

Quasi-Velocity-Matching을 이용한 60 GHz 광캐리어 발생기

김우경[†] · 양우석 · 이형만 · 이한영

전자부품연구원 나노바이오센터
Ⓣ 463-816 경기도 성남시 분당구 야탑동 68번지

정우진

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
Ⓣ 130-020 서울시 동대문구 전농동 90

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 30GHz 대역 광변조기를 제작하였고 60 GHz 광캐리어 발생기로 응용하였다. 주기적인 분극반전은 도파광과 RF사이의 QVM(Quasi-Velocity-Matching)을 유발하여 대역변조를 가능하게 하였다. 제작된 광변조기는 30.3 GHz에서 최대 변조효율을 보였으며, 3 dB 변조 대역폭은 약 5.1 GHz로 측정되었다. DSB-SC(Double Sideband Suppressed Carrier) 측정 실험을 통해 입사된 광 주파수로부터 30 GHz 간격으로 USB(Upper Sideband)와 LSB(Lower Sideband)를 발생시켰으며 입사광의 스펙트럼은 발생된 USB 혹은 LSB에 비해 28 dB정도 억제됨으로써, 30GHz 대역 광변조기가 60 GHz 광캐리어 발생기로 응용될 수 있음을 보였다.

주제어 : DSB Optical Modulator, DSB-SC, Domain-inversion.

I. 서 론

초고속 광변조기는 광대역 광통신 시스템에 있어서 핵심소자이다. 일반적인 진행파형 광대역 광변조기는 광과 RF간의 위상속도 정합을 기반으로 동작되므로, 고주파로 갈수록 그 제작이 어렵다. 이러한 이유로 ROF(radio on fiber) 시스템과 같은 아날로그 전송에서는 협대역 변조기의 활용이 대두되고 있으며, 이를 구현하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다.^[1,2]

본 논문에서는 LiNbO₃ 기판의 분극반전을 이용하여 30 GHz 대역 광변조기를 제작하고 60 GHz 광캐리어 발생기로 응용하였다. 탑재된 CPW 전극의 유효굴절률을 크게 하여 도파광과의 위상속도 부정합을 유발하였으며, 이로부터 발생하는 효율저하는 마흐젠더 두 도파로를 교번하여 주기적으로 분극 반전시킴으로써 30 GHz 대역에 한해 보상하였다. 넓은 중앙전극의 하부에 마흐젠더의 두 도파로를 모두 위치시킴으로써, 대칭적 변조가 가능하게 하였으며 변조 효율도 높일 수 있었다. 또한, 30 GHz 대역 광변조기를 DSB-SC 방법으로 동작시켜 60 GHz 광 캐리어 발생기로 응용하였다.^[3-6]

제작된 광변조기는 30.3 GHz에서 최대 변조효율을 보였으며, 3 dB 변조 대역폭은 약 5.1 GHz로 측정되었다. DSB-SC 측정 실험을 통해 입사된 광 주파수로부터 30 GHz 간격으로

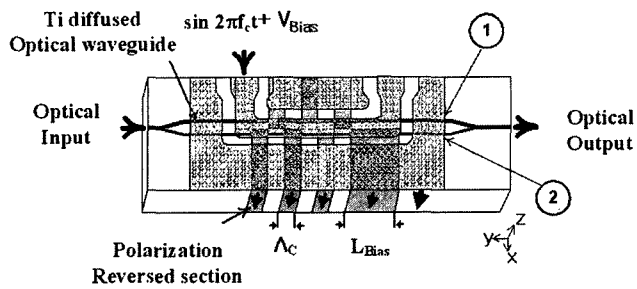
USB(Upper Sideband)와 LSB(Lower Sideband)를 발생시켰으며, 입사광의 스펙트럼은 발생된 USB 혹은 LSB에 비해 28 dB정도 억제시킬 수 있었다.

II. 동작 원리

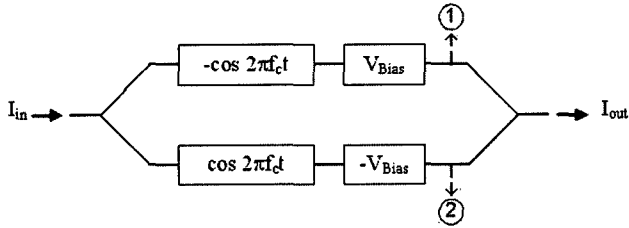
분극반전을 이용한 대역 광변조기의 개략도와 블록 다이어그램이 그림 1에 도시되어 있다.

Ti가 확산되어 이루어진 마흐젠더 한쪽도파로의 A_c 영역이 분극 반전되고 다음 A_c 영역은 다른쪽 도파로가 분극 반전되어 있으며, 이러한 구조는 주기적으로 반복된다. 주기적인 분극반전 구조는 특정한 주파수에서 도파광과 RF간의 위상속도 비정합에 의한 효율저하를 보상할 수 있게 하여, 대역 변조 특성을 얻게 한다.^[7,8](분극 반전에 의한 대역 변조 특성은 2.1에서 자세히 논의된다.) 그러나 이러한 주기적인 분극 반전 구조에서는 DC에 의한 변조동작이 불가능하므로, 전극의 끝단에 DC 바이어스 동작을 유발하기 위해 L_{Bias}에 해당하는 긴 분극반전 구간을 삽입하였다. 그림 1에서와 같이 마흐젠더 간섭기의 두 도파로가 모두 CPW 중앙전극 하부에 위치하므로, 두 도파로간의 대칭변조를 유발할 수 있으며 그 변조효율 또한 높일 수 있다. 또한 30 μm 이상의 넓은 중앙전극을 사용하므로 도체 손실에 의한 변조 효율 저하를 억제할 수 있다.

[†] E-mail: wkkim@keti.re.kr



(a) 개략도



(b) 블록 다이어그램

그림 1. 분극 반전된 구조를 갖는 대역 광변조기.

2.1 주기적인 분극반전을 이용한 대역 광변조

그림 2는 주기적으로 분극반전된 구조를 갖는 대역 광변조기의 구조를 보여주고 있다. 입사된 광의 전계를 $E_0(t, z)$ 로, 전극에 인가되는 RF 변조신호의 전압을 $V(t, z)$ 로 정의한다.

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

$$V(t, z) = A e^{-\alpha_c z} \sin(2\pi f_c t - \beta_c z) \quad (2)$$

여기서, $f_0, f_c, \beta_0, \beta_c, \alpha_c$ 는 각각 광과 RF의 주파수, 광과 RF의 전파상수 및 RF의 감쇄상수를 지칭한다. 광이 전극 하부를 통해 그림 3과 같이 분극반전된 한 주기를 진행할 때 광의 위상변화에 영향을 주는 총 유효전압 V_{eff} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{eff} &= \int_0^h A e^{-\alpha_c z} \sin\left[2\pi f_c \left(t + \frac{n_0}{c} z\right) - \beta_c z\right] dz \\ &\quad - \int_h^{h+\Lambda_c} A e^{-\alpha_c z} \sin\left[2\pi f_c \left(t + \frac{n_0}{c} z\right) - \beta_c z\right] dz \\ &\quad + \int_{h+\Lambda_c}^{2\Lambda_c} A e^{-\alpha_c z} \sin\left[2\pi f_c \left(t + \frac{n_0}{c} z\right) - \beta_c z\right] dz \\ &= \frac{\alpha_c A}{\alpha_c^2 + k^2} (1 - e^{-2\alpha_c \Lambda_c}) \sin(2\pi f_c t) \\ &\quad - \frac{kA}{\alpha_c^2 + k^2} (1 - e^{-2\alpha_c \Lambda_c}) \cos(2\pi f_c t) \\ &\quad + \frac{2kA}{\alpha_c^2 + k^2} (e^{-\alpha_c h} + e^{-\alpha_c(h+\Lambda_c)}) \cos(2\pi f_c t - kh) \\ &\quad - \frac{2\alpha_c A}{\alpha_c^2 + k^2} (e^{-\alpha_c h} + e^{-\alpha_c(h+\Lambda_c)}) \sin(2\pi f_c t - kh) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\Lambda_c = \frac{c}{2f_c(n_c - n_0)}$, $k = \frac{\pi}{\Lambda_c}$, c 는 공기 중에서의 빛

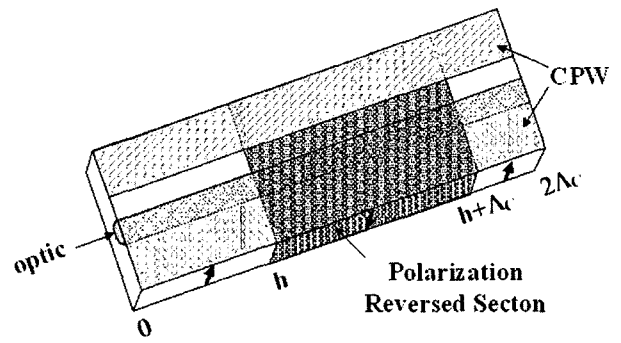


그림 2. 분극 반전된 변조영역의 한 주기.

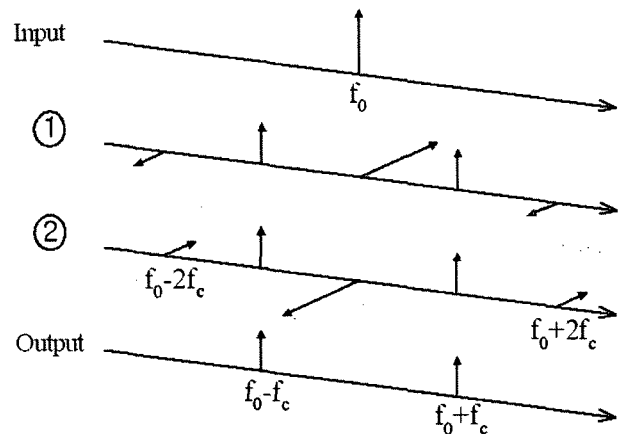


그림 3. 변조된 광의 스펙트럼 변화.

의 속도, n_c 와 n_0 는 각각 RF와 광의 유효굴절률을 의미한다. 만일 RF 손실이 없다고 가정하고, 그림 3과 같은 주기가 N 번 반복되면, 식 (3)의 V_{eff} 는 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$V_{eff} = \frac{4NA}{k} \cos(2\pi f_c t - kh) \quad (4)$$

식 (4)로부터 광을 변조시키는 총 유효전압 V_{eff} 의 위상 천이는 분극반전의 분기점 위치 h 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 마흐젠더의 두 도파로에서 그 분극반전의 분기점 위치를 각각 h_1, h_2 로 정의하고 그 위치차를 $h_1 - h_2 = \Lambda_c$ 로 결정하면, 두 도파로에서의 총 유효전압의 위상이 π 만큼의 차이를 갖게 된다. 즉, 그림 1(a)와 같이 교번으로 분극 반전시키면 대칭적인 광변조가 가능해진다.

2.2 60 GHz 광 캐리어 발생기로의 응용

그림 3는 f_0 의 주파수를 갖는 입력광에 대해, 그림 1에 표시된 각각 점들에서의 변조된 광 스펙트럼을 보여주고 있다. 위상 변조된 광의 스펙트럼은 변조신호의 조화파로 구성되어 있으며, 그 크기는 베셀함수에 비례한다.^[9] 제 1 도파로를 경유한 광은 $-\cos(2\pi f_c t)$ 에 의해 위상 변조되고 제 2 도파로에서는 $\cos(2\pi f_c t)$ 에 의해 위상 변조되는데, 이 때 $\pi/2$ 에

해당하는 바이어스 전압 VBias를 인가하면 서로 간섭을 일으켜 그림 3에서와 같이 $f_0 + f_c$ 와 $f_0 - f_c$ 대역의 두 부반송파들을 출력시킨다. 이러한 변조방법을 사용한다면, 제작된 소자는 ROF 시스템의 중요요소인 60 GHz 광캐리어 발생기로 활용될 수 있다.

III. 광변조기 제작실험

그림 4는 분극반전을 이용한 대역 광변조기의 제작과정을 개략적으로 나열한 것이다. 리튬나이오베이트 기판의 -Z면에 Ti를 확산시켜 광도파로를 제작하였다. 고온 확산과정 중에 발생한 +z면의 마이크로 도메인을 제거하기 위해 도파로 뒷면을 연마하였다. 연마된 기판의 전면을 분극반전한 후, 도파로 상부에 감광액 패턴을 형성하여 선택적인 영역에 한해 분극반전을 수행한다. 분극 반전된 도파로 위에 450 nm 두께의 SiO₂ 층을 형성하고 Ti, Au를 200 nm 증착한 후, 도금공정을 사용하여 4 μm 두께의 전극을 탑재하였다. 제작된 전극의 너비 W와 간격 S는 각각 38 μm, 50 μm이다. 또한 분극 반전 영역의 반주기 $\Lambda_c = 3.1$ mm, 바이어스 구간 $L_{Bias} = 9.3$ mm, 그리고 변조영역의 총 길이는 31 mm로 제작되었다.

그림 5는 제작된 단측파대 변조기를 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 분극 반전된 형상을 확인하기 위해서 LiNbO₃ 식각용액(HF:HNO₃=1:2)에 약 15분 동안 식각하였다.^[10] 그림 5(a)는 마흐젠더 간섭기 영역을 보여주고 있는데 정확히 한쪽 도파로에만 분극반전이 일어났음을 알 수 있으며, 그림 5(b)는 이러한 반전영역이 교차되는 형상을 보여주고 있다.

IV. 측정결과

광 입 · 출력을 위해 광변조기의 단면을 연마한 후 피그테 일링하였다. 제작된 소자의 삽입손실은 약 2.5 dB이다. 광변조기의 RF 입력단에 V 커넥터를 연결하고 출력단에는 50 Ω 저항을 연결하여, 원활한 RF 입 · 출력이 가능하게 하였다.

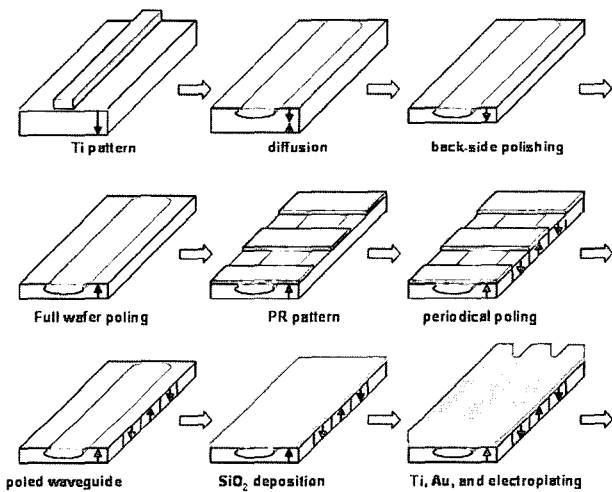
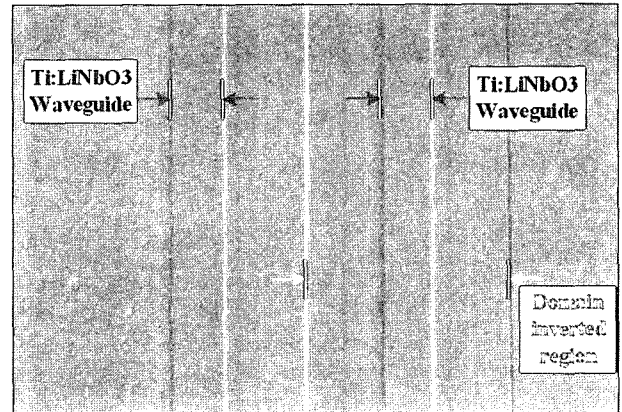


그림 4. 대역 광변조기 제작과정.

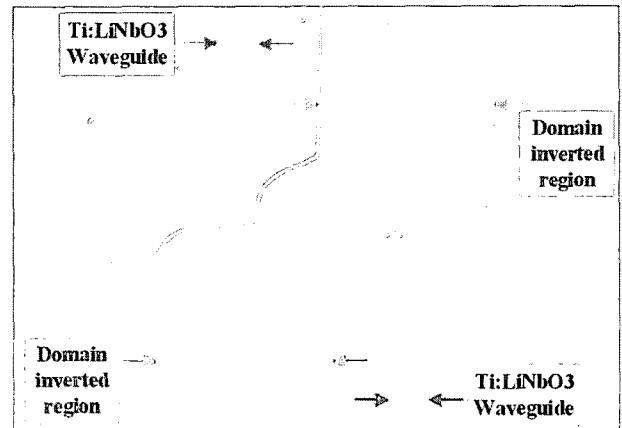
4.1 전극 특성 측정

제작된 변조기의 RF 반사특성을 Network Analyzer를 이용하여 측정하였으며, 그 결과는 그림 6에 도시되어 있다.

저주파에서의 반사특성(S11)을 제외하면 35 GHz까지 14 dB이하의 반사특성을 나타내었고, 특히 사용주파수 대역인 30 GHz 근방에서는 17 dB 이하의 특성을 보여주고 있다. 전극의 전파손실(S21)은 30 GHz 근처에서 약 7.5 dB 정도의 특성을 나타내고 있다.



(a) 분극반전된 마흐젠더 도파로 형상.



(b) 분극 반전 교차 형상.

그림 5. 분극반전된 도파로 형상.

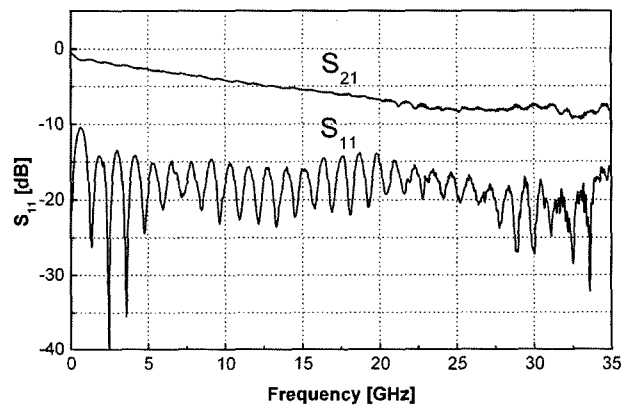


그림 6. 제작된 전극의 S-Parameter.

4.2 변조 특성 측정

제작된 광변조기의 변조 특성이 측정되었으며, 그림 7은 실험을 위한 측정시스템의 개략도와 측정된 결과를 도시한 것이다. Network Analyzer의 제 1포트에서 출력된 신호를 RF 단자에 입사시키고, Power Supply를 이용하여 바이어스 단자에 DC 전압을 인가하였다. 이 때 변조기에서 출력되는 광을 광대역 광수신기로 입사시켜 RF로 변화하였으며, 이 변환된 RF신호는 다시 Network Analyzer의 제 2포트로 입사되어 분석되었다.

그림 7(b)는 측정된 변조 응답 특성을 도시한 것이다. 주기적인 분극반전으로 인해 주기적인 변조 응답특성을 얻을 수 있었으며, 특히 30.3 GHz를 중심주파수로 하여 약 5.1 GHz의 3 dB 변조대역폭을 나타내었다.

4.3 60GHz 광캐리어 발생 실험

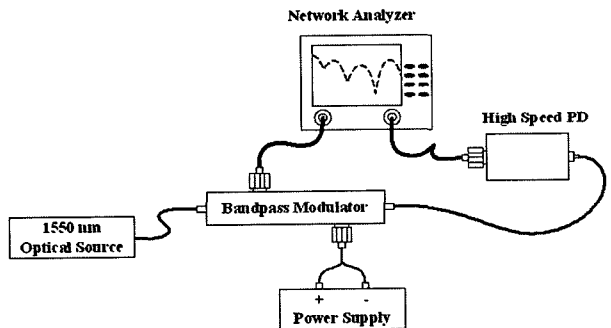
제작된 광변조기를 이용한 60 GHz 캐리어 발생 실험이 수행되었으며, 그림 8은 실험을 위한 측정시스템의 개략도와 측정된 결과를 도시한 것이다. Signal Generator에서 출력된 신호를 RF 단자에 입사시키고, Power Supply를 이용하여 바이어스 단자에 DC 전압을 인가하였다. 이 때 출력되는 광 스펙트럼의 변화를 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다. 광변조기의 RF 단자에 20 dBm의 30 GHz 인가한 후 DC 바이어스를 맞추면 그림 8(b)의 실선과 같은 광 스펙트

럼을 얻을 수 있었다. 그림에 표시된 점선은 입력된 광의 스펙트럼 형상을 도시한 것이다. 그림으로부터 입력 광으로부터 30 GHz 이격된 주파수가 발생하였으며, 반대로 입력광은 좌·우 스펙트럼에 비해 28 dB정도 억제된 것을 확인할 수 있다. 이러한 스펙트럼을 광 수신기에 입사시키면 DC와 60 GHz 신호로 변환되므로, 60 GHz ROF 시스템에 유용한 소자로 활용될 수 있다.

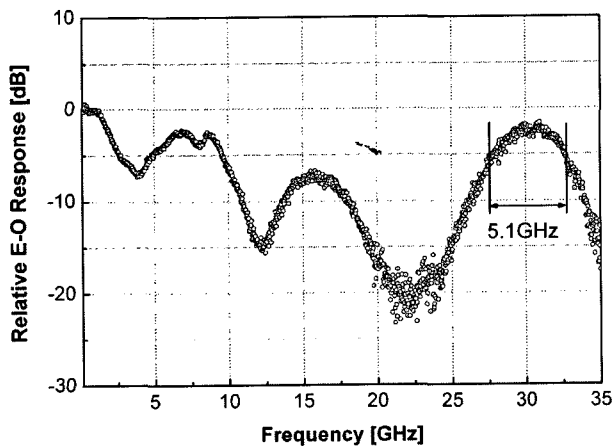
V. 결 론

본 논문에서는 LiNbO₃ 기판의 분극반전을 이용하여 30 GHz 대역 광변조기를 제작하고 60 GHz 광캐리어 발생기로 응용하였다. 탑재된 CPW 전극의 유효굴절률을 크게 하여 도파광과의 위상속도 부정합을 유발하였으며, 이로부터 발생하는 효율저하는 마흐젠더 두 도파로를 교번하여 주기적으로 분극 반전시킴으로써 30 GHz 대역에 한해 보상하였다. 넓은 중앙전극의 하부에 마흐젠더의 두 도파로를 모두 위치시킴으로써, 대칭적 변조가 가능하게 하였으며 변조 효율도 높일 수 있었다. 또한, 30 GHz 대역 광변조기를 DSB-SC 방법으로 동작시켜 60 GHz 광 캐리어 발생기로 응용하였고, 이를 활용한 60 GHz ROF 전송 시스템을 제시하였다.

제작된 광변조기는 30.3 GHz에서 최대 변조효율을 보였으

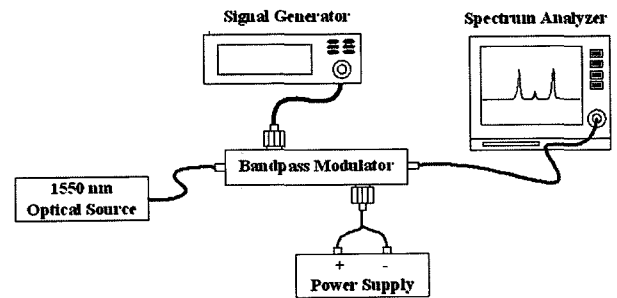


(a) 측정시스템.

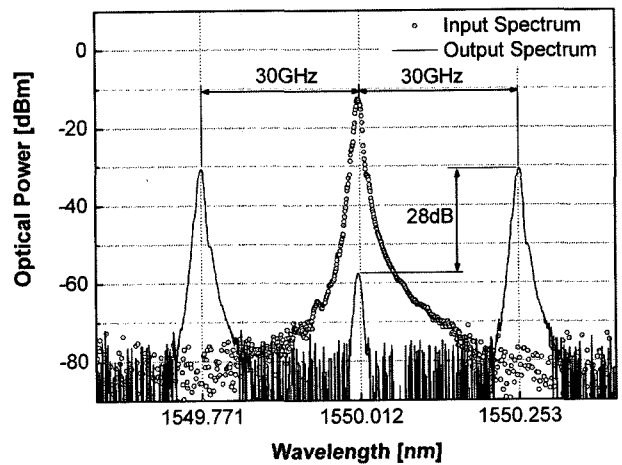


(b) 변조 응답 특성.

그림 7. 변조 응답 측정 시스템 및 응답 특성.



(a) 측정 시스템.



(b) 캐리어 억제 특성.

그림 8. 60 GHz 캐리어 발생 실험(입력 주파수 : 30 GHz, 입력파워 : 20 dBm).

며, 3 dB 변조 대역폭은 약 5.1 GHz로 측정되었다. DSB-SC 측정 실험을 통해 입사된 광 주파수로부터 30 GHz 간격으로 USB와 LSB를 발생시켰으며, 입사광의 스펙트럼은 발생된 USB 혹은 LSB에 비해 28 dB정도 억제시킬 수 있었다. 이러한 변조 특성은 60 GHz ROF 시스템에서 dual frequency optical source로서의 활용을 가능하게 한다.

참고문헌

- [1] W. Wang, R. Tavlykaev, and R. V. Ramaswamy, "Bandpass traveling-wave Mach-Zehnder modulator in LiNbO₃ with domain reversal," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 610-612, May 1997.
- [2] Y. Lu, M. Xiao, and G. J. Salamo, "Application of periodically-poled LiNbO₃ for wide-bandwidth high-frequency electro-optic modulator," *Proceedings of the conference on Lasers and Electro-Optics 2001, CTul7*, pp. 142-143, 2001.
- [3] J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann, and R. Hofstetter, "Optical generation of very narrow linewidth millimeter wave signals," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 25, December 1992.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] H. Murata, K. Kaneda, Y. Okamura, "38 GHz optical single-sideband modulation by using guided-wave electrooptic modulator with periodic polarization reversal," *Proceedings of the conference on Lasers and Electro-Optics 2004, CTh-T10*, pp. 293-295, May 2004.
- [8] H. Murata and S. Yamamoto, "Novel guided-Wave electro-optic single-sideband modulator by using periodically domain-inverted structure in a long wavelength operation," *OFC 2003, MF53*, 2003.
- [9] M. Izutsu and T. Sueta, "Coupled mode analysis of light intensity modulation in dielectric waveguide," *Appl. Phys.*, vol. 5, pp. 307-315, January 1975.
- [10] 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.

60 GHz Optical Carrier Generator using Quasi-Velocity-Matching Technique

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*

[†]*E-mail: wkim@keti.re.kr*

W. J. Jeong

School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul 90 Jeonnong-dong, Dongdaemun-gu, 130-743, Seoul, 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 novel 60GHz optical carrier generator with a polarization domain-inverted structure is suggested and is demonstrated. The two arms of the Mach-Zehnder optical waveguide are periodically poled for quasi-phase velocity matching between the optical wave at 1550nm and the RF wave at 30 GHz. The center frequency of band-pass modulation and the 3 dB bandwidth of the fabricated modulator were measured to be 30.3 GHz and 5.1 GHz, respectively. Sub-carriers with the frequency difference of 60GHz waeregenerated under appropriate DC bias voltage application while the carrier was suppressed to lead to the power ratio between the modulated sub-carrier and the suppressed fundamental carrier of 28 dB, which proves that double sideband-suppressed carrier(DSB-SC) operation can be realized by the suggested single device.

OCIS Codes : 230.4110, 230.3120, 230.2090, 130.3730.