

논문 2008-45TC-9-7

나선형 구조의 PBG(Photonic Bandgap)를 적용한 고효율 Class-F 전력 증폭기

(A Highly Efficiency CLass-F Power Amplifier Using The Spiral
PBG(Photonic Bandgap) Structure)

김 선 영*, 서 철 현**

(Sunyoung Kim and Chulhun Seo)

요 약

본 논문에서는 class F 전력 증폭기의 출력 정합단에 새로운 광전자밴드갭(PBG) 구조를 적용하여 높은 효율을 얻을 수 있도록 하였다. 제안된 나선형 PBG 구조는 비평면 제조 공정을 요구하지 않는 유전체 판 위에 패턴을 뜬 2차원의 규칙적인 격자이다. 이 구조는 2차 고조파에서 높은 저지 특성을 갖는다. 또한 더욱 가파른 스킨트 특성을 보인다. 이 새로운 PBG 구조는 효율향상을 위하여 class F 전력 증폭기에 적용되어 질 수 있다. 나선형 PBG 구조를 적용한 class F 전력 증폭기의 power-added efficiency(PAE)는 코드분할 다중접속(CDMA) 응용에서 73.62 %의 효율을 얻을 수 있었다. 이 결과는 제안한 PBG 구조를 적용하지 않은 기존의 Class F 전력 증폭기와 비교했을 때 6.2 % 향상된 결과를 보여준다.

Abstract

In this paper, the power added efficiency(PAE) of class F power amplifier is improved by applying a new Photonic Bandgap (PBG) structure on the output of amplifier. The proposed spiral PBG structure is a two-dimensional (2-D) periodic lattice patterned on a dielectric slab that does not require nonplanar fabrication process. This structure has higher suppression performance at second harmonic. Also, It has a sharp skirt property. This new PBG structure can be applied with class F power amplifier for efficiency improvement. We obtained the PAE of 73.62 % for CDMA applications, and the PAE performance is improved as much as 6.2 % compared with that of a conventional class F power amplifier.

Keywords: class F power amplifier, Photonic Bandgap(PBG), high efficiency, harmonic control

I. 서 론

최근 무선통신 분야는 유비쿼터스 시대의 도래라는 새로운 변혁에 발빠르게 대응하면서, 이를 보다 효율적이고 신속하게 현실화시키기 위해 요구되는 다양한 기술적 특성들에 대한 연구개발에 주력하고 있다. 특히 무선통신의 발달에 따라 저전력 시스템이 요구되게 되고, 이를 실

현하기 위해 송신 전력의 상당 부분을 소비하는 전력증폭기의 고효율을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

기존에 전력 증폭기의 효율을 향상시키기 위한 방법으로는 Doherty 구조를 이용한 방법^[1], 동적 바이어스 및 적응형 바이어스 등의 구조적인 해결방법과 단일 소자를 사용하여 효과적으로 높은 효율을 얻을 수 있는 방법으로 Class E 와 Class F의 전력 증폭기가 있다^[2]. Class E 는 스위칭 모드 증폭기로서 회로가 간단하고 높은 주파수에서도 우수한 성능을 보이지만 출력이 캐패시턴스에 따라서 변하기 때문에 고전력 증폭기에서는 구현하기 힘든 단점이 있다. 반면, Class F는 증폭기의 고조파를 제어하여 높은 효율을 얻을 수 있는 효과적인 방법이다^[3].

* 학생회원, ** 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

※ 이 연구는 2008학년도 숭실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음

접수일자: 2008년7월29일, 수정완료일: 2008년9월17일

본 논문에서는 간단한 고조파 조절 회로와 PBG 구조를 이용하여 더욱 효율이 향상된 Class F 전력 증폭기를 설계한다. 이론적으로 Class F 전력 증폭기는 모든 고조파를 제어한다면 100%의 효율을 얻을 수 있지만 현실적으로 구현이 불가능하다. 따라서 효율 향상에 가장 큰 영향을 미치는 2차와 3차 고조파만을 제어하여 회로를 단순화하였으며, 출력 정합단에 추가적으로 나선형 구조의 PBG를 적용하여 전력증폭기의 출력 정합단 이후에 발생하는 2차 고조파를 효과적으로 억제함으로써 class F 전력증폭기의 효율을 더욱 향상시킬 수 있도록 하였다.

II. 본 론

1. Class F 전력 증폭기

Class F 전력 증폭기는 그림 1에서 보는 바와 같이 전압과 전류 파형이 신호 주기 동안 overlap이 없이 동작한다. 전압의 홀수 고조파 임피던스를 조절하여 능동 소자의 출력단에서 구형파의 전압파형이 되도록 하고, 전류의 파형은 전도각이 180°와 같거나 작은 정현파 형태를 나타내도록 하여 전압과 전류가 겹치게 되는 부분을 최소화 시킨다. 따라서 소자에서 소모되는 순간 DC 전력은 0이 되어 이상적인 경우 100%의 효율을 얻을 수 있다. Class F 전력 증폭기의 그림 1과 같은 출력 파형을 얻기 위해 고조파 제어 회로를 증폭기의 출력 정합단에 추가하여 짝수 고조파 성분에서는 단락, 홀수 고조파 성분에서는 개방 형태로 동작하도록 한다^[4-6]. 본 논문에서는 전력 증폭기의 효율에 가장 큰 기여도를 갖는 2차와 3차 고조파만을 제어하여 설계하였다. 그림 2는 본 논문에서 제안한 나선형 구조의 PBG를 적용한 Class F 전력 증폭기의 구성도이다. 일반적인 Class F 전력 증폭기에서의 마이크로스트립 라인을 이용한 고조파 제어 회로를 이용하여 그림 3과 같이 능동소자의 드레인에서 바라본 2차

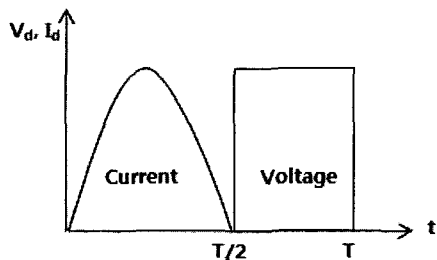


그림 1. 이상적인 Class F 전력 증폭기의 전압 전류 파형
Fig. 1. Ideal current and voltage waveform for Class F power amplifier.

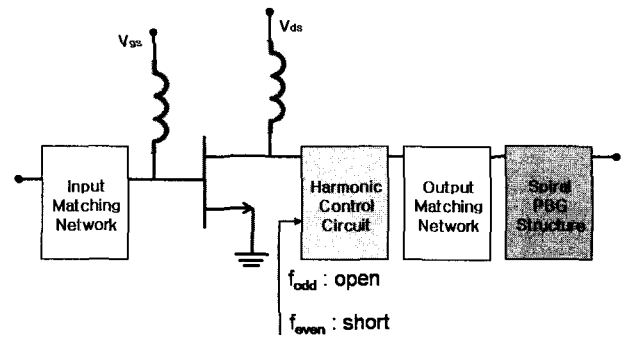


그림 2. 제안된 Class F 전력 증폭기 구성도
Fig. 2. Schematic of the proposed Class F power amplifier.

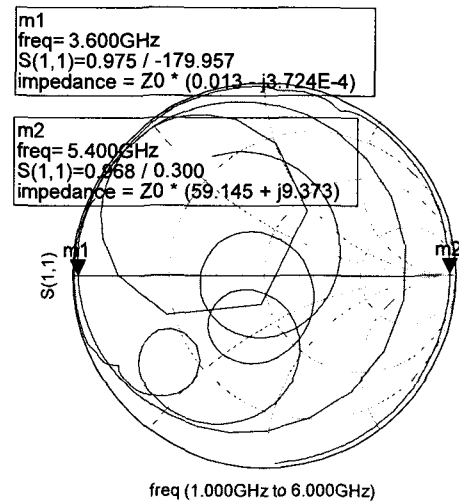


그림 3. 2차 고조파와 3차 고조파에 성분에서의 고조파 조절 회로의 임피던스 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation result of the harmonic control circuit showing impedance for 2nd- and 3rd-harmonic components.

고조파 임피던스가 단락, 3차 고조파 임피던스가 개방이 되도록 구현하였으며, 출력 정합단에 추가적으로 2차 고조파에서 높은 저지특성을 보이는 PBG 구조를 적용하여 출력 정합단 이후에 발생하는 고조파를 효과적으로 억제 시킴으로써 좀 더 높은 효율을 보이는 class F 전력 증폭기를 구현하도록 하였다.

2. 제안된 나선형 구조의 PBG

접지 평면에 식각된 주기적인 격자를 갖는 마이크로스트립 라인은 전자기적 전파에 대한 저지대역을 갖는 PBG 구조와 같이 동작한다^[7-8]. 이러한 형태의 PBG 구조는 전력 증폭기에서 고조파 조절을 위하여 적용되어 질 수 있다. 본 논문에서는 Class F의 효율을 개선시키기 위해서 고조파를 효율적으로 억제시키고자 전력 증폭기의 출력 정합단에 적용할 나선형 구조의 PBG를 제안한

다. 그림 4-(a)와 같은 나선형 마이크로스트립 라인은 필터링 특성을 갖는다. 나선형 마이크로스트립 라인의 중심축에 평행한 방향으로 시간에 따라 변하는 자기장 (time-varying magnetic field)이 가해지면 마이크로스트립 라인에 전류가 유기된다. 이 전류 루프가 흐르는 선로의 길이만큼 분산 인덕턴스(distributed inductance)가 발생하며 선로들 사이에 상호 인덕턴스(mutual inductance)가 발생한다. 또한 나선형 마이크로스트립 라인의 안쪽과 바깥쪽 선로 사이에 분산 캐패시턴스(distributed capacitance)와 양 끝 단에서 가장자리 캐패시턴스(fringing capacitance)가 발생한다. 이 두 캐패시턴스는 등가 회로적으로 직렬로 연결되어 있다고 할 수 있다. 결과적으로 나선형 마이크로스트립 라인은 일반적인 대역저지 필터의 LC공진회로와 같으며 등가회로에 대한 공진 주파수 ω_o 는 $1/\sqrt{L_T C_T}$ 의 값을 갖는다. 여기서 L_T 는 상호 인덕턴스와 분산 인덕턴스의 합이며, C_T 는 분산 캐패시턴스와 가장자리 캐패시턴스의 합을 나타낸다.

그림 4-(c), (d)는 제안된 나선형 PBG 구조의 단위 셀 형태를 보여준다. 나선형 마이크로스트립 라인 형태를 나란히 연결할 경우, 마이크로스트립 라인 사이에서 커플링이 발생한다. 나선형 구조의 커플러는 개방형 루프 구조보다 더욱 크기를 줄이고 저지 대역폭과 대역저지 특성 면에서 성능을 향상 시킬 수 있다^[9-10]. 또한 개방형 루프 형태 내부에 나선형 구조를 적용함으로써 개방형 루프의 필터 특성을 극대화 할 수 있다. 결합된 PBG 구조들은 나선형 루프간의 간격 s만큼 분리되어지고, 선 두께 w, 길이 l, 개방형 루프의 개방된 공간의 폭 g에 의해 구현된 한 쌍의 동일한 개방형 루프에 의해 구현된다. 각각의 나선형 PBG 구조들은 개방된 공간 부분에서 최고치의 전계 강도를 갖고, 반대 부분에서 최고치의 자계 강도를 갖는 것으로 설명될 수 있다. 그림 4-(c)는 개방형 루프들 사이에서 발생하는 전계를 이용하기 위한 단위 셀이다. 그림 4-(d)는 개방형 루프들 사이에서 발생하는 자계를 이용하기 위한 단위 셀을 보여준다. 이 커플링 구조에서 두 개의 결합된 개방형 루프들의 결합 부분에서의 전계와 자계의 분포가 동시에 존재하기 때문에, 전계와 자계 모두 발생되고 강화될 수 있다. 이러한 커플링을 혼합 결합이라고 한다. 혼합 결합은 매우 높은 결합 효과를 얻을 수 있으며 등가 캐패시턴스 C 또한 매우 크다. 제안된 PBG 구조는 이러한 높은 캐패시턴스 때문에 낮은 주파수 대역에서

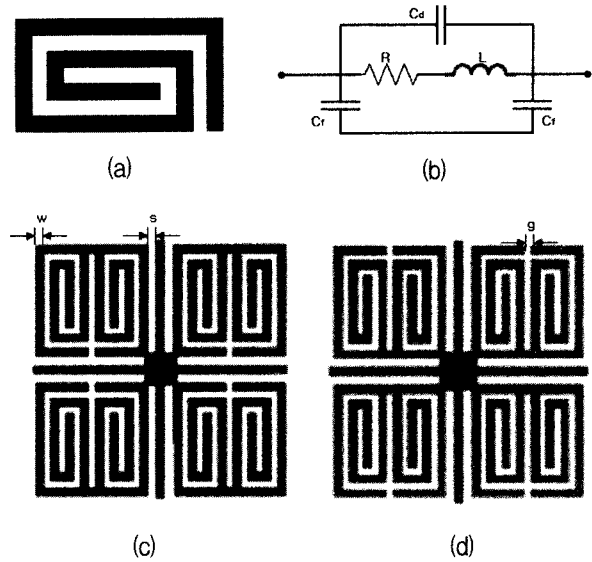


그림 4. (a) 나선형 마이크로스트립 라인, (b) 등가회로, (c) 제안된 나선형 PBG 구조의 단위 셀 타입 I, (d) 단위 셀 타입 II
 Fig. 4. (a) Spiral microstrip line, (b) equivalent circuit, (c) unit cell type I, (d) unit cell type II.

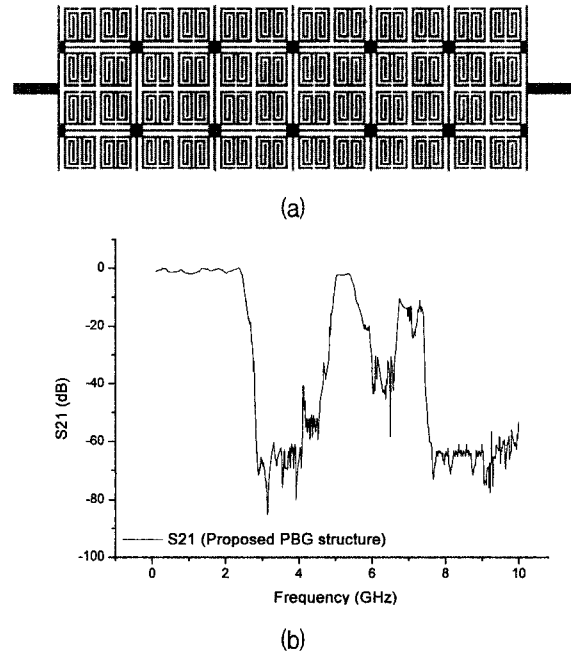


그림 5. (a) 제안된 나선형 PBG 구조의 시뮬레이션 모델, (b) 시뮬레이션 결과 S21
 Fig. 5. (a) Simulation model of the proposed spiral PBG structure, (b) simulated S21 parameter result.

크기를 줄이는데 이용될 수 있다. 나선형 PBG 구조는 주기성을 갖도록 두 가지 형태의 단위 셀을 2 × 6 격자로 번갈아 배치하였다. 새로운 PBG 구조의 특성을 확인하기 위해 Ansoft사의 상용 시뮬레이션 툴인 HFSS

를 이용하여 설계 하였으며, 시뮬레이션에 이용한 매개 변수들은 다음과 같다.

$$s = 0.3 \text{ mm}, w = 0.2 \text{ mm}, g = 0.2 \text{ mm}.$$

그림 5는 나선형 PBG 구조의 시뮬레이션 모델과 S-Parameter의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼, 2 GHz 이상의 주파수에서 대역 저지 특성이 나타난다. 나선형 PBG 구조는 2차 고조파(3.6GHz)에서 -67.7 dB의 저지특성을 보여 Class F 전력 증폭기 구현 시 출력 정합단 이후에 추가적으로 발생하는 2차 고조파를 효과적으로 억제시켜 증폭기의 효율을 향상시킬 수 있다. 기존에 발표된 다른 구조의 PBG들과 비교했을 때, 제안된 PBG 구조는 높은 저지 특성, 가파른 스퀘트 특성, 넓은 저지 대역폭의 개선된 특성들을 나타낸다. 그러므로 제안된 PBG 구조는 기존의 PBG 구조보다 동일한 특성에서 크기를 더 줄일 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 전력 증폭기의 효율을 더욱 향상시키기 위하여 class F 전력 증폭기의 출력 정합회로에 제안된 PBG 구조를 적용하였다.

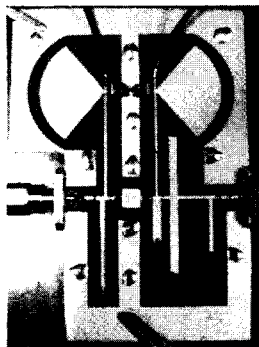
III. 제작 및 측정결과

1. 일반적인 Class F 전력 증폭기 제작

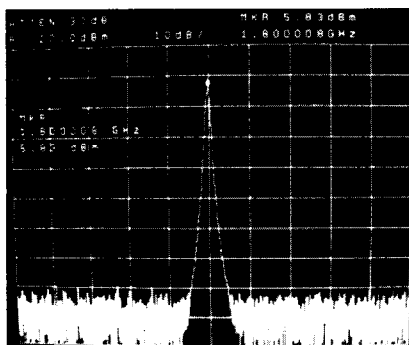
나선형 PBG 구조를 적용한 Class F 전력 증폭기의 효율 향상을 비교하기 위하여 일반적인 구조의 Class F 전력 증폭기를 제작하였다. 실험에 사용한 소자는 Freescale사의 4W급 LDMOSFET MRF281SR1을 사용하였고, 전도각이 180 °가 되도록 class B에 해당하는 바이어스 점을 잡았다. 제작에 사용된 기판은 유전율 3.2와 두께 31 mils를 갖는 Taconic TLC이다. 그림 6(a)는 성능 향상 비교를 위해 제작된 일반적인 Class F 전력 증폭기의 모습이며, CDMA 응용 대역(1.8 GHz)에서 구현된 일반적인 Class F 전력 증폭기는 측정결과 36.83 dBm의 출력 전력에서 69.34 %의 PAE를 보였다.

2. 나선형 PBG 구조의 제작

그림 7은 제안된 나선형 PBG 구조의 제작된 기판 모습과 측정된 S-parameter결과를 보여준다. 이 PBG 구조의 삽입 손실은 1.8 GHz의 통과 대역에서 -0.5 dB이며

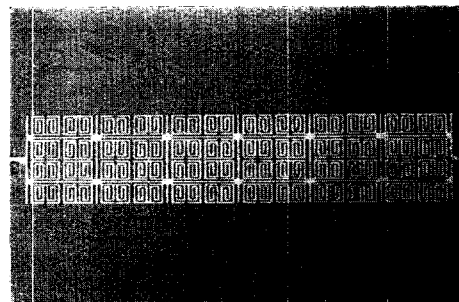


(a) 일반적인 Class F PA 제작 기판
(a) The fabrication of the conventional class F PA.

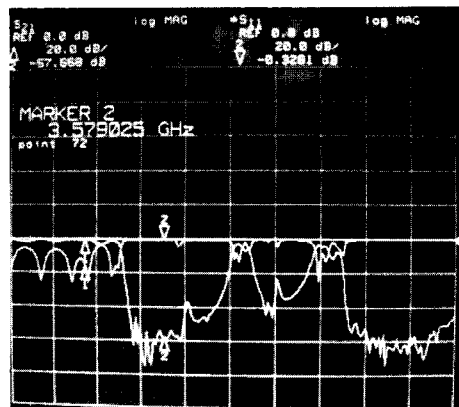


(b) 출력 파워
(b) output power.

그림 6. 일반적인 Class F PA의 구현
Fig. 6. Configuration of the conventional class F PA.



(a) 나선형 PBG 구조 제작 모습
(a) Fabricated photograph of the spiral PBG structure.



(b) 측정결과 S21, S11
(b) Measurement S21, S11 parameter results.

그림 7. 제안된 PBG 구조의 제작
Fig. 7. Configuration of the proposed PBG structure.

저지 특성은 3.6 GHz 대역에서 -57.67 dB를 보인다. 또한 제안된 PBG 구조의 저지 대역폭은 2.5 GHz ~ 5 GHz로 2.5 GHz이다. 나선형 PBG 구조는 기존의 PBG 구조들과 비교했을 때 44.6 mm 로 크기를 줄였을 뿐만 아니라 스킨트 특성과 저지 대역폭 등의 면에서도 크게 개선되었다. 또한, 이 구조는 7.5 GHz 이상의 주파수에서도 -60 dB 이하의 저지 특성을 갖는 저지 대역을 갖는다. 이러한 특성은 높은 차수의 고조파 성분들을 제거하여 효율향상에 기여한다.

3. 나선형 PBG 구조를 적용한 Class F 전력증폭기 제작

Class F 전력 증폭기의 효율을 높이기 위해서는 2차 고조파는 완전히 단락시키고, 3차 고조파에서는 개방되도록 고조파 조절 회로를 구현할 필요가 있다. 이 때 출력 정합회로를 통과한 고조파 성분을 확실히 단락시키기 위해서 증폭기의 출력 정합단에 나선형 PBG 구조를 적용하였다. 나선형 PBG 구조는 기존의 PBG 구조보다 더 높은 저지 특성과 가파른 스킨트 특성을 보인다. 따라서 이를 적용하였을 경우 추가적으로 발생하는 2차 고조파를 완전히 억제시켜서 Class F 전력 증폭기의 효율을 향상시킬 수 있다. 그림 8은 Class F 전력 증폭기의 효율 향상을 위해 제안한 나선형 PBG 구조를 출력 정합단에 적용한 Class F 전력 증폭기 제작 모습이다. 측정 결과 출력 전력은 37.5 dBm으로 나선형 PBG 구조의 적용 전 보다 0.7 dBm 향상되었으며, PAE는 73.62 %로 기존의 Class F 전력 증폭기와 비교했을 때 6.2 % 향상된 결과를 얻었다.

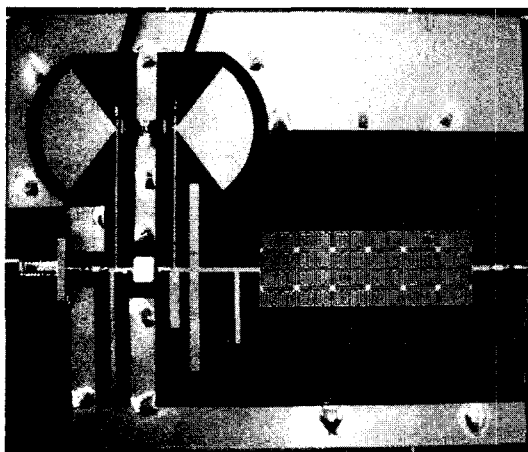
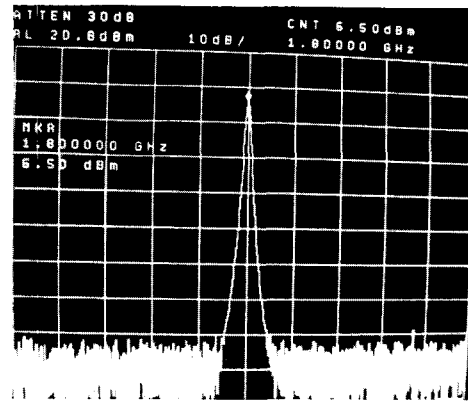
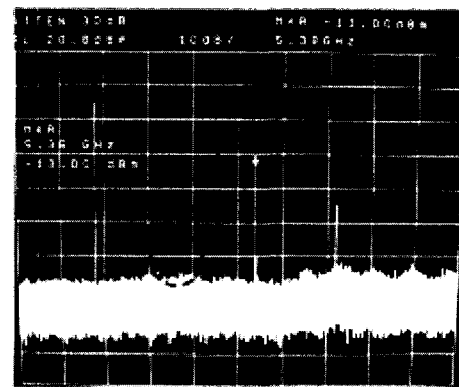


그림 8. 출력 정합단에 나선형 PBG 구조를 적용한 class F PA 제작 기관

Fig. 8. Fabricated photograph of the class F PA using the spiral PBG structure.



(a)



(b)

그림 9. 나선형 PBG를 적용한 Class F 전력증폭기 출력전력 측정결과

Fig. 9. Measured output power of calss F PA with the proposed PBG structure.

IV. 결 론

본 논문에서는 Class F 전력 증폭기의 효율을 향상시키기 위해 출력 정합단에 2차 고조파에서 뛰어난 저지특성을 보이는 새로운 구조의 PBG를 적용하였다. 제안된 PBG 구조는 비평면 제조 공정을 요구하지 않는 두 가지 형태의 단위 셀에 의해 번갈아 배열된 2 × 6 격자로 구성되었다. 나선형 PBG 구조의 크기는 44.6 mm이며, 2차 고조파에서 -57.67dB의 대역 저지 특성을 보여 일반적인 대역 저지 특성을 갖는 다른 구조들과 비교했을 때 높은 저지 특성, 가파른 스킨트 특성 등의 개선된 특성을 보이는 것을 확인하였다. 이를 Class F 전력 증폭기 구현 시 출력 정합단에 적용함으로써 출력 정합 회로 이후에 발생하는 고조파를 효과적으로 억제시켜 증폭기의 PAE를 약 4.3% 향상시킬 수 있었다.

참고 문헌

- [1] W. H. Doherty, "A new high efficiency power amplifier for modulated waves," Proc. IRE, vol. 24, no. 9, pp. 1163-1182, Sep. 1936.
- [2] Grebennikov, A. V., "Switched-mode tuned high-efficiency power amplifiers: historical aspect and future prospect", IEEE RFIC Symp., page 49-52, June 2002.
- [3] Grebennikov, A. V., "Circuit Design Technique for High Efficiency Class F Amplifier", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., vol. 2, page 771-774, June 2000. [
- [4] Y. Y. Woo, Y. Yang, and B. Kim, "Analysis and experiments for high-efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 54, no. 5, pp. 1969-1974, May 2006.
- [5] Y. Y. Woo, Y. Yang, and B. Kim, "Efficiency Comparison Between Highly Efficient Class-F and Inverse Class-F Power Amplifiers", IEEE Microwave magazine, June 2007.
- [6] H. C. Park, G. H. Ahn, S. C. Jung, C. S. Park, W. S. Nah, B. S. Kim, and Y. G. Yang, "High-Efficiency Class-F Amplifier Design In The Presence of Internal Parasitic Components of Transistors", Proceeding of the 36th European Microwave Conference, Sep. 2006.
- [7] T. S. Kim and C. H. Seo, "A Novel Photonic Bandgap Structure for Low-Pass Filter of Wide Stopband," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 10, no. 1, pp. 13-15, January 2000.
- [8] C. Y. Hang, "High Efficiency Power Amplifier with Novel PBG Ground Plane For Harmonic Tuning," IEEE Int'l, Symp., vol. 2, pp. 807-810, 1999.
- [9] J. Joubert, "Spiral microstrip resonators for narrow-stopband filters", IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., vol. 150, No. 6, December 2003.
- [10] Bao-qin Lin, Qiu-rong Zheng, and Nai-chang Yuan, "A Novel Planar PBG Structure for Size Reduction," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 16, no. 5, pp. 269-271, May 2006.

저자 소개

김 선 영(학생회원)
대한전자공학회 논문지
제45권 TC편 1호 참조

서 철 현(정회원)
대한전자공학회 논문지
제36권 TC편 6호 참조