

마이크로파 및 밀리미터파 회로 응용을 위한 넓은 저지대역 특성을 지닌 소형의 저역 통과 여파기 설계

Design of a Compact Lowpass Filter having Wide Bandstop Characteristics for Microwave and Millimeter-Wave Circuit Applications

서재옥 · 박성대* · 김진양 · 강남기* · 이해영

Jae-Ok Seo · Seong-Dae Park* · Jin-Yang Kim · Nam-Kee Kang* · Hai-Young Lee

요 약

본 논문에서는 DSL(Descended Signal Line)을 이용한 새로운 다층의 PBG 구조를 제안하였다. 측정 결과로부터 DSL을 이용한 제안된 PBG 구조는 일반적인 다층의 DGS 구조에 비하여 크기면에서 72 % 감소하였고 대역폭에서 13 % 증가하였다. 또한 EGP(Elevated Ground Plane)를 이용한 PBG 구조와 비교하면 제안된 구조는 크기가 42 % 감소하였고 대역폭이 23 % 증가하였다. 그리고 제작된 6 개의 PBG 구조들을 측정된 결과, 모든 패턴들이 동일한 차단주파수와 함께 저지대역 특성을 지님을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 구조는 삽입손실이 20 dB인 20 GHz에서 모든 패턴이 300 MHz 이하의 매우 정확한 오차(tolerance)를 가짐으로써 소형의 마이크로파 집적 회로나 모듈 개발에 효과적으로 활용될 수 있으리라 기대된다.

Abstract

In this paper, we proposed novel multilayer photonic bandgap(PBG) structure using DSL(Descended Signal Line). From measurement result, the proposed PBG structure using DSL is reduced 72 % at size and increased 13 % at bandwidth compared to typical multilayer DGS(Defected Ground Structure). It is also reduced 42 % at size and increased 23 % at bandwidth compared to PBG structure using EGP(Elevated Ground Plane). In case of measurement for manufactured six PBG patterns, all patterns have the same cutoff frequency and bandstop characteristics. So it can be used for bandstop filter having very precise tolerance of below 300 MHz at 20 GHz if it is applied to real product and this filter will be useful for small microwave integrated circuit and module development.

Key words : Filter, LTCC, PBG(Photonic Bandgap), Bandstop, Lowpass

I. 서 론

최근에 주목을 받고 있는 분야 중의 하나인 포토닉 밴드갭(PBG: Photonic Bandgap) 구조는 광학 분

야에서 처음으로 연구가 시작되었으나^[1], 최근에는 마이크로파 및 밀리미터파 응용 등 활용분야가 확대되고 있다^{[2],[3]}. 따라서 이러한 PBG 구조를 사용하여 고효율 안테나 및 전력증폭기, 여파기 등을 구

아주대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Ajou University)

*전자부품연구원 고주파재료연구센터(High Frequency Materials Research Center, Korea Electronics Technology Institute)

· 논문 번호 : 20021104-147

· 수정완료일자 : 2002년 12월 18일

현한 다양한 연구 결과들이 보고되고 있다^{[3]~[5]}.

현재까지 대역저지 여파기 특성을 지닌 마이크로 스트립 회로 응용을 위한 여러 가지 PBG 구조들이 제안되었다^{[6]~[11]}. 그러나 지금까지 제안된 이러한 PBG 구조들은 회로의 소형화와 광대역 특성을 동시에 만족시키기 어려울 뿐만 아니라 실장(packaging)시에 많은 단점을 지니고 있다. 첫째 신호선의 파동 임피던스를 주기적으로 변화시킨 1차원 구조는 20 dB 이상의 저지 대역 특성을 얻기 위하여 5차 이상의 셀수로 구현되어야 하기 때문에 크기가 커지는 문제점과 함께 광대역화의 어려움이 있으며 접지면 식각을 통해 구현된 PBG 구조는 기구에 삽입될 경우 기구의 접지면 형성으로 인하여 실장시 접지면 식각의 효과가 유용하지 못하기 때문에 이러한 효과를 고려한 기구 설계가 필요한 단점이 있다^{[6],[7]}. 마지막으로 넓은 저지대역을 형성하기 위하여 최근에 제안된 서로 다른 주기와 셀 크기를 갖는 PBG 구조를 직렬 및 병렬로 연결한 구조들은 설계 주파수에 따라 주기가 결정되면서 큰 크기로 구현되는 단점이 있다^{[10],[11]}. 따라서 소형의 광대역 여파기를 설계하기 위해서는 PBG 단위 셀의 크기를 줄이는 동시에 각각의 PBG 단위 셀사이의 격자상수(lattice constant) 거리를 줄여야 하며, 단위 셀 공진 구조에서 커패시턴스를 증가시켜 밴드갭을 향상시켜야 한다^{[12],[13]}.

본 논문에서는 지금까지 제시된 PBG 구조들의 단점을 해결하기 위해 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 공정을 이용하여 쉽게 구현할 수 있는 새로운 소형의 다층 PBG 구조를 제안하였다. 제안된 구조는 단위 셀간의 격자상수 길이를 줄이고, 단위 셀에서 금속판을 신호선과 비아 홀(via hole)로 연결하여 접지면과 형성된 병렬 커패시턴스를 증가시킴으로써 소형의 광대역 저지 여파기를 구현하였다^[11]. 이러한 제안된 구조의 전자기적인 해석을 위하여 완전 수치 해석법(full-wave analysis)인 유한요소법을 이용하여 5~40 GHz까지 해석 및 측정하였다. DSL 구조를 이용한 PBG 구조를 해석 및 측정된 결과, 기존의 다층 DGS 구조보다 대역폭이 13% 증가하였으며, 크기면에서는 72% 감소하였다. 그리고 EGP 구조를 이용한 PBG 구조와 비교하면, 대역폭이 23% 증가하였으며 크기면에서 42% 감

소하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 작은 크기의 대역 저지 여파기로 사용될 수 있는 DSL을 이용한 구조는 마이크로파 대역 집적회로나 모듈 개발에 효과적으로 활용될 수 있으리라 기대된다.

II. 구조 및 해석 방법

2-1 해석 구조

그림 1은 신호선의 임피던스 변화와 함께 접지면 식각을 통해 임피던스의 변화율을 증가시킴으로써 대역을 넓히고자 하는 기존의 접지면 식각 PBG 구조를 나타낸 그림이다^[7]. 그림 1에서 1.2 mm 높이의 세라믹 기판($\epsilon_r=7.8, \tan \delta=0.005$)에 1.2 mm의 주기를 신호선과 접지면에 형성하였으며 접지면 식각 구조는 신호선으로부터 0.4 mm 아래에 배치하였다. 그리고 50 Ω 선폭을 고려하여 마이크로스트립 신호선의 선폭(Ws)을 0.58 mm로 설계하였으며, 신호선과 접지면에서 셀 구조의 넓이는 2.58 mm로 설정하였다.

그림 2는 0.4 mm 두께의 세라믹 기판($\epsilon_r=7.8, \tan \delta=0.005$)에 비아(via)와 금속판(EGP: Elevated Ground Plane)을 삽입하여 마이크로스트립 선로에 구현된 PBG 구조를 나타내고 있다. 그림 2에서 신호선과 EGP의 간격은 0.05 mm이고, 삽입된 EGP의 두께와 비아의 직경은 각각 0.013 mm, 0.017 mm로 설정하였다. 그리고 EGP의 폭(W_{EGP})과 길이(L_{EGP})는 각각 1.16 mm, 0.5 mm이며, 접지면 식각 구조의 주기(a)를 1.16 mm로 설계하였다.

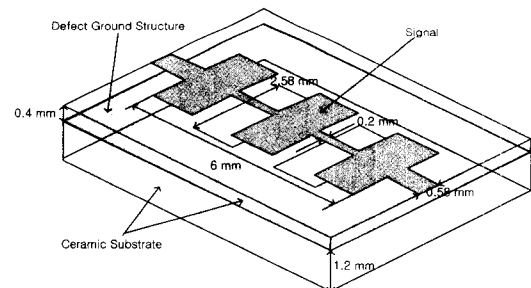


그림 1. 일반적인 접지면 식각 구조
Fig. 1. The conventional DGS(Defect Grounded Structure) structure.

마이크로파 및 밀리미터파 회로 응용을 위한 넓은 저지대역 특성을 지닌 소형의 저역 통과 여파기 설계

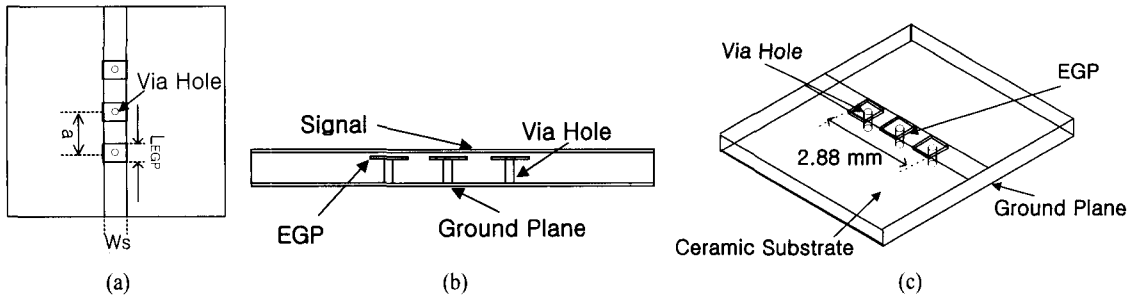


그림 2. EGP를 이용한 PBG 구조 (a) 평면도, (b) 측면도, (c) 3차원 구조
 Fig. 2. (a) The PBG structure using EGP. (a) Top view, (b) Side view, (c) 3-dimensional structure

그림 3은 그림 2의 PBG 단위 셀에서 커패시턴스를 증가시키기 위하여 본 논문에서 제안된 소형의 광대역 저지 여파기 구현을 위한 PBG 구조를 나타낸 그림이다. 그림 3에서 단위 셀의 커패시턴스를 증가시키기 위하여 신호선과 삽입된 금속판 사이의 거리를 0.29 mm로 설계하였으며, 삽입된 금속판의 위치를 제외한 구조와 기판을 포함한 물질 값들은 이전의 그림 2의 구조와 객관적인 비교를 위하여 동일한 조건을 이용하여 설계하였다.

III. 해석 결과

3-1 해석 결과

그림 4는 EGP와 DSL을 이용한 단위 셀 PBG 구조에 대한 FEM과 회로 모델 해석 결과를 비교한 것이다. 그림 4를 살펴보면, FEM과 회로 모델 해석 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있으며 EGP 구조와 DSL 구조의 공진주파수가 거의 동일한 주파수에

서 직렬 공진이 일어남을 확인할 수 있다. 그러나 EGP 구조는 기판 두께에 따라 50 Ω 선폭이 결정되어지기 때문에 커패시턴스를 증가시키는데 한계가 있으며 EGP의 폭이 커질수록 인덕턴스의 병렬로 기생 커패시턴스가 발생하여 대역폭이 줄어드는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 직렬 커패시턴스를 증가시키기 위하여 DSL 구조를 제안하였고 제안한 DSL 구조와 EGP 구조의 커패시턴스를 비교하면, 제안된 DSL 구조의 커패시턴스가 EGP 구조보다 훨씬 커지는 것을 확인할 수 있으며 이러한 커패시턴스의 상승은 LC 직렬공진(series resonance)에서 대역폭을 증가시키는 요인이 된다^[13].

그림 5는 그림 3의 구조에서 PBG 셀 사이의 격자상수(a) 변화에 따른 대역폭의 변화를 해석한 결과이다. 본 논문에서 제안된 하나의 셀이 LC 공진 특성을 나타내는 PBG 구조는 낮은 차단주파수가 $1/\sqrt{LC}$ 에 의해 결정되기 때문에 셀 사이의 거리를 변화시키더라도 낮은 차단 주파수는 변화가 없으며,

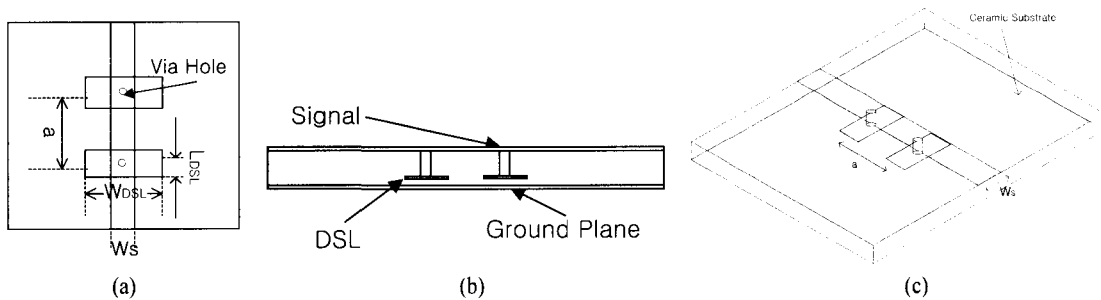


그림 3. DSL(Descended Signal Line)을 이용한 제안된 소형의 광대역 PBG 구조
 (a) 평면도, (b)측면도, (c) 3차원 구조
 Fig. 3. The proposed compact broadband PBG structure using DSL(Descended Signal Line).
 (a) Top-view, (b) Side view, (c) 3-dimensional structure

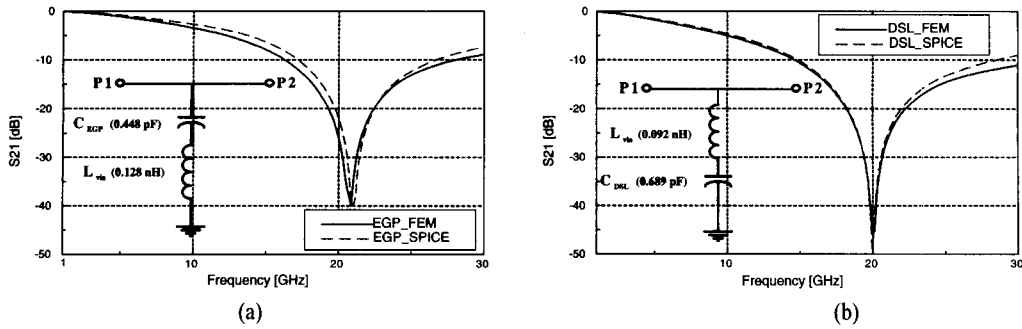


그림 4. EGP와 DSL을 이용한 단위 셀 PBG 구조에 대한 FEM & 회로 모델 해석 결과 비교
 Fig. 4. FEM and SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) model simulation result comparison of unit cell PBG structure using EGP & DSL.
 (a) Insertin loss of EGP structure, (b) Insertion loss of DSL

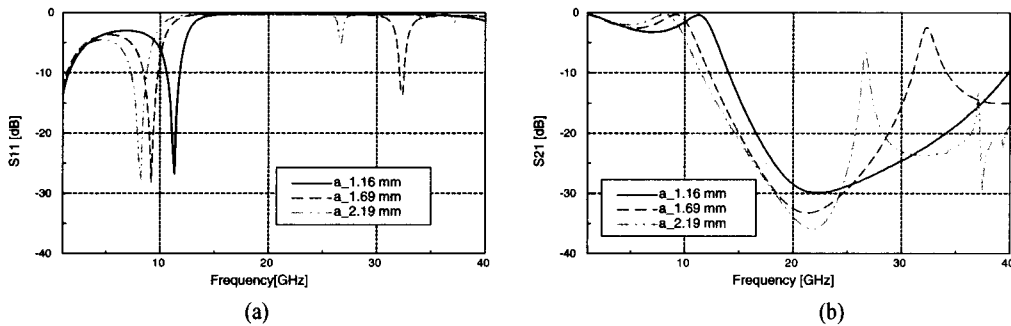


그림 5. PBG 구조(그림 3)에서 격자상수(a)의 변화에 따른 S-파라미터
 Fig. 5. S-parameter for lattice constant(a) variation in PBG structure(Fig. 3). (a) Return loss, (b) Insertion loss

높은 차단 주파수는 셀 사이의 격자 상수(a)에 의해 $V_p/2a$ 로 결정되기 때문에 셀 사이의 격자 상수를 줄일 경우 높은 차단 주파수가 고주파로 이동함으로써 대역폭이 넓어진다^[12]. 여기서 V_p 는 위상속도이다. 그림 5를 살펴보면, 10 GHz 근처의 낮은 차단 주파수는 LTCC 소성시 DSL 폭의 수축으로 인하여 오른쪽으로 약간 이동하였으나 대역폭은 격자상수의 거리가 줄어들수록 높은 차단주파수가 고주파로 이동함으로써 대역폭이 넓어지는 것을 확인할 수 있다.

3-2 결과 비교 및 고찰

그림 6은 기존에 제안된 접지면 식각 다층 PBG 구조와 본 논문에서 제안한 DSL을 이용한 소형의 PBG 구조에 대한 해석 및 측정결과를 나타낸다. 접지면 식각 다층 PBG 구조의 해석 및 측정결과가 잘 일치함을 확인할 수 있으며 30 GHz 이상에서 높

은 차단 주파수의 주파수 변화는 측정에 사용되었던 접지면 식각구조의 아래 세라믹 기판이 없는 상태에서 측정하였기 때문이다. 따라서 본 논문에서 제안된 DSL을 이용한 PBG 구조의 측정결과와 비교하면, DSL을 이용한 구조가 DGS 구조보다 부분 대역폭이 13 % 증가(DGS:24.57 GHz, DSL: 27.73 GHz)하였으며 크기에서는 72 % 감소(DGS: 6 mm, DSL: 1.66 mm)하였다. 또한 DGS 구조는 33.37 GHz이상의 차단주파수에서 전력손실이 급격히 나빠지는 단점을 지니고 있다.

그림 7은 EGP(Fig. 2)와 DSL(Fig. 3)을 이용한 PBG 구조의 해석 및 측정결과를 나타낸다. 측정 및 해석 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있으며 DSL 구조가 EGP 구조보다 부분대역폭이 23 % 증가(EGP: 22.58 GHz)하였고 크기면에서 42 % 감소(EGP:2.88 mm)함을 확인할 수 있다. 따라서 지금까지의 비교 결과로부터 본 논문에서 제안된 PBG 구조가 크기 축소와 대역폭 향상면에 있어서 큰 장점을 지닌 것

마이크로파 및 밀리미터파 회로 응용을 위한 넓은 저지대역 특성을 지닌 소형의 저역 통과 여파기 설계

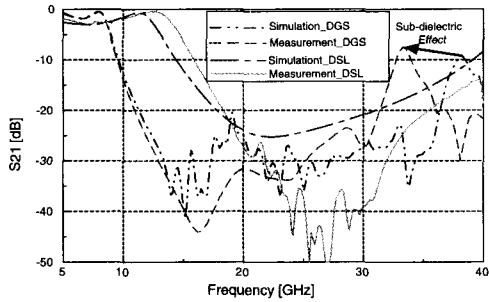


그림 6. 일반적인 DGS 구조와 DSL을 이용한 PBG 구조의 해석 및 측정결과

Fig. 6. Analysis and measurement results of conventional DGS structure(Fig. 1) and PBG structure using DSL.(Fig. 3)

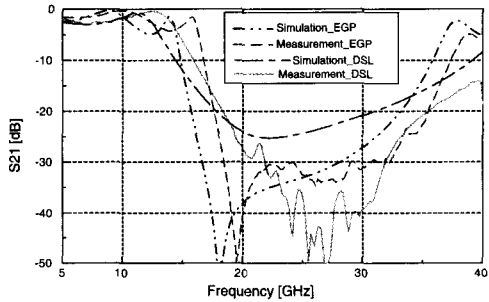


그림 7. EGP를 이용한 PBG 구조(Fig. 2)와 본 논문에서 제안된 DSL을 이용한 PBG 구조(Fig. 3)의 해석 및 측정 결과

Fig. 7. Analysis and measurement results of the PBG structure using EGP(Fig. 2) and proposed DSL(Fig. 3) in this paper.

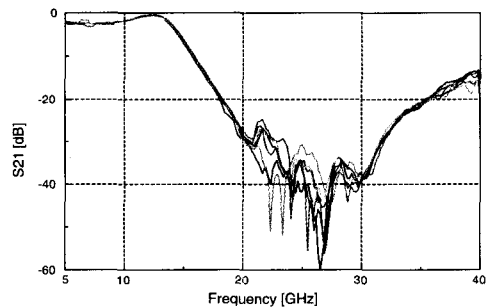


그림 8. 오차에 대한 신뢰성을 판단하기 위하여 6개의 DSL을 이용한 PBG 패턴들을 측정된 결과

Fig. 8. Measurement results of the six PBG structures using DSL to judge confidence for tolerance.

을 확인할 수 있다.

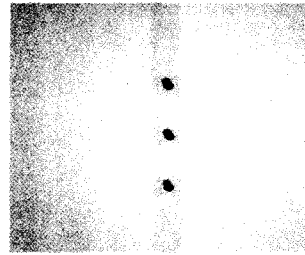


그림 9. X-ray scope로 촬영한 그림 2의 실제 제작 사진의 상면도

Fig. 9. Top view of the manufactured picture of Fig. 2 through X-ray scope.

그림 8은 실제 제작된 DSL을 이용한 PBG 구조의 각기 다른 6개의 패턴을 측정된 결과를 나타낸다. 모든 패턴이 동일한 차단 주파수와 저지대역폭을 가지는 것을 확인할 수 있으며 또한 선택도(sharpness)와 저지 특성에서도 거의 동일한 특성을 지닌 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 구조는 실제 산업화의 응용을 위한 제품에 적용되어질 경우, 제품에서 중요하게 여겨지는 정밀도에 대한 오차에 대하여 삽입손실이 20 dB인 20 GHz에서 모든 패턴이 300 MHz 이하의 매우 정확한 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 LTCC 공정을 이용하여 쉽게 구현할 수 있는 소형의 광대역 PBG 구조를 제안하였고, 제안된 구조는 단위 셀 간의 격자상수 길이를 줄이고, 단위 셀에서 금속판을 신호선과 비아 홀(via hole)로 연결하여 접지면과 형성된 병렬 커패시턴스를 증가시킴으로써 소형의 광대역 저지 여파기를 구현하였다. 제안된 구조는 DGS 구조를 이용한 PBG 구조에 비하여 대역폭이 13 % 증가하였으며, 크기면에서는 72 % 감소하였다. 그리고 EGP 구조를 이용한 PBG 구조에 비하여 DSL 구조는 대역폭이 23 % 증가하였으며 크기면에서 42 % 감소하였기 때문에 넓은 대역폭과 함께 훨씬 작은 크기의 대역 저지 여파기로 사용될 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 여러 가지 제작된 패턴을 측정된 결과, 모든 패턴에서 삽입손실이 20 dB인 20 GHz에서 모든 패턴이 300 MHz 이하의 매우 정확한 오차를 가지

기 때문에 실제 상용화 되어질 경우 매우 높은 신뢰성을 가짐을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 DSL을 이용한 PBG 구조는 마이크로파 대역 집적회로나 모듈 개발에 효과적으로 활용될 수 있으리라 기대된다.

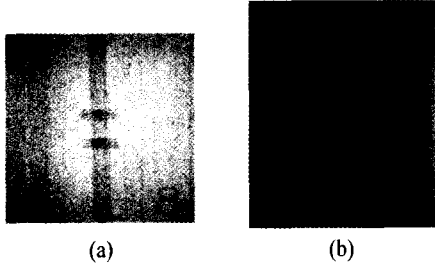


그림 10. X-ray scope로 촬영한 그림 3의 실제 제작 사진 (a) 상면도, (b) 측면도

Fig. 10. The manufactured picture of Fig. 3 through X-ray scope.

(a) Top view, (b) Side view

참 고 문 헌

[1] E. Yablanovich, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, May 1987.

[2] T. J. Ellis, G. M. Rebeiz, "MM-wave tapered slot antennas on micromashed photonic bandgap dielectrics", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1157-1160, June 1996.

[3] M. P. Kesler, J. G. Maloney and B. L. Shirley, "Antenna design with the use of photonic bandgap material as all dielectric planar reflectors", *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 11, no. 4, pp. 169-174, Mar. 1996.

[4] Jinho Yoon, Chulhun Seo, "Improvement of Broadband Feedforward Amplifier Using Photonic Bandgap", *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 450-452, Nov. 2001.

[5] F. R. Yang, K. P. Ma, Y. Qian and T. Itoh, "A Uniplanar Compact Photonic-Bandgap(UC-PBG) Structure and Its Applications for Microwave

Circuits", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 8, pp. 1509-1514, Aug. 1999.

[6] T. Y. Yun, K. Chang, "Uniplanar One- Dimensional Photonic-Bandgap Structures and Resonators", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 3, pp. 549-553, Mar. 2001.

[7] V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli and T. Itoh, "Novel 2-D Photonic Bandgap Structure for Microstrip Lines", *IEEE Microwave and Guided Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 69-71, Feb. 1998.

[8] L. Zhu, H. Bu and K. Wu, "Unified CAD Model of Microstrip Line with Backside Aperture for Multilayer Integrated Circuit", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 981-984, June 2000.

[9] Yasushi Horri, Makoto Tsutsumi, "Harmonic Control by Photonic Bandgap on Microstrip Patch Antenna", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 9, no. 1, pp. 13- 15, Jan. 1999.

[10] I. Rumsey, M. Piket-May and P. Keith Kelly, "Photonic Bandgap Structures Used as Filters in Microstrip Circuits", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 10, pp. 336-338, Oct. 1998.

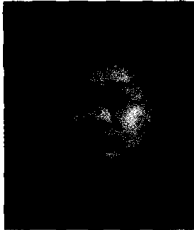
[11] T. Kim, C. Seo, "A Novel Photonic Bandgap Structure for Low-Pass Filter of Wide Stop-band", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 10, pp. 13-15, Jan. 2000.

[12] D. F. Sievenpiper, E. Yablonovitch, J. N. Winn, S. Fan, P. R. Villeneuve and J. D. Joannopoulos, "3D Metallo-Dielectric Photonic Crystals with Strong Capacitive Coupling between Metallic Islands", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 13, pp. 2829-2832, Mar. 1998.

[13] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.

마이크로파 및 밀리미터파 회로 응용을 위한 넓은 저지대역 특성을 지닌 소형의 저역 통과 여파기 설계

서재욱



1976년 3월 22일생
 2001년: 호남대학교 전파공학과 (공학사)
 2001년~2003년: 아주대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)
 [주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 대역 패키지 및 HMIC 설계, 밀리미터파 대역 패키징 기법, LTCC 기술을 이용한 RF 모듈 설계, RF 수동 및 능동소자 설계

강남기



1983년: 연세대학교 금속공학과 (공학사)
 1985년: 연세대학교 대학원 금속공학과 (공학석사)
 1991년: 연세대학교 대학원 금속공학과 (공학박사)
 1992년~현재: 전자부품연구원 수석연구원

[주 관심분야] LTCC를 이용한 모듈 제조 기술, 광모듈 패키징 공정 기술

박성대

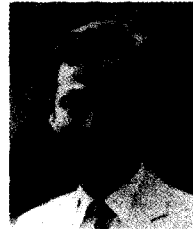


1993년: 서울대학교 무기재료공학과 (공학사)
 1995년: 서울대학교 대학원 무기재료공학과 (공학석사)
 1995년~1997년 9월: 쌍용중앙연구소 연구원
 1997년 10월~2000년: 대우전자 (고등기술연구원) 주임연구원

2001년~현재: 전자부품연구원 선임연구원

[주 관심분야] LTCC를 이용한 밀리미터파 모듈 제조 공정 기술, 후막 미세라인 재료 기술 및 RF 모듈 제조 공정 기술

이해영



1980년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1982년~1986년: 국방부 연구사무원
 1989년 12월: The University of Texas at Austin (공학박사)

1990년~1992년: 금성 중앙 연구소 기초1실장 책임연구원

1992년~현재: 아주대학교 전자공학부 정교수
 [주 관심분야] 초고속/고밀도 반도체 Package의 설계/측정, 초고주파소 및 광전자소자의 설계/측정, 초소형 안테나 해석/설계, 초전도체의 고속 전송 특성 모델링

김진양



1999년: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
 2001년: 아주대학교 전자공학부 대학원 (공학석사)
 2001년~2003년: 아주대학교 대학원 전자공학 (공학박사수료)

[주 관심분야] 밀리미터파용 수동소자의 최적화 기법, 밀리미터파 회로 모듈링 및 패키징 기법, MEMS 패키지 설계