

LiNbO₃ 기판의 분극반전을 이용한 5.5 GHz 대역 SSB 광변조기의 설계 및 제작

정우진[†]

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과
☎ 130-020 서울시 동대문구 전농동 90

김우경 · 양우석 · 이형만 · 이한영

전자부품연구원 나노바이오 센터
☎ 463-816 경기도 성남시 분당구 야탑동 68번지

권순우

한국항공대학교 항공재료공학과
☎ 412-791 경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

(2006년 2월 6일 받음, 2006년 4월 6일 수정본 받음)

리튬나이오베이트 기판의 분극 반전 기술을 이용하여 5.5 GHz대역의 SSB(Single Sideband) 광변조기를 설계 및 제작하였다. 분극 반전을 통해 광이 인가받는 유효전계가 마흐젠더 두 도파로에서 90° 위상차를 갖도록 할 수 있었다. 제작된 광변조기는 5.8 GHz의 중심주파수로, 1.9 V DC 인가 시 약 33 dB의 USB 억제율을, -10.6 V 인가 시 약 25 dB의 LSB 억제율을 나타내었다. 또한 2.5 GHz의 대역폭에서 15 dB 이하의 Sideband 억제율을 보이고 있다.

주제어 : SSB Optical Modulator, Sideband suppression, Local domain-inversion.

I 서 론

이동매체가 멀티미디어로서의 역할을 수행하면서 초고속 및 광대역 무선통신서비스에 대한 요구가 증가하고 있다. 밀리미터파 ROF(radio on fiber)시스템은 이러한 요구와 주파수 자원 부족이라는 문제에 대한 해결책으로 제안되고 있으며, 가까운 미래에 현실화될 것이다. 특히 60 GHz 대역은 산소분자의 높은 흡수율로 인해 주파수 재활용이라는 측면에서 ROF시스템의 전송주파수 대역으로 주목받고 있다. 60 GHz ROF 시스템의 송신부는 크게 60 GHz 주파수 간격을 갖는 dual frequency 광원과 중간주파수 대역 변조기로 구성된다.^[1-5] 이때 DSB(Double Sideband) 변조기를 사용한다면 색분산에 의한 영향으로 전송거리가 따른 신호왜곡이 발생할 수 있으며, 이는 ROF시스템의 성능을 제약하는 주요원인으로 작용한다. 이러한 이유로 LSB(Lowe Sideband) 혹은 USB(Upper Sideband) 신호를 제거함으로써 색분산에 의한 영향을 최소화할 수 있는 SSB(Single Sideband) 광변조기의 활용이 주목받고 있다.^[6] 일반적으로 SSB 광변조기는, 90° 위상차를 갖는 두 신호를 마흐젠더의 두 도파로에 각각 인가하는 구조를 취하는데, 이의 구동을 위해서는 90° 하이브리드 커플러와 같은 추가적인 RF 소자를 필요로 한다. 이러한 복잡한 구조를 피하기 위해 주기적인 분극반전을 이용한 SSB 변조방식이 도입되었다.^[7,8]

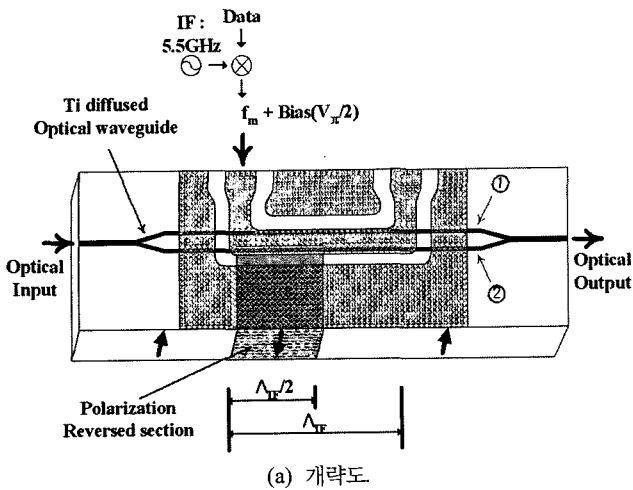
본 논문에서 한 개의 RF 신호로 SSB 변조를 수행하는 60 GHz ROF 시스템용 5.5 GHz 대역 변조기를 설계 및 제작하였다. 광과 RF간의 인위적인 위상속도 부정합과 리튬나이오베이트 기판의 부분적인 분극반전을 이용하여, 마흐젠더 두 도파로에 90° 위상차를 갖는 신호로 각각 위상 변조할 수 있었다. $\pi/4$ 의 바이어스 점에서 USB가 억제된 출력광 스펙트럼을 얻을 수 있었으며, $-\pi/4$ 의 바이어스 점에서는 LSB가 억제되었다. 특히, 본 논문에서 제안된 SSB 변조기는 기존의 SSB 변조기와 달리 분극반전 영역을 변조영역길이의 반주기로 한정되어 별도의 DC 바이어스 전극이 없이도 DC 동작을 수행하는 장점이 있다.

II. 동작 원리

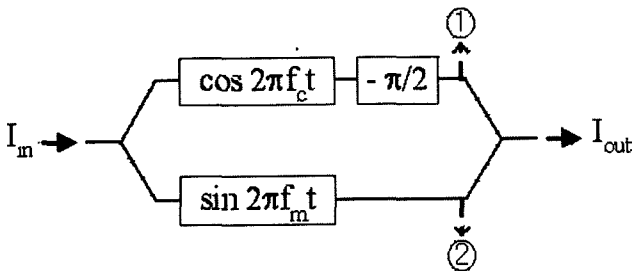
분극반전을 이용한 SSB 광변조기의 개략도와 블록 다이어그램이 그림 1에 도시되어 있다.

Ti가 확산되어 이루어진 마흐젠더형 간섭기 상부에 넓은 중앙전극이 위치해 있으며, 그 변조길이를 L_{IF} 라 할 때 마흐젠더 한쪽도파로의 $L_{IF}/2$ 영역이 부분적으로 분극반전된 형태를 취하고 있다. 도파광과 RF간의 위상속도 부정합에 의한 효과로, 변조영역을 진행하는 동안에 도파광의 위상속도 변화는 주기적인 분포를 나타낸다. 분극 반전의 영향으로 도파광의 총 위상변화량은 제 1 도파로와 제 2도파로에서 각각 다르게 되며, 특정한 주파수에서 그 차이는 90°만큼의 위상 지연으로 나타난다. 이러한 경우 그림 1(a)의 변조기의 구성

[†] E-mail: juni9842@uos.ac.kr



(a) 개략도



(b) 블록 다이어그램

그림 1. 분극반전된 구조를 갖는 집적형 광변조기.

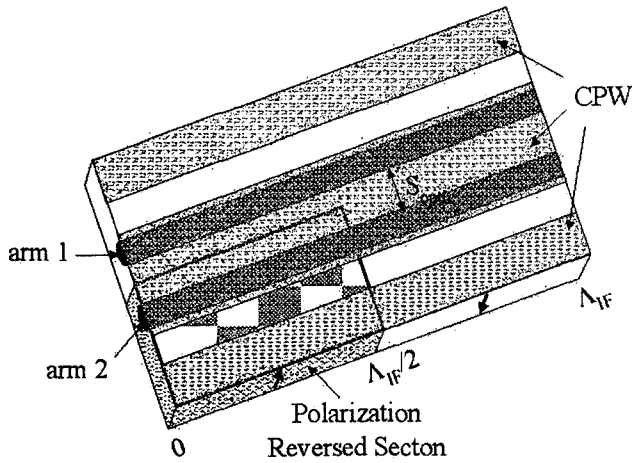


그림 2. 부분적으로 반전된 영역을 갖는 SSB 광변조기.

은 그림 1(b)와 같은 블록 다이어그램으로 간략화 될 수 있다.

그림 2는 부분적으로 반전된 영역을 갖는 분기된 마흐젠더 간섭계 영역으로, 분극 반전에 의한 RF의 위상지연 효과를 설명하기 위해 도시한 것이다. 입사된 광의 전기장 $E_0(t, z)$ 로, 전극에 인가되는 RF 변조신호의 전압 $V(t, z)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$E_0(t, z) = e^{j(2\pi f_0 t - \beta_0 z)} \quad (1)$$

$$V(t, z) = Ae^{-\alpha_{IF} z} \sin(2\pi f_{IF} t - \beta_{IF} z) \quad (2)$$

여기서, f_{IF} , α_{IF} , β_{IF} 는 각각 RF의 주파수, 감쇄상수 및 전파상수를 지칭한다.

이때 arm1과 arm2에 걸리는 총 유효전압 V_{eff1} 과 V_{eff2} 는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{eff1} = \int_0^{\Lambda_{IF}} Ae^{-\alpha_{IF} z} \sin\left[2\pi f_{IF}\left(t + \frac{n_0}{c}z\right) - \beta_{IF}z\right] dz$$

$$= \frac{A\alpha_{IF}}{\alpha_{IF}^2 + k^2} (1 + e^{-\alpha_{IF}\Lambda_{IF}}) \sin(2\pi f_{IF} t)$$

$$- \frac{Ak}{\alpha_{IF}^2 + k^2} (1 + e^{-\alpha_{IF}\Lambda_{IF}}) \cos(2\pi f_{IF} t) \quad (3)$$

$$V_{eff2} = -\int_0^{\Lambda_{IF}/2} Ae^{-\alpha_{IF} z} \sin\left[2\pi f_{IF}\left(t + \frac{n_0}{c}z\right) - \beta_{IF}z\right] dz$$

$$+ \int_{\Lambda_{IF}/2}^{\Lambda_{IF}} Ae^{-\alpha_{IF} z} \sin\left[2\pi f_{IF}\left(t + \frac{n_0}{c}z\right) - \beta_{IF}z\right] dz$$

$$= \frac{A}{\alpha_{IF}^2 + k^2} \left(k - ke^{-\alpha_{IF}\Lambda_{IF}} - 2\alpha_{IF}e^{-\alpha_{IF}\Lambda_{IF}/2}\right) \cos(2\pi f_{IF} t)$$

$$- \frac{A}{\alpha_{IF}^2 + k^2} \left(\alpha_{IF} - \alpha_{IF}e^{-\alpha_{IF}\Lambda_{IF}} + 2ke^{-\alpha_{IF}\Lambda_{IF}/2}\right) \sin(2\pi f_{IF} t) \quad (4)$$

여기서 $\Lambda_{IF} = \frac{c}{2f_{IF}(n_{IF} - n_0)}$, $k = \frac{\pi}{\Lambda_{IF}}$, n_{IF} 는 중간주파수대역의 유효굴절률을 지칭한다. 만일 RF waveguide가 무손실이면, 총 유효전압 V_{eff1} 과 V_{eff2} 는 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$V_{eff1} = -\frac{2A}{k} \cos(2\pi f_{IF} t) \quad (5)$$

$$V_{eff2} = -\frac{2A}{k} \sin(2\pi f_{IF} t) \quad (6)$$

식 (5), (6)로부터, 그림 2와 같은 부분적으로 반전된 구조를 이용하면 별도의 위상 지연기 없이도 $\pi/2$ 만큼의 위상차를 갖는 변조신호를 얻을 수 있어 SSB 변조를 가능하게 할 수 있다. 주기적 분극 반전을 이용한 기능성 변조기들은 그 협대역 특성으로 인해 DC 바이어스를 위한 별도의 전극을 필요로 하며, 이는 변조기의 집적화에 상당한 어려움으로 작용되고 있다. 그러나 제안한 구조와 같이 변조영역의 길이를 반주기로 한정하면, 별도의 전극 없이도 이러한 DC 동작을 가능하게 할 수 있다.

III. 광변조기 설계 및 모의 전산

설계된 광변조기에서, SiO₂ 버퍼층 및 전극의 두께는 각각 0.45 μm , 4 μm 이고 전극의 중앙폭과 간격은 각각 38 μm , 50 μm 이다. 이 때 RF의 특성 임피던스, 유효굴절률 및 감쇄상수는 각각 40 ohm, 3.76, 0.3 dB/cm $\sqrt{\text{GHz}}$ 이다. SSB 광변조기의 변조영역의 길이 Λ_{IF} 는 16.9 mm이다.

그림 3은 모의전산된 SSB 광변조기의 특성을 보여주고 있다. $\eta = (V_{eff2} - V_{eff1}) / (V_{eff2} + V_{eff1})$ 로 정의된 첩 파라미터

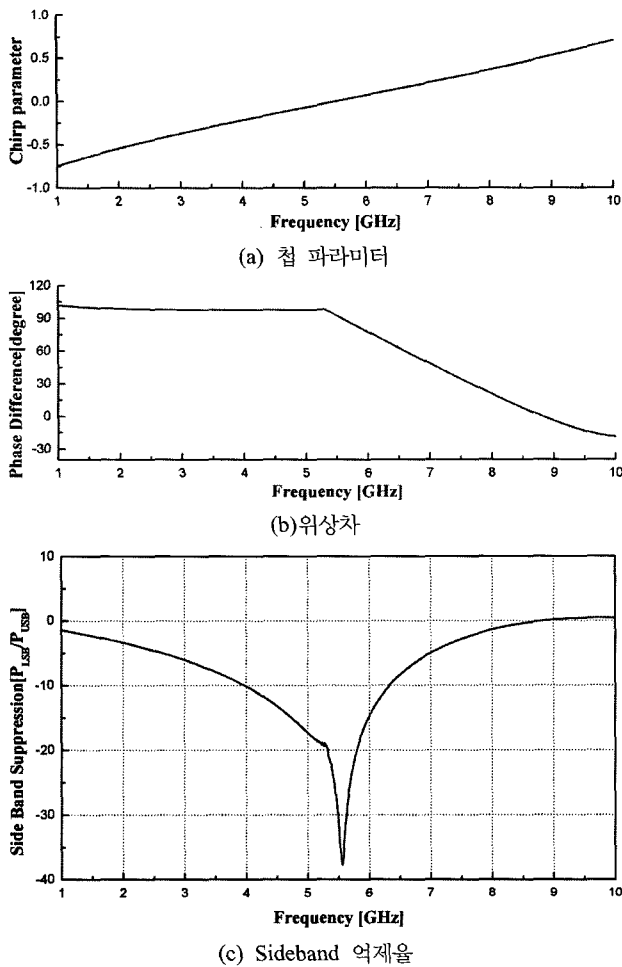


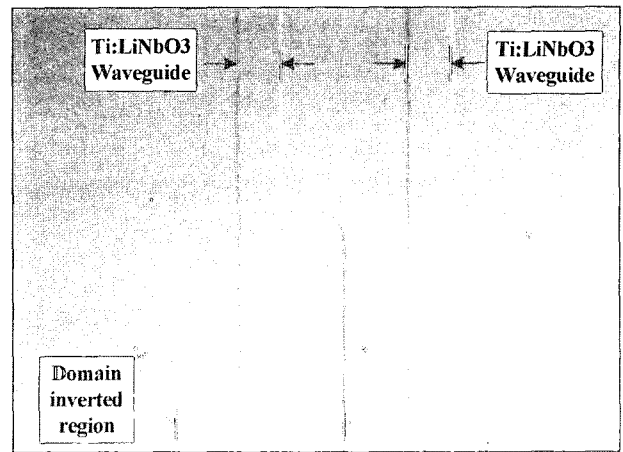
그림 3. 설계된 SSB 변조기의 특성

η 가 그림 3(a)와 같은 주파수의 함수로 도시되었고 5.5 GHz에서 대칭적인 동작을 수행함을 보이고 있다. 그림 3(b)는 총 유효전압 V_{eff1} 과 V_{eff2} 간의 위상차를 보여주고 있는데 역시 5.5 GHz에서 $\pi/2$ 의 위상차를 유지, 최적화된 SSB 광변조를 수행할 수 있음을 확인할 수 있다. 상기의 칩 파라미터와 위상차로부터 P_{LSB}/P_{USB} 로 정의되는 Sideband 억제율을 계산할 수 있으며, 그 결과가 그림 3(c)에 나타나 있다. 결과로부터 설계된 SSB 광변조기에서 Sideband 억제율 15 dB를 기준으로 사용가능한 주파수 대역은 대략 1.6 GHz 정도로 나타나고 있다.

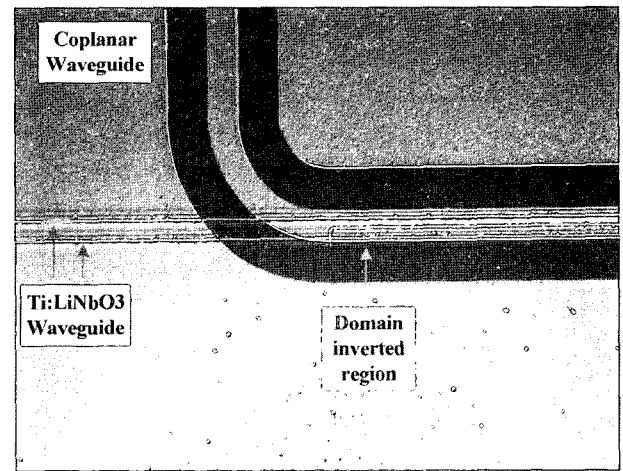
IV. 변조기 제작실험

4.1 광변조기 제작 과정

리튬나이오베이트 기판의 -z면에 Ti를 확산시켜 광도파로를 제작하였다. 고온 확산과정 중에 발생한 +z면의 마이크로도메인을 제거하기 위해 도파로 뒷면을 연마하였다. 연마된 기판의 전면을 분극반전한 후, 도파로 상부에 감광액 패턴을 형성하여 선택적인 영역에 한해 분극반전을 수행한다. 분극반전된 도파로 위에 450 nm 두께의 SiO₂ 층을 형성하고 Ti,



(a) 분극반전된 마흐젠더 도파로 형상



(b) 제작된 광변조기

그림 4. SSB 광변조기 형상.

Au를 200 nm 증착한 후, 도금공정을 사용하여 4 μ m 두께의 전극을 탑재하였다. 그림 4는 제작된 SSB 변조기를 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 분극 반전된 형상을 확인하기 위해 LiNbO₃ 식각용액(HF:HNO₃=1:2)에 약 15분 동안 식각하였다.^[9] 그림 4(a)는 마흐젠더 간섭기 영역을 보여주고 있는데, 정확히 한쪽 도파로에만 분극반전이 일어난 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 최종 제작된 광변조기를 보여주고 있으며, 마흐젠더의 두 도파로가 모두 중앙전극의 하부에 존재함을 알 수 있다.

4.2 분극 반전 실험 방법

기판의 +z면 위에 3 μ m정도의 감광액을 도포한 후 사진식각 공정으로 노광 및 현상을 통해 패턴을 형성하였다. 패턴이 형성된 기판에 전압을 인가하여 분극 반전시켰다.

그림 5는 분극반전시 사용된 시스템의 개략도이다. 기판의 두께를 t (mm)라 할 때 도메인 반전을 위한 구동전압 V_1 은 $23.4 \times t$ kV를, 저항 R_{vm} , R_s , R_m 은 각각 100 M Ω , 10 M Ω , 1 k Ω 을 사용하여 전류의 흐름을 조절하였다. 또한, 패턴이 형성된 결정에 외부전압을 인가하기 위해 결정과 전극사이에

LiCl 전해용액을 주입하였으며, 고무오링을 이용하여 전해용액의 방출을 막고 실리콘 오일을 사용하여 인가된 전압에 대한 누설 전류를 억제하였다. 분극반전 시 유발된 전류량은 current integrator에서 누적 계산되어 목표된 수치에 이르렀을 시 전압 인가가 차단되도록 하였다. 마흐젠더 간섭기의 두 도파로 중 한쪽만을 분극 반전시켜야 하므로, 이러한 시스템을 통해 분극 반전된 면적을 정확히 제어할 수 있었다.

그림 6은 선택적 분극반전시 인가된 전압과 그로 인해 유발된 전류의 변화를 도시한 것이다. 샘플에 가해지는 충격을 완화하기 위해 전압을 점진적으로 증가시켰으며, 목표한 전하량에 이르렀을 때 인가된 전압을 차단하였다. 그림으로부터 전압의 인가와 동시에 전류량이 증가·유지되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 리튬나리오베이트의 캐패시터 특성에 기인한 전류응답곡선으로 분극반전과는 관계가 없는 전류이다. $R_{vm} \gg R_s \gg R_m$ 이라 할 때 응답곡선의 시정수는 CR_s 이다. 이후 구동전압에 이르렀을 때 전류가 다시 증가·유지되는 것은 분극반전에 의한 영향으로 실제 분극 반전된 영역의 면적과 비례한다고 볼 수 있다.

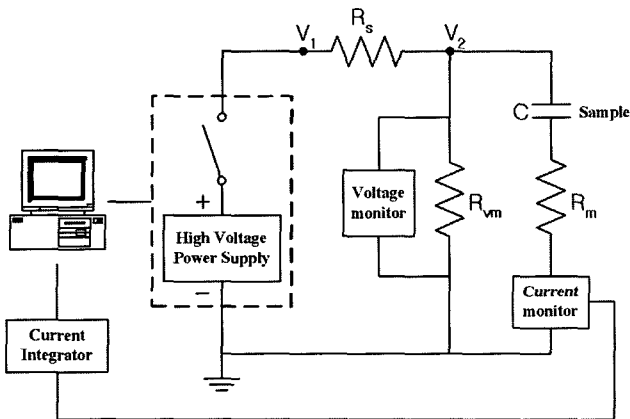


그림 5. 분극 반전을 위한 실험 구성도.

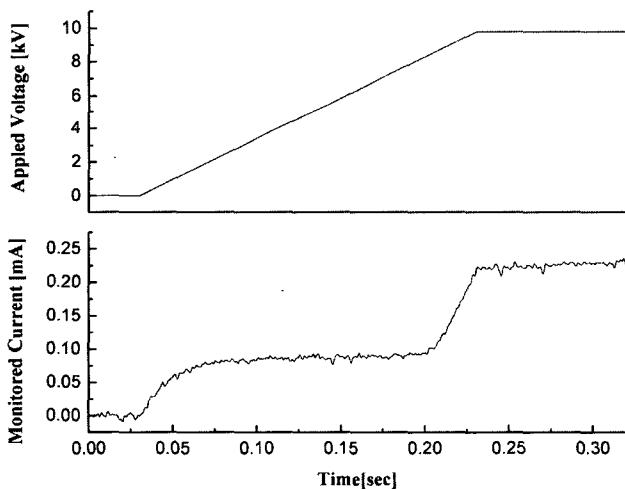


그림 6. 분극 반전시 인가된 전압과 유발된 전류변화.

V. 측정결과

5.1 전극 특성 측정

제작된 변조기의 RF S-parameter를 500 μm pitch GSG probe를 사용하여 측정하였고, 그 결과는 그림 7에 도시되어 있다.

반사특성은 20 GHz까지 14 dB이하의 값을 나타내었고, 투과특성은 3 dB이하로 측정되었다. 특히 5.5 GHz에서는 1.66 dB의 투과손실을 나타내어, 효율적인 SSB 억제를 가능하게 하였다.

5.2 SSB 변조 측정

광 입·출력을 위해 광변조기의 단면을 연마한 후 피그테일링하였으며, 이 때의 삽입손실은 도파로의 도파손실을 포함하여 4.5 dB이다. 광변조기의 RF 입력단에 V 커넥터를 연결하고 출력단에는 50 Ω 저항을 연결하여, 원활한 RF 입·출력이 가능하게 하였다. 제작된 광변조기의 SSB 억제 실험이 수행되었으며, 그림 8은 SSB 변조 실험을 위한 측정시스템의 개략도와 측정된 결과를 도시한 것이다. Signal Generator에서 출력된 신호를 RF 단자에 입사시키고, Power Supply를 이용하여 바이어스 단자에 DC 전압을 인가하였다. 이 때 출력되는 광 스펙트럼의 변화를 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다.

바이어스 단자에 1.9 V의 DC 전압을 인가한 후, 19 dBm의 5.8 GHz 신호를 RF 단자에 인가하면 그림 8(b)의 실선과 같은 광 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 그림에 표시된 점선은 RF을 인가하기 전의 광 스펙트럼 형상이다. 그림으로부터 입력 광의 주파수로부터 5.8 GHz 간격으로 신호가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 첫 번째 LSB에 비해 USB가 두드러지게 억제된 것을 알 수 있으며 그 억제율은 대략 33 dB이다. 이 때 바이어스를 -10.6 V로 바꾸면 그림 8(c)와 같은 스펙트럼을 얻을 수 있으며, 그림 8(b)과는 반대로 LSB가 억제된 것을 확인할 수 있었다.

5.3 변조대역폭 측정

그림 9는 그림 8(a)의 시스템을 통해 측정된 주파수에 따

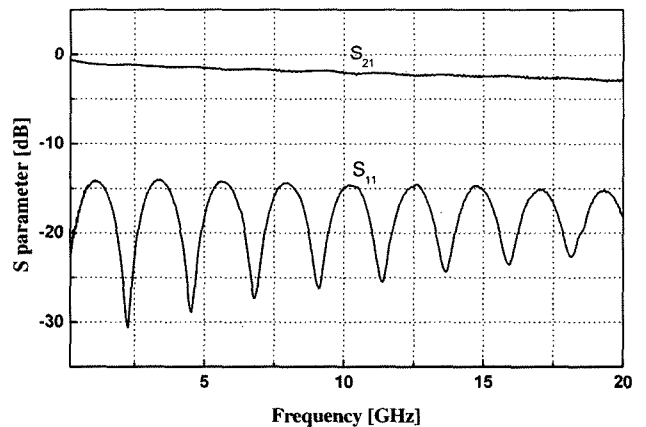
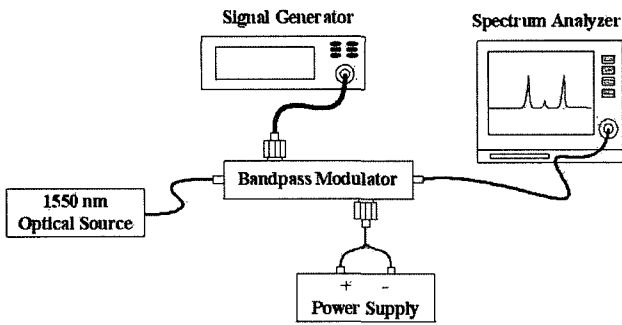
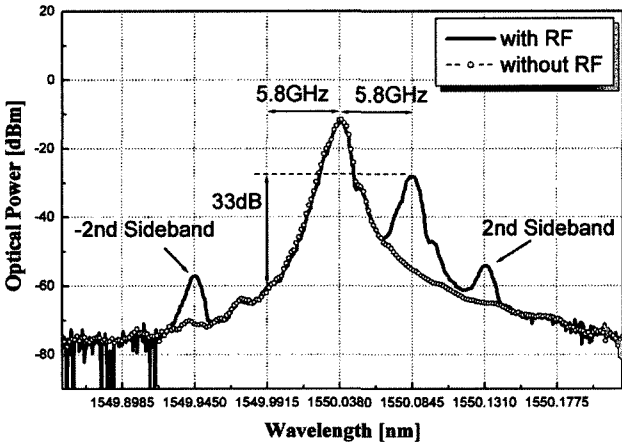


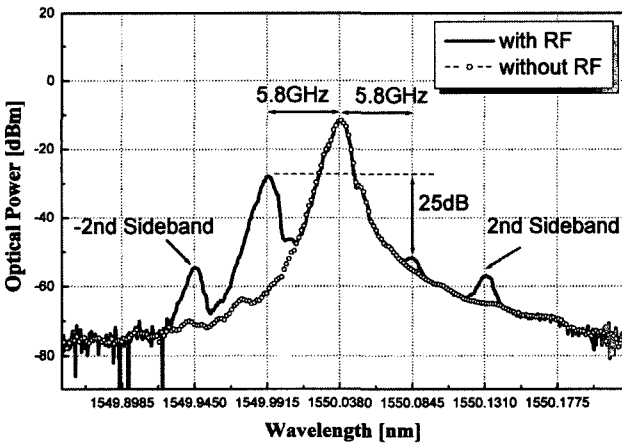
그림 7. 제작된 전극의 S-parameter.



(a) 측정시스템



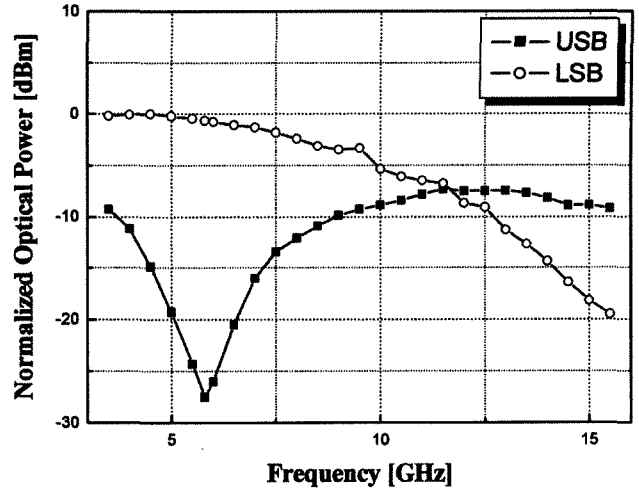
(b) 1.9V DC 인가 (주파수 : 5.8 GHz, 입력파워 : 19 dBm)



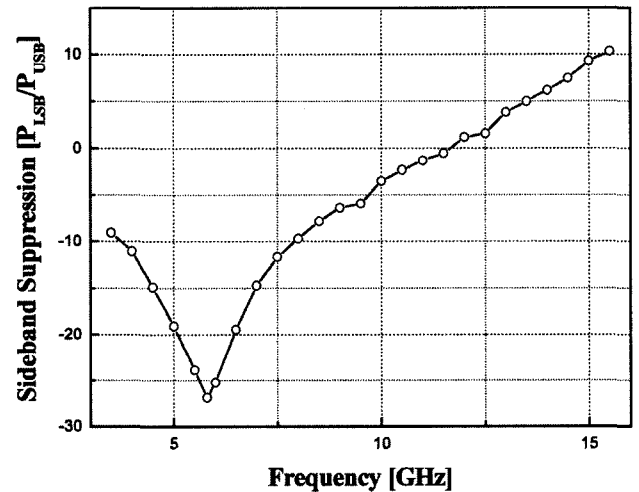
(c) -10.6V DC 인가시 (주파수 : 5.8 GHz, 입력파워 : 19 dBm)

그림 8. SSB 변조 측정 시스템 및 광 스펙트럼

른 변조특성의 변화를 나타낸 것이다. DC 바이어스를 고정시킨 상태에서 14 dBm의 파워를 갖는 RF를 입력하고, 주파수를 변화시키면서 출력되는 광의 USB 파워와 LSB 파워를 측정하였다. 그림 9(a)로부터 LSB의 경우 8.5 GHz까지 3 dB 이내의 변조효율을 유지함을 알 수 있었다. 그림 9(a)의 결과로부터 계산된 Sideband 억제율이 그림 9(b)에 도시되어 있으며, USB가 4.5 GHz에서 7 GHz의 범위에서 15 dB 이하로 억제됨을 확인할 수 있다.



(a) Frequency vs. Sideband Power



(b) Sideband 억제율

그림 9. 주파수에 따른 광변조 특성의 변화 (DC :1.9V, 주파수 : 5.8 GHz, 입력파워 : 14 dBm).

VI. 결 론

본 논문에서 한 개의 RF 신호로 SSB 변조를 수행하는 60 GHz ROF시스템용 5.5 GHz대역 변조기를 설계 및 제작하였다. 광과 RF간의 인위적인 위상속도 부정합과 리튬나이오베이트 기판의 부분적인 분극반전을 이용하여, 마호젠더 두 도파로에 90° 위상차를 갖는 신호로 각각 위상 변조할 수 있었다. 19 dBm의 5.8 GHz 주파수에서, 1.9 V의 DC 전압 인가시 USB 대비 LSB가 33 dB 정도 억제된 출력광 스펙트럼을 얻을 수 있었으며, -10.6 V의 DC 전압에서는 USB가 억제됨을 확인할 수 있었다. 주파수별로 측정된 광변조특성은 4.5 GHz에서 7 GHz의 범위에서 15 dB 이하의 Sideband 억제율을 유지함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. Kuri and K. Kitayama, "Optical heterodyne detection of millimeter-wave-band radio-on-fiber signals with a remote dual-mode local light source," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, no. 10, pp. 2025-2029, October 2001.
- [2] Y. K. Seo, C. S. Choi, and W. Y. Choi, "All-optical signal up-conversion for radio-on-fiber applications using cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 1448-1950, October 2002.
- [3] H. J. Song, J. S. Lee, and J. I. Song, "All-optical frequency up-conversion of radio over fibre signal with optical heterodyne detection," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 5, March 2004.
- [4] T. Kuri, K. Kitayama, and Y. Ogawa, "Fiber-optic millimeter-wave uplink system incorporating remotely fed 60-GHz-band optical pilot tone," *IEEE Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 7, pp. 1332-1337 July 1999.
- [5] L. Noël, D. Wake, D. G. Moodie, D. D. Marcenac, L. D. Westbrook, and D. Nasset, "Novel techniques for high-capacity 60-GHz fiber-radio transmission systems," *IEEE Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 8, pp. 1416-1423, August 1997.
- [6] G. H. Smith, D. Novak and Z. Ahmed, "Technique for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fiber-radio system," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 1, pp. 74-75, January 1997.
- [7] H. Murata, K. Kaneda, Y. Okamura, "38GHz optical single-sideband modulation by using guided-wave electrooptic modulator with periodic polarization reversal," *Proceedings of the conferences on Lasers and Electro-Optics 2004, CThT10*, pp. 293-295, May 2004.
- [8] H. Murata and S. Yamamoto, "Novel guided-Wave electrooptic single-sideband modulators by using periodically domain-inverted structure in a long wavelength operation," *OFC 2003, MF53*, 2003.
- [9] B. Bincent, A. Boudrioua, R. Kremer, and P. Moretti, "Second Harmonic Generation in Helium-Implanted Periodically Poled Lithium Niobate Planar Waveguides," *Opt. Commun.*, vol. 247, pp. 461-69, 2005.

Design and Fabrication of 5.5GHz SSB optical modulator with polarization reversed structure

W. J. Jeong[†]

School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul 90 Jeonnong-dong, Dongdaemun-gu, 130-743, Seoul, KOREA

[†]*E-mail: jumi9842@uos.ac.kr*

W. K. Kim, W. S. Yang, H. M. Lee, and H. Y. Lee

NANO Bio Researih Center, Korea Electronics Technology Institute 68 Yatap-dong Bundang-gu Seongnam-city Geonggi-do, 463-816, KOREA

S. W. Kwon

Department of Materials Engineering, Hankuk Aviation University 200-1 Hwajeon-dong Deogyang-gu Goyang-city Geonggi-do, 412-791, KOREA

(Received February 6, 2006, Revised manuscript April 6, 2006)

A single sideband(SSB) modulator operating at 5.5 GHz was fabricated by polarization inversion techniques. The dimension of domain inversion in a LiNbO₃ Mach-Zehnder structure was precisely controlled so that the RF signal applied on two Mach-Zehnder arms gives rise to 90° effective phase difference. The single sideband suppression was maximized by optimization of the polarization status of the optical input and by the DC bias value. The fabricated device showed the center frequency of 5.8 GHz and the maximum sideband suppression of 33dB, where the bandwidth of 15 dB sideband suppression ranged over a 2.5 GHz span. The optical phase delay could be regulated by the DC bias voltage, for example, the enhanced optical modulation sideband was distinctively switched from the upper sideband to the lower sideband by changing the DC bias voltage from 1.9 V to -10.6 V.

OCIS Codes : 230.4110, 230.3120, 230.2090, 130.3730.