

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.1.231>

IIBC 2017-1-31

다층 유전체 격자구조에 의한 공진 산란특성의 분석

Analysis of Resonance Scattering Characteristics by Multi-layered Dielectric Gratings

호광춘*

Kwang-Chun Ho*

요약 다층 유전체 격자에 입사하는 평면파에 의해 생성된 공간 고조파들은 GMR 특성으로 알려진 강한 공진 산란 변화를 겪는다. 이러한 효과를 명확히 분석하기 위하여 본 논문에서는 산란 문제의 정확한 등가전송선로 이론(RETT)을 사용하여 격자 영역 내부의 전파특성과 분산곡선을 조사하였다. 그 결과, 산란 공진의 최대 크기에서 산란된 모드와 격자 구조에 의하여 발생하는 누설 모드가 거의 동일하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 누설파의 자유 공명 특성과 관련된 GMR 효과가 다층 유전체 격자구조에서 발생한다는 이전 연구를 확인하고 일반화하였다. 전형적인 격자의 공진특성을 보여주는 정량적인 수치해석 결과가 주어졌으며 TM 모드가 반사면에 수직 입사된 특수한 경우를 논의하였다.

Abstract The space harmonics generated by a plane-wave incident upon a multi-layered dielectric grating can undergo strong resonance scattering variations known as GMR(guided-mode resonance). To clarify these effects, we examine the field propagation and dispersion curve inside the grating region by using a rigorous equivalent transmission-line theory(RETT). The results show that, at the peak of a scattering resonance, the reflected mode is almost identical to a leaky wave that can be supported by the grating structure. Thus, we confirm and generalize previous research that has occurred GMR effect associated with the free-resonant character of leaky waves at multi-layered dielectric gratings. Quantitative simulation results illustrating the behavior of typical gratings are given, and the special case of normal incidence is discussed for TM mode.

Key Words : Diffraction Grating, Equivalent Network, Guided-Mode Resonance, Leaky-Wave

1. 서론

주기적인 격자구조의 광학적 특성은 100년 이상 연구되어 왔지만 여전히 중요한 연구 분야로 활발히 연구되고 있다. 그들의 물리적 성질들은 다른 방법으로는 쉽게 실현되지 않는 많은 기능을 제공한다. 나노 스케일 패턴과 처리 기술이 계속 발전함에 따라 공간 변조 격자구조

로 설계된 수동 및 능동 광학 소자들이 꾸준한 발전되고 있다. 현재 회절 광학 또는 광결정 구조에서 가장 많은 연구하고 있는 분야는 1st stop-band의 특성이 적용된 1st Bragg 조건 근처에서 발생하는 광 제어다. 그러나 광학 장치에 대한 추가적인 흥미로운 가능성이 특별한 구조에서 누설 모드가 생성될 수 있는 2nd stop-band 근처에서 발생한다. 최근 논문에서는 공진 누설 모드를 사

*종신회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2016년 8월 31일, 수정완료 2017년 1월 27일
게재확정일자 2017년 2월 3일

Received: 31 August, 2016 / Revised: 27 January, 2017 /

Accepted: 3 February, 2017

*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr

Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

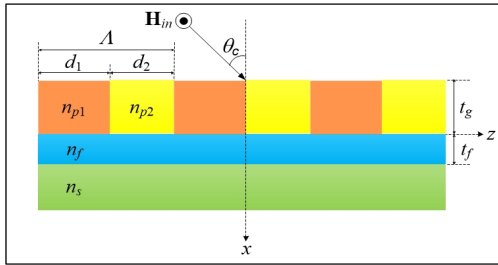


그림 1. 다층 유전체 격자구조에서 상층으로부터 입사되는 평면파의 구성도 (TM 모드의 경우).

Fig. 1. Schematic configuration of plane-wave incidence in the cover region of a multi-layered dielectric grating (for TM modes).

용하는 광학 필터 및 센서를 포함하는 누설 모드 장치의 분석 및 실험이 집중 조명되어 지고 있다^[1].

실제 광학 유전체 필터, 편광기, 빔 샘플러 및 기타 주파수 선택 소자를 사용한 최근의 응용은 Wood^[2]가 금속 격자에서 처음 발견 한 비정상적인 효과에 대한 새로운 해석에서 출발한 것이다^[3, 4]. 이러한 효과는 좁은 주파수 대역에서 회절된 스펙트럼에서 관찰되어 왔으며, 매우 강한 산란 특성을 발생하는 격자 구조에 의존하는 누설 파(leaky wave)와 관련된다. 이를 GMR 현상이라 부른다. Hessel과 Oliner는 이러한 이형 특성(anomalies)을 처음으로 일관되게 해석한 논문을 제시하였다^[5]. 본 논문에서는 Wood의 비정상적인 효과에 의존하는 격자구조의 GMR 현상을 평가하고 공진/산란 성질을 결정하는 누설 파 현상을 새로운 시각에서 살펴본다. 특히 정확한 등가 전송선로 해석법(RETT)^[6]을 사용하여 유전체 격자로 구성된 주기적인 전송로의 내/외부에서 발생하는 광학적 특성을 분석하였다. 분석된 모드들은 양방향 및 반대 방향으로 발생하는 흥미로운 모양을 나타냈으며, GMR 현상에 기인한 누설 모드의 모양과 일치함을 보여 주었다. 이를 바탕으로 Wood의 예외적인 강제 공진이론을 확인하였다. 또한 이러한 특성을 적절한 관점에서 설명하기 위하여 다양한 파장 또는 입사각이 매개 변수로 사용되었을 때 GMR의 예를 제시하고 이러한 두 가지 유형의 변화가 상호 유사한 효과를 나타냄을 보여주었다.

II. 격자구조의 분산특성

산란 모드와 유전체 격자에 의해 유도된 모드 사이의

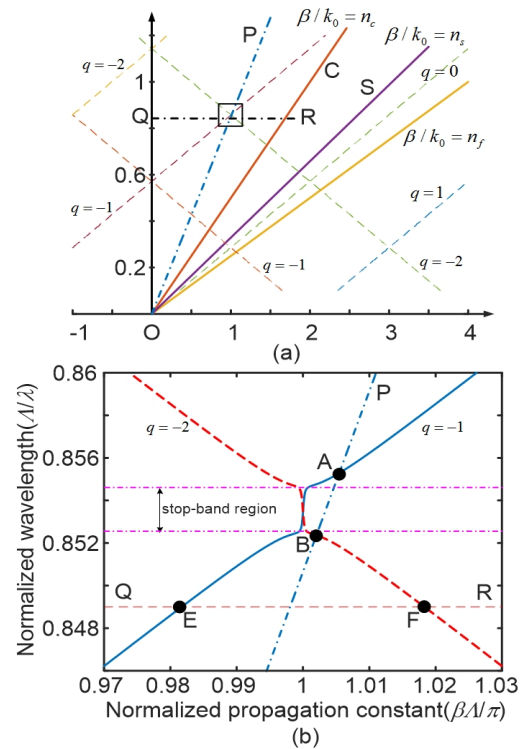


그림 2. 그림 1에서 격자구조에 의하여 전송되는 모드들의 분산곡선: (a) 비주기적인 기본 구조의 표면파 모드에 대한 큰 규모의 다이어그램, (b) 동작선 OP와 QR 사이 교차점 주변의 직사각형 영역에 대한 세부도.

Fig. 2. Dispersion curves for modes guided by the grating configuration in Fig. 1: (a) large-scale diagram for surface-wave mode of nonperiodic basic structure, (b) details of rectangular region around intersection1 between operating lines OP and QR.

관계를 탐구하기 위하여, 그림 1에서 보듯이 매우 두꺼운 기판과 cover 영역 사이에 위치하는 주기 A의 전형적인 적층 구조를 고려하였다. 고려된 다층 격자구조는 $n_{p1} = 2.0$, $n_{p2} = \sqrt{3.61}$ 의 격자로 구성된 두께 $t_g = 0.15 \mu\text{m}$ 의 격자 층과 $n_f = 2.0$, $n_s = \sqrt{2.31}$ 의 굴절률을 갖는 두께 $t_f = 0.05 \mu\text{m}$ 의 film 층과 기판으로 구성되었다. 또한, 격자주기는 $\Lambda = 0.39 \mu\text{m}$ 로 aspect ratio는 $d_1/\Lambda = 0.6$ 으로 선택하였다. 수치해석의 단순화를 위하여 단일 균일 film과 직사각형 격자로 구성된 2 차원 격자구조에서 TM 모드가 입사하는 경우로 제한하였다.

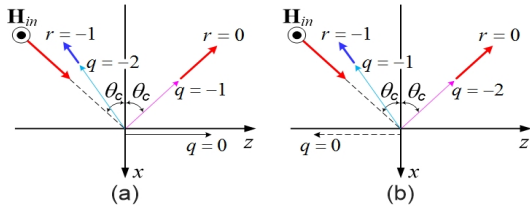


그림 3. 발생 가능한 평면파의 입사도: (a) +z 방향으로 전파하는 누설파의 공간 고조파 $q=-1$ 에 대한 위상 정합도, (b) -z 방향으로 전파하는 누설파의 공간 고조파 $q=-2$ 에 대한 위상정합도.

Fig. 3. Possible plane-wave incidence situations: (a) phase matching to $q=-1$ harmonic of leaky wave progressing along +z, (b) phase matching to $q=-2$ harmonic of leaky wave progressing along -z.

만일 주기성이 없는 경우, 예를 들어, 격자 층이 평균 굴절률 $n_p = \sqrt{(n_{p1}^2 d_1 + n_{p2}^2 d_2) / \Lambda}$ 의 균일 한 매체로 대체되면, 그 전송구조는 $k_{z,sw} = \beta_{sw} + i\alpha_{sw}$ 의 전파상수에 의존하여 변하는 표면파(surface wave) 형태의 모드를 전송한다. 그림 1에 보여준 구조의 경우, 비 주기적 구조에 대한 기본 모드의 분산 곡선(Λ/λ 대 $\beta_{sw}\Lambda/\pi$)은 그림 2에서 점선($q=0$)으로 도시하였다. 여기서, λ 는 동작파장을 나타낸다. 주기성이 없는 전송구조에서는 오직 기본 모드만이 고려되며 고차원 모드들의 존재 가능성은 무시한다.

그러나 주기성이 도입되면 표면파 모드는 Floquet 모드들이 나타나는 형태로 변한다. 즉, 전파상수는 아래와 같은 수식으로 표현된다.

$$k_{z,q} = \left(\beta_0 + \frac{2q\pi}{\Lambda} \right) + i\alpha \quad (1)$$

그때 $q=0$ 표면파 곡선은 Brillouin 다이어그램의 가지로 확장되며, 그림 2에 양(+)의 기울기를 갖는 점선으로 도시된 바와 같이 격자 형태의 순방향(+z)을 따라 전파되는 모드의 공간 고조파(space harmonics)를 발생시킨다($q=\pm 1, \pm 2, \dots$). 또한 동일한 특성의 공간 고조파들이 역방향(-z)으로 전파하는 모드에서도 발생하며 그림 2에 음(-)의 기울기를 갖는 점선으로 도시하였다. 그때 양/음의 기울기를 갖는 점선 사이의 교차점에서는 누설 파 형태의 stop-band가 생성된다. 이러한 stop-band는 그림 2 (a)에서 확인할 수 없을 정도로 매우 좁은 대역을 갖기 때문에 이 부분을 확대하여 그림 2 (b)에 개별적으로 도시하였다.

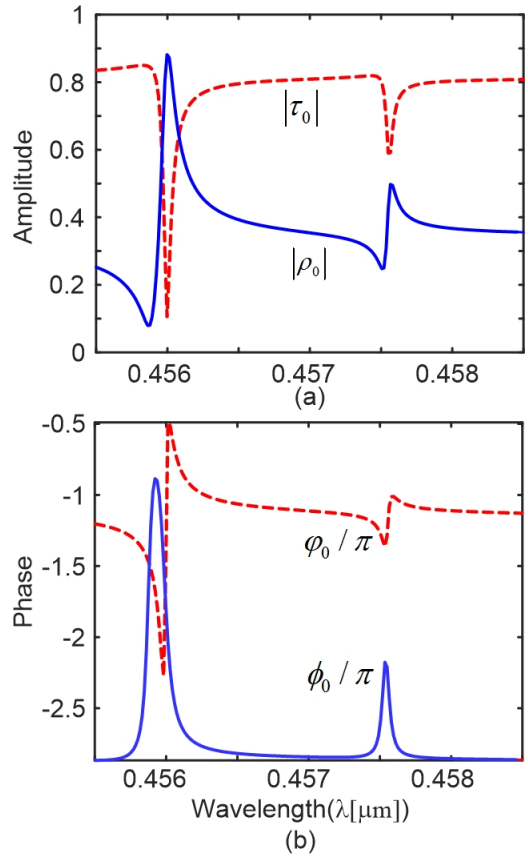


그림 4. $\theta_c=36^\circ$ 에서 그림 1처럼 입사된 기본 모드에 대한 반사율과 투과율의 변화도.

Fig. 4. Variation of reflection and transmission for fundamental mode incident as in Fig. 1 with $\theta_c=36^\circ$.

주기성에 기인하여 생성된 한정된 수의 고조파는 전송구조에서 대각선으로 유전체 격자를 따라 전파 될 수 있으며, 일반적으로 누설 파 (방사 파) 유형을 나타낸다.

지금부터 그림 1과 같이 격자에 각도 θ_c 의 평면파가 입사한다고 가정하자. 만일 입사된 TM 모드가

$$\beta_{c0} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) n_c \sin(\theta_c) \quad (2)$$

와 같은 전파상수에 의존하여 변한다면, 격자 층은 입사 모드를 산란시켜 아래와 같은 전파상수를 갖는 회절 성분의 모드들을 생성한다.

$$\beta_{cr} = \beta_{c0} + \frac{2r\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

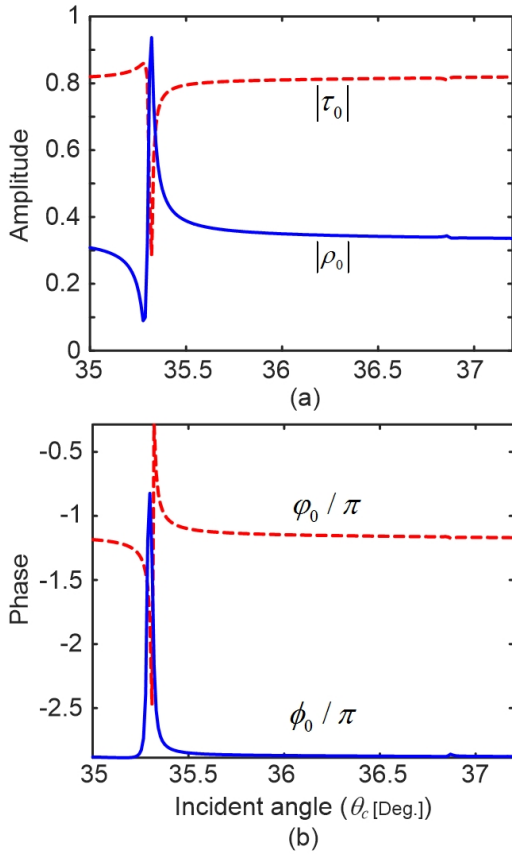


그림 5. $\lambda = 0.4594 \mu\text{m}$ 에서 그림 1처럼 입사된 기본 모드에 대한 반사율과 투과율의 변화도.

Fig. 5. Variation of reflection and transmission for fundamental mode incident as in Fig. 1 with $\lambda = 0.4594 \mu\text{m}$.

만일 λ 가 변하면, 식 (2)의 β_{c0} 는 파장에 따라 변하며 그림 2(a)에서 보듯이 dash-dotted line(선 OP)으로 나타내어진다. 이 선의 기울기는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\beta_{c0}\Lambda/\pi}{\Lambda/\lambda} = 2n_c \sin(\theta_c) \quad (4)$$

그러므로 θ_c 가 0부터 $\pi/2$ 까지 변할 때, 선 OP는 세로 좌표 $\Lambda/\lambda(\theta_c=0)$ 에서 cover 층의 cutoff인 실선 OC ($\theta_c = \pi/2$ 인 경우) 사이에서 회전한다. 고정된 λ 에 대하여 θ_c 를 변화시키면 식 (2)과 (4)는 그림 2(a)의 dash-dotted line QR로 나타낼 수 있으며, 이 수평선은 선 OQ($\theta_c=0$)와 OC($\theta_c=\pi/2$) 사이에서 정의되어진다. 그림 2(b)에서 보듯이, 선 OP는 점 A에서 $q=-1$ 에 대한 순방향(solid-line) 고조파 곡선과 점 B에서 $q=-2$

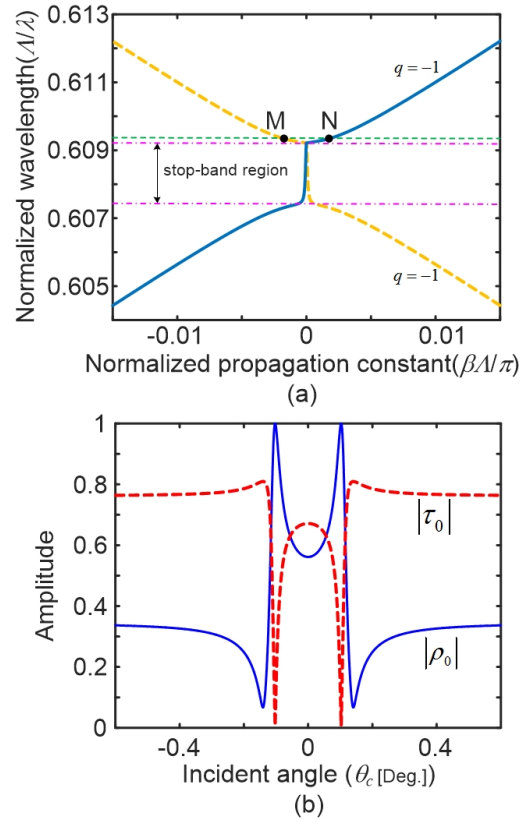


그림 6. 반사 표면에 직각에 근사하게 입사된 경우의 특성:

(a) $q=-1$ 곡선 사이 교차점 근처에서의 분산곡선, (b) $\lambda = 0.64225 \mu\text{m}$ 에서 그림 1처럼 입사된 기본 모드에 대한 반사율과 투과율의 변화도.

Fig. 6. Behavior around normal incidence for reflected surface: (a) dispersion curves in the vicinity of intersection between $q=-1$ curves, (b) variation of reflection and transmission for fundamental mode incident as in Fig. 1 with $\lambda = 0.64225 \mu\text{m}$.

에 대한 역방향(dashed-line) 고조파 곡선과 교차한다. 또한, 선 QR은 점 E와 F에서 각각 이들 곡선과 교차한다. 이러한 교차점에서, 입사 평면파의 회절 차수는 각각 $+z$ 또는 $-z$ 를 따라 전파하는 누설 파의 공간 고조파와 위상 정합된다. 그림 3에서 보듯이, 입사파에 대한 $r=0$ order의 반사파가 누설 파의 기본 고조파인 $q=0$ 와 동일하거나 반대 방향으로 전파하는지 여부에 따라 두 가지 상황이 발생할 수 있다. 그림 3(a)는 $r=0$ order의 반사파가 순방향($+z$)을 따라 진행되는 누설 파의 $q=-1$ 고조파와 정렬되어 있음을 보여 주고 있으며, 그림 3(b)는 $r=0$ 가 역방향($-z$)을 따라 진행되는 누설 파의 $q=-2$

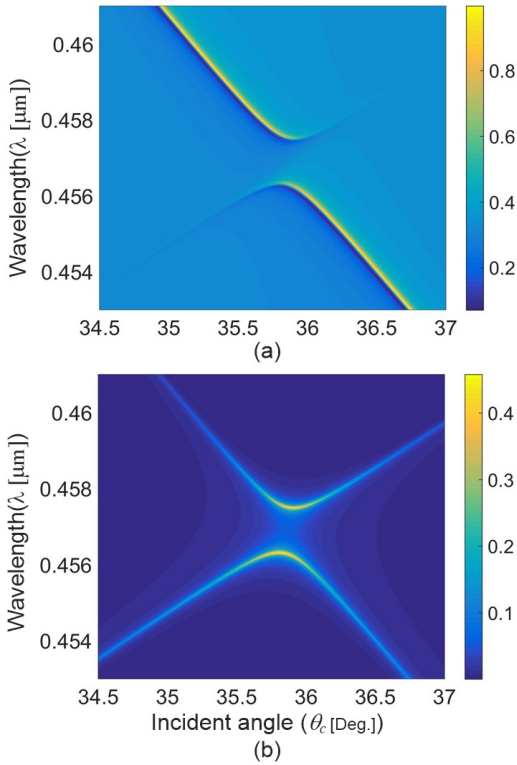


그림 7. 회절 차수 (a) $r=0$, (b) $r=-1$ 에 대한 공진 조건을 만족하는 TM 모드의 반사율 분포도.

Fig. 7. (Color Online) Reflection contour satisfying resonance scattering conditions of TM mode for diffracted order (a) $r=0$ and (b) $r=-1$.

고조파와 정렬되어 있음을 보여 준다. 이 두 가지 상황은 입사파와 격자 구조 사이의 양방향(co-directional) 또는 반대 방향(contra-directional) 상호 작용으로 각각 구별하여 표현된다.

λ 와 θ_c 가 그림 3에서 설명한 위상 정합 근처에서 변할 때, 입사파와 격자 구조 사이의 상호 작용은 반사(cover) 및 투과(substrate) 영역에서 발생하는 아래와 같은 회절 차수의 진폭에 크고 급격한 변화를 일으킨다.

$$\rho_r = |\rho_r| e^{i\phi_r}, \quad \tau_r = |\tau_r| e^{i\psi_r} \quad (5)$$

이러한 효과를 누설 파 형태의 우드의 이형(Wood anomalies)라고 하며, 그 전형적인 특성이 그림 4에 도시되어 있다. 유사하지만 약한 Wood의 이형(Rayleigh 유형으로 알려짐)은 다른 조건에서 발생하지만 그 중요성은 적으며 자세한 내용은 참고문헌 [7]에 자세하게 설명되어 있다.

III. 격자구조의 GMR 현상 분석

$\theta_c = 36^\circ$ 에서 파장 λ 의 변화에 따른 GMR 현상(Wood의 이형 현상)을 RETT를 사용하여 수치 해석한 그림이 그림 4에 도시되어 있다. 그림에서 보듯이, TM 모드가 cover 층으로부터 입사된 경우 $\lambda \approx 0.456 \mu\text{m}$ 와 $\lambda \approx 0.4576 \mu\text{m}$ 에서 GMR 현상이 발생함을 알 수 있으며, 이 현상은 그림 2(b)의 선 OP 상에 있는 교점 A와 B를 나타낸다. 또한, 이들 교차점에서 급격한 진폭의 변화(그림 4(a))와 함께 매우 큰 위상 천이(phase shift)가 발생(그림 4(b))하고 있음을 보여주고 있다. 비록 본 논문에서는 기본 회절 차수 $r=0$ 의 경우만 언급하였지만 1st 회절 차수인 $r=-1$ 에 대한 교차점 A와 B에서도 같은 GMR 현상이 나타났으나 그 영향은 매우 작았다.

다음으로, $\lambda = 0.4594 \mu\text{m}$ 에서 파장 θ_c 의 변화에 따른 GMR 현상을 분석하여 그림 5에 도시하였다. 그림에서 보듯이, 입사된 TM 모드는 $\theta_c \approx 35.31^\circ$ 와 36.86° 에서 GMR 현상을 나타냈으나 36.86° 에서의 변화는 무시할 정도로 매우 작았다. 이 현상은 그림 2(b)의 선 QR 상에 있는 교점 E와 F에서 발생한 공진 산란된 누설파의 정합특성을 나타내는 것이다.

같은 맥락으로, 수직에 가까운 각도로 입사된 TM 모드의 GMR 현상은 상당한 실질적인 관심을 가지며, 이 경우 해당 QR 라인의 작동 범위는 작은 영역 $\theta_c \approx 0^\circ$ 에 국한된다. 그때 GMR 현상은 그림 2(a)와 6(a)에서 도시한 것처럼 동일한 q 의 값을 갖는 순방향과 역방향 분산 라인들 사이의 수직축 Λ/λ 와 교차하는 점들에서 나타난다. 즉, $\Lambda/\lambda \approx 0.6, 1.14, \dots$ 근처에서 발생한다. 이와 같은 현상을 자세하게 분석하기 위하여 그림 6(a)에 $\Lambda/\lambda \approx 0.6$ 근처에서 발생하는 분산곡선을 도시하였다. Stop-band 근처(교차점 M과 N이 근사적으로 같은 값을 갖는 영역)의 $\lambda = 0.64225 \mu\text{m}$ 에서 파장 θ_c 의 변화에 따른 GMR 현상을 분석한 결과, 그림 6(b)에서 보듯이 GMR 현상은 $\theta_c = 0^\circ$ 에 대하여 대칭으로 나타났다. 이 동작은 필터 응용에 매우 유용하게 적용할 수 있는 특성이다.

마지막으로, 파장(λ)과 입사각(θ_c)의 변화에 따른 회절 차수 $r=0, -1$ 의 반사율 분포도를 분석하였다. 그림 7에서 보듯이, 반사율 피크 값(밝은 yellow color로 표

시)을 발생시키는 파장과 입사각에서 GMR이 발생한다. 더욱이, non-Bragg 공진 영역이 $\lambda = 0.4564 \mu\text{m}$ 와 $0.4575 \mu\text{m}$ 사이에서 발생함을 보여주고 있으며, 이 영역의 상/하 가장자리에서 발생하는 GMR은 넓은 대역의 입사각에 대하여 일어남을 보여주고 있다.

IV. 결 론

RETT를 사용하여 공진 산란 효과 (Wood의 이형 현상)에 특히 중점을 두고, 전형적인 유전체 격자에 의하여 산란된 평면파의 GMR 현상을 분석하였다. 분석 결과, 누설 파의 공간 고조파와 위상 정합되는 회절 차수에서 Wood의 이형 현상(GMR 현상)에 기인한 강제 공진이론을 확인하였다. 또한 다양한 파장 또는 입사각이 매개 변수로 사용되었을 때 GMR 현상의 예를 제시하고 이러한 두 가지 유형의 변화가 상호 유사한 효과를 나타냄을 자세하게 설명하고 그림으로 보여주었다.

References

[1] R. Magnusson, Y. Ding, K. J. Lee, D. Shin, P. S. Priambodo, P. P. Young, and T. A. Maldonado, "Photonic devices enabled by waveguide-mode resonance effects in periodically modulated films," *Proc. SPIE*, Vol. 5225, pp. 20-34, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.504425>

[2] R. W. Wood, "On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum," *Philos. Mag.*, Vol. 4, pp. 396 - 402, 1902.
DOI: <https://doi.org/10.1080/14786440209462857>

[3] R. Magnusson and S. S. Wang, "Transmission bandpass guided-mode resonance filters," *Appl. Opt.*, Vol. 34, pp. 8106 - 8109, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.34.008106>

[4] S. Peng and G. M. Morris, "Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-

relief gratings," *J.Opt. Soc. Am. A*, Vol. 12, pp. 1087 - 1096, 1995.

DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001087>

[5] A. Hessel and A. A. Oliner, "A new theory of Wood's anomalies on optical gratings," *Appl. Opt.*, Vol. 4, pp. 1275 - 1297, 1965.
DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.4.001275>

[6] K. C. Ho, "Diffraction Analysis of Multi-layered Grating Structures using Rigorous Equivalent Transmission-Line Theory," *The J. of IIBC*, Vol. 15, No. 1, pp. 261-267, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.1.261>

[7] T. Tamir and S. Zhang, "Modal transmission-line theory of multilayered grating structures," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, pp. 914 - 927, 1996.
DOI: <https://doi.org/10.1109/50.495177>

저자 소개

호 광 춘(종신회원)

- 제 10권 1호 참조
 - 현 한성대학교 전자정보공학과 교수
- <주관심분야 : Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Optical Biosensors and Bioelectronics>

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.