

측면 연마된 광섬유 브래그 격자를 이용한 연속적인 광학적 RF 실시간 지연

채호동[†] · 김도환 · 김형준 · 이상신

광운대학교 전자공학과

Ⓣ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

김효겸 · 이규호 · 김광택

호남대학교 광전자공학과

Ⓣ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

(2004년 6월 8일 받음, 2004년 10월 15일 수정본 받음)

본 논문에서는 허핑용 전극이 코팅된 측면 연마된 광섬유 브래그 격자를 이용한 광학적 RF 실시간 지연을 제안하고 제작하였다. 이 소자는 기계적인 움직임이나 진동 없이 전압에 의하여 연속적으로 정밀하게 시간 지연값을 제어할 수 있는 특징을 갖는다. 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. 측정된 최대 시간 지연은 소비 전력이 280 mW일 때 약 100 ps이다.

주제어 : true-time delay, phase shifter, phase array antenna, microwave, FBG.

I. 서 론

최근, 휴대전화와 디지털 멀티미디어 방송 서비스 등의 보급으로 인하여 무선 통신량이 폭발적으로 증가하고 있다. 무선 통신 단말기 및 시스템의 성능은 주변의 통신환경에 민감하게 의존하는 경우가 많다. 예를 들어, 휴대전화의 통화품질이 사용자 주변의 통화환경, 즉 통화량이나 위치 등에 영향을 받게 된다. 따라서 주변의 통신환경에 관계없이 우수한 통신 품질을 제공하기 위해서는 통신요구에 따라 능동적으로 전파의 송수신분포를 조절할 수 있는 배열형 안테나가 필요하다. 배열형 안테나의 주사 방식에는 위상 주사방식(phase scanning)과 시간 지연 주사방식(time delay scanning)이 있다. 위상 주사방식은 사용하는 주파수에 따라 주사빔의 방향이 변하는 beam squint 현상이 발생하는 문제점을 지니고 있다.^[1]

그림 1은 광학적 실시간 지연을 이용한 배열형 안테나의 구조를 보여준다. RF 신호는 광변조기에 의하여 캐리어(carrier)로 사용되는 광신호에 실린 후 광섬유를 통해 전송된다. 광변조된 RF 신호들은 광학적 RF 실시간 지연에 의해 전달 시간이 적절히 지연된다. 이 지연된 광신호들은 광검출기에 의해 다시 RF 신호로 복원된 후에 각 요소 안테나를 구동하게 된다. 그림에서 알 수 있듯이, 각 요소 안테나를 구동하는 RF 신호 간의 시간 지연 차이가 $\Delta\tau$ 인 경우, 배열형 안테나에 의해 송수신되는 RF 신호 빔의 주사 방향은 $\Delta\tau$ 에 의해

결정된다. 빔 주사 방향인 θ 와 $\Delta\tau$ 의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\sin\theta = \frac{c \cdot \Delta\tau}{d} \quad (1)$$

여기서, θ 는 빔 주사 각이고, d 는 요소 안테나 간의 길이, c 는 빛의 속도, $\Delta\tau$ 는 요소 안테나 간의 시간 지연 차이이다. 예를들어 시간 지연이 없는 $\Delta\tau=0$ 경우에는 θ 는 0° 가 된다.

그림 1에서 알 수 있듯이 배열형 안테나의 핵심 요소 중의 하나가 RF 신호의 전달 시간을 조절할 수 있는 광학적 RF 실시간 지연이다. 광학적 실시간 지연은 넓은 대역폭, 전자 기파 간섭에 무관한 동작특성, 낮은 손실, 경량, 소형 등의 장점을 가지고 있다. 지금까지 광학적 실시간 지연을 구현하기 위하여 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating: FBG)^[2,3], 처핑된 광섬유 격자(chirped fiber grating: CFG)^[4,5,6] 그리고 기계적 변형에 의해 제어되는 브래그 격자^[7]의 방법이 제안되었다. 먼저, 광섬유 브래그 격자를 이용한 방법은 브래그 파장이 서로 다른 광섬유 격자를 연결하여 광원의 파장에 따라 광섬유 격자에서 반사되는 위치가 서로 다르게 함으로써 이산적인(discrete) 시간 지연을 얻는 방식이다. 그리고 처핑된 광섬유 격자를 이용한 방법은 가변 파장 광원으로 부터 입력된 서로 다른 파장을 갖는 여러 개의 광신호가 처핑된 광섬유 격자에서 반사되는 위치가 다른 특성을 이용하여 시간 지연을 얻을 수 있는 방식이다. 다음으로 광섬유 격자에 기계적인 변형을 이용하는 방법은 처핑이 없는 격자를 기계적 변형을 통해 처핑된 격자로 변환시켜 위와 유사한 방법으로 파장 가변 광원을 이용하여 시간 지연을 얻는 것이다.

[†] E-mail: neopeto@naver.com

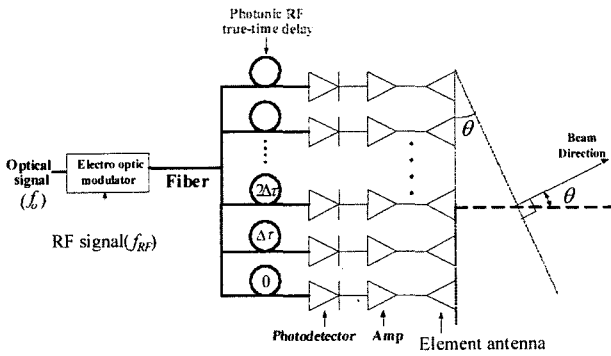


그림 1. 광학적 실시간 지연을 이용한 배열형 안테나의 구조.

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유 브래그 격자를 이용하여 광학적 RF 실시간 지연을 최초로 제안하고 구현하였다. 이 제작된 광학적 시간 지연은 기존의 소자에 비해 다음과 같은 장점을 갖는다. 첫째로, 광섬유 격자의 기계적 변형과 움직임 없이 전기적으로 시간 지연을 정밀하게 제어할 수 있기 때문에 정밀도와 신뢰성이 우수하다. 둘째로, 단일 광파장을 사용하기 때문에 파장 가변 광원을 이용하는 기존의 방법에 비해 가격이 저렴하고 단순한 구조를 갖는다. 한편, 최근에 광섬유의 측면 연마없이 광섬유 격자에 금속 코팅의 두께를 불균일하게 코팅하여 온도 gradient profile을 형성함으로써 격자의 처핑을 유도하는 방식의 분산보상기가 보고된 바 있다.^[8] 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 제안된 광학적 실시간 지연의 동작원리, 구조 및 제작 과정을 설명한다. 제 III장에서는 제작된 광학적 실시간 지연에 대한 실험과 결과를 보여주고, 제 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 제안된 광학적 실시간 지연 구조

광섬유 브래그 격자는 균일한 브래그 격자(uniform Bragg grating)와 처핑된 브래그 격자(chirped Bragg grating)로 나뉜다. 균일한 브래그 격자는 격자의 주기가 일정하여 단일 광파장에 대해서만 반사가 일어난다. 처핑된 브래그 격자는 격자의 주기가 선형 또는 비선형적으로 변하는 구조를 갖고 있으며, 여러 개의 광파장이 반사될 수 있다. 본 논문에서 제안된 광학적 실시간 지연 소자는 균일한 광섬유 브래그 격자를 사용하였다. 그림 2(a)에는 본 연구에서 제안된 RF 실시간 지연의 구조가 도시되어 있다. 이 소자는 측면 연마된 비대칭 테이퍼 구조를 갖는 광섬유 브래그 격자와 이 격자 표면에 코팅되어 있는 히팅용 전극으로 이루어져 있다. 광섬유 코어층에 형성되어 있는 격자는 주기와 유효 굴절률이 일정한 균일한 브래그 격자이다. 광섬유 클래딩층의 두께는 격자 방향을 따라 점진적으로 변하는 비대칭적인 테이퍼 구조를 갖는다. 균일한 브래그 격자의 반사 브래그파장 λ_B 는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda_g \tag{2}$$

여기서, n_{eff} 는 유효 굴절률이고 Λ_g 는 격자의 주기이다. 실리카 재질로 만들어진 광섬유는 온도가 증가함에 따라 굴절률이 증가하는 열광학효과 특성을 갖는다. 그림 2(a)에서 알 수 있듯이, 전극에 전압을 인가하여 전극의 온도를 상승시킨 경우, $z=L$ 근처에서는 측면 연마가 거의 되지 않아 광섬유 클래딩층이 두꺼운 부분에서는 격자가 형성되어 있는 코어층으로 열이 적게 전달되어 열광학효과에 의한 굴절률 변화가 매우 작기 때문에 반사되는 광파장이 거의 변화가 없다. 반면에 $z=0$ 근처에서는 측면 연마가 많이 되어 광섬유 클래딩층이 얇은 부분에서는 코어층으로 열이 많이 전달되어 굴절률 변화가 상대적으로 크기 때문에 반사 광파장이 열광학효과에 의해 커지게 된다. 결과적으로 비대칭적으로 측면 연마된 광섬유 격자에 전극을 통하여 온도를 변화시킴으로써 균일 브래그 격자가 처핑된 격자로 바뀌게 됨을 알 수 있다.

길이가 L인 측면 연마된 테이퍼된 구조의 광섬유 격자 내에서 전극에 인가한 전압에 따른 반사되는 광파장의 분포가 그림 2(b)에 도시되어 있다. $z=0$ 지점에서는 광섬유 클래딩층이 많이 제거되어 그 두께가 가장 얇기 때문에 전극의 온도변화가 코어층에 형성된 격자에 미치는 영향이 가장 크다. 한편, $z=L$ 인 지점에서는 클래딩층이 그대로 남아 있기 때문에 전극의 온도 변화가 격자에 영향을 거의 주지 못한다. 이로 인하여 전극 온도가 증가함에 따라 그림 2(b)에서와 같이 반사되는 광파장의 분포가 변하게 된다. 여기서 λ_{B0} 는 격자 내에서 초기에 온도변화가 없을 때의 반사되는 광 파장이다. RF 신호에 의해 변조된 파장 λ_p 를 갖는 광신호를 입력으로 사용한 경우, 전극의 온도변화에 따른 RF 실시간 지연 특성을 고찰해 보면 다음과 같다. 전극에 인가한 전압이 $V=V_0$ 일 때 입력된 광 신호는 $z=z_0$ 지점에서 반사되고, 전극에 인가

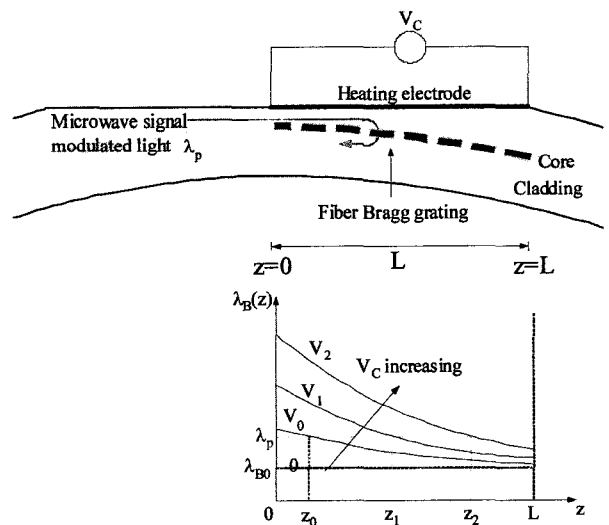


그림 2. 제안된 광학적 실시간 지연의 구조 및 동작 원리.

한 전압이 $V=V_1$ 인 경우에는 $z=z_1$ 지점에서 반사되고, 전압을 V_2 를 인가하면 z_2 지점에서 반사되는 것을 알 수 있다. 즉, 일정한 입력 광파장에 대해 전극에 인가되는 전압을 변화시킴으로써 열광학효과를 통해 광신호의 반사되는 위치를 조절할 수 있다. 결과적으로 전극에 인가되는 전압을 제어하여 광신호에 실려 전달되는 RF신호의 지연 시간을 조절할 수 있게 된다.

그림 3은 제안된 광학적 실시간 지연 구조에 대해 전극의 온도 변화(전압에 비례)에 따른 계산된 반사 스펙트럼을 보여준다. 비대칭 테이퍼 구조에 열을 인가할 때 전극과 코어의 거리가 가까울수록 격자의 길이는 증가하게 되고 전극과 코어의 거리가 멀수록 격자 주기에서의 변화는 감소하게 된다. 이로 인하여 반사 스펙트럼이 단파장 쪽은 거의 변하지 않고 장파장 쪽으로만 점점 넓어짐을 알 수 있다. 인가 전압에 따라 반사 스펙트럼의 대역폭이 증가하는 것은 인가 전압에 따라 격자의 길이 방향으로 격자의 주기가 점진적으로 증가하는 것을 보여주는 것이다. 따라서, 특정한 파장을 갖는 입력 광신호가 인가 전압에 따라 반사되는 위치가 달라짐으로써 결과적으로 출력 RF신호의 시간지연이 변하게 된다. 그림 3에서 온도 변화 ΔT 의 단위는 arbitrary unit이다. 본 계산 결과는 임의의 측면 연마된 광섬유 격자에 전극을 통해 열을 가할 때 광섬유 격자에 처핑현상이 유도됨을 정성적으로 보여주는 것이다. 이 이론적 계산결과와 제 III장에 있는 실험결과와의 정량적 비교를 위해서는 사용된 광섬유 격자의 구조와 전극의 전기적 특성(열 전도도, 두께, 폭) 등을 정확하게 고려해야 가능할 것이다.

본 논문에서 제안된 측면 연마된 비대칭 테이퍼 구조를 갖는 광섬유 브래그 격자의 제조 공정이 그림 4에 도시되어 있다. 우선 켈츠 블록(quartz block) 가운데에 홈을 낸 후, 이 홈에 광섬유 브래그 격자를 삽입한다. 격자를 고정시키기 위해서 자외선 경화 에폭시를 블록의 홈에 주입한 후 자외선으로 경화시켜 블록과 광섬유 격자를 고정 시킨다. 그리고 광섬유 격자가 고정된 켈츠 블록을 측면 연마하여 격자의 클래딩 일부분을 제거한다. 이 때 측면 연마된 광섬유의 깊이는 약 50

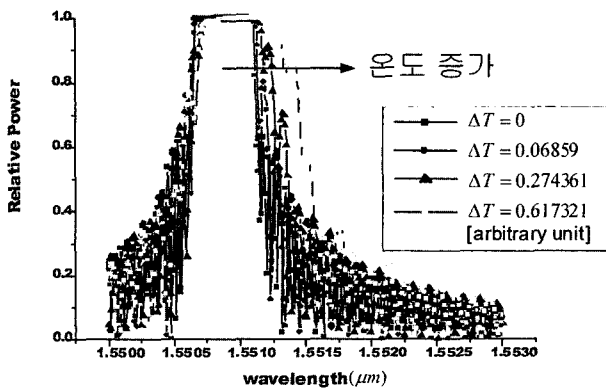


그림 3. 전극의 온도 변화(전압에 비례)에 따른 측면 연마된 광섬유 격자의 계산된 반사 스펙트럼.

μm 이다. 측면 연마된 광섬유 표면에 히팅용 전극인 알루미늄(Al)을 코팅하여 소자를 완성한다. 사용된 켈츠 블록의 길이는 3.5 cm이고, 광섬유 격자의 길이는 약 2 cm이다. 격자 위에 코팅된 전극의 길이는 2 cm이며 폭은 약 200 μm 이다. 측정된 전극의 저항은 340 Ω 이었다.

본 논문에서 제안된 방법과 같이 광섬유 격자의 측면 연마를 통해 얻을 수 있는 효과는 작은 소비전력으로 처핑된 광섬유 격자를 만들 수 있다는 것이다. 반면에 측면 연마를 하지 않고 전극을 코팅하여 소자를 구현한 경우에는 소비전력이 너무 커져서 필요한 전압이 전극에 인가할 수 있는 한계를 넘어설 것이다. 왜냐하면, 박막 형태의 전극에 과도한 전력을 인가하는 경우에는 전극이 파괴되는 문제가 발생하기 때문이다. 한편, 광섬유의 곡률 반경을 크게하여 광섬유와 전극의 각도를 크게 하는 경우에는 처핑되는 격자의 길이가 감소되기 때문에 최종적으로 얻어지는 시간 지연 값이 제한되는 문제점이 있다.

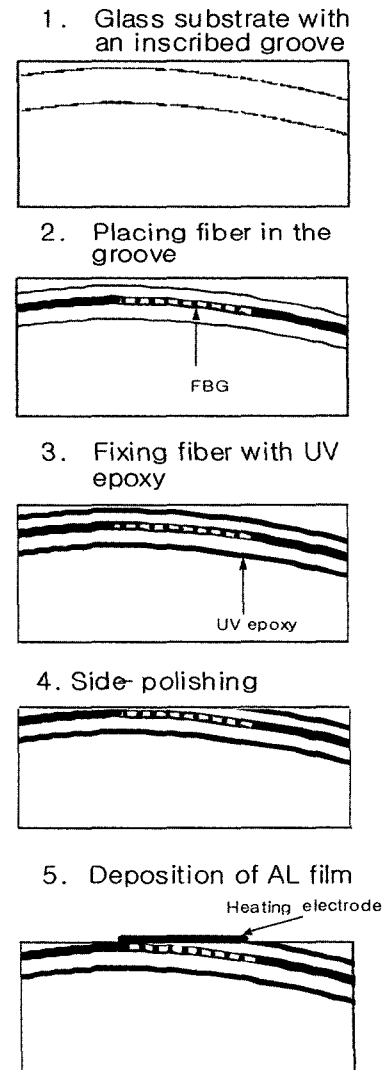


그림 4. 광학적 실시간 지연 소자 제작 과정.

III. 실험 및 측정 결과

제작된 광학적 실시간 지연의 전압에 따른 반사 광스펙트럼을 측정하기 위한 실험 구성이 그림 5(a)에 도시되어 있다. 그리고 그림 5(b)는 인가 전압을 0V부터 12V까지 3V 간격으로 변화시켰을 때 전압에 따른 광학적 반사 스펙트럼의 측정 결과를 보여준다. 전압이 증가함에 따라 예상대로 반사 스펙트럼이 장파장 쪽으로 넓어짐을 알 수 있다. 한편, 전압을 인가하기 전에 반사 스펙트럼이 약간 이동하고 넓어지는 처핑 현상을 보였다. 이것은 광섬유 격자를 일정한 곡률 반경을 갖도록 기판에 고정하고 측면 연마를 수행하게 되면 위치에 따라 유효굴절률이 점진적으로 변하기 때문이라고 생각된다. 그렇지만 제안된 시간 지연 소자의 동작원리를 고려할 때 전압을 인가하기 전에 발생하는 처핑 효과가 특성에는 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

그림 6은 샘플링(sampling) 오실로스코프(DCA)를 이용하여 인가 전압에 따른 실시간 지연 측정을 위한 실험 구성을 보여준다. RF 신호가 광변조기(electrooptic modulator: EOM)에 의해 가변 파장 광원에서 나오는 광신호에 실린다. 이 변조된 광 신호는 실시간 지연에 의해 반사된 후, 광검출기에 의해 RF 신호로 복원된다. 사용된 광검출기의 대역폭은 12 GHz이다. 일반적으로 RF 변조 주파수가 대역폭보다 클 경우에는 검출되는 RF 출력신호의 세기가 감소하게 된다. 본

논문에서는 대역폭보다 낮은 10 GHz까지만 RF 주파수를 사용하였기 때문에 광검출기의 특성이 실험에 미치는 영향은 거의 없다고 생각된다. 그림 7은 인가전압에 따른 실시간 지연 측정 결과를 보여준다. 이 때, 전압의 범위는 0V~11V이고, 광 파장은 1550.24 nm이며 RF 신호의 주파수는 2 GHz이다. 그림 7에는 5V~11V 범위의 인가 전압에 대해서만 측정결과를 도시하였다. 이것은 전압이 5V 이하인 경우에는 전압에 따른 시간 지연 양이 작고 불규칙한 반면에, 전압이 5V 이상인 경우에 전압에 따라 일정하게 시간 지연이 증가하는 특성을 보였기 때문이다. 이러한 현상을 보이는 이유는 균일한 브래그 격자에 약 5V 이상의 전압이 인가되어야 광섬유 격자가 충분히 처핑이 되어 전압에 따라 시간 지연이 달라지는 특성을 갖게 되기 때문이라고 생각된다. 그림 7에서 알 수 있듯이 얻어진 시간 지연은 최대 약 100 ps였으며, 이 때 소비전력은 약 280 mW였다. 한편, 그림 7을 보면 측정된 인가 전압에 대한 시간 지연의 특성이 monotonic한 연속적인 관계를 가짐을 알 수 있다.

그림 8은 DCA대신에 network analyzer를 이용하여 제작된 광학적 실시간 지연의 특성을 측정하는 실험 구성을 나타낸다. RF 신호의 주파수는 1 GHz~10 GHz 범위에서 변화되었다. 출력 RF 신호의 위상의 변화와 시간 지연과의 관계는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\Delta\phi = \omega_{RF} \tau_d = 2\pi f_{RF} \tau_d \tag{3}$$

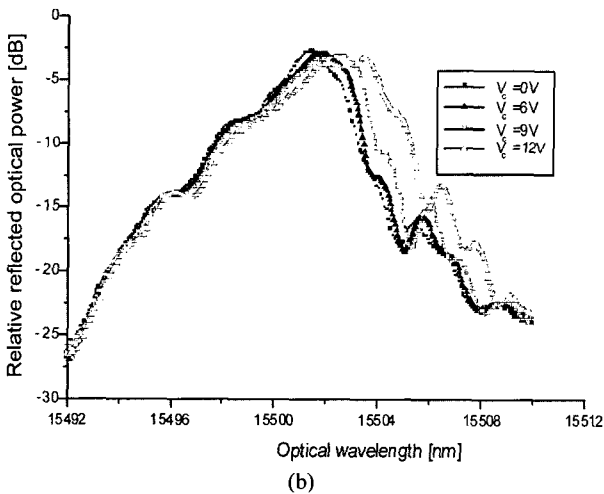
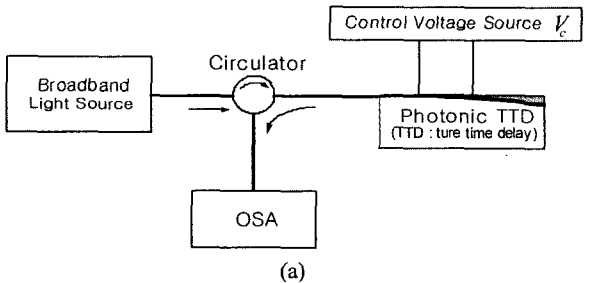


그림 5. 전압에 따른 반사 광스펙트럼 측정 (a) 실험 구성 (b) 반사 광스펙트럼.

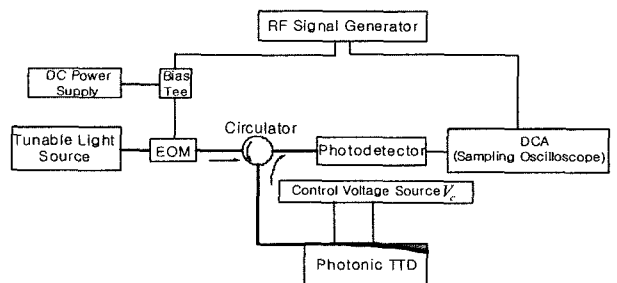


그림 6. 샘플링 오실로스코프 (DCA)를 이용한 RF 실시간 지연 측정 실험 구성.

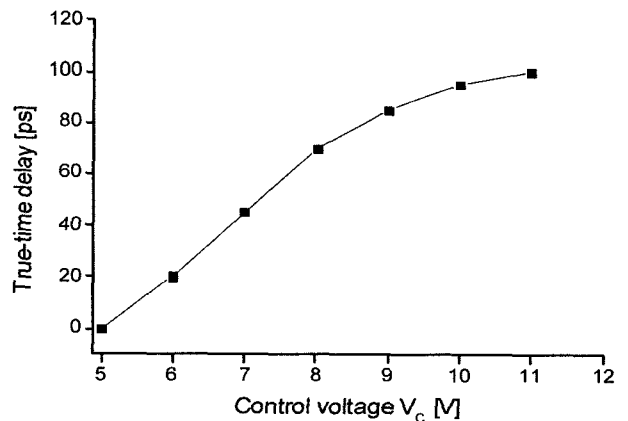


그림 7. 전압에 따른 실시간 지연 측정 결과.

여기서, $\Delta\phi$ 는 위상의 변화, f_{RF} 는 RF 신호의 주파수, τ_d 는 시간 지연을 나타낸다. 특정한 RF 주파수를 갖는 신호에 대해 인가 전압에 따른 시간 지연의 특성을 측정하기 위해서는 식 (3)에서 알 수 있듯이 특정 주파수에서 전압에 따른 위상 변화를 먼저 측정해야 한다. 그림 9(a)와 9(b)는 RF 주파수 2 GHz와 5 GHz 근처에서 전압에 따른 위상변화의 측정결과를 보여준다. 그림 10은 여러 RF 주파수에 대해 전압에 따른 측정된 위상 변화를 보여준다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 동일한 시간 지연에 대해서 RF 신호의 주파수가 높을수록 전압에 대한 위상변화의 기울기가 크을 알 수 있다. 식 (3)을 이용하여 그림 10의 결과로부터 얻어진 각 RF 신호 주파수에 대해 전압에 따른 시간 지연이 그림 11에 도시되어 있다. DCA를 이용한 측정결과와 같이 최대 시간 지연이 약 100 ps임을 알 수 있다. 이상적인 시간 지연의 경우에는 RF 신호의 주파수에 관계없이 전압에 따른 시간 지연 특성이 동일해

야 한다. 그러나 본 논문에서 얻은 결과는 주파수에 따라 시간 지연이 약간씩 변함을 알 수 있다. 이것은 시간 지연 측정상의 오류와 제작된 소자의 특성이 RF 신호 주파수에 따라 다소 변하기 때문이라고 생각된다. 정확한 원인을 찾기 위한 연구가 진행 중에 있다.

인가 전압에 대한 선형적인 시간 지연 특성을 얻기 위해서는 전극의 구조를 적절하게 설계하여 광섬유 격자에 생성되는 온도 분포를 변화시킴으로 광의 반사되는 위치가 전압에 따라 선형적으로 변화하도록 하면 가능할 것이다. 한편, 전극에 인가할 수 있는 전압의 한계는 박막 형태로 구현된 전극에 발생하는 열에 견딜 수 있는 온도에 의해 결정될 것이다. 특히, 실제적인 한계 전압은 제작된 전극의 저항값과 물리적인 특성에 따라 달라진다. 본 논문에서 최대 시간지연을 얻기 위해 사용된 인가전압은 전극에 전혀 영향을 주지 않는 것으로 생각된다.

마지막으로, 본 논문에서 제작된 시간지연 소자의 응답속도를 정밀하게 측정하기 위해서는 별도의 측정장치가 요구된다. 다만, 열광학효과 이용하는 유사한 측면 연마된 광섬유 격자 소자의 응답특성을 고려할 때 제안된 소자의 응답속도는 일반적으로 수십 ms 이하일 것으로 예상된다. 그리고 시간 지연 소자의 시간에 따른 안정성을 정밀하게 관찰하지

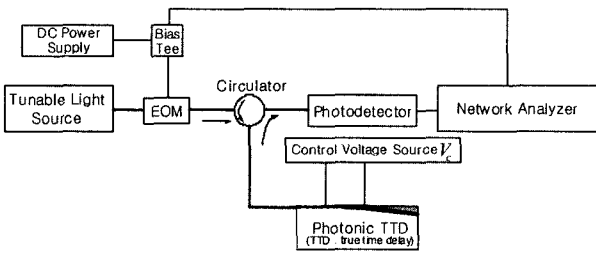
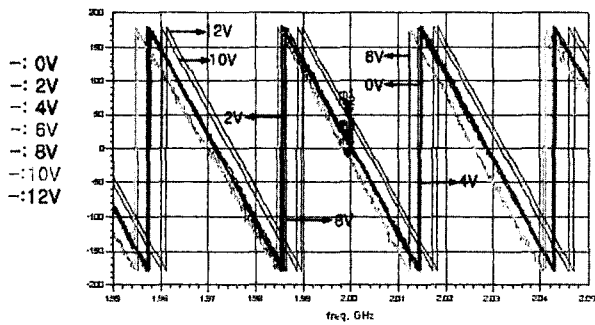
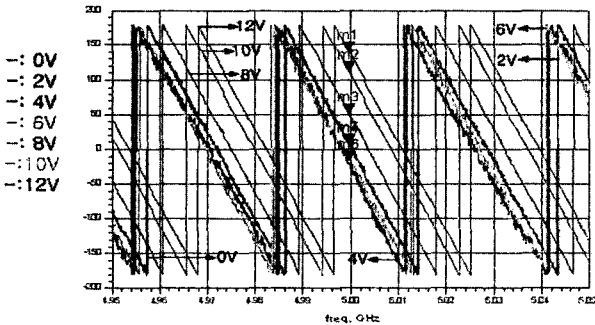


그림 8. Network analyzer를 이용한 시간 지연 측정 실험 구성도.



(a)



(b)

그림 9. Network analyzer를 이용한 위상변화 측정 결과 (a) 2 GHz 근처 (b) 5 GHz 근처.

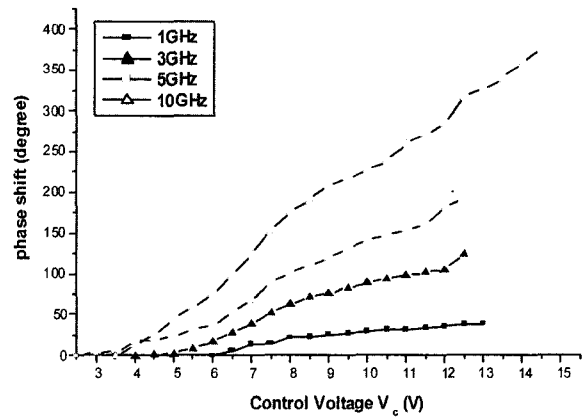


그림 10. 여러 RF 신호 주파수에 대한 전압에 따른 위상 변화 측정 결과.

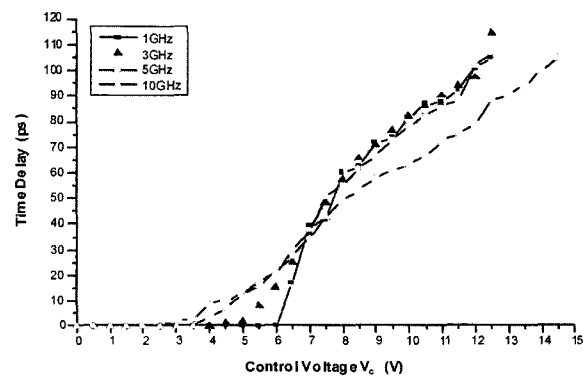


그림 11. 여러 RF 신호 주파수에 대한 전압에 의한 시간 지연.

는 못했으나 다음과 같이 시간에 따른 안정성을 간단히 조사하였다. 즉, 제작된 소자에 일정한 전압을 인가하고 시간 지연된 RF 신호의 변화를 DCA를 이용하여 수 십분 이상 관찰한 결과 특별한 drift 현상 등이 발견되지 않았다. 이 결과로부터 제작된 소자의 경우에 전극을 통해 광섬유로 전달된 열이 웰츠 블록을 통하여 일정하게 빠져나감을 알 수 있다. 이로부터 열이 광섬유 내에 고립되는 단열현상 등의 문제는 생기지 않는다고 생각된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유 브래그 격자를 이용하여 광학적 RF실시간 지연을 구현 하였다. 구현된 소자를 전압을 이용하여 RF 신호의 시간 지연을 연속적으로 정밀하게 제어 할 수 있는 특징을 갖는다. 측정된 최대 시간 지연은 약 100ps이었다. 인접한 요소 안테나 간의 간격이 30mm일 때, 이 시간 지연에 대해 빔의 주사각은 RF신호의 주파수에 관계없이 90°가 되어 공간을 충분히 커버할 수 있다. 그리고 제안된 소자의 경우에 얻을 수 있는 최대 시간 지연은 광섬유 격자와 전극의 길이를 증가시킴으로써 효과적으로 향상시킬 수 있을 것이다.

제안된 소자를 상품화하기 위해서 극복해야 할 가장 중요한 문제는 대량 생산시 발생될 수 있는 광섬유 측면 연마 공정의 재현성을 확보하는 것이다. 이것은 정밀한 검사기기를 갖춘다면 충분히 해결할 수 있다고 생각된다. 실제로 광섬유 측면 연마 방법을 응용한 광감쇠기 소자가 캐나다의 CIR사(www.cirl.com)에 의해 상품화된 예가 있다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부의 대학정보통신 연구센터(ITRC) 육성 지원사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] W. W. Ng, A. Walston, G. L. Tangonan, J. J. Lee, I. Newberg, and N. Berstein. "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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 이갑용, 최연봉, 신종덕, 김부균, 이상배, "CFG 실시간 지연선로를 사용한 10GHz 위상 배열 안테나의 설계," *한국통신학회논문지*, vol. 27, no. 3C, pp. 241-247, 2002.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] B. J. Eggleton, J. A. Rogers, P. S. Westbrook, and T. A. Strasser, "Electrically tunable power efficient dispersion compensation fiber Bragg grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 854-856, 1999.

Continuous Photonic RF True-time Delay Using a Side-polished Fiber Bragg Grating with Heating Electrode

Ho-Dong Chae[†], Do-Hwan Kim, Hyoung-Jun Kim, and Sang-Shin Lee

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

[†]E-mail: neopeto@naver.com

Hyo-Kyeom Kim, Kyu-Hyo Lee, and Kwang-Taek Kim

Department of Optoelectronics, Honam University 59-1 Seobong-dong, Kwangsan-Gu, Kwangju 506-714, Korea

(Received June 8, 2004, Revised manuscript October 15, 2004)

In this paper, a photonic RF true-time delay based on a partially side-polished fiber Bragg grating with heating electrode has been proposed and fabricated. It features continuous voltage-controlled operation, requiring no mechanical perturbation and no moving parts. For an RF signal carried over an optical signal, the time delay has been obtained by controlling the voltage applied to the electrode and thus adjusting its reflection positions from the fiber grating via the thermo-optic effect. The achieved time delay is about 100 ps with the electrical power consumption of 280 mW.

OCIS Codes : 220.5450, 050.5080, 350.4010.