韓國電磁波學會論文誌 第13卷 第1號 2002年 1月 論文 2002-13-1-01

포토닉 밴드갭 구조를 이용한 두껍고 유전상수가 높은 패치 안테나의 성능 향상

Improvement of Performance of Thick and High Dielectric Patch Antennas using Photonic Bandgap Structures

기철식* · 박익모* · 한해욱** · 이정일*** · 임한조*

Chul-Sik Kee* · Ikmo Park* · Haewook Han** · Jung Il Lee*** · Hanjo Lim*

요 약

본 논문에서는 표면파의 전파를 억제하는 포토닉 밴드갭 구조가 기판의 두께가 두껍고 유전상수가 높은 패치 안테나의 복사효율과 후방 복사를 획기적으로 개선할 수 있음을 보였다.

Abstract

This paper presents that photonic bandgap structures suppressing the propagation of surface waves can improve the performance of the patch antennas on a thick and high dielectric constant substrate. The forbidden propagation of surface wave due to the photonic bandgap enhances the radiation efficiency and reduces the back radiation drastically.

Key words : photonic band gap, surface wave, high dielectric antennas.

Ⅰ. 서 론

두껍고 높은 유전상수를 갖는 기판 위에 제작된 패치 안테나 (patch antenna)는 마이크로파 집적회로 (microwave integrated circuit)에 직접 응용될 수 있고 주변 소자와 연결이 용이해 개인통신단말기부터 위성통신장비까지 넓은 응용 가능성을 가지고 있다. 하지만 그 응용에 있어 걸림돌이 되고 있는 것은 표면파 발생으로 인한 복사효율의 저하이다. 일반적으로 패치 안테나에서 복사되는 전자기파의 일부는 공기 중으로 나가지 못하고 표면파(surface wave)의 형태로 기판과 공기의 계면을 따라 전파된다. 기판이 유한한 크기를 갖기 때문에 계면을 따라 전파되던 표면파는 기판 언저리에서 회절/산란되어 공기 중으로 복사되므로 패치에서 복사된 전자기파와 간섭하게 된다. 그래서 표면파의 기판 언저리에서 회절/산란은 복사패턴(radiation pattern)에 간섭무늬(ripples)를 만들고 후방 복사(backward radiation)를 증가시켜 복사효율(radiation efficiency)을 낮아지게 한다. 표면파로 인한 패치 안테나의 성능 저하는 기판의 유전상수가 높고 두께가 두꺼울수록 잘 나타나 효과적으로 표면파의 전파를 억제할 수 있는 방

「이 연구는 산업자원부가 주관하는 차세대 신기술 사업인 차세대 무선통신용 트랜시버시스템 개발의 연구비 지원에 의한 것임」

*아주대학교 분자과학기술학과 및 전자공학부(Department of Molecular Science & Technology and School of Electronic Engineering, Ajou University)

**포항공과대학교 전기컴퓨터공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Pohang University of Science and Technology)

***한국과학기술연구원 광전자연구실(Photonic Research Center, KIST)

· 논 문 번 호 : 20011103-01S

· 수정완료일자 : 2001년 11월 29일

법의 개발은 작은 기판 크기와 비교적 넓은 대역폭을 갖는 두껍고 높은 유전상수의 기판에 제작된 패치 안테나의 응용에 있어 매우 중요하다.

최근 전자기파의 전파를 효과적으로 제어할 수 있는 새로운 방법, 소위 포토닉 밴드갭[1] (photonic bandgap: PBG)을 이용한 전자기파의 제어가 마이크로파에서 큰 관심의 대상이 되고 있다[2]. PBG는 전자기파의 전파가 허용되지 않는 특정 주파수 영역을 뜻한다. 이러한 주파수 영역은 특성 임피던스가 일정한 주기로 반복하여 바뀌는 구조에서 형성되며 그 폭은 반복되는 임피던스간의 비에 비례하고 대략 반주기에 해당하는 주파수 근처에 위치한다[3],[4]. 사실 PBG는 가시광 영역에서 제안된 것이지만 PBG 특성은 모든 전자기파에 적용되므로 마이크로파 소자의 성능 향상에도 매우 유용하다. 이미 PBG 구조를 이용해 안테나의 전력 이득 향상과 복사형태 개선[5],[6], 고차 harmonic 주파수 제거를 통한 전력 증폭기[7], 낮은 손실을 갖는 slow-wave 마이크로스트립 구조[8], 분할기[9] 등이 제안되고 있으며 PBG 구조를 응용한 새로운 마이크로 및 밀리미터파 소자의 개발도 기대되고 있다. 하지만 PBG를 형성하기 위해서는 일정한 주기가 적어도 6~7번은 반복되어야 하기 때문에 마이크로파 영역에서의 PBG 구조를 이용한 소자의 크기는 기존의 마이크로파 소자에 비해 매우 크다.

최근 이러한 PBG 크기 문제를 다소 해결한 새로운 PBG 구조가 제안되었는데 이 구조는 주기에 해당하는 주파수보다 훨씬 낮은 주파수 영역에서 표면파의 전파를 저지하는 주파수 대역 (surface-wave band gap)을 갖는다[10]. 이 특성은 그 구조가 표면파 저지대역에서 높은 특성 임피던스를 가지기 때문이다. 그래서 이 구조를 높은 임피던스 전자기적 표면 (high impedance electromagnetic surface: HIES)이라 부른다[10]. 그러므로 HIES은 높은 유전상수를 갖는 두꺼운 기판 위에 제작된 패치 안테나의 장점 (작은 크기와 넓은 대역폭)을 그대로 유지하면서 표면파 발생으로 인한 단점 (낮은 복사효율과 좋지 않은 복사패턴)을 개선하는데 매우 유용할 수 있다. 본 논문에서는 같은 크기의 얇은 기판과 두꺼운 기판 그리고 HIES로 둘러싸인 두꺼운 기판의 패치 안테나의 반사계수와 복사패턴을 실험적으로 측정 비교하여 HIES가 두꺼운 기판의 패치 안테나의 복사패턴과 복사효율을 획기적으로 개선할 수 있음을 보였다.

Ⅱ. 안테나 구조 및 제작

그림 1은 HIES를 갖는 두꺼운 기판의 패치 안테나를 보여준다. HIES는 그림에서 보듯이 정사각형 금속 패치의 2차원 배열로 접지평면과 금속막대 (vias)로 연결되어 있다. HIES는 그 배열의 주기에 비해 훨씬 긴 파장의 표면파의 전파를 저지하므로 짧은 주기를 갖는 배열로 낮은 주파수대역의 표면파 전파를 저지할 수 있어 기판의 크기를 증가시키지 않고 패치 주위에 HIES를 실현할 수 있다.

주기보다 훨씬 긴 파장의 표면파에 대해 HIES의 표면 임피던스는 등가적으로 병렬 공진회로의 임피던스로 표현될 수 있다. 그 이유는 그림 2에서 보는 바와 같이 HIES와 표면파의 상호작용으로 금속 패치에 전류가 인가되므로 패치 사이에 전하가 모여 캐퍼시턴스 (C) 성분이 생기고 금속 패치와 접지평면을 연결하는 금속 막대를 통해 전류가 흐르므로

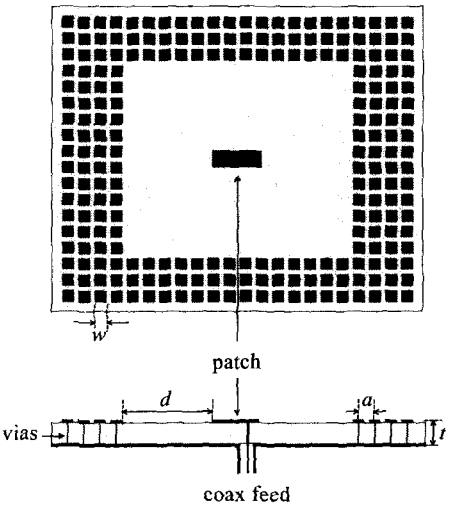


그림 1. 큰 임피던스 전자기적 표면으로 둘러싸인 고 유전상수 기판 위에 제작된 패치 안테나의 개략도.

Fig. 1. Schematics view of patch antenna surrounded by high-impedance electromagnetic surface on a thick and high dielectric substrate.

인덕턴스 (L) 성분이 생기기 때문이다. 병렬 공진회로의 임피던스는 공진 주파수 주위에서 매우 높은 임피던스를 가지므로 HIES의 임피던스 특성을 잘 표현한다. 그래서 표면파 저지대역의 중심 주파수 ω_{center}는 병렬 공진회로의 공진주파수로 대략 추정할 수 있다. 금속 패치의 주기가 패치 사이의 간격에 비해 매우 큰 경우, 패치 사이의 캐퍼시턴스와 인덕턴스는 대략 아래의 식으로 주어진다[10].

$$C_{HIES} = \frac{w\varepsilon_o(1+\varepsilon_r)}{\pi} cosh^{-1}\left(\frac{a}{a-w}\right)$$

$$L_{HIES} = \mu t$$

여기서, ε_r은 기판의 상대유전상수, μ 는 기판의 자화율, w는 금속패치의 폭, t는 기판의 두께, 그리고 a는 2차원 배열의 주기이다. 그러므로 표면파 저지대역의 중심 주파수 ω_{center}는 아래의 식으로 주어진다.

$$\omega_{center} = \frac{c}{\sqrt{1+\varepsilon_r}} \sqrt{\frac{\pi}{wt\, cosh^{-1}\left(\frac{a}{a-w}\right)}}$$

여기서 c는 전자기파의 진공속도이다. 그리고 중심 주파수에 대한 표면파 저지대역의 대역폭은 대략 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{center}} = \sqrt{\frac{L_{HIES}}{C_{HIES}}} \times \frac{1}{377}$$

즉, 저지대역의 대역폭은 진공에 대한 HIES의 표면 임피던스 비에 비례한다. 이러한 수식들은 다양한 응용에 적합한 HIES 설계에 있어 매우 유용하다.

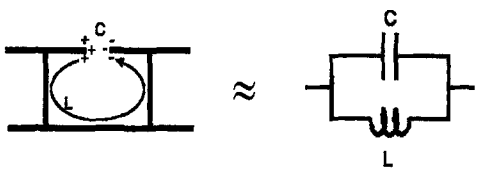


그림 2. HIES의 등가 병렬 공진회로의 개략도.
Fig. 2. Schematics view of the equivalent parallel resonant circuit of high-impedance electromagnetic surface.

먼저 높은 유전상수를 가진 안테나 특성에 있어 두께에 따른 표면파의 효과를 보기 위해 유전상수가 10.2 인 RT/Duroid 6010 기판으로 1.27 mm와 2.54 mm 의 두께를 갖는 패치 안테나를 제작하였다. 안테나의 공진주파수는 모두 5.8 GHz 주위에서 50 Ω 매칭이 잘 되도록 복사패치의 크기를 정했고 기판의 크기는 모두 52 mm×52 mm이다. 이 기판의 각 면의 길이는 대략 공진주파수의 진공중의 파장에 해당한다. 일반적으로 기판의 두께가 두꺼울수록 표면파의 효과가 크게 나타나므로 두께가 2.54 mm인 안테나의 특성에 있어 HIES에 의한 표면파 저지 효과를 살펴보았다. 공진주파수 5.8 GHz 주위의 표면파 저지대역을 가지는 HIES의 디자인 변수는 a=3 mm, w=2.5 mm이고, 각 패치 중심은 구멍을 뚫어 도체로 접지평면과 연결하였다.

HIES와 복사패치간의 거리 d는 안테나의 공진주파수에 영향을 줄 수 있다. HIES가 복사패치에 너무 가까우면 공진 볼륨 (cavity volume)이 작아져 공진주파수가 증가한다. 그러므로 공진주파수에 영향을 주지 않는 최소한의 거리는 실제 제작에 앞서 수치적 계산을 통해 반드시 구해져야 한다. 공진주파수의 변화가 거의 없는 최소한의 복사패치와 HIES 간의 거리는 FDTD 방법을 이용하여 계산한 결과 대략 10 mm이었고, 이에 따라 52 mm×52 mm 크기의 기판에 4주기를 갖는 HIES를 복사패치 주위에 배치하였다.

Ⅲ. 측정결과

그림 3은 동축 케이블로 급전된 각 안테나의 반사계수 (return loss)의 측정결과이다. 1.27 mm 두께의 안테나의 대역폭은 1.07 %로 좁은 반면 두께를 두 배로 한 2.54 mm의 안테나는 대역폭이 3.93 %로 얇은 기판에 비해 4배 정도 넓다. 이것은 두께의 증가로 인해 전자기파의 에너지가 기판 안에 좀더 많이 갇혀 (trapped) 있기 때문이다. 하지만 이 갇힌 에너지는 표면파와 손실파 (leaky wave) 형태로 기판 내에서 전파되어 안테나 특성을 저하시킨다. HIES로 둘러싸인 안테나의 대역폭은 3.03 %로 두꺼운 기판의 안테나의 대역폭과 비슷하다. 이 결과

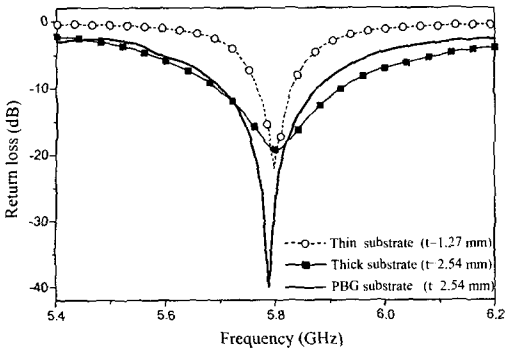
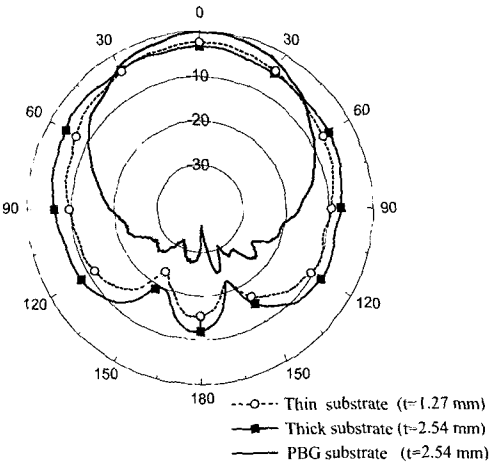


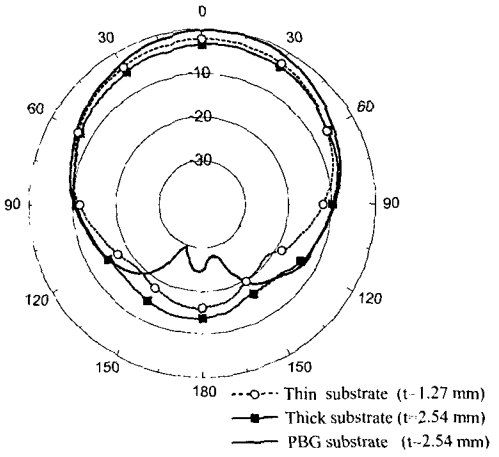
그림 3. 측정된 안테나의 반사계수.

Fig. 3. The measured return loss of three different antennas.

는 복사 패치로부터 적절히 떨어진 HIES는 안테나의 공진주파수와 대역폭에 거의 영향을 주지 않는 것을 보여준다. 그리고 HIES로 인해 두꺼운 기판 안테나의 공진주파수에서의 반사계수가 −20 dB에서 −35 dB까지 감소하므로 HIES가 두꺼운 기판 안테나의 복사효율을 크게 증가시킬 수 있음을 예측할 수 있다. 그림 4는 각 안테나의 복사패턴을 E 평면과 H 평면에서 측정한 결과이다. 비교를 위해 각 안테나의 이득 값은 HIES 안테나의 최고 이득 값으로 나누었다. 두께 1.27 mm의 얇은 기판 안테나와 2.54 mm의 두꺼운 기판 안테나의 복사패턴은 표면파의 기판 언저리에서의 회절/산란으로 인한 낮은 복사이득과 강한 후방복사를 잘 보여주고 있다. 기판의 두께가 두꺼울수록 표면파의 발생이 많아 두꺼운 기판 안테나의 복사패턴은 얇은 기판 안테나의 복사패턴에 비해 이득이 낮고 후방 복사의 강도가 크다. 하지만 HIES로 둘러싸인 두꺼운 기판 안테나의 복사패턴은 높은 이득과 많이 줄어든 후방 복사를 보여준다. 이런 두꺼운 기판 안테나의 성능 향상은 분명히 HIES에 의한 표면파 전파의 저지에 의한 것이다. 세 종류 안테나의 특성은 표 1에 정리되어 있다. 표에서 보는 바와 같이 두꺼운 기판 안테나의 최고 이득값은 HIES로 인해 2배 정도 증가하고 후방복사는 획기적으로 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러므로 표면파 저지대역을 갖는 PBG 구조인 HIES는 두꺼운 기판 안테나의 기판 크기와 넓은 대역폭을 그대로 유지하면서 복사패턴과 복사효율을 획기적



(a)



(b)

그림 4. 측정된 안테나의 복사패턴. (a) E 평면, (b) H 평면.

Fig. 4. The measured radiation patterns of three different antennas. (a) E plane, (b) H plane.

표 1. 안테나의 대역폭과 전후방 복사.

Table 1. Bandwidth, front and back radiation of three different antennas.

안테나 / 특성	%BW	Front radiation	Back radiation
Thin substrate (t=1.27 mm)	1.07	−2.34 dB	−15.50 dB
Thick substrate (t=2.34 mm)	3.93	−3.24 dB	−11.92 dB
PBG structure	3.03	0 dB	−30.0 dB

으로 개선할 수 있다. HIES의 표면파 저지 특성은 안테나뿐만 아니라 표면파로 인한 마이크로파 소자들간의 상호작용을 줄이는데도 매우 유용할 것이다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 표면파 저지대역을 갖는 PBG 구조인 HIES를 이용해 패치 안테나에서 발생하는 표면파의 전파를 억제하므로 두껍고 높은 유전상수 기판 위에 제작된 패치 안테나의 복사효율을 증가시키고 후방복사를 획기적으로 줄일 수 있음을 보였다.

감사의 글

이 논문을 쓰는데 도움을 주신 UCLA의 Yahya Rahmat-Samii교수와 Fan Yang에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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

[2] See for examples, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2150, Nov. 1999.

[3] C.-S. Kee, J.-E. Kim, H. Y. Park, S. J. Kim, H. C. Hong, 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.

[4] 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.

[5] 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 1998.

[6] J. S. Colburn and Y. Rahmat-Samii, "Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 12, pp. 1785-1794, Dec. 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] V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, "Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines", *IEEE Trans. Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 69-71, Feb. 1998.

[9] 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.

[10] 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. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.

기 철 식

1992년: 부산대학교 물리교육학과 (이학사)
1996년: 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)
2000년: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
1999년 10월~2000년 10월: 미국 UCLA 박사후 연구원
2000년 10월~현재: 아주대 분자과학기술학과 교수
[주 관심분야] 광자결정, 포토닉 밴드갭을 이용한 초고주파 소자 및 안테나.

박 익 모

1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학과 (공학사)
1989년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학과 (공학석사)
1994년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학과 (공학박사)
1994년~1996년: LG전자기술원 선임 연구원
1996년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수
[주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, 밀리미터파 수동소자, 수치해석, 광자결정

한 해 욱

1986년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1988년: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1995년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학과 (공학박사)
1995년~1997년: Lucent Technology, Technical Staff
1997년~현재: 포항공과대학교 전기컴퓨터 공학부 교수
[주 관심분야] 광자결정, 테라헤르츠와 나노 포토닉스, 광반도체소자

이 정 일

1975년: 서울대학교 물리학과 (이학사)
1985년: 미국 브라운대학 물리학과 (이학박사)
1975년~1977년: 육군 통신장교
1985년~1986년: 미국 GTE연구소 박사 후 연구원
1987년~현재: 한국과학기술연구원 광기술연구센터 책임연구원
1993년~1996년: 한중과학기술협력센터 북경사무소장 (초대)
1997년~1998년: 프랑스 그레노블 반도체소자물리연구실 방문 연구원
2000년~현재: 한국과학기술평가원 우주원천 전문위원
[주 관심분야] 광반도체소자, 전기적 잡음, 광자결정, 전자소자 모델링, 금속/반도체 및 절연체/반도체 계면 특성, 양자전송

임 한 조

1971년: 서울대학교 물리과학대 (이학사)
1974년: 서울대학교 물리학과 (이학석사)
1982년: 불란서 Montpellier 2대 물리학과 (이학박사)
1982년 2~8월: Montpellier 박사후 연구원
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
[주 관심분야] 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