PBG 기판을 사용한 광대역 도파관 스위치 설계

박병권°, 신임섭, 김문일
고려대학교 정보통신대학 전파통신공학과
bkpark@korea.ac.kr

Ku-band Photonic Bandgap Waveguide Switch with an Increased Frequency Bandwidth

B. K. Park, I. S. Shin, M. Kim
School of Information and Communication, Korea University

Abstract

기존에 제안된 도파관 스위치의 경우, 도파관의 E-plane에 PBG 기판을 내장하게 되는데, 이 경우 PBG 기판의 저항값을 조절해주는 MEMS 스위치의 바이어스 라인에 대한 문제점이 발생한다. 본 논문에서는 PBG 기판을 도파관의 H-plane에 놓음으로써 바이어스 라인을 RF로부터 쉽게 분리하고, 또한 단일 공진 주파수를 갖는 PBG의 경우에 제한된 기판의 길이로 인하여 bandwidth가 좁아지는 문제점을 서로 다른 공진 주파수를 갖는 PBG 기판의 연결을 통해서 bandwidth를 약 80%이상 증가 시킬 수 있음을 보였다.

I. 서 론

근래 통신 시스템의 경우 초 소형화 및 집적화가 진행되고 있다. 그에 따라 기존의 반도체 소자 제조 기술로는 구현할 수 없었던 낮은 전력 손실의 switch와 inductor 혹은 varactor 등의 수동 소자들을 하나의 chip으로 제작하기 위해 RF MEMS 기술에 대한 활발한 연구가 진행 중이다. 그 중에서 최근의 연구 중 가장 주목을 받는 주제로는 RF MEMS 스위치로서 기존 전자 소자인 다이오드에 비해 손실이 적고 광대역 특성을 갖고 있기 때문에 위상 배열 레이더, 다중 빔 인공위성 통신 시스템 및 무선 응용 분야의 스위칭 네트워크에서 큰 성능 향상을 불러 일으키고 있다. 앞으로 개인 이동통신의 진화에 따라 무선 이동 통신 기술은 보다 개인화, 멀티미디어화(음성, 데이터 및 화상 정보)된 정보통신 서비스의 제공과 데이터의 전송속도를 향상 시키기 위한 초고속 광대역 멀티미디어 정보통신 서비스 형태를 취하게 될 것이다. 향후의 밀리미터파를 이용한 대표적인 시스템 중 하나인 BMWS (Broadband Multimedia Wireless Service)의 주파수 대역(40.5GHz~43.5GHz)에서는 기존의 PIN 다이오드 스위치의 경우 손실이 지나치게 높고 상대적으로 높은 DC 파워를 요구하며, FET을 사용한 능동 스위치의 경우 디바이스의 크기가 작아짐에 따라 1W 정도의 출력 파워를 감당할 수 없게 된다. 이에 반해 PBG MEMS array 도파관 스위치는 작은 삽입손실과 높은 isolation를 얻어 낼 수 있으며 전력손실 면에서도 이점을 가지고 있다. 본 논문에서는 BMWS에서 사용될 도파관 스위치의 scaling 모델로서 Ku-band (12~18GHz)대역에서의 실험을 목표로 도파관 스위치를 설계하였다.

II. PBG 도파관 스위치 구조

PBG (Photonic Band Gap)에 대한 연구가 광에서부터 마이크로웨이브에 이르기까지 적용범위가 넓어짐에 따라 다양한 electromagnetic crystals(EMXT) 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 이러한 EMXT 구조는 일반 도체와는 달리 반사파의 위상 변화를 막아줌으로써 표면 임피던스를 무한대로 만들어주고, 그로 인하여 표면 전류의 흐름을 억제해주는 성질을 나타내게 된다[2]. 이러한 특성은 안테나의 무한대 임피던스 접지면이나 전력의 효율적인 결합을 위한 TEM 도파관, 그리고 방사 패턴의 개선을 위한 안테나의 reflector 등에 응용되고, 점점 그 범위를 넓혀 가고 있다[3,4,5].

도파관 스위치에 사용될 PBG는 그림과 같이 strip 구조의 주기적인 패턴을 통해서 구현될 수 있다. strip line 간의 갭 사이에서 생기는 캐패시턴스 성분과 기판의 두께에 의해서 생기는 인덕턴스 성분은 서로간의 병렬적인 연결 특성을 나타내게 되고 그로 인해 특정 주파수 대역에서 무한대의 표면저항을 만들어 낼 수 있다.

MEMS 스위치를 사용하여 active PBG를 구현할 경우, 스위치가 strip line 사이의 갭을 연결하게 되면 PBG의 갭 캐패시턴스 성분이 사라지게 되고 기판의 표면은 단락 저항을 나타내게 된다.

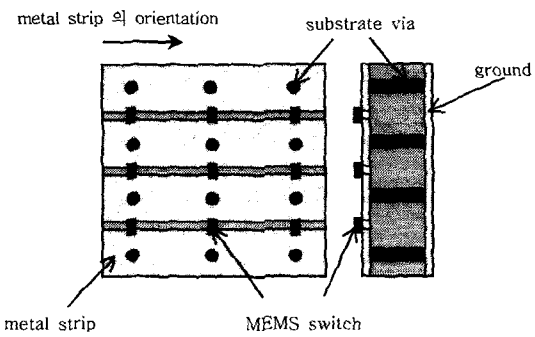


그림 1. 공진 주파수에서 무한 임피던스의 특성을 나타내는 PBG 구조의 정면 및 측면도. MEMS 스위치가 스트립 사이의 갭을 연결 시켜주게 되면 기판 표면에 단락 저항이 나타나게 된다.

도파관 내부에 PBG를 삽입하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 한 가지는 기존에 고안되었던 도파관의 E-plane에 기판을 장착하는 방법이고 나머지 하나는 H-plane에 장착하는 방법이다.

기존에 고안된 PBG도파관 스위치는 도파관 중앙의 E-plane에 PBG를 위치시킴으로써 PBG기판의 표면이 무한대의 저항 특성을 나타낼 시에는 진행파를 통과 시키고 갭 사이를 단락시켜 표면에 단락 저항을 만들어 주게 되면 진행파의 cutoff 주파수가 두 배 정도 증가하게 되면서 이로 인해서 거의 완벽한 차단 효과를 얻을 수 있게 되는 원리를 사용하였다[6]. 이 경우에는 strip line 사이에 존재하게 될 MEMS 스위치의 DC 바이어스 라인이 도파관 내부를 통과하지 않고 외부로 꺼내기가 매우 힘들다는 단점이 있다. 기판을 도파관의 양쪽 옆면에 삽입시키게 되면 DC 바이어스 라인을 외부로 도출하기가 가능해 지나, PBG 기판의 표면이 무한 저항을 나타낼 시에는 TEM 모드로, 단락 저항을 갖게 될 경우에는 TE_{10} 모드로 진행파가 통과하게 됨으로 도파관 스위치로서의 역할을 할 수 없게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 고안된 것이 도파관의 H-plane에 strip line의 오리엔테이션이 진행파의 방향과 수직이 되게 PBG 기판을 삽입하는 방법이다. 이 방법을 사용하면 바이어스 라인을 외부로 바로 연결하기가 매우 용이하게 된다. 스위치의 작용 특성은 E-plane 도파관 스위치와는 반대로, PBG의 표면이 무한대의 저항을 갖게 될 경우 도파관의 불연속 구역에서 TE_{10} mode가 존재할 수 없게 되고 이로 인해 높은 차단 효과를 얻을 수 있는 반면 표면에 단락 저항이 나타나게 될 경우 TE_{10} mode가 존재하게 되고 낮은 삽입손실을 가지고 전파를 통과 시키게 된다.

도파관의 H-plane에 PBG기판을 올려놓는 방법은 두 가지 경우로 나눌 수 있는데, 첫 번째 경우는 도파관의 중앙에 기판의 접지면을 마주보게 붙여 놓는 방법이고 두 번째는 도파관의 위, 아래 면에 기판을 삽입시키는 방법이다.

도파관 내부의 PBG 기판에 의해 불연속면을 갖게 되는 영역에서, 두 번째의 경우 PBG 기판 사이의 중앙 부분에 perfect E 평면이 존재하는 것으로 해석할 수 있고, 따라서 두 경우 모두 진행파인 TE_{10} mode가 볼 때 같은 간격을 가지고 perfect E 평면과 perfect H 평면이 번갈아 존재

하는 것으로 볼 수 있기 때문에 전파 진행의 특성상 거의 비슷한 성질을 갖게 된다.

본 논문에서는 바이어스 라인이 가능한 두 종류의 H-plane 도파관 스위치 중 도파관의 위, 아래에 기판을 삽입하는 스위치를 설계 하였다.

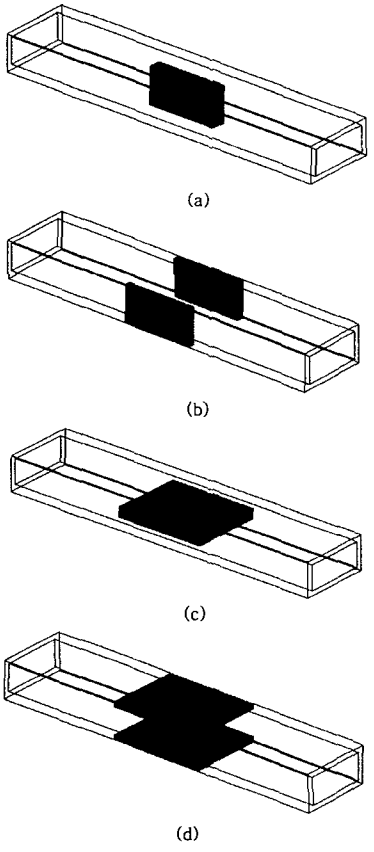


그림 2. 도파관 스위치에 기판을 삽입하는 네가지 방법, (a)도파관의 E-plane 중앙에 기판 삽입 (b)E-plane 사이드에 기판 삽입 (c)H-plane 중앙에 기판 삽입 (d)H-plane 위, 아래에 기판 삽입. (a)는 바이어스 라인을 넣어 주기가 불가능 하고 (b)는 스위치로서의 동작을 하지 못하게 되므로, 본 논문에서는 (d) 구조를 이용하여 설계하였다.

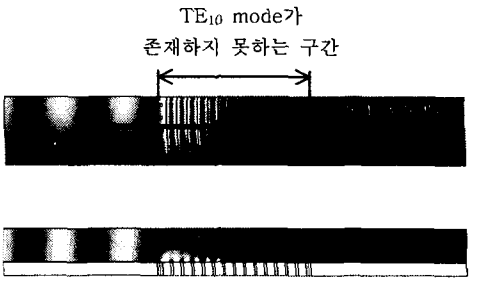


그림 3. 도파관의 위, 아래 면에 PBG 기판을 삽입했을 경우, TE_{10} mode가 대부분 반사 되는 것을 볼 수 있다. 구조의 대칭성을 이용해서 완전체의 1/4만을 시뮬레이션 하였다.

III. 단일 PBG와 다중 PBG 구조 비교

단일 PBG를 이용한 도파관 스위치에서 충분한 isolation 대역을 얻기 위해서는 동일한 두께와 유전율을 가질 경우에 기판의 길이를 매우 길게 해야 된다. 따라서 shorting bar를 MEMS 스위치로 대체할 경우에 많은 숫자의 MEMS 스위치가 필요하게 되고 또한 도파관의 길이 역시 증가하게 된다.

다중 PBG 도파관 스위치는 도파관 내부에 동일한 공진 주파수를 갖는 PBG 기판을 삽입하는 대신에, 일정한 간격의 서로 다른 공진주파수를 갖는 세 개의 PBG 기판을 직렬로 연결해 줌으로써, 요구되는 isolation 레벨을 같은 길이의 단일 PBG 구조보다 더 넓은 대역에서 얻을 수 있다.

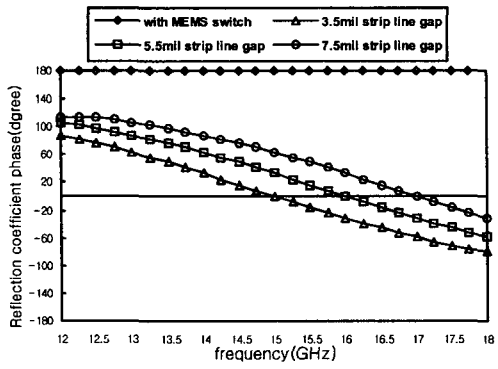
도파관(622×311mil) 시뮬레이션을 하기에 앞서, 원하는 주파수 대역에서 무한 임피던스를 갖는 PBG 기판을 설계하기 위해서 반사테스트를 실행하였다. 기판이 무한 임피던스를 갖는 주파수에서 반사계수의 위상 변화는 없게 되므로 반사계수의 위상변화를 보면서 공진 주파수를 찾을 수 있다. 시뮬레이션 툴은 HFSS 8.0[7]을 사용하였다. TEM 도파관의 한쪽을 포트로 설정하고 다른 한쪽 면을 PBG로 막은 후에 strip line 사이의 간격을 변화시키면서 공진 주파수를 변화시킬 수 있었고, 이를 통해서 원하는 주파수에서 공진을 일으키는 PBG 기판을 설계할 수 있었다. 이 과정에서 보유한 기판의 특성과 제작업체의 제작한계로 15GHz 아래로 공진주파수를 낮출

수 없었다. strip line 사이의 간격을 MEMS 스위치를 통하여 단락 시켰을 경우에는 PBG 표면이 단락의 특성을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 다중 PBG 도파관 스위치에 사용될 PBG 기판은 50dB isolation을 얻기 위해서 각각의 공진 주파수가 1GHz의 간격으로 15, 16, 17GHz 되도록 설계하였다. 반사테스트를 통해서 설계된 PBG 기판의 구조는 그림 1과 같다. 기판의 두께와 유전율은 60mil과 3.27인 TMM3 (Rogers corp.)를 사용하였고, 금속 strip line 사이의 간격은 공진 주파수 별로 각각 3.5, 5.5, 7.5mil이고, via의 지름은 14mil, via 사이의 간격은 45.4mil로 설계하였다.

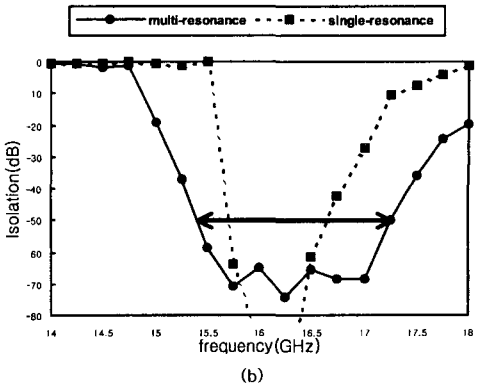
도파관 시뮬레이션은 단일 PBG 도파관 스위치의 경우 16GHz에서 공진 주파수를 갖는 PBG기판을 전파 진행방향으로의 길이를 $3\lambda/4$(933mil)로 늘여서 수행하였고, 다중 PBG의 경우에는 각각 $\lambda/4$의 길이를 갖게 한 뒤에 시뮬레이션 하였다.

그림 4(b).는 두 종류의 도파관 스위치 시뮬레이션 결과이다. 단일 구조의 경우 50dB isolation 레벨에서 약 0.95GHz의 주파수 대역을 갖는데 비해 다중 구조일 경우 80%정도 증가된 1.72GHz 정도의 주파수 대역을 얻을 수 있었고, MEMS 스위치를 장착 시키게 되면 두 종류 모두 삽입손실 없이 통과됨을 볼 수 있었다.

서로 다른 세 개의 PBG 기판은 상호간에 독립적으로 전파 진행에 영향을 미치게 되고, 결과적으로 각각의 PBG에 대한 isolation 특성의 곱으로 나타나게 된다. 따라서 사용되는 PBG의 공진 주파수 차이를 조절하게 되면 원하는 isolation 레벨에서 최대의 주파수 대역을 얻을 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. (a)시뮬레이션을 통한 PBG 기판의 반사계수 테스트 결과. 각각의 기판이 15, 16, 17GHz에서 공진 주파수를 갖고 MEMS 스위치를 장착 시켰을 경우 표면 저항이 단락으로 전환됨을 볼 수 있다. (b)서로 다른 공진 주파수를 갖는 세 개의 PBG 기판을 직렬로 연결하여 사용한 도파관 스위치와 단일 PBG 기판을 도파관 스위치로 사용한 경우의 시뮬레이션 비교. 50dB isolation주파수 대역이 다중 PBG 기판의 경우 약 80%정도 증가한다.

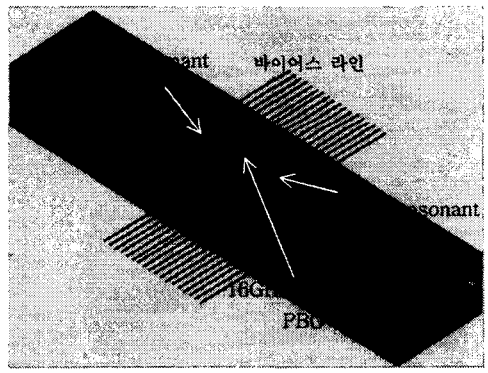


그림 5. H-plane 다중 PBG MEMS array 도파관 스위치의 개념도. H-plane에 PBG MEMS 스위치를 삽입하게 되면 DC 바이어스 라인을 도파관 외부로 쉽게 빼 낼 수 있고, 서로 다른 PBG 기판을 직렬로 연결해 줌으로써 스위칭 대역을 확장 시킬 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서 설계한 H-plane 다중 PBG 도파관 스위치는 MEMS 스위치를 사용하여 active PBG 기판을 삽입할 경우, DC 바이어스 라인을 도파관 외부로 쉽게 도출할 수 있기 때문에

PBG MEMS array 도파관 스위치의 실현 가능성을 더욱 높일 수 있다. 또한 다중 PBG 구조를 사용함으로써 단일 PBG 구조일 경우보다 효율적인 스위칭 대역을 만들 수 있다.

다중 PBG 구조의 경우, 기판의 길이, 공진 주파수 간격, 기판의 배열 방법 등에 의해서 스위치 특성에 영향을 미칠 것이라 생각된다. 앞으로 위에서 설계한 디자인을 제작한 뒤 시뮬레이션 데이터와 측정치를 비교 분석 하고, 위에서 언급한 여러 가지 변수들을 최적화 시키는 방향으로 연구를 수행할 것이다.

참고 문헌

[1] J. D. Joanopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals*, Princeton, NJ: Princeton Univ. Press 1995

[2] D. Sievenpiper, L Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.42, pp.2059-2974, Nov. 1999.

[3] J. A. Higgens, M. Kim, J. B Hacker , and D. Sievenpiper "The Application of Photonic Crystals to Quasi-Optic Ampl-ifiers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 2139-2143, Nov. 1999.

[4] M. Kim, J. B Hacker, A. L. Sailer, S. Kim, D. Sievenpiper, and J. A. Higgins, "A Re ctangular TEM Waveguide with Photonic Crystal Walls for Excitation of Quasi-Optical Amplifiers," 1999 *IEEE-S Microwave Symp. Dig.*, Anaheim, CA, June 13-19, 1999, pp. 543-546.

[5] F.-R.Yang, K.-P. Ma, Y.Qian, and T.Itoh, "A novel TEM waveguide using unipl-anar compact photonic-bandgap (UC-PBG) structure," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 2092-2098, Nov. 1999.

[6] 성영제 외, "Electromagnetic Crystals를 이용한 도파관 스위치," 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, vol.24, no.1, pp.269-272, 2001,5.

[7] HFSS. High frequency structure simulator, Ansoft사