

(19)대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(51) Int. Cl. H01S 3/05 (2006.01)	(45) 공고일자 (11) 등록번호 (24) 등록일자	2006년11월10일 10-0642954 2006년10월31일
--------------------------------------	-------------------------------------	--

(21) 출원번호	10-2004-7011918	(65) 공개번호	10-2004-0088489
(22) 출원일자	2004년07월31일	(43) 공개일자	2004년10월16일
번역문 제출일자	2004년07월31일		
(86) 국제출원번호	PCT/JP2002/008114	(87) 국제공개번호	WO 2003/065519
국제출원일자	2002년08월08일	국제공개일자	2003년08월07일

(30) 우선권주장      JP-P-2002-00025040      2002년02월01일      일본(JP)

(73) 특허권자      도꾸리쓰교세이호징 가가꾸 기쥬쓰 신키 기꼬  
    일본 사이따마켄 가와구찌시 혼쵸 4쵸메 1방 8고

(72) 발명자      다이라다꾸노리  
    일본 아이찌켄 오까자끼시 다쓰미미나미 2쵸메 2방 1고 다쓰미가오까고  
    우무인슈꾸샤 7-22

    쇼지이찌로  
    일본 아이찌켄 오까자끼시 다쓰미미나미 2쵸메 2방 1고 다쓰미가오까고  
    우무인슈꾸샤 8-23

(74) 대리인      특허법인코리아나

심사관 : 박준영

(54) 레이저 소자

요약

열복굴절효과를 현저하게 감소시킬 수 있는 광학 소자를 제공한다. 광학 소자에서는, (110)-커트 결정을 이용하여, 열유기 복굴절에 의해 생성된 편광소멸 (depolarization) 을 조금도 보상하지 않고 현저하게 감소시킨다. (111)-커트 결정과 비교하여 편광소멸을 1 자리수 이상 감소시킬 수 있다.

대표도

도 1

색인어

광학 소자

명세서

## 기술 분야

본 발명은 광학 소자에 관한 것으로, 특히 YAG 레이저에 관한 것이다.

## 배경 기술

종래 기술에서는, 본 발명에 관련되는 이하의 참고 문헌이 있다.

- [1] : W.Koechner, Solid-State Laser Engineering (Springer-Verlag, Berlin, 1996), pp. 393-412.
- [2] : W. C. Scott and M. de Wit, "Birefringence compensation and TEM<sub>00</sub> mode enhancement in a Nd:YAG laser," Appl.Phys. Lett.18, 3-4 (1971).
- [3] : K. Yasui, "Efficient and stable operation of a high-brightness cw 500-W Nd:YAG rod laser," App1. Opt.35, 2566-2569 (1996).
- [4] : W. A. Clarkson, N. S. Felgate, and D.C. Hanna, "Simple method for reducing the depolarization loss resulting from thermally induced birefringence in solid-state lasers," Opt.Lett.24, 820-822 (1999).
- [5] : W. Koechner and D. K. Rice, "Effect of birefringence on the performance of linearly polarized YAG:Nd lasers," IEEE J.Quantum Electron. QE-6, 557-566 (1970).
- [6] : W. Koechner and D. K. Rice, "Birefringence of YAG:Nd laser rods as a function of growth direction," J.Opt.Soc.Am.61, 758-766(1971).
- [7] : I.Shoji, Y.Sato, S.Kurimura, V.Lupei, T. Taira, A. Ikesue, and K.Yoshida, "Thermal birefringence in Nd:YAG ceramics," Trends in Optics and Photonics Vo1.50, Advanced Solid-State Lasers, C.Marshall, ed. (Optical Society of America, Washington D.C., 2001), pp.273-278.
- [8] : L.N.Soms, A.A.Tarasov, and V.V.Shashkin, "Problem of depolarization of linearly polarized light by a YAG:Nd<sup>3+</sup> laser-active element under thermally induced birefringence conditions," Sov.J.Quantum Electron. 10, 350-351(1980).
- [9] : V.Parfenov, V.Shashkin, and E. Stepanov, "Numerical investigation of thermally induced birefringence in optical elements of solid-state lasers, " APP1.Opt.32, 5243-5255(1993).

고체 레이저의 고풍력화 및 그 빔의 고품질화를 발전시키려는 시도가 있는 경우, 여기와 관련하여 매질내에 생성된 열복굴절 (thermal birefringence) 은 심각한 문제가 된다. 열복굴절에 의해 생성된 편광소멸 (depolarization)(초기의 직선적으로 편광된 빔에 대하여 수직방향으로 생성된 편광출력의 비율;  $D_{pol} = P_L/P_{initial}$ ) 을 보상하여 직선적으로 편광된 빔을 획득하기 위하여, 레이저 매체의 배치 또는 광학 소자와의 조합에 의해 여러 소자들을 제조하였다.

여기와 관련하여 발생하는 고체 레이저의 열복굴절 효과는 레이저의 고풍력 및 레이저 빔의 고품질화를 달성하는데 있어서 심각한 문제이다. 이는 열복굴절효과가 직선적으로 편광된 빔의 2 초점화 또는 편광소멸을 발생시킬 수도 있기 때문이다(참고문헌 [1] 참조).

이 현상은 YAG 와 같은 고체 레이저의 고풍력화를 달성하는데 큰 장애물이 되었다. 지금까지는, 발생한 편광소멸을 보상하기 위하여, 90°회전자 또는 1/4 파장판을 이용한 몇몇 기술들이 제안되고 있다(참고문헌 [2]-[4] 참조). 이러한 보상은 (111)-컷트 YAG 결정들에만 적용된다. 이는 (111) 면의 복굴절이 원형으로 대칭하고, YAG 로드가 (111) 방향에 따른 방향으로 성장하므로, (111)-컷트 로드를 이용하는 것이 편리하기 때문이다.

이러한 방식으로, (111)-방향으로 성장한 로드는 YAG 결정으로 사용되고 있고, YAG 결정은 종래 기술에서의 대표적인 레이저 재료이다.

**발명의 개시**

그러나, 상술한 바와 같이, 종래 기술의 YAG 레이저에서는 광의 전파 방향을 (111)-축 방향으로 설정하므로, 여기와 관련하여 발생할 수도 있는 열유기변형으로 인한 광탄성 효과에 의해 생성되는 복굴절 (열 복굴절) 을 제거하기 위하여, 공진기 내부에 부가적인 광학부품을 삽입하거나 또는 지그재그 슬랩 시스템과 같은 배치를 사용하는 등의 특수한 형태를 사용할 필요가 있었다.

이러한 상황을 고려하여, 본 발명은 열복굴절 효과를 현저하게 감소시킬 수 있는 광학 소자를 제공하는 것을 목적으로 한다.

상술한 목적을 달성하기 위하여,

[1] 광학 소자에 있어서, 빔 전파 방향을 등축 결정 시스템에 속하는 결정들의 (111)-축 방향 이외로 선택하여 중심대칭적으로 유기되는 스트레스들에 의해 발생하는 광탄성 효과에 기초하는 복굴절 효과를 감소시키는 것을 특징으로 한다.

[2] [1] 에 따른 광학 소자에서는, 빔 전파 방향을 결정의 (100)-방향으로 선택한다.

[3] [1] 에 따른 광학 소자에서는, 빔 전파 방향을 결정의 (110)-방향으로 선택한다.

**도면의 간단한 설명**

도 1 은 편광소멸의 편광 방향 의존성에 대한 측정 결과를 나타내는 도면이다.

도 2 는 본 발명에 따른 편광소멸의 흡수여기전력에 대한 의존성의 계산 결과를 나타내는 도면이다.

도 3 은 참고문헌 [5] 및 [6] 의 이론을 이용하여 계산된 (111)-면, (100)-면, 및 (110)-면에서의, 편광소멸의 흡수여기전력에 대한 의존성을 나타내는 도면이다.

도 4 는 (111)-면, (100)-면, 및 (110)-면에서의  $\theta$  와  $\Phi$  사이의 관계를 나타내는 도면이다.

도 5 는 각 면에서의  $\Omega r^2 / r_0^2$  의 계산 결과를  $\Phi$  의 함수로서 나타내는 도면이다.

도 6 은  $r_a=r_0$  의 경우에, (111)-면, (100)-면, 및 (110)-면에서의, 편광소멸의 흡수여기전력에 대한 정확한 의존성을 나타내는 도면이다.

도 7 은 도 6 의 저흡수 전력 영역을 수평 방향으로 확대한 도면이다.

도 8 은 (111)-면, (100)-면, 및 (110)-면에서의 측정 결과에 기초하여 편광소멸의 흡수여기전력에 대한 의존성을 나타내는 도면이다.

도 9 는  $r_a=r_0/4$  의 경우에, (111)-면, (100)-면, 및 (110)-면에서의 편광소멸의 흡수여기전력에 대한 의존성을 나타내는 도면이다.

**발명을 실시하기 위한 최적의 형태**

이하, 본 발명의 실시형태들을 설명한다.

우선, 본 발명의 제 1 실시형태를 나타내는, (100)-커트의 YAG 결정에 의한 열유기 복굴절의 편광소멸 감소를 설명한다.

YAG 를 포함한 입방 결정들에서는, 빔 전파 방향이 (111)-면에 수직인 경우, 열 분포가 축대칭이면, 면내에서의 열복굴절은 각도에 상관 없이 일정하다.

한편, 열복굴절은 (111)-면 이외의 면들에 대해서는 각도에 의존한다.

도 1 은 상술한 바와 같이 편광소멸의 편광 방향 의존성의 측정 결과를 나타내는 도면이다. 이 도면에서, 수평축은 편광 각도  $\theta_p(^{\circ})$ 를 나타내며, 수직축은 편광소멸  $D_{pol}$  을 나타낸다. 도 2 는 본 발명에 따른 편광소멸의 흡수여기전력에 대한 의존성의 계산결과를 나타내며, 여기서 수평축은 흡수여기전력  $P_{ab}(W)$  을 나타내며, 수직축은 편광소멸  $D_{pol}$  을 나타낸다.

과거에, 코에너 (Koechner) 와 라이스 (Rice) 는, 흡수여기전력이 작은 경우 적절한 면방향 및 편광 방향을 선택하여 (111)-면의 레벨보다 낮은 레벨로 편광소멸을 감소시키지만, 흡수여기전력이 일정치를 초과하면 면 방향에 의존하는 차이는 거의 존재하지 않는다고 주장하였다(도 2 의 점선 참조). 이 이론은 복굴절이 면 방향에 상관 없이 축대칭 면내의 반경벡터와 접선 방향 사이에 발생한다는 가정에 기초하였다. 그러나, 실제로, 복굴절은 (111)-면에 대해서만 정확하고, 다른 면들에 대해서는 복굴절의 축이 반경 벡터와 접선 방향에 일치하지 않고, 변위의 크기가 각도에 의존한다는 것을 알았다.

본 발명자들은 상술한 영향들을 고려하여 편광소멸의 흡수여기전력을 재계산하였고, 편광소멸을, 흡수여기전력의 크기에 상관없이 (100)-면내의 결정축에 대해  $45^{\circ}$ 의 각도를 형성하는 직선 편광빔에 대해서는, (111)-면 내의 직선 편광빔의 하프 레벨로 감소시킬 수 있음을 발견하였다(도 2 의 실선을 참조).

다음으로, 본 발명의 제 2 실시형태를 설명한다.

여기서, (110)-커트의 YAG 결정에 의한 열유기복굴절의 편광소멸 감소를 설명한다.

편광소멸은 초기의 직선 편광 레이저빔에 대한 편광소멸 전력의 비율로서 정의되며, 아래에 나타난 식으로 표현된다.

$$D_{pol} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} D r d\Phi dr \dots (1)$$

원통형 로드의 빔 전파 방향 (z-축) 에 수직한 면에서, 각 점 (r,  $\Phi$ ) 에서의 편광소멸의 전체량은,

$$D = \sin^2 [2(\theta - \gamma)] \sin^2 (\psi / 2) \dots (2)$$

으로 표현된다.

여기서,  $\theta$  는 x 축과 복굴절 고유벡터 (xy-평면의 굴절을 타원의 주축) 사이의 각도를 나타내며,  $\gamma$  은 x-축과 초기 편광 방향 사이의 각도를 나타낸다. 위상차  $\psi$  는 열유기 복굴절  $\Delta n$ 에 의해 주어지며, 각각

$$\psi = (2\pi/\lambda) \Delta n L; \Delta n = \Omega S (r^2/r_0^2);$$

$$S = [\alpha_1 / (1 - \nu)] (\eta_h P_{ab} / 16\pi \kappa L) \dots (3)$$

로 표현된다. 동일하게 여기하는 경우,  $\lambda$  는 레이저 파장을 나타내며,  $\Omega$  는 광탄성 계수에 의해 주어지는 복굴절 파라미터를 나타내고,  $r_0$  는 로드 반경을 나타내고,  $\alpha_1$  은 선팅장계수를 나타내며,  $\nu$  는 푸아송 (Poisson) 비를 나타내며,  $\eta_h$  는 여기 전력 중 열에 의해 변환되는 비율을 나타내며,  $P_{ab}$  는 흡수여기전력을 나타내며,  $\kappa$  은 열전도율을 나타내며,  $L$  은 로드 길이를 나타낸다.

코에너와 라이스는 여러 가지 방향으로 Nd:YAG 로드의 열유기복굴절을 분석 (참고문헌 [5] 및 [6] 참조) 하여, 도 3 에 나타낸 바와 같이, 고흡수전력영역의 극한에서는, 편광소멸의 양이 로드 방향들에 독립적이라고 결론을 내렸다. 그러나, 이 이론에는 2 가지 오류가 있었다. 하나는 어떤 면에서도 이들은  $\theta = \Phi$  를 취하였고, 이는 (111)-면에만 해당된다. 이는 (111)-면, (100)-면, 및 (110)-면에서의  $\theta$  와  $\Phi$  사이의 정확한 관계가,

$$\tan 2\theta = \tan (2\Phi) \dots (4a)$$

$$\tan 2\theta = [2p_{44} / (p_{11} - p_{12})] \tan (2\Phi) \dots (4b)$$

$$\tan 2\theta = [8p_{44} \tan (2\Phi)] / \{ 3 (p_{11} - p_{12}) + 2p_{44} - (p_{11} - p_{12} - 2p_{44}) [2 - (r_0^2 / r^2)] [1 / \cos (2\Phi)] \} \dots 4 (c)$$

로 주어지기 때문이다.

이 식에서,  $P_{mn}$  은 광탄성 계수 텐서를 나타내며, (100)-면에서의  $\theta$  의  $\Phi$  에 대한 의존성을 도 4 의 긴 점선으로 나타낸다. (100)-면에 대한 의존성은  $r$  의 값에 따라 변화하며, 이를 도 4 의 점선으로 나타낸다. 또 다른 오류는 각 면들에서의  $\Omega$  의 값이다. 참고문헌 [5] 및 [6] 에서는,  $\Omega$  의 값을 상기 식 (3) 에서  $r = r_0$  로 고정하고, 재정의 하였다. (111)-면, (100)-면, 및 (110)-면에서의 정확한  $\Omega$  값은,

$$\Omega = (1/3) n_0^3 (1 + \nu) (p_{11} - p_{12} + 4p_{44}) \dots (5a)$$

$$\Omega = n_0^3 (1 + \nu) [ (p_{11} - p_{12})^2 \cos^2 (2\Phi) + 4p_{44}^2 \sin^2 (2\Phi) ]^{1/2} \dots (5b)$$

$$\Omega = n_0^3 (1 + \nu) [ (1/16) \{ [3 (p_{11} - p_{12}) + 2p_{44}] \cos (2\Phi) - (p_{11} - p_{12} - 2p_{44}) [2 - (r_0^2 / r^2)] \}^2 + 4p_{44}^2 \sin^2 (2\Phi) ]^{1/2} \dots 5 (c)$$

으로 각각 주어진다.  $\Omega$  의 값을 재정의 하더라도,  $\Omega$  의 값은 (111)-면과 (100)-면에서 변화하지 않는다. 그러나, (110)-면에서는  $\Omega$  의 값이  $r$  에 의존하기 때문에, 정확한 값을 얻을 수 없다.

도 5 는 각 면에서의  $\Omega r^2 / r_0^2$  의 계산치를  $\Phi$  의 함수로서 나타낸다. (111)-면과 (100)-면에서는,  $r$  의 값이 변화할 때, 크기만 변화하고 형상들은 변화하지 않는다 (형상들이 유사함). 한편, (110)-면에 대해서는 크기 뿐만 아니라 형상도 변화한다.

도 6 은 레이저 빔의 반경 ( $r_a$ ) 이 로드 반경 ( $r_0$ ) 과 동일한 경우 편광소멸의 흡수여기전력에 대한 정확한 의존성을 나타낸다. 도 6 의 저흡수전력영역의 확대도를 도 7 에 나타낸다.

편광소멸은 고티수전력영역에서도 면방향 및 편광 방향에 의존하여,  $r_a=r_0$  인 경우, 편광이 (111)-면, (100)-면, 및 (110)-면 중 (100)-면에서 45°경우에 가장 작게되고, 그 양은 고티수전력영역에서는 (111)-면의 1/2, 저흡수전력영역에서는 (111)-면의 1/6 이다. 참고문헌 [7] 에 나타낸 여기-프로브-측정을 이용하여 실험을 수행하여 본 발명자들에 의해 행해진 계산이 정확했음을 증명한다.

이 실험에서는, 그 값을 중단 여기에 의해 평가하였기 때문에, 절대치가 다르다. 그러나, 도 8 에 나타낸 실험 데이터의 상대치는 실질적으로 도 7 에 나타낸 이론상의 곡선과 일치하며, 참고 문헌 [5] 및 [6] 에 나타낸 곡선들과는 일치하지 않는다.

참고문헌 [5] 및 [6] 의 이론의 2 가지 오류 중 하나가, (111) 면 이외의 면에서  $\theta$  가  $\Phi$  와 일치하지 않는다고 하는 점을 이미 지적하였지만, 편광소멸의 의존성은 (100)-면에 대해서만 정확하게 계산된다(참고문헌 [8] 및 [9] 참조). 그러나, 본 발명자들은  $r_a$  이  $r_0$  보다 작다는 조건 하에서 (110)-컷트 로드를 사용함으로써 편광소멸을 현저하게 감소시킬 수 있음을 발견하였다.

도 4 에 나타낸 바와 같이,  $r$  이  $r_0$  와 같이 큰 경우,  $\theta$  는  $\Phi$  에 근접한다. 즉, 각 점에서의 고유벡터들의 방향은 거의 반경방향 및 접선방향으로 된다.

한편,  $r$  이 작은 경우, 어떤  $\Phi$  에서의  $\theta$  는 0°또는 90°에 근접한다. 이는 모든 고유벡터들이 x축 방향 및 y축 방향으로 직선상에 정렬되어 있음을 의미한다. 이 특징에 의해, 편광방향이 x-축 또는 y-축 방향에 가까운 경우, 로드 반경보다 작은 반경을 갖는 빔을 거의 편광소멸시키지 않고 로드를 통하여 전파할 수 있다.

도 9 는  $r_a=r_0/4$  의 경우에, 편광소멸의 흡수여기전력에 대한 의존성의 예를 나타낸다. (100)-면에서의 편광소멸량은 (111)-면의 절반에 불과하지만,  $\Delta n$  자체는, (110)-면이 (111)-면 보다 더 큼에도 불구하고, (111)-면의 편광소멸량의 약 1/50 으로 감소된다. 이러한 조건은 여기가 균일한 경우에, 애퍼처 (개구) 에 의해 빔 크기를 제어하여 실현될 수도 있다.

한편, 중단 여기의 경우에, 집중된 여기 빔 자체가 이득 애퍼처의 역할을 하므로, 이 조건을 용이하게 만족시킬 수 있다. 또한, 동일한 조건이 도핑된 YAG 가 비도핑된 YAG 에 의해 둘러싸인 복합 재료와 같은 복합 재료로 실현될 수 있다.

결론적으로, 참고문헌 [5] 및 [6] 의 논문에서의 오류는, 이론으로부터 뿐만 아니라 실험으로부터 입증되고, 편광소멸을 (100)-면 과 (110)-면을 이용하여 본질적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 특히, 작은 반경의 빔과 조합한 (110)-컷트 결정을 사용함으로써, 편광소멸을 (111)-컷트 결정을 사용한 경우 보다 1 자리수 이상 감소시킬 수 있다.

이와 같은 구성에서,  $Y_3Al_5O_{12}$  레이저에서 열복굴절 효과에 의한 편광소멸은, (111) 이외의 방향으로 로드 커트를 사용하여 보상없이 본질적으로 감소시킬 수도 있다. (110)-컷트 결정을 사용함으로써, 종래 기술에서의 (111)-컷트 결정을 사용한 경우와 비교하여 편광소멸을 1/10 이하의 값으로 감소시킬 수 있다.

상술한 실시형태에서는, YAG 레이저를 예로서 설명하였다. 그러나, 이는 YAG 레이저로 한정되지 않고, 다른 등축 결정 시스템의 결정을 사용한 광학 소자에 적용될 수 있어, 그 광학 소자의 편광소멸을 감소시킬 수도 있다.

본 발명은 전술한 실시형태들로 한정되지 않으며, 본 발명의 범위에 기초하여 다양하게 변경될 수 있으며, 이는 본 발명의 범위로부터 배제되지 않는다.

상세히 설명한 바와 같이, 본 발명에 따르면, 이하의 효과를 달성한다.

(A) 빔 전파 방향으로 (111)-축 방향 이외의 방향을 선택하기만 하면 열복굴절효과를 감소시킬 수도 있다.

(B) (100)-컷트 또는 (110)-컷트의 시료를 사용하면, 열복굴절 효과를 현저하게 감소시킬 수도 있다.

(C) 특히 (110)-컷트 매질을 사용함으로써, (111)-컷트 매질을 사용한 경우와 비교하여, 편광소멸을 보상없이 1자리수 이상 감소시킬 수도 있다.

**산업상 이용가능성**

본 발명에 따른 광학 소자는 결정의 (110)- 방향을 빔 전파 방향으로 선택하여 열복굴절 효과를 현저하게 감소시킬 수 있고, 열 문제를 해결할 수 있는 고체 레이저에 적합하다.

**(57) 청구의 범위**

**청구항 1.**

빔 전파 방향을 등축 결정 시스템에 속하는 레이저 결정의 (111)-축 방향 이외로 선택하여 중심대칭적으로 유기되는 스트레소 인한 광탄성 효과에 기초하는 복굴절효과를 감소시키는 레이저 소자.

**청구항 2.**

제 1 항에 있어서,

빔 전파 방향은 상기 레이저 결정의 (100)-방향으로 선택되는, 레이저 소자.

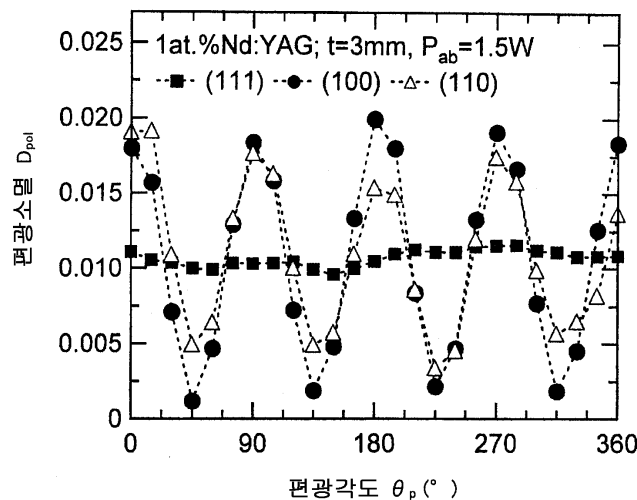
**청구항 3.**

제 1 항에 있어서,

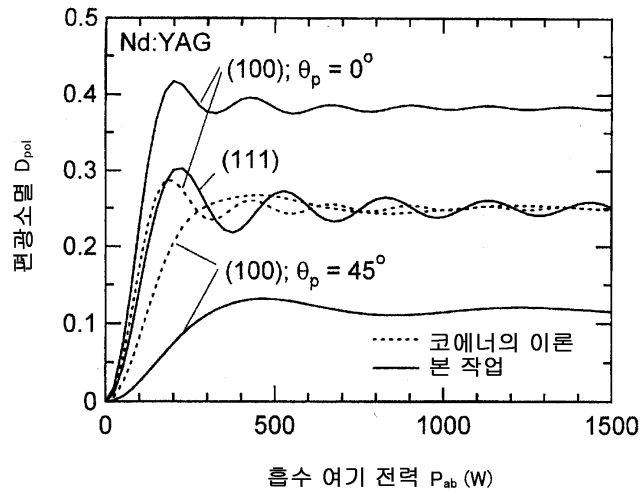
빔 전파 방향은 상기 레이저 결정의 (110)-방향으로 선택되는, 레이저 소자.

**도면**

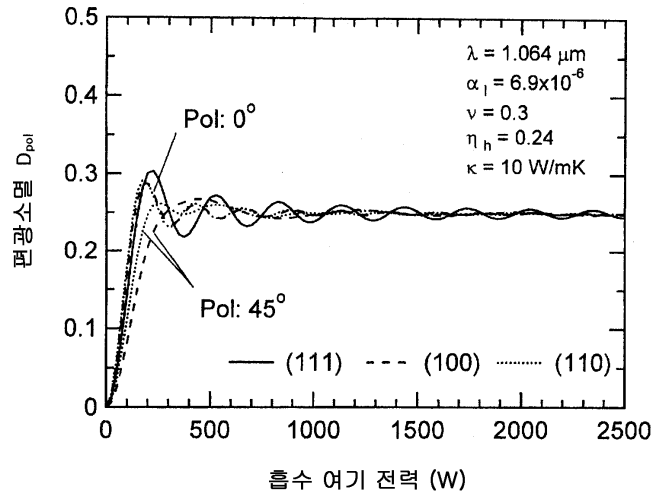
**도면1**



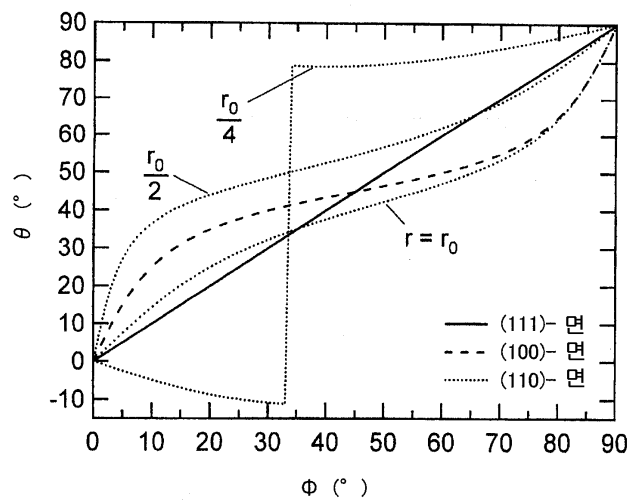
도면2



도면3

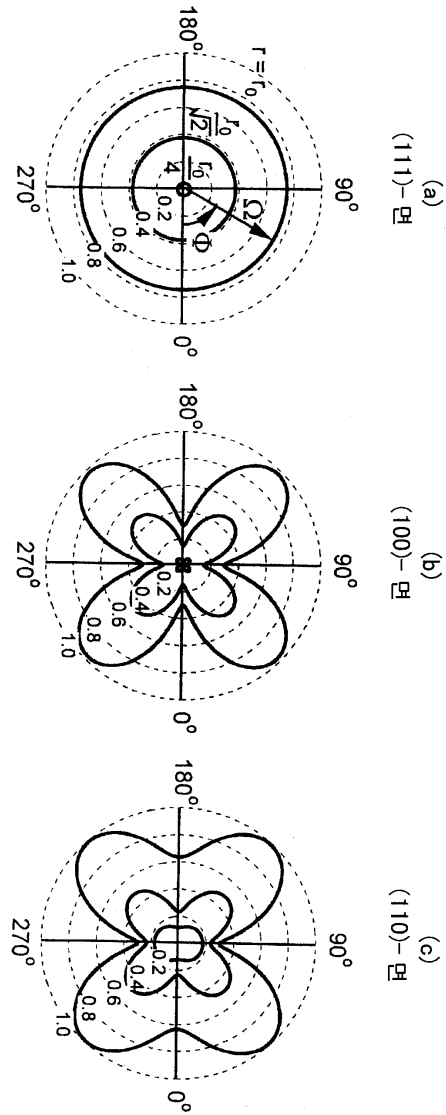


도면4

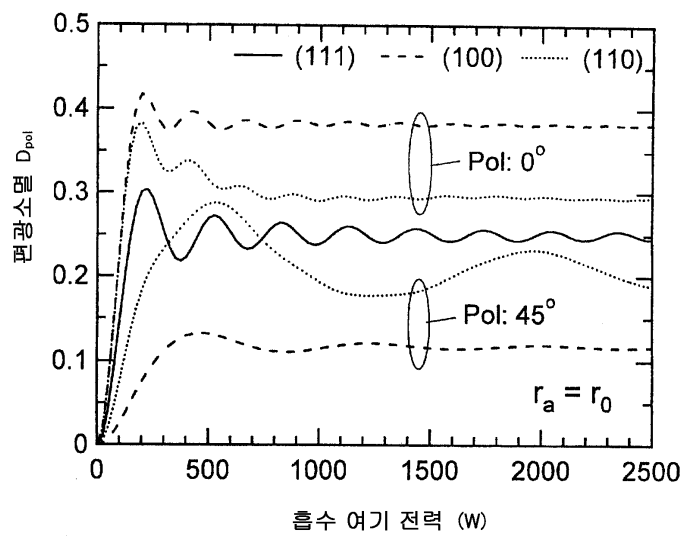




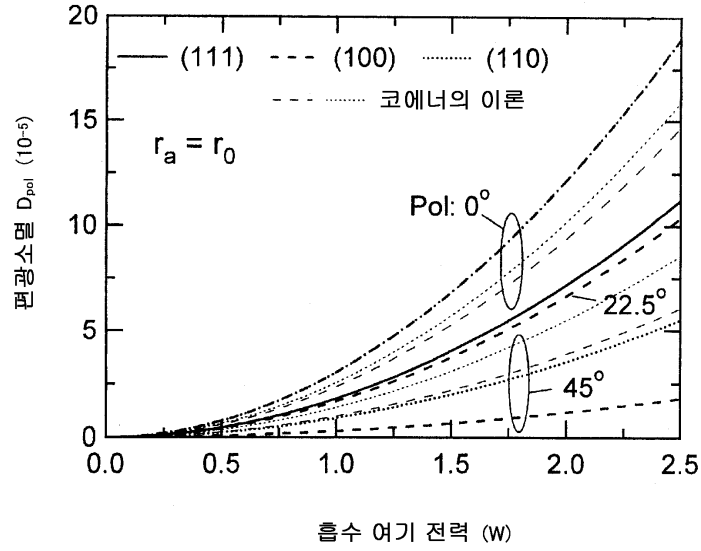
도면5



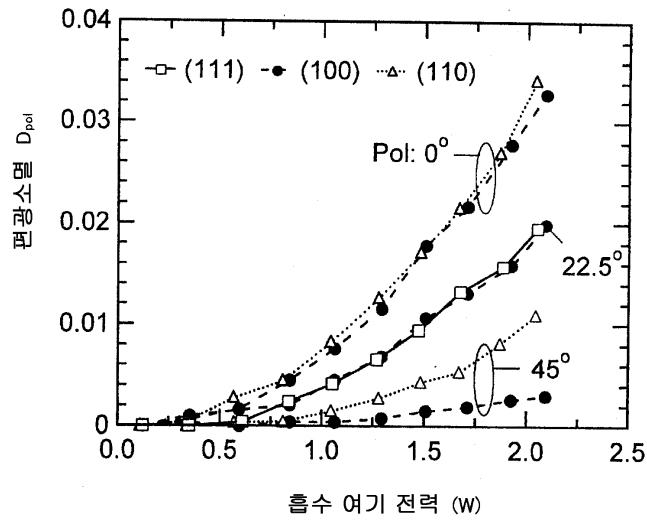
도면6



도면7



도면8



도면9

