

論文2000-37TC-9-5

## 변형된 저지특성을 갖도록 $\lambda_g/4$ 변환기를 정합 시킨 마이크로스트립 라인 포토닉 밴드갭 구조의 설계 및 응용

(Design and Application of Microstrip Line Photonic  
Bandgap Structure with a Quarter-Wavelength  
Transformer for The Modified Characteristics of Stopband)

金泰壹\*, 蔣美影\*\*, 朴益模\*, 林漢祚\*\*

(Tae-II Kim, Mi-Young Jang, Ik-Mo Park, and Han-Jo Lim)

### 요약

본 논문에서는 넓은 저지대역과, 저지대역내에 결합 모드를 포함할 수 있는 포토닉 밴드갭(PBG) 구조에 관하여 연구하였다. PBG 구조에서  $\lambda_g/4$  변환기를 이용하여 주기적인 저지대역 중에서 특정 저지대역을 제거할 수 있었으며, 제거된 저지대역의 중심주파수에 해당하는 주기를 가지는 일반적인 PBG 구조를 직렬로 연결함으로써 넓은 저지대역을 구현하였다. 이것은 저지대역의 겹침 문제를 효과적으로 해결한 것으로써 넓은 저지대역 안에서 결합 모드를 이용할 수 있게 되었으며, 넓은 저지대역내에서 다중 스위치의 구현을 가능하게 하였다.

### Abstract

This paper presents the photonic bandgap structure that has a defect mode within a broad stopband. In order to create a broad stopband, we eliminated one of periodic stopbands of PBG structure by using a quarter-wavelength transformer and cascaded another PBG structure having a center frequency corresponding to the eliminated stopband. We have demonstrated that it is a simple and effective method that can solve an overlapping problem of periodic stopband in two cascaded PBG structures.

### I. 서론

\* 正會員, 亞洲大學校 電子工學部

(School of Electronics Engineering, Ajou University)

\*\* 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)

※ 본 연구의 일부분은 2000년도 두뇌 한국 21사업과  
동국대학교 양자기능반도체 연구센터를 통한 과학  
재단의 과제번호 QSRC-00-II-1-1의 지원을 받았  
음.

接受日字:2000年6月15日, 수정완료일:2000年8月29日

광학분야에서 시작된 포토닉 밴드갭(photonic bandgap: PBG) 구조 또는 광자결정(photon crystal)은 주기적으로 배열된 고체를 이용하여 여러 가지 새로운 특성을 가진 광이나 전자기파를 비교적 쉽게 구현할 수 있다는 점에서 큰 관심의 대상이 되는 분야이다. PBG 구조는 일반적으로 유전상수가 서로 다른 두 물질을 일정한 주기로 반복하여 배열할 경우 굴절율이 주기적으로 변함에 따라 특정한 주파수 대역에서의 전자기파가 통과하지 못하게 하는 구조를 말한다<sup>[1]</sup>. 그러나 최근에 마이크로파 영역에서 동작하는 PBG 구조의 실험결과로부터 PBG를 일으키는 기본 요

소는 굴절율의 주기적 변화가 아니라 파동 임피던스의 주기적인 변화임이 밝혀졌다<sup>[2]</sup>. 따라서 이 결과는 어떠한 형태이던 파동 임피던스를 주기적으로 변화시켜 주면 그 주기에 따라 결정되는 주파수를 중심으로 하는 일정 대역에서 효과적으로 저지대역을 형성시킬 수 있음을 의미한다. 또한, PBG 구조의 주기적 배열의 일부를 변화시켜 결함(defect)을 만들어 주면 대역통과(passband) 특성을 얻을 수 있는데<sup>[3]</sup>, 통과대역이 저지대역내에서 형성되기 때문에 통과대역 이외의 영역에서 차단효과가 우수하다는 장점을 가지게 된다.

이렇게 광 및 전자기파를 제어하는데 효과적인 PBG 구조는 가시광선에서 마이크로파에 이르는 넓은 주파수 영역에 활용될 수 있기 때문에, 고성능 광통신을 위한 도파관의 개발이나 새로운 마이크로파 및 밀리미터파 소자의 개발 및 성능 향상 등 다양한 분야에 응용성이 기대되고 있다<sup>[4-6]</sup>. 현재 마이크로파 소자 분야에서는, 마이크로스트립 구조에 적용되면서 안테나에서 전력 이득 향상<sup>[7]</sup>과 beam pattern 개선<sup>[8]</sup> 등을 목적으로 이용하거나, 낮은 손실을 가지며 구조를 최소화시키기 위한 slow-wave 마이크로스트립 구조<sup>[9]</sup>, 넓은 주파수대역에서 power added efficiency를 개선시키기 위한 전력증폭기<sup>[10]</sup>, 그리고 광대역이나, 결함모드(defect mode)를 이용한 여파기<sup>[11-12]</sup> 등으로 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 통상적인 PBG 구조의 경우 중심주파수 대 저지대역폭의 비율이 약 50~70 % 정도로 제한되기 때문에 넓은 저지대역폭을 필요로 하는 여파기를 구현하고자 하는 경우 문제점을 나타날 수 있다.

최근에 Rumsey 등은 넓은 저지대역폭을 얻기 위하여 서로 다른 주기와 셀 크기를 갖는 3개의 PBG 구조를 직렬로 연결하는 구조를 제안하였다<sup>[13]</sup>. 그러나 각 PBG 구조의 중심 주파수를 다르게 설계하여 저지대역이 겹쳐지게 하면 넓은 저지대역을 얻을 수는 있지만, 이러한 저지대역에 결합 모드를 삽입하고자하는 경우에는 저지대역의 겹침이나 저지대역과 통과대역이 겹칠 때 발생하는 문제 때문에 아래에서 살펴볼 바와 같이 결합모드에 의한 통과대역의 위치나 특성을 제어하기가 어렵다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서  $\lambda_g/4$  변환기(quarter-wavelength transformer: QWT)를 포함한 PBG 구조를 새로이 제안하였다. 또한  $\lambda_g/4$  변환기의 통과특성을 이용하여 PBG 구조의 주기적인 저지대역 중에서  $\lambda_g/4$  파장에 해당하는 저지대역

을 제거함으로써, 여러 개의 PBG 구조가 직렬로 연결되는 경우에 발생하는 저지대역의 겹침으로 인해 발생하는 문제점을 최소화시킬 수 있음을 보였다. 이러한 결과를 활용한 예로 특성이 우수한 결합모드를 이용한 여파기를 제작하여 그 특성을 기존의 통상적인 경우와 비교하였다.

## II. 광대역의 저지 특성을 갖는 PBG 구조의 여파기 설계

PBG 구조를 설계하기 위해서는 원하는 저지대역을 구현하는데 필요한 배열형태, 주기, 셀 크기 등을 결정해 주어야 한다. 마이크로스트립 라인을 이용한 PBG 구조는 마이크로스트립 라인 주변의 유전체를 천공하는 방법<sup>[10,14]</sup>, 마이크로스트립 라인의 형태를 주기적으로 변형시켜 일차원적으로 배열하는 방법<sup>[15]</sup>, 접지면을 이차원적으로 식각하는 방법<sup>[16,17]</sup> 등으로 크게 세 종류로 분류할 수 있다. 이 때 유전체를 천공하거나, 접지면을 식각하여 PBG 구조를 구현하는 경우에도 전자기파가 마이크로스트립 라인의 근처에 집중되는 특성 때문에 1차원 배열과 2차원 배열의 결과가 거의 유사하여 1차원 배열만으로도 동일한 효과를 얻을 수 있다<sup>[17]</sup>. 상기 세 종류의 모든 PBG 구조에서 주기  $a$ 는 원하는 저지대역의 중심주파수( $f_o$ )에 해당되는 관내파장( $\lambda_g$ )의  $1/2$  길이로 결정되며, 셀 크기는 PBG 구조의 주기와 저지대역의 특성에 함께 영향을 주기 때문에 원하는 산란계수의 특성을 고려하여 결정한다<sup>[1]</sup>. 본 논문에서는 마이크로스트립 라인 자체의 구조를 변경하는 방법으로 PBG 구조를 설계하였으며 실제 제작사항은 III절에서 상세히 기술하였다.

우선  $\lambda_g/4$  변환기를 통상적인 PBG 구조에 첨가하여 통상적 PBG 구조의  $f_o$ ,  $2f_o$ ,  $3f_o$  등을 중심으로 하는 주기적인 저지대역 중  $2f_o$ 를 중심으로 하는 두 번째 저지대역을 제거하여  $f_o$ 와  $3f_o$  사이에 넓은 통과대역을 형성시키는 경우를 살펴보자. 그럼 1(a)의 구조는 PBG 셀과  $50 \Omega$  마이크로스트립 라인을 연결하는 부분에  $\lambda_g/4$  변환기를 위치시킨 것으로써,  $\lambda_g/4$  길이가  $2f_o$ 에 대응되게 하면 그림 1(b)에서 실선의 S11 결과에서 볼 수 있듯이 두 번째 저지대역이 제거되면서 넓은 통과대역이 형성된다.

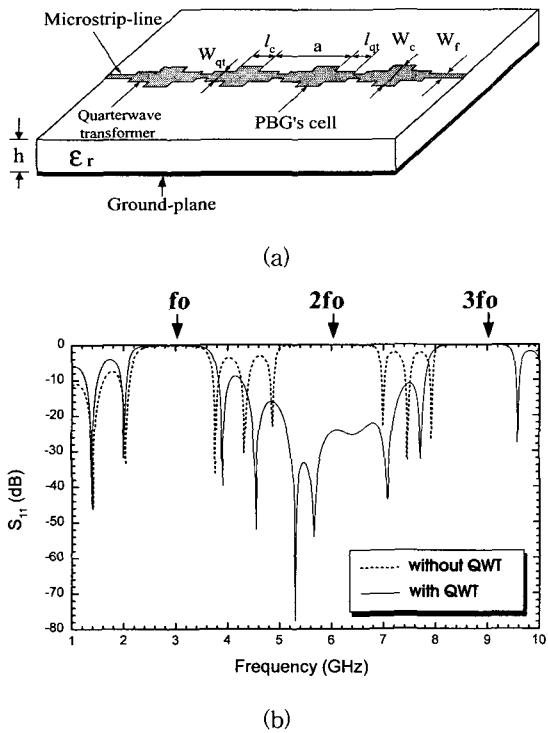


그림 1. (a)  $\lambda_g/4$  변환기가 첨가된 PBG 구조. PBG 구조와  $\lambda_g/4$  변환기의 구조적 변수들은  $a=18$  mm,  $l_{qt}=4.8$  mm,  $W_{qt}=1.472$  mm,  $W_c=3$  mm,  $l_c=3$  mm,  $W_f=0.6$  mm로 취하였다.  
 (b) 통상적인 PBG 구조와  $\lambda_g/4$  변환기가 첨가된 PBG 구조가 보이는 반사계수( $S_{11}$ )의 차이에 대한 시뮬레이션 결과 비교.

Fig. 1. (a) A PBG structure including a quarter-wavelength transformer. The structural parameters for the PBG structure and the quarter-wavelength transformer are  $a=18$  mm,  $l_{qt}=4.8$  mm,  $W_{qt}=1.472$  mm,  $W_c=3$  mm,  $l_c=3$  mm,  $W_f=0.6$  mm.  
 (b) Comparison of simulated  $S_{11}$  scattering parameters between the conventional PBG structure and the PBG structure including a quarter-wavelength transformer.

$\lambda_g/4$  변환기가 첨가된 PBG 구조에서 셀의 크기는 특성에 큰 영향을 미친다. 그림 1에서는  $\lambda_g/4$  변환기의 특성을 살펴보기 위하여 셀의 크기를 비교적 작게 설계하였다. 만약 2종의 PBG 구조를 사용하여 넓은 저지대역을 구현하고, 형성된 저지대역 내에 원하는 임의의 위치에 결합모드를 삽입하고자 하는 경우는 아래에서 보게되는 바와 같이 결함을 갖지 않는  $\lambda_g/4$  변환기가 결합된 PBG 구조가 넓은 저지대역을 가질수록 좋다. 이 때 저지대역의 폭은 셀의 크기가 커질수록 넓어

지므로 넓은 저지대역을 구현하기 위해서는  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조의 저지대역이 PBG로 동작할 수 있는 범위 내에서 가능한 한 넓어지도록 셀의 크기를 선택해야 한다. 그러므로 본 논문에서는 우수한 특성을 갖는 넓은 저지대역을 구현하기 위하여 이후부터는  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조의 셀의 폭  $W_c$ 를 6~9 mm로 선택하였다.  $\lambda_g/4$  변환기의 라인 폭은 변환기의 특성 임피던스 값이)

$$Z_{qt} = \sqrt{Z_o Z_c} \quad (1)$$

의 조건을 만족하도록<sup>[18]</sup> 선택하였으며,  $\lambda_g/4$  변환기의 길이는

$$l_{qt} = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{c}{4(2f_0)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

식을 이용하여 구하였다. 여기서  $Z_o$ 는  $50 \Omega$  특성임피던스,  $Z_c$ 는 PBG 구조의 셀 임피던스,  $Z_{qt}$ 는  $\lambda_g/4$  변환기의 임피던스,  $l_{qt}$ 는  $\lambda_g/4$  변환기의 길이,  $f_0$ 는 PBG 구조의 기본 저지대역 중심주파수,  $\lambda_g$ 는  $2f_0$ 에 해당하는 관내파장,  $c$ 는 자유공간에서의 빛의 속도,  $\epsilon_{eff}$ 는 마이크로스트립 기판의 실효유전상수(effective dielectric constant)이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이  $\lambda_g/4$  변환기를 포함하는 PBG 구조의 기본 저지대역이  $f_0$ 에서 중심주파수를 갖는다면,  $2f_0$ 에 해당하는  $\lambda_g/4$  길이를 선택함으로써 주기적인 저지대역 중의 두 번째 저지대역 대신에 넓은 통과대역을 구현할 수 있으며, 이는 그림 1(b)에서 본 바와 같다.

통상적인 PBG 구조의 경우 기본 저지대역 보다 높은 주파수 영역에서 나타나는 주기적인 저지대역 사이의 통과대역은 그 전달 주파수에 따라 산란계수 값이 변동을 보이는 문제점을 가진다<sup>[2,15]</sup>. 이러한 문제점을 개선하는 데에도  $\lambda_g/4$  변환기를 활용할 수 있다. PBG의 주기가 기본 저지대역의 중심주파수  $f_0$ 의 반파장 길이이며, 한 주기 내에는 적어도 두 개의  $\lambda_g/4$  변환기와 기본 PBG 셀이 있으므로  $\lambda_g/4$  변환기로  $f_0$ 에서 중심주파수를 갖는 기본저지 대역을 제거하는 것은 불가능하다. 그러나  $\lambda_g/4$  길이에 해당하는 주파수가 그림 2(a)의 구조를 갖는 경우에서 보는 바와 같이 기본 저지대역과 두 번째 저지대역 사이에 위치하게 할 수

는 있으며, 그 경우 그림 2(b)처럼 두 저지대역 사이의 통과대역폭이 넓어지고 전달특성도 개선되는 것을 확인할 수 있다. 한편, 그림 2(b)에서 비교용으로 사용된 통상적인 PBG 구조의 셀은 가로 길이가 3 mm, 셀의 세로 폭이 4 mm 되게 하여  $\lambda_g/4$  변환기를 가지는 PBG 구조의 셀의 크기보다 폭의 길이가 1/2이 되도록 하였다. 이렇게 셀의 크기를 다르게 한 이유는 비슷한 저지특성을 가지는 결과를 비교하기 위한 것으로써, 구조적으로  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조의 경우에는 50 Ω 마이크로스트립 라인과 PBG 셀과의 사이에  $\lambda_g/4$  변환기가 존재하기 때문에 서로간 임피던스 변화량이 감소하게 된다. 그러므로 동일한 셀의 크기를 가지는 기존의 PBG 구조와 비교해 볼 때  $\lambda_g/4$  변환기를 가지는 PBG 구조의 다중반사량과 저지대역폭은 감소

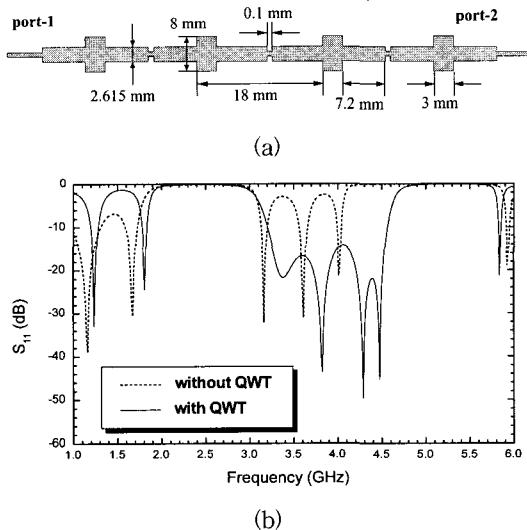


그림 2. (a)  $\lambda_g/4$  변환기의 길이를 주기의 1/2에 가깝도록 최대한 길게 설계한 PBG 구조의 한 예. (b) 위의 PBG 구조와 통상적인 PBG 구조가 보이는 반사계수(S<sub>11</sub>)의 차이에 대한 시뮬레이션 결과 비교. 통상적인 PBG의 구조적 변수들은  $a=21$  mm,  $W_c=4$  mm,  $l_c=3$  mm,  $W_f=0.6$  mm로 취하였다.

Fig. 2. (a) An example of PBG structure cascaded with a quarter-wavelength transformer whose length is maximum possible. (b) Comparison of simulated S<sub>11</sub> scattering parameters between above PBG and conventional PBG structures. The structural parameters for the conventional PBG structure are  $a=21$  mm,  $W_c=4$  mm,  $l_c=3$  mm,  $W_f=0.6$  mm.

하게 된다. 따라서  $\lambda_g/4$  변환기를 가지는 PBG 구조는 형성되는 통과대역이 같은 크기를 갖는 통상적인 PBG 구조의 저지대역 사이의 통과대역 보다 넓어지면서 두 번째 저지대역이 감소하는 경향을 가진다.

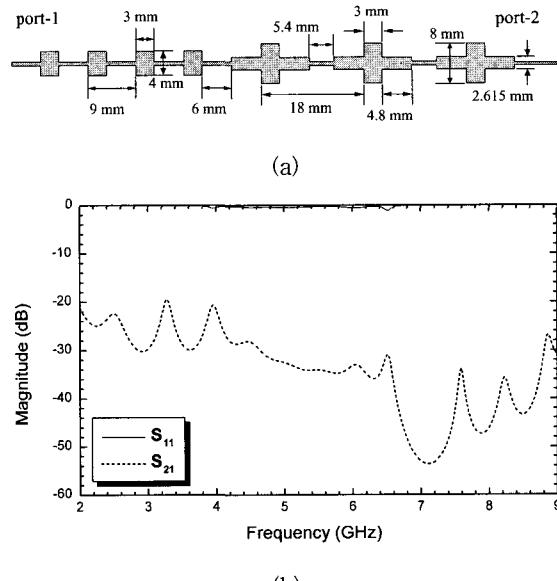


그림 3. (a) 통상적인 PBG 구조와  $\lambda_g/4$  변환기를 가진 PBG 구조를 직렬로 연결한 구조의 한 예. (b) 위의 PBG 구조가 갖는 S<sub>11</sub>과 S<sub>21</sub> 산란계수에 대한 시뮬레이션 결과.

Fig. 3. (a) Typical PBG structure cascaded with a normal PBG structure and a PBG structure having a QWT. (b) Simulated S<sub>11</sub> and S<sub>21</sub> scattering parameters for the above PBG structure.

다음으로 통상적 PBG 구조와  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조를 결합시켜서 넓은 저지대역을 형성시키는 경우를 살펴보자. 이때 그림 3(a)와 같이  $\lambda_g/4$  변환기는 그것이 포함된 PBG 구조의  $2f_o$ 를 중심으로 한 제2의 저지대역을 통과대역으로 전환시키고 이  $2f_o$ 에 저지대역 중심주파수를 갖도록 설계된 통상적 PBG 구조를  $\lambda_g/4$  변환기를 가진 PBG 구조와 직렬로 연결하면 통상적 PBG 구조에 의해 통과대역이 제거되면서 그림 3(b)의 결과처럼 넓은 저지대역을 구현할 수 있게 된다. 이때 통상적 PBG 구조는  $\lambda_g/4$  변환기를 가진 PBG 구조에 의해 형성된 넓은 통과대역을 제거하기에 충분하도록 셀의 크기가 충분히 커야 한다. 그러나 저지대역에서의 다중반사량을 크게 하기 위하여 셀의 크기를

지나치게 증가시킬 경우 저지대역 내에 삽입된 결합모드에 의한 통과대역에서의 특성이 나빠질 수 있으므로, 본 논문에서는 저지대역과 통과대역의 전반적인 특성을 고려하여 통상적 PBG 구조의 셀 폭을 3.5~4 mm로 선택하였다.

또한, PBG 구조에서 주기적 배열의 일부를 변화시켜 결합을 만들어 주면 결합모드에 의한 대역통과 특성을 얻을 수 있는데, 이는 전자기파가 주기를 변화시킨 결합 부분에 갇히게 되고, 갇힌 전자기파가 결합 부분을 중심으로 한 대칭구조의 반사효과에 의해 다중반사하면서 저지대역내의 일부 주파수 대역에서 전자기파의 통과 현상을 발생시키기 때문이다<sup>[1]</sup>. 이러한 결합 모드를 통상적 PBG 구조와  $\lambda_g/4$  변환기를 가진 PBG 구조가 직렬 연결된 PBG 구조에 의해 형성되는 넓은 저지대역내에 적용하고자 하는 경우, 통상적인 PBG 구조에 결합을 삽입시키는 것이 편리하다. 이때 결합모드에 의한 통과대역의 위치는 결합 길이를 변경함에 따라 달라지는데 일반적으로 결합의 길이가 길어지면 결합모드는 낮은 주파수 방향으로 이동한다. 그림 4(a)의  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조와 통상적 PBG 구조를 직렬로 연결하여 광대역의 저지대역을 실현한 후 (그림 3 참조) 이 PBG 구조에 다시 결합 d를 삽입한 마이크로스트립 라인의 평면도이다. 이렇게 제작된 PBG 구조에서 측정된  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  산란계수들은 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 넓게 형성된 저지대역 내에서 5.2 GHz 부근에 비교적 양호한 결합모드에 의한 통과대역을 형성함을 보여주고 있다.

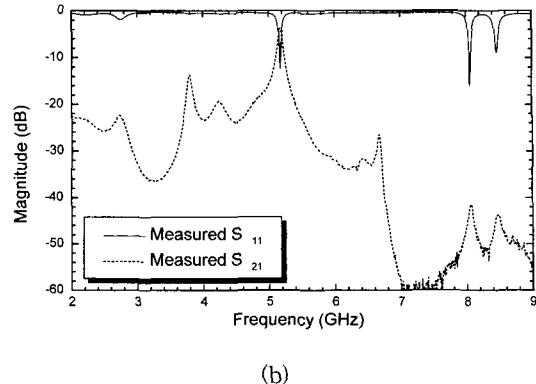
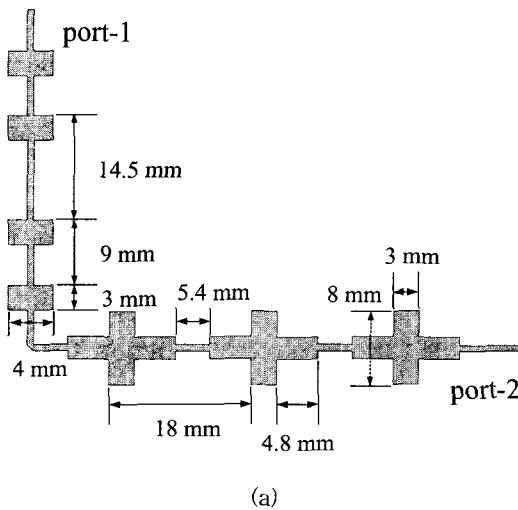


그림 4. (a) 결합을 갖는 통상적 PBG 구조와  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조를 직렬로 연결한 구조의 한 예.

(b) 위의 PBG 구조에서 측정된  $S_{11}$  및  $S_{21}$  산란계수들의 주파수 의존성.

Fig. 4. (a) An example of PBG structure cascaded with a normal PBG structure including defect and a PBG structure including the QWT.

(b) Measured  $S_{11}$  and  $S_{21}$  scattering parameters for the above PBG structure.

마지막으로 서로 다른 결합 길이를 갖는 여러 개의 PBG 구조를 병렬로 연결하면 마이크로파용 다중 스위치의 구현이 가능하다. 이 때 주의하여야 할 점은 병렬로 연결된 통상적 PBG 구조의 주기가 다를 경우 다른 저지대역내에서 반사되는 전자기파의 상호간섭에 의해 원하지 않는 공진 모드가 발생하기 때문에 병렬로 연결되는 PBG 구조의 주기가 동일해야 한다는 점이다<sup>[19]</sup>. 이렇게 병렬로 연결된 동일한 주기를 갖는 통상적 PBG 구조에서 결합의 길이는 각 포트에서 필요로 하는 통과대역을 고려하여 독립적으로 결정한다. 그림 5(a)에는  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조를 다중스위치에 활용하는 하나의 예로  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG를 포트1, 각기 다른 결합을 가진 PBG 구조들을 각각 포트2와 포트3으로 설계한 것이다. 이 때 포트2와 포트3의 PBG 구조에는 결합모드에 의한 통과대역이 각각 4.5 GHz와 6.5 GHz에서 중심을 갖도록 결합의 길이를 각각 11.5 mm와 17 mm로 설계하였다. 그림 5(a) 구조가 갖는 전달특성을 시뮬레이션으로 구한 결과를 그림 5(b)에 보였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 포트2와 포트3에는 의도한데로 넓은 저지대역내에 각각 4.55 GHz와 6.51 GHz 대역에 양호한 전달특성을 가진 결합모드가 서로간의 간섭현상 없이 나타나고 있다. 따라서

이 구조는 포트1을 입력단으로 하고 포트2와 포트3를 출력단으로 한 다중스위치로 동작한다.

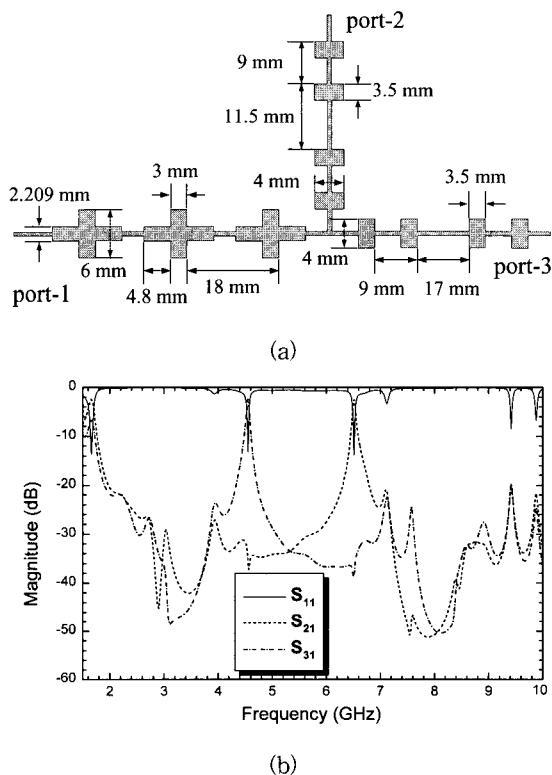


그림 5. (a) 서로 다른 결합 길이를 갖는 2개의 통상적 PBG 구조와  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 하나의 PBG 구조를 사용한 3-포트 주파수 선택용 다중스위치의 한 예  
(b) 위 PBG 구조의 산란계수에 관한 시뮬레이션 결과

Fig. 5. (a) An example of 3-port frequency selective microwave switch. The two conventional PBG structures have different defect lengths and the other is a PBG structure with a QWT.  
(b) Simulated scattering parameters of the above PBG structure.

### III. $\lambda_g/4$ 변환기를 갖는 PBG 구조의 여파기 제작 및 특성 측정

본 논문에서는 II절에서 논의된 설계방법을 바탕으로 넓은 주파수 범위에서 형성된 저지대역내에 결합모드에 의한 통과대역을 갖는 대역통과 여파기를 제작하

여 그 특성을 조사하였다. 제작은 비유전상수( $\epsilon_r$ )가 10.2이고 두께(h)가 0.635 mm인 RT/Duroid 6010 기판을 사용하였으며, 측정은 HP8510C network analyzer를 사용하였다. 그리고 구조에 대한 전자기파 특성은 모멘트 방법을 이용하는 Ensemble 5.1을 사용하여 시뮬레이션 하였는데, 실제 제작하는 구조의 크기가 유한한 것을 고려하여 유한 접지면으로 시뮬레이션하였다. 이것은 무한접지면 구조에 비해 유한접지면 구조에서는 실호-유전상수 값이 작아지기 때문에 제작된 구조의 관내파장이 길어지게 되어 중심주파수의 위치가 실험결과 값보다 낮은 주파수영역에서 나타나는 오차를 최소화하기 위한 것이다.

그림 4(a)는 실제 제작된 PBG 구조의 단면도이다.  $\lambda_g/4$  변환기를 포함한 PBG 구조의 중심주파수가 3 GHz에서 나타나도록 격자주기는  $a=18$  mm로 정하였고, 저지대역에서의 산란특성을 고려하여 PBG 셀의 폭은 8 mm, 셀의 가로길이는 3 mm,  $\lambda_g/4$  변환기의 폭은 2.615 mm,  $\lambda_g/4$  길이는 4.8 mm로 각각 선택하였다. 또한, 넓은 저지대역내에 대역통과 여파기를 제작하기 위해서  $\lambda_g/4$  변환기를 포함한 PBG 구조와 결합을 가지는 일반적인 PBG 구조를 그림 4(a)와 같이 직렬로 연결하였는데 기판의 크기를 최소화하기 위해서 L-자 모양으로 연결하였다. 결합 모드를 포함한 일반 PBG 구조에서는 셀의 크기를 폭은 4 mm, 가로길이는 3 mm로 선택하였으며, 결합의 길이는 저지대역의 중심에 통과대역을 위치시키기 위해 14.5 mm로 정하였다. 그림 4(b)의 특성측정 결과에서 볼 수 있듯이 2~8 GHz 이상의 넓은 저지대역내에서 약 5.18 GHz에 중심을 갖는 비교적 우수한 통과대역이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

### IV. 결과 및 토의

PBG 구조를 이용하여 넓은 저지대역을 형성시킬 수 있는 것은 PBG 구조가 주기적으로 저지대역을 갖는 특성 때문이다. 즉, 어떤 PBG 구조가  $f_o$ 에 중심을 갖는 저지대역을 형성한다면,  $2f_o$ ,  $3f_o$ , ... 등에 중심을 갖는 저지대역이 주기적으로 형성되며, 각각의 저지대역 사이에는 통과대역이 존재한다. 통과대역의 특성은 저지대역의 특성과 상호교환(trade-off)적이기 때문에 저지대역에서 -20 dB 이하의 우수한 저지특성을 얻고

자 하는 경우에는 통과대역에서 우수한 통과특성을 얻기가 힘들다. 또한, Rumsey 등이 제안한 바와 같이 저지대역 사이의 통과대역에 중심을 가지는 다른 PBG를 직렬로 연결시키면 첫 번째 PBG에서 통과된 전자기파가 두 번째 PBG에 의해 재반사되기 때문에 넓은 저지대역을 구현할 수 있다<sup>[13]</sup>. 그러나 주기가 서로 다른 통상적인 PBG 구조가 직렬로 연결된 구조에 결합을 삽입하여 원하는 위치에서 우수한 결합모드에 의한 통과대역을 얻는 것은 용이하지 않다. 그 한 예로 그림 6(a)와 같이 PBG1과 PBG2를  $\lambda_g/4$  변환기 없이 직접 직렬로 연결한 경우를 고려해보자. 여기서 결합 d를 가진 PBG1은 그림 6(b)에서 보인 바와 같이 결합길이  $d=11.4$  mm일 때 중심주파수가  $f_{c1}=5.83$  GHz이며 대역폭이  $\Delta f_1=4.74$  GHz인 저지대역내에 결합모드를 6.5 GHz에 가지는 구조이다. 한편 PBG2는 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 PBG1의 통과대역 중심주파수 6.5 GHz 부근에 통과대역을 형성시킨다. 이 두 PBG 구조를 직렬로 연결시켰을 때 전달특성은 그림 6(c)와 같이 얻어진다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 결합에 의한 통과대역의 위치를 달리 하였을 때 그 전달특성은 결합모드의 위치에 따라 영향을 받으며 전달특성이 양호하지 않은 경우가 발생한다. 그 이유를 살펴보기 위하여 우선 PBG1의 결합모드가 PBG2의 저지대역내에 위치하는 경우를 고려해보자. 이 경우 결합모드로 PBG1을 진행하는 전자기파는 PBG2에 의하여 다중반사되므로 출력단에서의 전자기파 전달은 없게 된다. 왜냐하면, 넓은 저지대역이 형성되는 원리와 마찬가지로 두 PBG 구조 중의 한 PBG 구조에 통과대역을 형성시키더라도 나머지 PBG 구조에 의한 저지대역이 동일한 주파수대역에 위치하게 되는 경우에 그 PBG 구조가 통과된 전자기파를 다시 다중반사 시키기 때문에 통과대역이 형성되지 못한다. 따라서 양호한 결합모드를 갖기 위해서는 PBG1 구조의 결합모드가 위치하는 곳에는 나머지 PBG2의 통과대역이 위치하여야만 가능하다. 그러나 이 때 PBG2의 전달특성은 그림 6(b)에서 보듯이 통과대역 내에서 주파수에 따라 약간의 변동을 보이며 이러한 변동이 미치는 영향이 그림 6(c)에서와 같이 결합모드의 주파수에 따라 전달특성 S<sub>21</sub>에 차이를 보이게 된다. 따라서 결과적으로 PBG2를 PBG1에 결합시키면 결합모드의 전달특성은 PBG1 만의 경우보다 불량하게 된다. 그러나 PBG1 만으로는 앞서 언급한 바와 같이 결합모드 주위에 충분히 넓은 저지대역을 형성하기에 어려

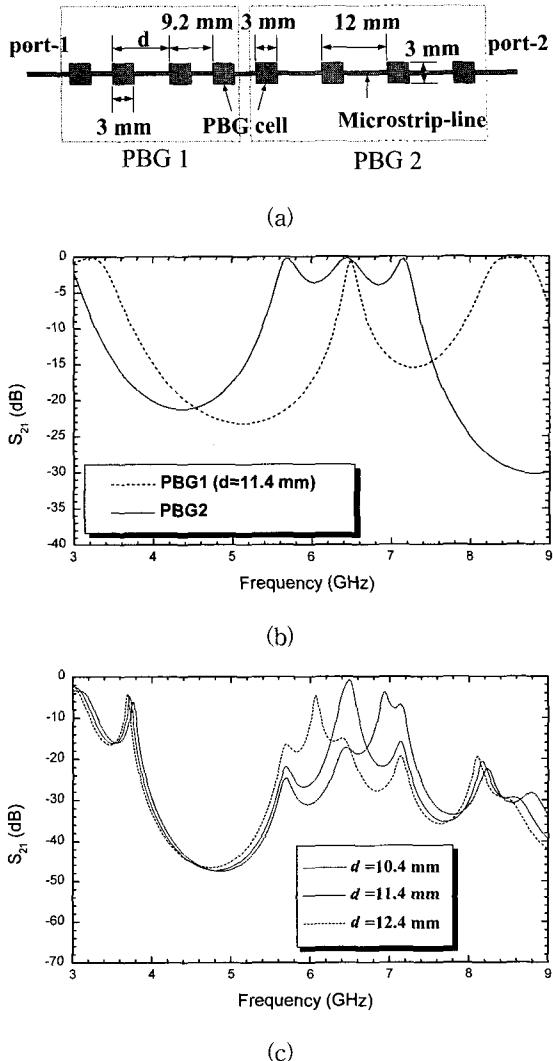


그림 6. (a) 결합을 갖는 통상적인 구조인 PBG1과 결합을 갖지 않는 통상적인 PBG 구조인 PBG2를 직접 직렬로 연결한 구조

(b) PBG1과 PBG2의 전달특성에 관한 시뮬레이션 결과

(c) 그림 6(a)의 PBG 구조에서 결합 길이 d에 따른 전달특성에 관한 시뮬레이션 결과

Fig. 6. (a) The simulated PBG structure directly cascaded with PBG1 and PBG2. PBG1 has a defect and PBG2 hasn't.

(b) The transmission characteristics S<sub>21</sub> of PBG1 and PBG2, respectively.

(c) Simulated scattering parameters of the PBG structures in Fig. 6(a) for different defect length.

움이 있다. 그러므로 결국 광범위한 주파수 대역에 걸쳐 형성된 저지대역내에 다양한 주파수의 양호한 결합

모드를 형성시키는 것은 어느 한 PBG 구조나 직접 결합시킨 PBG 구조로는 구현하는 것이 불가능하다.

한편  $\lambda_g/4$  변환기는 PBG 셀의 주기를 유지하면서 셀과  $50 \Omega$  마이크로스트립 라인을 연결하는 부분에 위치하기 때문에 기존의 구조적 크기를 변화시키지 않으며, 단지  $\lambda_g/4$  길이에 해당되는 주파수 대역에서 임피던스 정합을 통해 다중반사를 제거시킬 수 있다<sup>[18]</sup>. 이때  $\lambda_g/4$  변환기를 포함한 PBG 구조로 주기적인 저지대역 중  $2f_o$ 에 중심을 갖는 저지대역을 제거하도록 함으로써 이 부분에 넓은 통과대역을 구현할 수 있다. 이렇게 형성된 통과대역에 저지대역을 갖는 다른 PBG 구조를 직렬로 연결할 경우, 결과적으로  $2f_o$ 를 중심으로 하는 넓은 저지대역을 구현할 수 있다. 이렇게 형성된 저지대역에 결합모드를 구현하는 경우 넓은 주파수 대역 범위에서의 결합모드 구현과 결합 변화에 의한 결합모드의 위치이동이 용이해진다. 이러한 논의를 확

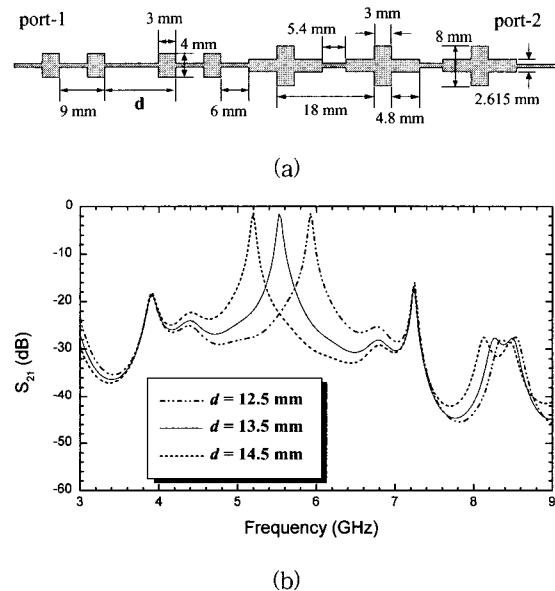


그림 7. (a) 결합을 갖는 통상적 PBG 구조와 결합 없이  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조를 직렬로 연결한 구조

(b) 위 PBG 구조에서 결합길이  $d$ 의 변화에 따른 결합모드 특성을 시뮬레이션으로 구한 결과

Fig. 7. (a) Cascaded PBG structures: One is the conventional PBG structure with a defect, and the other is the PBG structure with QWT.

(b) Simulated  $S_{21}$  parameters of the above PBG structure with different defect length  $d$ .

인하기 위하여 그림 7(a)와 같이 결합을 갖는 통상적 PBG 구조와  $\lambda_g/4$  변환기를 갖는 PBG 구조를 직렬로 연결하여 결합길이  $d$ 의 변화에 따른 결합모드 통과대역이 형성되는 위치와 특성을 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 그 결과 그림 7(b)에서 볼 수 있듯이 결합의 길이를 변화시켜 결합모드가 나타나는 위치를 달리 하였을 때 그림 6(b)의 경우와는 달리 결합모드의 주파수에 관계없이 우수한 통과대역이 구현됨을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 PBG 구조들로 여러 개의 통과대역을 가지는 스위치 소자를 구현하고자 하는 경우  $\lambda_g/4$  변환기를 통한 결합이 대단히 유력함을 알 수 있다. 더욱이 그림 2에서 볼 수 있듯이  $\lambda_g/4$  변환기는 기존의 통상적 PBG 구조가 주기적 통과대역의 특성을 개선하는 데에도 활용할 수 있다.

지금까지의 살펴본  $\lambda_g/4$  변환기의 유용성을 살펴보면 우선 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 통상적인 PBG 구조의 기본 저지대역과 두 번째 저지대역 사이의 통과특성을 개선시킬 수 있다. 이때 PBG 구조의 주기가 반파장 길이에 해당되는 것을 고려할 때  $\lambda_g/4$ 에 해당하는 최소 주파수 대역은 제한적이기 때문에  $\lambda_g/4$  변환기를 사용하여 기본 저지대역을 제거할 수는 없다. 하지만 그림 2(a)와 같이  $\lambda_g/4$ 의 길이를 최대한 길게 하는 경우 기본 저지대역과 두 번째 저지대역 사이에 근접한 주파수 대역에서 통과특성을 개선시키는 것은 가능하다. 이것은 PBG 구조가 갖는 근본적인 대역특성을 개선시킨 것으로 넓은 대역통과 필터 등으로의 응용이 가능하다. 다음으로  $\lambda_g/4$  변환기를 사용하여 넓은 저지대역을 구현하는 경우에, 여러 개의 대역통과 여파기를 사용하는 멀티플렉서에서도 응용이 가능하다. 통상적인 PBG 구조에서 결합 모드를 이용한 멀티플렉서는 훌륭한 통과대역의 특성을 가질 수는 있지만<sup>[19]</sup>, 여러 개의 통과대역을 포함하기에는 저지대역폭이 좁다는 문제점이 있다. 그러나  $\lambda_g/4$  변환기를 가지는 PBG 구조를 이용하여 멀티플렉서를 설계하는 경우에 그림 5(b)와 같이 넓은 저지대역 안에서 여러 개의 우수한 통과대역을 갖는 다중스위치를 구현할 수 있다. 주기가 서로 다른 PBG 구조를 직렬로 연결하는 경우  $\lambda_g/4$  변환기 없이도 넓은 주파수 범위에서 저지대역을 형성할 수 있다. 그러나 이 구조를 사용하여 결합모드에 의한 대역통과 여파기를 제작하고자 할 경우 전달특성이 우수한 결합모드를 원하는 입의의 주파수 위치에 있게 하기가 어렵다. 이와 달리  $\lambda_g/4$  변환기를 사용하는 경

우  $\lambda_g/4$  변환기의 길이를 조절함에 따라서 기본 저지대역을 제외한 원하지 않는 위치의 저지대역을 쉽게 제거할 수 있게 되며 따라서 결합을 가진 PBG 구조를 직렬로 연결함으로써 전달특성이 우수한 결합모드를 넓은 주파수 범위에서 구현하기가 용이하다. 마지막으로 2개 이상의 PBG 구조를 직렬로 연결하여 넓은 저지대역내에 통과대역을 얻고자 하는 구조에서는 그림 3~7의 결과에서 나타나는 spurious 성분들이 나타나게 된다. 여러 개의 PBG 구조를 직렬로 연결하면 전체적인 결과는 각각의 PBG 구조에 대한 산란계수들을 직렬로 연결하여 합한 것과 같기 때문이다. 이러한 결과는 그림6(c)에서 보이는 spurious 성분과 그림6(b)에서 PBG2의 ripple 특성이 잘 일치하고 있는 것을 통해 확인할 수 있으며, PBG1과 PBG2의 산란계수가 합해지는 경우 PBG1의 저지대역이 PBG2의 통과특성을 완전하게 제거하지 못하기 때문에 나타나는 결과이다. 그러나 본 논문에서 제시한  $\lambda_g/4$  변환기를 가지는 PBG 구조에서는 그림6(b)의 PBG2와 달리 통과대역 전체의 ripple 특성이 매우 우수하기 때문에 spurious 성분이 전체 특성에 큰 영향을 주지 않을 뿐만 아니라, 기존의 구조보다 매우 작기 때문에 이러한 문제점을 최소화 할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 주기적인 저지대역의 특성을 제어할 수 있는 방법으로써  $\lambda_g/4$  변환기를 포함하는 PBG 구조를 제안하였다.  $\lambda_g/4$  변환기 길이에 해당하는 저지대역이 제거됨으로써 넓은 통과대역이 형성되는 것을 보였으며, 그 통과대역의 중심주파수에 해당하는 주기를 갖는 통상적인 PBG 구조를 직렬로 연결함으로써 2개의 PBG 구조만으로도 넓은 저지대역을 구현할 수 있음을 확인하였다. 이 구조는 넓은 저지대역내에 결합모드를 삽입하기 위해서 가장 우선되는 저지대역의 겹침 문제를 해결한 것으로써, PBG 구조에서 여러 개의 통과대역을 갖는 다중 스위치로 응용되는 경우에 더욱 많은 통과대역의 구현이 가능하게 되었다. 실제로 약 2~8 GHz 이상의 저지대역내에서 5.2 GHz에 중심을 가지며 통과대역폭이 약 70 MHz인 우수한 대역통과여파기를 얻을 수 있음을 보였다. 또한 시뮬레이션 결과로 통과대역 중심주파수가 각각 4.55 GHz와 6.51 GHz인 우수한 3-포트 스위치를 구현할 수 있음을 보였다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals*, Princeton University Press, Princeton NJ, 1995.
- [2] 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 bandgaps," *Phys. Rev. E*, vol. 59, no. 4, pp. 4695-4698, Apr. 1999.
- [3] E. Yablonovich, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, May 1987.
- [4] D. J. Ripin, K.-Y. Lim, and G.-S. Petrich, "One-dimensional photonic bandgap microcavities for strong optical confinement in GaAs and GaAs/AlxOy semiconductor waveguides," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 17, no. 11, pp. 2152-2160, Nov. 1999.
- [5] S. Rowson, A. Chelnokov, and J.-M. Lourtioz, "Two-dimensional photonic crystals in macroporous silicon: from mid-infrared to telecommunication wavelengths," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 17, no. 11, pp. 1989-1995, Nov. 1999.
- [6] R. Cocciali, F.-R. Yang, K.-P. Ma, and T. Itoh, "Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2123-2130, Nov. 1999.
- [7] 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.
- [8] T. J. Ellis and G. M. Rebeiz, "MM-wave tapered slot antenna on micromachined photonic bandgap dielectrics," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1157-1160, June 1996.

- [9] F. R. Yang, Y. Qian, R. Caccioli, and T. Itoh, "A novel low-loss slow-wave microstrip structure," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 11, pp. 372-374, Nov. 1998.
- [10] V. Radisic, Y. Qian, and T. Itoh, "Broadband power amplifier using dielectric photonic bandgap structure," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 13-14, Jan. 1998.
- [11] S. Fan, J. N. Winn, A. Devenyi, J. C. Chen, R. D. Meade, and J. D. Joannopoulos, "Guided and defect modes in periodic waveguides," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 12, no. 7, pp. 1267-1272, July 1995.
- [12] J. C. Chen, H. A. Haus, S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Optical filters from photonic band gap air bridges," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 14, no. 11, pp. 2575-2580, Nov. 1996.
- [13] I. Rurnsey, M. Picket-May, and P. K. Kelley, "Photonic bandgap structures used as filters in microstrip circuits," *IEEE Microwave & Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 10, pp. 336-338, Oct. 1998.
- [14] B. Lenoir, D. Baillargeat, S. Verdeyme, and P. Guillzon, "Finite element method for rigorous design of microwave devices using photonic bandgap structures," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1061-1064, June 1998.
- [15] H. Contopanagos, L. Zhang, and N. G. Alexopoulos, "Thin frequency-selective lattices integrated in novel compact MIC, MMIC, and PCA architecture," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 11, pp. 1936-1948, Nov. 1998.
- [16] V. Radisic, Y. Qian, R. Caccioli, 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.
- [17] 김태일, 박익모, 임한조, 기철식, 김재은, 박해용, "마이크로스트립 라인을 이용한 PBG 구조의 효과적인 설계방법," 1999년도 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, vol. 22, no. 1, 183-186쪽, 1999년 5월.
- [18] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 92-96, 1998.
- [19] 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.

---

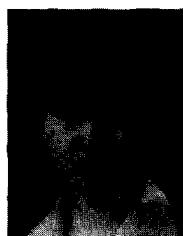
저자소개

---



金泰壹(正會員)

1972년 6월생. 1998년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사). 2000년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사). 2000년~현재: LG전자기술원 연구원. [주관심분야] 초고주파 능동소자,



蔣美影(正會員)

1978년 3월생. 2000년 2월: 아주대학교 전자공학부 학사졸업(공학사). 2000년~현재: 아주대학교 분자과학기술학과 석사 재학중, [주관심분야]: 광자 결정(photonics crystals), PBG 구조를 응용한 마이크로파 수동소자]



朴 益 模(正會員)

第36卷 D編 第12號 參照

1960년 2월생. 1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학과(공학사). 1989년: 일리노이 대학교 전기전자공학과(공학석사). 1994년: 일리노이 대학교 전기전자공학과(공학박사). 1994년~1996년: LG전자기술원 선임연구원. 1996년~현재: 아주대학교 전자공학부 부교수. [주관심분야] 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 수치해석



林 漢 祚(正會員)

1947년 9월생. 1971년: 서울대학교 물리과학대 (물리학 학사). 1974년: 서울대학교 물리학과 (고체물리학 석사). 1982년: 불란서 Montpellier 2 대 물리학과 (고체물리학 박사). 1982년 2월~8월: Montpellier post Doc. 1997년 2월~1997년 8월: Northwestern대 전기 및 컴퓨터공학과 visiting scholar 1995년 4월~1997년 3월: 물리학회 응용물리지 편집간사. 1993년 3월~1995년 2월: 아주대학교 연구처장. 1986년 2월~1987년 1월: 불란서 Ecole Normale 고체물리 그룹 연구원. 1975년 9월~현재: 아주대학교 전자공학부 및 분자과학기술학과 교수. [주관심분야 : 반도체 결합 관련 전기적·광학적 특성, 반도체 계면 및 금속/반도체 계면의 전자적 특성, 양자구조의 전자적 특성, 광자 결정(photonics crystals), III-V족 반도체 소자, 화학 센서, 전자소자의 잡음현상]