

論文97-34D-9-6

테이퍼 전송선 원리를 이용한 불균일 굴절률 광여파기의 해석 및 설계

(Analysis and Design of Inhomogeneous Optical Filters using Tapered Transmission Line Theory)

權伶哉*, 張漢星*, 林聖奎**, 吳明煥***

(Youngjae Kwon, Hosung Jang, Sungkyoo Lim, and Myung Hwan Oh)

요 약

테이퍼 전송선을 지배하는 Riccati 방정식에 Fourier 변환을 이용하여 불균일 굴절률을 갖는 광여파기를 설계하였으며 측정법을 이용하여 목표 스펙트럼에 근접하는 박막의 불균일 굴절률 분포를 산출하였다. Riccati 방정식으로부터 전개되는 반사계수의 크기와 위상에 대한 연립 방정식을 Runge-Kutta 수치해석법을 적용하여 불균일 굴절률을 갖는 광여파기를 해석하였고 행렬 방식을 이용하여 유사한 결과가 유도됨을 보였다.

Abstract

Optical filters with graded index profiles are designed by applying the Fourier transform to a Riccati equation which governs the reflection and transmission characteristics of inhomogeneous refractive index distributions. The inhomogeneous refractive index profile of an optical filter with specified target spectrum is obtained through iterations. The spectral response of the inhomogeneous refractive index layers are analyzed by using Runge-Kutta numerical method to solve the differential equations of the amplitude and the phase of reflection coefficient derived from the Riccati equation and the results are in good agreement with the results obtained by using matrix method.

1. 서 론

박막의 두께에 따라 굴절률이 연속적으로 변화하는 불균일 박막은 고굴절률과 저굴절률의 박막층이 교대로 반복되는 다층 균일 박막에 비해 산란과 스트레스가 적고 표면에 증착이 잘 되는 장점^[1]이 있으며 또한 이를 이용하여 각종 고성능 광여파기를 구현할 수

있으므로 여러 가지 광소자의 무반사 코팅, 대역 투과 여파기, 무편광 광분리기, rugate 여파기 등에 응용될 수 있다. 이러한 불균일 박막의 성장은 매우 어려운 기술로서 여러 가지의 성장방법이 있으나 최근에 S. Lim^[2] 등에 의하여 plasma-enhanced chemical vapor deposition(PECVD)를 이용하여 굴절률이 1.46에서 2.0까지 연속적으로 변화하는 불균일 SiON 박막을 성공적으로 성장시킨 이후로 이를 이용한 각종 광여파기의 설계 및 제작에 많은 관심에 모아지고 있다. 따라서 우선 목표 스펙트럼의 출력특성을 나타낼 수 있는 광여파기의 박막 두께에 따른 굴절률의 분포를 구하는 것이 매우 중요한 과제이다. 불균일 박막의 성장기술이 개발되기 이전에 이미 불균일 굴절률을 갖는 광여파기의 여러 설계방법들이 발표된 바 있다.

* 正會員, 漢陽大學校 電波工學科
(Dept. of Radio Science and Eng., Hanyang univ.)

** 正會員, 檀國大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Dankook univ.)

*** 正會員, 韓國科學技術研究院 情報電子研究室
(Korea Institute of Science and Technology)

接受日字:1997年5月12日, 수정완료일:1997年8月19日

Fourier 변환을 이용하는 불균일 박막의 광여파기 설계법은 Sossi^[3]에 의해 개발되어 Dobrowolski, Bovard, Fabricius와 Verly^[4-7]에 의해 더욱 발전되었다. Fourier 변환법은 설계시 시행착오의 횟수와 소요되는 시간을 단축시키고 설계의 자유도를 높이며 연속적인 굴절률의 분포를 생성한다. 초기 설계로부터 산출된 굴절률의 분포에 대한 주파수 특성은 제한된 여파기 두께 때문에 목표 스펙트럼과 다소 차이를 보이나 측차법을 사용하여 주어진 목표 스펙트럼에 근접하는 굴절률 분포를 구할 수 있다. 균일 박막층 해석에 이용되는 행렬방식^[8]은 불균일 굴절률 분포를 잘게 나누어 각 층을 균일 박막층으로 간주함으로써 불균일 박막의 해석에도 사용된다. 초고주파 공학분야에서도 다단 임피던스 변환기, 여파기, 테이퍼 전송선에 대한 설계 및 해석법이 발전되어 왔다. 서로 다른 특성 임피던스의 전송선로나 소자들을 정합시키는 다단 임피던스 변환기는 각 단에서의 입력 임피던스를 연속적으로 계산하여 입력단에서 반사계수를 계산함으로써 해석하고, 테이퍼 전송선 원리^[9-11]를 이용하여 서로 다른 특성 임피던스를 갖는 선로 사이에 특성 임피던스가 연속적으로 변하는 테이퍼 선로를 삽입하여 임피던스 정합 회로를 설계하고 해석할 수 있다. 테이퍼 전송선 설계법은 광학분야와 마찬가지로 Fourier 변환을 이용한다.

본 연구에서는 테이퍼 전송선의 반사 및 투과 특성을 지배하는 Riccati 방정식에 Fourier 변환을 적용하여 불균일 박막의 광여파기를 설계하였고, Fourier 변환을 통해 산출된 이산 굴절률 분포를 해석하기 위해 비선형 Riccati 방정식으로 부터 반사계수를 구하여 불균일 여파기의 주파수 특성을 구하였다. 제 2장에서는 Fourier 변환법을 이용한 설계법과 비선형 Riccati 방정식으로 부터 광 여파기의 반사계수를 구하는 해석법을 설명하였고, 제 3장에서는 예로써 단선 및 이중 대역 제거 여파기를 설계 및 해석하여 테이퍼 전송선 원리가 광여파기 설계에 응용될 수 있음을 보였다.

II. 테이퍼 전송선 이론

1. 설계

그림 1과 같이 손실이 없는 불균일 박막으로 구성된 광 여파기를 설계하는 경우 테이퍼 전송선로의 반사와 투과 특성을 지배하는 Riccati 방정식에 Fourier

변환을 적용할 수 있다. 정규화된 특성 임피던스 분포를 굴절률의 분포를 표시하고 굴절률의 분포가 연속이므로 어떤 위치에서의 반사계수가 $|\Gamma|^2 \ll 1$ 이라 가정하면 비선형 Riccati 방정식^[12]을 다음과 같은 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d\Gamma}{dz} &= 2j\beta\Gamma - \frac{1}{2}(1-\Gamma^2)\frac{d\ln Z}{dz} \\ &= 2j\beta\Gamma + \frac{1}{2}(1-\Gamma^2)\frac{d\ln(n(z)/n_0)}{dz} \\ &= 2j\beta\Gamma + \frac{1}{2}\frac{d\ln(n(z)/n_0)}{dz} \end{aligned} \quad (1)$$

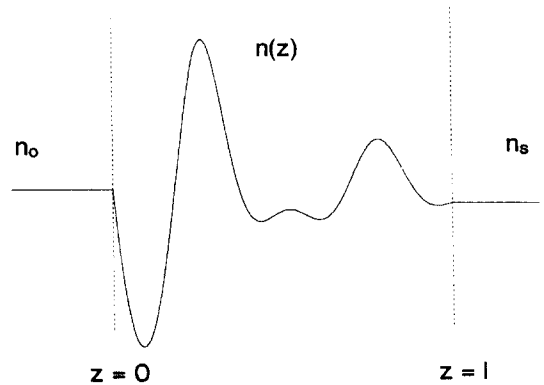


그림 1. 불균일 박막으로 구성된 광여파기 구조
Fig. 1. Optical interference filter with inhomogeneous thin film.

여기서 n_0 는 Z_0 에 대응되는 기본 굴절률로 입사매질 (incident medium) 또는 탈출매질(exit medium)의 굴절률 값으로 대치될 수 있고 $\beta = kn(z) = 2\pi n(z)/\lambda$ 이다. 두 매의 광학거리를 다음과 같이 정의하면^[3]

$$\tau = 2 \int_0^z n(u) du \quad (2)$$

식(1)은

$$\frac{d\Gamma}{d\tau} = jk\Gamma + \frac{1}{2} \frac{d\ln n(z)/n_0}{dz} \quad (3)$$

로 표현된다. 여기서 $\exp(-jk\tau)$ 를 양변에 곱하여 $0 < \tau < \tau_l$ 에 대하여 적분하면

$$\Gamma(k) = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \frac{d\ln(n(\tau)/n_0)}{d\tau} \exp(-jk\tau) d\tau \quad (4)$$

여기서 $\Gamma(\tau_l) = 0$, $\Gamma(0) = |\Gamma(k)|\exp[-j\Phi(k)]$ 이고 $n_0 = n_s$ 인 경우 τ 의 영역 밖에서는 적분항이 0이 되므로 적분구간을 $-\infty$ 에서 ∞ 까지 설정할 수

있다. Fourier 역변환에 의해서

$$\frac{1}{2} \frac{d \ln(n(z)/n_0)}{dz} = - \int_{-\infty}^{\infty} |\Gamma(k)| (\cos(kz - \Phi(k)) + j \sin(kz - \Phi(k))) dk \quad (5)$$

이며 좌변이 실수이므로 식 (5)의 우변이 실수가 되기 위해서는 $\Phi(k)$ 는 기함수이고 $|\Gamma(k)|$ 는 우함수이어야 한다. $\Phi(k)$ 는 k 에 대한 임의의 기함수이므로 $k\tau_i/2$ 로 설정하고 식 (5)를 우선 τ 에 대해서 적분하면

$$\ln \frac{n(\tau)}{n_0} = - \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{|\Gamma(k)|}{k} \sin k(\tau - \frac{\tau_i}{2}) dk + a' \quad (6a)$$

$$n(\tau) = n_0 \exp[- \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{|\Gamma(k)|}{k} \sin k(\tau - \frac{\tau_i}{2}) dk] + a \quad (6b)$$

로 불균일 굴절률의 분포를 구할 수 있다. $|\Gamma(k)|$ 는 광학분야에서 사용되고 있는 $Q(k)$ 함수에 해당된다. 반사율은 $R = \Gamma \Gamma^*$ 이고 양단에서의 굴절률의 값은 τ_i 이 증가함에 따라 n_0 또는 n_s 와의 차이가 줄어들게 되므로 충분히 큰 값으로 설정한다. a 는 적분상수로 여파기 양 단에서 생기는 굴절률 불연속 중 어느 한 끝에서 만큼은 불연속을 제거할 수 있다. 광학거리로 표시된 굴절률의 분포는 행렬방식으로 해석하는 경우에 매우 편리하고 임의의 광학거리 z 에 대한 실제 거리 z 는 식 (2)로부터 계산할 수 있다. 유한한 두께를 갖는 불균일 박막의 여파기 구조에 대한 주파수 특성은 목표 스펙트럼과 차이를 보이므로 이를 보상하기 위해 다음과 같은 축차법을 사용한다.^[13]

$$Q_m(k) \equiv mR_a(k) - \sum_{i=1}^{m-1} R_{ai}(k) \quad (7)$$

Q_m 은 m 번 째의 연산시 사용되는 Q 함수이고 R_a 는 목표 주파수특성이며 R_{ai} 는 실제로 계산된 주파수특성이다. 식 (7)을 몇 번 반복 사용하게 되면 R_a 는 R_d 에 근접하게 된다.

2. 해석

불균일 박막으로 구성된 광여파기를 해석하기 위하여 식 (1)의 해를 $\Gamma(z) = a(z) \exp(j\Phi(z))$ 라고 가정하면 다음과 같은 2개의 연립 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$a'(z) = \frac{1}{2} (1 - a^2(z)) \cos \Phi(z) \frac{n'(z)}{n(z)} \quad (8a)$$

$$\Phi'(z) = - \frac{1}{2} (a(z) + \frac{1}{a(z)}) \sin \Phi(z) \frac{n'(z)}{n(z)} + 2\beta \quad (8b)$$

위의 식 (8)은 불균일 매질의 두께를 l 이라 가정할 때 굴절률의 분포가 $z=l$ 에서 연속이고 위상은 임의의 값을 가질 수 있으므로 $a(z=l)=0$ 과 $\Phi(z=l)=0$ 의 경계조건에 대해서 4차의 Runge-Kutta 수치해석 방법을 적용함으로써 해결될 수 있다. S-polarized 파와 입사각 θ 에 대해서 불균일 매질과 외부 매질 사이의 경계에서 굴절률의 차이에 의한 불연속이 존재한다면 위상 $\Phi(z=l)=0$ 인 조건과 두 매질 사이의 굴절률에 의해 결정되는 0이 아닌 $z=l$ 에서의 반사계수를 다음과 같이 설정하여 경계 조건을 쓸 수 있다.

$$a(l) = \frac{n(l) \cos \theta(l) - n_s \cos \theta_s}{n(l) \cos \theta(l) + n_s \cos \theta_s} \quad (9)$$

입력단에서의 최종적인 반사계수는 $z=0$ 에서의 불연속을 고려할 때^[14]

$$\Gamma = \frac{\gamma(0) + a(0) \exp[j\Phi(0)]}{1 + \gamma(0)a(0) \exp[j\Phi(0)]} \quad (10)$$

이고 $\gamma(0)$ 는 Fresnel 반사계수이다. 입사각이 θ 인 경우에 대해서는 Snell의 법칙에 의해 투과 각도는 다음과 같다.

$$\cos \theta(z) = \sqrt{1 - (\frac{n_0 \sin \theta_0}{n(z)})^2} \quad (11)$$

또한 $\frac{d \ln n(z)}{dz}$ 는 입사각 θ 를 고려하여 $\frac{d \ln(n(z) \cos \theta(z))}{dz}$ 로 치환될 수 있고 굴절률의 분포가 물리적인 z 거리 또는 광학거리 τ 의 함수로 표시되는 경우 식 (8)을 이용하는 것이 편리하다.

한편, Fourier 변환법에 의해 식 (6)과 식 (7)로부터 얻어진 굴절률 데이터는 이산적인 분포를 갖게 되어 거리에 대한 함수로 표현하기 어렵다. 따라서 이러한 이산적인 데이터에 대해서는 미소구간 Δz 와 입사각 θ 를 고려하고 미분의 개념을 이용하면 식 (8)은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$a_i = a_{i+1} + \frac{1}{2} \ln(\frac{n_{i+1} \cos \theta_{i+1}}{n_i \cos \theta_i}) (a_{i+1}^2 - 1) \cos \theta_{i+1} \quad (12a)$$

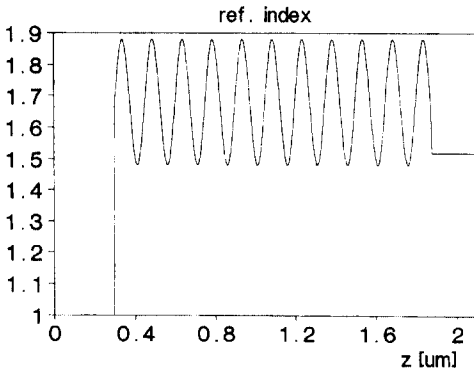
$$\Phi_i = \Phi_{i+1} + \frac{1}{2} \ln(\frac{n_{i+1} \cos \theta_{i+1}}{n_i \cos \theta_i}) (a_i + \frac{1}{a_i}) \sin \theta_{i+1} - 2\beta \Delta z \quad (12b)$$

$a_n = 0$ 와 $\Phi_n = 0$ 의 경계조건에 대해 식 (12a)와 식 (12b)를 교대로 반복 사용하여 최종적으로 a_1 과 Φ_1 의 값을 얻을 수 있다. 또한 양 끝단에서의 불연속을 고려하는 경우에도 식 (12)를 적용할 수 있다. 이산 굴절률 분포를 다루기 위해 사용되는 식

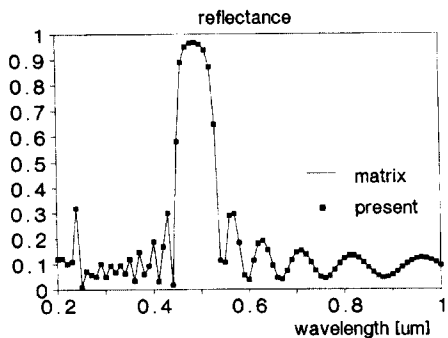
(12)의 알고리즘은 Runge-Kutta 프로그램이나 다른 수치해석적 방법을 요구하지 않기 때문에 매우 빠르게 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 테이퍼 전송선로의 반사 및 투과 특성을 지배하는 Riccati 방정식에 기초하여 위에서 묘사된 방법들은 연속적 또는 이산적인 굴절률 데이터를 가진 불균일 광여파기를 설계하는데 뿐만 아니라 해석하는데도 효과적으로 사용될 수 있다. 단, 굴절률의 분포가 τ 의 함수인 경우 식 (8)과 식 (12b)에서 τ 와 z 의 관계로부터 2β 는 k 로 바뀌게 된다.

III. 예제

설계에 앞서 기본주기가 $\Lambda = 150nm$, 입사각 $\theta = 25^\circ$, 여파기의 두께가 $1575nm$ 일 때 여파기 양단에서 불연속이 있고 정현과적으로 변하는 불균일 굴절률 분포 $n(z) = 1.68 + 0.2\sin(2\pi z/\Lambda)$ 에(그림. 2(a) 참조) 대한 Rugate 여파기의 주파수 특성을 그림. 2(b)에 그렸다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 정현과 함수로 표현되는 굴절률의 분포 및 (b) 주파수 특성

Fig. 2. (a) Profile of a sinusoidally varying index of refraction and (b) frequency characteristics.

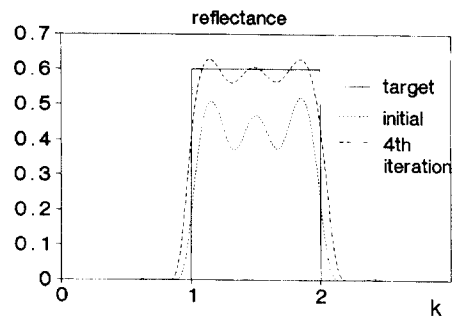
굴절률이 z 의 함수이므로 식 (8)에 Runge-Kutta 수치해석법을 적용한 결과를 행렬 방식의 결과와 비교하였고 동일한 결과를 얻을 수 있다. 미소구간 $\Delta z = 5nm$ 를 사용하였고 식 (8)의 사용은 행렬방식 보다는 느리게 연산을 수행하는 단점이 있다.

그림 2(a)와 같이 $1 \leq k \leq 2$ 범위에서 반사율 $R = 0.6$ 인 과녁 스펙트럼에 대하여 선형 Riccati 방정식으로부터 유도된 Q함수 $Q(k) = |\Gamma(k)| = \sqrt{R(k)}$ 를 이용하여 기초 설계된 불균일 굴절률 분포에 대한 주파수 특성과 축차법을 4회 사용한 주파수 특성을 그림 3(b)에 나타내었다. 기초 설계에 대한 해석 결과는 목표 스펙트럼에 비해 차이를 많이 보이나 축차법을 사용함으로써 목표 주파수 특성에 접근함을 알 수 있다. 광학 분야에서 상용되는 Q함수는

$$Q(k) = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T(k)} - T(k) \right)} \quad (13a)$$

$$Q(k) = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{R(k)}}{1 - \sqrt{R(k)}} \quad (13b)$$

로 식 (13a)는 Sossi에 의해 유도되었고 식 (13b)는 Bovard에 의해 개선된 Q함수이다. 그림. 3(a)의 목표 스펙트럼에 대한 기초 설계 결과를 식 (13b)를 이용한 결과와 그림. 3(c)에서 비교하였다. 선형 Riccati 방정식에서 유도된 Q함수와 개선된 Q함수를 사용한 결과가 기초 설계시 주파수 특성에서 차이를 보이고 있으나 축차법의 사용으로 두 결과는 목표 스펙트럼에 접근하게 된다. 식 (13b)와 같은 Q함수는 기초 설계시에도 상당히 목표 스펙트럼에 가까운 주파수 특성을 구할 수 있어 편리하고 축차의 횟수를 줄일 수 있다. 테이퍼 전송선 이론은 유도된 Q함수의 근원을 명확히 밝히고 있고 비선형 Riccati 방정식으로부터도 본 연구에서 사용된 Q함수 보다 개선된 Q함수를 유도할 수 있다.



(a)

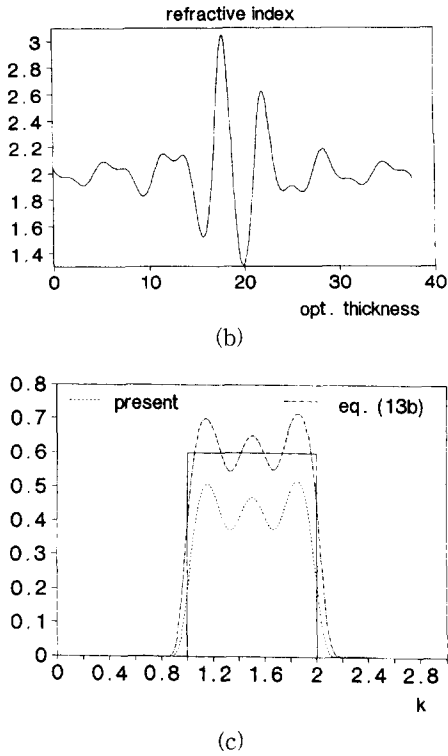


그림 3. (a) 목표 스펙트럼에 대한 기초 설계후의 주파수 특성과 축차법을 사용한 후의 주파수 특성, (b) 축차법을 4회 사용한 후의 불균일 굴절률 분포, 및 (c) 축차법을 적용하지 않고 Riccati 방정식에서 유도한 Q함수와 식 (13b)를 이용한 주파수 특성의 비교

Fig. 3. (a) Frequency characteristics by the basic design for target spectrum and by iterative calculation, (b) inhomogeneous refractive index profile obtained by using 4 times of iteration, and (c) comparison of frequency characteristics obtained by using Q function derived from Riccati equation and by equation (13).

이중 반사 대역을 갖는 목표 주파수 특성을 그림. 4(a)에 나타내었고 이에 대한 설계 결과인 불균일 굴절률 분포를 그림. 4(b)에 그렸다. 해석하는 과정에서 행렬 방식과 식 (12)를 각각 사용하여 구한 결과를 그림. 4(b)에서 비교하였다. 두 결과는 미세한 차이를 보이고 있어 비선형 Riccati 방정식에서 유추된 식 (12)를 이용한 해석 결과는 만족할 만 하다. 하나의 반사 대역을 갖는 목표 스펙트럼에 대하여서는 행렬 방식과 같은 해석 결과를 구할 수 있어 테이퍼 전송선 이론은 광여파기 해석에도 쉽게 해석 될 수 있다. 설계시 주

변환경을 고려해야 하는데 우선적인 고려 사항으로 굴절률의 최대치와 최소치를 들 수 있다. 이들은 성장방법과 성장 조건에 의해 결정되는데 Fourier 변환법은 성장시킬 수 있는 굴절률의 최대치와 최소치의 범위를 넘어 굴절률 분포를 산출하므로 설계 고려 사항을 만족하도록 불균일 층의 두께를 늘리고 위상값을 변화시켜야 한다. 위상 $\phi(k)$ 의 변화에 따른 굴절률의 분포를 그림. 5에 보였다. 위상에 따라 굴절률의 최대치와 최소치가 변함을 알 수 있다. 따라서 설계 조건에 부합되는 최적의 불균일 박막층의 두께와 굴절률의 분포를 구하는데 테이퍼 전송선 이론을 응용할 수 있다.

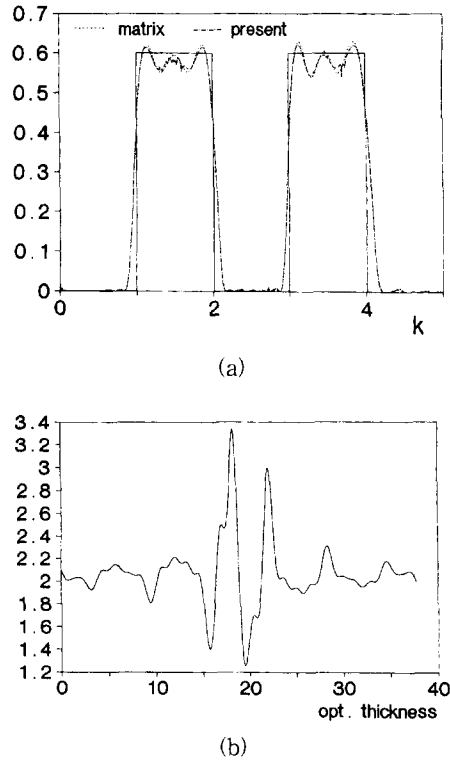


그림 4. (a) 축차법을 4회 사용하여 목표 스펙트럼에 대한 행렬 방식과 Riccati 방정식을 이용한 해석 결과 및 (b) (a)의 목표 스펙트럼에 대한 축차법을 4회 사용한 후의 산출된 굴절률 분포

Fig. 4. (a) Analysis results by using matrix method and Riccati equation on target spectrum by 4 times of iterations, and (b) refractive index profile.

IV. 결론

선형 Riccati 미분 방정식에 Fourier 변환을 적용

하여 Q함수를 유도하였고 이를 이용하여 불균일 박막으로 구성된 광 여파기를 설계하였다. 초기 반사율은 광학 분야에서 널리 쓰이고 있는 Q함수를 사용하였을 경우보다 낮았으나 축차법의 사용으로 목표 스펙트럼에 접근하는 주파수 특성과 굴절률의 분포를 구할 수 있었다. 해석의 경우 비선형 Riccati 방정식으로부터 유추된 연립 방정식에서 반사 계수를 계산하여 주파수 특성을 구했으며 행렬 방식과 비교하였다. 위상에 따른 굴절률의 분포의 변화를 보였고 함수로 표시되는 위상의 변화를 이용하여 실제로 허용되는 굴절률의 최대치와 최소치의 범위에 맞는 광여파기 설계에 테이퍼 전송선 이론이 응용될 수 있다. 위상을 이용하여 설계 고려사항에 맞는 굴절률의 분포와 두께를 제어하는 알고리즘 개발과 비선형 Riccati 방정식으로 부터 개선된 Q함수를 유도하는 것이 당면 과제이다.

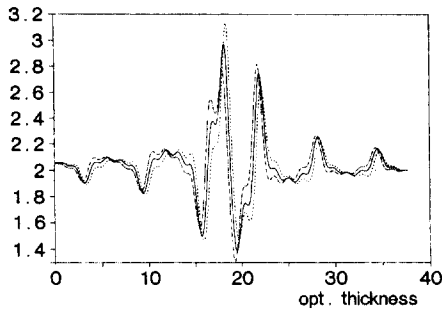


그림 5. 위상에 대한 굴절률 분포의 변화. $\phi(k) = k\tau_1/2$ (실선), $k\tau_1/2 + 0.5$ (점선), $k\tau_1/2 - 0.5$ (사슬선)을 각각 사용하였다

Fig. 5. Dependence of refractive index profile on phase variation. $\phi(k) = k\tau_1/2$ (solid line), $k\tau_1/2 + 0.5$ (dotted line), $k\tau_1/2 - 0.5$ (chain line) were used for calculation.

참 고 문 헌

[1] P. Verly, J. Dobrowolski, W. wild and R. Burton, "Synthesis of high rejection filters with the Fourier transform method," *App. Opt.*, vol. 28, pp. 2864-2875, 1989
 [2] S. Lim, J. H. Ryu, and J. F. Wager, "Inhomogenous dielectrics grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition," *Thin Solid Films*, vol. 236, pp. 64-66, 1993

[3] L. Sossi, "A method for the synthesis of multilayer dielectric interference coatings," *Izvestiya Akademii Nauk Estonskoi SSR. Fizika, Matematika*, vol. 23, pp. 223-237, 1974
 [4] J. Dobrowolski and D. Lowe, "Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transform," *Appl. Opt.*, vol. 17, pp. 3039-3050, 1978
 [5] B. Bovard, "Fourier transform technique applied to quarterwave optical coatings," *Appl. opt.*, vol. 27., pp 3062-3063, 1988
 [6] H. Fabricius, "Graded-index filters: designing filters with steep skirts, high reflection, and quintic matching layers," *Appl. opt.*, vol. 31, pp. 5191-5196, 1992
 [7] P. Verly, "Fourier transform technique with frequency filtering for optical thin-film design," *Appl. Opt.*, vol. 34, pp. 688-694, 1995
 [8] A. Thelen, *Design of Optical Interference Coatings*, McGraw-Hill, New York, 1989, Ch. 2
 [9] F. Bolinder, "Fourier transforms in the theory of inhomogeneous transmission lines," *Proc. I.R.E.*, vol. 38, p. 1354, 1950
 [10] R. Klopfenstein, "A transmission line taper of improved design," *Proc. I.R.E.*, vol. 44, pp. 31-35, 1956
 [11] R. Collin, "The optimum tapered transmission line matching section," *Proc. I.R.E.*, vol. 44, pp. 539-548, 1956
 [12] R. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, McGra-Hill, New York, 1992, p. 385
 [13] P. Verly and J. Dobrowolski, " Iterative Corection process for optical thin film synthesis with the Fourier transform method," *Appl. opt.*, vol. 27, pp. 3672-3684, 1990

저 자 소 개

吳 明 煥(正會員)

서울대학교 전기공학과 학사 및 석사. Paul Sabatier (France) 공학박사. 현재 한국과학기술연구원 정보전자 연구부. 관심분야는 평판디스플레이(Field Emission Displays 및 Electroluminescent Displays)

林 聖 奎(正會員)

1979년 3월 ~ 1981년 1월 해군사관학교 전자공학과 교관. 1981년 5월 ~ 1982년 2월 삼성전자 반도체사업부 주임연구원. 1982년 3월 ~ 1996년 9월 단국대학교 전자공학과 전임강사, 조교수, 부교수, 교수. 1995년 9월 ~ 현재 단국대학교 정보디스플레이연구소 소장. 1986년 9월 ~ 1987년 1월 University of Arizona 연구교수. 1987년 2월 ~ 1987년 8월 Oregon State University 연구교수. 1993년 6월 ~ 현재 Member of Phi Kappa Phi. 주관심분야는 Optical Interference Filter, Inhomogeneous Dielectrics, Electroluminescent Display, Field Emitter Display, Plasma Display Panels, Plasma Assisted Liquid Crystal(PALC) Displays



權 伶 哉(正會員)

1972년 5월 2일생. 1996년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 현재 한양대학교 전파공학과 대학원 석사 3기. 주관심분야 광여파기, 광도파관 등



張 溟 星(正會員)

1955년 3월 28일생. 1978년 서강대학교 전자공학과(공학사). 1986년, 1993년 미국 오레곤 주립대학교 전자공학과(공학석사, 공학박사). 1994년 ~ 현재 한양대학교 전파공학과 조교수. 주관심분야 광소자 설계 및 / 해석과 마이크로파 소자