論文2001-38TC-12-5

스텁을 갖는 PBG 셀로 구현한 마이크로스트립 PBG 구조 및 듀플렉서

(Design of Microstrip PBG structure and Duplexer using PBG Cell with Stub)

蔣 美 影 *, 奇 喆 埴 *, 朴 益 模 *, 林 漢 祚 *, 金 泰 壹 **, 李 精 一 ***

(Mi-Young Jang, Chul-Sik Kee, Ikmo Park, Han-jo Lim, Tae-Il Kim, and Jung Il Lee)

요 약

본 논문에서는 마이크로스트립 라인에 포토닉 밴드갭(photonic bandgap: PBG) 구조를 구현할 경우 저지대역 내에 형성되는 통과대역의 부분대역폭(fractional bandwidth)을 효과적으로 조절할 수 있는 PBG 구조의 설계에 관하여 연구하였다. 이 구조는 결함을 갖는 통상적 PBG 구조의 기본 PBG 셀(cell)에 스텁(stub)을 더하여 구현한 것으로 PBG 셀에 첨가된 스텁 길이가 증가함에 따라 스컷(skirt) 특성이 현저하게 개선됨을 볼 수 있었다. 이때 차단주파수(cutoff- frequency), 저지대역 및 통과대역의 중심주파수는 저주파 쪽으로 이동하였고 통과대역폭은 감소하였다. 이러한 결과는 PBG 셀에 스텁을 활용함으로써 저지대역 내에 형성되는 통과대역의 부분대역폭을 효과적으로 조절할 수 있음을 보여준다. 또한 스텁을 갖는 PBG 구조를 응용하여 우수한 스컷 특성을 갖는 듀플렉서를 설계할 수 있음도 보였다.

Abstract

We have studied the design of the photonic bandgap (PBG) structure on the microstrip line that can effectively control the fractional bandwidth of the passband formed in the stopband by adding the stub in the cell of the microstrip PBG structure. As the length of the stub increases, the cutoff frequency and the center frequency of the stopband are decreased, while the bandwidth of the stopband is increased. We have also found that the fractional bandwidth of the passband formed in stopband by the introduction of defect decreases as the stub length is increased. These results mean that adding the stub in the normal PBG structure is an effective way to control the fractional bandwidth. As an application example, we have implemented a microwave duplexer using the proposed structure.

* 正會員, 亞洲大學校 分子科學技術學科 및 電子工學部
(Department of Molecular Science & Technology and School of Electronics Engineering Ajou University)
** 正會員, LG 電子技術原
(LG Electronics Institute of Technology)
*** 正會員, 韓國科學技術研究員 光電子研究室
(Photonics Research Center, KIST, Cheongryang, Seoul, 136-791, Korea)

※ 본 연구의 일부분은 두뇌한국 21 사업과 동국대학교 양자기능반도체 연구센터를 통한 과학재단의 과제번호 QSRC-01-II-1-1의 지원을 받았음.
接受日字:2001年8月31日, 수정완료일:2001年10月15日

Ⅰ. 서 론

최근에 특정 주파수 범위의 전자기파를 효과적으로 통제할 수 있는 포토닉 밴드갭(photonic bandgap: PBG)구조 또는 광자 결정(photonic crystal)이라 불리우는 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 PBG 특성이 가시광선영역으로부터 마이크로파영역에 이르는 넓은 주파수 범위에서 활용될 수 있음이 밝혀짐에 따라 마이크로파 수동 소자 분야에서도 필터[1-2], 도파관[3], 마이크로스트립 안테나[4-7] 등 다양한 분야에 걸쳐 활용성이 시도되고 있다.

일반적으로 포토닉 밴드갭 구조는 유전상수가 서로 다른 물질을 일정한 주기로 반복적으로 배열하였을 때 굴절률(refractive index) $n=\sqrt{\mu\varepsilon}$ 이 주기적으로 변함에 따라 주기상수에 의해 결정되는 특정한 주파수 대역에서의 전자기파가 통과하지 못하기 때문에 생성되는 것으로 알려져 왔다[8]. 그러나 최근 자성체 PBG에 관한 실험결과와 마이크로파 영역 PBG 구조의 실험결과로부터 PBG를 형성하는 가장 기본적인 요소는 굴절률의 주기적인 변화가 아니라 파동 임피던스의 주기적 변화라는 사실이 밝혀졌다[9]. 이렇게 파동 임피던스의 주기적 변화가 PBG를 생성시키는 기본적인 요소임을 보여주는 예로 마이크로스트립 라인의 접지면을 2차원적으로 식각할 경우 PBG 구조로 동작하는 현상과 마이크로스트립 라인 상에 직접 주기적 배열을 주는 경우 PBG 구조로 동작하는 현상[9-11]을 들 수 있다. 마이크로스트립 라인에 형성된 PBG 구조는 PBG 셀과 50 Ω 마이크로스트립 라인 사이의 특성임피던스 차로 인한 다중반사 현상 때문에 넓은 대역에 걸쳐 저지대역(stop band)이 형성되기 때문에 광대역필터(broad band filter)로 동작할 수 있다. 이러한 점은 마이크로스트립 구조에서 shorted tuned stubs이 보이는 전형적인 협대역필터(narrow band filter) 특성과는 전혀 다른 점이다. 또한 이 PBG 셀(cell)의 주기적인 배열에 결함을 주면 특정 주파수 영역의 전자파들이 통과하는 결함모드(defect mode)라 불리우는 통과대역이 형성된다[8]. 이렇게 형성된 통과대역은 저지대역 내에 형성되기 때문에 원하지 않는 영역의 주파수에 대해 우수한 차단효과를 얻을 수 있으며 또한 삽입하는 결함의 특성에 따라 저지대역 내에서의 통과대역의 위치를 쉽게 조절할 수 있다.

이들 구조를 실제로 필터 등으로 설계하는데 있어 우선적으로 고려하여야 하는 점은 저지대역 형성에 관계되는 PBG 셀의 특성임피던스와 마이크로스트립 50 Ω 라인 사이의 특성임피던스 차이를 효과적으로 줄 수 있는 방법이다. 특히 마이크로스트립 PBG 구조에서 특성임피던스는 PBG 셀의 크기, 모양, 배열 형태 등에 따라 변하므로 원하는 특성의 PBG를 얻기 위해서는 PBG 셀 구조의 선택이 중요하다. 본 논문에서는 마이크로스트립 라인 상에 PBG 구조를 구현할 때 50 Ω 마이크로스트립 라인과 PBG 셀과의 특성임피던스 차를 효과적으로 조절할 수 있는 PBG 구조를 제안하고 그 특성을 살펴보았다. 이 구조는 통상적 형태의 PBG 셀에 스텁(stub) 성분을 첨가한 형태로 스텁 길이의 변화에 따라 저지대역 및 저지대역 내에 존재하는 통과대역의 중심주파수 및 통과대역폭을 용이하게 조절할 수 있다. 이러한 결과를 활용하는 예로서 제안된 PBG 구조를 이용하여 주파수에 따라 출력단이 달라지는 마이크로파용 듀플렉서(duplexer)를 구현하였고 그 특성이 우수함을 보였다.

Ⅱ. 스텁을 갖는 PBG 셀로 구현한 PBG 구조의 설계 및 특성 측정

그림 1에 본 연구에서 제안하는 스텁을 갖는 PBG 단위 셀과 이들 셀로 설계한 PBG 구조를 나타내었다. PBG 구조에 의해 생성되는 저지대역의 폭은 셀의 형태에 따라 달라지는데 본 연구에서는 그림 1(a)에서 보듯이 PBG 단위 셀의 기본형태를 정사각형 형태의 마이크로스트립 라인으로 하였으며 여기에 다시 길이 l mm인 스텁을 첨가하여 단위 셀이 되도록 하였다. 또한 결함모드(defect mode)는 그림 1(b)와 같이 주기 a를 d로 변화시켜서 발생하도록 하였다. 이러한 PBG 구조를 이용하여 필터를 설계하기 위해서 먼저는 원하는 저지대역의 중심주파수에 맞도록 주기를 선택해야 한다. 이때 PBG 구조의 주기 a는 다음 두 관계식을 따른다[8].

$$\lambda_g = \frac{c}{f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{1}$$

$$a = \lambda_g/2 \tag{2}$$

여기서 λg는 저지 대역의 중심주파수 f_0에 해당하는 관내파장의 길이이며, c는 빛의 속도, ε_{eff}는 마이크로스트립 기판의 실효유전상수(effective dielectric cons-

tant)이다. 본 논문에서는 기본 저지대역의 중심주파수를 5.5 GHz 부근으로 설정하였으며, 유전상수 10.2인 RT/Duroid 기판을 사용할 것을 고려하고 PBG의 주기 a를 위의 관계식에 의해 9 mm로 하였다. 또한 마이크로스트립 라인의 선폭은 50 Ω의 특성임피던스를 갖도록 0.6 mm로 설계하였다. 이렇게 중심주파수를 선택한 뒤 저지대역폭, 스컷 등 관련된 요구사항에 맞게 PBG 구조를 설계하기 위하여 PBG 셀의 크기, 모양, 배열 형태 등을 고려해 주어야 한다. 본 논문에서는 전자기파의 특성 제어가 용이하고 저지대역 특성이 우수한 방법으로 알려진 마이크로스트립 라인 자체로 PBG 구조를 제작하는 방법을 선택하였다[9,11]. 이 구조는 전자기파가 마이크로스트립 라인에 집중하는 현상을 이용한 것으로 2차원 PBG 구조와 동일한 PBG 효과를 얻을 수 있다[12,13]. 또한 PBG 단위 셀로는 저지대역 형성에 효과적이며[13], 시뮬레이션 해석이 쉬운 사각형 형태를 선택하였으며 이때 사각형 한 변의 길이는 3 mm로 하였다.

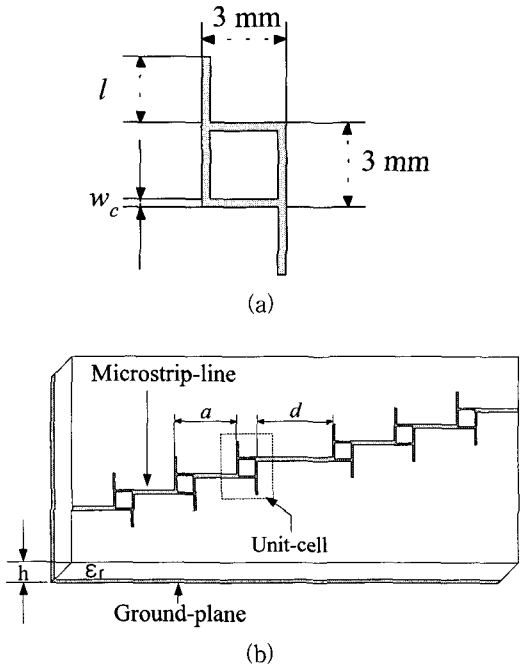


그림 1. 마이크로스트립 라인 상에 구현한 스텁을 갖는 PBG 단위 셀의 모형 (a) 및 결함을 갖는 PBG 구조 (b) ω_c는 셀 선폭, l은 스텁의 길이이다.

Fig. 1. The form of the PBG unit cell with stub (a) and the PBG structure with defect implemented on the microstrip line (b) l and ω_c are the stub length and the line width of the square line cell, respectively.

저지대역을 적절히 형성한 후에는 결함모드가 발생되도록 하여 저지대역 내에 통과대역을 형성함으로써 band pass 필터를 구현할 수 있다. 이때 결함모드는 셀의 형태나 크기 셀 간의 간격 등을 변화시켜 PBG 구조의 주기성을 깨어 결함을 제작함으로써 생성시킬 수 있다[12,13]. 본 연구에서는 주기를 9 mm에서 벗어난 d가 되게 함으로써 결함을 형성하였으며 저지대역의 중심에 통과대역을 위치시키기 위하여 결함의 길이 d는 셀의 선폭(w_c)을 따라 조절하였다. 이때 표 1에서 보는 바와 같이 셀의 선폭이 증가함에 따라 PBG 저지대역의 중심주파수는 높아졌으며 부분대역폭(fractional bandwidth)은 감소하고 있다. 일차원 PBG 구조에서 특성임피던스의 주기적인 변화에 의하여 PBG를 형성하는 다중반사(multiple reflection)가 일어날 때 두 특성임피던스의 계면에서 반사계수가 커질수록 저지대역은 깊어지는 동시에 그 중심주파수는 낮아지며 부분대역폭은 증가한다[14]. 따라서 PBG 셀의 선폭이 넓어질수록 저지대역의 중심주파수가 높아지고 부분대역폭이 적어지는 표 1의 결과로부터 본 연구에서 설계한 PBG 셀의 특성임피던스가 50 Ω 라인의 특성임피던스보다 큼을 알 수 있다. 한편 PBG 셀 간의 간격을 변화시켜 결함을 형성할 때 결함 간격 d를 증가시킬수록 결합모드 주파수는 낮아진다[12,13]. 따라서 변화되는 저지대역의 중심주파수 부근에 통과대역을 위치시키기 위하여 표 1에서 보듯이 셀 선폭이 넓어질수록 결함의 길이를 줄여주었다. 한편 셀의 크기는 PBG 셀의 특성임피던스가 50 Ω에서 벗어나 PBG를 형성하는데 직결되는 요소로 셀의 크기가 커질수록 저지대역의 폭이 넓어지고 깊이가 깊어지게 되는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 특성임피던스의 주기적 변화가 크면 클수록 저지대역(혹은 PBG)이 넓고 깊어지기 때문이다[9]. 그러나 또한 셀의 크기가 너무 커져 특성임피던스의 차이가 너무 많이 나게 되면 통과대역에서의 전달 특성에 나타나는 진동현상이 심해지게 된다. 이 연구의 주 목적은 스텁이 PBG에 미치는 영향을 조사하고 응용하는 것이므로 본 논문에서는 이러한 점을 고려하여 PBG 셀을 한 변의 길이가 3 mm인 정사각형으로 한정시키고 PBG 셀의 선폭이 0.2~0.6 mm인 경우를 조사하였다. 이렇게 PBG 셀의 가운데를 천공하여 셀의 선폭을 조절한 이유는 구조적으로 불연속한 부분에 전류가 집중되는 현

상 때문에 마이크로스트립의 셀 중앙에 변형을 주더라도 전자기파의 특성에 미치는 영향이 적기 때문이다[15]. 이렇게 결함을 갖는 통상적 PBG 구조에 스텁을 추가하였을 때 저지대역 및 저지대역 내에 형성되는 결함모드가 스텁에 의하여 받는 영향을 분석 응용하고자 한 것이 이 연구의 목적으로 이때 스텁은 정사각형 PBG 셀에 길이 l인 마이크로스트립 라인을 셀 위쪽과 아래쪽에 대칭적인 구조로 디자인하였다. 이렇게 스텁을 PBG 셀의 가장자리 부분에 첨가한 이유는 PBG 셀의 외곽 중앙에 스텁을 줄 경우 구조의 불연속 부분이 많아짐으로 인하여 통과대역의 특성이 급격히 악화되는 현상이 관측되었기 때문이었다. 이때 각 셀 선폭에 대해 스텁 길이 l은 기본 PBG 셀 크기를 넘지 않는 범위인 0~2.4 mm로 조절하였다. 본 논문에서 제안된 PBG 구조에 대한 모든 전자기파 특성분석에는 모멘트 방법(MoM)으로 계산하는 EM 시뮬레이터인 Ensemble 5.1을 사용하였다. 실제 PBG 구조는 이러한 시뮬레이션 파라미터를 바탕으로 유전상수 ε_r=10.2 이며, 두께가 0.635 mm 인 RT/Duroid 6010 기판 상에 통상적인 photolithography를 사용하여 구리판을 에칭하여 제작하였으며 전달특성 측정은 HP8510C network analyzer로 행하였다.

표 1. 셀 선폭에 따른 저지대역 중심주파수의 변화 및 저지대역 중심에 결함모드 통과대역이 위치하도록 하기 위한 결함길이

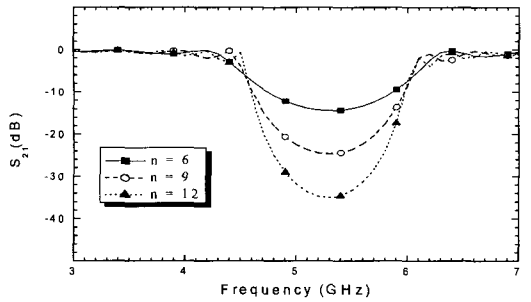
Table 1. The dependence of stop band center frequency on the line width of the PBG cell and the appropriate defect length for the passband due to the defect to be located at the center of the stopband.

w_c (mm)	f_o (GHz)	%BW (%)	d (mm)
0.2	5.292	10.4	11.3
0.3	5.325	5.1	11.0
0.4	5.341	3.1	10.9
0.5	5.353	2.3	10.8
0.6	5.360	1.6	10.7

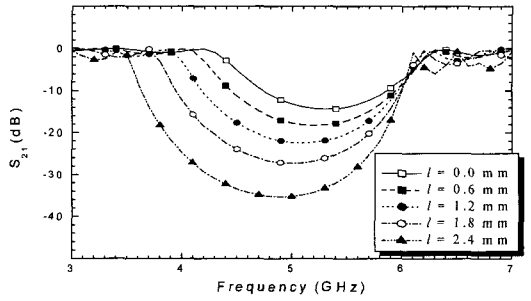
Ⅲ. 스텁을 가진 PBG 셀에 의해 형성되는 PBG의 특성

본 논문에서 제안하는 스텁을 가진 PBG 셀들에 의해 형성되는 저지대역 및 통과대역의 특성을 알아보기 위하여 결함이 없는 PBG 구조 즉 완전히 주기적인 구조에서 스텁이 없을 때(l=0) 셀의 개수에 따른 저지대역의 특성과 6개의 셀로 구성된 PBG 구조에서 선폭 0.3 mm인 PBG 셀에 첨부하는 스텁의 길이 l을 변경함에 따른 저지대역의 특성을 그림 2(a)와 2(b)에 나타낸 바와 같이 시뮬레이션으로 구한 전달특성 S_{21}의 변화로 살펴보았다. 또한 스텁 길이에 따른 차단주파수와 저지대역 삽입손실의 최대치 및 부분대역폭을 표 2에 비교하였다. 그림 2(a)에서 보이는 PBG 주기의 증가에 따라 저지대역의 폭은 변화가 없이 깊이만 점차 깊어지는 현상은 PBG 구조가 보이는 잘 알려진 특성이다. 즉 특성임피던스의 주기적인 변화는 전자파들이 일정한 위상관계를 갖고 다중반사 되게 하며 이렇게 다중반사되는 전자파들의 진폭과 위상차가 PBG의 크기를 결정한다[14]. 이때 다중반사되는 중심주파수는 일반적으로 식 (1)과 (2)로 주어지나 특성임피던스의 차이가 커지게 되면 중심주파수는 감소하는 경향을 보인다[14]. 그림 2(a)의 경우는 반사계수의 차이는 없이 다중반사되는 횟수만 증가하므로 저지대역의 폭은 변화하지 않고 깊이만 깊어진다. 스텁을 PBG 셀에 첨가하는 경우는 이와 달리 그림 2(b)에서 보듯이 스텁의 길이가 길어짐에 따라 저지대역의 저주파 경계 즉 차단주파수(cutoff frequency)가 저주파 쪽으로 이동하는 동시에 최대 삽입손실 역시 증가하고 있다. 반면 기본 저지대역이 끝나는 부분의 주파수 즉 기본 저지대역의 고주파 경계는 스텁의 길이에 관계없이 거의 일정하게 유지되고 있다. 이때 삽입손실은 표 2에서 보듯이 스텁의 길이를 1.8 mm로 할 경우 스텁이 없는 경우에 비하여 2배 가까이 증가한다. 앞서 언급한 특성임피던스의 불연속면에서 반사계수가 클수록 PBG의 중심주파수가 낮아지며 PBG 대역폭이 증가하는 사실로 미루어 볼 때 이러한 현상은 첨가되는 스텁의 길이가 길어질수록 PBG 구조에 의해 반사되는 마이크로파가 증가됨을 분명히 해준다. 이러한 현상은 마이크로파가 비록 마이크로스트립 라인과 접지면 사이에 강하게 구속되어 있으나 마이크로스트립 라인 주변에도 상당히 분포되어 있어 이들이 진행중 스텁의 경계면에서 특성임피던스의 변화로 반사되기 때문이라 판단된다.

그림 2(b)에서 PBG에 첨가된 스텁 길이 l이 증가될 때 PBG의 고주파 경계 주파수의 변화는 거의 없이 저



(a)



(b)

그림 2. 한변의 길이 3 mm, 셀 선폭 0.3 mm인 정사각형 PBG 셀로 구현한 결함이 없는 PBG 구조에 대해 MoM 시뮬레이션으로 구한 (a) 셀 수 n에 따른 삽입손실 및 (b) 6개의 셀로 이루어진 PBG 구조에서 스텁의 길이 l에 따른 삽입손실

Fig. 2. The simulated insertion loss of the PBG structure with the square cells of 3×3 mm^2 area and the cell line width of 0.3 mm. (a) The dependence on the cell number. (b) The dependence on the stub length for the PBG structure with six cells.

주파 경계 주파수 즉 차단주파수 ω_{cutoff}만 점차 낮은 주파수로 이동하는 현상은 스텁에 의한 분로 정전용량(shunt capacitance)이 전달특성에 미치는 영향을 고려함으로써 쉽게 이해할 수 있다. PBG 구조가 아닌 단순한 마이크로스트립 전송선에 정전용량 C_s를 갖는 스텁이 마이크로스트립 라인 상에 분로(shunt) 형태로 주기 a로 반복하여 나타날 때 그 전송선은

$$\omega_{cutoff} = 2\left(\frac{1}{C_s a L}\right)^{1/2} \tag{3}$$

로 주어지는 차단주파수 ω_{cutoff}를 보인다[16]. 여기서 C_s는 스텁성분으로 인해 더해진 병렬 부하 정전용량이며, a는 구조의 주기, L은 마이크로스트립의 단위길이당 인덕턴스 값이다. 본 연구의 경우에는 고정된 주기 a=9 mm와 셀 형태를 갖는 PBG 구조를 형성한 후 다시 그 구조상에 병렬 스텁을 주기 a로 반복시켰으므로 직렬 인덕턴스 성분에는 변화가 없다. 따라서 PBG 구조에 의해 형성된 저지대역에 덧붙여진 스텁에 의한 병렬 정전용량 C_s가 차단주파수를 더욱 감소시키는 역할을 한다. 스텁의 길이가 일정하면서 PBG 셀의 수가 증가하는 경우는 그림 2(a)와 같이 저지대역의 폭은 변화 없이 깊이만 깊어지는 현상을 확인할 수 있었다.

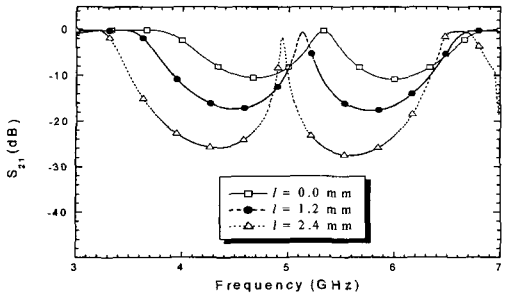
표 2. 한변의 길이 3 mm 셀의 선폭 0.3 mm인 정사각형 셀 6개로 주기 9 mm인 PBG 구조를 형성하였을 때 시뮬레이션으로 구한 스텁 길이 l의 변화에 따른 차단주파수(cutoff-frequency), 삽입손실의 최대치 S_{21max}, 부분대역폭의 변화

Table 2. The dependence of cutoff-frequency, maximum insertion loss and percentage bandwidth of the first stopband on the stub length l for the PBG structure with six PBG cells of 9 mm period.

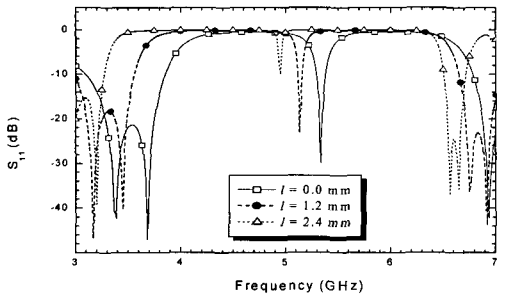
l (mm)	f_{cutoff} (GHz)	S_{21max} (dB)	%BW (%)
0.0	4.4	-14.4	33.6
0.6	4.2	-18.3	38.01
1.2	3.89	-22.5	42.45
1.8	3.79	-27.3	47.12
2.4	3.52	-35.4	53.3

PBG 구조를 마이크로파에 활용하는데 있어 큰 문제점 중의 하나는 마이크로파용 PBG 구조가 많은 경우 그 물리적 크기가 너무 크다는 점이다. 이는 식 (1)과 (2)에서 보듯이 PBG의 주기가 PBG 중심주파수의 파장과 직결되며 또한 충분한 크기의 PBG를 얻기 위해서는 적어도 5, 6 주기의 PBG 구조를 반복하여야 하기 때문에 활용하고자 하는 주파수 대역이 낮아질수록 PBG 구조가 커지기 때문이다. 이때 본 연구에서 제안하는 스텁을 가진 PBG 구조는 좀 더 짧은 주기로도 좀 더 낮은 주파수 대역에 충분히 넓고 깊은 저지대역을 형성할 수 있으므로 PBG 구조를 마이크로파 회로에 집적시키는데 대단히 유용한 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

결함에 의해 발생되는 통과모드에 스텁이 미치는 영향을 살펴보기 위하여 앞서의 PBG 구조 가운데 부분



(a)



(b)

그림 3. 앞서와 동일한 PBG 셀로 PBG 구조의 중앙에 d=11 mm되게 결함을 구현한 PBG 구조에서 시뮬레이션으로 구한 (a) 삽입손실 및 (b) 반사손실의 스텁길이 의존성.

Fig. 3. The dependence of (a) insertion loss and (b) return loss on the stub length l obtained from the simulation for the PBG structure identical with the formers except the existence of the defect d=9 mm at the center of the structure.

에 결함 길이 d=11 mm가 되게 하였을 때 시뮬레이션 결과로 구한 스텁의 길이 l에 따른 삽입손실과 반사손실의 변화를 그림 3(a)와 3(b)에 각각 나타내었다. 이 그림에서 스텁이 길어짐에 따라 저지대역 내에 형성된 통과대역의 위치가 저주파쪽으로 움직이고 통과대역의 첨두치가 낮아지며 통과대역의 대역폭이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이 구조에서 스텁 길이 l의 변화에 따른 PBG 특성변화를 좀 더 상세히 조사한 결과를 나타낸 표 3에서 보듯이 스텁이 길어짐에 따라 통과대역의 중심주파수가 감소하는 것에 비하여 그 대역폭이 좁아지는 정도가 훨씬 심하여 부분대역폭이 급격히 감소하고 있다. 따라서 스텁이 첨가된 구조는 협대역 통과용 필터로도 아주 적절함을 알 수 있다. 그러나 이 경우에도 그림 3(a)에서 보듯이 통과대역의 대역폭이 좁아짐과 동시에 통과대역 첨두치 역시 감소하고 있다. 따라서 실제 설계에 있어서 통과대역의 스컷특성을 개선하는 것과 충분한 첨두치를 확보하는 것은 서로 상호절충(trade-off) 관계에 있음을 알 수 있다. 스텁 길이 l이 증가됨에 따라 통과대역의 중심주파수와 그 첨두치가 낮아지는 현상은 스텁이 길어짐에 따라 반사되는 전자기파가 많아짐으로 인해 저지대역의 중심주파수가 낮아지며 저지대역의 깊이 역시 낮아지기[14] 때문이다.

표 3. 6개의 PBG 셀 가운데에 d=9 mm인 결함이 있는 PBG 구조에 대해 시뮬레이션으로 구한 스텁 길이 l에 따른 통과대역의 중심주파수 및 통과대역폭의 변화

Table 3. The dependence of center frequency and bandwidth of the passband on the stub length l obtained from the simulation results on the PBG structure described in the text.

l (mm)	f_0 (GHz)	BW (GHz)	%BW (%)
0	5.331	0.271	5.08
0.3	5.28	0.229	4.34
0.6	5.237	0.183	3.49
0.9	5.182	0.152	2.93
1.2	5.132	0.125	2.44
1.5	5.088	0.1	1.97
1.8	5.033	0.082	1.63
2.1	4.983	0.064	1.28
2.4	4.94	0.05	1.01

그림 4는 한변의 길이 3 mm인 정사각형 PBG 셀에서 각각의 PBG 셀 선폭에 대하여 스텁 길이를 변화시켜 가며 구한 통과대역의 부분대역폭을 보여준다. 그림 4에 보인 바와 같이 PBG 구조에서 셀의 선폭이 작을수록 스텁에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 PBG 셀의 선폭이 충분히 넓을 경우 스텁을 제외한 PBG 셀의 자체적인 커패시턴스 값이 충분히 커져 스텁의 병렬 커패시턴스 효과는 작아지기 때문으로 보여진다. 따라서 통과대역폭의 변화를 효과적으로 얻고자 할 때는 셀의 선폭을 좁게하여 스텁에 의한 영향을 크게 하여야 하는 것으로 판단된다. 지금까지의 결과들은 마이크로스트립 상에 형성된 PBG 구조에서 스텁 길이를 통하여 PBG 셀의 특성임피던스 값을 용이하게 변화시켜 줌에 따라서 저지대역 및 통과대역의 특성을 효과적으로 조절할 수 있음을 보였다. 이러한

시뮬레이션 결과들은 다음절에서 보여줄 바와 같이 PBG 구조로 실제 마이크로파 소자를 구현하는데 중요한 판단자료가 된다.

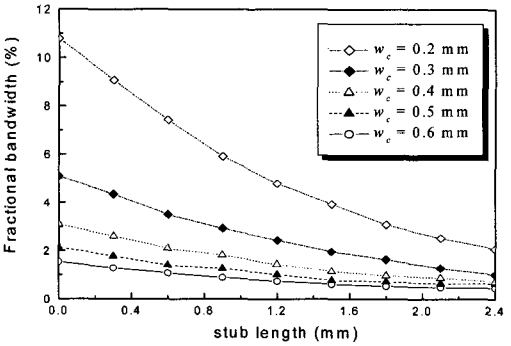


그림 4. PBG 셀의 선폭이 다를 때 스텁 길이 l에 따른 부분대역폭의 변화

Fig. 4. The variation of fractional bandwidth according to the stub length l for various cell line widths.

Ⅳ. 듀플렉서에의 응용 예

지금까지 시뮬레이션으로 구한 스텁 관련 특성을 활용하는 예로 그림 5(a)와 같이 주파수에 따라 출력단이 달라지는 듀플렉서(duplexer)를 설계하고 구현해 보았다. 이때 PBG 셀의 선폭은 스텁의 효과가 그림 4에 보듯이 충분히 나타나도록 ω_c=0.3 mm로 하였으며 전달특성은 스텁이 없는 경우(l=0 mm)와 l=2.4 mm 두 경우에서 측정된 결과를 비교해 보았다. 여기에서 서로 다른 주기를 갖는 두 PBG 구조를 병렬로 연결하여 듀플렉서를 설계하지 않고 a=9 mm로 동일한 주기를 가진 PBG 구조 내에 결함 주기만을 15.5 mm와 12 mm로 달리한 이유는 주기가 다른 PBG 구조의 경우 서로 다른 저지대역 내에서 반사되는 전자파의 상호간섭에 의해 원하지 않는 주파수 영역에서 발생되는 공진모드 때문에 듀플렉서로 동작하는데 제약이 많기 때문이었다[17]. 그림 5(a)의 PBG 구조는 출력단으로 갈수록 멀어지는 형태이나 각 포트로 진행하는 전자파 간의 간섭이 배제되는 한 셀의 방향을 반전시켜 포트 2, 3의 간격을 가까이 할 수도 있다. 또한 구조의 주기성과 대칭성을 유지하기 위해 첫 번째 셀을 양쪽 PBG 구조의 중앙에 위치시켰으며, 두 번째 PBG 셀은 스텁에 의한 겹침을 방지하기 위해 PBG 셀이 겹치는 부분의 스텁을 없앴는데 이는 이 스텁을 없애도 전자기파의 전체적인 특성에 미치는 영향이 작기 때문이다. 이 구조에서 l=0 mm인 경우와 l=2.4 mm인 경우에 대한 측정결과를 그림 5(b)와 그림 5(c)에 보였다. 이 그림에서 스텁이 없는 경우는 통과대역의 스컷특성이 나쁘고 두 출력단간에 간섭이 많이 존재하지만, 스텁이 있는 PBG 구조의 경우는 통과대역의 스컷특성이 좋아지고 두 신호의 간섭이 거의 제거되었음을 볼 수 있다. 듀플렉서와 같은 스위칭 소자의 경우 원치 않는 전자기파를 완전히 차단하는 것이 대단히 중요하므로 스컷 특성이 중요한 성능지수(figure of merits)의 하나이다. 이러한 면에서 매우 개선된 스컷 특성을 보여주는 스텁을 가

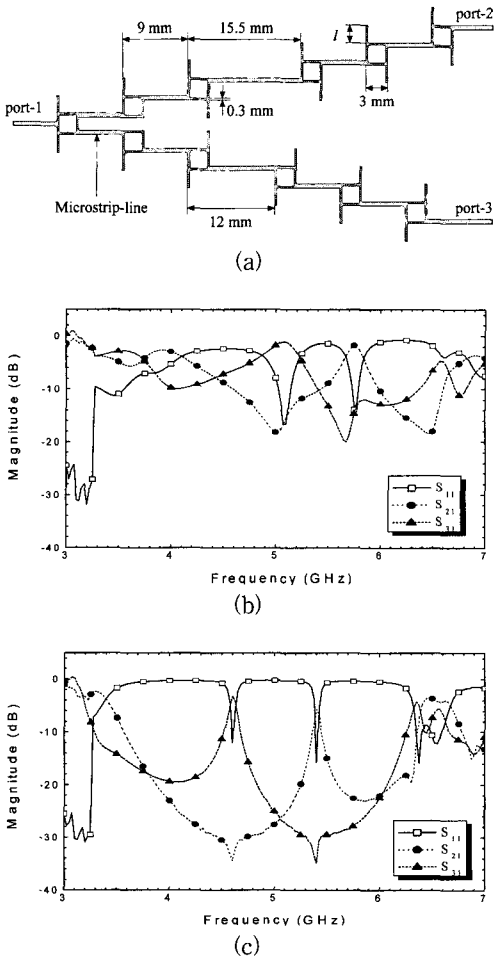


그림 5. PBG 구조로 구현된 듀플렉서 (a) 및 l=0 인 경우 (b) 와 l=2.4 mm일 때 (c) 측정된 삽입손실

Fig. 5. (a) A duplexer implemented using PBG structure (a) and the measured S parameters for l=0 (b) and for l=2.4 mm (c).

진 PBG 구조는 스텁이 없는 PBG 구조에 비해 듀플렉서로의 활용에 훨씬 유리함을 알 수 있다. 또한 앞서 시뮬레이션 결과로 살펴본 바와 같이 스텁이 첨가 될 때 통과대역의 첨두치가 낮아지는 현상이 관측되고 있다. 그러나 결함모드에 의해 형성되는 통과대역의 첨두치가 비교적 낮은 현상은 모든 PBG 구조에서 나타나는 공통현상이므로 스텁을 가진 구조의 단점이라 규정할 수는 없을 것이다.

V. 결 론

PBG 구조의 전달특성은 PBG 셀의 크기, 모양, 배열형태 등에 따라 달라지는바 본 논문에서는 PBG 셀에 스텁을 첨가하여 스텁의 길이변화에 따른 저지대역 및 통과대역의 특성을 효과적으로 제어하는 방법을 연구하였다. 이를 위해 PBG 셀은 한변의 길이가 3 mm 선폭이 0.3 mm인 정사각형으로 고정한 뒤 스텁의 길이를 0~2.4 mm로 변화시켰다. 이때 스텁의 길이가 길어짐에 따라서 저지대역이 넓고 깊어지면서 저지대역의 차단주파수와 중심주파수가 저주파쪽으로 이동하였다. 또한 한변의 길이가 3 mm인 정사각형 PBG 셀에서 셀의 선폭이 0.2~0.6 mm의 범위 내에 바뀔 때 스텁 길이가 통과대역에 미치는 영향을 살펴보았다. 이때 스텁의 효과는 셀 선폭이 0.2~0.3 mm 정도로 좁은 경우에 현저하게 나타났으며 스텁의 길이가 길어질수록 통과대역의 중심주파수에 대해 통과대역폭의 현저한 감소로 부분대역폭이 줄어들어 스컷 특성이 우수해졌다. 이러한 특성 조사를 근거로 스텁이 첨가된 PBG 구조로 스컷 특성이 우수한 마이크로파용 듀플렉서 구조를 구현할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

[1] E. Özbay, B. Temelkuran, M. Sigalas, G. Tuttle, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, "Defect structures in metallic photonic crystals," Appl. Phys. Lett., vol. 69, no. 25, pp. 3797~3799, 1996.

[2] F. Yang, Y. Qian, and T. Itoh, "A Novel uniplanar compact PBG structure for filter and mixer application," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 919~922, June 1999.

[3] J. Danglot, J. Carbonell, M. Fernandez, O. Vanbesien, and D. Lippens, "Modal analysis of guiding structures patterned in a metallic photonic crystal," Appl. Phys. Lett., vol. 73, no. 19, pp. 2712~2714, 1998.

[4] E. R. Brown and O. B. McMahon, "High zenithal directivity from a dipole antenna on a photonic crystal," Appl. Phys. Lett., vol. 68, no. 9, pp. 1300~1302, 1996.

[5] M. Kesler, J. Maloney, B. Shirley, and G. Smith, "Antenna design with the use of photonic band-gap materials as all-dielectric planar reflectors," Microwave Optic. Technol. Lett., vol. 11, no. 4, pp. 169~174, 1996.

[6] V. Radisic, Y. Qian, and T. Itoh, "Broadband power amplifier integrated with slot antenna and novel harmonic tuning structure," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 1895~1898, June 1998.

[7] Y. Horii and M. Tsutsumi, "Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 9, pp. 13~15, Jan. 1999.

[8] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, Photonic Crystals, Princeton University Press, Princeton NJ, 1995.

[9] C.-S. Kee, J.-E. Kim, H. Y. Park, S. J. Kim, H. C. Song, Y. S. Kwon, N. H. Myung, S. Y. Shin, and H. Lim, "Essential parameter in the formation of photonic band gaps," Phys. Rev. E 59, pp. 4695~4698, Apr. 1999.

[10] V. Radisic, Y. Qian, and R. Coccioli, and T. Itoh, "Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 8, no. 2, pp. 69~71, Feb. 1998.

[11] Q. Xue, K. M. Shum, and C. H. Chan, "Novel perforated microstrip PBG cell," Microwave and Optical Technol. Lett. vol. 26, no. 5, pp. 325~327, Sept. 2000

[12] 김태일, 장미영, 박익모, 임한조, "변형된 저지특성을 갖도록 $\lambda g/4$ 변환기를 정합시킨 포토닉 밴드갭 구조의 설계 및 응용," 전자공학회논문지,

제37권 TC편, 제19호, 534~544쪽, 2000년 9월

[13] 김태일, 김명기, 박익모, 임한조, "Photonic Bandgap 구조를 이용한 마이크로스트립 라인 대역통과 여파기 설계," 전자파학회논문지, 제12권, 제4호, 611~621쪽, 2001년 6월

[14] C.-S. Kee, J. -E. Kim, H. Y. Park, and H. Lim, "Roles of wave impedance and refractive index in photonic crystals with magnetic and dielectric properties," IEEE Trans. Microwave Theory Tech.., vol. 47, no. 11, pp. 2148~2150, Nov. 1999.

[15] 이계안, "초고주파 소자 소형화를 위한 천공된 마이크로트스립 구조 연구," 석사학위 논문, 아주대학교, 1999년

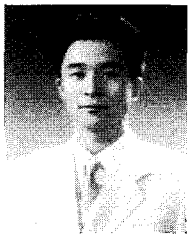
[16] S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. V. Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 545~550, 1996.

[17] S.-S. Oh, C.-S. Kee, J.-E. Kim, H. Y. Park, T. I. Kim, I. Park, and H. Lim, "Duplexer using microwave photonic band gap structure," Appl. Phys. Lett., vol. 76, no. 16, pp. 2301~2303, Apr. 2000.

저 자 소 개

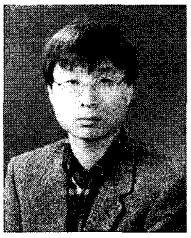
蔣 美 影(正會員)

2000년 2월 : 아주대학교 전자공학부 학사졸업(공학사). 2000년~현재 : 아주대학교 분자과학기술학과 석사 재학중. <주관심분야> 광자결정(photonic crystal) 및 마이크로파 영역 포토닉밴드갭 구조(photonic bandgap structure)



金 泰 壹(正會員)

1998년 2월 : 아주대학교 전자공학과(공학사). 2000년 8월 : 아주대학교 전자공학과(공학석사). 2000년~현재 : LG전자기술원 연구원. <주관심분야> 초고주파 능·수동소자



奇 喆 埴(正會員)

1992년 : 부산대학교 물리학과(물리학 학사). 1996년 : 한국과학기술원 물리학과(석사). 2000년 : 한국과학기술원 물리학과(박사). 1999년 10월~2000년 10월 : 미국 UCLA post Doc. 2000년 10월~현재 : 아주대 연구 조교수. <주관심분야> 광자결정, Tunable photonic band gaps using liquid crystals, 반도체/플라즈마, Birefringence of photonic crystals, 포토닉 밴드갭을 이용한 초고주파 소자, 자성 광자결정, Omnidirectional mirrors, Tunable high Q cavities, 광자결정의 열적 특성, Opal photonic crystals, Optical properties of photonic crystals with nano-spheres. Acoustic band gap structures.

李 精 一(正會員)

1975년 : 서울대학교 물리학과(물리학 학사). 1985년 : 미국 부라운대학 물리학과(박사). 1975~77년 : 육군 통신장교. 1985~86년 : 미국 GTE연구소 박사후 연구원. 1987년~현재 : 한국과학기술연구원 광기술연구센터 선임연구원 및 책임연구원. 1993~96년 : 한중과학기술협력센터 북경사무소장(초대). 1997~98년 : 프랑스 그레노블 반도체소자물리연구실 방문연구원. 2000년~현재 : 한국과학기술평가원 우주원천 전문위원. <주관심분야> 광반도체소자, 전기적 잡음, 광자결정, 전자소자 모델링, 금속/반도체 및 절연체/반도체 계면 특성, 양자전송

朴 益 模(正會員)

1984년 : 뉴욕주립대학교 전기전자공학과(공학사). 1989년 : 일리노이 대학교 전기전자공학과(공학석사). 1994년 : 일리노이 대학교 전기전자공학과(공학박사). 1994~1996년 : LG 전자기술원 선임연구원. 1996년~현재 : 아주대학교 전자공학부 부교수. <주관심분야> 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 수치해석

林 漢 祚(正會員)

1971년 : 서울대학교 물리과학대(물리학 학사). 1974년 : 서울대학교 물리학과(고체물리학 석사). 1982년 : 불란서 Montpellier 2대 물리학과(고체물리학 박사). 1982년 2~8월 : Montpellier post Doc. 1986년 2월~1987년 1월 : 불란서 Ecole Normale 고체물리 그룹 연구원. 1995년 4월~1997년 3월 : 물리학회 응용물리지 편집간사. 1993년 3월~1995년 2월 : 아주대학교 연구처장. 1997년 2~8월 : Northwestern대 전기 및 컴퓨터공학과 visiting scholar. 1975년 9월~현재 : 아주대학교 전자공학부 및 분자과학기술학과 교수. <주관심분야> 반도체 결함 관련 전기적·광학적 특성, 반도체 계면 및 금속/반도체 계면의 전자적 특성, 양자구조의 전자적 특성, Ⅲ-Ⅴ족 반도체 소자, 화학 센서, 전자소자의 잡음현상, 광자 결정(photonic crystal)