

직시형분산요소로서 그리즘(GRISM)의 합성과 효율특성에 대한 연구

리유성, 조천규, 김철진

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《새로운 과학기술분야를 개척하기 위한 사업도 전망성있게 밀고나가야 합니다. 나라의 과학기술을 세계적수준에 올려세우자면 발전된 과학기술을 받아들이는것과 함께 새로운 과학기술분야를 개척하고 그 성과를 인민경제에 적극 받아들여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 138~139페이지)

에돌이효율과 분산도, 분해능을 높이기 위하여 위상변조형홀로그래피에돌이살창(HDG)에 대한 연구[2-4]가 심화되고있으나 프리즘과 굴절률정합시킨 그리즘분산계의 합성과 계에서의 빛의 에돌이특성을 밝힌 연구자료는 제기된것이 없다.

론문에서는 고분해능홀로그래피건판(《Slavish PFG-3》)을 기관으로 하고 Br_2 로 처리하여 제작한 위상변조형홀로그래피에돌이살창에 기초하여 굴절률정합법으로 그리즘을 합성하고 그것의 에돌이특성을 밝혔다.

1. 그리즘의 기초로서 굴절률변조형HDG의 제작

위상변조형HDG시편을 촬영하기 위한 광학계는 각이한 공간주파수를 가진 HDG를 얻어야 하므로 가변주파수살창촬영광학계로 구성하였다. 이 광학계에서는 광속분할 및 합성요소로서 단일체의 광학요소를 리용하고 초점거리가 $f=250\text{mm}$ 인 원기둥형렌즈와 쌍프리즘을 리용하여 평행광속이 아니라 발산원기둥파면들의 간섭을 실현할수 있게 함으로써 간섭마당속에서의 고분해능건판의 설치위치에 따라 넓은 대역에서 공간주파수를 변화시킬수 있게 하였다. 즉 간섭마당속에서 광속의 사립각은 건판의 위치를 변화시킬 때 $2\theta_1 \sim 2\theta_2$ 로 되므로 $\nu = 2 \sin \theta / \lambda$ 에 의하여 살창의 공간주파수를 변화시킬수 있다. 촬영된 진폭살창은 Br_2 에 의한 화학처리공정을 거쳐 위상변조형으로 변환시켰다.[1]

이런 방법으로 제작한 위상살창에 대하여 최대효율을 주는 에돌이각을 결정하기 위하여 브래그각의 변화특성을 반도체레이자(650nm)를 리용하여 살창의 공간주파수에 따라 실험적으로 고찰하였다.(그림 1)

그림 1에서 보는바와 같이 브래그각은 공간주파수가 커지는데 따라서 서서히 커진다. 이러한 측정결과는

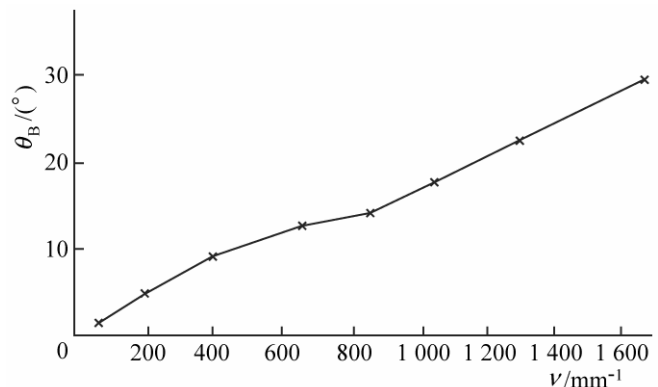


그림 1. 살창의 공간주파수에 따른 브래그각의 변화특성

$\lambda = 2\Lambda \sin \theta_B$ 에 의하여 이론적으로 계산한 값들과 잘 일치한다. 여기서 λ 는 빛의 파장이고 Λ 는 살창의 공간주기이다.

다음으로 반도체레이자를 브래그각으로 입사시킬 때 공간주파수에 따르는 효율의 변화특성을 밝혔다.

실험결과 효율은 공간주파수가 커지는데 따라 높아지다가 어떤 공간주파수구역에서 극대가 나타나고 다시 서서히 떨어진다. 위상변조살창의 경우 에돌이효율의 극대값은 $\nu \approx 700\text{mm}^{-1}$ 에서 나타난다.

위상변조살창의 경우 브래그효과를 특징짓는 체적효과파라미터는 다음과 같다.

$$Q = \frac{2\pi\lambda_a d}{n_0 \Lambda^2} \quad (1)$$

여기서 n_0 는 기록층의 평균굴절률, d 는 기록층의 두께, λ_a 는 공기중에서의 빛의 파장이다.

공간주파수에 따르는 체적효과파라미터의 변화특성을 그림 2에 보여주었다.

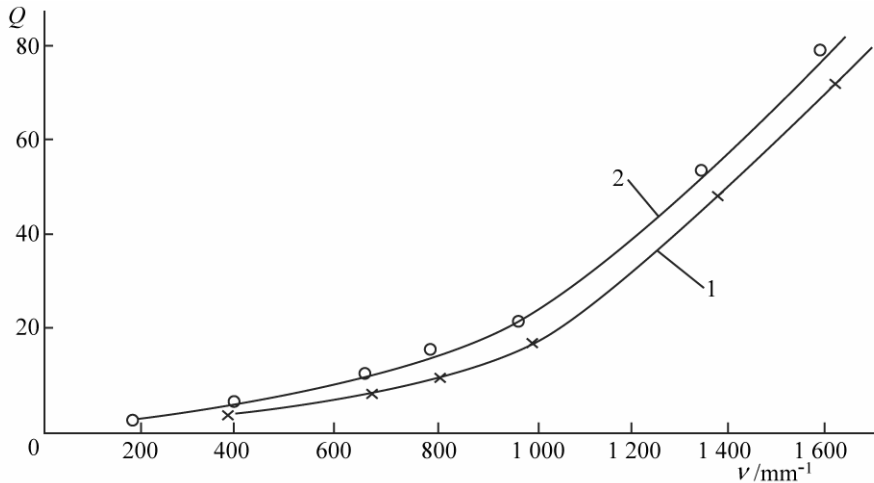


그림 2. 공간주파수에 따르는 체적효과파라미터의 변화특성

1-진폭살창, 2-위상살창

그림 2에서 보는바와 같이 공간주파수가 커지는데 따라 체적효과가 크게 나타난다.

위상변조형살창의 체적효과는 $\nu = 700\text{mm}^{-1}$ 일 때 $Q = 12.8$ 로서 $Q \geq 10$ 인 조건을 만족시키므로[1] 이 구역에서 뚜렷하게 나타난다. 그런데 위상변조형살창의 효율측정실험에 의하면 1000mm^{-1} 이상의 높은 공간주파수구역에서 $Q \geq 26.2$ 로서 체적효과가 더 커짐에도 불구하고 효율이 떨어진다. 그것은 낮은 공간주파수구역과는 달리 높은 공간주파수구역에서는 굴절률변조가 기본변조형식으로 되는 반면에 표면의 기록변조는 산란잡음을 증대시키고 감광유제의 분해능이 한계를 가지기때문이다.

2. 프리즘-신폴광학계에서의 빛의 에돌이

너비가 a_0 인 신폴에 켜기형직각프리즘을 그림 3과 같이 결합시킨 광학계에 평면빛파동이 입사하는 경우를 보자. 이러한 광학계를 지나는 빛파동은 신폴면을 따라 연속적으로 변하는 위상변화를 받게 된다.

실름의 중심 O 에 자리표원점을 정하고 켜기형프리즘의 정각 δ 가 크지 않다고 보면 $\sin \delta \approx \delta$ 이고 자리표가 y 인 점에서 프리즘의 기하학적두께는 $\delta a_0/2 + \delta y$ 로 되고 광학적두께는 $(\delta a_0/2 + \delta y)n$ 이다. 여기서 n 은 프리즘의 굴절률이다.

위상변화는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\Delta\alpha = kn\left(\delta\frac{a_0}{2} + \delta y\right) + k\left[\delta a_0 - \left(\delta\frac{a_0}{2} + \delta y\right)\right] \quad (2)$$

여기서 $k = 2\pi/\lambda$ 이다.

식 (2)에서 첫번째 항은 프리즘에 의한 위상변화량이고 두번째 항은 빛이 지나는 행로 δa_0 에서 받게 되는 위상변화량이다.

한편 후이겐스-프레넬의 원리에 의하면 프라운호페르구역에서 에돌이무늬의 진폭분포는

$$\Phi(x', y') = \int_S \Psi(x, y) e^{ik(xx' + yy')} dx dy \quad (3)$$

로 표시되므로 실름이 무한히 길다고 보면 빛마당분포 Ψ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Psi(y) = \frac{A_0}{a_0} e^{i\Delta\alpha} \quad (4)$$

그러나 프리즘이 없는 경우 실름에 의한 프라운호페르에돌이무늬의 복소진폭은

$$A_\varphi = \int_{-a_0/2}^{a_0/2} \Psi(y) e^{-iky \sin \varphi} dy \quad (5)$$

이므로 식 (5)에 식 (4)를 넣으면 다음과 같이 표시된다.

$$A_\varphi = \int_{-a_0/2}^{a_0/2} \frac{A_0}{a_0} e^{i\Delta\alpha - ik y \sin \varphi} dy = \frac{A_0}{a_0} e^{ik(n+1)\delta a_0/2} \int_{-a_0/2}^{a_0/2} e^{-i[k \sin \varphi - k(n-1)\delta]y} dy \quad (6)$$

직4각형구역에서의 프라운호페르에돌이공식을 리용하면 식 (6)으로부터 다음의 식을 얻는다.

$$|A_\varphi| = |A_0| \frac{\sin\{ka_0[\sin \varphi - (n-1)\delta]/2\}}{ka_0[\sin \varphi - (n-1)\delta]/2} \quad (7)$$

프리즘이 없는 경우 에돌이무늬의 주극대가 주축우에 나타난다는것을 고려하면 식 (7)로부터 프리즘이 있는 경우 에돌이무늬의 주극대가

$$\varphi \approx (n-1)\delta \quad (8)$$

만큼 주축으로부터 편기되게 된다는것을 알수 있다.

3. 그리즘의 합성과 안정화

앞에서 고찰한 결과를 굴절률정합한 그리즘분산계에 적용할수 있다. 그러자면 편기각 φ 가 HDG에서 1차스펙트르를 주는 에돌이각 φ_1 에 의하여 보상되도록 함으로써 직시형의 분산계는 $\varphi = \varphi_1$ 의 조건을 만족시킬수 있다.

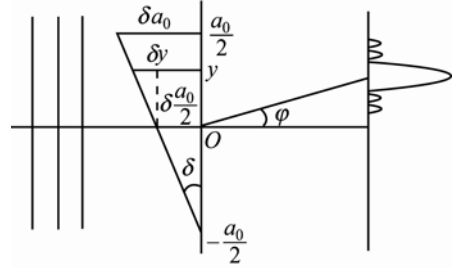


그림 3. 프리즘-실름계에서의 프라운호페르에돌이

한편 굴절률변조형HDG에서 극대는 브래그조건을 만족시킬 때 이루어진다. 이때 브래그각은

$$\theta_B = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\Lambda}\right) \quad (9)$$

로 표시되며 $\varphi_1 = 2\theta_B$ 를 만족시켜야 한다. 이로부터 주어진 그리즘분산계에서 에돌이각은 다음과 같이 표시된다.

$$\varphi_1 = 2\theta_B = 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{2\Lambda}\right) = (n-1)\delta \quad (10)$$

식 (10)으로부터 HDG의 공간주기와 프리즘정각사이에는 다음과 같은 관계가 만족되어야 한다.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\left[\frac{(n-1)\delta}{2}\right]} \quad (11)$$

이 식으로부터 프리즘정각에 따르는 HDG의 공간주기변화는 그림 4와 같다.

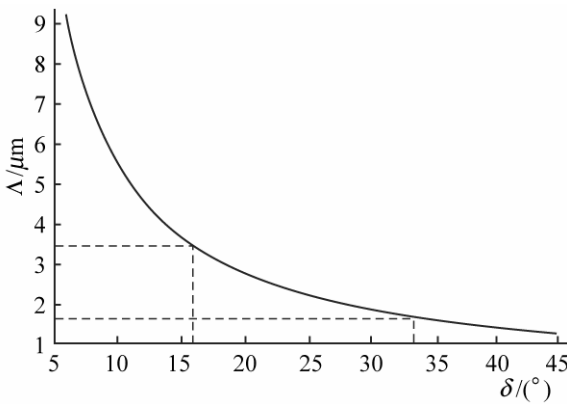


그림 4. 프리즘정각에 따르는 HDG의 공간주기변화

그림 4에서 보는바와 같이 공간주파수가 300mm^{-1} 즉 공간주기가 $\Lambda = 3.33\mu\text{m}$ 인 경우 정각 $\delta = 17^\circ$, 공간주파수가 600mm^{-1} 즉 공간주기가 $\Lambda = 1.67\mu\text{m}$ 인 경우에는 정각이 $\delta = 33^\circ$ 인 췌기형프리즘으로 정합시키는 것이 합리적이다. 정합물질로서 굴절률이 $n=1.52$ 인 발삼을 리용하면 살창유제와 프리즘의 굴절률이 모두 $n=1.52$ 인 조건에서 굴절률정합이 완전히 실현되어 그 어떤 추가적인 위상이지러짐도 발생하지 않는다.

그림 5에 그리즘분산계의 안정화특성을 보여주었다. 그림 5에서 곡선 1은 Br_2 로 처리한 HDG의 효율을 나타내고 곡선 2는 굴절률정합한 그리즘분산계의 효율을 나타낸다.

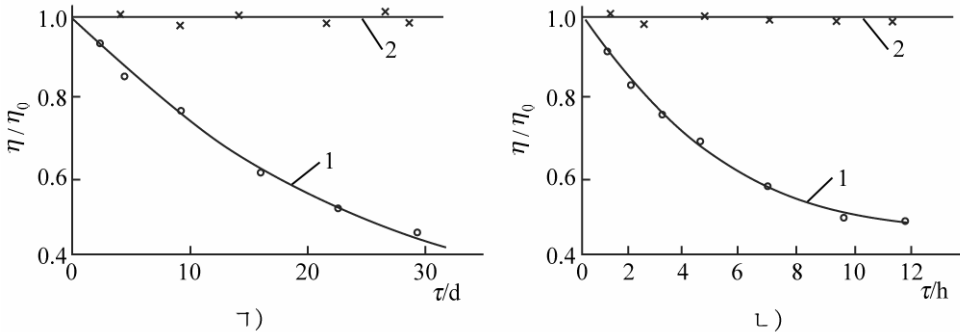


그림 5. 그리즘분산계의 안정화특성

1) 습기에 의한 살창효율의 변화, 2) 자외선로출에 의한 살창효율의 변화

그림 5에서 보는바와 같이 굴절률정합한 그리즘분산계는 주위환경에 대해서 매우 안정하다는것을 알수 있다. 즉 Br_2 로 처리한 HDG의 효율은 정합전에 상대습도가 90%인 조건

에서 1개월 동안에 40%까지 낮아졌으나 굴절률정합한 그리즘의 경우에는 효율이 변하지 않았다.(그림 5의 ㄱ))

마찬가지로 초고압수은등을 리용하여 자외선로출조건에서 실험을 진행한 결과 Br_2 로 처리한 살창의 효율은 12h동안에 현저히 낮아졌으나 굴절률정합한 그리즘분산계에서는 효율이 변하지 않았다.(그림 5의 ㄴ))

맺는 말

1) 살창광학계에서 프라운호페르에돌이특성을 조사한데 기초하여 직시형분산계를 합리적으로 정합하기 위한 조건을 밝히고 실현하였다.

2) 굴절률정합법으로 그리즘분산계를 합성하는것이 분산계의 안정화를 위한 합리적인 방도로 된다는것을 실험적으로 확증하였다.

참고 문헌

- [1] 조천규 등; 물리, 3, 8, 주체102(2013).
- [2] Barbarta Kilosanidze et al.; Appl. Opt., 52, 5, 1006, 2013.
- [3] Ho Chiao Chuang et al.; Optics & Laser Technology, 44, 2182, 2012.
- [4] T. Hietala et al.; Optics Communication, 282, 3119, 2009.

주체107(2018)년 3월 5일 원고접수

On the Composition of an GRISM as a Direct-Vision Dispersed Element and Its Efficiency Characteristics

Ri Yu Song, Jo Chon Gyu and Kim Chol Jin

We have realized the stability of a grating by a holographic phase grating and refractive index matching of a prism. The holographic phase grating has been developed by using high resolution holographic plate "Slavish PFG-3" as the base and processing it with Br_2 . On the basis of this, we have studied the problem to account for the Fraunhofer diffraction characteristics of the grating.

We have theoretically studied the rational refractive index matching condition of the GRISM. We have experimentally proved that it is a rational method for the stability of the disperse system and the development of a direct-vision disperse element to compose a GRISM disperse system by refractive index matching method.

Key words: GRISM, efficiency, refractive index matching