

유전체 격자구조에서 전자기파의 산란 해석

김민년, 채규수
 천안대학교 정보통신학부
 myki@cheonan.ac.kr

Analysis of Scattering of Electromagnetic Wave in Dielectric Periodic Media

Min-Nyun Kim, Gyoo-Soo Chae
 Division of information and communication
 Cheonan University

요약

본 논문에서는 격자구조의 유전체에 수직으로 입사된 전자기파의 산란, 투과 특성을 얇은 위상 막 근사화 이론을 이용하여 분석하였다. 위상 막 근사화 이론은 격자구조가 입사되는 전자기파의 위상 변화만을 주는 것으로 간주하는 것으로 이를 이용하여 격자구조를 통과한 직후인 근거리 필드 분포를 TE 모드에서 계산하였다. 기존의 제시된 이론에 비해 비교적 간단하고 빠르게 산란 필드를 분석할 수 있다.

1. 서론

일반적으로 비파괴적인 방법을 통해 매질의 구조 정보를 알아내기 위해서 전자기파의 산란분포를 분석하는 방법을 사용한다. 복잡하거나 주기를 갖지 않는 구조라도 여러 주기의 합으로 생각할 수 있고 그중에 가장 두드러진 주기가 산란된 파에 주된 영향을 준다. 본 논문에서는 비 주기구조의 산란 분포를 해석하기 위한 일환으로 먼저 주기를 갖는 구조인 격자구조를 해석하고자 한다[1].

격자구조를 갖는 유전체는 입사되는 전자기파를 일정한 방향이나 분포로 투과 또는 산란시킨다. 산란되는 전자기파의 분포, 방향, 크기 등은 널리 알려진 것과 같이 입사파의 주기와 격자의 구조파라미터인 주기, 높이, 유전율 등에 따라 달라진다[2].

본 논문에서는 수직으로 입사되는 전자기파를 가정하여 격자구조를 통과 시 크기의 감쇄는 무시하여 상변화만을 주는 것으로 가정하였다. 또한 격자구조는 구형파모양과 정현파모양을 가정하여 각각 산란 분포를 해석하였다.

2. 전자기파의 산란

얇은 위상막 근사화 방법은 격자층을 얇은 위상막으로 간주하여 입사되는 광파의 진폭은 감쇄되지 않고 위상의 분포에만 영향을 주는 것으로 가정하는 것이다[3][4]. 그림 1은 격자구조의 입사파, 투과파, 산란파를 보여주고 있다.

아래의 수식 (1)은 입사파가 가우스 분포를 갖을 때를 가정한 것이다.

$$E_i(x, y) = E_0 e^{-x^2/2w_x^2} e^{-y^2/2w_y^2} \quad (1)$$

여기서 w_x, w_y 는 각각 x, y 방향으로 가우시안 빔의 폭을 나타낸다.

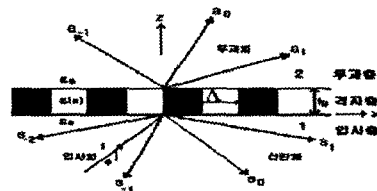


그림 1. 전자기파의 입사, 투과, 산란

위의 가정에 의하여 격자 층에 의해 인가되는 주기적인 위상분포는 수식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$e^{i\phi(x)} = \sum_{q=-\infty}^{\infty} b_q e^{\frac{j2\pi qx}{\Lambda}} \quad (2)$$

대부분의 경우 입사파의 범위가 위상마스크보다 크기 때문에 본 논문의 계산과정에서는 가우시안 빔을 평면파로 근사화한다.

따라서, 격자층을 통과한 직후의 전계의 분포는 수식 (4)과 같으며 이를 2-D 푸리에 변환한 것이 수식 (5)이다.

$$E_p(x, z) = \sum_q b_q e^{j\frac{2\pi qx}{\Lambda}} e^{jk_z z} \quad (3)$$

$$\text{단, } k_q = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{2\pi q}{\Lambda}\right)^2}$$

$$E_i(x, y) e^{i\phi(x)} = e^{-y^2/2w_0^2} \sum_q b_q e^{-x^2/2w_0^2} e^{j\frac{2\pi qx}{\Lambda}} \quad (4)$$

$$E_i(\xi_x, \xi_y) = \iint dx dy E_i(x, y) e^{j\xi_x x} e^{j\xi_y y} \\ = \sum_q b_q \iint E_i(x, y) e^{j\xi_x x} e^{j\xi_y y} \Big|_{z=z_0} \quad (5)$$

$E_i(\xi_x, \xi_y)$ 는 공간 주파수(spatial frequency)가 성분 (ξ_x, ξ_y) 인 크기를 뜻하며 $e^{j\xi_x x} e^{j\xi_y y}$ 는 $z=0$ 에서의 wavevector \vec{k} 가 (ξ_x, ξ_y, ξ_z) 인 평면파를 의미한다. 따라서, $z=z_0$ 까지 진행한 전자기파의 분포는 수식 (5)와 같이 표현 될 수 있다.

좀더 구체적으로 살펴보면 수식 (4)는 격자층 바로 하단에서 형성된 필드 분포로 이것을 수식 (5)는 푸리에 변화를 통해 공간적인 평면파로 분해한 것이다. 이렇게 하면 각 평면파가 격자층의 영향에 따른 위상 변화를 구할 수 있고 이를 $z=z_0$ 에서 그 합을 구하여 분포된 필드를 구할 수 있는 것이다.

본 이론의 장점은 격자층 으로부터 근거리에서도 별다른 근사 없이 필드 분포를 구할 수 있다는 점이다. 위식에서 적분식은 일반적인 격자의 경우 \int

를 \sum 로 바꾸어 계산하여야 FFT를 사용함으로써 계산 량을 줄일 수 있다.

다음은 각 계산을 격자구조가 구형과 모양과 정현파 모양으로 나누어 실행하였다. 일반적인 단일 격자구조는 두 모양의 중간상태에서 형성될 것으로 간

주할 수 있으며 각각의 결과로 산란/투과 분포의 추이를 알 수 있으리라 사료된다.

2.1 구형과 모양의 격자층의 산란

입사파는 그림 2와 같이 공간적으로 위상차이가 발생하여 변조된다. 격자구조를 갖고 있는 유전체는 투과된 전자기파의 분포가 일정한 주기(Λ_p)를 갖도록 한다.

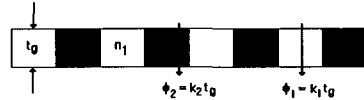


그림 2. 격자층에서 투과하는 영역에 다른 위상의 차이

격자층의 두께는 각 공간고조파의 파워분포에 결정적인 영향을 끼친다. 투과파의 분포를 적절히 파악하기 위해서는 격자층의 두께가 주는 위상차이가 π 의 정수배가 되도록 한다. 이때 dc에 해당하는 0번째 모드는 모두 상쇄되어 투과되는 파는 주로 ± 1 모드가 두드러져 격자구조가 갖고 있는 주기의 약 절반정도의 주기를 갖는 투과 분포를 형성하게 된다. 좀 더 구체적으로 격자층의 두께를 구하고자 그림 2와 같이 duty cycle이 50%인 직각모양의 격자의 경우 0번째 모드의 파워가 최소가 되도록 하고 위상차 π 의 정수배가 되도록 하여 굴절율이 n_1 의 영역(보통의 공기층)과 n_2 의 영역을 통과하는 빛이 서로 거의 상쇄되도록 한다.

$$(k_2 - k_1)t_g = m\pi \quad (6)$$

여기서 $k_1 = 2\pi n_1/\lambda$, $k_2 = 2\pi n_2/\lambda$ 이며 각각 n_1 인 매질과 n_2 인 매질에서 λ 의 파장을 가진 전자기파의 전파상수이다.

이식을 근거리 0 번째 모드의 파워를 최소화하는 t_g 를 구하면 아래 수식 (7)이 된다.

$$t_g = \frac{m\lambda}{2(n_2 - n_1)} \quad (7)$$

투과파가 발생하는 간섭패턴의 주기는 격자주기와 관계되며 공간상 변조되어 주기적인 패턴을 형성한다. 본 논문에서는 계산상의 편의성을 위해 격자구조와 관련된 모든 구조를 2차원으로 모델링을 하였고 따라서 $x-z$ 평면에서의 변화를 TE-모드에

서 다루었다.

2.2 정현파 모양의 격자층의 산란

격자층의 모양이 정현파 모양인 경우(그림3) 그 투과 파는 수식 4, 5의 적분식을 통해서 얻을 수 있다. 수식 5는 격자층을 투과 한 후 일정한 거리만큼 떨어져 있는 투과파의 필드 분포를 구할 수 있는 결과식인데 $J_g(m/2)$ 가 격자모양에 의한 것으로 $m/2$ 는 격자의 두께에 따라 달라진다. 여기서는 0번째 모드가 억제 되도록 두께를 정해야 하므로 $m/2 = 2.404$ 의 값을 갖도록 해야 한다. 이 값은 Bessel함수의 0번째 오더의 값이 최소로 작아진 값이다.

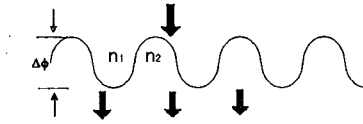


그림 3. 정현파 모양의 격자구조

3. 결론 및 토의

아래 그림 4는 구형파 모양의 격자 층을 통과한 후 변화 거리에 따라 나타나는 분포이다.

그림 5는 격자층이 정현파의 모양을 갖고 있는 경우에 거리에 따라 각각 나타나는 필드 패턴이다. 여기서 $\Delta\phi$ 은 격자층 두께가 주는 위상차이를 나타낸다.

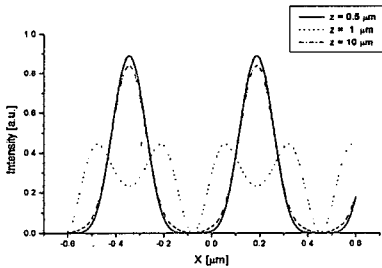


그림 4. 거리에 따른 투과파의 분포의 변화 ($\Delta\phi = \pi$)

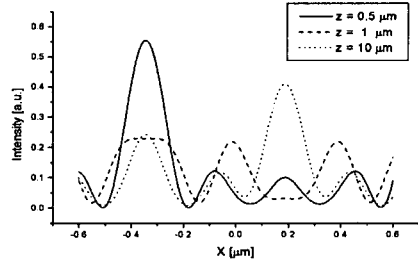


그림 5. 거리에 따른 투과파의 분포의 변화 ($\Delta\phi = \pi$)

그림 4, 5는 모두 입사되는 전자기파의 파장이 244 nm를 사용하였으며 격자의 주기는 약 1um를 사용하였다. 격자의 굴절율은 $n_1 = 1, n_2 = 1.5$ 인 경우를 사용하였다. 격자를 통과한 필드는 거리에 따라 일정하게 변하고 있으며 공간적 주기는 격자주기의 절반 정도이 굴절율과 ± 2 이상의 고조파의 영향으로 불규칙하게 특징을 나타내고 있다.

얇은 위상막 근사화 방법은 격자가 입사파의 위상 변화 만에 영향을 고려하여 계산하였기 때문에 원거리 필드를 계산하면 다소 오차가 발생할 수 있다. 그러나 격자층이 아주 얇거나 격자층 바로 하단의 필드는 이 방법을 사용하면 쉽게 구할 수 있다. 추후 격자구조의 분석에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1]. D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan, and A.E.White, "Production of n-fiber gratings using a diffractive optical element," *Electron. Lett.*, vol 29, no. 6, pp. 566-568, Mar., 1993.
- [2]. K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, "Bragg grating fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phask mask," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037, Mar., 1993.
- [3]. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th ed, Ch. 13, Cambridge University Press, 1999.
- [4]. J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," McGraw-Hill Books, 1996.