

論文 2002-39SD-7-4

# m-section의 위상반전이 있는 Mach-Zehnder형 진행파 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기

(Mach-Zehnder Type Ti:LiNbO<sub>3</sub> Traveling-Wave Optical  
Modulator with m-Section Phase Reversal)

李 禹 眞 \* \*, 金 敬 岩 \* , 金 禹 京 \* , 金 昌 敏 \*

(Woo-Jin Lee, Kyoung-Am Kim, Woo-Kyung Kim, and Chang-Min Kim)

## 요 약

z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 3-section, 5-section 위상반전 전극을 가진 Mach-Zehnder형 진행파 광변조기를 설계 및 제작하였다. FDM(Finite Difference Method : 유한 차분법)을 이용하여 광도파로를 설계하였으며, MW(Microwave)전극 taper영역의 입·출력단에서는 CMM(Conformal Mapping Method: 등각 사상법)을, 변조영역에서는 SOR(Successive Over Relaxation : 반복 이완법)을 이용하여 설계를 수행하였다. 제작된 소자의 S 파라미터를 측정하였다. 측정된 S파라미터를 이용하여 이론적으로 주파수응답  $R(\omega)$ 을 구하였다. 3-section 전극의 경우 중심 주파수 25GHz에 ~15GHz의 대역폭, 5-section의 경우 중심 주파수 45GHz에 ~22GHz의 대역폭을 갖는 bandpass 동작을 나타낼 것으로 예측되었다.

## Abstract

Mach-Zehnder type traveling-wave optical modulators with 3-section and 5-section phase reversal were designed and fabricated on z-cut LiNbO<sub>3</sub> substrates. Optical waveguides were designed by means of the FDM(Finite Difference Method). Design of CPW traveling-wave electrodes were performed by the SOR(Successive Over Relaxation) in the active region and by the CMM(Conformal Mapping) in the input/output section. The optical response  $R(\omega)$  calculated based on the measured S-parameters showed the bandwidth of 15GHz centered at 25GHz for the 3-section, and the bandwidth of 22GHz at 45GHz for the 5-section.

## I. 서 론

\* 正會員, 서울市立大學校 電子電氣工學部科

(Dept. of Electronics Eng., The University of Seoul)

\*\* 正會員, 韓國電子通信研究院 光接續모듈팀

(Electronics and Telecommunication Research Institute)

※ 본 연구는 2001년도 한국학술진흥재단 선도 연구자 지원(2001-041-E00160), 2001년도 한국과학재단 특정기초연구지원(R01-2001-00288) 및 2001년도 서울 시립대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

接受日字:2001年12月21日, 수정완료일:2002年4月18日

인터넷 사용자의 증가로 대용량 광대역 정보 전송이 요구되며, 교육, 자택근무, 화상회의, 고품질 TV 등을 포함하는 정보 사회의 실현은 초고속 광통신 기술을 필수 요건으로 하고 있다. 초고속 광변조기는 광대역 광통신에서 어떠한 전송방식에도 불구하고 요구되는 필수 소자이다.

일반적으로 초고속 광변조기는 기저대역으로부터 수십 GHz에 이르기까지 평탄한 응답특성을 가질 것이 요구되며, 이 기대에 적합한 구조가 진행파 전극을 이용한 외부 광변조기이다. 대부분의 진행파 전극 외부

광변조기의 대역폭은 i) MW/도파광 사이의 전파속도 부정합, ii) MW 특성임피던스 부정합, iii) MW 전파 손실등에 의하여 제약을 받는다. 이와 같은 제약요소를 극복하기 위한 방법들로는 두꺼운 Au전극의 채택, SiO<sub>2</sub> 완충 박막의 도입 등이 있으며, 많은 연구자들의 노력으로 진행파 광변조기의 대역폭은 최근 50GHz 이상까지 증가 되었다.<sup>[1-8]</sup>

한편 기존의 CATV위성방송에서 사용되는 아날로그 전송서비스를 위한 광통신 방식으로 부 반송파 다중화(SCM : Sub-Carrier Multiplexing) 전송방식이 부각되고 있다. SCM 전송 방식은 다수의 기저대역 신호원으로 지정된 부 반송파를 AM/FM 변조한 후 주파수 다중하고, 이 다중화 신호로 외부 광변조기를 구동하여 광신호로 변환후 전송하는 방식이다. 수신부에서는 광검파기를 이용하여 전광변화 시킨 후 지정 부 반송파에 동기된 대역 필터를 통하여 원하는 기저대역 신호를 추출하게 된다. SCM 시스템에서 광변조기는 0~수십 GHz이상의 대역에서 거의 평탄한 주파수 응답을 가질 필요가 없고, 오직 부반송파의 중심 주파수를 가진 통과대역에서만 평탄한 응답을 보이면 충분하다.

이러한 SCM 시스템에서 사용되는 광변조기는 위상반전 특성을 가진 진행파 전극 구조에서 구현될 수 있고, 위상반전 진행파 광변조기가 어느 정도의 광/MW 위상속도 부정합시 대역통과 필터 특성을 갖는다는 사실을 이용하여 설계자는 목표로 하는 통과 대역폭, 중심주파수에 대하여 유연하게 전극구조를 설계할 수 있다.<sup>[9-10]</sup> 기존의 진행파 전극의 경우 전극으로부터 광도파로에 인가되는 전계 분포가 변조영역 전체에 걸쳐 균일한 반면, 위상반전 진행파 전극에서는 변조영역을 m-section 으로 나누어 교번적으로 전계분포의 벡터가 바뀌는 구조를 갖는다.(그림 8. 참조) 위상반전구조에서는 MW/도파광 사이의 전파속도 부정합, MW 임피던스 부정합, MW와 도파광 사이의 상관길이, 반전영역의 개수 등을 적절히 조절함으로써 원하는 대역통과 특성을 갖는 주파수 응답을 얻을 수 있다. 이 구조의 다행스러운 점은 기존의 진행파 전극 설계시처럼 까다로운 정합조건을 만족시키지 않아도 되고, 결과적으로 지나치게 두꺼운 전극도 필요 없을 뿐만 아니라 공정상에서의 엄격한 조건들이 상당히 완화될 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 z-cut Ti:LiNbO<sub>3</sub> Mach-Zehnder형 광

결합기 위에 전극반전 CPW형 진행파 전극이 탑재된 외부 광변조기를 설계하였다. 반전영역이 3개, 그리고 5개인 두가지의 경우를 제작, 실험하였다. 제작된 소자의 MW 특성을 얻기 위하여 Network Analyzer를 이용하여 진행파전극의 S 파라미터를 측정하고, 이들 S 파라미터로부터 감쇠상수  $\alpha_0$ , MW 유효굴절률  $N_{eff}$ , 특성 임피던스  $Z_c$ 를 추출하였다. MW 특성으로부터 광의 예상 주파수 응답특성 곡선을 이론적으로 계산하였다.

## II. Mach-Zehnder 광변조기의 설계와 제작

### 1. Mach-Zehnder 결합기의 광도파로 설계

Mach-Zehnder 결합기는 두도파로 간의 직접적인 광결합 없이 각 도파로를 진행하는 두 도파광 사이의 위상차를 이용한다. 그림 1은 설계된 광도파로의 확산전 Ti 스트립의 치수를 나타낸다.

Mach-Zehnder 결합기의 동작원리는 다음과 같다. 두 광도파로는 동일한 구조를 갖는다고 가정하고, 전극에 전압이 인가되지 않으면 입사된 광은 두 도파로로 분기되어 들어가고, 같은 거리만큼 진행한 후 두 도파로가 다시 만나는 지점에서 두 광파는 동위상으로 서로 합쳐져 출력된다. 반면에, 전극에 전압을 인가하면 전기광학 효과에 의하여 변조영역 거리 L에 걸쳐 전극밑에 위치한 두 광도파로의 굴절률이 변하게 된다. 각 도파로에 수직으로 가해지는 전계 벡터의 방향이 다르므로 각 도파로의 도파광은 각각 서로 다른 굴절률을 느끼면서 진행하게 된다. 일정한 거리 L 만큼 진행했을 때 두 광파의 위상은  $\pi$  만큼 차이가 나며, 두도파로가 다시 만나는 지점에서 두 광파는 소멸된다. 대칭구조를 갖는 Mach-Zehnder 결합기의 구조에서 스위칭이 일어나기 위해서는  $\Delta\beta \cdot L = \pi$ 가 되어야 한다.

### 2. CPW형 진행파 전극 설계

본 연구에서 채택하고자 하는 CPW형 진행파 전극의 입·출력단에서의 특성임피던스 설계는 CMM(Conformal Mapping Method)을 사용하였으며, 변조영역에서의 특성임피던스 설계는 SOR(Successive Over Relaxation)을 이용하였다.

#### 1) CMM에 의한 입·출력단 전극설계<sup>[11,12]</sup>

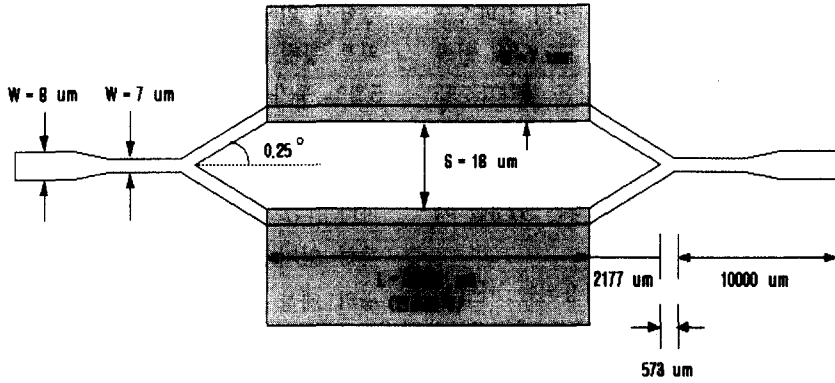


그림 1. 설계된 M-Z 광도파로 치수 ( $\mu\text{m}$ )  
 $w$  : 광도파로 폭,  $s$  : 두 광도파로의 간격(전극의 간격  $S$ 와 동일)  
 $L$  : 변조영역 길이, 회색부분은 전극을 나타냄  
 Fig. 1. Dimensions of the designed M-Z optical WG ( $\mu\text{m}$ ).

실제 설계, 제작된 입, 출력단의 모습은 그림 8(a)에 그려져 있다.

중앙전극의 폭( $W$ )은 MW 포트와 연결을 쉽게 하기 위해 입출력단에서 대체로 약  $300\mu\text{m}$  이상이 되어야 한다. 입·출력단에서의 중앙전극 폭( $W$ ) 및 전극사이의 간격( $S$ )은 전극두께 및 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께에 비해 대단히 크므로 SOR 적용시 방대한 양의 메모리와 계산시간이 소요되고 그 정확성도 신뢰할 수가 없게 된다. 이러한 이유로 입·출력단에서는 CMM을 이용하여 특성 임피던스를 계산하였으며, 이 방법은 전극두께 및 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께가 전극 폭 및 전극간격에 비해 무시할 수 있을 경우, 더욱 정밀도를 제공한다.

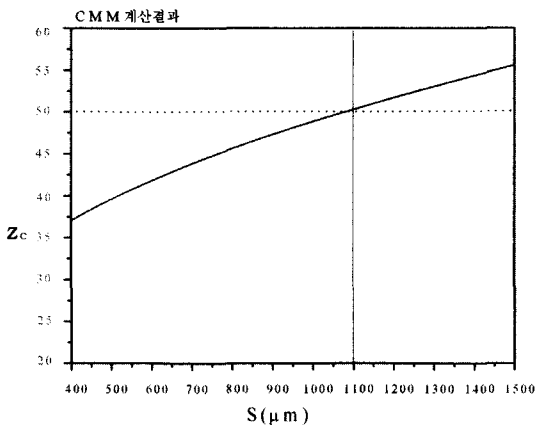


그림 2. 입·출력단에서의 전극간격( $S$ )에 따른  $Z_c$   
 ( $W=300\mu\text{m}$ ,  $T=12\mu\text{m}$ )  
 Fig. 2.  $Z_c$  v.s  $S$  in the input/output section  
 ( $W=300\mu\text{m}$ ,  $T=12\mu\text{m}$ ).

그림 2는 SiO<sub>2</sub> 박막 두께를 무시하고 전극폭( $W$ )과 전극두께( $T$ )를 각각  $300\mu\text{m}$ ,  $12\mu\text{m}$ 로 고정된 상태에서 전극간격을 변화시켜가면서 특성임피던스를 계산한 것이다.

2) SOR에 의한 변조영역 전극 설계<sup>[13-15]</sup>

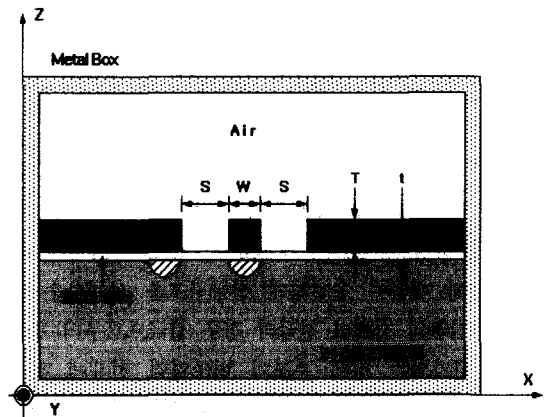


그림 3. 진행파 CPW 전극의 단면도  
 $Z$ -cut LiNbO<sub>3</sub> :  $\epsilon_x=43$ ,  $\epsilon_z=28$ ,  $n_0=2.29$ ,  $n_e=2.150$   
 SiO<sub>2</sub> 원층박막 :  $\epsilon_x=\epsilon_z=3.9$ ,  $n=1.457$   
 $T$  : 전극두께,  $t$  : SiO<sub>2</sub> 두께  
 빗금영역 : Mach-Zehnder 결합기의 광도파로 구조

Fig. 3. Cross section of traveling-wave CPW electrode.

그림 8(a)의 변조영역 3-section중 1-section의 단면도가 그림 3에 그려져 있다. CPW 구조를 갖는 진행파 전극과 그 아래 두 광도파로가 위치하고 있다. 두 전극

의 edge와 두 광도파로의 edge가 align 되어 있음을 유의한다.

MW 특성임피던스  $Z_c$  및 유효굴절률  $N_{eff}$ 는 다음과 같이 모두 전극 정전용량의 함수로 표현 할 수 있다.

$$Z_c = \frac{1}{c_0 \sqrt{C_o C_m}}, \quad N_{eff} = \sqrt{\frac{C_m}{C_o}}$$

여기서  $C_o$ 는 전극구조내의 유전체 ( $\text{LiNbO}_3$  기판,  $\text{SiO}_2$  포함)를 모두 공기로 대체시켰을 때의 정전용량이고,  $C_m$ 은 원래구조의 정전용량이다. 그리고  $c_0$ 는 진공중 전자파의 속도이다.

그림 4는 SOR에 의해 구해진 CPW 진행파 전극 구조의 변조영역에서 전극사이의 간격(S)에 따른 특성 임피던스 및 유효굴절률을 도시한 것이다.

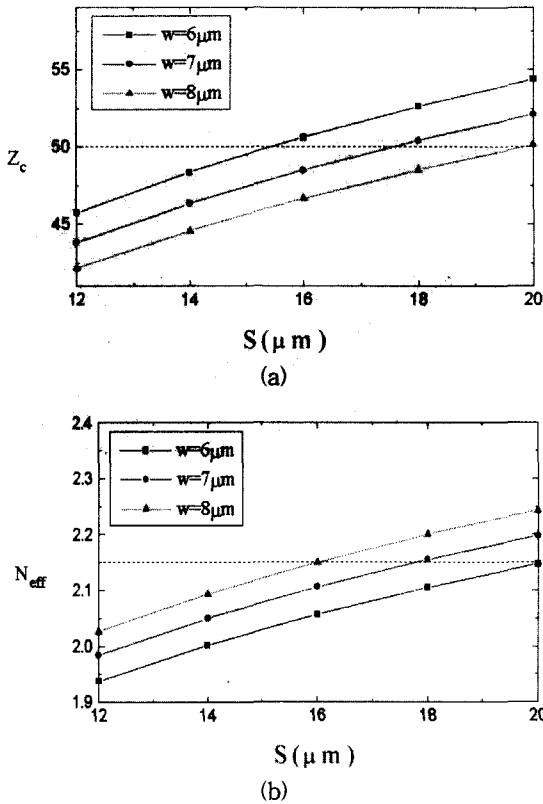


그림 4. 변조영역에서 전극 사이의 간격 S에 따른  $Z_c, N_{eff}$  ( $T=12\mu\text{m}, t=1.6\mu\text{m}$ )  
 W : 중앙전극 폭, S : 두전극의 간격  
 (a) 특성 임피던스( $Z_c$ ) (b) MW 유효 굴절률 ( $N_{eff}$ )

Fig. 4.  $Z_c, N_{eff}$  vs. electrode separation ( $T=12\mu\text{m}, t=1.6\mu\text{m}$ ).  
 (a) Characteristic impedance( $Z_c$ ) (b) MW effective index( $N_{eff}$ )

### 3. 광도파로와 진행파전극의 제작

광도파로 제작을 위하여 Ti를 진공 열증착(thermal evaporation)방법으로 증착하였고, 표준사진식판(standard photolithography)으로 Ti 도파로 pattern을 만들었으며 건식식각(dry etching)으로 pattern이외의 Ti를 제거하였다. 도파로 생성을 위해 Ti 내부확산 방법 등이 사용되었다.

진행파 전극을 제작하기 위하여 먼저 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)방법으로  $\text{SiO}_2$ 를 증착하였고, 진공열증착법으로 base metal인 Cr, Au를 차례로 증착하였으며, 진행파전극의 성장을 위하여 전기분해(electroplating) 방법을 사용하였다. base metal인 Cr, Au의 식각은 습식식각(wet etching)을 하였다. 광도파로와 진행파전극의 공정 파라미터를 표 1에 정리하였다.

그림 5는 제작된 Mach-Zehnder 결합기의 두 광도파로와 진행파전극의 위상반전 부분의 사진이다.

광도파로	900 A	1050 ° C	8 h	18 $\mu\text{m}$
진행파전극	16 $\mu\text{m}$	Cr : 700A, Au : 600A	12 $\mu\text{m}$	18 $\mu\text{m}$

표 1. 광도파로와 진행파전극의 공정 파라미터  
 Table 1. Parameter of fabricated optical waveguides and traveling-wave electrodes.

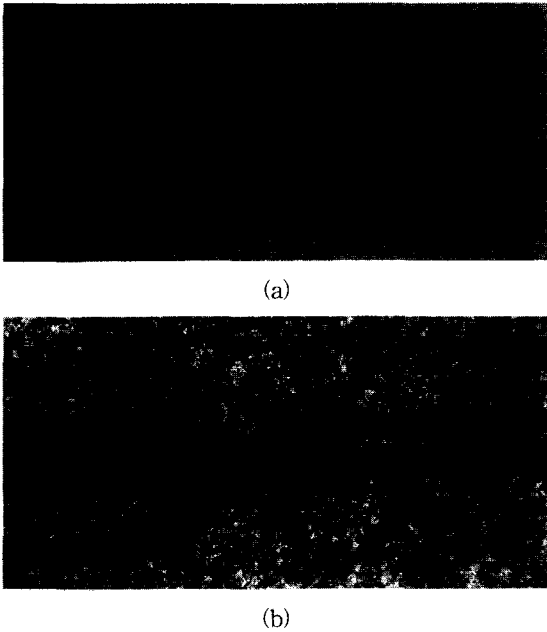


그림 5. 제작된 M-Z의 두 광도파로와 진행파 전극  
 (a) 광도파로  
 (b) 진행파전극의 위상반전부분  
 Fig. 5. Fabricated optical waveguides and traveling-wave electrodes.  
 (a) Optical waveguides  
 (b) Phase reversal region of traveling-wave electrodes

III. 광변조 특성 측정

1. 단일 광도파로에 대한 모드 측정

제작되어진 광변조기를 테스트하기 위하여 광원으로 1.3 $\mu$ m LD를 이용하여 광도파 실험을 하였다. 광도파 실험장치의 개략도가 그림 6에 도시되어 있다.

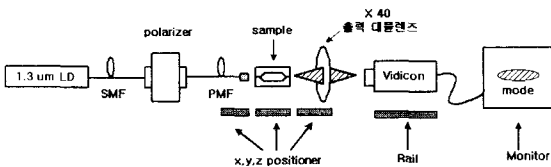


그림 6. 광도파로 특성 측정 장치  
 Fig. 6. Measurement system for optical WG characterization.

SMF(single mode fiber)로 pig-tailing 된 1.3 $\mu$ m LD에서 발생된 광을 polarizer를 사용하여 TM모드만 통과시키고 모드를 계속 유지하기 위해 PMF가 사용되었

다. 도파로에 TM모드로 편광된 광이 입사되어 도파로를 빠져나온 광은 40배 대물렌즈에 의해 IR Vidicon 카메라에 상이 맺히게 되는데, 이러한 상(image)은 컴퓨터 모니터를 통하여 볼 수 있다. 그림 7은 전압이 인가되지 않았을 때 광의 출력 모습을 나타낸 것이다.

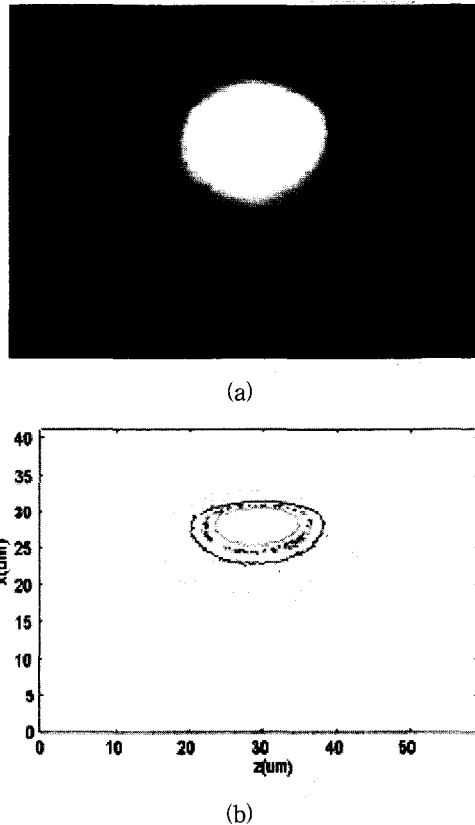


그림 7. 광도파로의 near field 패턴  
 (a) IR Vidicon에 잡힌 도파모드  
 (b) 도파모드의 contour  
 Fig. 7. Near field pattern of optical waveguides.  
 (a) guided mode on IR Vidicon  
 (b) contour of guided mode

1) MW 인가에 따른 변조영역 굴절을 변화<sup>[15~17]</sup>

그림 8(a)에는 M-Z 간섭기와 3-section 전극반전이 있는 CPW 전극으로 구성된 진행파 광변조기의 개략도가 그림 8(b)에는 3-section M-Z 진행파 전극의 상세도가 그려져 있다.

MW 특성임피던스  $Z_m$ , 유효굴절률  $N_{eff}$  그리고 광의 유효굴절률  $n_{eff}$ 에 따른 광변조기의 변조대역폭을 정량화하기 위해 MW 전극을 그림 9의 등가 전송선로로서 모델화 하였다.

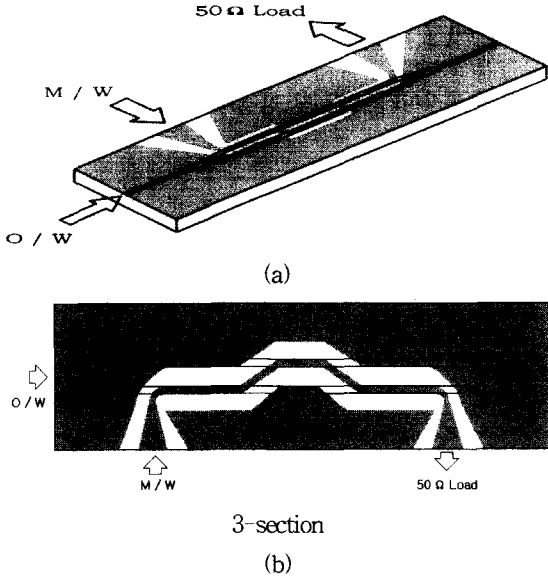


그림 8. 진행파 광변조기 개략도  
 (a) 진행파 광변조기 개략도  
 (b) 위상반전 부위의 상세도  
 Fig. 8. Schematic diagram of a traveling-wave optical modulator.  
 (a) traveling-wave optical modulator  
 (b) Electrodes with phase reversal

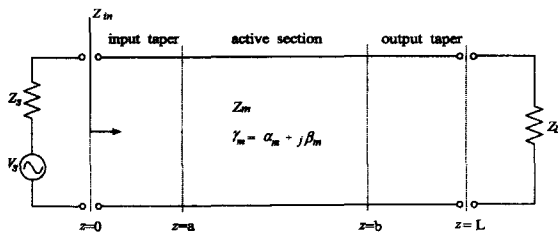


그림 9. 진행파전극의 등가 전송선로  
 Fig. 9. Equivalent transmission line of travelling-wave electrodes.

그림 9 에서  $V_s$  및  $Z_0$ 는 급전 동축케이블의 MW 전원과 특성임피던스를 의미한다.  $Z_m$  및  $Z_L$ 은 각각 진행파전극의 특성임피던스와 종단부하의 임피던스를 나타낸다.  $\gamma_m$ 은 진행파전극의 전파상수,  $\alpha_m$ ,  $\beta_m$ 은 각각 감쇠정수, 위상정수를 의미한다.

전송선로를 따라 분포되는 전압  $V(z)$ 는 전향 진행파와 후향 진행파의 합으로 표시된다. 편의상  $e^{j\omega t}$ 항은 생략되었다.

$$V(\omega_m, z) = V_s \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_0}$$

$$\cdot \frac{1}{1 + \Gamma_L e^{-2\gamma_m L}} (e^{-\gamma_m z} + \Gamma_L e^{-2\gamma_m L} e^{\gamma_m z}) \quad (2)$$

여기서

$$\Gamma_L = (Z_L - Z_m)/(Z_L + Z_m) : \text{반사계수} \quad (3)$$

$$\gamma_m(\omega_m) = \alpha_m + j\beta_m : \text{MW 전파상수} \quad (4)$$

$$Z_{in}(\omega_m) = Z_m \frac{Z_L + Z_m \tanh(\gamma_m L)}{Z_m + Z_L \tanh(\gamma_m L)} : \text{입력 임피던스} \quad (5)$$

광도파로를 따라 전파하는 도파광은 도파로 위에 놓인 전극을 따라 진행되는 MW에 의해 전기광학효과를 받게된다. 식 (2)는 z축을 따라 진행되는 MW의 인가전압이며, 전송 선로를 따라 분포하는 상대 전위  $V'(z)$ 는

$$V'(\omega_m, z) = V(\omega_m, z) / e^{-j\frac{\omega_m}{\omega_0} \beta_m z} \\ = V_s \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_0} \frac{1}{1 + \Gamma_L e^{-2\gamma_m L}} (e^{\beta_m z} + \Gamma_L e^{-2\gamma_m L} e^{\beta_m z}) \quad (6)$$

여기서

$$p^+ = -\alpha_m - j\frac{\omega_m}{c_0} (N_{eff} - n_{eff}) \quad (7)$$

$$p^- = \alpha_m + j\frac{\omega_m}{c_0} (N_{eff} + n_{eff}) \quad (8)$$

한편, 전극의 변조영역에서 일어나는 굴절률 변화  $\Delta n(\omega_m)$ 는 균일한 전극에 대해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta n(\omega_m) \triangleq c_{eo} \left| \int_a^b V'(\omega_m, z) dz \right| \\ = c_{eo} \left| V_s \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_0} \frac{1}{1 + \Gamma_L e^{-2\gamma_m L}} \int_a^b g(\omega_m, z) dz \right| \quad (9)$$

여기서

$$g(\omega_m, z) = e^{\beta_m z} + \Gamma_L e^{-2\gamma_m L} e^{\beta_m z} \quad (10)$$

$$c_{eo} = \frac{1}{2} n_{eff}^3 r_{33} \Gamma \frac{1}{S} \quad (11)$$

$\Delta n(0)$ 는 dc전압이 인가된 경우 굴절률 변화이다.  $a$ 와  $b$ 사이의 거리는 MW와 광파가 상호작용을 하는 영역의 길이이다.  $r_{33}$ ,  $\Gamma$  그리고  $S$ 는 각각 전기광학 계수, 중첩 적분인자, 그리고 전극 사이의 간격을 의미한

다. 계수  $c_{\omega}$ 는 전기광학 효과의 비례상수이다.

식 (9)~(11)을 통해 m-section의 위상반전을 가지는 전극인 경우  $\overline{\Delta n}(0)$ 에 대한  $\overline{\Delta n}(\omega_m)$ 의 비는 다음과 같 이 된다.

$$\frac{\overline{\Delta n}(\omega_m)}{\overline{\Delta n}(0)} = \left| \frac{Z_{in}}{Z_L} \frac{Z_L + Z_s}{Z_{in} + Z_L} \frac{m}{(b-a)(1 + \Gamma_L e^{-2r_a L})} \left[ \int_a^{a+h} g(\omega_m, z) dz - \int_{a+h}^{a+2h} g(\omega_m, z) dz \right] \dots \dots \int_{b-h}^b g(\omega_m, z) dz \right| \quad (12)$$

2) m-section Mach-Zehnder 광변조기의 주파수응답  
Mach-Zehnder 광변조기의 변조영역(1)에서 스위칭 동작이 수행될 때, 두 도파로 사이의 전파상수의 차이  $\Delta\beta(\omega_m)$ 과 굴절률 차이  $\overline{\Delta n}(\omega_m)$ 은 다음과 같은 관계 를 만족한다.

$$\Delta\beta(0) \cdot l = \pi \quad (\text{완전스위칭을 위한 bias}) \quad (13)$$

$$\Delta\beta(\omega_m) \approx k_0 \overline{\Delta n}(\omega_m) \quad (14)$$

일반적인 Mach-Zehnder 간섭기의 정규화 된 광 출 력 세기  $I(\omega_m)$ 는 다음과 같다.

$$I(\omega_m) = \cos^2 \left( \frac{\Delta\beta(\omega_m)l}{2} + \phi_0 \right) \quad (15)$$

여기서

$$\Delta\beta(\omega_m) = \beta_1(\omega_m) - \beta_2(\omega_m) \quad (16)$$

주파수응답  $R(\omega_m)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$R(\omega_m) \triangleq \sqrt{\frac{I(\omega_m) - I_{\phi_0}}{I(0) - I_{\phi_0}}} \quad \text{여기서 } I_{\phi_0} = \cos^2 \phi_0 \quad (17)$$

$\phi_0$ 는 광 바이어스 점이고  $I_{\phi_0}$ 는 dc 바이어스에서 검출 된 광 출력세기이다. 대칭 M-Z 간섭기에 전압이 인가 되지 않았을 때( $\Delta\beta=0$ ) 출력 세기는 1이므로,  $\phi_0=0$ 인 경우  $I_{\phi_0}=1$ 이다. 그러면 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 주파수응답  $R(\omega_m)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(\omega_m) = \left| \frac{\cos^2 \frac{\Delta\beta(\omega_m)l}{2} - 1}{\cos^2 \frac{\Delta\beta(0)l}{2} - 1} \right|^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left| \sin \left( \frac{\pi}{2} \frac{\Delta\beta(\omega_m)}{\Delta\beta(0)} \right) \right| = \left| \sin \left( \frac{\pi}{2} \frac{\overline{\Delta n}(\omega_m)}{\overline{\Delta n}(0)} \right) \right| \quad (18)$$

3) S 파라미터 측정 및 진행파 전극 파라미터 추출

A. S<sub>11</sub>'

그림 10은 특성 임피던스  $Z_s$ ,  $Z_L$ 인 connector에 특 성임피던스  $Z_m$ 인 전송선로가 연결되어 있을 때의 S 파라미터를 묘사한 것이다.

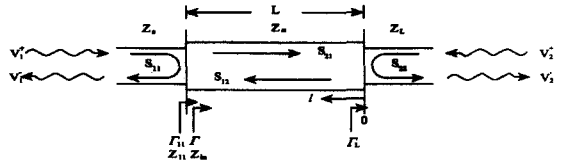
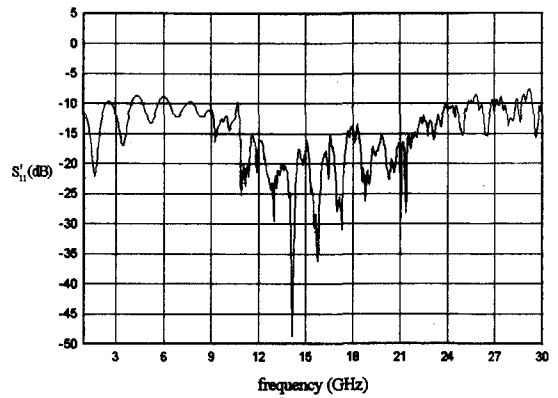
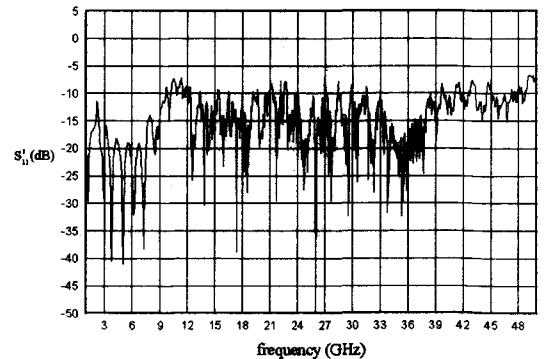


그림 10. 진행파전극의 S 파라미터  
Fig. 10. S parameters of traveling-wave electrodes.



(a) 3-section



(b) 5-section

그림 11. 반사특성 S<sub>11</sub>'  
(a) 3-section(b) 5-section

Fig. 11. Reflection characteristic S<sub>11</sub>'  
(a) 3-section(b) 5-section

입력단에서의  $\Gamma_{11}$  은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} = S_{11}' = S_{11} - \frac{S_{11}S_{21}\Gamma_L}{S_{22}\Gamma_L - 1} \quad (19)$$

여기서,

$$\Gamma_L = (Z_L - Z_m) / (Z_L + Z_m) \quad (20)$$

a) 진행파 전극의  $Z_m$  추출

그림 11의 반사특성 곡선을 보면 peak와 dip이 일정한 주파수마다 반복됨을 볼 수 있다. peak는 입력단에서 반사된 파와 출력단에서 반사된 파의 위상이 같아서 서로 더해져서 생기는 것이고, dip은 두 파의 위상이 반대가 되어 서로 상쇄가 일어난 것이다. 입력단에서의 입사파를  $V_1^+$ , 반사파를  $V_1^-$ , 출력단에서의 반사파를  $V_L^-$ 라 놓으면

$$\text{Peak(dB)} = 20 \log \frac{V_1^- + V_L^-}{V_1^+} \quad (21)$$

$$\text{Dip(dB)} = 20 \log \frac{V_1^- - V_L^-}{V_1^+} \quad (22)$$

이고 식 (21), (22)로부터 우리가 원하는  $S_{11}'$ 에 관한 성분을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{11}'(\text{dB}) &= 20 \log \frac{V_1^-}{V_1^+} \\ &= 20 \log \frac{1}{2} \left[ 10^{\frac{\text{Peak(dB)}}{20}} + 10^{\frac{\text{Dip(dB)}}{20}} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

한편,  $S_{11}'$ 과  $Z_m$  사이의 관계는 다음 식과 같다.

$$S_{11}'(\text{dB}) = 20 \log \frac{V_1^-}{V_1^+} = 20 \log \Gamma_{11} = 20 \log \left| \frac{Z_s - Z_m}{Z_s + Z_m} \right| \quad (24)$$

식 (23), (24)로부터 전극의 특성임피던스  $Z_m$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$Z_m = 36.5\Omega(3\text{-section})$$

$$Z_m = 35.7\Omega(5\text{-section})$$

이상의 결과는  $50\Omega$ 으로부터 충분히 벗어난 값이며, 서론에서 논의한 바와 같이 대역통과 특성을 갖는 위상반전 진행파 광변조기 설계에 적절한 수치이다.

b) MW 유효굴절률  $N_{eff}$  추출

MW가 소자의 길이가  $L$ 인 전극을 따라 진행할 때

$\Psi_m(z) = e^{-j\beta_m z}$ 에서 위상변화가 생기며 주파수에 따른 소멸간섭, 생성간섭을 고려하면 MW의 유효굴절률  $N_{eff}$ 는 다음과 같다.

$$N_{eff} = \frac{c_0}{2L\Delta f} \quad (25)$$

그림 11의  $S_{11}'$  곡선으로부터 MW의 유효굴절률은 다음과 같이 계산된다.

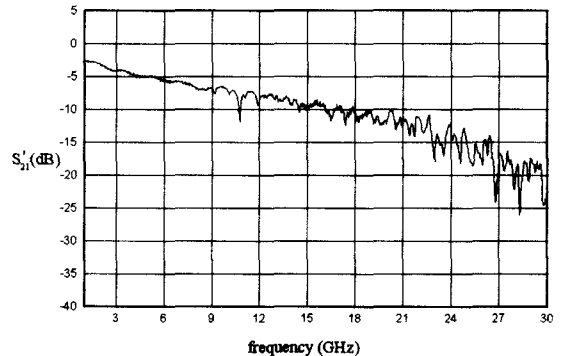
$$N_{eff} = 2.68(3\text{-section})$$

$$N_{eff} = 2.72(5\text{-section})$$

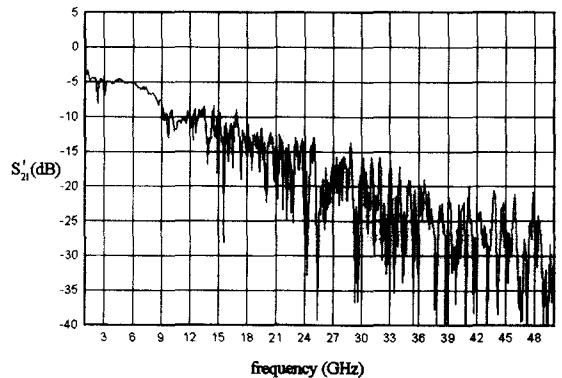
B.  $S_{21}'$

$S_{21}'$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{21}' = V_2^- / V_1^+ = \exp(\alpha_m L) = \exp(\alpha_0 \sqrt{f} L) \quad (26)$$



(a) 3-section



(b) 5-section

그림 12. 전달특성  $S_{21}'$

(a) 3-section (b) 5-section

Fig. 12. Transmission characteristic  $S_{21}'$ .

(a) 3-section (b) 5-section



그림 12의 S<sub>21</sub>' 곡선으로부터 전극의 감쇠정수 α<sub>0</sub>를 다음과 같이 구할 수 있다.

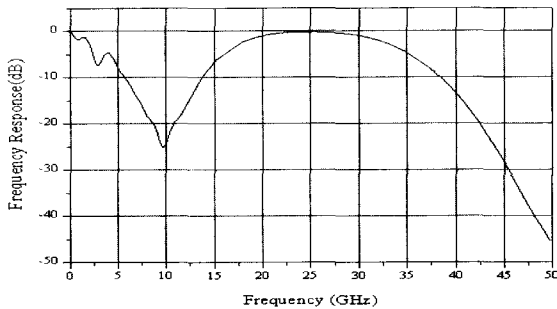
$$\alpha_m L = (\alpha_0 \sqrt{f}) L = y \text{ dB where } \alpha_0 : \text{dB/cm}\sqrt{\text{GHz}} \quad (27)$$

여기서 y는 특정 주파수 f에서 읽은 S21 곡선상의 값이다. 그림 12로부터 감쇠정수 α<sub>0</sub>를 구해보면 다음과 같다.

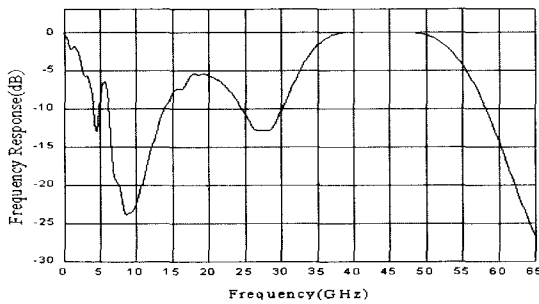
$$\alpha_0 = 0.078/\text{cm}\sqrt{\text{GHz}} \quad (3\text{-section})$$

$$\alpha_0 = 0.086/\text{cm}\sqrt{\text{GHz}} \quad (5\text{-section})$$

4) 광변조 응답



(a) 3-section



(b) 5-section

그림 13. 광출력 주파수응답

(a) 3-section (b) 5-section

Fig. 13. Optical Frequency Response.

(a) 3-section (b) 5-section

광 변조기의 성능을 나타내는 지표인 광의 예상 주파수 응답특성 R(ω)는 식 (18)로부터 구할 수 있다. 그림 13은 앞에서 추출한 Z<sub>m</sub>, N<sub>eff</sub>, α<sub>m</sub>등을 식 (18)에 대입해서 주파수 특성 R(ω)를 이론적으로 계산한 것이다.

그림 13 으로부터 본 대역통과 특성은 3-section의

경우가 확인한 것을 알 수 있으며, 두 위상반전 전극에 대한 예상 중심 주파수 f<sub>0</sub> 및 통과 대역폭 B.W.는 다음과 같다.

$$3\text{-section} : f_0 = 25\text{GHz}, \text{ B.W.} = 15\text{GHz}$$

$$5\text{-section} : f_0 = 45\text{GHz}, \text{ B.W.} = 22\text{GHz}$$

section 수가 커질수록 중심주파수 f<sub>0</sub>가 높아지고, 대역폭이 넓어지는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Ti:LiNbO<sub>3</sub> M-Z형 광도파로와 전극 반전을 가지는 CPW 구조의 진행파 전극으로 구성된 고속 외부 광변조기를 설계, 제작하였다. FDM을 이용하여 광도파로를 설계하였으며, CPW 진행파 전극은 SOR에 의해 위상속도 및 특성 임피던스 정합 조건을 만족하는 구조로 설계하였다. 관심 주파수에서 광응답 특성이 좋은 Bandpass 동작을 하도록 하기 위해 3개, 5개의 위상반전을 가지는 전극을 제작하였다. 광도파로 제작을 위하여 진공열증착, 표준사진석판, Ti 내부화산 공법 등이 사용되었다. SiO<sub>2</sub> 완충박막과 진행파 전극의 성장을 위하여 각각 PECVD와 전기분해 공정을 사용하였다.

제작된 소자는 성능을 테스트하기 위해 광도파 실험과 회로분석기(Network Analyzer)를 이용하여 진행파 전극의 S 파라미터를 측정하였다. 측정된 S 파라미터 곡선들로부터 추출된 진행파 전극 특성은 3-section 전극이 α<sub>0</sub>=0.6775dB/cm√GHz, N<sub>eff</sub>=2.68, Z<sub>c</sub>=36.5Ω이었으며, 반사계수 Γ는 -15dB이하로 관측되었다. 또한 5-section 전극에서는 α<sub>0</sub>=0.7479dB/cm√GHz, N<sub>eff</sub>=2.72, Z<sub>m</sub>=35.7Ω의 전극 파라미터가 추출되었다. 3-section 및 5-section 전극의 감쇠상수 α<sub>0</sub>가 크게 나온 이유는 Network Analyzer와 진행파전극 mount의 connector 부정합, mount와 변조기 chip과의 silver paste bonding 불량, 성장시킨 Au 전극의 표면의 거칠기로 인한 것으로 추정된다.

MW 특성으로부터 계산된 주파수 응답은 3-section 전극이 중심주파수 25GHz인 약 15GHz의 대역폭이 예측되었고, 5-section 전극은 중심주파수 45GHz인 약 22GHz의 대역폭이 예측되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] X. Zhang and T. Miyoshi, "Optimum design of coplanar waveguide for LiNbO<sub>3</sub> optical modulator," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 43, No. 3, pp. 523~528, 1995.
- [2] K. W. Hui, K. S. Chiang, B. Wu, and Z. H. Zhang, "Electrode optimization for high-speed traveling-wave integrated optic modulators," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 16, No. 2, pp. 232~238, 1998.
- [3] S.-J. Chang, C.-L. Tsai, Y.-B. Lin, J.-F. Liu, and W.-S. Wang, "Improved electrooptic modulator with ridge structure in X-cut LiNbO<sub>3</sub>," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 17, No. 5, pp. 843~847, 1999.
- [4] K. Noguchi, O. Mitomi, and H. Miyazawa, "Millimeter-wave Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulators," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 16, No. 4, pp. 615~619, 1998.
- [5] W. K. Burns, M. M. Howerton, R. P. Moeller, A. S. Greenblatt, and R. W. McElhanon, "Broad-band reflection traveling-wave LiNbO<sub>3</sub> modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No. 6, pp. 805~806, 1998.
- [6] K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa, and S. Seki, "A broadband Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator with a ridge structure," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 13, No. 6, pp. 1164~1168, 1995.
- [7] O. Mitomi, K. Noguchi, and H. Miyazawa, "Design of ultra-broadband LiNbO<sub>3</sub> optical modulators with ridge structure," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 43, No. 9, pp. 2203~2207, 1995.
- [8] R. C. Alferness, S. K. Korotky, and E. A. J. Marcatili, "Velocity-Matching Techniques for Integrated Optic Traveling Wave Switch/Modulators", *IEEE J. Quantum Electronics.*, Vol. QE-20, No. 3, pp. 301~309, March 1984.
- [9] D. Erasme, M. G. F. Wilson, "Analysis and optimization of integrated-optic travelling-wave modulators using periodic and non-periodic phase reversals", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 18, pp. 203~211, 1986.
- [10] W. Wang, R. Tavlykaev, and R. V. Ramaswamy, "Bandpass Traveling-Wave Mach-Zehnder Modulator in LiNbO<sub>3</sub> with Domain Reversal," *IEEE J. photon. Technol. Lett.*, Vol. 9, No. 5, pp. 610~612, May. 1997.
- [11] C. M. Kim and R. V. Ramaswamy, "Overlap integral factors in integrated optic modulators," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-7, No. 7, pp. 1063~1070, July 1989. (supported by U.S. Navy)
- [12] K. C. Gupta et al., *Microstrip lines and Slotlines*, Artech House, pp. 257~301, 1979.
- [13] 김창민, 한상필, "Ti:LiNbO<sub>3</sub> 진행파 광변조기의 FEM 전극해석 및 대역폭 예측", 대한전자공학회 논문지, 제32권, A편, 제2호, pp. 96~110, 1995
- [14] 정석원, 김창민, "진행파 광변조기의 Taper영역 전극 설계 : SOR기법," 한국광학회 논문지, 제7권, 제1호, pp. 78-86, 1996년 3월
- [15] 한영탁, 이우진, 고병국, 이병권, 김창민, "Mach-Zehnder 간섭기를 이용한 진행파 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기" 대한전자공학회지 논문지, 제38권 11호, pp. 27~39, 2001년 11월
- [16] 한영탁, 이우진, 김창민, "위상반전 진행파 광변조기에서 주파수응답의 추정", 한국광학회 논문지, 제12권 4호 pp. 327~333, 2001년 8월
- [17] Chang-Min Kim, and Young-Tak Han, "Optical Response of Triveling-Wave Optical Modulator with 3-Section Domain Reversal" 한국광학회 영문논문지, JOSK Vol. 5, No. 3, pp. 76~82, September 2001

## 저 자 소 개



李 禹 眞(正會員)

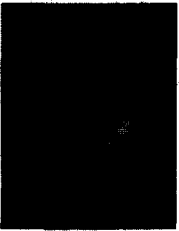
2000년 2월 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터학부 공학사. 2002년 2월 : 동 대학원 전자전기컴퓨터공학부 공학석사. 현재 : 한국전자통신연구원 반도체·원천기술연구소 광집속 모듈팀 연구원. <주관심분야: 광전자공학, 도파/집적광학, 광 스위치/변조기, 광통신시스템, FDM, FEM, BPM, SOR, FDTD 등 수치해석, WKB이론, 반도체 공정>



金 禹 京(正會員)

2001년 2월 서울시립대학교 전자전기공학부 졸업. 2001년 3월~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정. <주관심분야: 도파/집적광학, 광 스위치/변조기, 광통신 시스템, FEM, BPM, SOR 등 수치해석 등임>

金 昌 敏(正會員) 第38卷 SD編 第11號 參照



金 敬 岩(正會員)

2001년 2월 : 배재대학교 물리학과 졸업. 현재 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사과정. <주관심분야: 집적광학, 광스위치/변조기, 광통신시스템, 반도체 공정, FDM, FEM, SOR, 등 수치해석 등>