

X-대역 LFM 신호생성을 위한 진행파형 전광변조기의 설계 및 제작

이민우^{*,1)} · 류성준¹⁾ · 배영석¹⁾ · 장성훈¹⁾ · 유준형¹⁾ · 신진우¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 국방첨단과학기술연구원

Design and Manufacture of Traveling-wave Electro-optic Modulator for X-band LFM Signal Generation

Minwoo Yi^{*,1)} · Sungjun Yoo¹⁾ · Youngseok Bae¹⁾ · Sunghoon Jang¹⁾ · Joonhyung Ryoo¹⁾ · Jinwoo Shin¹⁾

¹⁾ Advanced Defense Science and Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 12 May 2021 / Revised 12 August 2021 / Accepted 8 October 2021)

Abstract

In this paper, a photonic-based microwave system technology is described, and a traveling-wave electro-optic modulator is designed and manufactured as a key component. The fabricated modulator is composed of a metal diffusion waveguide for optical transmission and a planar waveguide electrode on lithium niobate substrate for microwave transmission. The electro-optic response bandwidth of I and Q channels in a fabricated dual parallel Mach-Zehnder modulator were measured for 27.67 and 28.11 GHz, respectively. Photonic four times up-converted X-band frequency and linear frequency modulated signal were confirmed using the fabricated electro-optic modulator by S-band input signal. The confirmed broadband signal can be applied to a microwave system for surveillance and high-resolution ISAR imaging.

Key Words : Microwave Photonics(마이크로파 포토닉스), Electro-optic Modulator(전광변환기), Diffusion Waveguide(확산도파로), Traveling-wave Electrode(진행파형 전극)

1. 서론

최근 원격 감지 시스템의 성능 향상에 대한 요구가 높아짐에 따라 탐지 및 감시정찰로 제한되었던 기존의 레이더 시스템에서 다기능 및 다중대역 감시와 같

이 고도화된 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위하여 레이더를 포함한 전자소자를 이용한 시스템에서 광자 기반 마이크로파 기술이 제안되고 있다^{1,2)}. 제안된 기술은 광기술을 이용하여 마이크로파 신호를 생성 및 처리하는 기술로, 레이저에서 발생한 광신호를 마이크로파 대역의 신호로 전광(electro-optic) 변조하거나 복조하는 기술이다. 이 기술은 광학 변조기를 이용하기 때문에 기존 전자소자 기반의 시스템

* Corresponding author, E-mail: minuga@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

대비하여 주파수 상향/하향변환이 용이하고 광대역의 신호를 쉽게 만들 수 있는 장점을 가진다. 또한 경량화 및 저손실로 구성된 송신 채널로 원거리 전송이 가능하며, 수신 채널에서는 높은 신호 대 잡음비로 복조할 수 있는 특성을 갖고 있다.

본 논문에서는 연속파 광원을 이용한 광자기반 마이크로파 송수신 시스템의 핵심소자인 진행파형 전광변조기를 설계 및 제작하고, 이를 이용하여 XX-대역 Linear Frequency Modulation(LFM) 신호 생성을 확인하였다. 제작된 진행파형 전광변조기는 LiNbO₃ 기판에 광전송을 위한 Ti 확산도파로와 마이크로파 신호를 전달하기 위한 평면도파로 전극으로 구성된다.

2. 광자기반 X-대역 송수신 시스템 설계

Fig. 1은 광자기반 X-대역 송수신기의 개념도를 보여준다. 제안된 송수신기에서 송신부는 연속파형 레이저 다이오드 및 파형발생기에서 만들어진 신호를 IQ 변조기인 이중 마흐젠더 변조기(Dual Parallel Mach-Zehnder Modulator, DPMZM)에서 파형발생기의 기준신호를 원하는 X-대역으로 상향 변환하여 변조된 송신 주파수를 생성한다. 증폭된 송신신호는 송신안테나를 통해 방사되고 표적에서 반사된 신호는 수신안테나로 들어오게 된다. 송신 및 수신된 신호는 수신부의 위상 변조기(Phase Modulator, PM)에서 복조되고, 이 후 신호처리과정을 통해서 표적의 위치 및 속도 등의 정보를 획득할 수 있다^[3].

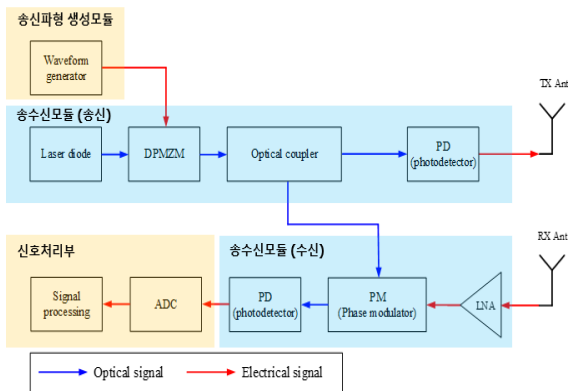


Fig. 1. Schematic of photonic-based X-band transceiver system

광자 기반 송수신 시스템은 기존 송수신 시스템에서 사용되는 전자적 디지털 신호생성기(Direct Digital Synthesizer, DDS) 방식이 아닌 레이저 신호원과 광변조기인 DPMZM 등의 광소자를 이용하여 광대역 특성을 도출한다. 우선, 레이저 다이오드에서 발생된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$E_i = E_c \cos(\omega_c t) \tag{1}$$

여기서 E_c 는 인가된 신호의 크기, ω_c 는 레이저 주파수이다. 레이저 신호원과 기저대역에서 중심주파수와 일정 대역폭을 갖는 신호는 DPMZM으로 인가되며, 레이저 신호원에서 인가된 신호는 IQ변조기인 DPMZM의 전압조절을 이용하여 다음과 같은 신호로 변조될 수 있다.

$$E_{DPMZM}(t) = \tag{2}$$

$$E_c \left[\sum_{n=1}^{\infty} J_{4n-2}(m) \left\{ \begin{aligned} &\cos(2\pi(f_c + (4n-2)f_{IF})t) \\ &+ \cos(2\pi(f_c - (4n-2)f_{IF})t) \end{aligned} \right\} \right]$$

여기서 f_{IF} 는 입력주파수, m 은 DPMZM에서 변조상수 차수, J_{4n-2} 는 Bessel 함수에서 $(4n-2)$ 차수를 의미한다. 식 (2)에서 2차 이상의 고주파 신호원이 매우 작으므로 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다^[4].

$$E_{DPMZM}(t) \cong E_c J_2(m) \left[\begin{aligned} &\cos(2\pi(f_c + 2f_{IF})t) \\ &+ \cos(2\pi(f_c - 2f_{IF})t) \end{aligned} \right] \tag{3}$$

위의 식과 같이 중심주파수에서 일정 대역폭을 갖는 마이크로파 입력신호는 DPMZM을 거쳐 4배 상향 변환된다. 광소자 기반을 이용하여 생성된 파형은 기존의 송수신 시스템에서의 믹서 및 필터 등과 같은 전자소자 없이 생성될 수 있으며, 광신호원 및 DPMZM을 이용하기 때문에 송신파형의 변화에 따라 자유롭게 중심주파수, 대역폭, chirp의 특성을 변화시킬 수 있다.

생성된 파형은 송신 광검출기를 통하여 전기신호로 변환된 후 송신안테나를 통해 표적으로 방사되며, 표적에 반사되어 돌아오는 신호는 수신안테나를 통해 수신된다. DPMZM을 거친 송신 광신호와 수신안테나

를 통해 들어온 수신 전기신호는 PM으로 인가되며, 비팅 주파수(beat frequency)를 생성하고 수신 광검출기를 거쳐 전기신호로 변환된다. 변환된 전기신호는 신호처리 되고 이를 이용하여 표적의 거리 및 ISAR 영상을 획득한다.

3. 확산도파로를 이용한 LiNbO₃ 전광변조기

광자기반 마이크로파 송수신시스템의 송신부에서는 광캐리어 주파수를 마이크로파 대역의 전기신호를 이용하여 광변조를 하는데 이때 전광변조기는 마이크로파 대역의 신호를 발생시키기 위한 핵심소자이다. 광캐리어 주파수의 변조는 레이저 다이오드의 신호를 직접 변조하는 기술도 개발되고 있으나, 장거리 전송을 위해서 외부 변조를 이용한 방식이 널리 활용되고 있으며, 이 중에서 LiNbO₃ 광변조기는 안정적인 고속 변조가 가능하기 때문에 널리 사용되고 있다^[5].

3.1 금속 확산방식을 이용한 광도파로 설계

LiNbO₃은 큐리 온도(T_c ~ 1142 °C) 이하에서 강유전체 성질을 갖고 있으며, 높은 큐리 온도를 갖고 있기 때문에 넓은 온도범위에서 이용이 가능하다. 또한 LiNbO₃는 전기광학텐서 중 r₃₃의 값이 크면서 수평과 수직 모두 전광변화가 가능하기 때문에 변조효율을 고려하여 r₃₃ 방향의 굴절률 변화를 이용한다. 이를 이용하여 진행파형 전극을 갖는 변조기 구조로 제작할 경우 30 GHz 이상의 대역까지 작동하는 전광변조기 구현이 가능하다^[6].

LiNbO₃ 기판을 이용한 광변조기에서 광전송을 위한 광도파로는 리튬 외부 확산도파로, 이온주입도파로, 양자교환 도파로, 티타늄 내부 확산도파로 등 여러 방법을 이용하여 구현되고 있다. 본 연구에서는 상대적으로 제조공정이 용이한 LiNbO₃ 기판에 금속 티타늄을 증착하여 확산시킨 채널형 내부 확산도파로의 특성을 연구하였다.

금속 확산 도파로 방식은 광도파로를 형성하려는 부분에 금속을 증착한 후 고온에서 금속을 내부로 확산시켜 광도파로를 제작하는 방법으로 확산 전 선포, 두께, 그리고 확산시간 및 확산 분위기 등의 변수에 따라 광도파로의 성능이 결정되어진다. Fig. 2는 z-cut LiNbO₃ 위에 확산 전에 증착된 티타늄 박막과 확산에 의해서 광도파로가 형성된 모습을 나타내고 있다. 2w

는 확산 전 티타늄 패턴의 폭, τ는 두께이다.

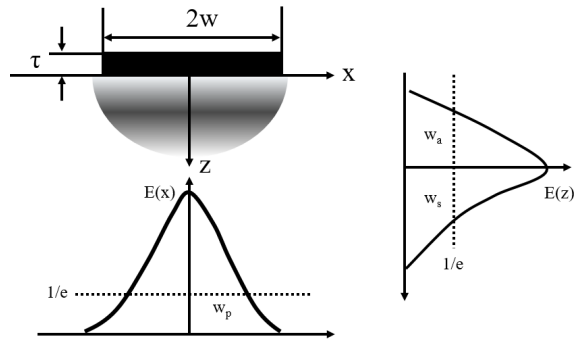


Fig. 2. E-field of titanium diffusion waveguide in z-cut LiNbO₃

티타늄 확산은 확산온도, 확산시간과 같은 확산변수에 변화에 의해 매우 다르게 나타내는데, LiNbO₃ 기관에서 시간에 따른 티타늄 확산길이는 $d_{z,x} = 2\sqrt{D_{z,x}t}$ 과 같으며, $D_{z,x}$ 는 확산계수 이다. 일반적으로 티타늄 박막(100~1000 Å)의 확산은 900 내지 1150 °C 범위의 온도에서 반응성 또는 불활성 분위기에서 수행되며, 확산시간은 0.5 내지 30 시간에서 이루어지며, 다양한 연구에서 확산계수가 보고되었다. 본 논문에서는 파장 1550 nm의 단일모드 광섬유와의 커플링을 고려하여 z-cut 기관에서 y방향으로 진행하는 티타늄 금속 확산 광도파로 제작을 위하여 $D_z = 2.19 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2/\text{s}$, $D_x = 1.7 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2/\text{s}$ 의 확산계수를 이용하였다^[7].

확산도파로에서 확산길이가 티타늄에 두께에 비해 충분히 크면서 티타늄이 모두 확산되도록 충분한 시간동안 내부 확산을 수행했을 때 확산도파로 내의 굴절률 변화의 분포는 다음과 같다^[8].

$$\Delta n(\lambda, z, x) = A(\lambda, C_s)[C(z, x)]^\gamma \quad (4)$$

여기서 $A(\lambda, C_s)$ 와 γ 는 분산계수 및 분산지수로 실험적으로 결정된다. 이때 굴절률은 확산도파로의 티타늄 분포에 의해서 결정되며, 분산방정식에 의해 확산길이에 따른 확산분포는 다음과 같이 표현될 수 있다.

Fig. 3은 증착된 티타늄의 너비를 변화시켰을 때 확산방향에 따른 티타늄 확산분포를 나타내고 있다. 초기 확산변수는 티타늄 두께 750 Å을 1025 °C에서 9시간 확산하였다^[9].

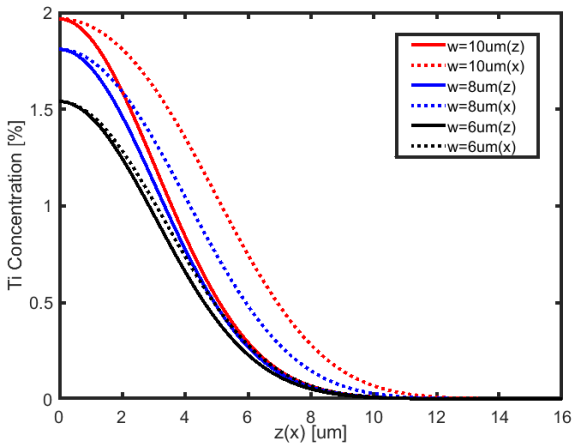


Fig. 3. Ti Concentration according to vertical and lateral position for different titanium width

$$C(z,x) = \frac{1}{2} C_0 \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\tau+z}{d_z}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\tau-z}{d_z}\right) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{w+x}{d_x}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{w-x}{d_x}\right) \right] \quad (5)$$

Fig. 4는 형성된 확산도파로에서 티타늄 폭(w) $6 \mu\text{m}$ 에서의 전계분포를 나타내고 있다. 확산도파로의 경우 서로 다른 확산계수로 인하여 비대칭인 형태를 가지고 있기 때문에 단일모드 광섬유와의 커플링을 고려하여만 삽입손실을 줄일 수 있다. 단일모드 광섬유와 확산도파로의 커플링 효율은 아래와 같이 표현된다^[10].

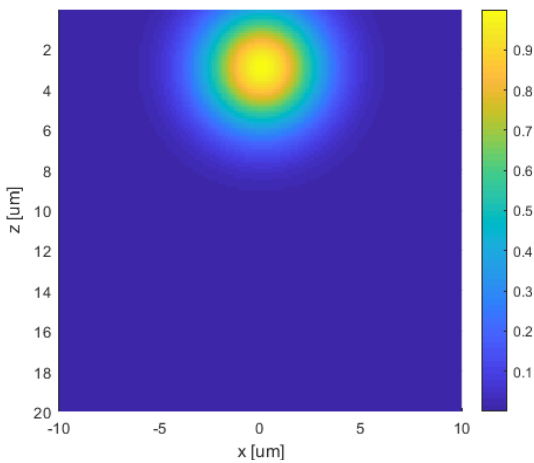


Fig. 4. Calculation of normalized E-field of Ti diffusion waveguide

$$\eta = \frac{2 \left[\sqrt{(1/a^2 + 1/w_a^2)} + \sqrt{(1/a^2 + 1/w_s^2)} \right]^2}{a^2 w_p (w_a + w_s) (1/a^2 + 1/w_p^2)} \quad (6)$$

여기서, $2a$ 는 단일모드 광섬유의 모드직경이다. 모드 직경 $10 \mu\text{m}$ 의 1550 nm 단일모드 광섬유에서 계산된 커플링 효율은 -2.5036 dB 이며, 확산도파로의 대칭도 $r(=w_a/w_s)$ 은 0.9905 , 이심율 $\epsilon(=2w_p/(w_a + w_s))$ 은 1 이었다. 따라서, 계산된 티타늄 확산도파로는 단일모드 광섬유와 매우 잘 결합될 수 있다.

3.2 진행파 전극 설계

Fig. 5는 제작을 위한 진행파형 전광변조기의 전극 형상을 보여준다. 본 논문의 진행파형 전광변조기는 Ti 확산도파로와 Coplanar Waveguide(CPW) 전극으로 구성되며, Au으로 이루어진 전극은 두 전파의 속도부정합을 개선하기 위해 적용된 SiO_2 박막 위에 위치하며, 확산도파로는 LiNbO_3 기판 내부에 존재한다^[11].

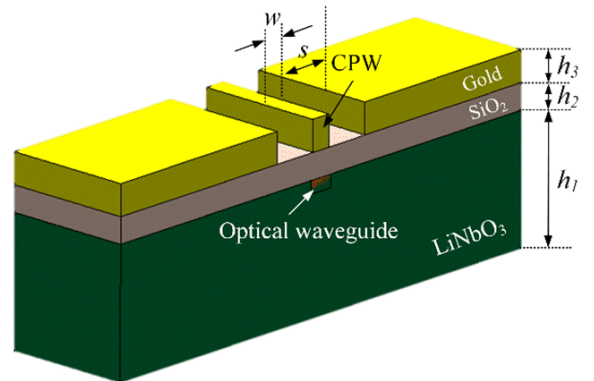


Fig. 5. Cross section view of coplanar traveling-wave electrode for LiNbO_3 electro-optic modulator

진행파형 전광변조기의 광대역 성능을 얻기 위해서는 진행파형 전극의 낮은 마이크로파 손실과 광파와 마이크로파의 위상속도 정합을 동시에 만족하여야 하는데 이러한 조건을 고려하여 진행파형의 전극을 설계하였다. Fig. 6은 전광변조기의 전극을 설계하기 위하여 등각상상좌표계 방식^[12]을 이용한 결과로 전극 금속의 두께 $20 \mu\text{m}$, SiO_2 유전층 두께 $1.5 \mu\text{m}$ 일 때 전극의 폭(w)과 간격(s)을 변화시키면서 유효굴절률과 특성임피던스를 계산하였다.

Fig. 6의 결과를 살펴보면 측정된 광도파로의 굴절

물 2.33을 진행하는 광파의 위상정합과 전파의 특성 임피던스 50 Ω 매칭을 동시에 만족하기 매우 어렵다. 하지만 광대역 광변조기에서는 광파와 전파를 위상정합하여 전광변환 효율을 높이는 것이 중요하기 때문에 광도파로의 유효굴절률 부근에서 전극의 폭과 간격을 설정하였다. 광파의 단일모드 크기를 함께 고려하여 폭(w) 10 μm, 간격(s) 10~20 μm 설정하였고 이 영역에서 특성임피던스는 약 30~37 Ω의 범위를 갖는다.

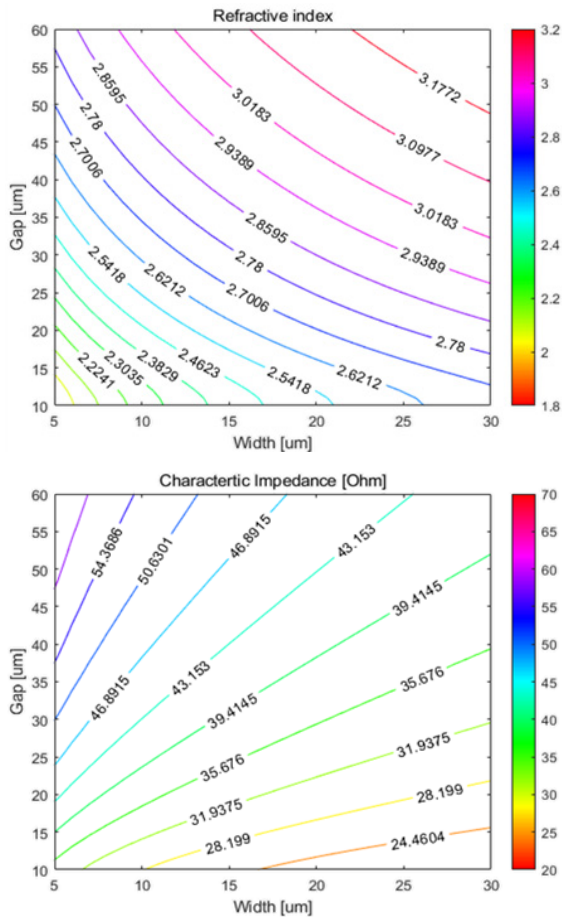


Fig. 6. Calculated effective refractive index(top) and characteristic impedance(bottom) of CPW electrodes with SiO₂ buffer layer

Fig. 7은 CPW 전극의 폭과 간격이 각각 10 μm, 20 μm 그리고, 그라운드 폭 100 μm 일 때 전극의 길이가 1 cm인 경우 측정된 전파특성의 결과이다. X-대역 이상을 포함하는 20 GHz 주파수 대역까지 반사계수 및

투과계수가 -15 dB 및 -3 dB이하로 측정되었기 때문에 낮은 전파손실로 마이크로파는 금속 전극에서 도파될 수 있다. 측정된 산란계수를 이용하여 계산된 전파의 굴절률을 Fig. 8에 도시하였다. 측정된 마이크로파 전파 굴절률은 X-대역 내에서 2.35로 계산된 Fig. 6에서 계산된 굴절률과 2 % 정도의 오차를 보이기 때문에 2 GHz 이상의 대역에서 광파와 전파는 정합 속도의 차이 없이 위상정합이 잘 일어날 수 있으며, 따라서 본 전극의 구조를 이용하여 제작될 전광변조기는 20 GHz 이상까지 작동됨을 예상할 수 있다.

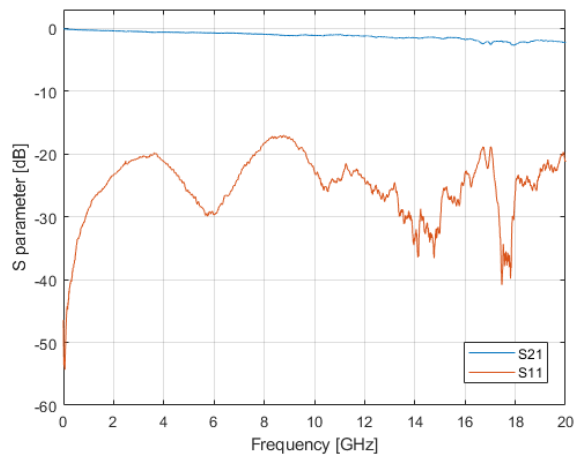


Fig. 7. Measured S-parameters of CPW electrodes with SiO₂ buffer layer

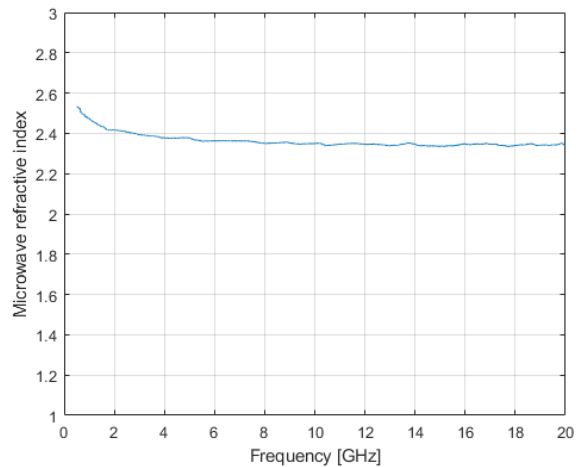


Fig. 8. Measured microwave refractive index of CPW electrode with SiO₂ buffer layer

4. LiNbO₃ 광변조기 제작 및 측정

광자기반 마이크로파 송수신시스템에서 요구되는 전광변조기는 앞서 설명하였듯이 DPMZM과 PM이다. 본 논문에서는 DPMZM의 제작 및 측정에 관하여 설명할 것이며, PM의 경우 동일한 공정에 의하여 제작이 가능하다. 4인치 z-cut LiNbO₃ 기판에 Ti 확산 광도파로와 전기도금 공정을 통하여 칩이 제작되었으며, 제작된 전광변조기 칩을 패키징한 후 전광변조기의 기본 성능을 확인하였다. 이 후 광자기반 마이크로파 송수신시스템의 활용여부를 판단하기 위하여 제작된 전광변조기를 이용하여 X-대역의 LFM신호 생성을 확인하였다.

4.1 LiNbO₃ 전광변조기 칩 제작

전광변조기 칩 공정은 상세공정을 통하여 제작되는데 크게 3단계로 구분할 수 있다. 1단계는 확산도파로 제작, 2단계는 SiO₂ 증착 및 열처리, 마지막 3단계는 전기도금 방식의 CPW 금속 증착이다.

- (1) LiNbO₃ 기판에 폭 12 μm 두께 750 Å Ti를 증착한 후 1025 °C에서 9시간을 확산한다.
- (2) 확산 광도파로를 생성한 후 1.5 μm 두께의 SiO₂ 기판박막을 증착하여 버퍼레이어를 생성한다.
- (3) CPW 전극생성을 위하여 Cr/Au(두께 600 Å/20 μm)의 전극을 금속증착과 전기도금 방식을 이용한다.

제작된 DPMZM 칩의 전극 크기를 확인하기 위하여 광학현미경을 이용하였다. CPW 선폭(w)은 10.28 μm, 그라운드/신호선 간 간격(s)은 19.87 μm, DC 전극은 16.45 μm, 알파스텝을 이용하여 측정된 CPW의 증착 두께는 20 μm 측정되어 공정 허용오차인 ±0.5 μm를 만족함을 Fig. 9와 같이 확인하였다.

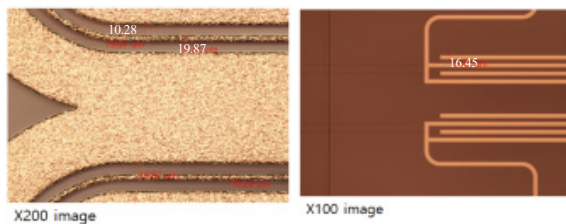


Fig. 9. Microscope images of fabricated CPW(left) and DC electrode(right)

4.2 DPMZM 패키징 제작

DPMZM의 측정을 위해 전광변조기 칩과 광섬유 연결을 위한 광섬유 블럭, 마이크로파 신호 급전용 서브 PCB를 본딩하여 하우징을 제작하였으며, 하우징의 크기는 길이 110 mm, 넓이 42 mm, 높이 11 mm 이다. 제작에 사용된 서브 PCB의 형상을 포함한 내부레이아웃과 제작된 패키징 변조기는 Fig. 10과 같다.

서브 PCB 기판은 Rogers 4003C를 사용하여 제작되었으며, 20 GHz 이상의 마이크로파 전송이 가능하도록 K Female 커넥터와 스트립 라인 형태의 전송선로를 구성하였다.

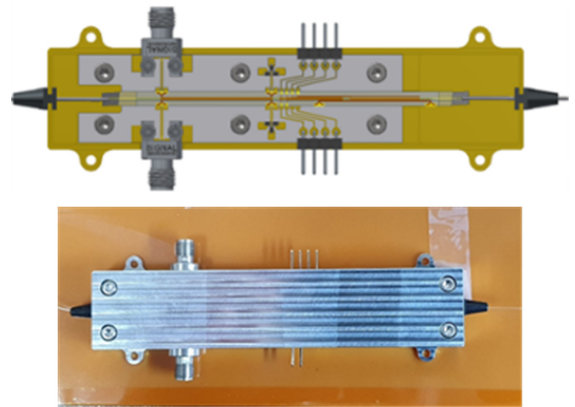


Fig. 10. Internal layout image(top) and external packaging photo(bottom) of manufactured traveling-wave DPMZM

4.3 제작된 DPMZM의 성능측정결과

제작된 DPMZM의 성능을 확인하기 위하여 광신호 삽입손실, 반파전압, 전광변환대역폭과 같은 주요 항목에 대하여 측정하였다. 측정은 중심파장 1550 nm에서 100 kHz의 선폭을 갖는 광원과 Keysight사의 Lightwave Component Analyzer N4373D를 이용하였다.

우선, 광 삽입손실 측정을 위해 DPMZM에 인가되는 DC 전원공급기의 전압을 DPMZM을 지나서 출력된 광신호가 최대 투과조건이 되도록 설정 후 광원의 입력 신호 크기 대비 출력 광신호의 크기를 측정하여 삽입손실을 확인하였다. 제작된 DPMZM의 광 삽입손실의 측정 결과 6.7 dB로 확인되었다. 3.1절에서 계산된 단일모드 광섬유와의 커플링 손실을 입출력단 양방향에서 고려하고 칩 내부의 도파손실 1.3 dB를 고려하면 광패키징 손실은 약 0.4 dB로 매우 작다.

제작된 DPMZM의 구동전압인 반파전압 V_{π} 측정을 위해 DPMZM에 인가되는 파형발생장치의 출력 전압을 변화 시키면서 오실로스코프의 파형이 베셀함수의 출력 형태를 나타내도록 설정한 후 I/Q 채널의 구동 전압을 각각 측정하였으며, 측정된 구동 전압은 I 채널 7.5 V, Q 채널 7.75 V 이다.

전광변환 대역폭 측정의 경우 교정된 네트워크 분석기를 이용하여 DPMZM의 반사계수를 측정하였으며, 측정된 전광 대역폭의 Intensity Response는 I채널 27.67 GHz, Q채널 28.11 GHz로 Fig. 11과 같이 확인되었다.

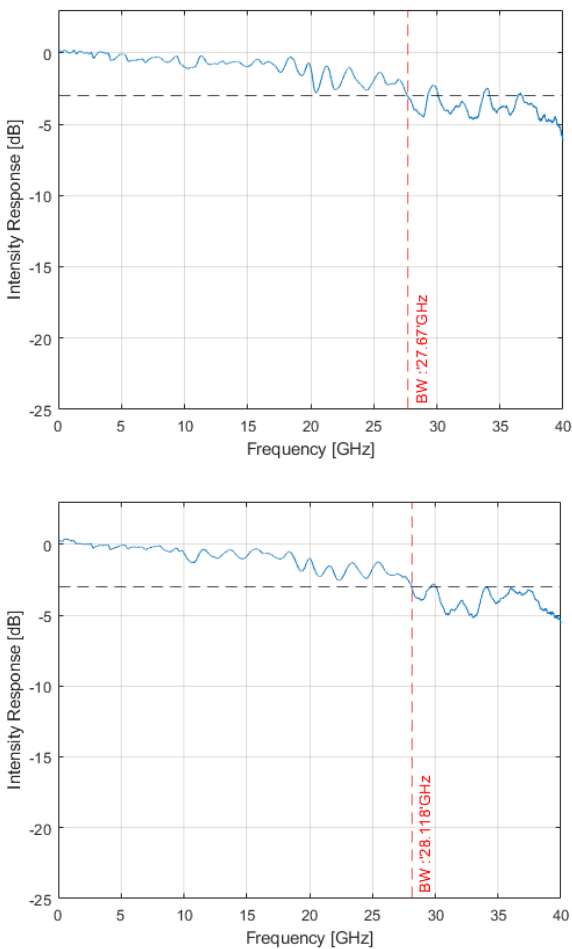


Fig. 11. Intensity EO response of I(top) and Q(bottom) channel for the modulator

제작된 DPMZM의 변조기의 경우 K-대역까지의 입력 신호를 변조할 수 있으므로, 이를 활용하면 W-대역

까지의 체배된 광변조 신호를 생성할 수 있기 때문에 밀리미터파 대역 시스템에서 송신부 설계까지 활용할 수 있다.

5. 광자기반 X-대역 LFM 신호생성 확인

5.1 광자기반 주파수 상향변환

제작된 DPMZM을 이용하여 광자기반 주파수 상향 변환을 확인하기 위하여 입력신호로 S-대역 연속파 신호를 입력한 후 광검출기의 전기신호를 스펙트럼으로 측정하였다. 상향변환되어 생성된 주파수는 입력주파수의 4배에 해당하는 X-대역 신호로 측정된 신호는 다음의 Fig. 12와 같다.

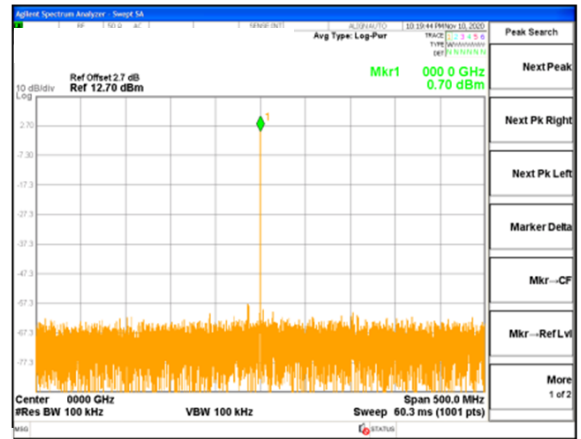


Fig. 12. Photonic-based up-converted microwave signal

5.2 광자기반 X-대역 LFM신호 생성

광자기반 X-대역 송수신 시스템 개발을 위하여 제작된 DPMZM이므로 이를 이용하여 광자기반 X-대역 LFM신호 생성을 확인하였다. LFM신호 생성 및 대역폭을 확인하기 위해서 입력신호로 Fig. 13과 같이 S-대역에서 일정 대역폭을 갖고 있는 선형주파수변환 (Linear Frequency Modulated Continuous Wave, LFM CW) 된 신호를 입력하여 변조된 주파수를 스펙트럼분석기를 통해 확인하였다. 확인 결과 X-대역 중심주파수에서 4배 넓어진 대역폭을 갖는 신호로 출력되어 원하는 주파수 상향변환 및 LFM 신호 생성을 Fig. 14와 같이 확인하였다.

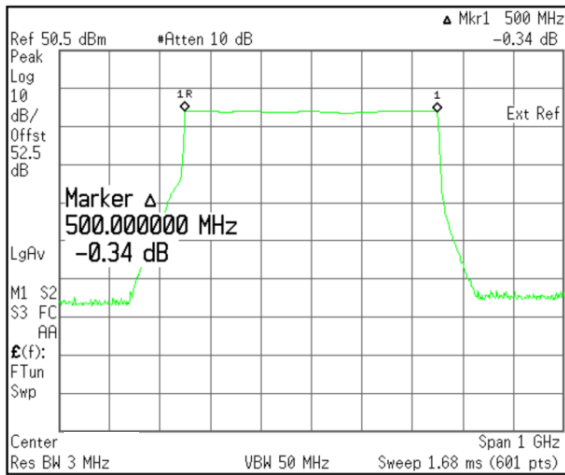


Fig. 13. Input LFM microwave signal for photonic-based up-converting method

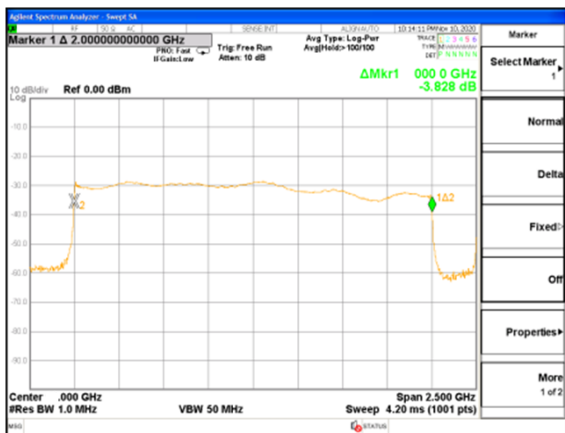


Fig. 14. Photonic-based up-converted LFM microwave signal

6. 결론

본 논문에서는 연속파 광원을 이용한 광자기반 마이크로파 송수신 시스템 기술을 설명하고 핵심소자인 진행파형 전광변조기를 설계 및 제작하였다. 제작된 진행파형 전광변조기는 LiNbO₃ 기판에 광전송을 위한 Ti 확산도파로와 마이크로파 신호를 전달하기 위한 평면도파로 전극으로 구성된다. 제작된 DPMZM의 전광변환 대역폭의 경우 I채널 27.67 GHz, Q채널 28.11

GHz로 확인되었다.

또한, 제작된 전광변조기를 이용하여 광자기반 주파수 상향변환 및 LFM신호 생성을 확인하였다. S-대역의 입력신호는 전광변조기의 상향변환을 통하여 X-대역 신호로 변조되었으며, S-대역의 중심주파수에서 일정한 대역폭을 갖는 입력신호는 전광변조기를 거쳐 4배 배되어 X-대역 중심주파수에서 대역폭 또한 4배 넓어진 신호로 변조되었다. 넓은 대역폭을 갖는 LFM 신호는 고해상도 ISAR 영상을 얻기 위한 마이크로파 송수신 시스템에 적용이 가능하며, 제작된 전광변조기는 X-대역 이상의 K-대역 송수신시스템까지 활용될 수 있다.

References

- [1] A. J. Seeds and K. J. Williams, "Microwave Photonics," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 12, pp. 4628-4641, 2006.
- [2] J. Yao, "Microwave Photonics : Photonic Generation of Microwave and Millimeter-Wave Signal," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 3, pp. 314-335, 2009.
- [3] F. Zhang, Q. Guo, and S. Pan, "Photonics-based Real-Time Ultra-High-Range-Resolution Radar with Broadband Signal Generation and Processing," *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-8, 2017.
- [4] Y. Bae, M. Yi, J. Shin, and S. G. Lee, "X-Band Photonic-based Pulsed Radar Architecture with a High Range Resolution," *Applied Science*, Vol. 10, No. 18, p. 6558, 2020.
- [5] Ed L. Wooten, et. al. "A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 6, No. 1, pp. 69-82, 2000.
- [6] M. Rangaraj, T. Hosoi, and M. Kondo, "A Wide-Band Ti: LiNbO₃ Optical Modulator with a Conventional Coplanar Waveguide Type Electrode," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 4, No. 9, pp. 1020-1022, 1992.
- [7] M. D. Feit, et. al., "Comparison of Calculated and Measured Performance of Diffused Channel-Waveguide Couplers," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 73, No. 10, pp.

- 1296-1304, 1983.
- [8] S. Fouchet, A. Carencio, C. Daguët, R. Guglielmi, and L. Riviere, "Wavelength Dispersion of Ti Induced Refractive Index Change in LiNbO₃ as a Function of Diffusion Parameters," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 5, No. 5, pp. 700-708, 1987.
- [9] M. Fontaine, A. Delage, and D. Landheer, "Modeling of Titanium Diffusion into LiNbO Using a Depth-Dependent Diffusion Coefficient," *J. Appl. Phys.*, Vol. 60, No. 7, pp. 2343-2350, 1986.
- [10] L. McCaughan and E. Murphy, "Influence of Temperature and Initial Titanium Dimensions on Fiber-Ti : LiNbO₃ Waveguide Insertion Loss at $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$," *IEEE J. Quantum Elect.*, Vol. QE-19, No. 2, pp. 131-136, 1983.
- [11] R. A. Becker and B. E. Kincaid, "Improved Electrooptic Efficiency in Guided-Wave Modulators," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 11, No. 12, pp. 2076-2079, 1993.
- [12] H. Chung, W. S. C. Chang, and E. L. Adler, "Modeling and Optimization of Traveling-Wave LiNbO₃ Interferometric Modulators," *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. 27, No. 3, pp. 608-617, 1991.