

전기광학폴리머 변조기를 이용한 집적광학적 RF 위상변환기

이상신

광운대학교 전자공학과

Ⓣ139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2004년 2월 9일 받음, 2004년 5월 25일 수정본 받음)

본 논문에서는 두 개의 중첩된 Mach-Zehnder 구조의 변조기를 이용한 집적광학적 RF 위상변환기를 제안하고, 새로운 전기광학폴리머를 이용하여 제작하였다. 구현된 소자는 RF신호의 위상을 전압에 의하여 연속적으로 제어할 수 있는 특징을 갖는다. 본 논문에서는 16GHz RF신호의 경우에 대해, 7.8 V_{pp} 제어 전압을 인가하여 약 108°범위에서 RF신호의 위상을 거의 선형적으로 변환시킬 수 있었다.

주제어: polymer waveguides, phase shifter, microwaves, modulator, electro-optic polymers

I. 서 론

위상배열안테나(phased array antenna)는 모터에 의한 기계적인 움직임 없이 RF(radio frequency) 신호의 위상을 조절함으로써 안테나의 출력 및 입사 빔의 방향을 제어하는데 사용된다. 이러한 안테나는 이동통신 시스템에서 통화량에 따라 실시간으로 통화품질 및 효율을 극대화 할 수 있는 스마트 안테나로서 응용될 수 있다. 또한, 초고속으로 추적이 가능한 레이더 등 군사무기 시스템의 지능형 안테나로서 사용된다. 위상배열 안테나의 핵심 요소 중의 하나가 RF신호의 위상을 조절하는 위상변환기(phase shifter)이다. 기존의 RF 위상변환기는 전자부품 등을 사용하여 구현되기 때문에 전자기적 간섭 등에 영향을 받고, 크고 무거운 등의 문제점을 지니고 있다. 또한, 위상변환이 연속적인 아닌 이산적으로 조절될 수 밖에 없는 한계를 갖고 있다. 최근에 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 광신호를 캐리어로 사용하여 RF신호의 위상을 변화시킬 수 있는 광학적 RF 위상변환기를 구현하기 위한 연구가 진행되어 왔다.^[1-2] 본 논문에서는 두 개의 중첩된 Mach-Zehnder 변조기(광주파수 변환기(optical frequency translator) + 광위상변조기(optical phase modulator)) 구조의 광학적 RF 위상변환기를 제안하고, 전기광학폴리머를 이용하여 구현하였다. 이 소자는 전압에 의하여 연속적으로 RF신호의 위상을 정밀하게 조절할 수 있는 특징을 지닌다. 또한, 광대역 동작(>40GHz), 간단한 제작공정, 저렴한 가격, 뛰어난 확장성 등의 여러 장점을 지니고 있다.

II. 제안된 광학적 RF 위상변환기

본 논문에서 제안된 두 개의 중첩된 Mach-Zehnder 변조기

구조의 광학적 RF 위상변환기가 그림 1에 도시되어 있다. 소자의 윗 부분의 Mach-Zehnder형 변조기는 광주파수 변환기 역할을 하고, 아래 부분은 인가되는 직류 전압에 의해 광신호의 위상이 조절되는 광위상변조기 역할을 한다. 먼저, 광주파수 변환기 부분의 동작특성을 살펴보면 다음과 같다. 입력 광의 전계는 $E_{in} = E_0 \sin(\omega_m t) = E_0 \sin(2\pi f_m t)$ 로 주어진다. 여기서 f_m 는 광원의 주파수이다. 입력 광은 첫번째 Y자형의 분기에 의해 $\alpha:\beta$ 의 비로 나뉜다. α 의 비로 광주파수 변환기 쪽으로 나뉜 광은 다시 Y자형 분기에 의해 균일하게 나뉜다. 1번과 2번 팔에 있는 두 개의 마이크로스트립 전극은 RF 신호원과 동위상($V_m \cos(\omega_m t) = V_m \cos(2\pi f_m t)$) 및 90° 위상차를 갖는 quadrature 신호($V_m \sin(\omega_m t)$)에 의해 각각 구동된다. 2번 팔에는 직류 바이어스에 의해 90°만큼의 광 위상 차이가 이미 추가되어 있다. 광주파수 변환기의 출력 전계는 다음의 식 (1)과 같이 주어진다.

$$E_t = \frac{\alpha E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_m t} \left(e^{j(\phi_m \sin \omega_m t)} + j e^{j(\phi_m \cos \omega_m t)} \right), \text{ where } \phi_m = \pi V_m / V_\pi. \quad (1)$$

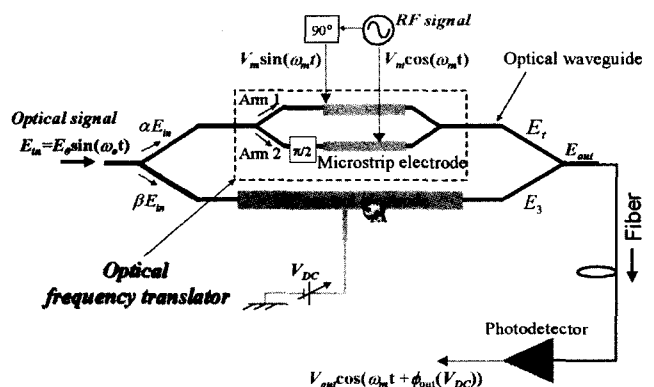


그림 1. 제안된 광학적 RF 위상변환기의 구조

* E-mail: sslee@daisy.kw.ac.kr

여기서 V_{π} 는 폴리머 광변조기의 반파장 전압이다. 그리고 광위상 변조기의 출력 전계는 다음의 식 (2)와 같이 주어진다.

$$E_3 = \beta E_0 e^{j\omega_m t} e^{j\phi_{DC}}, \text{ where } \phi_{DC} = \pi V_{DC} / V_{\pi} \quad (2)$$

여기서 V_{DC} 는 광위상변조기에 가해지는 제어 전압이다. 따라서 전체 출력 광의 전계는 다음의 식 (3)과 같이 주어진다.

$$E_{out} = \frac{\alpha E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_m t} \left(e^{j(\phi_m \sin \omega_m t)} + j e^{j(\phi_m \cos \omega_m t)} + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} e^{j\phi_{DC}} \right) \left[\begin{array}{l} J_0(\phi_m) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(\phi_m) \cos(2k\omega_m t) \\ -2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} J_{2k-1}(\phi_m) \cos((2k-1)\omega_m t) \\ + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} \cos \phi_{DC} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} j \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(\phi_m) \sin((2k+1)\omega_m t) + J_0(\phi_m) \right] \\ + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\phi_m) \cos(2k\omega_m t) \\ + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} \sin \phi_{DC} \end{array} \right] \quad (3)$$

변조 RF신호의 주파수 ω_m 에서 입력 광파위에 비례하는 광검출기의 출력은 다음의 식 (4)와 같이 주어진다. 이 결과로부터 출력 RF신호의 위상이 광위상변조기에 인가되는 전압에 의하여 연속적으로 조절될 수 있음을 알 수 있다.

$$P(\omega_m) = V_{out} \cos(\omega_m t + \phi_{out} + \pi) \text{ where}$$

$$V_{out} = 4\alpha^2 J_1(\phi_m) \left(\left(J_0(\phi_m) + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} \cos \phi_{DC} \right)^2 + \left(J_0(\phi_m) + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} \sin \phi_{DC} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$\text{and } \phi_{out}(V_{DC}) = \tan^{-1} \left(\frac{J_0(\phi_m) + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} \sin \phi_{DC}}{J_0(\phi_m) + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} \cos \phi_{DC}} \right) \quad (4)$$

다음의 두 가지 경우에 대해 제안된 RF 위상변환기의 동작 특성을 살펴보고자 한다. 첫째로, 다음의 식 (5)로부터 알 수 있듯이 변조 RF신호의 크기가 다음의 조건을 정확히 만족시키는 경우에는 출력 RF신호의 진폭이 일정하고, 위상은 광위상변조기의 인가전압에 선형적으로 비례한다.

$$\phi_m = \pi V_m / V_{\pi} = 2.4 \rightarrow V_m = 0.76 V_{\pi}$$

$$\Rightarrow P(\omega_m) \approx 4\alpha^2 \cos(\omega_m t + \pi V_{DC} / V_{\pi} + \pi) \quad (5)$$

앞으로 실험결과 부분에서 언급하겠지만 본 논문에서 제작된 폴리머 광변조기의 반파장 전압은 10.8V 정도로 비교적 커서, 위의 조건을 만족시키기 위해서는 상당히 큰 RF신호가 요구된다. 또한, RF신호의 크기를 정확하게 유지해야만

하는 어려움이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점으로 인하여 RF신호의 크기가 광변조기의 구동전압보다 충분히 작은 소신호를 사용하여 동작시켰다. 소신호 근사 조건 하에서 전체 출력 RF신호의 위상과 크기는 다음의 식 (6)과 같이 각각 주어진다.

$$\phi_{out} \approx \tan^{-1} \left(\frac{1 + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} \sin \phi_{DC}}{1 + \sqrt{2} \frac{\beta}{\alpha} \cos \phi_{DC}} \right)$$

$$\text{and } V_{out} \approx 4\sqrt{2}\alpha^2 J_1(\phi_m) \left[1 + \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 + 2 \frac{\beta}{\alpha} \cos(\phi_{DC} - 45^\circ) \right]^{1/2} \quad (6)$$

그림 2에는 $\alpha = \beta = 1/\sqrt{2}$ 인 경우에 RF신호의 크기를 변화시켰을 경우에 광위상변조기에 인가되는 전압에 따른 출력 RF신호의 위상변화를 계산한 결과가 도시되어 있다. 앞에서 언급했듯이 $\phi_m = 2.4$ 인 경우에는 인가 제어 전압에 따라 RF신호의 위상이 선형적으로 변환을 알 수 있다. 한편, RF신호의 크기가 감소함에 따라 선형성을 갖는 범위가 다소 감소하지만, 본 논문에서 실험할 예정인 $\phi_m = 0.6$ 인 소신호 경우에도 100° 이상의 범위에서 선형적인 위상변환 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

III. 제작 및 실험 결과

제안된 소자는 PLC(planar lightwave circuits) 기술을 도입하여 제작되었으며 그 과정은 다음과 같다. 실리콘 기판 위에 금을 증착하여 접지 전극을 만들고, 자외선 경화 에폭시를 스펀코팅하여 하부 폴리머 클래딩층을 형성하였다. 그 위에 전기광학 특성을 갖는 전기광학폴리머를 CLD2^[3]를 스펀코팅하여 코어층을 형성한 후, 건식 식각 공정을 통하여 도파로 패턴을 제작하였다^[4]. 그리고 하부 클래딩층과 동일하게 상부 클래딩층을 형성하고, 전기도금을 통하여 마이크로 스트립 전극을 제작하였다. 마지막으로 광신호의 결합을 위

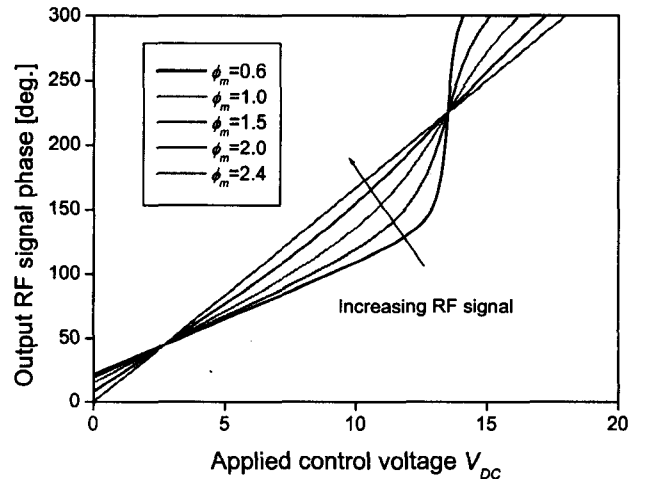


그림 2. 광위상변조기에 인가되는 제어 전압에 따른 RF신호의 이론적인 위상변환 특성.

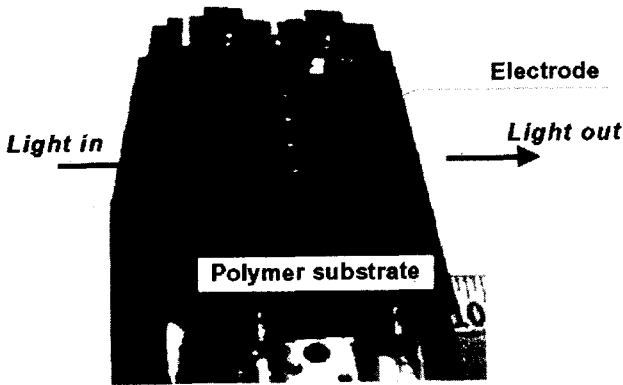


그림 3. 제작된 전기광학폴리머 RF 위상변환기.

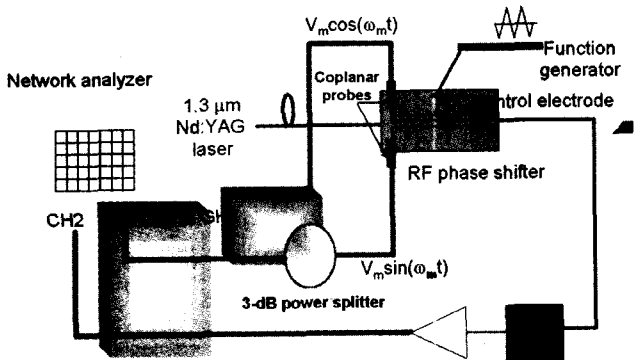


그림 4. 측정 장치.

해 dicing공정을 통해 입출력 단면을 형성하였다. 그림 3에는 제작된 전기광학폴리머 RF 위상변환기의 구조가 나타나 있다. 이 샘플에는 4개의 단위 소자가 제작되어 있다.

다음으로 제작된 소자의 기본적인 광학적 특성을 조사하고 RF 위상변환기로서의 동작특성을 측정하였다. 먼저, 앞에서 언급했듯이 저주파에서 측정된 폴리머 광위상변조기의 반파장 전압은 10.8 V였다. 그리고 RF에 의해 구동되는 광주파수변환기의 고주파 변조특성을 16 GHz에서 테스트하였는데 우수한 변조특성을 보임을 확인하였다. 다음으로 RF 위상변환기로서의 특성을 측정하기 위해 그림 4에 나타나 있는 장치를 사용하였다. HP 8510 네트워크 분석기의 포트1이 16 GHz RF 신호원으로 사용되었으며, 3-dB 파워 분리기를 도입하여 두 팔의 마이크로스트립 전극 구동에 필요한 신호를 얻었다. 이 두 개의 전극은 90°의 위상차를 갖는 두 RF 신호에 의해 Coplanar probe를 통해 구동되었다. 이때 각각의 마이크로스트립 전극에 가해진 RF 신호의 파워는 약 15 dBm이었다. 한편, 2번 팔에는 바이어스 터를 통하여 직류 바이어스를 가함으로써 90°의 일정한 광위상변환을 주었다. 광원으로는 1310 nm 파장을 갖는 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 위상변환을 측정하기 위하여 광검출기의 출력은 네트워크 분석기의 포트2로 입력되었다. 그리고 RF 신호의 위상을 전기적으로 제어하기 위하여 50Hz의 낮은 주파수를 갖는 삼각파 신호를 광위상변조기에

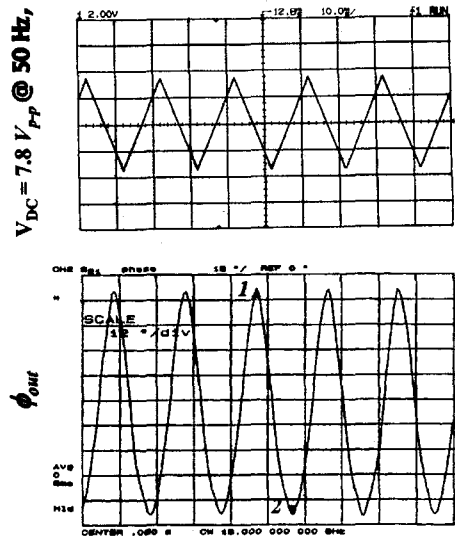


그림 5. 측정된 광위상변조기에 인가되는 제어 전압에 따른 RF 신호의 위상변환 특성.

인가였다. 그림 5에는 $V_{DC}=7.8V_{pp}$ 인 경우, 출력 RF 신호의 위상 변화가 나타나 있다. 이 결과로부터 약 108°의 위상변화가 얻어짐을 알 수 있으며, 해당 기울기는 약 13.9°/V였다. 이론적 결과로부터 예측할 수 있듯이 인가 제어 전압이 증가함에 따라 RF 위상변환의 선형성이 약간 떨어졌다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전압에 의하여 연속적으로 제어 가능한 광학적 RF 위상변환기를 제안하고 전기광학폴리머 변조기를 이용하여 구현하였다. 이 소자는 위상배열 안테나의 핵심요소로서 응용될 수 있을 것으로 기대된다. PLC 기술을 이용하여 구현될 수 있기 때문에 배열형 구조를 구현하는데 매우 유리하며 제작공정도 간단하다. 또한, 전기광학폴리머의 고유한 특성으로 인하여 광대역 동작이 가능하며, 최근들어 전기광학효과가 획기적으로 향상됨에 따라 구동전압도 상당히 개선될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-003-D00303).

참고문헌

[1] J. F. Coward, T. K. Yee, C. H. Chalfant, and P. H. Chang, "A photonic integrated-optic RF phase shifter for phased array antenna beam-forming applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 2201-2205, 1993.

- [2] D. R. Jez, K. J. Cearns, and P. E. Jessop, "Optical waveguide components for beam forming in phased array antennas," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 46-49, 1997.
- [3] C. Zhang, C. Wang, L. R. Dalton, G. Sun, H. Zhang, and W. H. Steier, "Investigation on new polyurethanes and incorporation of a soluble high $\mu\beta$ chromophore for electro-optic applications," *Polymer Preprints*, vol. 40, no. 1, pp. 51-52, 1999.
- [4] D. Chen, H. R. Fetterman, A. Chen, W. H. Steier, L. R. Dalton, W. Wang, and Y. Shi, "Demonstration of 110GHz electro-optic polymer modulators," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. 25, pp. 3335~3337, 1997.

Integrated Photonic RF Phase Shifter Using an Electrooptic Polymer Modulator

Sang-Shin Lee

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

E-mail: sslee@daisy.kw.ac.kr

(Received February 9, 2004, Revised manuscript May 25, 2004)

An integrated photonic radio frequency (RF) phase shifter has been proposed and fabricated using a nested dual Mach-Zehnder modulator configuration in a new electro-optic polymer. The fabricated device shows a continuous voltage control of the RF signal phase. A near-linear phase shift exceeding 1080 was obtained for a 16-GHz microwave signal by tuning the dc control voltage over a $7.8\text{-}V_{pp}$ range.

OCIS Codes : 130.2790, 230.2090, 230.4110, 250.2080, 250.7360.