

논문 2005-42TC-2-10

PBG 구조를 이용한 고선형성 Doherty 전력 증폭기 구현에 관한 연구

(Realization of High Linear Doherty Amplifier Using PBG)

이 상 만*, 서 철 현**

(Sangman Lee and Chulhun Seo)

요 약

본 논문에서는 PBG 구조를 이용하여 Doherty 증폭기의 선형성을 개선하였다. PBG 구조를 출력 정합회로에 구현하였으며, Doherty 증폭기의 효율 뿐 아니라 선형성을 개선 할 수 있었다. 제안된 PBG 구조를 이용한 Doherty 증폭기는 PAE 36.4%, IMD -24.5 dBc 였으며, IMD 측면에서 3 dBc, PAE 측면에서 약 3% 정도 개선되었다.

Abstract

In this paper, the high linear Doherty amplifier has been realized by employing the PBG(Photonic Band Gap) structure. The PBG structure has been employed on the output matching network of the power amplifier. The proposed Doherty amplifier has been improved in PAE and IMD. The PAE has been 36.4% and the IMD has been -24.5 dBc, respectively.

Keywords : Power Amplifier, Doherty Amplifier, Efficiency, Linearity, PAE

I. 서 론

최근 몇 년간 CDMA와 같은 이동통신 시스템의 급격한 보급에 의해 무선통신 고출력 증폭기의 중요성이 새로이 부각되고 있으며 앞으로는 새로운 이동통신 환경에 적합한 고출력, 고효율을 가지는 전력증폭기가 급격히 보급되리라 예상된다. 따라서 이러한 요구에 부응하기 위해 차세대 무선통신 환경에 적합한 새로운 고출력, 고효율 전력증폭기 연구가 요구되고 있다^{1, 2)}.

현재 전력증폭기는 기지국용의 경우 10%, 단말기의 경우 30%의 효율을 넘어서기 힘들 정도로 이동통신 부품중 전력소비가 가장 큰 부품이다. 또한 전력증폭기 비선형 특성은 무선통신 환경 비선형 특성의 대부분을 차지해서 광대역, 다중가입자 전송시 전송 품질 저하의

원인이 되고 있다. 결국 전력증폭기의 전력효율과 비선형 특성을 개선하는 것은 차세대 이동통신 전력증폭기 연구에 직결되는 요인이다. 기존의 전력증폭기의 선형성 해결 방법으로는 feedforward, predistortion, back-off, PBG가 있다. 이 중 feedforward, predistortion 방식은 회로가 복잡해지고, 추가적인 소자를 사용해야 한다는 단점이 있고, backoff 방식은 증폭기의 최대 출력을 사용할 수 없어 그만큼의 성능을 낼 수 없다는 단점이 있다. 따라서 PBG를 이용한 선형화기법이 필요하다. 일반적으로 Doherty 증폭기는 임피던스 인버터와 입력 전력에 따라 동작이 제어되는 보조 증폭기로 이루어진다. 즉 Doherty 증폭기는 전력증폭기 낮은 입력에서의 낮은 전력효율 측면을 보완하기 위해 각기 다른 클래스의 두 증폭기를 사용하여 출력 부하를 변화시키는 부하 변조기술을 사용한다. 이러한이유로 Doherty 증폭기는 각기 다른 클래스의 두 증폭기를 사용하는데 주 증폭기를 A급 또는 AB 급으로 설계하면 보조 증폭기는 하나는 B급 또는 C급 증폭기를 사용한다. B급 또는 C급 증폭기의 경우 선형성이 작은 문제점을 갖고 있고, 이러한 증폭기의 사용으로 인해 많은 고조파 및

* 학생회원, ** 정회원, 송실대학교 정보통신공학부
(School of Electronic Engineering Soongsil University)

※ 이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음. (KRF-2001-041-E00227)

접수일자: 2005년1월25일, 수정완료일: 2005년2월12일

IMD가 발생한다. B급 또는 C급 증폭기의 경우 입력신호가 클때 동작을 하게 되고, 전체적으로 보면 입력신호가 커지면 선형성 측면에 문제가 발생하게 된다. 즉 전력효율개선의 장점이 있는 반면 선형성 문제를 갖게 될 수 있다^{3 6)}.

본 논문에서는 PBG 구조를 Doherty 증폭기의 출력 정합회로에 구현함으로써 무선통신 고출력 증폭기의 전력효율 및 비선형 특성 문제를 동시에 해결할 수 있었으며 RF 고출력 증폭기의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 가능성을 보여주었다.

II. PBG를 이용한 Doherty 증폭기의 설계

PBG란 유전율이 서로 다른 물질들이 주기적인 일정 형태로 격자 구조를 형성하여 특정 주파수대역의 전자파가 진행하지 못하는 현상을 이용한 것이다. 주기적인 유전체는 자유 광자상태의 감소를 제거하도록 유도하며, 광자의 에너지 제한 대역을 형성한다^{7 8)}.

PBG구조의 기판을 사용하면 주파수가 올라감에 따라 평면형 기판을 이용한 RF 부품들에 나타나는 문제점들중 안테나의 협대역의 밴드폭 및 낮은 이득, Surface Wave 손실, 고출력 증폭기(HPA, LPA)의 선형화문제, 필터의 하모닉 성분을 해결할 수 있으며 광대역 특성, 고이득 특성, 고효율 등 뛰어난 특성을 지닌 RF 부품을 설계할 수 있다. 특히 Doherty 증폭기에서는 출력 단에서 PBG구조를 사용함으로써 증폭기 내부구조의 변화 없이 출력 전력효율 및 IMD를 더욱 향상시킬 수 있는 특성을 지닐 수 있다. 따라서 전력효율 및 저왜곡성에 있어 기존의 고출력 증폭기에 비해 물리적으로 월등한 장점을 갖기 때문에 PBG 구조를 이용한 Doherty 증폭기는 기존 기술의 한계를 극복하여 정보전송 대역폭과 품질을 획기적으로 증대시킬 수 있는 기술이다^{9 10)}.

Doherty 증폭기의 중심주파수가 1.8GHz이고 이에 해당하는 2차 고조파는 3.6 GHz이다. 따라서 3.6 GHz 대역을 저지시킬 수 있는 PBG를 설계 하였다. 일반적으로 PBG의 셀 크기는 저지대역 주파수의 $\lambda/4$ 가 된다.

시뮬레이션 결과 통과대역인 1.8 GHz에서의 삽입손실은 0.03 dB, 저지대역인 3.6 GHz에서 37 dB의 저지특성을 갖는 PBG를 설계하였다.

본 연구에 사용된 소자는 Motorola사의 MRF-281ZR1, 유전율 3.2의 테프론 기판을 사용하였다. Loadpull 시뮬레이션을 통하여 출력 정합점을 찾고 그



그림 1. PBG 구조
Fig. 1. Configuration of PBG.

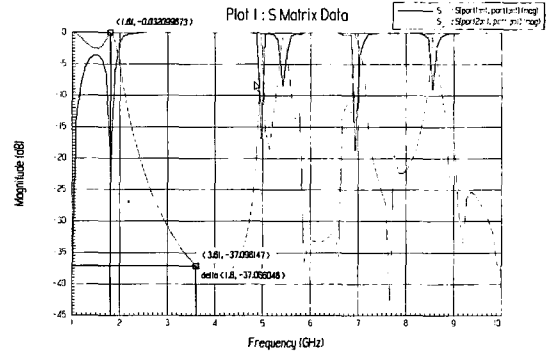


그림 2. PBG 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulated result of PBG.

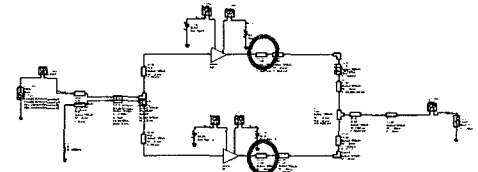


그림 3. Doherty 증폭기 설계(PBG적용 전)
Fig. 3. Design of Doherty Amplifier.

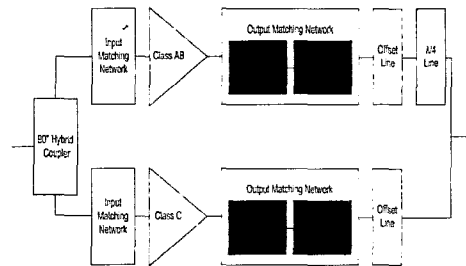


그림 4. 제안된 PBG가 적용된 고선형성 Doherty 전력 증폭기의 구조
Fig. 4. Proposed configuration of Doherty Amplifier using PBG.

에 따른 출력 정합을 하여 증폭기를 설계하였다.

이 증폭기들을 사용하여 Doherty 증폭기를 구현하였다. 증폭기 뒤에 offset line을 추가하여 각 증폭기의 임피던스를 높여주었다.

차세대 이동통신 시스템의 획기적인 연구를 위하여 새로운 개념의 고출력 증폭기 연구의 필요성이 증대하고 있으며 전 세계적으로 무선통신 환경에서 고출력 증폭기의 연구가 경쟁적으로 진행되고 있다. 이러한 고출력 전력증폭기 개발을 위해 여러 가지 가능성이 제안되

었으나 그 중 PBG를 이용한 Doherty 증폭기가 알맞은 구조이다.

그림 5는 각 증폭기에 PBG를 적용한 것으로 PBG를 사용함으로써 기존의 Doherty 증폭기가 갖고 있는 선형성 문제를 해결하는 것이다. 전력증폭기 Loadpull 정합점을 찾아 출력정합회로를 구현할 때, PBG를 포함하여 출력정합회로를 구현 한 것이다. 이와 같은 방식으로 PBG를 적용하여 최종적인 PBG를 적용한 Doherty 증폭기를 설계하였다.

III. PBG를 이용한 Doherty 증폭기의 제작

앞서 설계한 PBG를 제작하여 3.6 GHz 대역을 저지

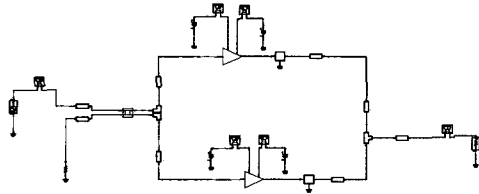
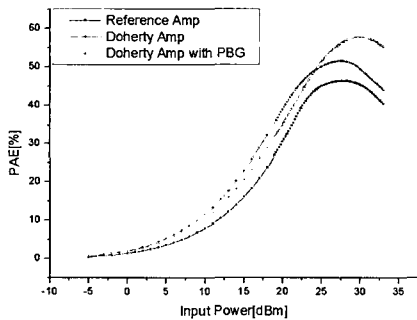
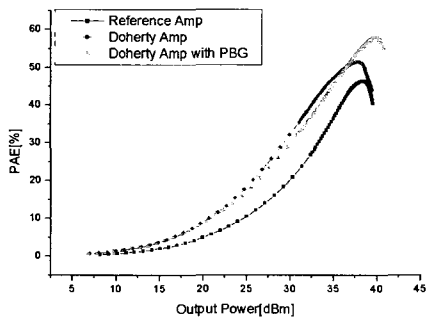


그림 5. PBG적용한 Doherty 증폭기 설계
Fig. 5. Design of Doherty Amplifier usign PBG.



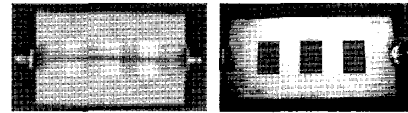
(a) 입력 전력에 대한 PAE 시뮬레이션 결과



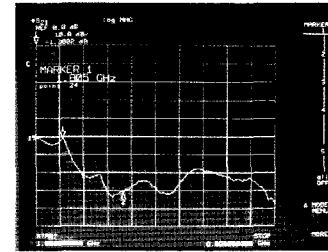
(b) 출력 전력에 대한 PAE 시뮬레이션 결과

그림 6. (a) 입력 전력에 대한 PAE 시뮬레이션 결과
Fig. 6. (a) Input power vs. PAE(Simulated).
(b) output power vs. PAE(Simulated).

하는 PBG를 구현하였다. 통과대역인 1.8 GHz 대역에서 1.3 dB의 손실이 있고, 3.6 GHz 대역에서 30 dB 이상의 대역 저지 특성을 얻을 수 있었다.



(a) PBG 윗면 (b) PBG 아랫면



(c) PBG 측정 결과

그림 7. (a)PBG 윗면 (b)PBG 아랫면 (c)PBG 측정 결과
Fig. 7. (a) Top of PBG (b) Bottom of PBG
(c) Measured Data of PBG.

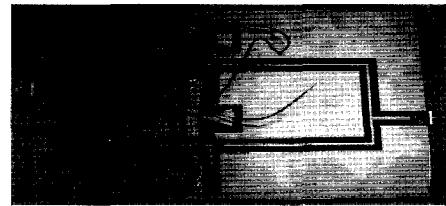
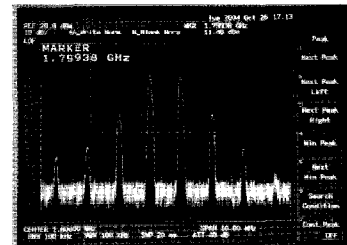


그림 8. 실제 제작한 Doherty 증폭기
Fig. 8. Realization of Doherty Amplifier.

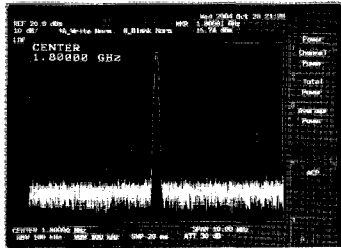


(a) 기준 증폭기 1-톤 측정결과

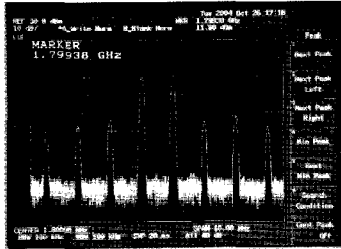


(b) 기준 증폭기 2-톤 측정결과

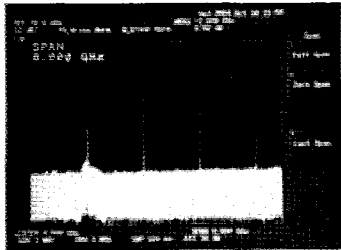
그림 9. (a) Reference 증폭기 1-톤 측정결과
Fig. 9. (a) Measured 1-tone test data of reference amplifier
(b) Reference 증폭기 2-톤 측정결과
(b) Measured 2-tone test data of reference amplifier.



(a) Doherty 증폭기 1-톤 측정결과



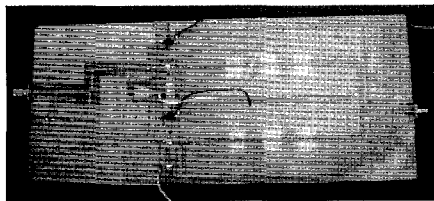
(b) Doherty 증폭기 2-톤 측정결과



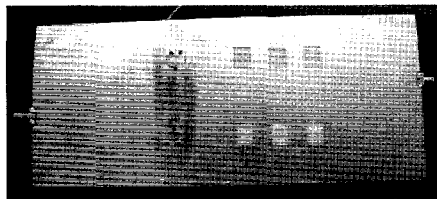
(c) Doherty 증폭기 고조파 측정결과

그림 10. (a) Doherty 증폭기 1-톤 측정결과 (b) Doherty 증폭기 2-톤 측정결과 (c) Doherty 증폭기 고조파 측정결과

Fig. 10. (a) Measured 1-tone test data of Doherty amplifier (b) Measured 2-tone test data of Doherty amplifier (c) Measured harmonics of Doherty amplifier.

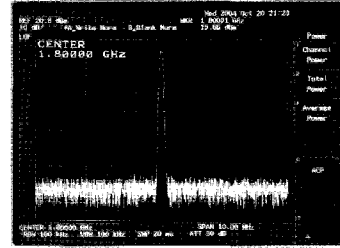


(a) PBG를 적용한 Doherty 증폭기의 윗면

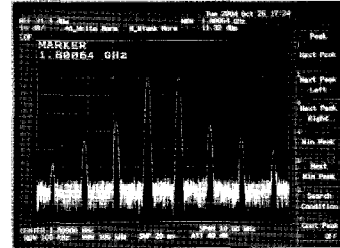


(b) PBG를 적용한 Doherty 증폭기의 아랫면

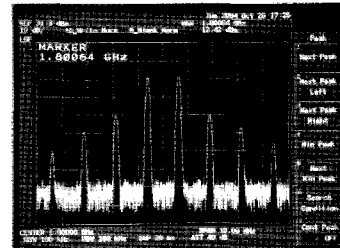
그림 11. (a) PBG를 적용한 Doherty 증폭기의 윗면 (b) PBG를 적용한 Doherty 증폭기의 아랫면
Fig. 11. (a) Top of Realized Doherty Amplifier using PBG (b) Bottom of Realized Doherty Amplifier using PBGHomepage of KEES.



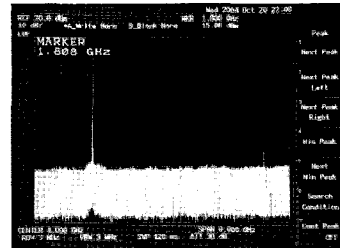
(a) PBG를 적용한 Doherty 증폭기 1-톤 측정결과



(b) PBG를 적용한 Doherty 증폭기 2-톤 측정결과 (동일 출력 전력)



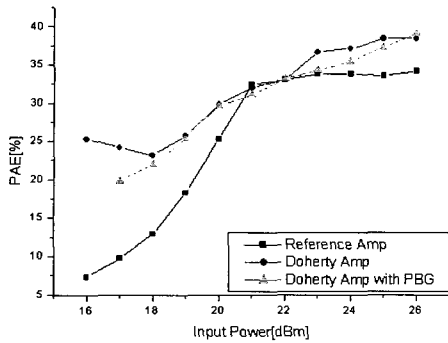
(c) PBG를 적용한 Doherty 증폭기 2-톤 측정결과 (동일 IMD)



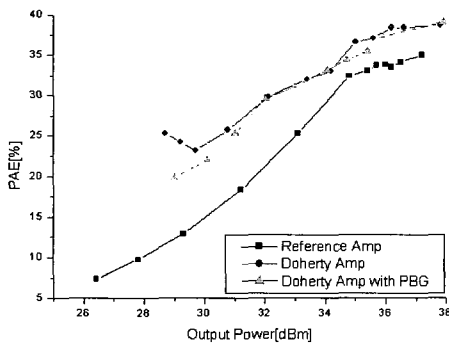
(d) PBG를 적용한 Doherty 증폭기 고조파 측정결과

그림 12. (a) PBG를 적용한 Doherty 증폭기 1-톤 측정결과 (b) PBG를 적용한 Doherty 증폭기 2-톤 측정결과(동일 출력 전력) (c) PBG를 적용한 Doherty 증폭기 2-톤 측정결과(동일 IMD) (d) PBG를 적용한 Doherty 증폭기 고조파 측정결과

Fig. 12. (a) Measured 1-tone test data of Doherty amplifier using PBG (b) Measured 2-tone test data of Doherty amplifier using PBG(same output power) (c) Measured 2-tone test data of Doherty amplifier using PBG(same IMD) (d) Measured harmonics of Doherty amplifier using PBG.



(a) 입력 전력에 대한 PAE 측정 결과



(b) 출력 전력에 대한 PAE 측정 결과

그림 13. (a) 입력 전력에 대한 PAE 측정 결과
(b) 출력 전력에 대한 PAE 측정 결과
Fig. 13. (a) Input power vs. PAE(Measured).
(b) output power vs. PAE(Measured).

그림 9는 기준 증폭기의 1-톤, 2-톤 측정결과로 V_{gs} 를 4.03V로 동일하게 인가하였다. 1-톤 실험에서 22dBm의 입력에서 35.39 dBm의 출력을 나타내었고, 2-톤 실험에서는 31.4 dBm/tones의 출력을 그리고 24.7 dBc의 IMD를 나타내었다.

그림 10은 Doherty 증폭기의 측정 결과로 앞서 제작한 그림 8의 증폭기에 V_{gs} 를 각각 4.04 V, 1.8 V를 인가하였다. 1-톤 실험에서 22 dBm의 입력에서 35.39 dBm의 출력을 나타내었고, 2-톤 실험에서는 31.5 dBm/tones의 출력을 그리고 21.4 dBc의 IMD를 나타내었다.

그림 12는 PBG를 적용한 Doherty 증폭기의 측정 결과로 V_{gs} 를 각각 4.04V, 1.8V를 인가하였다. 1-톤 실험에서 22 dBm의 입력에서 35.66 dBm의 출력을 나타내었고, 2-톤 실험은 두 가지 경우에 대해 수행하였다. 첫 번째 실험은 동일한 출력전력에 대한 IMD 개선을 확인하기 위한 실험이고, 두 번째 실험은 동일한 IMD에 대한 출력전력을 통해 효율 개선을 확인하기 위한 실험이다. 첫 번째 실험을 통해 31.3 dBm/tones에서의 IMD는

표 1. 각 증폭기에 대한 효율 측정 결과 비교

Table 1. PAE summary of the measured data.

		Reference Amp	Doherty Amp	Doherty Amp with PBG
PAE	High output Power	31.7% @31.4dBm /tone	33% @31.5dBm /tone	33.1% @31.3dBm /tone 36.4% @32.42dBm /tone
	Low output Power	12.9% @26.3dBm /tone	23.2% @26.7dBm /tone	22% @26.6dBm /tone

표 2. 각 증폭기에 대한 IMD 측정 결과 비교

Table 2. IMD summary of the measured data.

		Doherty Amp	Doherty Amp with PBG
Output Power (1tone)		35.74dBm	35.66dBm
IMD		21.4dBc @31.5dBm /tone	24.5dBc @31.3dBm /tone 21.4dBc @32.42dBm /tone

표 3. 실물 제작 측정 결과

Table 3. Measured Results of a Manufacture.

	PBG 적용 안함	PBG 적용
발진 주파수(GHz)	2.38	2.36
출력 전력(dBm)	3.84	7.09
위상 잡음(dBc/Hz)	-81.06 @100kHz	-91.8 @100kHz

24.5 dBc로 약 3 dBc 개선된 것을 확인할 수 있었다. 두 번째 실험에서는 IMD를 약 21.4 dBc로 고정하여 출력 전력을 측정하였다. 이때 32.42 dBm/tones의 출력으로 약 3.3%의 효율이 개선된 것을 확인할 수 있었다.

그림 13은 측정 결과를 바탕으로 얻어진 입출력 전력에 대한 효율 그래프이다. [표 1]은 측정 결과에 대한 비교를 보여준다.

마지막으로 [표 3]는 실물 제작된 PBG를 적용했을 때 측정된 결과를 나타내고 있다. 결과에서 보는바와 같이 발진 주파수에 약간의 차이가 있었으나 우리가 염두에 두었던 위상잡음 성능이 약 10 dBc정도 개선되었다.

IV. 결 론

본 논문은 공진부에 PBG 적용하여 모의실험 및 실

제 제작하여 발진기에서의 위상잡음 성능을 향상시킨 결과를 보여주고 있다. PBG를 적용하지 않은 발진기와 적용한 발진기의 위상잡음 특성을 비교 했을 때, 10 dBc의 위상잡음 성능 향상을 얻었다.

이것은 마이크로 스트립 라인만으로 공진기를 만들었을 때와 PBG까지 적용하여 만든 공진기를 비교해 볼 때 PBG를 적용한 공진기가 마이크로스트립 라인 공진기의 낮은 Quality factor를 개선한 것이라고 말할 수 있다.

또, PBG와는 다른 구조로 알려져 있지만 저역 통과 여파 특성과 저지 대역 특성이 비슷한 Defected Ground Structure(DGS)를 적용하여 발진기의 위상잡음을 향상시킨 경우와 마찬가지로 PBG를 적용함으로써 위상잡음에 대한 특성을 향상시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, 1999.
- [2] Steve C. Cripps *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Artech House, 2002.
- [3] W. H. Doherty, "A New High Efficiency Power Amplifier for Modulated Waves." *Proceeding of the IRE*, Vol. 24, No. 9, pp.1163-1182, 1936.
- [4] Upton, David M., and Maloney, Peter R, et al, "A Microwave Doherty Amplifier," *Applied Microwaves and RF*, Winter 1994.
- [5] F. H. Raab, "Efficiency of Doherty RF power amplifier systems." *IEEE transactions on Broadcasting*, Vol, BC-33, No. 3, September 1987.
- [6] 정형태, 김성욱, 장익수, "발륜을 이용한 푸쉬풀 구조의 도허티 증폭기 설계" *대한전자공학회 논문지 제 41권 TC 제 4호* 247-253, 2004년 4월.
- [7] V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioliand, T. Itoh, "Novel 2-D Photonic Bandgap Structure for Microstrip Lines," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 69-71, 1998.
- [8] I. Rumsey, P. M. Melinda and P. K. Kelly, "Photonic Bandgap Structures Used as Filters in Microstrip Circuits," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, pp. 336-338, 1998.
- [9] V. Radisic, Y. Qian and T. Itoh, "Broadband power amplifier using dielectric photonic bandgap structure," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, pp. 13-14, 1998.
- [10] Taesun Kim, and Chulhun Seo, "A Novel Photonic Bandgap Structure for Lowpass Filter of Wide Stopband," *IEEE Microwave Guided wave Lett.*, January, 2000. Amplifier for Modulated Waves." *Proceeding of the IRE*, Vol. 24, No. 9,

저 자 소 개



이 상 만(학생회원)
2003년 2월 숭실대학교 정보통신
전자공학부(공학사)
2003년 3월~현재 숭실대학교
정보통신공학과 석사과정
<주관심분야 : 초고주파 회로설
계, RF power Amplifier 등>

서 철 현(정회원)

대한전자공학회논문지 vol. 31, no. 6 참조