총 전력 레벨에 비해 입력 총 전력 레벨이 5 내지 15 % 감소한, 72Ge가 55 내지 60 %로 농축된 72GeF<sub>4</sub>가 활용될 수 있다. 또 다른 실시양태에서, 약 58 %로 농축된 72GeF<sub>4</sub>를 1 내지 3 sccm으로 이온 챔버 내에 흐르게 하는 경우, 약 200 내지 400 W, 바람직하게는 200 내지 375 W, 및 더욱 바람직하게는 200 내지 350 W의 범위일 수 있는 감소한 소스 필라멘트에 대한 입력 전력으로 동작함으로써, 입력 총 전력 레벨이 감소할 수 있다.
- [0041] 다른 실시양태에서, 72Ge가 58 % 이상으로 농축된 72GeF<sub>4</sub>가 선택되고, 200 내지 500 W의 감소된 필라멘트 전력 레벨이 선택되어 챔버 벽이 400 °C 내지 900 °C 범위의 감소된 온도를 가지게 되고 유량은 1 sccm 내지 3 sccm의 범위에 있다.
- [0042] 다른 실시양태에서, 고농축된 레벨의 72GeF<sub>4</sub>가 본 발명의 원리에 따라 선택될 수 있다. 예컨대, 70 % 초과 및 80 % 미만의 농축 레벨을 사용할 수 있다. 70 % 내지 80 %의 농축 레벨인 72GeF<sub>4</sub>를 이온 주입하고, 이온 소스 챔버 내로 대응하는 미농축된 또는 덜 농축된 GeF<sub>4</sub> 도펀트 기체를 활용하는 경우와 동일한 범위의 유량(예컨대, 1 내지 3 sccm)을 유지하면, 20 % 내지 30 %의 비율로 전력 레벨이 감소할 수 있다. 소스 필라멘트에 공급되는 실제 전력은 약 175 내지 350 W, 바람직하게는 175 내지 325 W, 및 더 바람직하게는 175 내지 300 W의 범위일 수 있다.
- [0043] 감소된 전력 레벨은 바람직하게는, 72Ge의 필요한 주입 투여량을 달성하도록 농축된 72GeF<sub>4</sub>를 적절히 이온화시키기 위해 가해지는 에너지를 충분히 유지하지만 할로젠 사이클 효과가 최소화되게 하는 방식으로 챔버 벽 및 소스 필라멘트 온도를 낮추기에 충분할 만큼 낮게 선택된다. 그 결과, 농축된 72GeF<sub>4</sub>를 사용하는 경우 할로젠 사이클에 의한 이온 소스 챔버 내의 원치 않았던 침착이 감소할 수 있다. 기존 공정과는 달리, 본 발명은 더 고농축된 도펀트 기체를 사용하는 경우에 농축된 도펀트 기체의 유량을 감소시키지 않고도 이온 소스의 수명을 연장시키게 한다.
- [0044] 기체 소비를 감소시키는 것이 주요한 설계 목표라면, 동위원소로 농축된 도펀트 기체의 감소된 유량이 안정화 기체와 함께 챔버 내로 도입될 수 있음을 이해해야 한다. 안정화 기체의 예시적인 실시예들로는 아르곤, 크립톤, 크세논, 수소, 다양한 다른 불활성 기체 및 이들의 조합을 포함하지만 위에 열거된 예들에 제한되지 않는다. 안정화 기체는 기체의 총 최소 유량을 적어도 플라즈마를 유지하기 위해 이온 소스 내의 최소 압력을 유지하는 데 필요한 최소한의 임계값까지 증가시킨다. 챔버 내로 도입된 농축된 도펀트 기체의 더 낮은 유량에 응답하여, 이온 소스에 입력된 총 전력 레벨은 동일하게 농축된 도펀트 기체(예컨대, 58 % 72GeF<sub>4</sub>)의 유량이 감소하지 않은 이전 실시양태들에서 설명한 것보다 약간 더 높게 설정될 수 있다. 이러한 방식으로, 상대적으로 약간 더 높은 전력은 제어 방식으로 도펀트 기체(예컨대, 58 % 72GeF<sub>4</sub>)의 이온화 효율을 증가시켜 감소한 유량에 의해 챔버 내로 도입된 72Ge 도펀트 중의 감소된 수를 조정(offset)한다. 이처럼, 생성된 72Ge 이온의 총 수는 일정하게 유지되어, 검정된 것과 같은 빔 전류가 이온 주입 공정 중에 달성 및 유지되는 것을 가능하게 한다. 이러한 기술은 동등한 주입 투여량을 수행하는 데 더 적은 기체 소비가 될 수 있게 한다. 일 실시예에서, 질량 72Ge가 58 %로 농축된 레벨에서의 72GeF<sub>4</sub> 0.7 sccm이, 안정화 기체 없이 1 sccm에서의 58 % 72GeF<sub>4</sub>에 사용되는 감소된 전력 레벨에 비해 약간 증가한(예컨대, 1 내지 10 %) 전력 레벨에서 안정화 기체(예컨대, 아르곤) 0.3 sccm과 공동 유입될 수 있다. 또는, 불활성 기체 0.3 sccm과 함께 58 % 72GeF<sub>4</sub> 0.7 sccm을 이온화하는 경우의 전력 레벨이, 챔버 내에 약 1 sccm으로 도입되는 예컨대 50 %의 대응하는 덜 농축된 72GeF<sub>4</sub>에 사용되는 전력 레벨과 실질적으로 동일한 레벨로 증가할 수 있어서, 72Ge 이온이 두 경우 모두에서 동일한 양으로 생성된다. 도펀트 기체, 도펀트 기체의 농축 레벨, 농축된 도펀트 기체의 유량, 안정화 기체의 선택, 안정화 기체의 유량, 이온 소스 챔버의 온도 및 이온 소스에 입력된 총 전력 레벨을 포함하지만 위에 열거된 예에 제한

되지 않는, 다양한 주요 설계 변수의 특정 조합은 이들은 이온 소스의 수명에 영향을 미칠 수 있다.

[0045] 본 발명의 원리에 따르면, 안정화 기체 없이 농축된 도펀트 기체에 대한 유량은 적어도 이온 소스의 안정성을 유지하기 위한 하한선 이상으로 유지되어야 하지만, 이온 소스 챔버 내의 압력이 부당하게 높아져서 재조합 반응이 일어날 수 있게 되는 상한선 위로 초과하지 않아야 한다. 특히, 도펀트 이온은 중성자상 화합물을 형성하기 위해 재조합하는 경향이 있다. 알짜 효과는 생성된 이온의 전체 수가 감소하는 것일 수 있는데, 이는 비교적으로는 감소된 빔 전류가 필요한 투여량을 달성하기 위한 주입을 가능하게 한다는 것이라고 할 수 있다. 추가적으로, 농축된 도펀트 기체가 72GeF4와 같은 플루오린 함유 기체라면, 상한선을 초과하는 유량에서 작동시키는 것은 이온 챔버에 과도한 플루오린을 도입하고, 그럼으로써 할로겐 사이클 효과를 악화시키고 소스 수명을 단축시킨다. 일반적으로, 유량의 상한선은 5 sccm을 초과하지 않아야 한다. 플루오린 함유 기체를 사용하면 5 sccm 이하로 작동시키는 것이 할로겐 사이클 효과의 가속을 억제할 수 있다. 따라서, 최적의 이온 주입 공정은 바람직하게는, 이온 소스의 불안정성을 극복하기 위해 1 sccm 이상 및 재조합 반응 및 빔 전류 감소를 방지하기 위해 5 sccm 이하의 유량의 농축된 레벨의 도펀트 기체를 사용한다. 바람직한 실시양태에서, 설명한 바와 같은 감소된 전력 레벨에서 작동되는 경우 72Ge가 75 % 이상으로 농축된 72GeF4에 대해 유량은 1 내지 3 sccm의 범위를 갖는다. 유량의 하한과 상한 사이에서 농축된 기체의 적절한 유량을 선택하는 것은, 전술했던 다양한 주요 공정 파라미터를 포함하여, 특정 이온 주입 공정 자체에 따라 달라질 것이다.

[0046] 임의의 감압 저장장치 및 진공 구동 전달 장치가 농축된 도펀트 기체를 저장하고 전달하기 위해 활용될 수 있음을 이해해야 한다. 바람직한 실시양태에서, 프랙스에어®(Praxair®)에서 상업적으로 입수가능하고, 본 명세서에 그 전체가 참조로서 인용되는 미국 특허 제5,937,895호; 제6,045,115호; 제6,007,609호; 제7,708,028호, 및 제7,905,247호에 개시된, 업타임®(Uptime®) 전달 장치가 본 발명에 사용되어 농축된 도펀트 기체의 제어된 유량을 이온 소스에 안전하게 전달할 수 있다. 압력 조건이 감압 조건을 달성하는 경우, 전달 장치는 밀폐된 농축된 도펀트 기체가 실린더로부터 유체 배출 라인을 통해 이온 기기로 흐르도록 하게 한다.

[0047] 도 1 및 2를 참조하면, 본 발명의 원리에 따른 예시적인 이온 주입 기기(100)가 도시된다. 특히, 일 실시예에서, 도 1의 이온 소스 기기(100)는 반도체 기판에 72Ge 이온을 주입하기 위한 전자 빔을 생성하는 데 사용될 수 있다. 72Ge 이온은 72Ge가 55 % 이상으로 농축된 72GeF4의 이온화로부터 생성된다. 농축된 72GeF4는 바람직하게는 스트림(102)으로서 감압 저장장치 및 전달 용기(201)(도 2)로부터 유입 라인(113)을 통해 챔버(103)로 도입된다. 스트림(102)은 약 1 내지 5 sccm, 또는 더 바람직하게는 1 내지 3 sccm 범위의 유량으로 도입될 수 있다. 이온 소스(100)에 입력된 총 전력 레벨은 덜 농축된 또는 미농축된 GeF4 도펀트 기체와 함께 활용되는 총 전력 레벨에 비해 감소한다. 일반적으로, 더 높은 농축된 레벨의 72GeF4를 활용하는 것은 이온 소스(100)에 입력된 총 전력 레벨이 더 감소하여 챔버(113) 내로 흐르는 단위 유량 당 생성된 72Ge 이온의 수를 감소하게 하는 것을 필요로 할 것이다.

[0048] 도 1에 도시된 이온 소스(100)는 농축된 72GeF4를 그 대응하는 이온으로 이온화하는 이온 소스로서 역할하는 이온 소스 필라멘트(114) 및 간접 가열 캐소드(IHC)(115)를 포함하는 다양한 구성요소를 가진다. 예컨대, 프리먼 소스(Freeman source), 버나즈 소스(Bernas source) 및 RF 플라즈마 소스를 포함하는, 본 발명이 속하는 기술 분야에 알려져 있는 이온 소스의 다른 적절한 유형이 사용될 수 있음을 이해해야 한다.

[0049] 전원 공급 소스(미도시)는 캐소드(115) 가까이 위치된 텅스텐 기체 필라멘트(114)를 저항적으로 가열한다. 필라멘트(114)는 캐소드(115)에 대해 음극으로 바이어스될 수 있다. 전류가 전원 공급 소스를 통해 필라멘트(114)에 인가되어 필라멘트(114)를 저항적으로 가열한다. 절연체(118)가 아크 챔버 벽(111)으로부터 캐소드(115)를 전기적으로 절연시키기 위해 제공된다. 감소된 전력 레벨이 바람직하게는 캐소드(115)의 온도를 낮추지만 농축된 72GeF4의 적절한 이온화를 유지하여 72Ge의 필수 주입 투여량을 달성하도록 선택된다. 이온 챔버(112) 벽 및 소스 필라멘트(114)의 온도 또한 감소함으로써, 할로겐 사이클에서 발생하는 역효과를 완화시킨다.

[0050] 전력 및 온도가 감소함으로써 더 적은 전자가 캐소드(115)로부터 생성되게 되고 이는 캐소드(115)로부터 생성된 전자와의 상호작용 및 충돌로 생성되는 전체 72Ge 이온이 더 적다고도 말할 수 있다. 캐소드(115)는 또한 더 낮은 에너지를 가진 전자를 더 적게 생성한다. 이러한 방식으로, 대응하는 덜 농축된 GeF4(예컨대, 농축된 GeF4에서 50 내지 52 %로 농축된 72Ge) 또는 미농축된 GeF4(즉, 미농축된 GeF4에서 27 % 자연 존재량 레벨로 자연적으로 발생한 72Ge)에서와 동일한 빔 전류가 생성됨으로써, 챔버(113) 내에 더 적은 유리 플루오라이드 이온이 생성되고 텅스텐 챔버 벽을 따라 온도가 더 낮아진 결과로 이온 소스(100)의 수명이 연장될 수 있다.

[0051] 계속하여 도 1을 참조하면, 캐소드(115)로부터 방출된 전자가 가속하고 농축된 72GeF4를 이온화하여 챔버(112) 내에서의 플라즈마 환경을 생성한다. 1 내지 3 sccm의 유량은 이온 주입 공정 중에 챔버(112) 내의 플라즈마의

안정성을 유지하기에 충분하도록 매우 높다. 반사 전극(116)은 음극 전하를 구축하여 농축된 72GeF4 쪽으로 전자들을 반발시켜서 충돌시키게 하고 농축된 72GeF4의 이온화를 지속시킨다. 이러한 방식으로, 이온 소스(100)의 안정성을 유지하기에 충분하게 유지되는 압력에서 플라즈마 환경이 아크 챔버(112) 내에 유지된다.

[0052] 반사 전극(116)은 바람직하게는 캐소드(115)의 실질적으로 정반대에 구성되어 챔버(112) 내에서 농축된 72GeF4의 이온화를 유지시킨다. 아크 챔버 벽(111)은 잘 규정된 이온 빔(121)이 이를 통해 아크 챔버(112) 밖으로 추출되는 추출 개구(117)를 포함한다. 추출 시스템은 추출 개구(117)의 전면에 위치한 추출 전극(120) 및 억제 전극(119)을 포함한다. 추출 및 억제 전극(120 및 119)은 둘 다 잘 규정된 이온 빔(121)의 추출을 위한 추출 개구(117)와 정렬된 각각의 개구를 가지고 있다.

[0053] 도 2는 빔 라인 이온 주입 시스템(200)에 통합된 도 1의 이온 소스 기기(100)를 도시한다. 55 % 이상으로 농축된 72GeF4가 기체 박스(201)로부터 도입된다. 농축된 72GeF4는 설명했던 바와 같이 에너지가 챔버에 도입되는 이온 소스 챔버(100)에 도입되어 72GeF4를 이온화한다. 질량 유량 제어기 및 밸브를 포함하는 유량 제어 장치(219)가 사용되어 농축된 도펀트 기체의 흐름을 원하는 유량인 1 내지 3 sccm으로 제어한다.

[0054] 덜 농축된 72GeF4 또는 미농축된 GeF4로부터 생성된 빔과 유사하게 유지되는 원하는 전류로 원하는 72Ge 이온 빔을 생성하면, 이온 빔 추출 시스템(201)이 사용되어 원하는 에너지의 이온 빔(121)의 형태로 이온 소스 챔버(113)으로부터 이온을 추출한다. 추출 전극에 걸쳐 높은 전압을 인가함으로써 추출을 수행할 수 있다. 추출된 빔(221)은 질량 분석기/필터(205)를 통해 전송되어 주입될 72Ge 종을 선택한다. 이어서 필터링된 이온 빔(207)이 가속/감속되고(206) 워크피스(209)에 72Ge 도펀트 원자 종을 주입하기 위해 엔드 스테이션(210) 내에 위치한 타겟 워크피스(209)의 표면에 전송된다. 빔의 72Ge 이온은 원하는 전기적 및 물리적 특성을 가지는 지역을 형성하기 위해 워크피스(209)의 표면과 충돌하여 특정 깊이로 침투한다.

[0055] 다른 실시양태에서, 55 % 이상의 농축으로 농축된 72GeF4는 약 1 내지 3 sccm의 범위를 가지는 유량으로 도입됨으로써 필라멘트(114)와 캐소드(115) 사이의 바이어스를 감소시킨다. 바이어스 전압은 100 V 내지 600 V 사이의 범위일 수 있다. 이러한 방식으로, 원하는 수의 72Ge 이온을 생성하기 위해 챔버(113) 내의 농축된 GeF4 도펀트 기체(103)에 가해진 알짜 이온화 에너지가 감소하여 검정된 것과 같은 빔 전류를 유지한다. 나아가, 감소된 바이어스 전압은 캐소드(115)의 온도를 더 낮게 만듦으로써, 할로젠 사이클의 역효과를 감소시킨다.

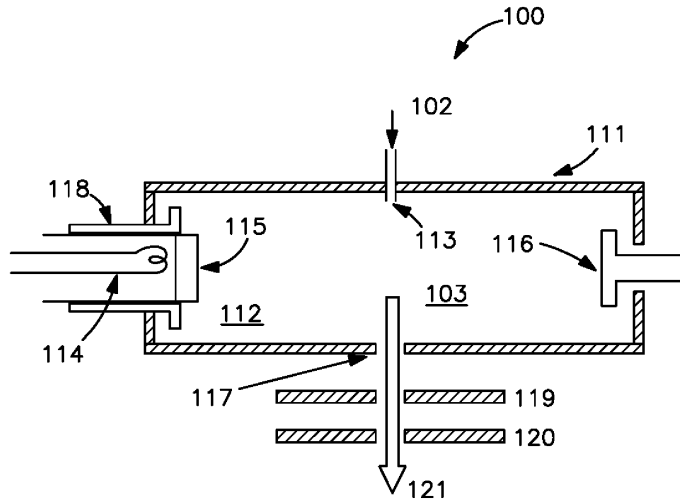
[0056] 또 다른 실시양태에서, 이온 챔버(113) 내의 아크 전압을 기결정된 양으로 낮출 수 있다. 특히, 캐소드(115)와 챔버 벽(111) 사이의 전위차가 감소한다. 일 실시양태에서, 본 발명의 아크 전압은 50 V 내지 150 V의 범위일 수 있다. 기결정된 양만큼 아크 전압을 감소시킴으로써, 캐소드(115)에서 생성된 전자에 가해진 에너지가 감소한다. 아크 전압의 적절한 감소는 바람직하게는 플라즈마의 이온화 효율을 낮춰서 대응하는 미농축된 또는 덜 농축된 72GeF4로부터 생성된 대응하는 72Ge 이온의 수와 실질적으로 동일한 72Ge 이온의 양을 유지한다. 이러한 방식으로, 생성된 활성 플루오린의 알짜량(이온 및 중성자 포함)이 더 적어지고, 할로젠 사이클을 덜 발생하는 결과를 낳게 됨으로써, 이온 소스의 수명을 개선 및 연장시킨다.

[0057] 또는, 아크 바이어스, 아크 전압 및 캐소드(115)에의 입력 전력의 임의의 조합이 감소되어 이온 소스(100)에 입력된 전체 총 전력을 낮출 수 있다는 것을 이해해야 한다. 총 전력 레벨의 감소는 사용자가 농축된 및 고농축된 도펀트 기체를 이온 주입하는 공정의 이점을 실현할 수 있게 한다.

[0058] 본 발명의 특정 실시양태로 간주되는 것이 도시되고 설명되었지만, 물론, 형태 및 세부사항에 있어서 다양한 수정 및 변경이 본 발명의 사상 및 범위를 벗어나지 않고 이루어질 수 있다는 것이 이해될 것이다. 따라서, 본 발명은 본 명세서에 도시되고 설명된 것과 똑같은 형태와 세부사항, 및 본 명세서에 개시되고 이후 청구항에 주장된 본 발명의 전체 범위보다 작은 범위로 제한되지 않을 것을 의도하고 있다.

도면

도면1



이온 소스 기기의 개략도

도면2

