

Split-step angular spectrum 방법을 이용한 광전자 시스템 성능분석

신희영, 심형관, 유충현

* 청주대학교 전자공학과, ** 청주대학교 전정반공학부

Performance analysis of opto-electronic system using Split-step angular spectrum method

Shin, heui young* Sim, hyuong kwan** Yoo, chong hyun**

*Dept. Electronic Engineering, Chongju Univ.

** Dept. Electronic, Semiconductor, Computer & Communication Engineering, Chongju Univ.

Abstract - 광전자실험에 사용되고있는 수동 광학소자로는 lense, mirror, grating, prism, polarizer 등이 있다. 본 연구에서는 각 소자들에 대한 수학적 모델과 실질적 구조에 의한 수치 해석적 모델인 Split-step angular spectrum 방법을 구현하고 이를 이용한 실험적 결과를 이론치와 비교 분석하여 모델의 정확성을 분석하였다.

서 론

일반적으로 새로운 이론적 아이디어는 실험을 통하여 그 효용성을 검증한다. 실제적인 모델을 만들어 실험하는 것이 제일 설득력이 있는 검증 방법이나 경우에 따라서는 그 실험이 여의치 않는 경우가 많다. 설사 실험이 가능하더라도 하더라도 노력이나 비용이 막대하여 감당하기 어려운 경우가 있다. 특히 광전자시스템과 같이 고도의 정밀성과 정확도, 또는 이상적인 환경을 요하는 실험에서는 현재의 기술력의 한계로 실험자체가 불가능한 경우가 있다. 이때 유용하게 이용할 수 있는 것이 수치해석적 방법이다. 이러한 수치해석적 방법 중 광의 전파특성을 가장 잘 표현하여 실행시킬 수 있는 방법이 Split-step angular spectrum 방법이다. Split-step angular spectrum 방법은 평면파의 전파를 실제 실험과 같이 재현할 수 있는 방법으로, 그 원리는 다음과 같다. 일정한 형태를 갖는 평면파는 일반적으로 Fourier 분석이 가능하다. 이러한 공간 Fourier 성분들은 wave front에서 임의의 방향으로 진행하는 평면파의 성분으로 볼 수 있다. 이 Fourier 성분은 평면파의 진행에 따라 위상의 변화를 만들어 내고 그들의 합이 새로운 wave front를 형성한다. 이러한 이론을 바탕으로 파의 진행방향과 수직으로 얇은 위상 지연 평면을 설정하고 이 면에서 광학적 소자에 적용할 수 있는 위상의 변화를 유도하여 실제적인 소자의 특성을 수치 해석적으로 구현한다. 즉 렌즈의 경우 굴절률을 고려하여 각 위치에 따라 위상지연의 차를 들으로써 그 특성을 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 Split-step angular spectrum 방법을 유도함으로써 각 소자들이 수치 해석적으로 실제와 같이 동작할 수 있음을 보였다.

이 론

일반적인 homogeneous 2-D wave 방정식에 대하여

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - c_0^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

Gaussian 형태를 가진 CW연속파 Beam을 가정하면

$$U = \text{Re} \{ \Psi(x; z) \exp(j\omega_c t) \} \quad (2)$$

를 쓸 수 있다. 이때 파의 진행방향을 z축으로 한다. 이를 식(1)에 대입하여 정리하면 phase 방정식

$$-\omega_c^2 \Psi - c_0^2 \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) \approx 0 \quad (3)$$

을 얻는다.

여기서 평면파의 전파성분을 (k_x, k_z) 를 잡으면

$$\Psi = |\Psi| e^{-jk_x x - jk_z z} \quad (4)$$

가 되고, 이를 식(3)에 대입하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 즉,

$$-\omega_c^2 + c_0^2(k_x^2 + k_z^2) = 0 \quad (5)$$

또는

$$\frac{\omega_c^2}{c_0^2} = k_e^2 = k_x^2 + k_z^2 \quad (6)$$

한편 $z=0$ 에서 Beam profile에 대한 Angular spectrum은

$$A_o(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) e^{jk_x x} dx \quad (7)$$

이 되고, 이에 대한 역관계는

$$\Psi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_o(k_x) e^{-jk_x x} dk_x \quad (8)$$

이 된다. 또한 Beam이 임의의 위치 z에서의 spectrum $A(k_x; z)$ 를 갖는다면

$$\Psi(x; z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_o(k_x; z) e^{-jk_x x} dk_x \quad (9)$$

가 된다.

식(9)를 (3)에 대입하면 spectrum 전파 법칙에 관한식

$$\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \left(\frac{\omega_c^2}{c_0^2} - k_x^2 \right) A = 0 \quad (10)$$

을 얻는다.

식(10)의 해는

$$A(k_x; z) = A_o(k_x) e^{-j \left(\frac{\omega_c^2}{c_0^2} - k_x^2 \right)^{1/2} z} \quad (11)$$

또는

$$A(k_x; z) = A_0(k_x) e^{-j(k_x^2 - k_0^2)^{1/2} z} \quad (12)$$

여기서 $k_e = \frac{\omega}{c_0}$ 이다.

◎ Numerical Algorithm

Angular spectrum $A(k_x; z)$ 는 식(9)에서와 같이 $\Psi(x; z)$ 로부터 구할 수 있다. 여기서 z 축에 수직인 얇은 slice dz 를 생각하자. 이 얇은 slice은 phase filter로 Angular spectrum $A(k_x; z)$ 가 입사하여 $A(k_x; z + dz)$ 를 다음과 같이 형성한다.

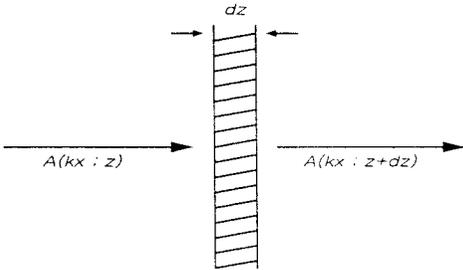


그림 1

즉, 식(12)에 의해

$$A(k_x; z + dz) = A(k_x; z) e^{-j(k_x^2 - k_0^2)^{1/2} dz} \quad (13)$$

가 되고, Paraxial 가정에 의하여 주 $k_x \ll k_0$ 이 되면 식(13)은

$$A(k_x; z + dz) = A(k_x; z) e^{-j k_x dz} e^{j \frac{k_x^2}{2k_0} dz} \quad (14)$$

가 된다. 여기서 첫 번째 exponential 항은 on-axis에 대한 phase 지연을 나타내고, 두 번째 exponential 항은 off-axis에 대한 phase 변화를 나타낸다.

식(14)에 의해

$$\Psi(x; z_0 + dz) = \frac{1}{2\pi} e^{-j k_x dz} \int_{-\infty}^{\infty} A(k_x; z) e^{j \frac{k_x^2}{2k_0} dz} e^{-j k_x x} dk_x \quad (15)$$

식(15)를 살펴보면 두 부분으로 나누어 생각할 수 있다. 즉 얇은 slice에 의한 diffraction 항인

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(k_x; z) e^{j \frac{k_x^2}{2k_0} dz} e^{-j k_x x} dk_x \quad (16)$$

과, z 축에 대한 phase delay

$$e^{-j k_x dz} \quad (17)$$

이다.

◎ Split-step angular spectrum 방법에서의 광학소자구현

한편 광학소자를 구현하기 위하여 식(17)의 지수항의

$$k_e = nk_0 \quad (18)$$

로 표시 할 수 있다. $n = n(x)$ 로 x 방향의 profile을 갖게

되면 z 방향의 phase delay에 편차가 생겨 광소자의 특성을 갖게 된다.

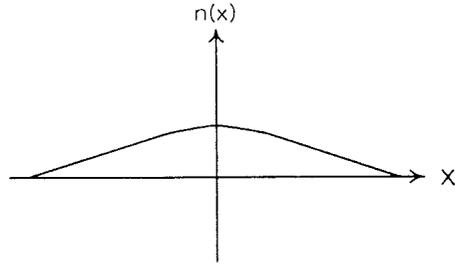


그림 2 Lens

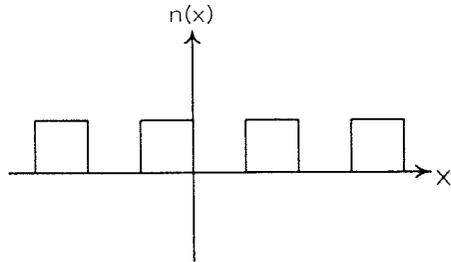


그림 3 Grating

임의의 위치에 그림2와 같은 굴절률을 갖는 slice를 놓게 되면 그 곳에 lens를 설치한 것과 같은 결과를 얻을 수 있다. 또한, 그림3과 같은 slice를 삽입하게 되면 Grating의 효과를 얻을 수 있다.

따라서 임의의 위치에 임의의 형태의 굴절률 slice를 삽입함으로써 광전자 system을 구현 할 수 있다.

결론

Split-step angular spectrum method는 wave 전파 특성을 물리적으로 표현하고 있으므로 어떤 다른 Algorithm보다 실현성이 뛰어나다. 이를 이용한 광소자의 구현은 실제 실험과 대동소이한 결과를 보여주고 있다. 본 연구에서 제시한 $k_x = n(x)k_0$ 에 대해 $n(x)$ 의 표현에 따라 다양한 소자를 표현할 수 있음을 보였다.

(참고 문헌)

- [1] A.Yariv, Introduction to Optical Electronics(Holt, Rinehart and Winston, New York,1971).
- [2] A.Korpel, K.E.Lonngren, P.P.Banerjee, H.K.Sim and M.R.Chatterjee, "Split-step type angular plane-wave spectrum method for the study of self-refractive effects in nonlinear wave propagation", k.Opt.Soc.Am.B 3, 885-890 (1986)

본 연구는 과학기술부 한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다.