



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년11월19일
(11) 등록번호 10-2328525
(24) 등록일자 2021년11월15일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/02 (2006.01) C30B 23/02 (2006.01)
C30B 25/02 (2006.01) C30B 29/38 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 21/02581 (2013.01)
C30B 23/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2016-7030552
(22) 출원일자(국제) 2015년03월31일
심사청구일자 2020년03월30일
(85) 번역문제출일자 2016년11월01일
(65) 공개번호 10-2017-0005409
(43) 공개일자 2017년01월13일
(86) 국제출원번호 PCT/NZ2015/050039
(87) 국제공개번호 WO 2015/152737
국제공개일자 2015년10월08일
(30) 우선권주장
623339 2014년04월02일 뉴질랜드(NZ)
(56) 선행기술조사문헌
US20080079111 A1*
(뒷면에 계속)
전체 청구항 수 : 총 20 항

(73) 특허권자
나탈리 프랭크
뉴질랜드 6037 웰링톤 처튼 파크 얼레스토크 크레
센트 84에이
릭 벤자민 존
뉴질랜드 5010 로어 허트 와이위투 와이투이 크레
센트 9
(뒷면에 계속)
(72) 발명자
나탈리 프랭크
뉴질랜드 6037 웰링톤 처튼 파크 얼레스토크 크레
센트 84에이
릭 벤자민 존
뉴질랜드 5010 로어 허트 와이위투 와이투이 크레
센트 9
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
제일특허법인(유)

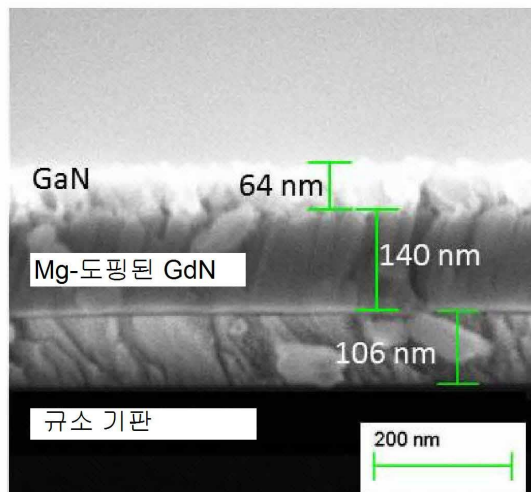
심사관 : 방기인

(54) 발명의 명칭 도핑된 희토류 니트라이드 물질 및 이를 포함하는 장치

(57) 요약

일부가 반-절연성 또는 절연성인 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 본원에 개시된다. 또한, 상기 물질을 제조하는 방법이 개시된다. 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 예를 들면 스핀트로닉스, 전자 및 광전자 장치의 제작에 유용할 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

C30B 25/02 (2013.01)
C30B 29/38 (2013.01)
H01L 21/02192 (2013.01)
H01L 21/02381 (2013.01)
H01L 21/0242 (2013.01)
H01L 21/02433 (2013.01)
H01L 21/02458 (2013.01)
H01L 21/02579 (2013.01)
H01L 21/02631 (2013.01)

(73) 특허권자

트로달 해리 조셉

뉴질랜드 7175 어퍼 모우터 존스톤 루프 27

베지안 스테판 앤지

프랑스 에프-06560 발본느 슈밍 드 라 페이리에르
6

(72) 발명자

트로달 해리 조셉

뉴질랜드 7175 어퍼 모우터 존스톤 루프 27

베지안 스테판 앤지

프랑스 에프-06560 발본느 슈밍 드 라 페이리에르
6

(56) 선행기술조사문헌

S.F.PALGUEV et al., "IONIC CONDUCTIVITY OF
NITRIDES" *

KR1020060007367 A

US20080224238 A1

US20110207337 A1

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

명세서

청구범위

청구항 1

마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질로서, 상기 희토류 니트라이드가 란탄 니트라이드(LaN), 프라세오디뮴 니트라이드(PrN), 네오디뮴 니트라이드(NdN), 사마륨 니트라이드(SmN), 유로퓸 니트라이드(EuN), 가돌리늄 니트라이드(GdN), 터븀 니트라이드(TbN), 디스프로슘 니트라이드(DyN), 홀뮴 니트라이드(HoN), 어븀 니트라이드(ErN), 툴륨 니트라이드(TmN), 이터븀 니트라이드(YbN) 및 루테튬 니트라이드(LuN) 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택되고,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 박막 필름이고, 박막 필름 두께가 1 내지 2000 nm인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 25 Ω·cm 이상의 저항률을 갖는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

10^{18} 내지 10^{21} 개의 원자/cm³의 마그네슘을 포함하는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

하나 이상의 추가적인 도판트(들)를 추가로 포함하는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 70 K 이하에서 강자성(ferromagnetic)인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 비-도핑된 희토류 니트라이드와 실질적으로 동일한 XRD 측정치를 갖는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 박막 필름 두께가 1 내지 1000 nm인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 박막 필름 두께가 10 내지 200 nm인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

청구항 9

(a) 마그네슘 공급원의 존재 하에 희토류 및 질소 공급원을 조합하고 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 침착시키는 단계

를 포함하는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 제조 방법으로서,

상기 희토류 니트라이드가 란탄 니트라이드(LaN), 프라세오디뮴 니트라이드(PrN), 네오디뮴 니트라이드(NdN), 사마륨 니트라이드(SmN), 유로퓸 니트라이드(EuN), 가돌리늄 니트라이드(GdN), 터븀 니트라이드(TbN), 디스프로슘 니트라이드(DyN), 홀뮴 니트라이드(HoN), 어븀 니트라이드(ErN), 툴륨 니트라이드(TmN), 이터븀 니트라이드(YbN) 및 루테튬 니트라이드(LuN) 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 25 Ω·cm 이상의 저항률을 갖는, 방법.

청구항 11

제 9 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 10^{18} 내지 10^{21} 개의 원자/cm³의 마그네슘을 포함하는, 방법.

청구항 12

제 9 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 하나 이상의 추가적인 도판트(들)를 추가로 포함하는, 방법.

청구항 13

제 9 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 70 K 이하에서 강자성인, 방법.

청구항 14

제 9 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 비-도핑된 희토류 니트라이드와 실질적으로 동일한 XRD 측정치를 갖는, 방법.

청구항 15

제 9 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 기판 상에 침착되는, 방법.

청구항 16

제 9 항에 있어서,

(b) 단계 (a)에서 침착된 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 상에 캡핑(capping) 층을 침착하는 단계를 추가로 포함하는 방법.

청구항 17

제 9 항에 있어서,

상기 질소 공급원이 순수한 분자 질소, 암모니아 및 활성 질소의 공급원 또는 이들 중 임의의 둘 이상의 혼합물로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.

청구항 18

제 9 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 0.01 내지 1 nm/초의 속도로 침착되는, 방법.

청구항 19

제 9 항에 있어서,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 주위 온도 또는 상승된 온도에서 침착되는, 방법.

청구항 20

마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 포함하는 장치로서,

상기 희토류 니트라이드가 란탄 니트라이드(LaN), 프라세오디뮴 니트라이드(PrN), 네오디뮴 니트라이드(NdN), 사마륨 니트라이드(SmN), 유클로프뮴 니트라이드(EuN), 가돌리늄 니트라이드(GdN), 터븀 니트라이드(TbN), 디스프로슘 니트라이드(DyN), 홀뮴 니트라이드(HoN), 어븀 니트라이드(ErN), 툴륨 니트라이드(TmN), 이터븀 니트라이드(YbN) 및 루테튬 니트라이드(LuN) 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택되고,

상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 박막 필름이고, 박막 필름 두께가 1 내지 2000 nm인, 장치.

청구항 21

삭제

청구항 22

삭제

청구항 23

삭제

청구항 24

삭제

청구항 25

삭제

청구항 26

삭제

청구항 27

삭제

청구항 28

삭제

청구항 29

삭제

청구항 30

삭제

청구항 31

삭제

청구항 32

삭제

청구항 33

삭제

청구항 34

삭제

청구항 35

삭제

청구항 36

삭제

청구항 37

삭제

청구항 38

삭제

청구항 39

삭제

청구항 40

삭제

청구항 41

삭제

청구항 42

삭제

청구항 43

삭제

청구항 44

삭제

청구항 45

삭제

청구항 46

삭제

청구항 47

삭제

청구항 48

삭제

청구항 49

삭제

청구항 50

삭제

청구항 51

삭제

청구항 52

삭제

청구항 53

삭제

청구항 54

삭제

청구항 55

삭제

청구항 56

삭제

청구항 57

삭제

청구항 58

삭제

청구항 59

삭제

청구항 60

삭제

청구항 61

삭제

청구항 62

삭제

청구항 63

삭제

청구항 64

삭제

청구항 65

삭제

청구항 66

삭제

청구항 67

삭제

청구항 68

삭제

청구항 69

삭제

청구항 70

삭제

청구항 71

삭제

청구항 72

삭제

청구항 73

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 희토류 니트라이드 반도체에 관한 것으로, 더욱 구체적으로, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질(이들 중 일부는 반-절연성 또는 절연성임)에 관한 것이다. 본 발명은 또한 상기 물질의 제조 방법 및 상기 물질을 포함하는 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 희토류는 58(La) 내지 71(Lu)의 원자 번호를 가지며 4f 오비탈이 채워진 원소들, 즉, 란탄(La), 세륨(Ce), 프라세오디뮴(Pr), 네오디뮴(Nd), 프로메튬(Pm), 사마륨(Sm), 유클로프(Eu), 가돌리늄(Gd), 터븀(Tb), 디스프로슘(Dy), 홀뮴(Ho), 어븀(Er), 툴륨(Tm), 이터븀(Yb) 및 루테튬(Lu)을 포함한다. 이들은 원자 구성 $[Xe]6s^2 5d^1 4f^n$ 또는 $[Xe]6s^2 4f^{n+1}$ (여기서 n은 La에 대해 0으로부터 Lu에 대해 14까지 변함)을 갖는다. 이들의 가장 일반적인 이온 전하 상태는 3+이며, 4f 준위가 페르미 에너지에 걸쳐 있다. 이들은 약간 많이 채워진 f-셸 전자 오비탈을 갖는 유일한 안정한 원소들이고, 따라서, 이들은 가장 큰 스핀과 오비탈 모멘트를 갖는 원소들이다. 배향된 고체에서, 이들은 가장 강한 강자성 물질에 기여하며, 이는 강한 영구 자석을 필요로 하는 기술에서 유용하다. 이들은, 그 명칭에도 불구하고, 안정한 핵 동위원소가 없는 프로메튬을 제외하고는, 결코 희박하지 않다.

- [0003] 희토류 니트라이드는 격자 상수가 LaN에 대해 약 5.3Å에서 LuN에 대해 약 4.76Å에 이르는 범위에 있고 시리즈를 통해 총 10%의 차이를 보이고 인접한 원자 종의 니트라이드들 간에는 약 0.7%의 차이를 보이는 면심 입방 NaCl 구조를 형성한다. 희토류 니트라이드는 희토류 시리즈의 화학적으로 유사한 구성원들을 분리하는 데 직면했던 문제들을 기술 개발로 극복한 1960년대에 우선 조사되었다. 희토류 니트라이드는 흥미로운 자기 및 전자 특성을 가지고 있다. 희토류 니트라이드는 전형적으로 1 eV 정도의 광학 밴드갭을 가지고 거의 모두 강자성으로서 성장 조건에 크게 의존하는 시리즈 및 보자력 필드에 걸쳐 크게 변하는 자기 상태를 갖는다. 예를 들어, SmN은 유일하게 공지된 거의 제로 모멘트의 강자성 반도체이고 거대한 보자력 자장을 가지며, GdN은 3배 정도 작은 크기의 보자력 자장을 갖는다.
 - [0004] 희토류 니트라이드는 스핀트로닉스(spintronics), 적외선(IR) 검출기뿐만 아니라 III족 니트라이드 반도체 화합물과의 접촉과 관련된 다양한 적용례에 적용될 수 있다. 예를 들어, 희토류 니트라이드는 스핀-필터 요셉슨(Josephson) 접합 및 전계 효과 트랜지스터 구조의 제조에 사용되어왔다.
 - [0005] 희토류 니트라이드는 또한, 예를 들면, 광전자 장치 및 고 전력 트랜지스터의 제조를 위한 기술적으로 중요한 물질들의 패밀리의 III족 니트라이드 반도체와의 에피택시(epitaxy)-상용성 물질이다. 희토류 니트라이드의 특성은 또한 III족 니트라이드의 그것과 상보적이다. 이러한 두 가지 반도체 물질과 관련된 헤테로접합(heterojunction)은 다중-과장 광 소자 및 스핀 발광 다이오드에 매우 매력적인 특성을 가질 수 있다. 예를 들어, GdN 양자 점은 GaN 터널 접합의 효율을 향상시키는 것으로 나타났다.
 - [0006] 반-절연성 및 절연성 희토류 니트라이드 절연 층은, 특히, 예를 들어 스핀트로닉스, 전자 및 광전자 기기의 제조에, 임의적으로 III족 니트라이드와 조합되어, 유용할 수 있다. 이러한 층은 예를 들어 누설 전류 또는 장치의 무선 주파수 성능의 저하를 방지할 수 있다.
 - [0007] 희토류 니트라이드의 고품질 에피택셜 박막은 초고 진공(UHV)-기반 방법 예를 들면 분자 빔 에피택시(MBE), 펄스-레이저 침착(PLD) 및 DC/RF 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 성장시킬 수 있다. 그러나, 이러한 UHV-기반 방식은 전형적으로, 실온에서 0.05 내지 10 mΩ·cm 정도의 저항률을 갖고, 질소 공공(vacancy)으로부터 유래하며 성장 조건에 따라 달라지는 10²⁰ 내지 10²² cm⁻³ 범위의 배경 전자 캐리어와 관련된 n-형 도핑 농도를 갖는, 의도되지 않게 도핑된 필름을 형성한다.
 - [0008] 따라서, 본 발명의 목적은 상기 단점을 어느 정도 방지하고/하거나 적어도 일반인에게 유용한 선택을 제공하는 것이다.
 - [0009] 본 발명의 또 다른 목적은 단지 예로서 주어지는 하기 상세한 설명으로부터 명백해질 수 있다.
 - [0010] 본원에 포함된 문서, 증서, 물질, 장치, 논문 등에 대한 논의는 본 발명의 내용을 제공하기 위한 목적일 뿐이다. 그러나, 이들 자료 중 일부 또는 전부가 종래 기술의 기재의 일부를 형성하거나 우선일 이전에 존재하는 본 발명과 관련된 분야에서 일반 상식이었음을 인정하는 것으로 간주해서는 안 된다.
- 발명의 내용**
- [0011] 제 1 양태에서, 본 발명은 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공하고, 이때 희토류 니트라이드는 란탄 니트라이드(LaN), 프라세오디뮴 니트라이드(PrN), 네오디뮴 니트라이드(NdN), 사마륨 니트라이드(SmN), 유로퓸 니트라이드(EuN), 가돌리늄 니트라이드(GdN), 터븀 니트라이드(TbN), 디스프로슘 니트라이드(DyN), 홀름 니트라이드(HoN), 어븀 니트라이드(ErN), 툴륨 니트라이드(TmN), 이터븀 니트라이드(YbN) 및 루테튬 니트라이드(LuN) 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
 - [0012] 제 2 양태에서, 본 발명은 (a) 마그네슘 공급원의 존재 하에 희토류 및 질소 공급원을 조합하고 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 침착시키는 단계를 포함하는 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 제조 방법을 제공한다.
 - [0013] 제 3 양태에서, 본 발명은 제 2 양태의 방법에 의해 제조되는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공한다.
 - [0014] 본 발명은 또한 제 2 양태의 방법에 의해 수득가능한 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공한다.
 - [0015] 본 발명은 또한 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 포함하는 장치를 제공한다.
 - [0016] 본 발명은 또한 본원의 명세서에 개별적으로 또는 집합적으로 기재되거나 언급된 부품, 요소 및 특징으로 구성

되도록 그리고 임의의 둘 이상의 상기 부품, 요소 또는 특징들의 일부 또는 모든 조합으로 구성되도록 넓게 특징지어질 수 있으며, 본 발명과 관련된 분야에서 등가인 것으로 공지된 특정 정수들이 본원에 언급되는 경우, 이러한 공지의 등가물은 개별적으로 기재된 것처럼 본원에 포함되는 것으로 간주한다.

- [0017] 또한, 본 발명의 특징 또는 양태가 마쿠쉬(Markush) 그룹 형식으로 기재되는 경우, 당해 분야 숙련자는 본 발명이 또한 임의의 개별적인 구성원 또는 마쿠쉬 그룹의 구성원들의 서브-그룹의 관점에서 기재되고 있음을 알 수 있을 것이다.
- [0018] 본원에 사용된 명사 다음에 이어지는 "(들)"은 상기 명사의 복수 및/또는 단수 형태를 의미한다.
- [0019] 본원에 사용된 용어 "및/또는"은 "및" 또는 "또는" 또는 둘 다를 의미한다.
- [0020] 본원에 사용된 용어 "포함하는"은 "적어도 부분적으로 이루어진"을 의미한다. 용어 "포함하는"을 포함하는 본원 명세서에 있어서의 각각의 문장을 해석할 때, 상기 용어 뒤에 오는 것 또는 것들 외에 다른 특징들이 또한 존재할 수 있다. "포함한다" 등과 같은 관련된 용어는 동일한 방식으로 해석되어야 한다.
- [0021] 본원에 사용된 용어 "반-절연성"은 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 실온에서 약 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 내지 약 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항률을 가짐을 의미한다.
- [0022] 본원에 사용된 용어 "절연성"은 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 실온에서 약 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 초과 저항률을 가짐을 의미한다.
- [0023] 본원에 개시된 숫자 범위(예컨대, 1 내지 10)는 또한 그 범위 내에 있는 모든 유리수(예컨대, 1, 1.1, 2, 3, 3.9, 4, 5, 6, 6.5, 7, 8, 9 및 10)를 포함할 뿐만 아니라 상기 범위 내에 있는 임의의 유리수 범위(예컨대, 2 내지 8, 1.5 내지 5.5 및 3.1 내지 4.7)를 포함하며, 따라서 본원에 명시적으로 개시된 모든 범위의 모든 하위 범위도 본원에 명시적으로 개시된 것으로 의도된다. 이것은 단지 특별히 의도된 것의 단순한 예시일 뿐, 열거된 최소값과 최대값 사이의 수치 값들의 모든 가능한 조합도 유사한 방식으로 본원에 명시적으로 기술되어 있는 것으로 간주해야 한다.
- [0024] 본 발명은 상기 정의된 바와 같이 광범위하지만, 당해 분야 숙련자는 본 발명이 이들에만 국한되지 않으며 본 발명은 또한 본원이 예시하고 있는 실시양태들을 포함함을 이해할 것이다.

도면의 간단한 설명

- [0025] 본 발명은 이하에서 도면을 참조하여 기술한다:
 도 1은, 규소 상에 침착된 AlN 버퍼 층 및 GaN 캡핑 층을 포함하는, 규소 상의 Mg-도핑된 GdN의 층 구조를 나타내는 단면 주사 전자 현미경 사진이다.
 도 2는 Mg-도핑된 GdN 층 및 비-도핑된 GdN 층에 대한 (111) x-선 록킹(rocking) 곡선을 도시한다.
 도 3은, 규소 상에 침착된 AlN 버퍼 층 및 GaN 캡핑 층을 포함하는, 규소 상의 Mg-도핑된 GdN 층의 측정된 이차 이온 질량 분석 마그네슘 프로파일을 도시한다.
 도 4(a)는 Mg-도핑된 GdN 층의 평면내(in-plane) 제로 자계-냉각(zero field-cooled) 자화를 도시한다.
 도 4(b)는 Mg-도핑된 GdN 층의 자계-의존성 자화를 도시한다.
 도 5는 전자 캐리어 농도의 함수로서 Mg-도핑된 GdN 층의 저항률을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0026] 공지의 UHV-기반 방법을 사용하여 반-절연성 및 절연성 희토류 니트라이드 물질을 성장시키기 어렵다. 이러한 UHV-기반 방식은 전형적으로, 에피택셜 시, 실온에서 0.05 내지 10 mΩ·cm 정도의 저항률을 갖고, 질소 공공으로부터 유래하며 성장 조건에 따라 달라지는 10^{20} 내지 10^{22} cm^{-3} 범위의 배경 전자 캐리어와 관련된 n-형 잔류 도핑 농도를 갖는, 의도되지 않게 도핑된 박막 필름을 초래한다.
- [0027] 그러나, 본 발명은 일부가 반-절연성 및 절연성인 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공한다. 또한, 본 발명은 도너(donor) 층을 보충하고 저항률을 증가시키기 위해 억셉터(acceptor) 도판트 중인 마그네슘으로 상기 성장 중인 희토류 니트라이드 물질을 도핑함으로써 상기 물질을 제조하는 방법을 제공한다. 본 발명의 방

법은 n-형으로부터 반-절연성 및 절연성까지 희토류 니트라이드 물질의 전도도를 제어 가능하게 한다.

- [0028] 따라서, 제 1 양태에서, 본 발명은 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공하며, 이때 상기 희토류 니트라이드는 란탄 니트라이드(LaN), 프라세오디뮴 니트라이드(PrN), 네오디뮴 니트라이드(NdN), 사마륨 니트라이드(SmN), 유퀴륨 니트라이드(EuN), 가돌리늄 니트라이드(GdN), 터븀 니트라이드(TbN), 디스프로슘 니트라이드(DyN), 홀뮴 니트라이드(HoN), 어븀 니트라이드(ErN), 툴륨 니트라이드(TmN), 이터븀 니트라이드(YbN) 및 루테튬 니트라이드(LuN) 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0029] 또한, 본 발명은 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공하며, 이때 상기 희토류 니트라이드 물질은 LaN, PrN, NdN, SmN, EuN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN, YbN 및 LuN, 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택되고, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 비-도핑된 희토류 니트라이드 물질에 비해 증가된 저항률을 갖는다.
- [0030] 또한, 본 발명은 반-절연성 또는 절연성 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공하며, 이때 상기 희토류 니트라이드 물질은 LaN, PrN, NdN, SmN, EuN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN, YbN 및 LuN, 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0031] 또한, 본 발명은 약 25 $\Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 저항률을 갖는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공하며, 이때 상기 희토류 니트라이드 물질은 LaN, PrN, NdN, SmN, EuN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN, YbN 및 LuN, 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0032] 또한, 본 발명은 약 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 저항률을 갖는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공하며, 이때 상기 희토류 니트라이드는 LaN, PrN, NdN, SmN, EuN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN, YbN 및 LuN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0033] 또한, 본 발명은 약 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 내지 약 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항률을 갖는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공하며, 이때 상기 희토류 니트라이드는 LaN, PrN, NdN, SmN, EuN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN, YbN 및 LuN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0034] 또한, 본 발명은 약 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 저항률을 갖는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공하며, 이때 상기 희토류 니트라이드는 LaN, PrN, NdN, SmN, EuN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN, YbN 및 LuN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0035] 몇몇 실시양태에서, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 $5 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 저항률을 갖는다. 몇몇 실시양태에서, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 저항률을 갖는다.
- [0036] 대조적으로, 비-도핑된 GdN은 전형적으로 약 $2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항률을 갖는다.
- [0037] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 LaN, PrN, NdN, SmN, EuN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN, YbN 및 LuN으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0038] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 LaN, PrN, NdN, SmN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN 및 LuN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0039] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 LaN, PrN, NdN, SmN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN 및 LuN으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0040] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 NdN, SmN, EuN, GdN, DyN, HoN, ErN 및 YbN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0041] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 NdN, SmN, EuN, GdN, DyN, HoN, ErN 및 YbN으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0042] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 NdN, SmN, GdN, DyN, HoN 및 ErN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0043] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 NdN, SmN, GdN, DyN, HoN 및 ErN으로 이루어진 군으로부터 선택된다.

- [0044] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 희토류 니트라이드 합금이다. 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드 합금은 (Sm,Gd)N, (Gd,Ho)N 및 (Gd,Dy)N으로 이루어진 군으로부터 선택된다. 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드 합금은 (Sm,Gd)N이다. 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드 합금은 (Gd,Ho)N이다. 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드 합금은 (Gd,Dy)N이다.
- [0045] 몇몇 실시양태에서, 희토류 니트라이드는 GdN이다.
- [0046] 놀랍게도, 마그네슘은 희토류 니트라이드에서 잔류 도너 종(즉, 질소 공공)을 보충하고, 몇몇 실시양태에서는, 적어도 반-절연성인 희토류 니트라이드 물질을 생성하는 것으로 밝혀졌다.
- [0047] 몇몇 실시양태에서, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 10^{18} 내지 10^{21} 개의 원자/cm³의 마그네슘을 포함한다. 몇몇 실시양태에서, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 10^{18} 내지 5×10^{20} 개의 원자/cm³의 마그네슘을 포함한다. 몇몇 실시양태에서, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 10^{19} 내지 5×10^{20} 개의 원자/cm³의 마그네슘을 포함한다.
- [0048] 그러나, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 하나 이상의 추가적인 도판트(들)를 추가로 포함한다. 일반적으로, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 10^{21} 개 미만의 원자/cm³의 추가적인 도판트(들) 또는 다른 불순물들을 포함한다. 몇몇 실시양태에서, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 10^{20} 개 미만의 원자/cm³의 추가적인 도판트(들) 또는 다른 불순물들을 포함한다. 몇몇 실시양태에서, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 10^{19} 개 미만의 원자/cm³의 추가적인 도판트(들) 또는 다른 불순물들을 포함한다.
- [0049] 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 박막 필름이다.
- [0050] 몇몇 실시양태에서, 필름 두께는 약 1 내지 2000 nm이다. 몇몇 실시양태에서, 필름 두께는 약 5 내지 2000 nm이다. 몇몇 실시양태에서, 필름 두께는 약 1 내지 1000 nm이다. 몇몇 실시양태에서, 필름 두께는 약 5 내지 1000 nm. 몇몇 실시양태에서, 필름 두께는 약 10 내지 200 nm이다.
- [0051] 유리하게는, 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 비-도핑된 희토류 니트라이드 물질에 비해 증가된 저항률을 갖는다. 그러나, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 자기 특성은 일반적으로 비-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 것과 실질적으로 다르지 않다.
- [0052] 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 자기 특성은 초전도 양자 간섭 장치(SQUID) 등의 공지 기술 및 장비를 사용하여 측정할 수 있다. 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 50 K 이하, 바람직하게는 약 70 K 이하에서 강자성이다.
- [0053] 또한, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 구조적 특성은 일반적으로 비-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 것과 실질적으로 다르지 않다.
- [0054] 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 구조적 특성은 x-선 회절(XRD) 측정과 같은 공지 기술 및 장비를 사용하여 측정할 수 있다. 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 비-도핑된 희토류 니트라이드와 실질적으로 동일한 XRD 측정치를 갖는다.
- [0055] 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 기판상에 박막 필름을 포함한다.
- [0056] 적합한 기판은 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질과 비-반응성이며, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 제조에 사용되는 처리 조건 동안 안정하다.
- [0057] 몇몇 실시양태에서, 기판은 전도체이다. 다른 실시양태에서, 기판은 반도체이다. 다른 실시양태에서, 기판은 절연체이다.
- [0058] 몇몇 실시양태에서, 기판은 결정성이지만, 본 발명은 이에 국한되지 않는다.
- [0059] 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 기판과 에피 택셜 성장된다. 다른 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 다결정성이다.
- [0060] 몇몇 실시양태에서, 기판은 AlN, GaN 또는 (Al,In,Ga)N 합금이다.

- [0061] 다른 적합한 기판은 이트리아-안정화된 지르코니아(YSZ) 및 MgO를 포함하나, 이에 한정되지 않는다.
- [0062] 추가로 적합한 기판은 Al, W, Cr, Cu, Gd, Mg, TaN, NbN, GaAs 및 MgF₂를 포함하나, 이들에 한정되지 않는다.
- [0063] 적합한 기판은 또한 다층-구조 물질을 포함한다. 예를 들어, 다층-구조 기판은 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질과 접촉하는 버퍼 층을 포함할 수 있다.
- [0064] 몇몇 실시양태에서, 다층-구조 물질은 비-도핑된 희토류 니트라이드의 버퍼 층을 포함한다.
- [0065] 몇몇 실시양태에서, 기판은, 임의적으로 AlN 또는 GaN의 버퍼 층과 함께, Si 또는 Al₂O₃를 포함한다. 다른 실시양태에서, 버퍼 층은 (Al, In, Ga)N 합금이다.
- [0066] 몇몇 실시양태에서, 기판은 (111) 면을 따라 배향된 탈산화 규소를 포함한다.
- [0067] 몇몇 실시양태에서, 기판은 에피택셜 AlN 버퍼 층과 (111) 면을 따라 배향된 탈산화 규소를 포함한다.
- [0068] 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 캡핑된다.
- [0069] 공기 중 분해로 인해, 기판상의 희토류 니트라이드의 박막 필름은 일반적으로 주위 분위기와 반응하여 피하기 위해 효과적인 캡핑 층으로 부동태화된다.
- [0070] 적절한 캡핑 층은 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질과 비-반응성이다.
- [0071] 상기 캡핑 층은 다결정성 또는 무정형 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질과 에피택셜 성장할 수 있다.
- [0072] 몇몇 실시양태에서, 캡핑 층은 전도체이다. 다른 실시양태에서, 캡핑 층은 반도체이다. 다른 실시양태에서, 캡핑 층은 절연체이다.
- [0073] 캡핑 층에 적합한 물질은 Al, W, Cr, Cu, Gd, Mg, TaN, NbN, Si, YSZ, GaN, GaAs, AlN, (Al, In, Ga)N 합금 및 MgF₂를 포함하나, 이들에 한정되지 않는다.
- [0074] 몇몇 실시양태에서, 캡핑 층은 AlN, GaN, (Al, In, Ga)N 합금 및 Si로부터 선택된다.
- [0075] 몇몇 실시양태에서, 캡핑 층은 AlN 및 GaN으로부터 선택된다. 유리하게는, AlN 또는 GaN은 투명하여 광 측정이 가능하다. AlN 및 GaN의 다른 장점은 시간 경과에 따라 성장이 용이하고 화학적 안정성이 우수하다.
- [0076] 몇몇 실시양태에서, 캡핑 층은 GaN이다.
- [0077] 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 마그네슘 원자의 존재 하에 희토류 니트라이드를 성장시킴으로써 제조될 수 있다. 그러나, 본 발명은 이에 한정되지 않고, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 주입 및 확산 방법 등을 비롯한 당해 분야 숙련자에게 공지된 다른 방법에 의해 제조될 수 있다.
- [0078] 따라서, 제 2 양태에서, 본 발명은 (a) 마그네슘 공급원의 존재 하에 희토류 및 질소 공급원을 조합하고 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 침착시키는 단계를 포함하는 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 제조 방법을 제공한다.
- [0079] 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 기판상에 침착된다. 적합한 기판은 위에서 논의된다.
- [0080] 따라서, 몇몇 실시양태에서, 본 발명은 (a) 마그네슘 공급원의 존재 하에 희토류 및 질소 공급원을 조합하고 기판상에 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 침착시키는 단계를 포함하는 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 제조 방법을 제공한다.
- [0081] 몇몇 실시양태에서, 상기 방법은 (b) 단계 (a)에서 침착된 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 상에 캡핑 층을 침착하는 단계를 추가로 포함한다.
- [0082] 적합한 캡핑 층은 위에서 논의된다.
- [0083] 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질 및 임의적인 캡핑 층은 당해 분야 숙련자에게 공지된 초고 진공 기술을 사용하여 침착될 수 있다. 적합한 기술은 물리적 기상 증착(PVD) 예컨대 펄스 레이저 증착(PLD) 및 DC/RF 마그네트론 스퍼터링, 열 증발 및 분자 빔 에피택시(MBE)를 포함하나, 이들에 한정되지 않는다. 금속유기 화학 기상 증착(MOCVD) 등을 비롯한 다른 기술들이 사용될 수도 있다.

- [0084] 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질 및 임의적인 캡핑 층은 MBE에 의해 순차적으로 침착된다. 몇몇 실시양태에서, 반사 고 에너지 전자 회절(RHEED)이 층(들)의 성장을 모니터링하는 데 사용된다.
- [0085] MBE 장치의 기본 압력은 전형적으로 약 10^{-8} 토르(Torr) 이하이다.
- [0086] 마그네슘 공급원은 성장 면에 기상 마그네슘 원자를 제공할 수 있는 마그네슘-함유 물질이다. 몇몇 실시양태에서, 마그네슘 공급원은 마그네슘이다.
- [0087] 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 MBE에 의해 침착되는 것을 특징으로 하는 실시양태에서, 마그네슘 공급원은, 침착 시 증발하는 고체 마그네슘을 함유하는 유출 셀일 수 있다.
- [0088] 마찬가지로, 희토류는, 침착 시 증발하는 고체 희토류를 함유하는 유출 셀과 같은 희토류 원소의 공급원으로부터 제공될 수 있다.
- [0089] 당해 분야 숙련자는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 도핑 수준이 마그네슘과 희토류의 상대적 증발 속도를 제어함으로써 제어될 수 있음을 이해할 것이다.
- [0090] 질소 공급원은 성장 표면에 반응성 질소 원자를 제공한다. 몇몇 실시양태에서, 질소의 공급원은 순수한 분자 질소, 암모니아 및 활성 질소의 공급원 예컨대 질소 플라즈마 또는 이온화 질소, 또는 이들 중 임의의 둘 이상의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0091] 몇몇 실시양태에서, 질소 공급원은 순수한 분자 질소, 암모니아 및 활성 질소의 공급원 예컨대 질소 플라즈마 또는 이온화 질소로 이루어진 군으로부터 선택된다.
- [0092] 몇몇 실시양태에서, 질소 공급원은 암모니아이다.
- [0093] 질소 공급원 플럭스는 전형적으로 희토류 플럭스보다 적어도 100배 더 많다. 희토류 플럭스에 대한 질소 공급원 플럭스의 비가 약 100 미만인 경우, 생성 필름은 주로 질소 공공으로 도핑될 수 있다.
- [0094] 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 MBE에 의해 침착되는 것을 특징으로 하는 몇몇 실시양태에서, 질소 공급원의 분압 또는 빔 등가 압력(BEP)은 약 10^{-5} 내지 10^{-3} 토르, 바람직하게는 약 10^{-5} 내지 10^{-4} 토르이다.
- [0095] 몇몇 실시양태에서, 질소 공급원의 BEP는 약 1.9×10^{-5} 토르이다.
- [0096] 몇몇 실시양태에서, 희토류의 BEP는 약 10^{-8} 내지 10^{-7} 토르이다.
- [0097] 몇몇 실시양태에서, 희토류의 BEP는 약 5×10^{-8} 토르이다.
- [0098] 몇몇 실시양태에서, 마그네슘의 BEP는 약 10^{-9} 내지 5×10^{-6} 토르, 바람직하게는 약 10^{-9} 내지 5×10^{-7} 토르이다.
- [0099] 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 전형적으로 약 0.01 내지 1 nm/초의 속도로 침착된다. 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 0.01 내지 0.5 nm/초의 속도로 침착된다. 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 0.01 내지 0.15 nm/초의 속도로 침착된다. 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 0.01 내지 0.1 nm/초의 속도로 침착된다.
- [0100] 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 주위 온도 또는 상승된 온도에서 침착된다.
- [0101] 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 일반적으로 고온에서 침착되며, 이때 상기 물질은 물질이 침착되는 기관과 에피택셜 성장할 수 있는 것이 바람직하다.
- [0102] 따라서, 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 500 내지 900°C의 온도에서 침착된다. 몇몇 실시양태에서, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 약 500 내지 750°C의 온도에서 침착된다.
- [0103] 그러나, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은, 특히 다결정성 물질을 필요로 하는 경우, 상기보다 낮은 온도에서 또는 심지어 주위 온도에서 침착될 수 있다. 낮은 온도에서 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 침착하는 것은 전형적으로 적은 질소 공공을 초래한다.
- [0104] 침착 시의 온도는 광학 고온계(pyrometer) 또는 당해 분야에 공지된 다른 적절한 장치 예컨대 열전대로 편리하게 측정할 수 있다.
- [0105] 몇몇 실시양태에서, 2개 이상의 희토류 원소를, 전술한 바와 같이, 질소 공급원 및 마그네슘 공급원의 존재 하

에 동시에 증발시켜 희토류 니트라이드가 합금인 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공한다.

- [0106] 유사하게, 기판 및/또는 캡핑 층이 III족 니트라이드를 포함하는 실시양태에서는, III족 니트라이드의 합금도 고려된다.
- [0107] 당해 분야 숙련자는 하나 이상의 도판트가 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 침착하는 동안 도입될 수 있음을 알 것이다. 이러한 도판트는 생성 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 자기적 및/또는 전기적 특성을 변경할 수 있다.
- [0108] 제 3 양태에서, 본 발명은 제 2 양태의 방법에 의해 제조되는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공한다.
- [0109] 또한, 본 발명은 제 2 양태의 방법에 의해 수득될 수 있는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 제공한다.
- [0110] 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질은 예를 들면 스피트로닉스, 전자 및 광전자 장치의 제작에 유용할 수 있다.
- [0111] 따라서, 본 발명은 또한 본 발명의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 포함하는 장치를 제공한다.
- [0112] 하기 비-제한적인 실시예는 본 발명을 예시하기 위해 제공되는 것일 뿐 어떠한 방식으로든 본 발명의 범주를 제한하는 것은 아니다.
- [0113] **실시예**
- [0114] 마그네슘-도핑된 가돌리늄 니트라이드 필름(Mg-도핑된 GdN)을 통상의 Al, Ga, Mg 및 Gd 증발 셀을 구비한 분자 빔 에피택시 시스템에서 성장시켰다. 수득된 상태의 Al, Ga, Mg 및 Gd 고체 전하의 순도는 각각 6N5, 7N5, 5N 및 3N이었다. 성장 표면상에서의 아모니아(NH₃)의 열적 활성 분해에 의해 원자 질소 종을 생성하였다. NH₃의 순도는 6N5이었다. Mg-도핑된 GdN의 성장 이전에, 100 nm 두께의 AlN 버퍼 층을 (111) 면을 따라 배향된 탈산화 규소 기판상에서 성장시켰다.
- [0115] NH₃ 및 Gd에 대해 각각 1.9×10^{-5} 토르 및 5×10^{-8} 토르의 빔 등가 압력(BEP)을 사용하여 650°C의 기판 온도에서 Mg-도핑된 GdN 필름을 성장시켜 성장 속도가 약 $0.12 \pm 0.01 \mu\text{m/h}$ 의 성장 속도에 이르렀다. 마그네슘의 BEP는 전형적으로 10^{-9} 내지 5×10^{-7} 토르 범위였다.
- [0116] Mg-도핑된 GdN 필름의 두께는 100 nm 내지 200 nm 범위였다. Mg-도핑된 GdN 층은 60 nm 두께의 GaN 층으로 캡핑하여 공기 중 분해를 방지하였다.
- [0117] 전술된 조건 하에서 성장된 비-도핑된 GdN 필름은 실온에서 약 $2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항률을 가지지만, GdN 층에 Mg를 혼입시켜 저항률을 더 높였다. Mg 농도가 약 1×10^{19} 개의 원자/cm²이고 약 5×10^{19} 개의 원자/cm²인 Mg-도핑된 층은 각각 약 $25 \Omega \cdot \text{cm}$ 및 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 초과 저항률을 가졌다.
- [0118] 달리 명시되지 않는 한, 저항률은 반 데르 포(van der Pauw) 기하학을 사용하여 실온에서 측정하였다.
- [0119] 전술한 조건 하에서 성장된 비-도핑된 GdN 필름의 저항률은 4 K에서 약 $1.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 이었다. Mg 농도가 약 1×10^{19} 개의 원자/cm²이고 약 5×10^{19} 개의 원자/cm²인 Mg-도핑된 GdN 층은 각각 4 K에서 약 $4 \Omega \cdot \text{cm}$ 및 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 초과 저항률을 가졌다.
- [0120] 도 1은 규소 상에 침착된 106 nm 두께의 AlN 버퍼 층 및 64 nm 두께의 GaN 캡핑 층을 포함하는, 규소 상의 Mg-도핑된 GdN의 140 nm 두께의 층 구조를 나타내는 단면 주사 전자 현미경 사진이다.
- [0121] Mg-도핑된 GdN 층의 결정성 배향/품질은 동일한 조건 하에서 성장된 비-도핑된 GdN 층의 것과 유사하다.
- [0122] 도 2는, 650°C에서 성장된 5×10^{19} 개의 Mg 원자/cm²의 농도를 갖는 140 nm 두께의 Mg-도핑된 GdN에 있어서, (111) x-선 록킹 곡선의 반치전폭(FWHM)은 비-도핑된 GdN 층에 대한 FWHM과 유사함을 보여준다.
- [0123] 도 3은, 규소 상에 침착된 AlN 버퍼 층 및 GaN 캡핑 층을 포함하는, 규소 상의 Mg-도핑된 GdN 층의 측정된 이차

이온 질량 분석(SIMS) 마그네슘 프로파일을 도시한다. 마그네슘의 원자 농도는 약 1×10^{19} 개의 원자/cm³이다.

- [0124] 도 4에 도시된 자화 곡선은 Mg-도핑된 GdN 층의 자기 특성이 비-도핑된 GdN 층의 것과 실질적으로 동일함을 보여준다. 도 4(a)는 SIMS로 측정시 약 5×10^{19} 개의 원자/cm³의 Mg 농도를 갖는 140 nm 두께의 Mg-도핑된 GdN 층의 250 Oe의 인가 자기 하에서의 평면내 제로 자기-냉각(ZFC) 자화를 도시한다. 퀴리(Curie) 온도는 비-도핑된 GdN 박막 필름에 대해 약 70 K이다. 도 4(b)는 SIMS로 측정시 약 5×10^{19} 개의 원자/cm³의 Mg 농도를 갖는 140 nm 두께의 Mg-도핑된 GdN 층의 5 K에서의 자기-의존성 자화를 도시한다. 자화 모멘트는 가돌리늄 이온 당 약 7 보어 마그네톤(Bohr magneton)이고, 보자력은 비-도핑된 GdN 필름에 대해 약 100 Oe이다.
- [0125] 저항률 및 홀(Hall) 효과 측정은 다양한 Mg 농도의 Mg-도핑된 GdN 필름 상에서 실온에서 수행하였다. 도 5는 전자 캐리어 농도의 함수로서 100 nm 두께의 Mg-도핑된 GdN 층의 저항률을 나타낸다. 실온 저항률은 전자 밀도에 따라 5배 이상의 크기로 반비례한다. 예를 들어, 비-도핑된 GdN 층은 약 0.002 Ω·cm의 저항률 및 6.9×10^{20} cm⁻³의 전자 캐리어 농도를 갖는 반면, 약 5×10^{19} 개의 원자/cm³의 Mg 농도를 갖는 Mg-도핑된 GdN 층은 약 10^4 Ω·cm의 저항률 및 6.6×10^{15} cm⁻³의 전자 캐리어 농도를 갖는다.
- [0126] 본 발명의 다양한 양태는 하기 항들에 의해 기재된다:
- [0127] 1. 희토류 니트라이드가 란탄 니트라이드(LaN), 프라세오디뮴 니트라이드(PrN), 네오디뮴 니트라이드(NdN), 사마륨 니트라이드(SmN), 유로퓸 니트라이드(EuN), 가돌리늄 니트라이드(GdN), 터븀 니트라이드(TbN), 디스프로슘 니트라이드(DyN), 홀름 니트라이드(HoN), 어븀 니트라이드(ErN), 툴륨 니트라이드(TmN), 이터븀 니트라이드(YbN) 및 루테튬 니트라이드(LuN) 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0128] 2. 제 1 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 비-도핑된 희토류 니트라이드 물질에 비해 증가된 저항률을 갖는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0129] 3. 제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 25 Ω·cm 이상의 저항률을 갖는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0130] 4. 제 1 항 내지 제 3 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 10^3 Ω·cm 이상의 저항률을 갖는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0131] 5. 제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 10^3 Ω·cm 내지 약 10^{10} Ω·cm의 저항률을 갖는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0132] 6. 제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 10^{10} Ω·cm 이상의 저항률을 갖는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0133] 7. 제 1 항 내지 제 6 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 LaN, PrN, NdN, SmN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN 및 LuN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0134] 8. 제 1 항 내지 제 6 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 NdN, SmN, EuN, GdN, DyN, HoN, ErN 및 YbN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0135] 9. 제 1 항 내지 제 8 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 NdN, SmN, GdN, DyN, HoN 및 ErN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택된, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0136] 10. 제 1 항 내지 제 7 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 LaN, PrN, NdN, SmN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN 및 LuN으로 이루어진 군으로부터 선택된, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0137] 11. 제 1 항 내지 제 6 항 및 제 8 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 NdN, SmN, EuN, GdN, DyN, HoN, ErN 및 YbN으로 이루어진 군으로부터 선택된, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0138] 12. 제 1 항 내지 제 11 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 NdN, SmN, GdN, DyN, HoN 및

ErN으로 이루어진 균으로부터 선택된, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.

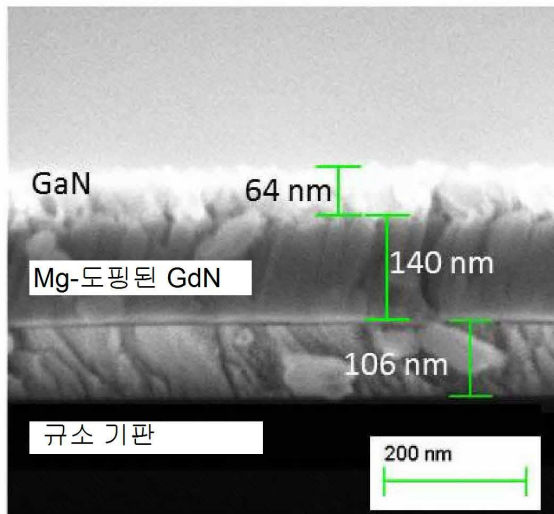
- [0139] 13. 제 1 항 내지 제 12 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 GdN인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0140] 14. 제 1 항 내지 제 9 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 희토류 니트라이드 합금인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0141] 15. 제 14 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드 합금이 (Sm,Gd)N, (Gd,Ho)N 및 (Gd,Dy)N으로 이루어진 균으로부터 선택된, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0142] 16. 제 1 항 내지 제 15 항 중 어느 한 항에 있어서, 약 10^{18} 내지 10^{21} 개의 원자/cm³의 마그네슘을 포함하는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0143] 17. 제 1 항 내지 제 16 항 중 어느 한 항에 있어서, 하나 이상의 추가적인 도판트(들)를 추가로 포함하는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0144] 18. 제 1 항 내지 제 17 항 중 어느 한 항에 있어서, 약 10^{21} 개 미만의 원자/cm³의 추가적인 도판트(들) 또는 다른 불순물을 포함하는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0145] 19. 제 1 항 내지 제 18 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 50 K 이하에서 강자성인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0146] 20. 제 1 항 내지 제 19 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 70 K 이하에서 강자성인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0147] 21. 제 1 항 내지 제 20 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 상기 비-도핑된 희토류 니트라이드와 실질적으로 동일한 XRD 측정치를 갖는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0148] 22. 제 1 항 내지 제 21 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 박막 필름인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0149] 23. 제 22 항에 있어서, 상기 필름 두께가 약 1 내지 2000 nm인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0150] 24. 제 22 항 또는 제 23 항에 있어서, 상기 박막 필름이 기판상에 존재하는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0151] 25. 제 24 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 상기 기판과 에피택셜(epitaxial)인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0152] 26. 제 24 항 또는 제 25 항에 있어서, 상기 기판이 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질과 접촉하는 버퍼(buffer) 층을 포함하는, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0153] 27. 제 1 항 내지 제 26 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 캡핑된(capped), 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0154] 28. 제 27 항에 있어서, 상기 캡핑 층이 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질과 에피택셜인, 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0155] 29. (a) 마그네슘 공급원의 존재 하에 희토류 및 질소 공급원을 조합하고 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 침착시키는 단계를 포함하는 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 제조 방법으로서, 상기 희토류 니트라이드가 란타넘 니트라이드(LaN), 프라세오디뮴 니트라이드(PrN), 네오디뮴 니트라이드(NdN), 사마륨 니트라이드(SmN), 유로퓸 니트라이드(EuN), 가돌리늄 니트라이드(GdN), 터븀 니트라이드(TbN), 디스프로슘 니트라이드(DyN), 홀뮴 니트라이드(HoN), 어븀 니트라이드(ErN), 툴륨 니트라이드(TmN), 이터븀 니트라이드(YbN) 및 루테튬 니트라이드(LuN) 및 이들 중 임의의 둘 이상의 합금으로 이루어진 균으로부터 선택되는, 방법.
- [0156] 30. 제 29 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 상기 비-도핑된 희토류 니트라이드 물질에 비해 증가된 저항률을 갖는, 방법.
- [0157] 31. 제 29 항 또는 제 30 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 25 Ω·cm 이상의 저항률을 갖는, 방법.

- [0158] 32. 제 29 항 내지 제 31 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 저항률을 갖는, 방법.
- [0159] 33. 제 29 항 내지 제 32 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 내지 약 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항률을 갖는, 방법.
- [0160] 34. 제 29 항 내지 제 32 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 저항률을 갖는, 방법.
- [0161] 35. 제 29 항 내지 제 34 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 LaN, PrN, NdN, SmN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN 및 LuN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0162] 36. 제 29 항 내지 제 34 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 NdN, SmN, EuN, GdN, DyN, HoN, ErN 및 YbN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0163] 37. 제 29 항 내지 제 36 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 NdN, SmN, GdN, DyN, HoN 및 ErN, 및 이들 중 둘 이상의 합금으로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0164] 38. 제 29 항 내지 제 35 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 LaN, PrN, NdN, SmN, GdN, TbN, DyN, HoN, ErN, TmN 및 LuN으로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0165] 39. 제 29 항 내지 제 34 항 및 제 36 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 NdN, SmN, EuN, GdN, DyN, HoN, ErN 및 YbN으로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0166] 40. 제 29 항 내지 제 39 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 NdN, SmN, GdN, DyN, HoN 및 ErN으로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0167] 41. 제 29 항 내지 제 40 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 GdN인, 방법.
- [0168] 42. 제 29 항 내지 제 37 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드가 희토류 니트라이드 합금인, 방법.
- [0169] 43. 제 42 항에 있어서, 상기 희토류 니트라이드 합금이 (Sm,Gd)N, (Gd,Ho)N 및 (Gd,Dy)N으로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0170] 44. 제 29 항 내지 제 43 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 10^{18} 내지 10^{21} 개의 원자/ cm^3 의 마그네슘을 포함하는, 방법.
- [0171] 45. 제 29 항 내지 제 44 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 하나 이상의 추가적인 도판트(들)를 추가로 포함하는, 방법.
- [0172] 46. 제 29 항 내지 제 45 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 10^{21} 개 미만의 원자/ cm^3 의 추가적인 도판트(들) 또는 다른 불순물을 포함하는, 방법.
- [0173] 47. 제 29 항 내지 제 46 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 50 K 이하에서 강자성인, 방법.
- [0174] 48. 제 29 항 내지 제 47 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 70 K 이하에서 강자성인, 방법.
- [0175] 49. 제 29 항 내지 제 48 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 상기 비-도핑된 희토류 니트라이드와 실질적으로 동일한 XRD 측정치를 갖는, 방법.
- [0176] 50. 제 1 항 내지 제 23 항 중 어느 한 항의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질의 제조 방법으로서, (a) 마그네슘 공급원의 존재 하에 희토류 및 질소 공급원을 조합하고 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 침착시키는 단계를 포함하는, 방법.
- [0177] 51. 제 29 항 내지 제 50 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 기관상에 침착되는, 방법.

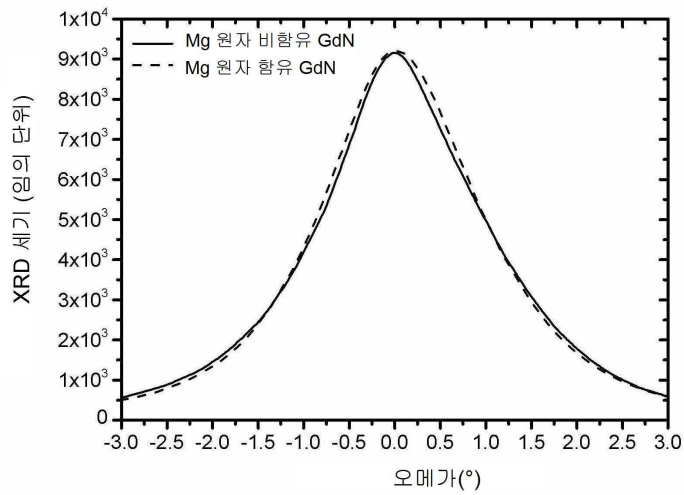
- [0178] 52. 제 51 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 상기 기판과 에피택셜인, 방법.
- [0179] 53. 제 29 항 내지 제 52 항 중 어느 한 항에 있어서, (b) 단계 (a)에서 침착된 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 상에 캡핑 층을 침착하는 단계를 추가로 포함하는 방법.
- [0180] 54. 제 53 항에 있어서, 상기 캡핑 층이 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질과 에피택셜인, 방법.
- [0181] 55. 제 29 항 내지 제 54 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 초고 진공 기술을 사용하여 침착되는, 방법.
- [0182] 56. 제 55 항에 있어서, 상기 초고 진공 기술이 물리적 기상 증착(PVD), 펄스 레이저 증착(PLD), DC/RF 마그네트론 스퍼터링, 열 증발 및 분자 빔 에피택시(MBE)로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0183] 57. 제 29 항 내지 제 57 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 MBE에 의해 침착되는, 방법.
- [0184] 58. 제 29 항 내지 제 57 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘 공급원이 마그네슘인, 방법.
- [0185] 59. 제 29 항 내지 제 58 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 질소 공급원이 순수한 분자 질소, 암모니아 및 활성 질소의 공급원 또는 이들 중 임의의 둘 이상의 혼합물로 이루어진 군으로부터 선택되는, 방법.
- [0186] 60. 제 59 항에 있어서, 상기 활성 질소의 공급원이 질소 플라즈마 또는 이온화 질소인, 방법.
- [0187] 61. 제 29 항 내지 제 59 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 질소 공급원이 암모니아인, 방법.
- [0188] 62. 제 29 항 내지 제 61 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 질소 공급원 플럭스가 상기 희토류 플럭스보다 약 100배 이상 더 많은, 방법.
- [0189] 63. 제 29 항 내지 제 62 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 MBE에 의해 침착되고, 상기 질소 공급원의 분압 또는 빔 등가 압력(BEP)이 약 10^{-5} 내지 10^{-3} 토르인, 방법.
- [0190] 64. 제 63 항에 있어서, 상기 희토류의 BEP가 10^{-8} 내지 10^{-7} 토르인, 방법.
- [0191] 65. 제 63 항 또는 제 64 항에 있어서, 마그네슘의 BEP가 약 10^{-9} 내지 5×10^{-6} 토르인, 방법.
- [0192] 66. 제 29 항 내지 제 65 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 0.01 내지 1 nm/초의 속도로 침착되는, 방법.
- [0193] 67. 제 29 항 내지 제 66 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 주위 온도 또는 상승된 온도에서 침착되는, 방법.
- [0194] 68. 제 29 항 내지 제 67 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 500 내지 900°C의 온도에서 침착되는, 방법.
- [0195] 69. 제 29 항 내지 제 68 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질이 약 500 내지 750°C의 온도에서 침착되는, 방법.
- [0196] 70. 제 29 항 내지 제 69 항 중 어느 한 항의 방법에 의해 제조된 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0197] 71. 제 29 항 내지 제 69 항 중 어느 한 항의 방법에 의해 수득가능한 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질.
- [0198] 72. 제 1 항 내지 제 28 항, 제 70 항 및 제 71 항의 마그네슘-도핑된 희토류 니트라이드 물질을 포함하는 장치.
- [0199] 단지 상술한 실시예에 의해 본 발명의 범주를 제한하려는 의도는 아니다. 당해 분야 숙련자에 의해 이해되는 바와 같이, 첨부된 특허청구범위에 개시된 바와 같이 본 발명의 범주를 벗어나지 않고 다양한 변형들이 가능하다.

도면

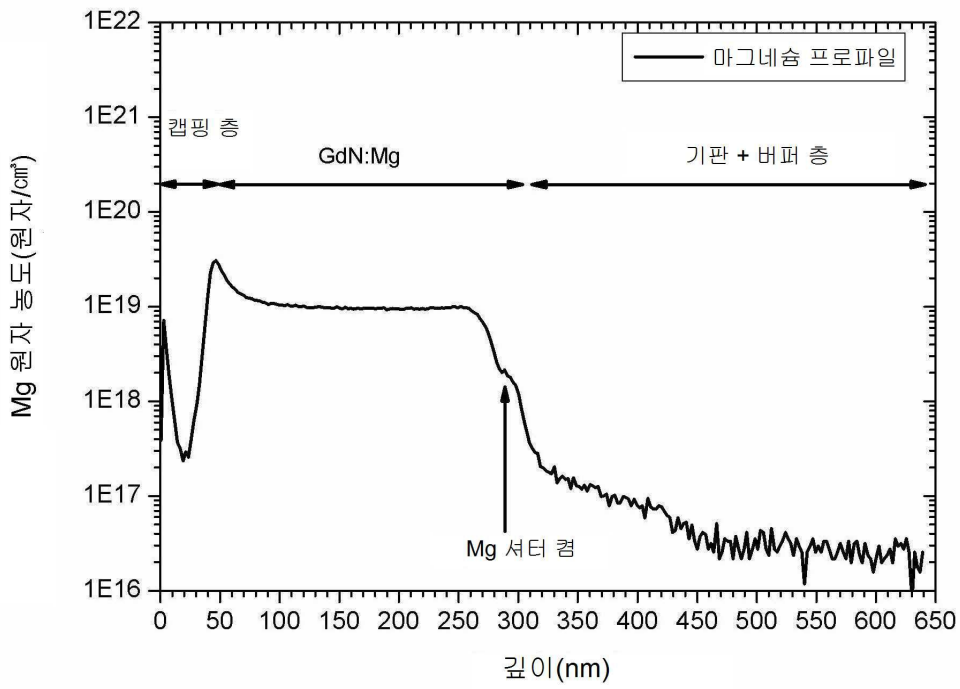
도면1



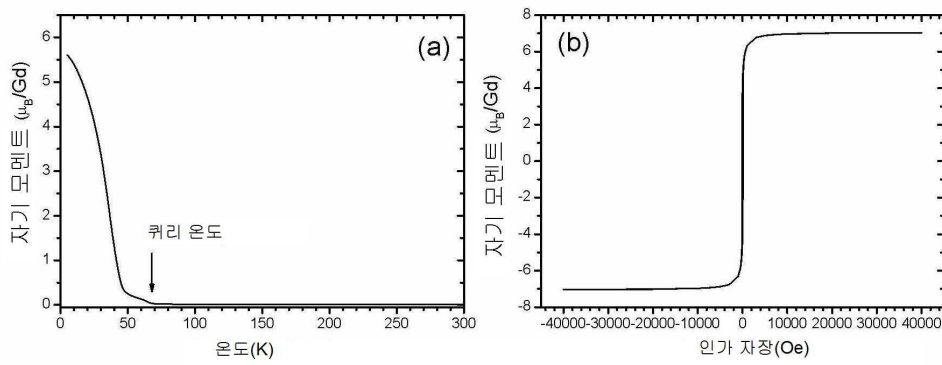
도면2



도면3



도면4



도면5

