

테이퍼 구조를 갖는 광섬유 브래그 격자를 이용한 전압에 의하여 제어 가능한 광학적 실시간 지연 소자

채호동 · 이상신[†]

광운대학교 전자공학과

Ⓣ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2005년 3월 15일 받음, 2005년 4월 19일 수정본 받음)

본 논문에서는 테이퍼된 구조를 갖는 광섬유 브래그 격자를 이용한 광학적 RF 실시간 지연 소자를 제안하고 구현하였다. 광섬유 격자 표면에는 금속 박막의 히팅용 전극이 코팅되어 있다. 전극에 인가되는 전압에 의해 유발되는 열광학효과를 통하여 광섬유 격자로부터 반사되는 광신호의 반사 위치를 변화시킴으로써 광신호에 변조용 신호로 실려서 전달되는 RF 신호의 시간 지연을 조절할 수 있다. 따라서 이 제안된 소자는 기존의 소자들과는 달리 기계적 변형이나 움직임 없이 전압에 의하여 연속적으로 정밀하게 시간 지연 값을 제어할 수 있는 특징을 갖는다. 측정된 최대 시간 지연은 소비 전력이 250 mW일 때 약 120 ps였다.

주제어 : true-time delay, phase shifter, phase array antenna, RF, fiber Bragg grating

I. 서 론

최근에 휴대전화, 디지털 멀티미디어 방송 서비스 등의 보급으로 인하여 무선 통신량이 폭발적으로 증가해 왔다. 무선 통신 단말기 및 시스템의 성능은 주변의 통신 환경에 민감하게 의존한다. 예를 들어, 휴대전화의 통화 품질은 사용자 주변의 통신 환경, 즉 통화량이나 위치 등에 영향을 받게 된다. 따라서 주변의 통신 환경에 관계없이 우수한 통신 품질을 제공하기 위해서는 통신 요구에 따라 능동적으로 전파의 송수신 분포를 조절할 수 있는 배열형 안테나가 필요하다. 배열형 안테나의 주사방식에는 위상 주사(phase scanning) 방식과 시간 지연 주사(time delay scanning) 방식이 있는데, 위상 주사 방식은 사용하는 주파수에 따라 주 빔의 방향이 변하는 빔스퀀트(beam squint) 현상이 발생하는 문제점을 지니고 있다.^[1] 광학적 RF (radio frequency) 실시간 지연 소자는 빔스퀀트 현상 등의 문제가 없는 시간 지연 주사 방식을 이용한 광학적 배열형 안테나의 핵심요소 중의 하나이다. 광학적 실시간 지연은 넓은 대역폭, 전자기 간섭에 무관, 낮은 손실, 경량, 소형 등의 장점을 지니고 있다.

지금까지 광학적 실시간 지연 소자는 광섬유 지연선로 소자,^[2] 홀로그래프 격자 결합기,^[3] 균일 광섬유 브래그 격자 (fiber Bragg grating: FBG),^[4,5] 처핑된 광섬유 격자(chirped fiber Bragg grating: CFBG),^[6,7,8] 그리고 기계적 변형에 의해 제어되는 브래그 격자 등을 이용하여 구현되었다.^[9] 특히, 광섬유 격자를 이용한 지연선로 소자의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 첫째로, 균일 FBG를 이용한 방법의 경우에는 반사 파장이 서로 다른 여러 개의 광섬유 격자를 연결하여 광원의

파장에 따라 반사되는 위치가 서로 다르게 함으로써 이산적 인(discrete) 시간 지연을 얻는다. 둘째로, CFBG를 이용한 방법은 가변 파장 광원으로부터 입력된 서로 다른 파장을 갖는 여러 개의 광신호가 처핑된 광섬유 격자에서 반사되는 위치가 다른 특성을 이용하여 시간 지연을 얻는 방식이다. 마지막으로, 광섬유 격자에 기계적인 변형을 이용하는 방법의 경우에는 처핑이 없는 격자를 기계적 변형을 통해 처핑된 격자로 변환시켜 위와 유사한 방법으로 시간 지연을 얻는 것이다. 이러한 기존의 시간 지연 소자는 고가의 파장 가변 광원이 필요할 뿐만 아니라 시간 지연 정밀도와 재현성이 낮은 문제점을 지니고 있다.

본 논문에서는 테이퍼 구조를 갖는 처핑된 광섬유 브래그 격자를 이용하여 광학적 RF 실시간 지연을 제안하고 구현하였다. 이 소자의 특징은 다음과 같다. 먼저 광섬유 격자의 기계적 변형이나 움직임 없이 전기적으로 시간 지연을 정밀하게 제어할 수 있기 때문에 정밀도와 재현성이 우수하다. 그리고 단일 파장 광원을 사용하기 때문에 가변 파장 광원을 이용하는 기존의 방법에 비해 가격이 저렴하고 단순한 구조를 갖는다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II장에서는 제안된 광학적 실시간 지연 소자의 구조 및 동작원리를 설명한다. 제III장에서는 소자의 제작 과정 및 특성 측정 결과를 보여주고, 그리고 제IV장에서 결론을 맺는다.

II. 제안된 광학적 실시간 지연 소자

그림 1은 광학적 실시간 지연을 이용한 배열형 안테나의 구조를 보여준다. RF 신호(주파수 f_{RF})는 광변조기에 의해 캐리어(carrier)로 사용되는 광신호(파장 λ_0)에 실린 후 광섬유를 통해 전송된다. 광 변조된 RF 신호들은 광학적 실시간

[†] E-mail: sslee@daisy.kw.ac.kr

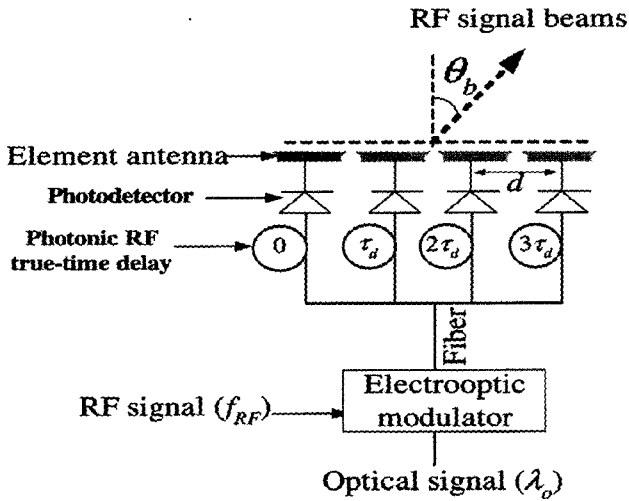


그림 1. 광학적 RF 실시간 지연을 이용한 배열형 안테나의 구조.

지연에 의해 전달 시간이 각각 적절히 지연된다. 이 지연된 광신호들은 광검출기에 의해 다시 RF 신호로 복원된 후 각 요소 안테나를 구동하게 된다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 각 요소 안테나를 구동하는 RF 신호 간의 시간 지연 차이가 τ_d 인 경우, 배열형 안테나에 의해 송수신 되는 RF 신호 빔의 주사 방향은 $\theta_b = \sin^{-1}\left(\frac{c\tau_d}{d}\right)$ 과 같이 결정된다. 여기서 d 는 요소 안테나 간의 길이이고 c 는 빛의 속도이다. 예를 들어, 시간 지연이 없는 $\tau_d = 0$ 경우에는 $\theta_b = 0^\circ$ 가 되어 빔이 수직 방향으로 직진하게 되고, τ_d 가 +이면 빔은 그림과 같이 오른쪽 쪽 방향으로 주사되며, τ_d 가 -이면 빔은 오른쪽 방향으로 주사된다.

그림 2(a)에는 본 논문에서 제안된 광학적 RF 실시간 지연 소자의 구조가 도시되어 있다. 이 소자는 테이퍼 구조를 갖는 처핑된 광섬유 브래그 격자와 격자 표면에 코팅되어 있는 히팅용 전극으로 이루어져 있다. 이 소자의 입력은 RF신호에 의해 변조된 광신호이다. 이때, 히팅용 전극의 양 끝 단에는 제어 전압 V_c 가 인가된다. 광섬유 코어에 형성되어 있는 격자의 주기와 광섬유 클래딩의 두께는 광신호의 진행 방향을 따라 점진적으로 (거의 선형적으로) 변한다. 이 광섬유 격자 상의 특정한 위치 z 에서의 반사 광파장은 $\lambda_B(z) = 2n_{eff}(z)\Lambda_g(z)$ 와 같이 주어진다. 여기서 n_{eff} 는 광섬유 모드의 유효굴절률이고 Λ_g 는 격자 주기이다. 전극에 전압을 인가하지 않은 $V_c = 0$ 인 경우, n_{eff} 는 위치에 관계없이 일정한 값을 갖기 때문에 반사 광파장의 분포는 광섬유 격자 제작시 주어진 Λ_g 에 의해 결정된다. 한편, 전극에 전압을 인가하여 전극의 온도를 상승시킨 경우에는 열광학효과에 의하여 n_{eff} 가 위치에 따라 변하게 되어 결과적으로 반사 광파장의 분포도 변하게 된다. 이를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 먼저 실리카 재질의 광섬유는 온도가 증가함에 따라 굴절률이 증가하는 열광학 효과 특성을 갖는다. 식각이 거의 되지 않은 광섬유 클래딩이 두꺼운 $z=L$ 부근에서는 격자가 형성되어 있는 코어로 열

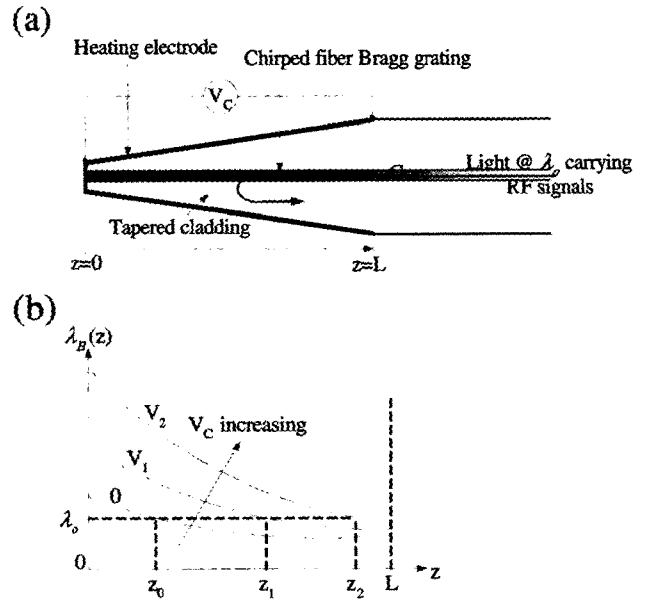


그림 2. 테이퍼 구조를 갖는 처핑된 광섬유 격자를 이용한 RF 실시간 지연 소자 (a) 소자 구조 (b) 전극 전압에 따른 반사 광파장의 분포.

이 적게 전달되기 때문에 열광학효과에 의한 굴절률 변화가 매우 작아서 반사되는 광파장이 거의 변화하지 않는다. 반면에 식각이 많이 되어 클래딩이 얇은 $z=0$ 부근에서는 코어로 열이 많이 전달되어 굴절률 변화가 상대적으로 크게 되어 반사 광파장이 전극에 인가되는 전압에 의해 많이 증가하게 된다. 테이퍼된 격자에 전압을 인가함으로써 격자의 처핑 정도가 증가하는 특성을 갖게 된다.

그림 2(b)에는 그림 2(a)에 나타나 있는 제안된 테이퍼 구조를 갖는 처핑된 광섬유 격자 내에서 전극에 인가한 전압 (전극의 온도에 비례)에 따른 반사되는 광파장의 분포가 도시되어 있다. $z=0$ 지점에서는 클래딩 두께가 가장 얇기 때문에 전극의 온도 변화가 코어에 형성된 격자에 미치는 영향이 가장 크다. 반면에, $z=L$ 인 지점에서는 클래딩의 두께가 가장 크기 때문에 전극의 온도 변화가 격자에 미치는 영향이 가장 작다. 이로부터 전극에 인가되는 전압이 증가함에 따라 반사되는 광파장의 분포가 그림 2(b)에서 같이 변하게 됨을 알 수 있다. RF 신호에 의해 변조된 파장 λ_0 를 갖는 광신호를 입력으로 사용한 경우, 전극에 인가되는 전압의 변화에 따른 실시간 지연 특성을 고찰해 보면 다음과 같다. 광섬유 격자 소자에 입력된 광신호는 전극 전압이 $V_c=0$, $V_c=V_1$, $V_c=V_2$ 일때 각각 $z=z_0$, $z=z_1$, $z=z_2$ 의 서로 다른 위치에서 반사된다. 따라서 일정한 입력 광파장에 대해 전극 전압을 이용하여 광신호의 반사되는 위치를 변화시킴으로써 광신호에 실려 전달되는 RF신호의 지연 시간을 조절할 수 있게 된다.

III. 제안된 실시간 지연 소자의 제작 및 특성 측정 결과

제안된 소자의 제작 공정은 다음과 같다. 먼저, 처핑된 광섬유 격자의 재킷을 약 15 mm 정도 제거하고 모터로 제어되는 정밀 스테이지에 고정시킨다. 그리고 재킷이 제거된 격자 부분을 광섬유 식각에 효과적인 HF용액에 수직 방향으로 담근 후 일정한 속도로 용액으로부터 꺼낸다. 이렇게 함으로써 광섬유의 식각 정도는 용액에 머무는 시간에 비례하기 때문에 그림 2에 나타낸 것과 같은 테이퍼된 구조를 갖는 광섬유 격자가 형성된다. 이 식각된 광섬유 격자 표면에 히팅용 전극으로서 Cr/Au 박막을 증착시킨다. 여기서 Cr/Au의 두께는 수백 Å 정도 범위에서 변화되어 전극의 저항 값을 적절하게 조절하였다. 특히, 금속 박막을 광섬유 표면에 균일하게 증착하기 위하여, 증착용 금속 소스와 광섬유의 거리를 수십 cm 이상 충분히 두었으며, 또한 광섬유의 아랫면과 윗면을 순차적으로 코팅하였다. 마지막으로 이 소자를 실리콘 기판에 에폭시를 이용하여 고정시키고 전극의 양 끝단에 전극 패드를 형성한다. 그림 3에는 제작된 광섬유 격자형 실시간 지연 소자의 현미경 사진이 나타나 있다. 테이퍼 구조의 길이 15 μm 에 걸쳐 광섬유 격자의 반경이 125 μm 에서 43 μm

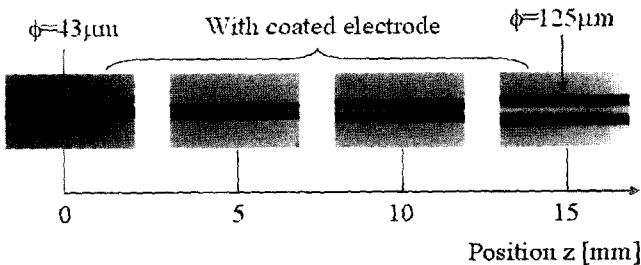


그림 3. 제작된 광학적 RF 실시간 지연 소자의 사진.

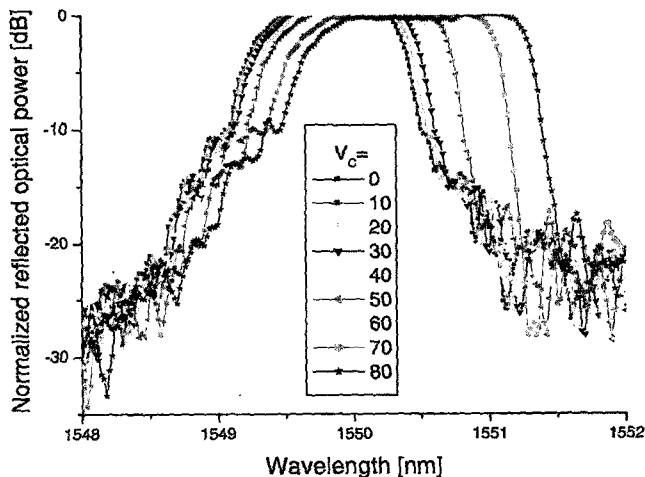
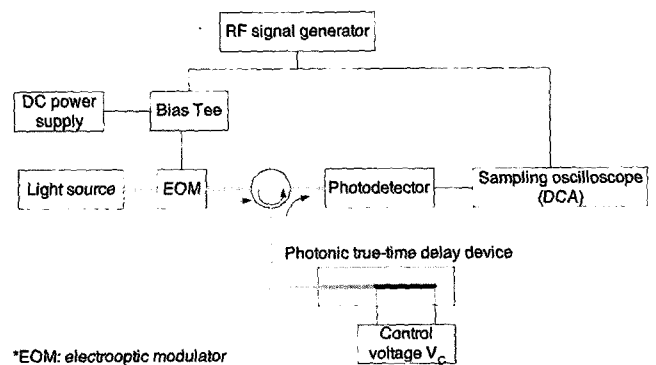


그림 4. 제작된 소자의 전극 전압에 따른 반사 광스펙트럼.

m까지 거의 선형적으로 변환을 알 수 있다. 이때 측정된 전극의 저항값은 약 26 k Ω 이다. 테이퍼 구조의 최소 직경이 43 μm 로 광섬유 모드에 비해 충분히 크기 때문에 추가적인 광손실을 유발하지 않을 것으로 생각된다.

제작된 테이퍼 구조를 갖는 광섬유 격자형 실시간 지연 소자의 전극에 인가된 전압에 따른 반사 광스펙트럼의 특성을 조사하였다. 그림 4는 전극 전압 V_c 를 0 V부터 80 V까지 10 V 간격으로 변화시켰을 때 전압에 따른 반사 광스펙트럼의 측정 결과를 보여준다. 전압이 인가되기 전에는 대역폭이 약 1.14 nm였으며, 전압을 $V_c=80$ V 인가하였을 때 대역폭이 약 1.67 nm로 증가하였다. 특히, 전압이 증가함에 따라 반사 스펙트럼이 장파장 쪽으로 주로 확장되어 전체적으로 대역폭이 증가함을 알 수 있다. 이것은 그림 2로부터 예상할 수 있듯이 테이퍼 구조를 갖는 광섬유 격자에 열을 인가할 때 전극과 코어의 거리에 반비례하여 광섬유 모드의 유효굴절률이 증가하기 때문이다.

그림 5에는 제작된 소자의 시간 지연 특성을 측정하기 위한 실험 장치가 도시되어 있다. 광신호는 선폭이 <0.0004 nm인 파장 가변 광원 (Agilent 81640A)으로부터 얻었으며, RF 신호는 RF signal generator로부터 얻었다. 먼저, 광신호는 외부 광변조기에 의하여 변조된 후 circulator를 통하여 시간 지연 소자에 입력된다. 이때 전극에는 일정한 제어 전압 V_c 가 인가된다. 소자로부터 반사된 광신호는 광검출기에 의해 RF 신호로 변환되고, 이 신호는 샘플링 오실로스코프 (Agilent 86100A, DCA)에 의해 관측된다. 그림 2(b)에서 예측할 수 있듯이, 제안된 소자로부터 일정한 인가 전압 범위에 대해 최대의 시간 지연을 얻기 위해서는 광원의 파장을 $V_c=0$ 일 때의 반사 광스펙트럼 상에서 장파장 쪽의 3-dB대역폭 근처에 맞춰야 한다. 이것보다 파장이 짧아지면 시간 지연량이 감소하게 되고, 파장이 길어지면 시간 지연량은 약간 증가할 수 있으나 RF 신호의 파워가 급격히 감소하는 문제가 발생한다. 그림 6은 $V_c=0$ 일 때 장파장쪽 대역폭 위치에 해당되는 파장 $\lambda_0=1550.3$ nm에 대하여 제작된 소자의 특성을 측정할 결과를 보여준다. 여기서 제어 전압 V_c 의 범위는 0 V~80 V이고, RF 신호의 주파수 범위는 4 GHz~8 GHz이다. 그림에서 알 수 있듯이 측정된 최대 실시간 지연의 크기는 약 120 ps이



*EOM: electrooptic modulator

그림 5. 샘플링 오실로스코프를 이용한 실시간 지연 소자의 실험 장치.

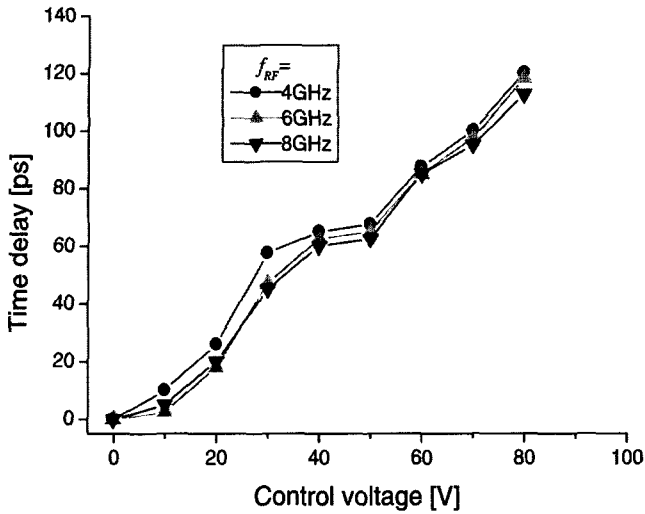


그림 6. 제작된 소자의 전극 전압에 따른 실시간 지연 특성 측정 결과.

다. 이로부터 광신호의 반사 위치 간의 최대 거리는 약 12 mm임을 알 수 있다. 이때 소비 전력은 약 250 mW이다. 그리고 제작된 소자는 실리카 물질에서의 열광학 효과에 의해 동작하기 때문에 동작속도는 ~ms일 것으로 예상된다. 위 실험 결과로부터, 본 논문에서 구현된 소자는 단일 광파장 광원을 이용하고 전극에 인가되는 전압을 제어함으로써 연속적으로 정밀하게 가변되는 시간 지연을 얻을 수 있는 광학적 RF 실시간 지연으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 한편 실시간 지연의 크기를 증가시키기 위해서는 테이퍼 구조를 갖는 광섬유 격자의 길이를 길게 하면 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 테이퍼된 구조를 갖는 광섬유 브래그 격자를 이용한 광학적 RF 실시간 지연 소자를 구현하였다. 이 소자는 전극에 인가되는 전압에 의해 유발되는 열광학효과를 통하여 광섬유 격자로부터 반사되는 광신호의 반사 위치를 변화시킴으로써 광신호에 변조용 신호로 실려서 전달되는 RF 신호의 시간 지연을 조절할 수 있다. 테이퍼된 소자의 길이가 15 mm에 대해, 측정된 최대 시간 지연은 소비 전력이 250 mW일 때 약 120 ps였다.

감사의 글

이 논문은 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음

(R08-2004-000-10312-0). 본 논문의 수행을 위해 도움을 주신 KAIST 전자전산학과 신상영 교수님과 오영훈 박사님, 그리고 광운대학교 전자공학과 김도환, 임정규 학생에게 깊은 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. Ng, A. Walston, G. Tangonan, J. Lee, I. Newberg, and N. Bernstein. "The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay," *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, pp. 1124-1131, 1991.
- [2] J. Shin, B. Lee, and B. Kim "Optical true time-delay feeder for X-band phased array antennas composed of 2x2 optical MEMS switches and fiber delay lines," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 1364-1366, 2004.
- [3] Y. Chen and R. T. Chen, "A fully packaged true time delay module for a K-band phased array antenna system demonstration," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 8, pp. 1175-1177, 2002.
- [4] H. Zmuda, R. A. Soref, P. Payson, S. Johns, and E. N. Toughlian, "Photonic beamformer for phased array antennas using a fiber grating prism," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 241-243, 1997.
- [5] A. Molony, L. Zhang, J. A. R. Williams, I. Bennion, C. edge, and J. Fells, "Fiber Bragg grating true time-delay systems: discrete-gating array 3-b delay lines and chirped-grating 6-b delay lines," *IEEE Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, pp. 1527-1530, 1997.
- [6] J. Marti, J. L. Corral, F. Ramos, V. Polo, and J. M. Fuster, "Millimeter-wave optical beamforming network for phased-array antenna employing optical up-conversion and wide-band chirped fiber gratings," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 517-518, 1999.
- [7] 이갑용, 최연봉, 신종덕, 김부균, 이상배, "CFG 실시간 지연선로를 사용한 10GHz 위상 배열 안테나의 설계", *한국통신학회논문지*, vol. 27, no. 3C, pp. 241-247, 2002.
- [8] B. Ortega, J. L. Cruz, J. Capmany, M. V. Andres, and D. Pastor, "Variable delay line for phased-array antenna based on a chirped fiber grating," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 8, pp. 1352-1360, 2000.
- [9] Y. Liu, J. Yang, and J. Yao, "Continuous true-time-delay beamforming for phased array antenna using a tunable chirped fiber grating delay line," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 8, pp. 1172-1174, 2002.

Voltage-Controlled Photonic RF True-Time Delay Using a Tapered Chirped Fiber Bragg Grating

Ho-Dong Chae, and 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 March 15, 2005, Revised manuscript April 19, 2005)

A photonic RF true-time delay using a tapered chirped fiber Bragg grating coated with a heating electrode has been proposed and fabricated. For an RF signal carried over an optical signal, the time delay has been achieved by controlling the voltage applied to the electrode and thus adjusting its reflection positions from the fiber grating through the thermo-optic effect. It features continuous voltage-controlled operation, requiring no mechanical perturbation and no moving parts. The measured time delay was about 120 ps with the electrical power consumption of 250 mW.

OCIS Codes : 050.5080, 060.2340, 230.0230, 230.1480, 350.4010.