

반도체 레이저용 홀로그래픽 시준 렌즈 설계 제작

임용석 · 박종훈 · 최옥식

영남대학교 물리학과, 경산 712-749

(1998년 1월 7일 받음, 1998년 6월 1일 수정본 받음)

비점수차를 갖는 반도체 레이저에서 off-axis 홀로그래픽 렌즈를 이용하여 수차 제거 방법에 대해 논하였다. Dichromated gelatin 필름을 사용하여 높은 회절효율과 off-axis 방향으로 비점수차 없이 시준되는 반도체 레이저용 홀로그래픽 시준 렌즈를 제작하였다. 홀로그래픽 렌즈는 홀로그래픽 회절과 광선추적(ray-tracing) 방법에 의해 계산 설계되어졌다. 비점수차의 제거는 기록 및 재생 각도를 적당히 선택하므로서 얻을 수 있다. 홀로그래픽은 488 nm 파장인 Ar⁺ 레이저를 사용하여 기록하였고, 670 nm 파장인 반도체 레이저 광으로 재생하였다. 주요 파라미터인 기록 및 재생 각도, 파장, 그리고 비점수차 등을 계산하고 실험적으로 검증하였다.

I. 서 론

홀로그래픽 광학소자 (Holographic Optical Element : HOE)는 빛의 굴절을 이용하는 재래식 광학소자와는 달리 빛의 회절현상을 이용하여 입사광의 진행경로를 바꾸어 주는 일종의 회절 광학소자로서, 그 응용 범위가 넓어 최근에 많은 관심과 연구 개발이 진행되고 있는 분야이다. HOE의 실제적 응용에서는 설계 및 분석 기술, 적당한 기록 매질 선택, 제작 공정 기술들이 고려되어야 한다. 특히 홀로그래픽 기록 매질로서는 dichromated gelatin (DCG) 필름이 HOE에 가장 적당한 매질 가운데 하나로 알려져 있다.^[1-5] DCG 필름은 HOE 제작에 있어서 많은 유용한 특성들을 가지고 있다. 그 중에서 신호대 잡음비가 좋고, 높은 회절효율, 고분해능 특성들을 갖고 있는 위상형 홀로그래픽 감광 재료이다. 본 논문에서는 위상형 홀로그래픽 감광재료를 사용하여, 반도체 레이저의 타원 발산 빔을 평행광으로 정형(modify)하는 HOE를 설계 제작하였다. 기존의 재래식 광학 소자 대신 HOE의 일종인 홀로그래픽 시준 렌즈 (Holographic Collimating Lens : HCL)를 사용한다면 제품의 경량화, 소형화, 대량생산 등의 여러 가지 경제적 잇점들을 갖는다.^[6,7] 일반적으로 HCL을 제작하고 재생할 때 서로 다른 파장의 광원을 사용하면 색수차에 의한 회절 특성이 달라져 결국 광학 소자의 특성도 변하게 된다. 이러한 문제점을 없애기 위해서는 동일한 파장의 기록 광원을 사용하는 것이 좋으나, 반도체 레이저의 출력이 너무 낮고, 출력광이 수직 발산각 (25°~45°)과 수평 발산각 (8°~15°)이 다른 타원형의 빔 특성을 갖고 있을 뿐만 아니라,^[6] 파장영역이 적색 파장 이상이므로 홀로그래픽 기록매질을 잘 감광시키지 못한다. 그래서 보통 기록 광원으로는 Ar⁺ 레이저(514 nm 이하의 파장)가 사용되는데, 이 경우 재생 광원과의 파장 차이로 인한 색수차가 발생하므로 이를 보정하기 위해 Bragg 각도, 초점 길이, 비점

수차 등과 같은 파장에 의존하는 파라미터들을 조절하여야 한다.^[7-17]

본 논문에서는 광디스크의 광신호 검출 시스템이나 바코드 스캐너, 레이저 프린터, 광정보 처리 시스템, 간섭계등에서 평행광으로 사용할 수 있는 반도체 레이저용 시준 렌즈를 홀로그래픽 방식으로 설계 제작하였다. 비점수차 갖는 반도체 레이저에서 off-axis 홀로그래픽 렌즈를 이용하여 수차 제거 방법에 대해 논하였으며, 홀로그래픽 렌즈는 홀로그래픽 회절과 광선추적(ray-tracing) 방법으로 계산, 설계하였다. HCL에 의해 시준된 회절빔은 회전 대칭성을 갖는 강도 분포가 요구되므로 자오면(tangential plane)과 구결면(sagittal plane)에 관계되는 제작 파라미터들을 구하고, dichromated gelatin 필름을 사용하여 높은 회절효율과 off-axis 방향으로 비점수차 없이 시준되는 반도체 레이저용 홀로그래픽 시준 렌즈를 제작하였다. 홀로그래픽은 488 nm 파장인 Ar⁺ 레이저를 사용하여 기록하였고, 670 nm 파장인 반도체 레이저 광으로 재생하였다. 홀로그래픽 기록에는 구면피와 평면파를 사용하였다. 주요 파라미터인 기록 및 재생 각도, 파장, 그리고 비점수차 등을 계산하고 실험적으로 검증하였다. 또한 설계 제작된 HCL을 평가하기 위해 시준된 회절빔의 단면에 대해 강도 분포를 조사하였으며, 빔의 발산 정도 등을 측정하였다.

II. 이 론

반도체 레이저의 특성상, 타원 추형으로 발산하는 출력광으로서 비점수차를 가진다. 이론식들을 유도하는데 있어서, 논의를 간단히 하기 위해 다음과 같이 가정하기로 한다.

1. 반도체 레이저 발산파의 단면 중에 하나는 구면이고, 다른 하나는 비점수차로 인하여 타원을 갖는다.
2. 반도체 레이저의 출력광은 far-field에서 Gaussian beam intensity profile을 갖으며, 반치폭(FWHM)에 해당된 강도만을 고려한다.
3. 비점수차 이외에 다른 수차들 (코마, 구면수차 등)은 없다.

*본 연구는 한국과학재단의 96핵심 전문 연구 지원 과제(961-0206-026-2)로 수행되었습니다.

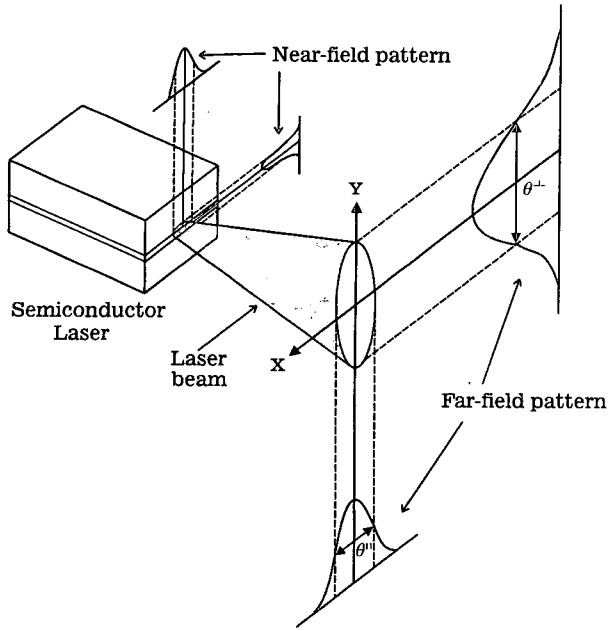


그림 1. 반도체 레이저의 출력광 특성, X는 자오축, Y는 구결축.

4. 기록 광원의 기록파와 물체파 빔 종단면은 완전한 평면파와 구면파이다.

수차를 설명하기 위해서 광선과 주광선 (홀로그램 렌즈의 중심을 통과하는 광선)을 포함하는 자오면(그림 1의 X축면; 수식에서 위 첨자 ||로 표시함), 그리고 자오면에 수직이고 주광선을 포함하는 구결면(그림 1의 Y축면; 수식에서 위 첨자 ⊥로 표시함)으로 나누어 정의하였다.^[18]

홀로그램 재생시, 기록 광축선상이 아닌 다른 선상에서 기록 파장과 다른 재생빔을 입사하면 재생빔은 비점수차를 가지게 된다.^[7-17] 그림 2와 3은 홀로그램 기록 및 재생시, 홀로그램이 갖는 수차를 해석하기 위한 간단한 모델이다. 그림 2는 홀로그램 렌즈를 제작하기 위한 간단한 기하학적 그림이며, 그림 3은 홀로그램 렌즈에 의한 재생상의 그림이다.

부피형 홀로그램에서 최대의 회절효율을 얻기 위해서는 Bragg 조건을 만족해야 하며, 파벡터 $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ 로 표현하면

$$K_{\phi} - K_{\varphi} = K_{\phi'} - K_{\varphi'} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서 φ 는 Z축과 기록 기준파와의 각도, ϕ 는 Z축과 기록 물체파와의 각도, 그리고 φ' 는 Z축과 재생 기준파와의 각도, ϕ' 는 Z축과 재생 물체파와의 사이각을 나타낸다[그림 2, 3 참고].

그림 2와 3의 A점에서 홀로그램의 회절조건은 격자 방정식에 의해

$$K_{\text{재생}}(\sin\phi' - \sin\varphi') = K_{\text{기록}}(\sin\phi - \sin\varphi) \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 여기서 $K_{\text{재생}}$ 은 재생시 파벡터이고, $K_{\text{기록}}$ 은 기록시 파벡터이다. 식 (2)를 미분하면

$$K_{\text{재생}}(\cos\phi'\partial\phi' - \cos\varphi'\partial\varphi') = K_{\text{기록}}(\cos\phi\partial\phi - \cos\varphi\partial\varphi) \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 그림 2에서 삼각형 $\angle APC$ 와 $\angle BPD$ 에 대

해서는

$$\phi + \delta\theta = \phi + \delta\phi + \delta\sigma \quad (4)$$

$$\delta\phi = \delta\theta - \delta\sigma \quad (5)$$

이 된다. 식 (4), (5)와 같은 방법으로 그림 2와 3의 다른 삼각형에 대해 구하면

$$\delta\varphi = \delta\theta - \delta\epsilon, \quad \delta\phi' = \delta\theta - \delta\sigma', \quad \delta\varphi' = \delta\theta - \delta\epsilon' \quad (6)$$

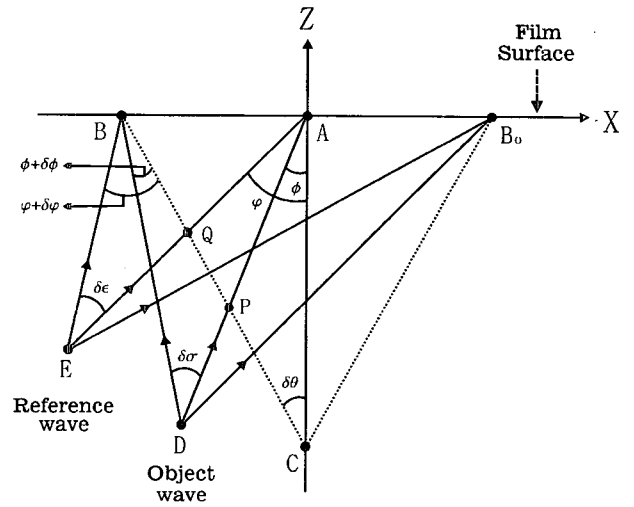


그림 2. 홀로그램 렌즈를 제작하기 위한 간단한 기하학적 모델, 홀로그램이 갖는 비점수차를 해석하기 위해 홀로그램 기록영역중 작은 부분만 고려함.

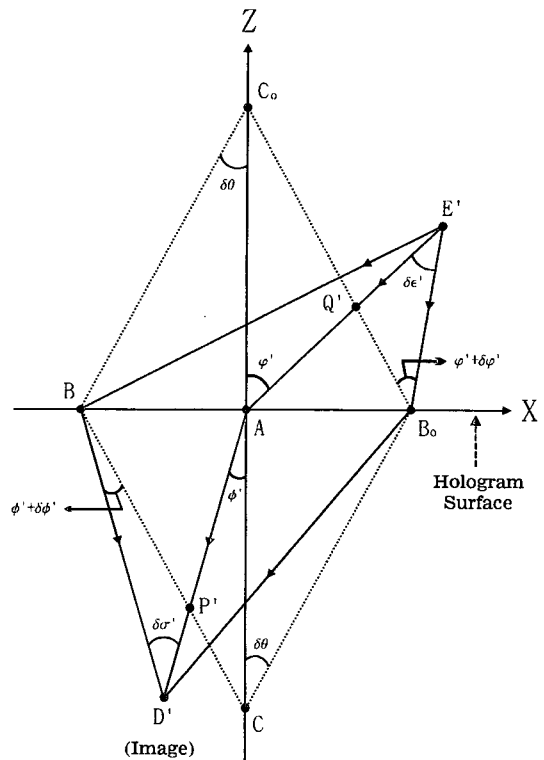


그림 3. 홀로그램 재생시 자오 곡면 (f^{\parallel})의 비점수차를 해석하기 위해 도입한 간단한 기하학적 모델.

와 같다. $\delta\psi, \delta\varphi, \delta\psi', \delta\varphi'$ 가 매우 작은 값을 가진다면, 그림 2와 3으로부터

$$\delta\theta = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}} \left(= \frac{\overline{AB}_0}{\overline{AC}_0} \right), \quad \delta\sigma = \frac{\overline{AB} \cos\phi}{\overline{AD}},$$

$$\delta\varepsilon = \frac{\overline{AB} \cos\varphi}{\overline{AE}}, \quad \delta\sigma' = \frac{\overline{AB}_0 \cos\phi'}{\overline{AD}'}, \quad \delta\varepsilon' = \frac{\overline{AB}_0 \cos\varphi'}{\overline{AE}'} \quad (7)$$

와 같다. 여기서 $\overline{AC}(=\overline{AC}_0)$ 는 기록 기준파 또는 기록 물체파가 필름(홀로그래프)면에 수직으로 입사하는 경우의 거리이다. 식 (7)을 식 (5)에 대입하고, 다시 식 (3)에 대입하면

$$K_{\text{재생}} \left[\frac{\cos\varphi'^2}{\overline{AE}'} - \frac{\cos\phi'^2}{\overline{AD}'} \right] - K_{\text{기록}} \left[\frac{\cos\varphi^2}{\overline{AE}} - \frac{\cos\phi^2}{\overline{AD}} \right] =$$

$$K_{\text{기록}} \left[\frac{\cos\phi}{\overline{AC}} - \frac{\cos\varphi}{\overline{AC}} \right] - K_{\text{재생}} \left[\frac{\cos\phi'}{\overline{AC}} - \frac{\cos\varphi'}{\overline{AC}} \right] \quad (8)$$

와 같은 결과를 얻는다.^[7-19] 식 (8)은 비점수차를 갖는 식이 된다. 따라서 홀로그래프 렌즈의 수차를 제거하기 위해서는

$$K_{\text{재생}} \left[\frac{\cos\varphi'^2}{f_{\phi'}^{\perp}} - \frac{\cos\phi'^2}{f_{\phi'}^{\parallel}} \right] - K_{\text{기록}} \left[\frac{\cos\varphi^2}{f_{\phi}^{\perp}} - \frac{\cos\phi^2}{f_{\phi}^{\parallel}} \right] = 0 \quad (9)$$

$$K_{\text{기록}} \left[\frac{\cos\phi}{\overline{AC}} - \frac{\cos\varphi}{\overline{AC}} \right] - K_{\text{재생}} \left[\frac{\cos\phi'}{\overline{AC}} - \frac{\cos\varphi'}{\overline{AC}} \right] = 0 \quad (10)$$

를 만족해야 한다. 여기서 $\overline{AE}' = f_{\phi'}^{\perp}$, $\overline{AD}' = f_{\phi'}^{\parallel}$, $\overline{AE} = f_{\phi}^{\perp}$, $\overline{AD} = f_{\phi}^{\parallel}$ 이다. 식 (9)는 자오면에 관계되며, 식 (10)은 구결면에 관계되는 식이다. 구결면은 그림 4와 같다. 그림 4의 삼각형 ACE''에서 sine 법칙을 적용하면^[20,21]

$$\frac{\overline{CE}''}{\sin\varphi'} = \frac{\overline{AE}''}{\sin\angle ACE''}, \quad \frac{\overline{CD}''}{\sin\phi'} = \frac{\overline{AD}''}{\sin\angle ACD''} \quad (11)$$

여기서 \overline{AE}'' 는 구결면에서 홀로그래프 면에 입사하는 빔의 상점 거리($=f_{\phi'}^{\perp}$)이고, \overline{AD}'' 는 홀로그래프 면에서 회절되는 파의 상점 거리($=f_{\phi}^{\perp}$)이다. $\angle ACD'' + \angle ACE'' = 180^\circ$ 이므로 식 (11)을 정리하면

$$\frac{\overline{CD}''}{f_{\phi}^{\perp} \sin\phi'} = \frac{\overline{CE}''}{f_{\phi'}^{\perp} \sin\varphi'} \quad (12)$$

이 된다. 여기서 $\overline{CD}'' = \frac{f_{\phi}^{\perp} \cos\varphi' - \overline{AC}}{\cos\delta\theta}$, $\overline{CE}'' = \frac{f_{\phi'}^{\perp} \cos\phi' - \overline{AC}}{\cos\delta\theta}$

이다.

식 (12)에 격자 방정식 (2)를 도입하여 정리하면

$$\frac{K_{\text{재생}}}{f_{\phi'}^{\perp}} + \frac{K_{\text{기록}}}{f_{\phi}^{\perp}} - \frac{K_{\text{재생}}}{f_{\phi'}^{\parallel}} - \frac{K_{\text{기록}}}{f_{\phi}^{\parallel}} =$$

$$K_{\text{기록}} \left[\frac{\cos\phi}{\overline{AC}} - \frac{\cos\varphi}{\overline{AC}} \right] - K_{\text{재생}} \left[\frac{\cos\phi'}{\overline{AC}} - \frac{\cos\varphi'}{\overline{AC}} \right] \quad (13)$$

이 된다. 식 (13)은 식 (10)과 같다. 만약에 기록 물체파와 재생되는 광파가 평면파라고 가정한다면, 식 (9)와 (13)에서 $\frac{1}{f_{\phi}^{\perp}}$ 와 $\frac{1}{f_{\phi'}^{\perp}}$ 는 영이 되므로 식 (9)와 (13)은 다음과 같이 표현된다.

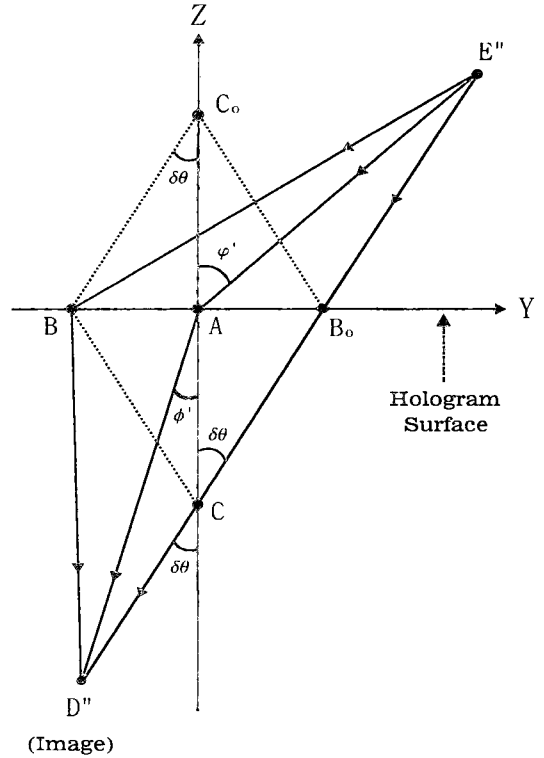


그림 4. 홀로그래프 재생시 구결 파면(f^{\perp})의 비점수차를 해석하기 위한 기하학적 모델.

$$f_{\phi'}^{\perp} = \frac{\lambda_{\text{기}}}{\lambda_{\text{재}}} \frac{\cos\varphi'^2}{\cos\varphi^2} \cdot f_{\phi}^{\perp} \quad (14)$$

$$f_{\phi'}^{\perp} = \frac{\lambda_{\text{기}}}{\lambda_{\text{재}}} \cdot f_{\phi}^{\perp} \quad (15)$$

여기서 $\lambda_{\text{기}}$ 는 기록 파장, $\lambda_{\text{재}}$ 는 재생 파장, $\phi \cdot \varphi \cdot \phi' \cdot \varphi'$ 는 기록과 재생할 때 관계되는 각도 파라미터들이며, 재생할 때 재생광원의 비점수차를 허용한다. 기록과 재생 사이에서 파장 변화는 각도 변화를 필요로 하며, 식 (2)와 같이 주어진다. 식 (14)와 (15)는 입사 평면에서 자오 파면(f^{\parallel})과 구결 파면(f^{\perp})의 곡률로 표현된다. 이 경우 파의 하나는 구면($f_p^{\parallel} = f_p^{\perp}$)이고, 다른 하나는 비점($f_p^{\parallel} \neq f_p^{\perp}$)을 필요로 하므로, 파장과 각도가 변한다(즉, $\lambda_{\text{기}} \neq \lambda_{\text{재}}$, $\phi \neq \phi'$, $\varphi \neq \varphi'$).

자오 파면과 구결 파면의 상점 거리 비($\frac{f_{\phi'}^{\perp}}{f_{\phi}^{\perp}}$)에 대한 비점수차의 각도 의존도를 그림 5에 나타내었다. 기록 각도와 재생 각도를 적당히 선택하므로써 재생 광원의 비점수차 제거할 수 있다.

그림 6에서 자오 상면의 곡률(tangential image field curvatures)과 구결 상면의 곡률(sagittal image field curvatures)로 대별된 비점수차의 상 겹질(astigmatic image shells) 곡선들은 반도체 레이저로부터 나오는 여러 다른 광선에 의하여 생기는 모든 비점수차들을 연결한 것이다. 이 두 상 겹질(image shells) 사이의 거리차는 임의의 발산 반각(α)에서 f_{ϕ}^{\perp} 와 $f_{\phi'}^{\perp}$ 사이의 거리차이다. 그림 7은 반도체 레이저의 출력광에서 자

표 2. 실험값

LD 종류	φ'	ϕ'	\overline{SL}	R
TOLD 9200	$6.8 \pm 0.5^\circ$	$28 \pm 0.5^\circ$	$93 \pm 3 \text{ m}$	$11.5 \pm 1 \text{ m}$
TOLD 9211	$8.6 \pm 0.5^\circ$	$28 \pm 0.5^\circ$	$95 \pm 2 \text{ m}$	$11.5 \pm 1 \text{ m}$

표 3. Holographic collimating lens 제작에서의 오차 범위

φ	ϕ	\overline{AC}	R
$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 1 \text{ mm}$
0~0.5%	0~1.7%	0~2.2%	0~8.3%

표 4. 이론 설계치와 실험 측정치를 비교한 오차 범위.

LD 종류	φ'	ϕ'	\overline{SL}	R
TOLD 9200	45.3~52.7%	0~1.7%	2~8.1%	0~12.5%
TOLD 9211	6.3~16.6%	0~1.7%	1~5.1%	0~12.5%

재생광을 얻을 수 있다.

이론 설계값과 비교할 때 약간의 오차를 보이는데, 이것은 HCL 제작과정에서 오차와 반도체 레이저의 특성상 주위 온도변화에 따른 파장의 미소이동, 이론에서 고려하지 않은 사항(구면수차, 코마 등)들 때문이라 생각된다. 특히 TOLD 9200 반도체 레이저인 경우 HCL의 회전 각도가 이론치에 비해 큰 오차(실험치의 2 배)를 보이고 있는데, 이는 TOLD 9200 반도체 레이저의 파장이 670 nm 근처에서 다중모드의 특성을 갖고 있기 때문에 오차가 큰 것으로 생각되며, 이러한 요인들을 고려하면 이론치와 실험치가 근사적으로 일치함을 알 수 있다.

그림 8은 반도체 레이저의 출력 입사광과 HCL로부터 회절된 시준 재생광을 나타낸 기하학적 도면이다. 그림 8과 같이 HCL로부터 거리 10 cm, 50 cm, 100 cm 떨어진 각각의 위치에 스크린을 두고, 스크린 뒷면에서 CCD 카메라로 시준광의 형태와 강도 분포를 측정하였다. 그림 9~13의 (a)에서 강도 분포상의 노이즈는 스크린 표면에 의해 생긴 것이다. 따라서 노이즈를 제거하기 위해 소프트웨어 상에서 그림 9~13의 (b)와 같이 FFT하고, 다시 low-pass filtering 하여 나타낸 상이

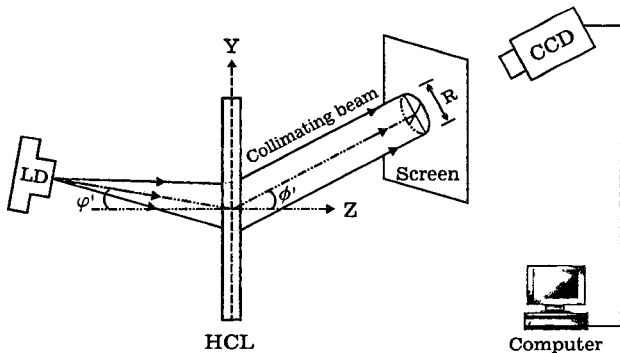


그림 8. 반도체 레이저의 발산 출력광으로 입사시켰을 때, holographic collimating에서 재생되어 나오는 collimating beam의 기하학적 도면.

그림 9~13의 (c)이며 강도분포도 함께 제시하였다.

반도체 레이저 (TOLD 9211)의 출력빔 단면과 강도분포를 그림 9에 제시하였다. 그림 10과 11은 TOLD 9211 반도체 레이저에 대한 시준된 광속의 빔의 균일도를 나타낸 사진이다. 그림 12는 TOLD 9200 반도체 레이저를 사용하여 재생된 평행광으로서 시준 광속의 균일도가 TOLD 9211에 비해 그다지 좋지 않은데, 이것은 HCL이 일종의 회절 소자임으로 파장이 다중모드인 TOLD 9200 반도체 레이저에서는 시준 광속의 균일도를 저하시키는 요인으로 작용한 것이다.

시준 광속들이 완전한 평면파가 되지 않은 것은 재생 광원인 반도체 레이저가 가우스 빔 강도 분포를 갖고 있기 때문이며, 홀로그램 기록시 기록광원 또한 가우스 강도 분포를 갖고 있기 때문이다. 따라서 HCL에 의해 재생된 시준 광속들은 대체로 가우스 빔 강도 분포를 가지면서 일정한 빔 직경($R \approx 12 \text{ mm}$)을 유지한 채 진행하였다. 반도체 레이저의 출력빔(그림 9)과 비교할 때 시준 광속의 강도 분포곡선(그림 10~12)의 기울기가 많이 완만해짐을 알 수 있다. 또한 측정거리에 따라 시준광의 강도 분포곡선들이 약간의 차이를 보인다. 이러한 요인으로서서는 홀로그램 기록 및 재생시 광학 정렬계의 오차와, 시준 광속을 촬영하기 위한 스크린과 CCD 카메라 사이의 광학계 오차와, 특히 홀로그램 기록 및 재생에서 고려하지 않은 수차(구면수차, 코마, 왜곡 등)이라 생각된다. 반도체 레이저의 출력빔과 비교할 때 HCL에 의해 재생된 시준광은 상당 부분 비점수차가 제거됨을 확인 할 수 있었다. 홀로

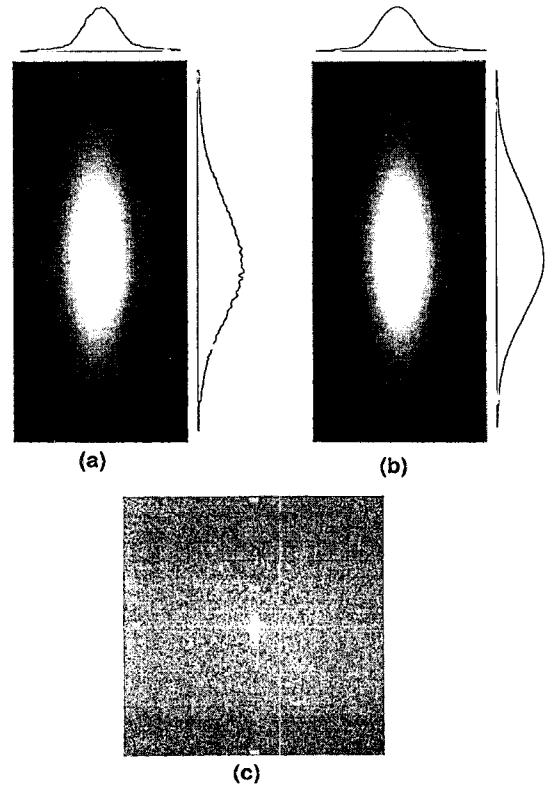


그림 9. Toshiba TOLD 9211 반도체 레이저의 발산 출력광 강도 분포도. (a) CCD-array에서 찍은 출력광의 단면 사진과 강도. (b) Fast Fourier transform. (c) Low-pass filtering.

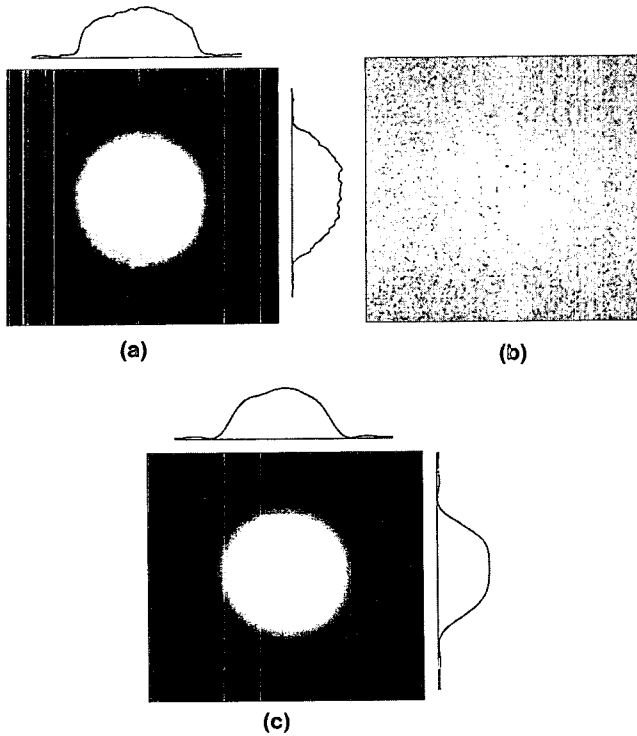


그림 10. Toshiba TOLD 9211 반도체 레이저를 사용할 때, holographic collimating lens로 부터 10 cm 떨어진 위치에서 관측한 시준광. (a) CCD-array에서 찍은 시준광의 단면 사진과 강도. (b) Fast Fourier transform. (c) Low-pass filtering.

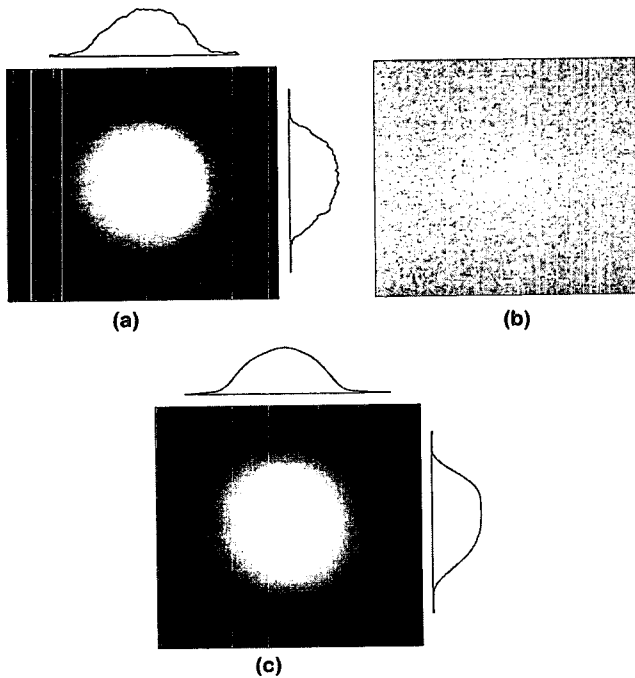


그림 11. Toshiba TOLD 9211 반도체 레이저를 사용할 때, holographic collimating lens로 부터 100 cm 떨어진 위치에서 관측한 시준광. (a) CCD-array에서 찍은 시준광의 단면 사진과 강도. (b) Fast Fourier transform. (c) Low-pass filtering.

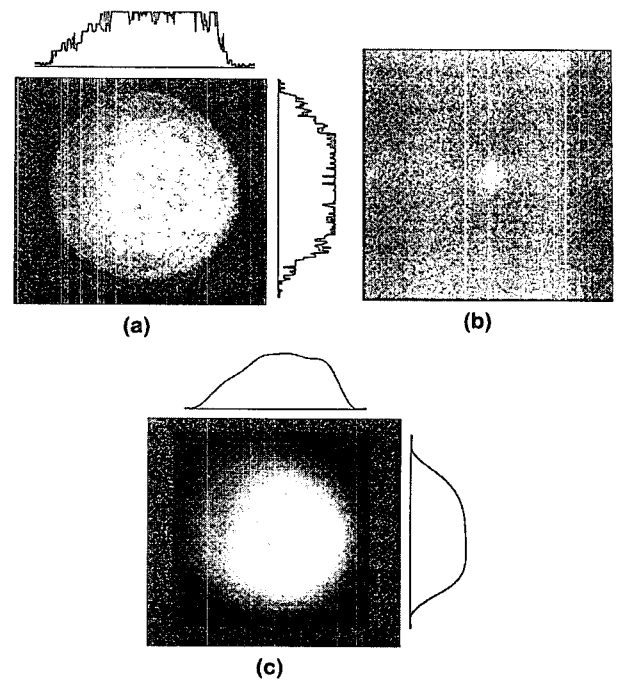


그림 12. Toshiba TOLD 9200 반도체 레이저를 사용할 때, holographic collimating lens로 부터 100 cm 떨어진 위치에서 관측한 시준광. (a) CCD-array에서 찍은 시준광의 단면 사진과 강도. (b) Fast Fourier transform. (c) Low-pass filtering.

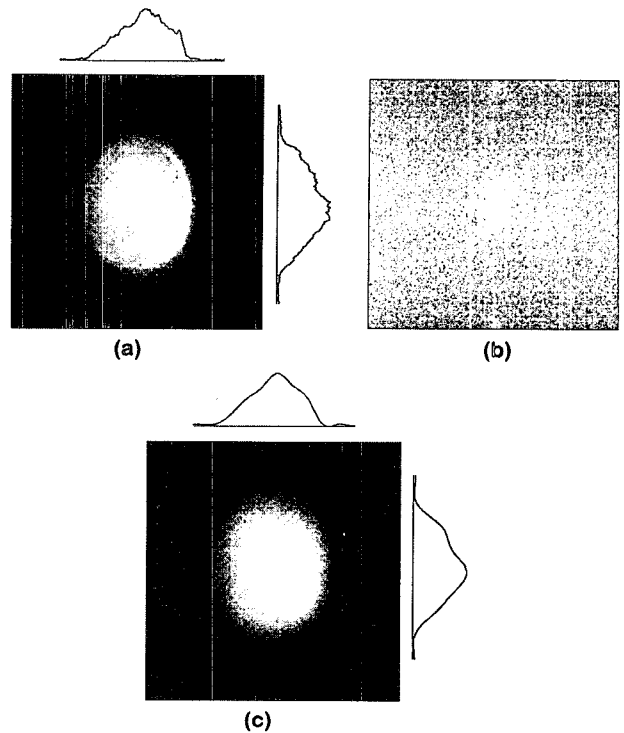


그림 13. 재래식 시준기 (collimator, ILXLightwave 제품)에 의해 시준된 반도체 레이저 광의 강도 분포를 관측. (a) CCD-array에서 찍은 시준광의 단면 사진과 강도. (b) Fast Fourier transform. (c) Low-pass filtering.

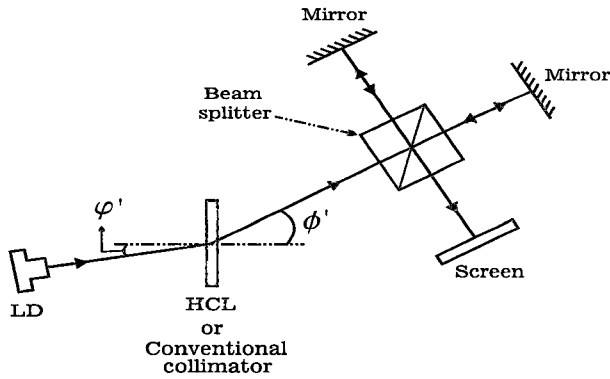


그림 14. Holographic collimating lens로 구성된 Michelson 간섭계.

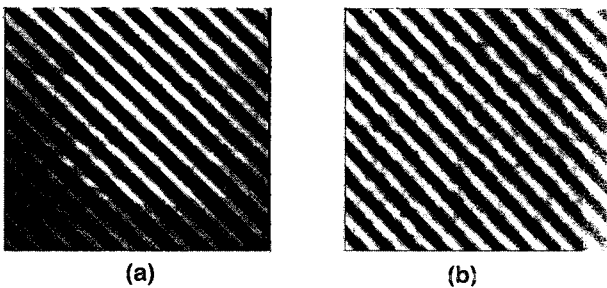


그림 15. 그림 14의 간섭계에 의한 간섭무늬. (a) Holographic collimating lens 소자를 사용한 경우. (b) 재래식 시준기를 사용한 경우.

그럼 (HCL)의 회절효율은 84% 이었다.

그림 13은 재래식 시준기 (ILX Lightwave 제품)에 의해 시준된 반도체 레이저 광의 강도 분포이다. 재래식 시준기에 의한 시준광도 완벽하게 평행광으로 전파되지 않으며, 강도 분포면도 비대칭적인 가우스 형태일 뿐만 아니라 상당한 수차를 가지고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서 설계, 제작된 HCL의 응용으로 그림 14와 같이 간섭계를 구성해 보았다. 그림 15는 그림 14의 간섭계에 의한 간섭무늬로서, (a)는 HCL 소자를 사용한 경우이고 (b)는 재래식 시준기를 사용한 간섭무늬이다. 그림 15 (a)의 간섭무늬를 볼 때, 간섭계로 사용하여도 손색이 없음을 보여주고 있다. 반도체 레이저와 HCL 소자로 결합된 간섭계는 기존의 간섭계에 이용된 헬륨-네온 레이저 광원보다 경제적 면과 소형화면에서 큰 이점들을 가지고 있다.

IV. 결 론

수차를 갖는 광원에서 off-axis 홀로그래픽 광학소자를 이용하여 수차 제거 방법에 대해 논하였으며, 광선추적방법으로 수차 제거용 홀로그램 렌즈 설계식들을 유도하였다. 파장이 670 mm 이고 타원 추형으로 발산하는 반도체 레이저 광을 수차가 제거된 시준광으로 만들기 위해 홀로그램 렌즈를 설계 제작하였다. 홀로그램 488 mm 파장인 Ar⁺ 레이저를 사용하여 기록하였고, 670 mm 파장인 반도체 레이저 광으로 재생하였다. 홀로그램 기록에는 구면파와 평면파를 사용하였다.

실험에 사용된 반도체 레이저는 Toshiba 제품으로서 TOLD 9200과 TOLD 9211 두종류이다. 재생 파면의 수차를 제거하기 위해 반도체 레이저로부터 far-field 위치에 놓여질 홀로그램 렌즈를 설계하였다. 반도체 레이저로부터 약 $\overline{SL} \approx 100$ mm 떨어진 위치에서 반도체 레이저 광의 수평 단면 직경은 약 $R=12$ mm 이다. 이 때 기록 구면파는 필름면에 수직으로 입사하였으며, 점광원과 필름면 사이의 거리는 $\overline{AC}=134.5$ mm 였다. 기록 물체파인 평면파의 입사각도는 $\phi=20^\circ$ 였으며, 홀로그램 렌즈(HCL)에 의해 회절되는 시준광의 각도는 $\phi=28^\circ$ 였다. 반도체 레이저(TOLD 9211)로부터 홀로그램 중심까지 측정거리는 $\overline{SL}=95 \pm 2$ mm 였으며, 이 위치에서 측정된 홀로그램의 회전 각도는 $\phi'=8.6 \pm 0.5^\circ$ 이며, 이론치는 9.72° 이다. 홀로그램 기록시 거리·각도·광학계의 수차 등의 오차를 감안할 때, 이론치와 측정치가 근사적으로 잘 일치함을 알 수 있었다. 반도체 레이저에 결합된 홀로그램 소자는 광신호 검출 시스템, 광정보 처리 시스템, 간섭계 등에서 기존의 재래식 소자 대응으로 충분히 대체될 수 있을 뿐만 아니라 제품의 경량화, 소형화 등에 한층 더 기여할 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] T. A. Shankoff and R. K. Curran, Appl. Phys. Lett., **13**, 239 (1968).
- [2] 임용석, 최옥식, 김상철, 새물리, **35**, 446 (1995).
- [3] Y. S. Im, Y. L. Lee, C. H. Kwak, O. S. Choe and S. C. Kim, 1996 OSA Technical Digest Series 5, 182 (1996).
- [4] D. Meyerhofer, RCA Rev., **33**, 110 (1972).
- [5] B. J. Chang and C. D. Leonard, Appl. Opt., **18**, 2407 (1979).
- [6] 최영진, 임용석, 박진원, 최옥식, 정진호, 임은식, 새물리, **35**, 197 (1995).
- [7] Y. Ishii and T. Kubota, Appl. Opt., **32**, 4415 (1993).
- [8] H. P. Herzig, Opt. Commun., **58**, 144 (1986).
- [9] M. V. Klein and T. E. Furtak, Optics, second edition (John Wiley & Sons, New York, 1986) Chap. 2 and 5.
- [10] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, (Pergamon Press, Oxford, 1983), Chap. 8 and 9.
- [11] M. Young, J. Opt. Soc. Am., **62**, 972 (1972).
- [12] K. Kamiya, Science of Light, **12**, 35 (1963).
- [13] K. S. Mustafin, Optics and Spectroscopy, **37**, 664 (1974).
- [14] R. W. Smith, Opt. Commun., **21**, 102 (1977).
- [15] Y. Amitai and A. A. Friesem, J. Opt. Soc. Am., **A5**, 702 (1988).
- [16] Y. Amitai and A. A. Friesem, Opt. Eng. **26**, 1133 (1987).
- [17] M. C. Hutley, Diffraction Gratings (Academic Press, London, 1990), Chap. 7.
- [18] E. B. Champagne, J. Opt. Soc. Am., **57**, 51 (1967).
- [19] M. Assenheimer, Y. Amitai, and A. A. Friesem, Appl. Opt., **27**, 4747 (1988).
- [20] M. H. Freeman, Optics (Alden Press, Oxford, 1980), Chap. 7.
- [21] J. N. Latta, Appl. Opt., **11**, 1686 (1972).
- [22] Laser Diode Manual (Toshiba, Tokyo, 1991).

Design and Fabrication of Holographic Collimating Lens for Semiconductor Laser

Yong Seok Im, Chong Hoon Kwak and Ok Shik Choe
Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan, 712-749, Korea

(Received January 7, 1998, Revised manuscript received June 1, 1998)

A method is described to produce off-axis hologram lenses without astigmatism for semiconductor lasers. We fabricated a holographic collimating lens by using dichromated gelatin film with high diffraction efficiency and without astigmatism which makes a collimated off-axis beam of semiconductor laser. We have designed the holographic collimating lens by applying the classical ray-tracing method to holographic diffraction. The elimination of astigmatism is obtained by choosing appropriate angles of recording and reconstruction beams. The hologram is recorded by use of Ar⁺ laser (488 nm wavelength) and reconstructed by semiconductor laser (670 nm wavelength). The physical parameters of recording and reconstruction angles, wavelength, and astigmatism are analytically calculated and experimentally confirmed.