

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.3.209>

IIBC 2017-3-26

## 비대칭 다층 유전체 격자구조에 의한 GMR 현상의 분석

### Analysis of GMR Phenomenon by Asymmetric Multi-layered Dielectric Gratings

호광춘\*

Kwang-Chun Ho \*

**요약** 비대칭 다층 유전체 격자구조에 입사된 평면파는 대칭 격자구조와 같이 공간 고조파들을 생성한다. 이 성분들 중에 특정 공간 고조파는 GMR 특성으로 알려진 강한 공진 산란 변화를 겪는다. 본 논문에서는 이러한 효과를 명확히 분석하기 위하여 고유치 문제에 기인한 정확한 등가전송선로 이론(RETT)을 사용하여 격자 영역 내부의 공진현상과 분산특성을 분석하였다. 그 결과, 산란 공진의 peak에서 격자구조에 의하여 발생한 반사 모드와 격자구조에서 전송되는 누설 모드가 거의 일치한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 누설파의 자유 공명 특성과 관련된 GMR 효과가 비대칭 다층 유전체 격자구조에서도 발생한다는 것을 확인하고 일반화하였다. 전형적인 격자의 공진특성을 보여주는 정량적인 수치해석 결과가 주어졌으며 TE, TM 모드가 반사면에 수직 입사된 특수한 경우도 논의하였다.

**Abstract** A plane-wave incident upon asymmetric multi-layered dielectric grating as well as symmetric grating structure generates space harmonics. Selected space harmonics among those harmonics can undergo strong resonance scattering variations known as GMR(guided-mode resonance). In this paper, to clarify these effects, the field propagation and dispersion curve inside the grating region are analyzed by using a rigorous equivalent transmission-line theory(RETT) based on eigenvalue problem. 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, it confirms to be occurred GMR effect associated with the free-resonant character of leaky waves at asymmetric 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 TE and TM modes.

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

## 1. 서론

다층 유전체 격자구조에서 발생하는 GMR 특성에 대한 연구는 그러한 구조에서 고유한 필터링 능력이 있음을 보여 주고 있다<sup>1), 2)</sup>. 이 새로운 유형의 광학 필터는 도

파관 특성 및 반사 방지 (AR) 박막 특성을 갖는 주기 구조에 의한 회절 원리가 결합되어 원하는 파장에서 100 % 반사율을 갖는 필터를 설계할 수 있게 한다. 다층 유전체 격자 파라미터의 적절한 선택은 넓은 주파수 범위에 걸쳐 확장된 낮은 대칭 sideband를 갖는 협대역 또는 광대

\*종신회원, 한성대학교 전자정보공학과  
접수일자: 2017년 2월 7일, 수정완료: 2017년 5월 17일  
게재확정일자: 2017년 6월 9일

Received: 7 February, 2017 / Revised: 17 May, 2017 /

Accepted: 9 June, 2017

\*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr

Dept. of Electronic & Information Eng., Hansung University, Korea

역 반사 필터를 제작할 수 있게 하여 준다. 이와 같은 노력이 Gale et al.<sup>[3]</sup>와 Peng과 Morris<sup>[4]</sup>에 의해 광학 영역에서, Meriakri et al.<sup>[5]</sup>에 의해 밀리미터 파 영역에서 그리고 Magnusson et al.<sup>[6]</sup>에 의해 마이크로파 영역에서 실험적으로 수행되어 왔으며, 그 결과들은 GMR 필터 설계에 사용된 이론적인 모델의 타당성을 입증하였다.

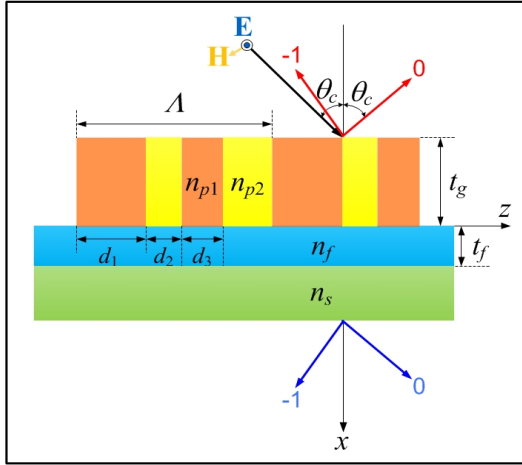


그림 1. 비대칭 다층 유전체 격자구조에서 상층으로부터 입사되는 평면파의 구성도.

Fig. 1. Schematic configuration of plane-wave incidence in the cover region of asymmetric multi-layered dielectric grating.

실제 다층 유전체 격자구조로 설계한 필터 소자의 최근 응용은 Wood<sup>[7]</sup>가 금속 격자에서 처음 발견 한 이형 특성(anomalies)에 대한 새로운 해석에서 출발한 것이다. 이러한 효과는 좁은 주파수 대역에서 회절된 스펙트럼에서 관찰되어 왔으며, 매우 강한 산란 특성을 발생하는 격자 구조에 의존하는 누설 파(leaky wave)와 관련되어 있다. 이를 GMR 현상이라 명명하여 왔다.

본 논문에서는 비대칭도 다층 유전체 격자구조에서 발생하는 GMR 현상에 기인한 새로운 반사필터의 설계 특성을 제시하고, 공진/산란 성질을 결정하는 TE, TM 모드들의 누설 파 현상을 새로운 시각에서 관찰하였다. 특히 고유치 문제에 기인한 정확한 등가 전송선로 해석법(RETT)<sup>[8]</sup>을 사용하여 비대칭 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. 또한 이

러한 특성을 적절한 관점에서 설명하기 위하여 과장에 따른 입사된 평면파의 종방향 필드분포를 도시하고 분석하였다.

## II. 비대칭 격자구조의 분산특성

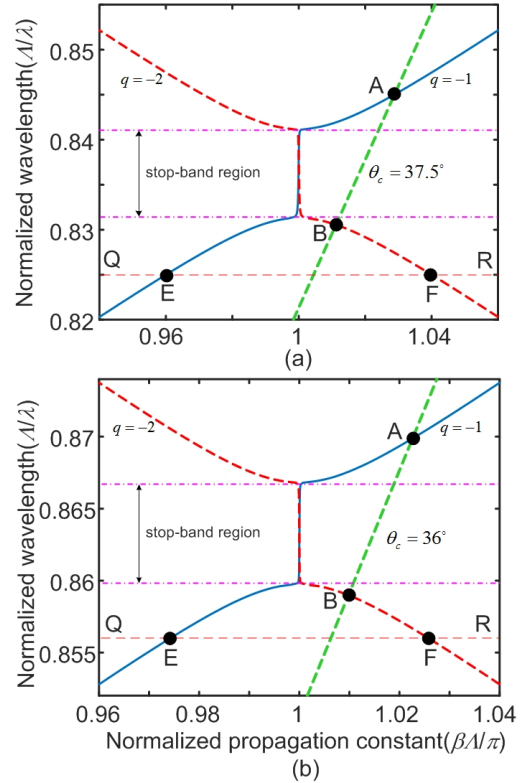


그림 2. 그림 1에서 비주기적인 격자구조에 의하여 전송되는 모드들의 분산곡선: (a) TE 모드, (b) TM 모드.

Fig. 2. Dispersion curves for modes guided by asymmetric grating configuration in Fig. 1: (a) TE mode, and (b) TM mode.

비대칭 다층 유전체 격자구조의 산란 모드와 유전체 격자에 의해 유도된 모드 사이의 관계를 탐구하기 위하여, 그림 1에서 보듯이 매우 두꺼운 기판과 cover 영역 사이에 위치하는 주기 Λ의 전형적인 비대칭 격자구조를 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 각각  $F_1 = 0.01$ ,  $F_2 = 0.25$ ,  $F_3 = 0.15$  로 선택하였다. 여기서,  $F_i = d_i/\Lambda$  이다. 수치해석의 단순화를 위하여 단일 균일 film과 직사각형 격자로 구성된 2 차원 격자구조에서 TE 또는 TM 모드가 입사하는 경우로 제한하였다.

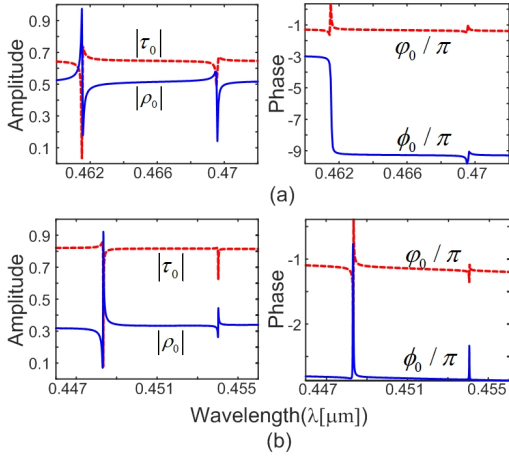


그림 3. 파장에 따른 기본 모드의 반사율과 투과율 변화도:  
 (a) TE 모드, (b) TM 모드  
 Fig. 3. Variation of reflection and transmission for fundamental mode incident along wavelength:  
 (a) TE mode, and (b) TM mode.

만일 주기성이 없는 경우, 즉 격자 층이 아래와 같은 평균 굴절률로 대체되는 경우,

$$n_p = \sqrt{n_{p1}^2 (F_1 + F_3) + n_{p2}^2 [1 - (F_1 + F_3)]} \quad (1)$$

그 전송구조는  $k_{z,sw} = \beta_{sw} + i\alpha_{sw}$  의 전파상수에 의존하여 변하는 표면파(surface wave) 형태의 모드를 전송한다. 그러므로 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.

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

그때 표면파 곡선은 Brillouin 다이어그램의 branch로 확장되며, 그림 2에 도시된 바와 같이 순방향(+z)과 역

방향(-z)을 따라 전파되는 모드의 공간 고조파(space harmonics)를 발생 시킨다( $q = \pm 1, \pm 2, \dots$ ). 그때 양/음의 기울기를 갖는 선들 사이의 교차점에서는 누설 파 형태의 stop-band가 생성되며, 이러한 stop-band는 매우 좁은 협대역의 특성을 갖는다. 그림 2에서 보듯이, TE와 TM 모드의 경우 각각  $\Delta(A/\lambda) \approx 0.09$ 와  $\Delta(A/\lambda) \approx 0.07$ 로 나타났다.

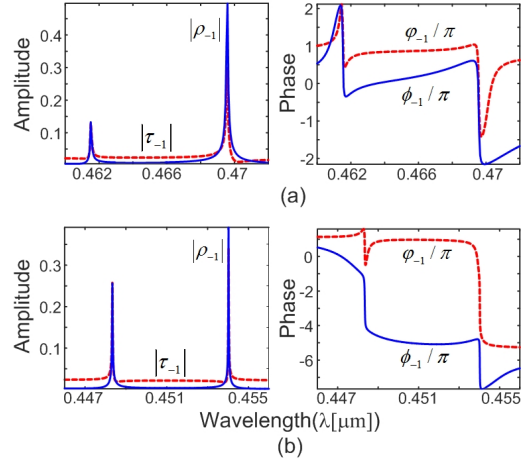


그림 4. 파장에 따른 1st 고차 모드의 반사율과 투과율 변화도: (a) TE 모드, (b) TM 모드  
 Fig. 4. Variation of reflection and transmission for 1st higher-order mode incident along wavelength: (a) TE mode, and (b) TM mode.

지금부터 그림 1과 같이 격자에 각도  $\theta_c$ 의 평면파가 입사한다고 가정하자. 만일 입사된 모드가

$$\beta_{c0} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) n_c \sin(\theta_c) \quad (3)$$

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

$$\beta_{cr} = \beta_{c0} + \frac{2r\pi}{\Lambda} \quad (4)$$

만일 고정된  $\theta_c$ 에 대하여  $\lambda$ 가 변하면, 식 (3)의  $\beta_{c0}$ 는 파장에 따라 변하며 그림 2에서 보듯이 비대칭 다층 유전체 격자구조에서 전파하는 공간 고조파 곡선과 두 점 A, B에서 교차한다. 이 선의 기울기는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\beta_{c0}\Lambda/\pi}{\Lambda/\lambda} = 2n_c \sin(\theta_c) \quad (5)$$

그러므로  $\theta_c$ 가 0부터  $\pi/2$ 까지 변할 때, 이 점선은 세로 좌표  $\Lambda/\lambda(\theta_c=0)$ 에서 cover 층의 cutoff 기준선 ( $\theta_c = \pi/2$ 인 경우) 사이에서 회전한다. 같은 개념으로, 고정된  $\lambda$ 에 대하여  $\theta_c$ 를 변화시키면 식 (3)과 (5)는 그림 2의 수평선 QR로 나타낼 수 있으며, 이 수평선도 특정한 입사각  $\theta_c$ 에서 공간 고조파 곡선과 두 점 E, F에서 교차한다. 이러한 교차점에서, 입사 평면과의 회절 차수는 각각  $+z$  또는  $-z$ 를 따라 전파하는 누설 파의 공간 고조파와 위상 정합하며 GMR 현상을 발생시킨다.

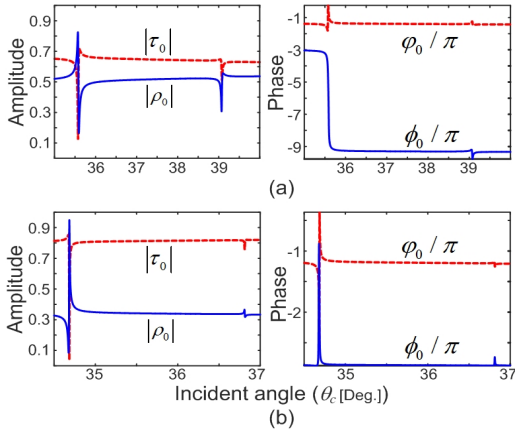


그림 5. 입사각에 따른 기본 모드의 반사율과 투과율 변화도: (a) TE 모드, (b) TM 모드  
Fig. 5. Variation of reflection and transmission for fundamental mode incident along incident angle: (a) TE mode, and (b) TM mode.

그림에서 보듯이,  $\lambda$ 가 변할 때 TE 모드의 경우  $\theta_c = 37.5^\circ$  일 때  $\Lambda/\lambda = 0.8305$  (point B)와  $\Lambda/\lambda = 0.845$  (point A)에서, TM 모드의 경우  $\theta_c = 36^\circ$  일 때  $\Lambda/\lambda = 0.859$  (point B)와  $\Lambda/\lambda = 0.87$  (point A)에서 GMR 현상이 나타났다. 또한,  $\theta_c$ 가 변할 때 TE 모드의 경우  $(\Lambda/\lambda, \beta_{c0}\Lambda/\pi) = (0.825, 0.96)$  (point E)와  $(\Lambda/\lambda, \beta_{c0}\Lambda/\pi) = (0.825, 1.04)$  (point F)에서, TM 모드의 경우  $(\Lambda/\lambda, \beta_{c0}\Lambda/\pi) = (0.856, 0.9742)$  (point E)와  $(\Lambda/\lambda, \beta_{c0}\Lambda/\pi) = (0.856, 1.0258)$  (point F)에서 GMR 현상이 나타남을 보였다. 이러한 교차점들에서 발생하는 GMR 현상의 수치 해석한 결과를 다음 장에 자세하게 설

명하였다.

결국,  $\lambda$ 와  $\theta_c$ 가 그림 2에서 설명한 위상 정합 근처에서 변할 때, 입사파와 격자 구조 사이의 상호 작용은 반사 (cover) 및 투과(substrate) 영역에서 발생하는 아래와 같은 회절 차수의 진폭에 급격한 변화를 일으킨다.

$$\rho_r = |\rho_r|e^{i\phi_r}, \quad \tau_r = |\tau_r|e^{i\phi_r} \quad (6)$$

이러한 효과를 누설 파 형태의 GMR 현상이라 한다.

### III. 비대칭 격자구조의 GMR 현상

비대칭 다층 유전체 격자구조에 입사된 TE, TM 모드에 대한 파장  $\lambda$ 의 변화에 따른 GMR 현상(Wood의 이행 현상)을 고유치 문제에 기초한 RETT를 사용하여 수치 해석한 그림이 그림 3에 도시되어 있다.

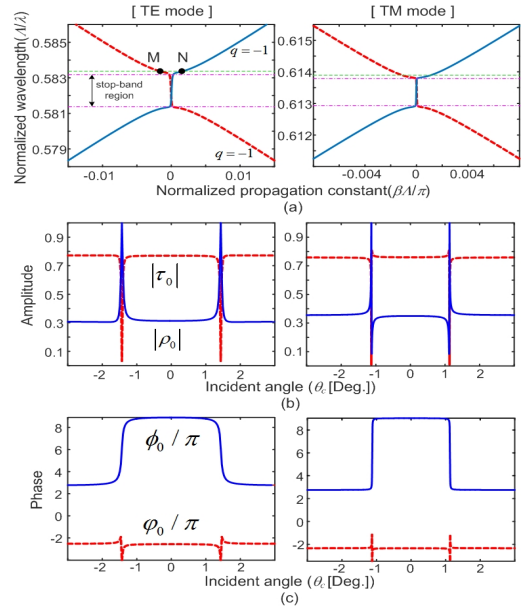


그림 6. 반사 표면에 대하여 직각에 근사하게 입사된 경우의 특성: (a) 분산곡선, (b) 입사각에 따른 기본 모드의 반사율과 투과율 크기 변화도, (c) 위상 변화도.  
Fig. 6. Behavior around normal incidence for reflected surface: (a) dispersion curves, (b) amplitude variation, and (c) phase variation of reflection and transmission for fundamental mode incident along incident angle.

그림에서 보듯이, TE 모드가  $\theta_c = 37.5^\circ$ 의 각도로 cover 층에서 입사된 경우  $\lambda \approx 0.4615 \mu\text{m}$  (point A)와  $\lambda \approx 0.4696 \mu\text{m}$  (point B)에서 GMR 현상이 발생하였으며, TM 모드가  $\theta_c = 36^\circ$ 의 각도로 입사된 경우에는  $\lambda \approx 0.4483 \mu\text{m}$  (point A)와  $\lambda \approx 0.454 \mu\text{m}$  (point B)에서 GMR 현상이 발생함을 보였다. 즉, 이들 교차점에서 기본 회절 차수  $r = 0$ 의 반사파가 급격한 진폭의 변화와 함께 매우 큰 위상 천이(phase shift)가 발생하고 있음을 잘 보여주고 있다.

또한, 그림 4에서 보듯이 1st 회절 차수인  $r = -1$ 에 대한 교차점 A와 B에서도 같은 GMR 현상이 나타났으나 그 영향은 매우 작았다. 이와 같은 특성은 1st 회절 차수( $r = -1$ )의 반사율이 기본 회절 차수( $r = 0$ )의 반사율에 비하여 현저하게 낮기 때문에 발생하는 현상으로 분석할 수 있다.

다음으로, TE 모드의 경우  $\lambda = 0.4727 \mu\text{m}$ 에서, TM 모드의 경우  $\lambda = 0.4556 \mu\text{m}$ 에서 파장  $\theta_c$ 의 변화에 따른 GMR 현상을 분석하여 그림 5에 도시하였다. 그림에서 보듯이, 입사된 TE 모드는  $\theta_c \approx 35.6^\circ$  (point E)와  $39^\circ$  (point F)에서 GMR 현상을 나타냈으며, TM 모드는  $\theta_c \approx 34.67^\circ$  (point E)와  $36.81^\circ$  (point F)에서 GMR 현상을 나타냈으나  $36.81^\circ$ 에서의 변화는 무시할 정도로 매우 작았다.

같은 맥락으로, 수직에 가까운 각도( $\theta_c \approx 0^\circ$ )로 입사된 TE, TM 모드의 GMR 현상을 분석하였으며, 이는 상당한 실질적인 관심을 가질 수 있다. 이 경우 해당 QR 라인의 동작 범위는 입사각이  $\theta_c \approx 0^\circ$ 에 가까운 영역에 국한된다. 그때 GMR 현상은 그림 6(a)에서 도시한 것처럼 동일한  $q$ 의 값을 갖는 순방향과 역방향 분산 라인들 사이의 수직축  $A/\lambda$ 와 교차하는 점(point M, N)들에서 나타난다. 즉, TE 모드의 경우  $(A/\lambda, \beta_{d0}A/\pi) = (0.5834, -1.86 \times 10^{-3})$  (point M)와  $(A/\lambda, \beta_{d0}A/\pi) = (0.5834, 1.86 \times 10^{-3})$  (point N)에서, TM 모드의 경우  $(A/\lambda, \beta_{d0}A/\pi) = (0.6139, -1.16 \times 10^{-3})$  (point M)와  $(A/\lambda, \beta_{d0}A/\pi) = (0.6139, 1.16 \times 10^{-3})$  (point N)에서 GMR 현상이 발생함을 보였다.

이와 같은 현상을 자세하게 분석하기 위하여 그림 6(b)에 TE 모드의 경우  $\lambda = 0.6684 \mu\text{m}$ 에서, TM 모드의 경우  $\lambda = 0.6354 \mu\text{m}$ 에서 파장  $\theta_c$ 의 변화에 따른

GMR 현상을 분석하였다. 그림 6(b)에서 보듯이 GMR 현상은  $\theta_c = 0^\circ$ 에 대하여 대칭으로 나타났다. 이 동작은 비대칭 다층 유전체 격자구조의 GMR 현상을 이용한 광학 필터 설계에 매우 유용하게 적용할 수 있다.

마지막으로, 그림 2의 point A와 B 근처에서 발생하는 필드분포를 분석하였다. TE, TM 모드의 종방향( $x$ -축) 필드분포를 파장의 변화에 따라 도시한 그림 7에서 보듯이, 그 전계와 자계의 크기는 point A와 B 근처의 파장에서 매우 크게 튀어 올랐다. 이와 같은 물리적 특성은 비대칭 다층 유전체 격자구조를 구성하는 격자 층에 매우 큰 에너지가 집약되어 있음을 잘 보여주는 현상이라 할 수 있다.

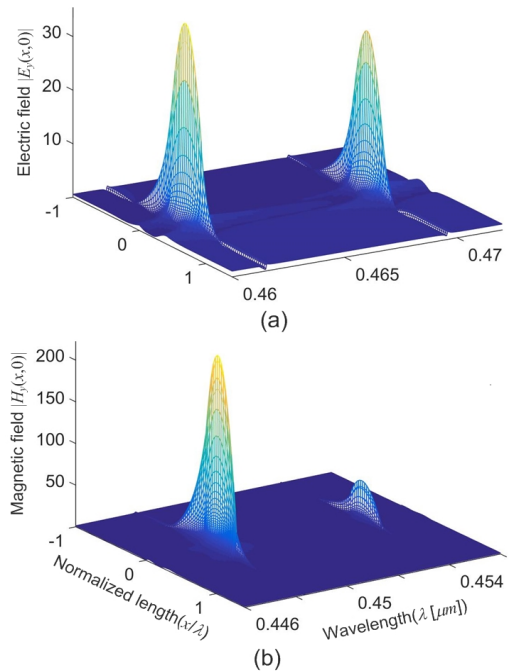


그림 7. 파장에 따른 입사된 평면파의 종방향 필드분포.:  
 Fig. 7. Transverse variation of field magnitude for plane-wave incidence along wavelength.

#### IV. 결론

비대칭 다층 유전체 격자구조에 입사된 TE, TM 모드에 의하여 산란된 평면파의 GMR 현상을 고유치 문제에 기초한 RETT를 사용하여 공진 산란 효과 (Wood의 이형 현상)에 특히 중점을 두고 분석하였다. 분석 결과, 누

설 파의 공간 고조파와 위상 정합되는 회절 차수에서 GMR 현상에 기인한 강제 공진 현상이 발생함을 확인하였다. 또한, 다양한 파장  $\lambda$  또는 입사각  $\theta_c$ 가 매개 변수로 사용되었을 때 GMR 현상이 발생함을 예시하고 이러한 두 가지 유형의 변화가 상호 유사한 효과를 나타냄을 자세하게 설명하고 그림으로 보여주었다. 더욱이, GMR 현상의 물리적 특성을 자세하게 관찰하기 위하여 GMR 현상이 발생하는 파장 근처에서 전계와 자계의 종방향 필드분포를 분석하였다.

## References

- [1] H. Bertoni, L. Cheo, and T. Tamir, "Frequency-selective reflection and transmission by a periodic dielectric layer," *IEEE Trans. Antennas Propag.* Vol. 37, pp. 78 - 83, 1989.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/8.192167>
- [2] 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>
- [3] M. T. Gale, K. Knop, and R. H. Morf, "Zero-order diffractive microstructures for security applications," *Proc. SPIE*, Vol. 1210, pp. 83 - 89, 1990.  
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.17917>
- [4] S. Peng and G. M. Morris, "Sub-nanometer linewidth resonant grating filters," in *Diffractive Optics and Micro-optics*, Vol. 5 of 1996 OSA Technical Digest Series, pp. 257 - 260, 1996.
- [5] V. V. Meriakri, I. P. Nikitin, and M. P. Parkhomenko "Frequency characteristics of metal-dielectric gratings," *Radiotekh. Elektron.* Vol. 4, pp. 604 - 611, 1992.
- [6] R. Magnusson, S. S. Wang, T. D. Black, and A. Sohn, "Resonance properties of dielectric waveguide gratings: theory and experiments at 4 - 18 GHz," *IEEE Trans. Antennas Propag.* Vol. 42, pp. 567 - 569, 1994.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/8.286232>
- [7] 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>
- [8] 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>

## 저자 소개

### 호 광 춘(중신회원)

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

※ 본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제입니다.