



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0119416
(43) 공개일자 2013년10월31일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02F 1/37 (2006.01) H01S 3/06 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2013-7001174
(22) 출원일자(국제) 2011년06월17일
심사청구일자 없음
(85) 번역문제출일자 2013년01월16일
(86) 국제출원번호 PCT/JP2011/063889
(87) 국제공개번호 WO 2011/158927
국제공개일자 2011년12월22일
(30) 우선권주장
JP-P-2010-138115 2010년06월17일 일본(JP)

(71) 출원인
가부시키가이샤 니콘
일본 도쿄도 지요다쿠 유라쿠쵸 1쵸메 12방 1고
(72) 발명자
도쿠히사 아키라
일본 도쿄도 지요다쿠 유라쿠쵸 1쵸메 12방 1고
가부시키가이샤 니콘 나이
(74) 대리인
특허법인코리아나

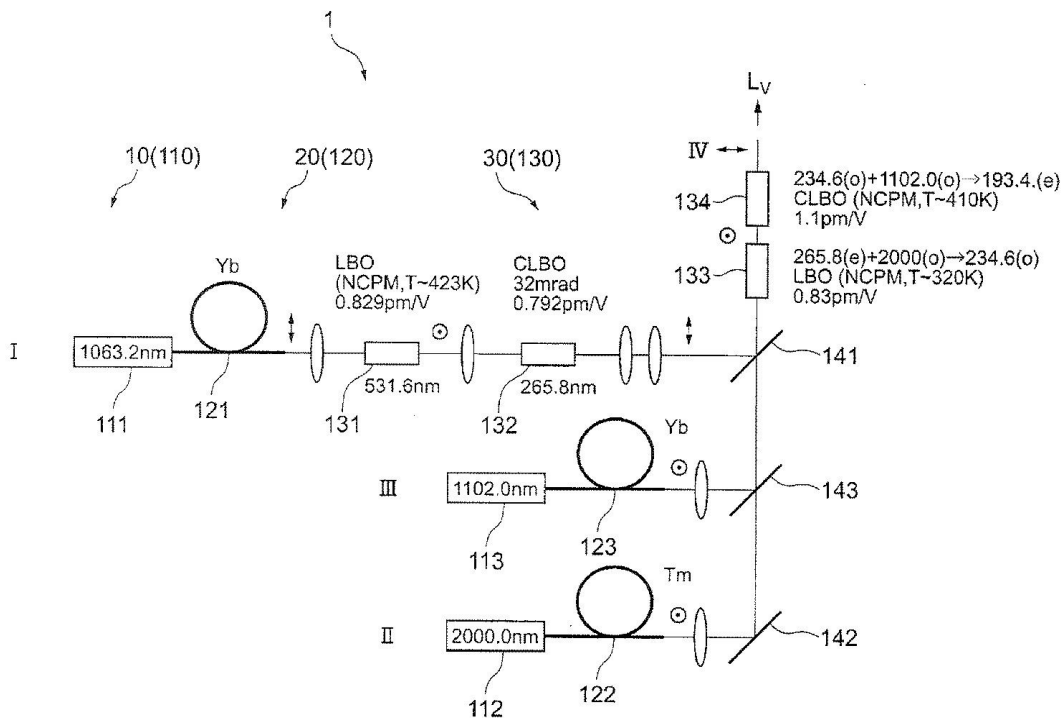
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 **자외 레이저 장치**

(57) 요약

자외 레이저 장치는, 제 1~3 적외 레이저광을 출력하는 이트리븀 도프 파이버 광 증폭기, 틀륨 도프 파이버 광 증폭기, 및 이트리븀 도프 파이버 광 증폭기 또는 에르븀 도프 파이버 광 증폭기를 포함하는 레이저광 출력부와, 제 1~3 적외 레이저광이 전파되어 제 1~3 레이저광이 각각 출력되는 제 1~3 광학 계열과, 제 1~3 레이저광이 합과되어 전파되는 제 4 광학 계열을 포함하는 파장 변환부를 구비한다. 제 1 광학 계열은, 제 1 적외 레이저광을 소정의 고조파로 파장 변환하여 제 1 레이저광으로서 발생시키고, 제 4 광학 계열은, 소정의 고조파와 제 2 레이저광의 합주파 발생에 의해 전단 자외 레이저광을 발생시키는 제 1 파장 변환 광학 소자와, 전단 자외 레이저광과 제 3 레이저광의 합주파 발생에 의해 자외 레이저광을 발생시키는 제 2 파장 변환 광학 소자를 포함한다.

대표도



특허청구의 범위

청구항 1

적외 파장의 제 1 적외 레이저광과 제 2 적외 레이저광과 제 3 적외 레이저광을 각각 출력하는 제 1 파이버 광 증폭기와 제 2 파이버 광 증폭기와 제 3 파이버 광 증폭기를 포함하는 레이저광 출력부와,

상기 제 1 적외 레이저광이 입사되고 전파되어 제 1 레이저광으로서 출력되는 제 1 광학 계열과, 상기 제 2 적외 레이저광이 입사되고 전파되어 제 2 레이저광으로서 출력되는 제 2 광학 계열과, 상기 제 3 적외 레이저광이 입사되고 전파되어 제 3 레이저광으로서 출력되는 제 3 광학 계열과, 상기 제 1 광학 계열, 상기 제 2 광학 계열 및 상기 제 3 광학 계열로부터 각각 출력된 상기 제 1 레이저광, 상기 제 2 레이저광 및 상기 제 3 레이저광이 합파(合波) 되고 입사되어 전파되는 제 4 광학 계열을 포함하는 파장 변환부를 구비하고,

상기 제 1 파이버 광 증폭기는 이트리븀 도프 파이버 광 증폭기이고,

상기 제 2 파이버 광 증폭기는 틀륨 도프 파이버 광 증폭기이고,

상기 제 3 파이버 광 증폭기는 이트리븀 도프 파이버 광 증폭기 또는 에르븀 도프 파이버 광 증폭기이고,

상기 제 1 광학 계열은, 상기 제 1 적외 레이저광을 소정의 고조파로 파장 변환하여, 상기 소정의 고조파를 상기 제 1 레이저광으로서 발생시키고,

상기 제 4 광학 계열은 제 1 파장 변환 광학 소자와 제 2 파장 변환 광학 소자를 포함하고,

상기 제 1 파장 변환 광학 소자는, 상기 소정의 고조파와 상기 제 2 레이저광의 합주파 발생에 의해, 자외 영역의 전단(前段) 자외 레이저광을 발생시키고,

상기 제 2 파장 변환 광학 소자는, 상기 전단 자외 레이저광과 상기 제 3 레이저광의 합주파 발생에 의해, 자외 레이저광을 발생시키는, 자외 레이저 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 제 3 파이버 광 증폭기가 이트리븀 도프 파이버 광 증폭기인, 자외 레이저 장치.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 제 3 파이버 광 증폭기가 에르븀 도프 파이버 광 증폭기인, 자외 레이저 장치.

청구항 4

제 1 항 내지 제 3 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 소정의 고조파는, 각주파수(角周波數)가 상기 제 1 적외 레이저광의 4 배이고, 또한 파장이 상기 제 1 적외 레이저광의 1/4 인 4 배 고조파인, 자외 레이저 장치.

청구항 5

제 1 항 내지 제 3 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 소정의 고조파는, 각주파수가 상기 제 1 적외 레이저광의 3 배이고, 또한 파장이 상기 제 1 적외 레이저광의 1/3 인 제 1 의 3 배 고조파이고,

상기 제 2 광학 계열은, 상기 제 2 적외 레이저광을, 각주파수가 상기 제 2 적외 레이저광의 3 배이며, 또한 파장이 상기 제 2 적외 레이저광의 1/3 인 제 2 의 3 배 고조파로 파장 변환하여, 상기 제 2 의 3 배 고조파를 상기 제 2 레이저광으로서 발생시키고,

상기 제 1 파장 변환 광학 소자는, 상기 제 1 의 3 배 고조파와 상기 제 2 의 3 배 고조파의 합주파 발생에 의

해, 상기 전단 자외 레이저광을 발생시키고,

상기 제 2 파장 변환 광학 소자는, 상기 전단 자외 레이저광과 상기 제 3 레이저광의 합주파 발생에 의해, 상기 자외 레이저광을 발생시키는, 자외 레이저 장치.

청구항 6

제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 제 1 파장 변환 광학 소자는 LBO 결정이고,

상기 제 2 파장 변환 광학 소자는 CLBO 결정인, 자외 레이저 장치.

청구항 7

제 1 항 내지 제 3 항 및 제 5 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 제 1 파장 변환 광학 소자 및 상기 제 2 파장 변환 광학 소자가 CLBO 결정인, 자외 레이저 장치.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은, 파이버 (fiber) 광 증폭기를 갖고 적외 파장의 레이저광을 출력하는 레이저광 출력부와, 파장 변환 광학 소자를 갖고 레이저광 출력부로부터 출력된 적외 파장의 레이저광을 자외 파장의 레이저광으로 파장 변환하는 파장 변환부를 포함하는 자외 레이저 장치에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 상기와 같은 레이저광 출력부와, 파장 변환부를 포함하는 자외 레이저 장치로서, 예를 들어, 노광 장치나 검사 장치, 치료 장치 등에 바람직하게 사용되는 레이저 장치가 알려져 있다. 이와 같은 레이저 장치는, DFB 반도체 레이저 등의 레이저 광원으로부터 출사된 적외 파장의 레이저광을 파이버 광 증폭기에 의해 증폭시키고, 증폭된 적외 레이저광을 파장 변환부에 배치 형성된 파장 변환 광학 소자에 의해 파장 변환하여 자외 파장의 레이저광을 출력한다.

[0003] 파이버 광 증폭기로는, 광섬유 개발의 역사적 경위로부터, 파장 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 대의 적외 파장의 레이저광을 증폭시키는 에르븀 (Er) 도프 파이버 광 증폭기 (일반적으로 「EDFA」라고 약기된다) 가 널리 사용되고 있다. EDFA 로부터 출력된 적외 레이저광이 파장 변환부에 형성된 복수 계열의 전파 경로를 지나는 과정에서, 상이한 파장 (기본파 및 고차 고조파) 의 레이저광이 생성되고, 이들이 파장 변환부의 후단 (後段) 에서 합성되어, 합주파 (和周波) 발생 등에 의해 자외 레이저광을 출력한다 (특허문헌 1 및 특허문헌 2 를 참조). 이와 같은 구성에 의해, 취급이 용이하며 소형인 전고체형 (全固體型) 의 자외 레이저 장치가 실현된다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 일본 공개특허공보 2007-279084호
(특허문헌 0002) 일본 공개특허공보 2010-93210호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 그러나, 적외 레이저광의 출력을 증대시키기 위해, EDFA 를 복수단 직렬로 접속하거나 해도, 복수단 직렬 접속된 EDFA 에 의해 얻어지는 적외 레이저광의 최대 출력이 수십 W 정도로, 자외 레이저 장치의 추가적인 고효율화가 어렵다는 과제가 있었다. 또, 파장 변환부에 대해 여러 가지의 구성이 고안되어 있지만, 자외 파장 영역

에 있어서, 빔 정형 등을 위한 광학 소자를 형성하지 않고, 파장 변환 효율을 높여, 보다 고출력의 자외 레이저 광을 출력 가능하게 하는 구성은 곤란한 것으로 생각되고 있었다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명의 제 1 양태에 의하면, 자외 레이저 장치는, 적외 파장의 제 1 적외 레이저광과 제 2 적외 레이저광과 제 3 적외 레이저광을 각각 출력하는 제 1 파이버 광 증폭기와 제 2 파이버 광 증폭기와 제 3 파이버 광 증폭기를 포함하는 레이저광 출력부와, 제 1 적외 레이저광이 입사되고 전파되어 제 1 레이저광으로서 출력되는 제 1 광학 계열과, 제 2 적외 레이저광이 입사되고 전파되어 제 2 레이저광으로서 출력되는 제 2 광학 계열과, 제 3 적외 레이저광이 입사되고 전파되어 제 3 레이저광으로서 출력되는 제 3 광학 계열과, 제 1 광학 계열, 제 2 광학 계열 및 제 3 광학 계열로부터 각각 출력된 제 1 레이저광, 제 2 레이저광 및 제 3 레이저광이 합과(合波)되고 입사되어 전파되는 제 4 광학 계열을 포함하는 파장 변환부를 구비한다. 제 1 파이버 광 증폭기는 이트리븀 도프 파이버 광 증폭기이고, 제 2 파이버 광 증폭기는 틀륨 도프 파이버 광 증폭기이고, 제 3 파이버 광 증폭기는 이트리븀 도프 파이버 광 증폭기 또는 에르븀 도프 파이버 광 증폭기이고, 제 1 광학 계열은, 제 1 적외 레이저광을 소정의 고조파로 파장 변환하여, 소정의 고조파를 제 1 레이저광으로서 발생시키고, 제 4 광학 계열은 제 1 파장 변환 광학 소자와 제 2 파장 변환 광학 소자를 포함하고, 제 1 파장 변환 광학 소자는, 소정의 고조파와 제 2 레이저광의 합주파 발생에 의해, 자외 영역의 전단(前段) 자외 레이저광을 발생시키고, 제 2 파장 변환 광학 소자는, 전단 자외 레이저광과 제 3 레이저광의 합주파 발생에 의해, 자외 레이저광을 발생시킨다.

[0007] 본 발명의 제 2 양태에 의하면, 제 1 양태의 자외 레이저 장치에 있어서, 제 3 파이버 광 증폭기가 이트리븀 도프 파이버 광 증폭기인 것이 바람직하다.

[0008] 본 발명의 제 3 양태에 의하면, 제 1 양태의 자외 레이저 장치에 있어서, 제 3 파이버 광 증폭기가 에르븀 도프 파이버 광 증폭기인 것이 바람직하다.

[0009] 본 발명의 제 4 양태에 의하면, 제 1~3 중 어느 하나의 양태의 자외 레이저 장치에 있어서, 소정의 고조파는, 각주파수(角周波數)가 제 1 적외 레이저광의 4 배, 또한 파장이 제 1 적외 레이저광의 1/4 의 4 배 고조파인 것이 바람직하다.

[0010] 본 발명의 제 5 양태에 의하면, 제 1~3 중 어느 하나의 양태의 자외 레이저 장치에 있어서, 소정의 고조파는, 각주파수가 제 1 적외 레이저광의 3 배, 또한 파장이 제 1 적외 레이저광의 1/3 인 제 1 의 3 배 고조파이고, 제 2 광학 계열은, 제 2 적외 레이저광을, 각주파수가 제 2 적외 레이저광의 3 배이며, 또한 파장이 제 2 적외 레이저광의 1/3 인 제 2 의 3 배 고조파로 파장 변환하여, 제 2 의 3 배 고조파를 제 2 레이저광으로서 발생시키고, 제 1 파장 변환 광학 소자는, 제 1 의 3 배 고조파와 제 2 의 3 배 고조파의 합주파 발생에 의해, 전단 자외 레이저광을 발생시키고, 제 2 파장 변환 광학 소자는, 전단 자외 레이저광과 제 3 레이저광의 합주파 발생에 의해, 자외 레이저광을 발생시키는 것이 바람직하다.

[0011] 본 발명의 제 6 양태에 의하면, 제 1~4 중 어느 하나의 양태의 자외 레이저 장치에 있어서, 제 1 파장 변환 광학 소자는 LBO 결정이고, 제 2 파장 변환 광학 소자는 CLBO 결정인 것이 바람직하다.

[0012] 본 발명의 제 7 양태에 의하면, 제 1~3 및 5 중 어느 하나의 양태의 자외 레이저 장치에 있어서, 제 1 파장 변환 광학 소자 및 제 2 파장 변환 광학 소자가 CLBO 결정인 것이 바람직하다.

발명의 효과

[0013] 본 발명에 의하면, 고출력의 자외 레이저광을 출력 가능한 자외 레이저 장치를 제공할 수 있다. 또, 자외 파장 영역에 모드 정형을 위한 광학 소자를 형성하지 않고, 고출력화가 가능한 자외 레이저 장치를 제공하는 것도 가능해진다.

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1 은, 제 1 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치의 구성의 개요를 예시하는 도면이다.

도 2 는, 제 2 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치의 구성의 개요를 예시하는 도면이다.

도 3 은, 제 3 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치의 구성의 개요를 예시하는 도면이다.

도 4 는, 제 4 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치의 구성의 개요를 예시하는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0015] 이하, 본 발명을 실시하기 위한 형태에 대해 도면을 참조하면서 설명한다. 본 발명의 제 1~제 4 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치 (1~4) 를 각각 도 1~4 에 나타낸다. 이들 자외 레이저 장치 (1~4) 는, 레이저광 출력부와, 파장 변환부를 포함한다. 레이저광 출력부는, 파이버 광 증폭기를 갖고, 적외 파장의 레이저광을 출력한다. 파장 변환부는, 파장 변환 광학 소자를 갖고, 레이저광 출력부로부터 출력된 적외 파장의 레이저광을 자외 파장의 레이저광으로 파장 변환하여 출력한다.
- [0016] 레이저광 출력부는, 도 1~4 에 나타내는 바와 같이, 적외 영역의 소정 파장의 레이저광 (시드광) 을 발생시키는 레이저광 발생부 (10) (110, 210, 310, 410)와, 레이저광 발생부 (10) 가 발생시킨 시드광을 증폭시켜 소정 출력의 적외 레이저광을 출력하는 증폭부 (20) (120, 220, 320, 420) 를 포함한다. 파이버 광 증폭기의 양 단부에 공진기를 장착한 파이버 레이저를 이용하여 레이저광 출력부를 구성해도 된다.
- [0017] 레이저광 발생부 (10) (110, 210, 310, 410) 는, 3 개의 레이저 광원, 즉, 제 1 레이저 광원 (111, 211, 311, 411), 제 2 레이저 광원 (112, 212, 312, 412) 및 제 3 레이저 광원 (113, 213, 313, 413) 을 포함한다. 제 1 레이저 광원 (111, 211, 311, 411), 제 2 레이저 광원 (112, 212, 312, 412) 및 제 3 레이저 광원 (113, 213, 313, 413) 은, 각각 적외 영역의 소정 파장의 시드광을 발생시킨다.
- [0018] 증폭부 (20) (120, 220, 320, 420) 는, 제 1~제 3 레이저 광원에 대응하여 형성된 3 개의 파이버 광 증폭기에 의해 구성된다. 이들 3 개의 파이버 광 증폭기는, 제 1 레이저 광원에 대응하여 형성된 제 1 파이버 광 증폭기 (121, 221, 321, 421), 제 2 레이저 광원에 대응하여 형성된 제 2 파이버 광 증폭기 (122, 222, 322, 422), 및 제 3 레이저 광원에 대응하여 형성된 제 3 파이버 광 증폭기 (123, 223, 323, 423) 이다. 제 1 파이버 광 증폭기 (121, 221, 321, 421) 는, 제 1 레이저 광원이 발생시킨 시드광을 소정 출력으로 증폭시키고, 증폭된 적외 파장의 레이저광 (「제 1 적외 레이저광」이라고 한다) 을 출력한다. 제 2, 제 3 파이버 광 증폭기에 대해서도 동일하다.
- [0019] 제 1 파이버 광 증폭기 (121, 221, 321, 421) 는 이트륨(Yb) 도프 파이버 광 증폭기, 제 2 파이버 광 증폭기 (122, 222, 322, 422) 는 툴륨(Tm) 도프 파이버 광 증폭기이고, 제 3 파이버 광 증폭기 (123, 223, 323, 423) 는 이트륨 도프 파이버 광 증폭기 또는 에르븀 도프 파이버 광 증폭기이다.
- [0020] 파장 변환부 (30) (130, 230, 330, 430) 는, 제 1~제 3 파이버 광 증폭기에 각각 대응하여 형성된 3 개의 광학 계열과, 이들 3 개의 광학 계열이 일체로 합류된 광학 계열을 포함한다. 즉, 파장 변환부 (30) (130, 230, 330, 430) 는, 제 1 파이버 광 증폭기로부터 출력된 제 1 적외 레이저광이 입사되어 전파되는 제 1 광학 계열 I, 제 2 파이버 광 증폭기로부터 출력된 제 2 적외 레이저광이 입사되어 전파되는 제 2 광학 계열 II, 제 3 파이버 광 증폭기로부터 출력된 제 3 적외 레이저광이 입사되어 전파되는 제 3 광학 계열 III, 및 이들 제 1~제 3 광학 계열을 전파한 레이저광이 합파되고 입사되어 전파되는 제 4 광학 계열 IV 를 갖는다.
- [0021] 제 1, 제 2, 제 3 각 광학 계열에 입사된 적외 파장의 제 1, 제 2, 제 3 적외 레이저광에 대해, 파장 변환부 (30) 에 형성된 파장 변환 광학 소자에 의해 순차 파장 변환이 실시되고, 제 4 광학 계열 IV 로부터 파장이 대체로 200 nm 정도 이하인 자외 레이저광 (심(深) 자외 레이저광) (Lv) 이 출력된다.
- [0022] 제 4 광학 계열 IV 에는, 제 1 파장 변환 광학 소자 및 제 2 파장 변환 광학 소자가 배치 형성되어 있다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (133, 233, 333, 433) 에 있어서, 제 1 광학 계열 I 을 전파한 레이저광과 제 2 광학 계열 II 를 전파한 레이저광의 합주파 발생에 의해 자외 영역의 전단 자외 레이저광이 발생하고, 제 2 파장 변환 광학 소자 (134, 234, 334, 434) 에 있어서 상기 전단 자외 레이저광과 제 3 광학 계열 III 을 전파한 레이저광의 합주파 발생에 의해 출력광인 자외 레이저광 (Lv) 이 발생한다.
- [0023] 이와 같이 구성되는 자외 레이저 장치 (1~4) 에 있어서는, 제 1 파이버 광 증폭기, 제 2 파이버 광 증폭기로서, 모두 백 W 이상의 고출력 적외 레이저광이 비교적 용이하게 얻어지는 파이버 광 증폭기가 이용되고, 또한, 이들 (제 1 파이버 광 증폭기 및 제 2 파이버 광 증폭기) 은, 적외 파장 영역 중에서도 파장이 크게 상이한 레이저광을 증폭시키는 이트륨 도프 파이버 광 증폭기 (이하, 「YDFA」라고 약기한다) 와 툴륨 도프 파이버 광 증폭기 (이하, 「TDFA」라고 약기한다) 를 이용하여 구성된다.
- [0024] 이와 같은 구성에 의하면, 거의 한계에 이르러 고출력화가 곤란할 것으로 여겨져 온 자외 레이저광의 출력을 대폭 향상시킬 수 있는 자외 레이저 장치를 제공할 수 있다. 또, YDFA 와 TDFA 로부터 각각 출력되는 제 1,

제 2 적외 레이저광의 파장이 크게 상이한 것에 더하여, 추가로 제 3 파이버 광 증폭기로서 YDFA 또는 EDFA 가 사용되므로, 파장 변환부의 구성의 자유도를 확대할 수 있다. 이로써 자외 파장 영역에 모드 정형을 위한 광학 소자를 형성하지 않고 고출력화가 가능한 복수 종류의 자외 레이저 장치를 제공할 수 있다.

[0025] 이후에서는, 상기 서술한 자외 레이저 장치 (1~4) 에 대해, 보다 구체적인 구성을 예시하면서 상세하게 설명한다. 도 1~4 의 각 도면에는, 광로 상의 각 위치에 있어서의 편광 상태에 대해, 편광면이 지면에 평행하다는 편광 상태를 p 편광으로 하여 양 단 (端) 화살표의 부호를 덧붙여 기재하고, 편광면이 지면에 수직이라는 편광 상태를 s 편광으로 하여 도트가 부여된 둥근 표시의 부호를 덧붙여 기재하고 있다.

[0026] (제 1 실시형태)

[0027] 도 1 에 나타내는 제 1 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치 (1) 는, 시드광을 발생시키는 레이저광 발생부 (110) 와, 레이저광 발생부 (110) 가 발생시킨 시드광을 증폭시켜 소정 출력의 적외 레이저광을 출력하는 증폭부 (120) 와, 광 증폭부 (120) 로부터 출력된 적외 파장의 레이저광을 자외 파장의 레이저광으로 파장 변환하여 출력하는 파장 변환부 (130) 를 포함한다.

[0028] 레이저광 발생부 (110) 는, 제 1 레이저 광원 (111), 제 2 레이저 광원 (112), 및 제 3 레이저 광원 (113) 을 포함한다. 제 1 레이저 광원 (111), 제 2 레이저 광원 (112), 및 제 3 레이저 광원 (113) 의 각각은, 적외 파장의 시드광을 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서, 제 1 레이저 광원 (111) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1063.2$ nm, 제 2 레이저 광원 (112) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=2000$ nm, 제 3 레이저 광원 (113) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1102$ nm 이다.

[0029] 제 1 레이저 광원 (111), 제 2 레이저 광원 (112), 및 제 3 레이저 광원 (113) 은, 각각 예를 들어, 각각 상기 파장을 발진 대역에 포함하는 DFB (Distributed Feedback) 반도체 레이저의 주입 전류를 펄스 변조함으로써, 혹은 DBR (Distributed Bragg Reflector) 반도체 레이저의 주입 전류를 펄스 변조함으로써, 혹은 CW 발진시킨 협대역의 파이버 레이저나 반도체 레이저의 출력광을 EOM (Electro-Optic Modulator) 등의 고속 광 변조기로 펄스 변조하거나 함으로써, 펄스 변조광을 발생시킨다.

[0030] 증폭부 (120) 는, 제 1 레이저 광원 (111) 의 출력이 입사단 (端) 에 접속된 제 1 파이버 광 증폭기 (121), 제 2 레이저 광원 (112) 의 출력이 입사단에 접속된 제 2 파이버 광 증폭기 (122), 및 제 3 레이저 광원 (113) 의 출력이 입사단에 접속된 제 3 파이버 광 증폭기 (123) 를 포함한다.

[0031] 제 1 파이버 광 증폭기 (121) 는, 제 1 레이저 광원 (111) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1063.2$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장 대역에서 높은 이득을 갖고, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 YDFA (이트리븀 도프 파이버 광 증폭기) 가, 제 1 파이버 광 증폭기 (121) 로서 바람직하게 사용된다. 제 1 파이버 광 증폭기 (121) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1063.2$ nm 의 제 1 적외 레이저광은, 파장 변환부 (130) 의 제 1 광학 계열 I 에 입사된다.

[0032] 제 2 파이버 광 증폭기 (122) 는, 제 2 레이저 광원 (112) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=2000$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장 대역에서 높은 이득을 갖고, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 TDFA (툴륨 도프 파이버 광 증폭기) 가, 제 2 파이버 광 증폭기 (122) 로서 바람직하게 사용된다. 제 2 파이버 광 증폭기 (122) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=2000$ nm 의 제 2 적외 레이저광은, 파장 변환부 (130) 의 제 2 광학 계열 II 에 입사된다.

[0033] 제 3 파이버 광 증폭기 (123) 는, 제 3 레이저 광원 (113) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1102$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 제 1 파이버 광 증폭기 (121) 와 마찬가지로, YDFA (이트리븀 도프 파이버 광 증폭기) 가, 제 3 파이버 광 증폭기 (123) 로서 바람직하게 사용된다. 제 3 파이버 광 증폭기 (123) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1102$ nm 의 제 3 적외 레이저광은, 파장 변환부 (130) 의 제 3 광학 계열 III 에 입사된다.

[0034] 본 실시형태의 설명에서는, 각 부가 갖는 기능에 기초하여 레이저광 발생부 (110) 와 증폭부 (120) 로 나누어 설명하는데, 상기 설명으로부터 알 수 있는 바와 같이, 각 레이저 광원과 파이버 광 증폭기는 일체적으로 결합되어 있고, 그 양자 에 의해 소정 파장의 적외 레이저광을 출력하는 레이저광 출력부가 형성된다. 즉, 제 1 레이저 광원 (111) 과 제 1 파이버 광 증폭기 (121) 에 의해 파장 $\lambda=1063.2$ nm 의 제 1 적외 레이저광을 출력하는 제 1 레이저광 출력부가 형성되고, 제 2 레이저 광원 (112) 과 제 2 파이버 광 증폭기 (122) 에 의해 파장 $\lambda=2000$ nm 의 제 2 적외 레이저광을 출력하는 제 2 레이저광 출력부가 형성되고, 제 3 레이저 광원 (113) 과 제 3 파이버 광 증폭기 (123) 에 의해 파장 $\lambda=1102$ nm 의 제 3 적외 레이저광을 출력하는 제 3 레이저광 출력

부가 형성된다. 이것은, 이후에 기재하는 다른 실시형태의 설명에서도 동일하다.

- [0035] 제 1 파이버 광 증폭기 (121)로부터 출력된 파장 $\lambda=1063.2$ nm 의 제 1 적외 레이저광은, 제 1 광학 계열 I 에 입사되고 전파되어, 제 1 레이저광으로서 출력된다. 제 2 파이버 광 증폭기 (122)로부터 출력된 파장 $\lambda=2000$ nm 의 제 2 적외 레이저광은, 제 2 광학 계열 II 에 입사되고 전파되어, 제 2 레이저광으로서 출력된다. 제 3 파이버 광 증폭기로부터 출력된 파장 $\lambda=1102$ nm 의 제 3 적외 레이저광은, 제 3 광학 계열 III 에 입사되고 전파되어, 제 3 레이저광으로서 출력된다. 이들 제 1~제 3 광학 계열로부터 각각 출력된 제 1~3 레이저광은 합파되어, 제 4 광학 계열 IV 에 입사되어 전파된다. 파장 변환부 (130) 는, 이와 같은 제 1 광학 계열 I, 제 2 광학 계열 II, 제 3 광학 계열 III, 및 제 4 광학 계열 IV 의 4 개의 광학 계열에 의해 구성된다. 본 실시형태의 파장 변환부 (130) 는, 4 개의 파장 변환 광학 소자 (131~134) 를 주체로 하여 구성된다. 도 1 에 있어서, 제 1~제 3 광학 계열의 광축 상에 형성된 긴 타원형의 부재는, 파장 변환 광학 소자에 빔을 집광 입사시키기 위한 실린드릭 렌즈이며, 이것은 도 2~4 에 있어서도 동일하다.
- [0036] 제 1 광학 계열 I 에는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (131) 및 제 4 파장 변환 광학 소자 (132) 가 형성되어 있다. 제 1 광학 계열 I 에 있어서는, 제 1 파이버 광 증폭기 (121)로부터 출사되어 제 1 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1063.2$ nm, 각주파수 ω_1 의 제 1 적외 레이저광 (이후, 본 실시형태의 설명에서 「제 1 기본파」라고도 표기한다) 이, 제 1 광학 계열을 전파하는 과정에서, 각주파수가 제 1 기본파의 4 배 ($4\omega_1$), 파장이 $1/4$ ($\lambda=265.8$ nm) 의 4 배 고조파로 파장 변환된다.
- [0037] 제 1 광학 계열 I 에 형성된 제 3 파장 변환 광학 소자 (131) 는, 이 소자에 입사되는 각주파수 ω_1 의 제 1 기본파 (제 1 적외 레이저광) 를, 각주파수가 $2\omega_1$ 인 2 배 고조파로 파장 변환한다. 본 실시형태에 있어서는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (131) 로서 LBO (LiB_3O_5) 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 423K 로 하여 NCPM (Non-Critical Phase Matching) 에서 사용한다. 제 3 파장 변환 광학 소자 (131) 에서는, 제 1 기본파의 2 차 고조파 발생 (SHG) 에 의해, 각주파수가 제 1 기본파의 2 배 ($2\omega_1$), 파장이 절반 ($\lambda=531.6$ nm) 인 2 배 고조파가 발생한다. 이 때, LBO 결정의 유효 비선형 광학 상수 d_{eff} 는, $d_{\text{eff}}=0.829$ pm/V 로 높아, 고효율로 제 1 기본파의 2 배 고조파가 발생한다. 제 3 파장 변환 광학 소자 (131) 에서 발생한 2 배 고조파는, 제 4 파장 변환 광학 소자 (132) 에 집광 입사된다.
- [0038] 제 4 파장 변환 광학 소자 (132) 는, 집광 입사된 각주파수 $2\omega_1$ 의 2 배 고조파를, 각주파수가 $4\omega_1$ 인 4 배 고조파로 파장 변환한다. 본 실시형태에 있어서는, 제 4 파장 변환 광학 소자 (132) 로서 CLBO ($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$) 결정을 이용하고, Type I 각도 위상 정합에서 사용한다. 제 4 파장 변환 광학 소자 (132) 에서는, 2 배 고조파의 2 차 고조파 발생에 의해, 각주파수가 제 1 기본파의 4 배 ($4\omega_1$), 파장이 $1/4$ ($\lambda=265.8$ nm) 인 4 배 고조파가 발생한다. 이 때, CLBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.792$ pm/V 로 높아, 고효율로 제 1 기본파의 4 배 고조파가 발생한다.
- [0039] 제 4 파장 변환 광학 소자 (132) 에서 발생한 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 는, 2 장의 상기 서술한 실린드릭 렌즈에 의해 빔 형상이 정형된 후, 다이크로익 미러 (141) 에 입사된다. 다이크로익 미러 (141) 는, 파장 265.8 nm 의 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파를 반사시키고, 파장 2000 nm 의 제 2 적외 레이저광, 및 파장 1102 nm 의 제 3 적외 레이저광을 투과시킨다. 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 는, 다이크로익 미러 (141) 에 의해 반사되어, 제 4 광학 계열 IV 에 형성된 제 1 파장 변환 광학 소자 (133) 에 제 1 레이저광으로서 집광 입사된다.
- [0040] 다이크로익 미러 (141) 의 투과 파장은, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 보다 길고, 제 2, 제 3 적외 레이저광의 파장을 포함하는 파장 대역 중의 임의의 파장이다. 예를 들어, 다이크로익 미러 (141) 의 투과 파장을 350 nm 이상 (반사 파장은 350 nm 미만) 으로 설정하고, 다이크로익 미러 (141) 를, 제 1 적외 레이저광의 기본파 (ω_1) 및 그 2 배 고조파 ($2\omega_1$) 가 투과되어 광 흡수체에 흡수되는 구성으로 하면, 필요 없는 파장의 레이저광이 제 4 광학 계열 IV 의 파장 변환 광학 소자에 입사되는 것을 억제할 수 있다. 이후의 각 실시형태에 있어서도 동일하다.
- [0041] 파장 변환부 (130) 는, 제 2 적외 레이저광이 입사되는 제 2 광학 계열 II, 및 제 3 적외광이 입사되는 제 3 광학 계열 III 에 파장 변환 광학 소자를 형성하지 않고 구성된다. 이들 광학 계열의 종단부에는, 미러 (142)

와 다이크로익 미러 (143) 가 형성되어 있다. 다이크로익 미러 (143) 는, 파장 2000 nm 의 제 2 적외 레이저광을 투과시키고, 파장 1102 nm 의 제 3 적외 레이저광을 반사시키도록 구성된다.

[0042] 미러 (142) 에 의해 반사된 제 2 적외 레이저광은 다이크로익 미러 (143) 를 투과한다. 제 3 적외 레이저광은, 다이크로익 미러 (143) 에 의해 반사되어 제 2 적외 레이저광과 동일축 상에 중첩된다. 또한 제 2, 제 3 적외 레이저광이 다이크로익 미러 (141) 를 투과한다. 이렇게 하여, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파 (제 1 레이저광), 제 2 적외 레이저광 (제 2 레이저광), 및 제 3 적외 레이저광 (제 3 레이저광) 이, 동일축 상에 중첩된 상태에서 제 4 광학 계열 IV 의 제 1 파장 변환 광학 소자 (133) 에 집광 입사된다.

[0043] 제 4 광학 계열 IV 에는, 제 1 파장 변환 광학 소자 (133) 및 제 2 파장 변환 광학 소자 (134) 가 형성되어 있다. 제 1 적외 레이저광이 제 1 광학 계열 I 을 전파하는 과정에서 파장 변환되어, 제 4 광학 계열에 입사되었을 때의 파장 $\lambda=265.8$ nm 인 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 와, 제 2 광학 계열을 전파하여 제 4 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=2000$ nm 의 제 2 적외 레이저광과, 제 3 광학 계열을 전파하여 제 4 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1102$ nm 의 제 3 적외 레이저광의 3 개의 적외 레이저광이, 제 4 광학 계열을 전파하는 과정에서, 파장이 $\lambda=193.4$ nm 인 자외 레이저광으로 파장 변환된다.

[0044] 제 4 광학 계열 IV 에 형성된 제 1 파장 변환 광학 소자 (133) 는, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파와 제 2 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장이 자외 영역이 되는 자외 레이저광 (본 명세서에서는, 이것을 편의적으로 「전단 자외 레이저광」 이라고 한다) 을 발생시킨다.

[0045] 본 실시형태에 있어서는, 제 1 파장 변환 광학 소자 (133) 로서 LBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 320K 로 하여 NCPM 에서 사용한다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (133) 에서는, 파장 $\lambda=265.8$ nm 인, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 와, 파장 $\lambda=2000$ nm 의 제 2 적외 레이저광의 합주파 발생 (SFG) 에 의해, 파장 $\lambda=234.6$ nm 의 전단 자외 레이저광이 발생한다. 이 때, LBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{eff}=0.83$ pm/V 로 높아, 고효율로 파장 $\lambda=234.6$ nm 의 전단 자외 레이저광이 발생한다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (133) 에서 발생한 전단 자외 레이저광과, 제 1 파장 변환 광학 소자 (133) 를 투과한 제 3 적외 레이저광은, 제 2 파장 변환 광학 소자 (134) 에 입사된다.

[0046] 제 2 파장 변환 광학 소자 (134) 는, 전단 자외 레이저광과 제 3 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장이 200 nm 이하인 자외 레이저광을 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서는, 제 2 파장 변환 광학 소자 (134) 로서 CLBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 410K 로 하여 NCPM 에서 사용한다. 제 2 파장 변환 광학 소자 (134) 에서는, 파장 $\lambda=234.6$ nm 의 전단 자외 레이저광과, 파장 $\lambda=1102$ nm 의 제 3 적외 레이저광의 합주파 발생 (SFG) 에 의해, 파장 $\lambda=193.4$ nm 의 자외 레이저광이 발생한다. 이 때, CLBO 결정의 유효 비선형 광학 상수 d_{eff} 는, $d_{eff}=1.11$ pm/V 로 매우 높아, 고효율로 파장 $\lambda=193.4$ nm 의 자외 레이저광이 발생한다.

[0047] 제 2 파장 변환 광학 소자 (134) 에서 발생한 파장 $\lambda=193.4$ nm 의 자외 레이저광은, 제 4 광학 계열의 종단으로부터 출력된다. 파장 변환부 (130) (자외 레이저 장치 (1)) 로부터, ArF 엑시머 레이저와 거의 동일 파장의 파장 $\lambda=193.4$ nm 의 자외 레이저광 (심자외 레이저광) (Lv) 이 출력된다.

[0048] 이와 같이 구성되는 자외 레이저 장치 (1) 에 있어서는, 상기 서술한 기본적인 효과에 더하여, 이하와 같은 효과가 얻어진다. 먼저, 본 실시형태에 있어서는, 적외 레이저광을 증폭시키는 3 개의 파이버 광 증폭기 (제 1~제 3 파이버 광 증폭기) (121~123) 가, 모두 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 YDFA 와 TDFA 에 의해 구성된다. 이 때문에, 파장 193 nm 의 자외 레이저광을 출력하는 전고체형 자외 레이저 장치의 대폭적인 고효율화를 실현할 수 있다.

[0049] 또한 본 실시형태에 있어서는 자외 레이저 장치 (1) 에 있어서는, 자외 레이저광을 발생시키기 위한 제 1, 제 2 파장 변환 광학 소자 (LBO 결정, CLBO 결정) (133, 134) 는, 양방 모두 워크 오프를 일으키지 않는 NCPM 에서 사용된다. 이 때문에, 파장 변환부 (130) 에서는 매우 고효율로 파장 변환이 실시되고, 또한 높은 빔 품질이 얻어진다. 또, 심자외 영역의 레이저광을 발생시켜 출력하는 제 4 광학 계열에는, 빔 정형을 위한 광학 소자를 형성할 필요가 없다.

[0050] (제 2 실시형태)

[0051] 제 2 실시형태에 있어서는 자외 레이저 장치 (2) 에 대해 도 2 를 참조하여 설명한다. 자외 레이저 장치 (2) 는, 시드광을 발생시키는 레이저광 발생부 (210) 와, 레이저광 발생부 (210) 가 발생시킨 시드광을 증폭시켜 소정 출력의 적외 레이저광을 출력하는 증폭부 (220) 와, 광 증폭부 (220) 로부터 출력된 적외 파장의 레이

저광을 자외 파장의 레이저광으로 파장 변환하여 출력하는 파장 변환부 (230) 를 포함한다.

- [0052] 레이저광 발생부 (210) 는, 제 1 레이저 광원 (211), 제 2 레이저 광원 (212), 및 제 3 레이저 광원 (213) 을 포함한다. 제 1 레이저 광원 (211), 제 2 레이저 광원 (212), 및 제 3 레이저 광원 (213) 의 각각은, 적외 파장의 시드광을 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서, 제 1 레이저 광원 (211) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1080$ nm, 제 2 레이저 광원 (212) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=2000$ nm, 제 3 레이저 광원 (213) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1080$ nm 이다.
- [0053] 제 1 레이저 광원 (211), 제 2 레이저 광원 (212), 및 제 3 레이저 광원 (213) 은, 제 1 실시형태와 동일하고, 각각 상기 파장을 발진 대역에 포함하는 DFB 반도체 레이저의 주입 전류를 펄스 변조함으로써, 혹은 DBR 반도체 레이저의 주입 전류를 펄스 변조함으로써, 혹은 CW 발진시킨 협대역의 파이버 레이저나 반도체 레이저의 출력광을 EOM 등의 고속 광 변조기로 펄스 변조하거나 함으로써, 펄스 변조광을 발생시킨다.
- [0054] 증폭부 (220) 는, 제 1 레이저 광원 (211) 의 출력이 입사단에 접속된 제 1 파이버 광 증폭기 (221), 제 2 레이저 광원 (212) 의 출력이 입사단에 접속된 제 2 파이버 광 증폭기 (222), 및 제 3 레이저 광원 (213) 의 출력이 입사단에 접속된 제 3 파이버 광 증폭기 (223) 를 포함한다.
- [0055] 제 1 파이버 광 증폭기 (221) 는, 제 1 레이저 광원 (211) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1080$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장 대역에서 높은 이득을 갖고, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 YDFA 가, 제 1 파이버 광 증폭기 (221) 로서 바람직하게 사용된다. 제 1 파이버 광 증폭기 (221) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1080$ nm 의 제 1 적외 레이저광은, 파장 변환부 (230) 의 제 1 광학 계열 I 에 입사된다.
- [0056] 제 2 파이버 광 증폭기 (222) 는, 제 2 레이저 광원 (212) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=2000$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장 대역에서 높은 이득을 갖고, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 T DFA 가, 제 2 파이버 광 증폭기 (222) 로서 바람직하게 사용된다. 제 2 파이버 광 증폭기 (222) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=2000$ nm 의 제 2 적외 레이저광은, 파장 변환부 (230) 의 제 2 광학 계열 II 에 입사된다.
- [0057] 제 3 파이버 광 증폭기 (223) 는, 제 3 레이저 광원 (213) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1080$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 제 1 파이버 광 증폭기 (221) 와 동일한 YDFA 가 사용된다. 제 3 파이버 광 증폭기 (223) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1080$ nm 의 제 3 적외 레이저광은, 파장 변환부 (230) 의 제 3 광학 계열 III 에 입사된다.
- [0058] 제 1 파이버 광 증폭기 (221) 로부터 출력된 파장 $\lambda=1080$ nm 의 제 1 적외 레이저광은, 제 1 광학 계열 I 에 입사되고 전파되어, 제 1 레이저광으로서 출력된다. 제 2 파이버 광 증폭기 (222) 로부터 출력된 파장 $\lambda=2000$ nm 의 제 2 적외 레이저광은, 제 2 광학 계열 II 에 입사되고 전파되어, 제 2 레이저광으로서 출력된다. 제 3 파이버 광 증폭기로부터 출력된 파장 $\lambda=1080$ nm 의 제 3 적외 레이저광은, 제 3 광학 계열 III 에 입사되고 전파되어, 제 3 레이저광으로서 출력된다. 이들 제 1~제 3 광학 계열로부터 각각 출력된 제 1~3 레이저광은 합과되어, 제 4 광학 계열 IV 에 입사되어 전파된다. 파장 변환부 (230) 는, 이와 같은 제 1 광학 계열 I, 제 2 광학 계열 II, 제 3 광학 계열 III, 및 제 4 광학 계열 IV 의 4 개의 광학 계열에 의해 구성된다. 본 실시형태의 파장 변환부 (230) 는, 4 개의 파장 변환 광학 소자 (231~234) 를 주체로 하여 구성된다.
- [0059] 제 1 광학 계열 I 에는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (231) 및 제 4 파장 변환 광학 소자 (232) 가 형성되어 있다. 제 1 광학 계열 I 에 있어서는, 제 1 파이버 광 증폭기 (221) 로부터 출사되어 제 1 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1080$ nm, 각주파수 ω_1 의 제 1 적외 레이저광 (이후, 본 실시형태의 설명에서 「제 1 기본파」라고도 표기한다) 이, 제 1 광학 계열을 전파하는 과정에서, 각주파수가 제 1 기본파의 4 배 ($4\omega_1$), 파장이 $1/4$ ($\lambda=270$ nm) 인 4 배 고조파로 파장 변환된다.
- [0060] 제 1 광학 계열 I 에 형성된 제 3 파장 변환 광학 소자 (231) 는, 이 소자에 입사되는 각주파수 ω_1 의 제 1 기본파 (제 1 적외 레이저광) 를, 각주파수가 $2\omega_1$ 인 2 배 고조파로 파장 변환한다. 본 실시형태에 있어서는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (231) 로서 LBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 400K 로 하여 NCPM 에서 사용한다. 제 3 파장 변환 광학 소자 (231) 에서는, 제 1 기본파의 2 차 고조파 발생 (SHG) 에 의해, 각주파수가 제 1 기본파의 2 배 ($2\omega_1$), 파장이 절반 ($\lambda=540$ nm) 인 2 배 고조파가 발생한다. 이 때, LBO

결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.85 \text{ pm/V}$ 로 높아, 고효율로 제 1 기본파의 2 배 고조파가 발생한다.

제 3 파장 변환 광학 소자 (231) 에서 발생한 2 배 고조파는, 제 4 파장 변환 광학 소자 (232) 에 집광 입사된다.

[0061] 제 4 파장 변환 광학 소자 (232) 는, 집광 입사된 각주파수 $2\omega_1$ 의 2 배 고조파를, 각주파수가 $4\omega_1$ 인 4 배 고조파로 파장 변환한다. 본 실시형태에 있어서는, 제 4 파장 변환 광학 소자 (232) 로서 CLBO 결정을 이용하고, Type I 각도 위상 정합에서 사용한다. 제 4 파장 변환 광학 소자 (232) 에서는 2 배 고조파의 2 차 고조파 발생에 의해, 각주파수가 제 1 기본파의 4 배 ($4\omega_1$), 파장이 $1/4$ ($\lambda=270 \text{ nm}$) 인 4 배 고조파가 발생한다. 이 때, CLBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.77 \text{ pm/V}$ 로 높아, 고효율로 제 1 기본파의 4 배 고조파가 발생한다.

[0062] 제 4 파장 변환 광학 소자 (232) 에서 발생한 4 배 고조파는, 2 장의 상기 서술한 실린드릭 렌즈에 의해 빔 형상이 정형된 후, 다이크로익 미러 (241) 에 입사된다. 다이크로익 미러 (241) 는, 파장 270 nm 의 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파를 반사시키고, 파장 2000 nm 의 제 2 적외 레이저광, 및 파장 1080 nm 의 제 3 적외 레이저광을 투과시킨다. 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파는, 다이크로익 미러 (241) 에 의해 반사되어, 제 4 광학 계열 IV 에 형성된 제 1 파장 변환 광학 소자 (233) 에 제 1 레이저광으로서 집광 입사된다.

[0063] 파장 변환부 (230) 는, 제 2 적외 레이저광이 입사되는 제 2 광학 계열 II, 및 제 3 적외광이 입사되는 제 3 광학 계열 III 에 파장 변환 광학 소자를 형성하지 않고 구성된다. 이들 광학 계열의 중단부에는, 미러 (242) 와 다이크로익 미러 (243) 가 형성되어 있다. 다이크로익 미러 (243) 는, 파장 2000 nm 의 제 2 적외 레이저광을 투과시키고, 파장 1080 nm 의 제 3 적외 레이저광을 반사시키도록 구성된다.

[0064] 미러 (242) 에 의해 반사된 제 2 적외 레이저광은 다이크로익 미러 (243) 를 투과한다. 제 3 적외 레이저광은, 다이크로익 미러 (243) 에 의해 반사되어 제 2 적외 레이저광과 동일축 상에 중첩된다. 또한 제 2, 제 3 적외 레이저광이 다이크로익 미러 (241) 를 투과한다. 이렇게 하여, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파 (제 1 레이저광), 제 2 적외 레이저광 (제 2 레이저광), 및 제 3 적외 레이저광 (제 3 레이저광) 이, 동일축 상에 중첩된 상태에서 제 4 광학 계열 IV 의 제 1 파장 변환 광학 소자 (233) 에 집광 입사된다.

[0065] 제 4 광학 계열 IV 에는, 제 1 파장 변환 광학 소자 (233) 및 제 2 파장 변환 광학 소자 (234) 가 형성되어 있다. 제 1 적외 레이저광이 제 1 광학 계열 I 을 전파하는 과정에서 파장 변환되어 제 4 광학 계열에 입사되었을 때의 파장 $\lambda=270 \text{ nm}$ 인 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 와, 제 2 광학 계열을 전파하여 제 4 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=2000 \text{ nm}$ 의 제 2 적외 레이저광과, 제 3 광학 계열을 전파하여 제 4 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1080 \text{ nm}$ 의 제 3 적외 레이저광의 3 개의 적외 레이저광이, 제 4 광학 계열을 전파하는 과정에서, 파장이 $\lambda=195 \text{ nm}$ 인 자외 레이저광으로 파장 변환된다.

[0066] 제 4 광학 계열 IV 에 형성된 제 1 파장 변환 광학 소자 (233) 는, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파와 제 2 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장이 자외 영역이 되는 전단 자외 레이저광을 발생시킨다.

[0067] 본 실시형태에 있어서는, 제 1 파장 변환 광학 소자 (233) 로서 LBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 340K 로 하여 NCPM 에서 사용한다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (233) 에서는, 파장 $\lambda=270 \text{ nm}$ 의, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 와, 파장 $\lambda=2000 \text{ nm}$ 의 제 2 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장 $\lambda=237.9 \text{ nm}$ 의 전단 자외 레이저광이 발생한다. 이 때, LBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.82 \text{ pm/V}$ 로 높아, 고효율로 파장 $\lambda=237.9 \text{ nm}$ 의 전단 자외 레이저광이 발생한다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (233) 에서 발생한 전단 자외 레이저광과 제 1 파장 변환 광학 소자 (233) 를 투과한 제 3 적외 레이저광은, 제 2 파장 변환 광학 소자 (234) 에 입사된다.

[0068] 제 2 파장 변환 광학 소자 (234) 는, 전단 자외 레이저광과 제 3 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장이 200 nm 이하인 자외 레이저광을 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서는, 제 2 파장 변환 광학 소자 (234) 로서 CLBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 415K 로 하여 NCPM 에서 사용한다. 제 2 파장 변환 광학 소자 (234) 에서는, 파장 $\lambda=237.9 \text{ nm}$ 의 전단 자외 레이저광과, 파장 $\lambda=1080 \text{ nm}$ 의 제 3 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장 $\lambda=195 \text{ nm}$ 의 자외 레이저광이 발생한다. 이 때, CLBO 결정의 유효 비선형 광학 상수 d_{eff} 는, $d_{\text{eff}}=1.10 \text{ pm/V}$ 로 매우 높아, 고효율로 파장 $\lambda=195 \text{ nm}$ 의 자외 레이저광이 발생한다.

- [0069] 제 2 파장 변환 광학 소자 (234) 에서 발생한 파장 $\lambda=195$ nm 의 자외 레이저광은, 제 4 광학 계열의 종단으로부터 출력된다. 파장 변환부 (230) (자외 레이저 장치 (2)) 로부터, 파장 $\lambda=195$ nm 의 자외 레이저광 (심자외 레이저광) (Lv) 이 출력된다.
- [0070] 이와 같이 구성되는 자외 레이저 장치 (2) 에 있어서는, 상기 서술한 기본적인 효과에 더하여, 제 1 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치 (1) 와 마찬가지로, 이하와 같은 효과가 얻어진다. 먼저, 본 실시형태에 있어서는, 적외 레이저광을 증폭시키는 3 개의 파이버 광 증폭기 (제 1~제 3 파이버 광 증폭기) (221~223) 가, 모두 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 YDFA 와 TDFA 에 의해 구성된다. 이 때문에, 파장 195 nm 의 자외 레이저광을 출력하는 전고체형 자외 레이저 장치의 대폭적인 고효율화를 실현할 수 있다.
- [0071] 또한 본 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치 (2) 에 있어서는, 자외 레이저광을 발생시키기 위한 제 1, 제 2 파장 변환 광학 소자 (LB0 결정, CLB0 결정) (233, 234) 는, 양방 모두 워크 오프를 일으키지 않는 NCPM 에서 사용된다. 이 때문에, 파장 변환부 (230) 에서는 매우 고효율로 파장 변환이 실시되고, 또한 높은 빔 품질이 얻어진다. 또, 심자외 영역의 레이저광을 발생시켜 출력하는 제 4 광학 계열에는, 빔 정형을 위한 광학 소자를 형성할 필요가 없다.
- [0072] 추가로, 파장 193 nm 는 CLB0 결정의 흡수단의 파장에 가깝기 때문에, 파장이 193 nm 일 때에는 결정 품질의 편차나, 흡습, 온도 상승 등에 의해 흡수율이 급격하게 증대될 우려가 있지만, 파장이 195 nm 이면 흡수단으로부터 멀어지기 때문에, 여유를 갖고 자외 레이저 장치를 운용할 수 있다.
- [0073] (제 3 실시형태)
- [0074] 제 3 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치 (3) 에 대해 도 3 을 참조하여 설명한다. 자외 레이저 장치 (3) 는, 시드광을 발생시키는 레이저광 발생부 (310) 와, 레이저광 발생부 (310) 가 발생시킨 시드광을 증폭시켜 소정 출력의 적외 레이저광을 출력하는 증폭부 (320) 와, 광 증폭부 (320) 로부터 출력된 적외 파장의 레이저광을 자외 파장의 레이저광으로 파장 변환하여 출력하는 파장 변환부 (330) 를 포함한다.
- [0075] 레이저광 발생부 (310) 는, 제 1 레이저 광원 (311), 제 2 레이저 광원 (312), 및 제 3 레이저 광원 (313) 을 포함한다. 제 1 레이저 광원 (311), 제 2 레이저 광원 (312), 및 제 3 레이저 광원 (313) 의 각각은, 적외 파장의 시드광을 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서, 제 1 레이저 광원 (311) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1050$ nm, 제 2 레이저 광원 (312) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1850$ nm, 제 3 레이저 광원 (313) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1540$ nm 이다.
- [0076] 제 1 레이저 광원 (311), 제 2 레이저 광원 (312), 및 제 3 레이저 광원 (313) 은, 예를 들어, 각각 상기 파장을 발진 대역에 포함하는 DFB 반도체 레이저의 주입 전류를 펄스 변조함으로써, 혹은 DBR 반도체 레이저의 주입 전류를 펄스 변조함으로써, 혹은 CW 발진시킨 협대역의 파이버 레이저나 반도체 레이저의 출력광을 EOM 등의 고속 광 변조기로 펄스 변조하거나 함으로써, 펄스 변조광을 발생시킨다.
- [0077] 증폭부 (320) 는, 제 1 레이저 광원 (311) 의 출력이 입사단에 접속된 제 1 파이버 광 증폭기 (321), 제 2 레이저 광원 (312) 의 출력이 입사단에 접속된 제 2 파이버 광 증폭기 (322), 및 제 3 레이저 광원 (313) 의 출력이 입사단에 접속된 제 3 파이버 광 증폭기 (323) 를 포함한다.
- [0078] 제 1 파이버 광 증폭기 (321) 는, 제 1 레이저 광원 (311) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1050$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장 대역에서 높은 이득을 갖고, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 YDFA 가, 제 1 파이버 광 증폭기 (321) 로서 바람직하게 사용된다. 제 1 파이버 광 증폭기 (321) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1050$ nm 의 제 1 적외 레이저광은, 파장 변환부 (330) 의 제 1 광학 계열 I 에 입사된다.
- [0079] 제 2 파이버 광 증폭기 (322) 는, 제 2 레이저 광원 (312) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1850$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장 대역에서 높은 이득을 갖고, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 TDFA 가, 제 2 파이버 광 증폭기 (322) 로서 바람직하게 사용된다. 제 2 파이버 광 증폭기 (322) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1850$ nm 의 제 2 적외 레이저광은, 파장 변환부 (330) 의 제 2 광학 계열 II 에 입사된다.
- [0080] 제 3 파이버 광 증폭기 (323) 는, 제 3 레이저 광원 (313) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1540$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장대역에서 높은 이득을 갖는 EDFA (에르븀 도프 파이버 광 증폭기) 가, 제 3 파이버 광 증폭기 (323) 로서 바람직하게 사용된다. 제 3 파이버 광 증폭기 (323) 에 의해 증

폭된 파장 $\lambda=1540$ nm 의 제 3 적외 레이저광은, 파장 변환부 (330) 의 제 3 광학 계열 III 에 입사된다. 코어에 에르븀 (Er) 과 이트륨 (Yb) 이 함께 첨가된 Er ; Yb 코도프 파이버 광 증폭기를 제 3 파이버 광 증폭기 (323) 로서 사용하는 것도 바람직하다.

[0081] 제 1 파이버 광 증폭기 (321) 로부터 출력된 파장 $\lambda=1050$ nm 의 제 1 적외 레이저광은, 제 1 광학 계열 I 에 입사되고 전파되어, 제 1 레이저광으로서 출력된다. 제 2 파이버 광 증폭기 (322) 로부터 출력된 파장 $\lambda=1850$ nm 의 제 2 적외 레이저광은, 제 2 광학 계열 II 에 입사되고 전파되어, 제 2 레이저광으로서 출력된다.

제 3 파이버 광 증폭기로부터 출력된 파장 $\lambda=1540$ nm 의 제 3 적외 레이저광은, 제 3 광학 계열 III 에 입사되고 전파되어, 제 3 레이저광으로서 출력된다. 이들 제 1~제 3 광학 계열로부터 각각 출력된 제 1~3 레이저광은 합파되어, 제 4 광학 계열 IV 에 입사되어 전파된다. 파장 변환부 (330) 는, 제 1 광학 계열 I, 제 2 광학 계열 II, 제 3 광학 계열 III, 및 제 4 계열 IV 의 4 개의 계열에 의해 구성된다. 본 실시형태의 파장 변환부 (330) 는, 4 개의 파장 변환 광학 소자 (331~334) 를 주체로 하여 구성된다.

[0082] 제 1 광학 계열 I 에는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (331) 및 제 4 파장 변환 광학 소자 (332) 가 형성되어 있다. 제 1 광학 계열 I 에 있어서는, 제 1 파이버 광 증폭기 (321) 로부터 출사되어 제 1 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1050$ nm, 각주파수 ω_1 의 제 1 적외 레이저광 (이후, 본 실시형태의 설명에서 「제 1 기본파」라고도 표기한다) 이, 제 1 광학 계열을 전파하는 과정에서, 각주파수가 제 1 기본파의 4 배 ($4\omega_1$), 파장이 $1/4$ ($\lambda=262.5$ nm) 인 4 배 고조파로 파장 변환된다.

[0083] 제 1 광학 계열 I 에 형성된 제 3 파장 변환 광학 소자 (331) 는, 이 소자에 입사되는 각주파수 ω_1 의 제 1 기본파 (제 1 적외 레이저광) 를, 각주파수가 $2\omega_1$ 인 2 배 고조파로 파장 변환한다. 본 실시형태에 있어서는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (331) 로서 LBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 440K 로 하여 NCPM 에서 사용한다. 제 3 파장 변환 광학 소자 (331) 에서는, 제 1 기본파의 2 차 고조파 발생 (SHG) 에 의해, 각주파수가 제 1 기본파의 2 배 ($2\omega_1$), 파장이 절반 ($\lambda=525$ nm) 인 2 배 고조파가 발생한다. 이 때, LBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{eff}=0.852$ pm/V 로 높아, 고효율로 제 1 기본파의 2 배 고조파가 발생한다.

제 3 파장 변환 광학 소자 (331) 에서 발생한 2 배 고조파는, 제 4 파장 변환 광학 소자 (332) 에 집광 입사된다.

[0084] 제 4 파장 변환 광학 소자 (332) 는, 집광 입사된 각주파수 $2\omega_1$ 의 2 배 고조파를, 각주파수가 $4\omega_1$ 인 4 배 고조파로 파장 변환한다. 본 실시형태에 있어서는, 제 4 파장 변환 광학 소자 (332) 로서 CLBO 결정을 이용하고, Type I 각도 위상 정합에서 사용한다. 제 4 파장 변환 광학 소자 (332) 에서는, 2 배 고조파의 2 차 고조파 발생에 의해, 각주파수가 제 1 기본파의 4 배 ($4\omega_1$), 파장이 $1/4$ ($\lambda=262.5$ nm) 인 4 배 고조파가 발생한다. 이 때, CLBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{eff}=0.81$ pm/V 로 높아, 고효율로 제 1 기본파의 4 배 고조파가 발생한다.

[0085] 제 4 파장 변환 광학 소자 (332) 에서 발생한 4 배 고조파는, 2 장의 상기 서술한 실린드릭 렌즈에 의해 빔 형상이 정형된 후, 다이크로익 미러 (341) 에 입사된다. 다이크로익 미러 (341) 는, 파장 262.5 nm 의 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파를 반사시키고, 파장 1850 nm 의 제 2 적외 레이저광, 및 파장 1540 nm 의 제 3 적외 레이저광을 투과시킨다. 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파는, 다이크로익 미러 (341) 에 의해 반사되어, 제 4 광학 계열 IV 에 형성된 제 1 파장 변환 광학 소자 (333) 에 제 1 레이저광으로서 집광 입사된다.

[0086] 파장 변환부 (330) 는, 제 2 적외 레이저광이 입사되는 제 2 광학 계열 II, 및 제 3 적외광이 입사되는 제 3 광학 계열 III 에 파장 변환 광학 소자를 형성하지 않고 구성된다. 이들 광학 계열의 종단부에는, 미러 (342) 와 다이크로익 미러 (343) 가 형성되어 있다. 다이크로익 미러 (343) 는, 파장 1850 nm 의 제 2 적외 레이저광을 투과시키고, 파장 1540 nm 의 제 3 적외 레이저광을 반사시키도록 구성된다.

[0087] 미러 (342) 에 의해 반사된 제 2 적외 레이저광은 다이크로익 미러 (343) 를 투과한다. 제 3 적외 레이저광은, 다이크로익 미러 (343) 에 의해 반사되어 제 2 적외 레이저광과 동일축 상에 중첩된다. 또한 제 2, 제 3 적외 레이저광이 다이크로익 미러 (341) 를 투과한다. 이렇게 하여, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파 (제 1 레이저광), 제 2 적외 레이저광 (제 2 레이저광), 및 제 3 적외 레이저광 (제 3 레이저광) 이, 동일축 상에 중첩된 상태에서 제 4 광학 계열 IV 의 제 1 파장 변환 광학 소자 (333) 에 집광 입사된다.

- [0088] 제 4 광학 계열 IV 에는, 제 1 파장 변환 광학 소자 (333) 및 제 2 파장 변환 광학 소자 (334) 가 형성되어 있다. 제 1 적외 레이저광이 제 1 광학 계열 I 을 전파하는 과정에서 파장 변환되어 제 4 광학 계열에 입사되었을 때의 파장 $\lambda=262.5$ nm 의 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 와, 제 2 광학 계열을 전파하여 제 4 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1850$ nm 의 제 2 적외 레이저광과, 제 3 광학 계열을 전파하여 제 4 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1540$ nm 의 제 3 적외 레이저광의 3 개의 적외 레이저광이, 제 4 광학 계열을 전파하는 과정에서, 파장이 $\lambda=200$ nm 인 자외 레이저광으로 파장 변환된다.
- [0089] 제 4 광학 계열 IV 에 형성된 제 1 파장 변환 광학 소자 (333) 는, 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파와 제 2 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장이 자외 영역이 되는 전단 자외 레이저광을 발생시킨다.
- [0090] 본 실시형태에 있어서는, 제 1 파장 변환 광학 소자 (333) 로서 LBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 300K 로 하여 Type II 각도 위상 정합에서 사용한다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (333) 는, 파장 $\lambda=262.5$ nm 의 제 1 적외 레이저광의 4 배 고조파 ($4\omega_1$) 와 파장 $\lambda=1850$ nm 의 제 2 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장 $\lambda=229.9$ nm 의 전단 자외 레이저광을 발생시킨다. 이 때, LBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.83$ pm/V 로 높아, 고효율로 파장 $\lambda=229.9$ nm 의 전단 자외 레이저광이 발생한다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (333) 에서 발생한 전단 자외 레이저광과, 제 1 파장 변환 광학 소자 (333) 를 투과한 제 3 적외 레이저광은 제 2 파장 변환 광학 소자 (334) 에 입사된다.
- [0091] 제 2 파장 변환 광학 소자 (334) 는, 전단 자외 레이저광과 제 3 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장이 200 nm 이하인 자외 레이저광을 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서는, 제 2 파장 변환 광학 소자 (334) 로서 CLBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 420K 로 하여 Type I 각도 위상 정합에서 사용한다. 제 2 파장 변환 광학 소자 (334) 에서는, 파장 $\lambda=229.9$ nm 의 전단 자외 레이저광과, 파장 $\lambda=1540$ nm 의 제 3 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광이 발생한다. 이 때, CLBO 결정의 유효 비선형 광학 상수 d_{eff} 는, $d_{\text{eff}}=0.94$ pm/V 로 높아, 고효율로 파장 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광이 발생한다.
- [0092] 제 2 파장 변환 광학 소자 (334) 에서 발생한 파장 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광은, 제 4 광학 계열의 종단으로부터 출력된다. 파장 변환부 (330) (자외 레이저 장치 (3)) 로부터, 파장 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광 (심자외 레이저광) (Lv) 이 출력된다.
- [0093] 이와 같이 구성되는 자외 레이저 장치 (3) 에 있어서는, 상기 서술한 기본적인 효과에 더하여, 이하와 같은 효과도 얻어진다. 먼저, 본 실시형태에 있어서는, 적외 레이저광을 증폭시키는 3 개의 파이버 광 증폭기 (제 1~제 3 파이버 광 증폭기) (321~323) 중 2 개가, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 YDFA 와 TDFA 에 의해 구성된다. 이 때문에, 파장 200 nm 의 자외 레이저광을 출력하는 고효율의 전고체형 자외 레이저 장치를 실현할 수 있다.
- [0094] 또, 본 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치 (3) 에 있어서는, 자외 레이저광을 발생시키기 위한 제 3 파장 변환 광학 결정 (333) 에 LBO 결정을 사용함으로써, 위크 오프각이 7 mrad 정도의 작은 각도가 되어 NCPM 에 가까운 상태가 된다. 그 때문에, 전단 자외 레이저광의 빔 품질이 높고, 빔 정형을 위한 광학계를 개재하지 않고 최종단의 제 2 파장 변환 광학 소자 (334) 에서 파장 변환을 실시하는 것이 가능하다.
- [0095] 또, 본 실시형태에서는, 제 2 파장 변환 광학 소자 (334) 로부터 출력되는 자외 레이저광의 파장이 200 nm 로, CLBO 결정의 흡수단의 파장으로부터 크게 떨어지기 때문에, 제 2 실시형태의 경우보다 더욱 큰 여유를 갖고 자외 레이저 장치를 운용할 수 있다.
- [0096] 또한 이상에서 설명한 제 1~제 3 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치 1 ~3 에 있어서는, 파장 200 nm 이하의 심자외 영역의 자외 레이저광을 출력하는 파장 변환부 (130, 230, 330) 를, 불과 4 개의 파장 변환 광학 소자로 구성할 수 있다.
- [0097] (제 4 실시형태)
- [0098] 제 4 실시형태에 있어서의 자외 레이저 장치 (4) 에 대해서 도 4 를 참조하여 설명한다. 자외 레이저 장치 (4) 는, 시드광을 발생시키는 레이저광 발생부 (410) 와, 레이저광 발생부 (410) 가 발생시킨 시드광을 증폭시켜 소정 출력의 적외 레이저광을 출력하는 증폭부 (420) 와, 광 증폭부 (420) 로부터 출력된 적외 파장의 레이저광을 자외 파장의 레이저광으로 파장 변환하여 출력하는 파장 변환부 (430) 를 포함한다.
- [0099] 레이저광 발생부 (410) 는, 제 1 레이저 광원 (411), 제 2 레이저 광원 (412), 및 제 3 레이저 광원 (413) 을

포함한다. 제 1 레이저 광원 (411), 제 2 레이저 광원 (412), 및 제 3 레이저 광원 (413) 의 각각은, 적외 파장의 시드광을 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서, 제 1 레이저 광원 (411) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1064.7$ nm, 제 2 레이저 광원 (412) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1950$ nm, 제 3 레이저 광원 (413) 이 발생시키는 시드광의 파장 λ 는 $\lambda=1550$ nm 이다.

[0100] 제 1 레이저 광원 (411), 제 2 레이저 광원 (412), 및 제 3 레이저 광원 (413) 은, 예를 들어, 각각 상기 파장을 발진 대역에 포함하는 DFB 반도체 레이저의 주입 전류를 펄스 변조함으로써, 혹은 DBR 반도체 레이저의 주입 전류를 펄스 변조함으로써, 혹은 CW 발진시킨 협대역의 파이버 레이저나 반도체 레이저의 출력광을 EOM 등의 고속 광 변조기로 펄스 변조하거나 함으로써, 펄스 변조광을 발생시킨다.

[0101] 증폭부 (420) 는, 제 1 레이저 광원 (411) 의 출력이 입사단에 접속된 제 1 파이버 광 증폭기 (421), 제 2 레이저 광원 (412) 의 출력이 입사단에 접속된 제 2 파이버 광 증폭기 (422), 및 제 3 레이저 광원 (413) 의 출력이 입사단에 접속된 제 3 파이버 광 증폭기 (423) 를 포함한다.

[0102] 제 1 파이버 광 증폭기 (421) 는, 제 1 레이저 광원 (411) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1064.7$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장 대역에서 높은 이득을 갖고, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 YDFA 가, 제 1 파이버 광 증폭기 (421) 로서 바람직하게 사용된다. 제 1 파이버 광 증폭기 (421) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1064.7$ nm 의 제 1 적외 레이저광은, 파장 변환부 (430) 의 제 1 광학 계열 I 에 입사된다.

[0103] 제 2 파이버 광 증폭기 (422) 는, 제 2 레이저 광원 (412) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1950$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장 대역에서 높은 이득을 갖고, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 TDFA 가, 제 2 파이버 광 증폭기 (422) 로서 바람직하게 사용된다. 제 2 파이버 광 증폭기 (422) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1950$ nm 의 제 2 적외 레이저광은, 파장 변환부 (430) 의 제 2 광학 계열 II 에 입사된다.

[0104] 제 3 파이버 광 증폭기 (423) 는, 제 3 레이저 광원 (313) 으로부터 출력된 파장 $\lambda=1550$ nm 의 시드광을 증폭시키는 광 증폭기이다. 구체적으로는, 이 파장대역에서 높은 이득을 갖는 EDFA 가, 제 3 파이버 광 증폭기 (423) 로서 바람직하게 사용된다. Er ; Yb 코도프 파이버 광 증폭기를 제 3 파이버 광 증폭기 (423) 로서 사용하는 것도 바람직하다. 제 3 파이버 광 증폭기 (423) 에 의해 증폭된 파장 $\lambda=1550$ nm 의 제 3 적외 레이저광은, 파장 변환부 (430) 의 제 3 광학 계열 III 에 입사된다.

[0105] 제 1 파이버 광 증폭기 (421) 로부터 출력된 파장 $\lambda=1064.7$ nm 의 제 1 적외 레이저광은, 제 1 광학 계열 I 에 입사되고 전파되어, 제 1 레이저광으로서 출력된다. 제 2 파이버 광 증폭기 (422) 로부터 출력된 파장 $\lambda=1950$ nm 의 제 2 적외 레이저광은, 제 2 광학 계열 II 에 입사되고 전파되어, 제 2 레이저광으로서 출력된다. 제 3 파이버 광 증폭기로부터 출력된 파장 $\lambda=1550$ nm 의 제 3 적외 레이저광은, 제 3 광학 계열 III 에 입사되고 전파되어, 제 3 레이저광으로서 출력된다. 이들 제 1~제 3 광학 계열로부터 각각 출력된 제 1~3 레이저광은 합파되어, 제 4 광학 계열 IV 에 입사되어 전파된다. 파장 변환부 (430) 는, 제 1 광학 계열 I, 제 2 광학 계열 II, 제 3 광학 계열 III, 및 제 4 광학 계열 IV 의 4 개의 계열에 의해 구성된다. 본 실시형태의 파장 변환부 (430) 는, 6 개의 파장 변환 광학 소자 (431~436) 를 주체로 하여 구성된다.

[0106] 제 1 광학 계열 I 에는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (431) 및 제 4 파장 변환 광학 소자 (432) 가 형성되어 있다. 제 1 광학 계열에 있어서는, 제 1 파이버 광 증폭기 (421) 로부터 출사되어 제 1 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1064.7$ nm, 각주파수 ω_1 의 제 1 적외 레이저광 (이후, 본 실시형태의 설명에서 「제 1 기본파」라고도 표기한다) 이, 제 1 광학 계열을 전파하는 과정에서, 각주파수가 제 1 기본파의 3 배 ($3\omega_1$), 파장이 1/3 ($\lambda=354.9$ nm) 인 3 배 고조파로 파장 변환된다.

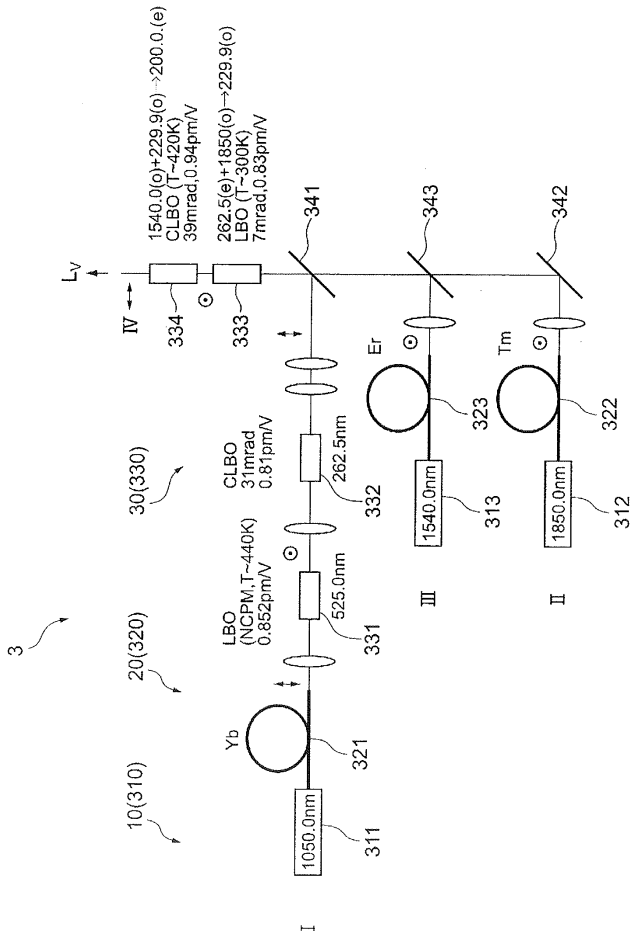
[0107] 제 1 광학 계열 I 에 형성된 제 3 파장 변환 광학 소자 (431) 는, 이 소자에 입사되는 각주파수 ω_1 의 제 1 기본파 (제 1 적외 레이저광) 를, 각주파수가 $2\omega_1$ 인 2 배 고조파로 파장 변환한다. 본 실시형태에 있어서는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (431) 로서 LBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 420K 로 하여 NCPM 에서 사용한다. 제 3 파장 변환 광학 소자 (431) 에서는, 제 1 기본파의 2 차 고조파 발생 (SHG) 에 의해, 각주파수가 제 1 기본파의 2 배 ($2\omega_1$), 파장이 절반 ($\lambda=532.4$ nm) 인 2 배 고조파가 발생한다. 이 때, LBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.852$ pm/V 로 높아, 고효율로 제 1 기본파의 2 배 고조파가 발생한다.

- [0108] 제 3 파장 변환 광학 소자 (431) 에서 발생한 2 배 고조파와, 제 3 파장 변환 광학 소자 (431) 를 투과한 제 1 기본파는, 2 파장 파장판 (445) 을 개재하여 제 4 파장 변환 광학 소자 (432) 에 집광 입사된다. 2 파장 파장판 (445) 은, 파장 1064.7 nm 의 제 1 기본파에 대해서는 $\lambda / 2$ 파장판으로서 작용하고, 그 제 1 기본파의 편광면을 90 도 회전시키지만, 파장 532.4 nm 의 2 배 고조파에 대해서는 λ 파장판으로서 작용하고, 그 2 배 고조파의 편광면은 그대로 유지된다. 그 때문에, 제 1 기본파의 편광 상태가 s 편광이 되어, 제 1 기본파 및 2 배 고조파가 모두 s 편광 상태에서 제 4 파장 변환 광학 소자 (432) 에 집광 입사된다.
- [0109] 제 4 파장 변환 광학 소자 (432) 는, 집광 입사된 각주파수 $2\omega_1$ 의 2 배 고조파와, 각주파수가 ω_1 인 제 1 기본파로부터, 각주파수가 $3\omega_1$ 인 3 배 고조파를 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서는, 제 4 파장 변환 광학 소자 (432) 로서 LBO 결정을 이용하고, Type I 각도 위상 정합에서 사용한다. 제 4 파장 변환 광학 소자 (432) 에서는, 제 3 파장 변환 광학 소자 (431) 를 투과한 제 1 기본파 (ω_1) 와 제 3 파장 변환 광학 소자 (431) 에서 발생한 2 배 고조파 ($2\omega_1$) 의 합주파 발생 (SFG) 에 의해, 각주파수가 제 1 기본파의 3 배 ($3\omega_1$), 파장이 1/3 ($\lambda=354.9$ nm) 인 3 배 고조파가 발생한다. 이 때, LBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.72$ pm/V 이며, 비교적 고효율로 제 1 기본파의 3 배 고조파가 발생한다.
- [0110] 제 4 파장 변환 광학 소자 (432) 에서 발생한 3 배 고조파는, 2 장의 상기 서술한 실린드릭 렌즈에 의해 빔 형상이 정형된 후, 다이크로익 미러 (441) 에 입사된다. 다이크로익 미러 (441) 는, 파장 354.9 nm 의 제 1 적외 레이저광의 3 배 고조파 ($3\omega_1$) 를 반사시키고, 파장 1950 nm 의 제 2 적외 레이저광, 및 파장 1550 nm 의 제 3 적외 레이저광을 투과시킨다. 제 1 적외 레이저광의 3 배 고조파는, 다이크로익 미러 (441) 에 의해 반사되어, 제 4 광학 계열 IV 에 형성된 제 1 파장 변환 광학 소자 (433) 에 제 1 레이저광으로서 집광 입사된다.
- [0111] 제 2 광학 계열 II 에는, 제 5 파장 변환 광학 소자 (435) 및 제 6 파장 변환 광학 소자 (436) 가 형성되어 있다. 제 2 광학 계열 II 에 있어서는, 제 2 파이버 광 증폭기 (422) 로부터 출사되어 제 2 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1950$ nm, 각주파수 ω_2 의 제 2 적외 레이저광 (이후, 본 실시형태의 설명에서 「제 2 기본파」라고도 표기한다) 이, 제 2 광학 계열을 전파하는 과정에서, 각주파수가 제 2 기본파의 3 배 ($3\omega_2$), 파장이 1/3 ($\lambda=650$ nm) 인 3 배 고조파로 파장 변환된다.
- [0112] 제 2 광학 계열 II 에 형성된 제 5 파장 변환 광학 소자 (435) 는, 이 소자에 입사되는 각주파수 ω_2 의 제 2 기본파 (제 2 적외 레이저광) 를, 각주파수가 $2\omega_2$ 의 2 배 고조파로 파장 변환한다. 본 실시형태에 있어서는, 제 5 파장 변환 광학 소자 (435) 로서 PPLN (주기 분극 반전 구조를 형성한 LiNbO_3) 을 사용한다. 제 5 파장 변환 광학 소자 (435) 에서는, 제 2 기본파의 2 차 고조파 발생 (SHG) 에 의해, 각주파수가 제 2 기본파의 2 배 ($2\omega_2$), 파장이 절반 ($\lambda=975$ nm) 인 2 배 고조파가 발생한다. 제 5 파장 변환 광학 소자 (435) 에서 발생한 2 배 고조파 ($2\omega_2$) 와, 제 5 파장 변환 광학 소자 (435) 를 투과한 제 2 기본파 (ω_2) 는, 제 6 파장 변환 광학 소자 (436) 에 집광 입사된다.
- [0113] 제 6 파장 변환 광학 소자 (436) 는, 집광 입사된 각주파수가 $2\omega_2$ 인 2 배 고조파와 각주파수가 ω_2 인 제 2 기본파로부터, 각주파수가 $3\omega_2$ 인 3 배 고조파를 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서는, 제 6 파장 변환 광학 소자 (436) 로서 PPLN 을 사용한다. 제 6 파장 변환 광학 소자 (436) 에서는, 제 5 파장 변환 광학 소자 (435) 를 투과한 제 2 기본파 (ω_2) 와, 제 5 파장 변환 광학 소자 (435) 에서 발생한 2 배 고조파 ($2\omega_2$) 의 합주파 발생 (SFG) 에 의해, 각주파수가 제 2 기본파의 3 배 ($3\omega_2$), 파장이 1/3 ($\lambda=650$ nm) 인 3 배 고조파가 발생한다. 발생된 제 2 적외 레이저광의 3 배 고조파 ($3\omega_2$) 는 미러 (442) 에 의해 반사되어 다이크로익 미러 (443) 에 입사된다.
- [0114] 미러 (442) 를 다이크로익 미러로 해도 된다. 이 경우, 다이크로익 미러의 투과 파장을 700 nm 이상 (반사 파장은 700 nm 미만) 정도로 설정하고, 다이크로익 미러를, 제 2 적외 레이저광의 기본파 및 그 2 배 고조파가 투과되어 광 흡수체에 흡수되는 구성으로 하면, 필요 없는 파장의 레이저광이 제 4 광학 계열의 파장 변환 광학 소자에 입사되는 것을 억제할 수 있다.
- [0115] 제 3 광학 계열 III 은, 파장 변환 광학 소자를 형성하지 않고 구성되어, 제 3 광학 계열의 중단부에 다이크로익

미러 (443) 가 형성되어 있다. 다이크로익 미러 (443) 는, 파장 650 nm 의 제 2 적외 레이저광의 3 배 고조파 ($3\omega_2$) 를 투과시키고, 파장 1550 nm 의 제 3 적외 레이저광을 반사시키도록 구성된다.

- [0116] 미러 (442) 에 의해 절첩된 제 2 적외 레이저광의 3 배 고조파 ($3\omega_2$) 는 다이크로익 미러 (443) 를 투과한다.
제 3 광학 계열의 제 3 적외 레이저광은, 다이크로익 미러 (443) 에 의해 반사되어 제 2 적외 레이저광의 3 배 고조파와 동일축 상에 중첩된다. 이들 레이저광이 다이크로익 미러 (441) 를 투과한다. 이렇게 하여, 제 1 적외 레이저광의 3 배 고조파 (제 1 레이저광), 제 2 적외 레이저광의 3 배 고조파 (제 2 레이저광), 및 제 3 적외 레이저광 (제 3 레이저광) 이, 동일축 상에 중첩된 상태에서 제 4 광학 계열 IV 의 제 1 파장 변환 광학 소자 (433) 에 집광 입사된다.
- [0117] 제 4 광학 계열 IV 에는, 제 1 파장 변환 광학 소자 (433) 및 제 2 파장 변환 광학 소자 (434) 가 형성되어 있다. 제 1 적외 레이저광이 제 1 광학 계열 I 을 전파하는 과정에서 파장 변환되어 제 4 광학 계열에 입사되었을 때의 파장 $\lambda=354.9$ nm 인 3 배 고조파 ($3\omega_1$) 와, 제 2 적외 레이저광이 제 2 광학 계열 II 를 전파하는 과정에서 파장 변환되어 제 4 광학 계열에 입사되었을 때의 파장 $\lambda=650$ nm 인 3 배 고조파 ($3\omega_2$) 와, 제 3 계열 III 을 전파하여 제 4 광학 계열에 입사된 파장 $\lambda=1550$ nm 의 제 3 적외 레이저광의 3 개의 적외 레이저광이, 중첩되어 제 4 광학 계열을 전파하는 과정에서, 파장이 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광으로 파장 변환된다.
- [0118] 제 4 광학 계열 IV 에 형성된 제 1 파장 변환 광학 소자 (433) 는, 제 1 적외 레이저광의 3 배 고조파 ($3\omega_1$) 와 제 2 적외 레이저광의 3 배 고조파 ($3\omega_2$) 의 합주파 발생에 의해, 파장이 자외 영역이 되는 전단 자외 레이저광을 발생시킨다.
- [0119] 본 실시형태에 있어서는, 제 1 파장 변환 광학 소자 (433) 로서 CLBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 370K 로 하여 NCPM 에서 사용한다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (433) 에서는, 파장 $\lambda=354.9$ nm 인, 제 1 적외 레이저광의 3 배 고조파 ($3\omega_1$) 와, 파장 $\lambda=650$ nm 의 제 2 적외 레이저광의 3 배 고조파 ($3\omega_2$) 의 합주파 발생에 의해, 파장 $\lambda=229.6$ nm 의 전단 자외 레이저광이 발생한다. 이 때, CLBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.96$ pm/V 로 높아, 고효율로 파장 $\lambda=229.6$ nm 의 전단 자외 레이저광이 발생한다. 제 1 파장 변환 광학 소자 (433) 에서 발생한 전단 자외 레이저광과 제 1 파장 변환 광학 소자 (433) 를 투과한 제 3 적외 레이저광은, 제 2 파장 변환 광학 소자 (434) 에 입사된다.
- [0120] 제 2 파장 변환 광학 소자 (434) 는, 전단 자외 레이저광과 제 3 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장이 200 nm 정도 이하인 자외 레이저광을 발생시킨다. 본 실시형태에 있어서는, 제 2 파장 변환 광학 소자 (434) 로서 CLBO 결정을 이용하고, 결정 온도 T 를 약 420K 로 하여 Type I 각도 위상 정합에서 사용한다. 제 2 파장 변환 광학 소자 (434) 에서는, 파장 $\lambda=229.6$ nm 의 전단 자외 레이저광과, 파장 $\lambda=1550$ nm 의 제 3 적외 레이저광의 합주파 발생에 의해, 파장 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광이 발생한다. 이 때, CLBO 결정의 유효 비선형 광학 상수는, $d_{\text{eff}}=0.94$ pm/V 로 높아, 고효율로 파장 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광이 발생한다.
- [0121] 제 2 파장 변환 광학 소자 (434) 에서 발생한 파장 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광은, 제 4 광학 계열의 종단으로부터 출력된다. 파장 변환부 (430) (자외 레이저 장치 (3)) 로부터, 파장 $\lambda=200$ nm 의 자외 레이저광 (심 자외 레이저광) (L_v) 이 출력된다.
- [0122] 이와 같이 구성되는 자외 레이저 장치 (4) 에 있어서는, 상기 서술한 기본적인 효과에 더하여, 이하와 같은 효과가 얻어진다. 먼저, 본 실시형태에 있어서는, 적외 레이저광을 증폭시키는 3 개의 파이버 광 증폭기 (제 1~제 3 파이버 광 증폭기) (421~423) 중 2 개가, 높은 파워의 적외 레이저광을 출력 가능한 YDFA 와 TDFA 에 의해 구성된다. 이 때문에, 파장 200 nm 의 자외 레이저광을 출력하는 고효율의 전고체형 자외 레이저 장치를 실현할 수 있다.
- [0123] 또, 본 실시형태에 있어서는, 자외 레이저 장치 (3) 에 있어서는, 자외 레이저광을 발생시키기 위한 제 3 파장 변환 광학 결정 (433) 에 CLBO 결정을 사용하면 NCPM 을 달성할 수 있다. 그 때문에, 전단 자외 레이저광의 빔 품질이 높고, 빔 정형을 위한 광학계를 개재하지 않고 최종단의 제 2 파장 변환 광학 소자 (434) 에서 파장 변환을 실시하는 것이 가능하다.
- [0124] 또, 본 실시형태에서는, 제 2 파장 변환 광학 소자 (434) 로부터 출력되는 자외 레이저광의 파장이 200 nm 로, CLBO 결정의 흡수단의 파장으로부터 크게 떨어지기 때문에, 제 2 실시형태의 경우보다 더욱 여유를 갖고 자외

도면3



도면4

