

고온초전도체를 이용한 마이크로파 전력분배기의 소형화 개발

논문
58P-3-16

Miniaturized Development of Microwave Power Divider Using High-T_c Superconductors

정 동 철[†] · 유 병 화* · 곽 민 환** · 강 광 용*** · 한 병 성[§]

(Dong-Chul Chung · Byung-Hwa Yoo · Min-Hwan Kwak · Gwang-Yong Kang · Byoung-Sung Han)

Abstract - In this paper, We report the miniaturization of superconducting microwave power dividers based on lumped element equivalent circuits. To do this, we analyzed a conventional branch-type power divider by using an ABCD matrix under even and odd mode excitation. Then, we calculated each lumped element impedance throughout this analysis of a transmission line matrix. Also we simulated our equivalent circuits made of lumped elements by using a full wave analysis, *em* Sonnet. Our design of microwave power divider based on simulated results was fabricated on high-T_c superconducting thin films deposited on MgO substrate. Experimental results were reported in terms of bandwidth, center frequency, and phase difference between S₂₁ and S₃₁. We confirm that our design will be useful in the future microwave power system.

Key Words : Power Divider, Superconductor, Phase Difference, Bandwidth, ABCD Matrix

1. 서 론

액체질소 비등점 이상에서 초전도성을 나타내는 고온초전도체가 발견된 이래, 많은 연구자들은 임계온도 하에서 초전도체 고유의 '0' 저항 특성을 전기, 전자 공학 분야 소자에 응용하기 위한 다양한 접근 방법을 시도하였다. 이러한 노력의 결과로 대전력 분야에서 고온초전도 한류기, 고온초전도 전력케이블, 각종 초전도 발전기 전동기 등이 개발된 것이 그 예이며 또 다른 한편으로 전자공학 분야 중, 주파수가 증가할수록 표면 저항에 의한 손실이 급격히 증가하는 마이크로파 대역에서의 초전도 안테나, 대역 통과필터 등이 개발된 것이 그 예라고 할 수 있다[1]-[3].

더불어 초전도체 고유의 '0' 저항 특성을 응용한 예는 각종 전자파 수동 소자의 소형화를 들 수 있다. 물론, 일반 전도체를 이용한 전자파 수동 소자의 소형화 연구가 부재한 것은 아니다. 그러나 구리 등의 상전도체를 이용한 전자파 수동 소자 설계의 경우 주파수가 마이크로파 대역이나 밀리미터파 대역으로 상승할 경우, 급격한 표면 저항의 증가로 인해 소자의 이득이 현저히 떨어지는 경향을 보여준다. 이러한 경향은 전자파 수동 소자의 소형화로 인한 소자 내의 전로 폭의 감소에 기인하는 것이다. 따라서 마이크로파 대역에서 일반 전도체를 이용한 수동 소자 설계는 거의 불가능에 가깝다고 볼 수 있다. 초전도체

를 이용한 수동 소자의 소형화 시도는 비록 주파수 대역이 마이크로파 대역이나 밀리미터파 대역으로 상승한다할 지라도 표면 저항의 발생이 상대적으로 미미한 초전도체의 특성을 이용하는 것이다. 이미 안테나와 대역통과 필터 분야에서 수동소자의 소형화는 어느 정도 진전을 이루고 있다 [4].

이 논문에서 제시하고자 하는 마이크로파 전력 분배기의 경우, 현재까지 소형화에 대한 연구가 매우 미미한 형편이다. 따라서 저자들은 기존의 분포정수형 전력 분배기를 분석하고 이를 바탕으로 집중정수회로를 이용한 고온초전도 전력 분배기의 설계를 제시하고자 할 예정이다 [5]. 또한 설계된 등가회로를 바탕으로 고온초전도체를 이용한 소형화된 집중정수형 마이크로파 대역 전력 분배기를 제작 특성 실험을 통해 그 결과를 분석, 제시할 것이다.

2. 브랜치형 전력분배기를 이용한 집중정수 등가회로의 도출

분포정수회로에 기반을 둔 일반적인 브랜치형 전력 분배기는 그림 1과 같은 형태를 취하고 있다. 이때 port 1이 입력 port 이고 port 2와 port 3가 출력 port, port 4가 분리 port 역할을

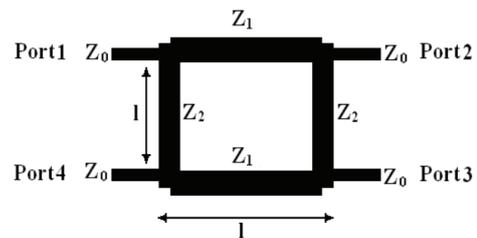


그림 1 일반적인 브랜치형 전력분배기
Fig. 1 Conventional branch-type power divider

* 준 회 원 : 우석대학교 전기공학과 석사과정
** 정 회 원 : 전자통신연구원 테라전자팀 선임연구원 · 공박
*** 정 회 원 : 전자통신연구원 테라전자팀 책임연구원 · 이박
§ 펠로우회원 : 전북대학교 전기공학과 교수 · 공박
† 교신저자 정회원 : 우석대학교 전기전자공학과 교수 · 공박
E-mail : dchung@woosuk.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 10일
최종완료 : 2009년 5월 25일

담당하게 되며 선로의 길이 1은 동작주파수의 1/4 파장의 크기를 갖는다. 이러한 브랜치형 전력분배기로부터 집중정수 등가회로를 도출하기 위해서는 우수모드와 기수 모드의 해석이 필요하며 이에 필요한 등가회로를 그림 2에 제시하였다 [6].

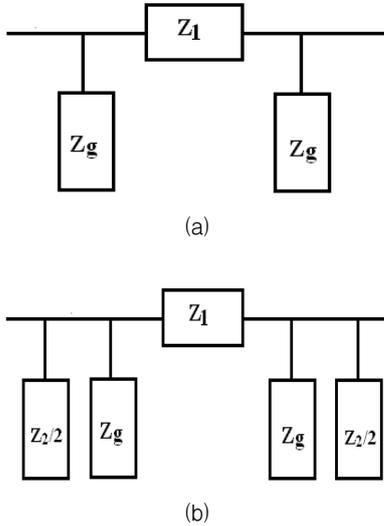


그림 2 branch형 전력분배기의 등가회로
 (a) 우수모드 등가회로 (b) 기수모드 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuits of branch-type power dividers
 (a) equivalent circuits for even mode
 (b) equivalent circuits for odd mode

이로부터 ABCD 행렬을 각자 모드에 대하여 구하면 우수모드는 (1) 식과 같이 전개할 수 있으며

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_g & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z_g \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_g & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_g} & Z_1 \\ \frac{2 + Z_1}{Z_g} & 1 + \frac{Z_1}{Z_g} \end{bmatrix} \quad (1)$$

기수 모드는(2)식과 같이 전개할 수 있다

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_p & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z_p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_p & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_p} & Z_1 \\ \frac{2 + Z_1}{Z_p} & 1 + \frac{Z_1}{Z_p} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 Z_1 과 Z_2 는 선로상의 임피던스, Z_g 는 선로와 접지면 간의 임피던스, Z_p 는 Z_g 와 $Z_2/2$ 의 평행 등가 임피던스다. 이상적인 전력분배기에 대하여 우수모드와 기수모드의 반사계수 $\Gamma_e = \Gamma_o = 0$ 이고 이때 $B/Z_o = Z_o C$ 이므로,

$$Z_o^2 = \frac{B_e}{C_e} = \frac{Z_1 Z_g^2}{2Z_g + Z_1} \Rightarrow Z_1 = \frac{2Z_o^2 Z_g}{Z_g^2 - Z_o^2} \quad (3)$$

여기서 투과 계수는

$$T_e = \frac{1}{A_e + \frac{B_e}{Z_g}} = \frac{1}{1 + \frac{Z_1}{Z_g} + \frac{Z_1}{Z_o}} \quad (4)$$

이며 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$Z_g^2 (T_e - 1) + Z_g(2T_e Z_o) + (2T_e Z_o^2 + Z_o^2 - T_e Z_o^2) = 0 \quad (5)$$

방정식 (4)와 (5)으로부터 Z_1 과 Z_g 값을 얻을 수 있다. 또 다른 임피던스 Z_2 를 얻기 위해 기수 모드 해석으로부터 (7) 식과 (8)식을 얻을 수 있다.

$$Z_o^2 = \frac{B_o}{C_o} = \frac{Z_1}{\frac{2}{Z_p} + \frac{Z_1}{Z_p^2}} \Rightarrow (-Z_1)Z_p^2 + (2Z_o^2)Z_p + Z_1 Z_o^2 = 0 \quad (6)$$

$$Z_2 = \frac{2Z_p Z_g}{Z_g - Z_p} \quad (7)$$

이때, 동작 주파수를 이 논문에서 설계하고자 하는 410 MHz로 하고 Z_1 을 유도용량, Z_2 를 정전용량으로 설정하고, Z_g 를 접지면에 대한 정전용량으로 설정하면 3 dB 결합에서 $k_c = k_t = 0.707$ 이고 이에 대한 방정식은 각각 (8)식과 같다.

$$T_e = -0.707 - 0.707j \quad , \quad T_o = 0.707 - 0.707j \quad (8)$$

방정식 (5)으로부터 $Z_g = -120.9j$ 이므로 접지면에 대한 정전용량은 아래 (9)식으로 주어진다.

$$C_g = \frac{1}{j\omega \cdot Z_g} = 3.23 \text{ pF} \quad (9)$$

방정식 (3)으로부터 $Z_g = 35.3j$ 를 얻을 수 있으며 이 식은 다음과 같은 유도용량 값으로 변환할 수 있다

$$L_1 = \frac{Z_1}{j\omega} = 13.82 \text{ nH} \quad (10)$$

동일한 방식으로 방정식 (7)로부터 $Z_2 = -49.9j$ 를 얻을 수 있으며 정전용량으로 환산할 경우 7.82 [pF]이 된다.

3. 집중정수 등가회로 모델링을 이용한 전력분배기 설계

그림 3에 브랜치형 전력분배기의 우수모드와 기수모드 해석을 통해 도출된 집중정수형 등가회로를 제시하였다. 이때, 회로에 상층과 하층부의 3.23 [pF]의 정전용량은 접지면과 기판 사이의 병렬 정전 용량을 표시한 것이며 동시에 13.82 [nH]와 7.82 [pF]으로 이루어진 유도용량과 정전용량은 접지면에 대하여 직렬인 임피던스를 의미한다. 또한 4개의 입출력 포트들은 50 옴의 특성저항이 연결되었다고 가정하였다.

그림 4에 마이크로스트립 선로 형태로 설계된 집중정수형 초전도 마이크로파 전력분배기의 모의 실험결과를 제시하였다. 컴퓨터 모의실험은 모멘트법에 기반을 둔 전자장 해석 상용 프로그램인 *em* Sonnet을 사용하여 실시하였다. 그림 4의 (a)에 제시된 통과특성은 400 MHz에서 420 MHz까지 양호한 반전력 (3 dB) 통과 특성을 보여준다. 또한 반사손실을 나타내는 S11값과 S14 값은 -25 dB 매우 적절한 특성을 나타내고 있다. 이러한 결과는 입력 port로 유입되는 전력의

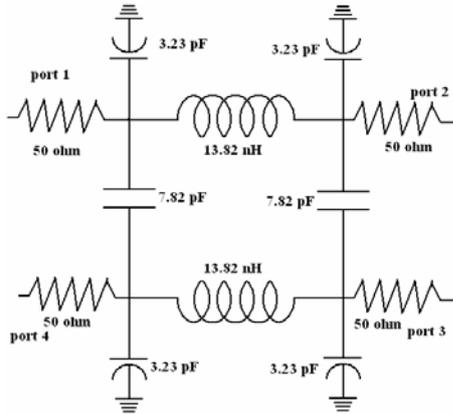
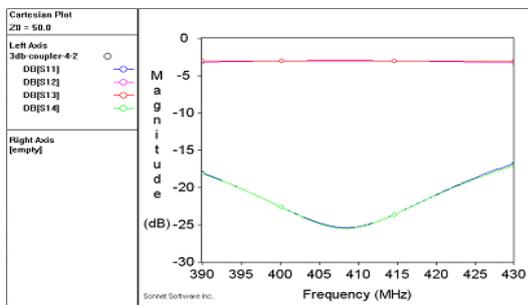
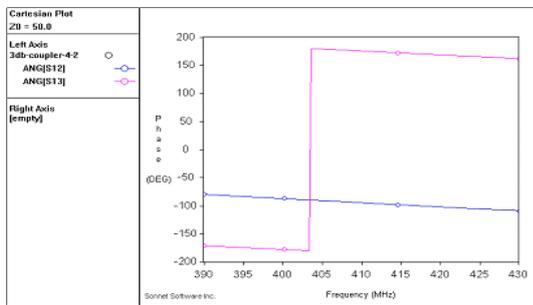


그림 3 전력분배기 집중정수형 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuits of lumped elements for power dividers



(a)



(b)

그림 4 전자장 해석을 이용한 소형화된 집중정수형 초전도 전력분배기의 모의실험 결과

(a) s 파라미터 특성 (b) 위상 특성

Fig. 4 Simulated results of miniaturized lumped element-type superconducting power dividers using a full wave analysis

(a) S-parameter characteristics
(b) phase characteristics

임피던스 결합이 이상적으로 이루어져 있으며 최대전력 전달조건을 만족하는 증거라고 할 수 있다. 더불어 통과 특성을 나타내는 S12 값과 S13 값도 제시된 20 MHz의 대역폭 내에서 0.3 dB의 오차를 보여주고 있어 매우 훌륭한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그림 4의 (b)에 제시된 위상 특성으로부터 우리는 손쉽게 통과대역인 400 MHz에서 420

MHz에 걸쳐 S12 값과 S13 값이 근사적으로 90°의 위상차를 보여주고 있으며 두 파라미터 간의 위상차는 통과 대역 내에서 ± 0.5° 이상의 위상차를 벗어나지 않고 있음을 확인할 수 있다.

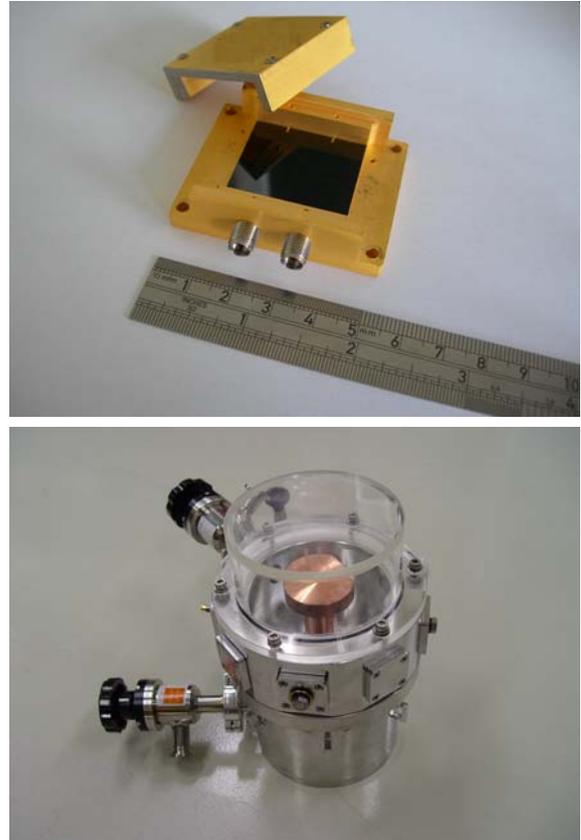
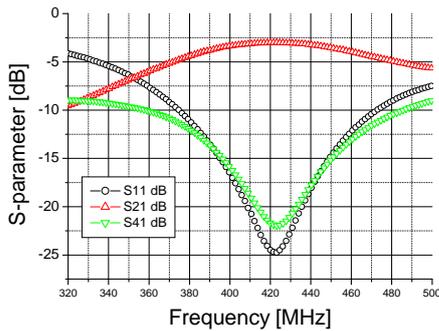


그림 5 제작된 전력분배기와 냉각 시스템 사진
Fig. 5 Photograph of constructed power dividers and a cryostat

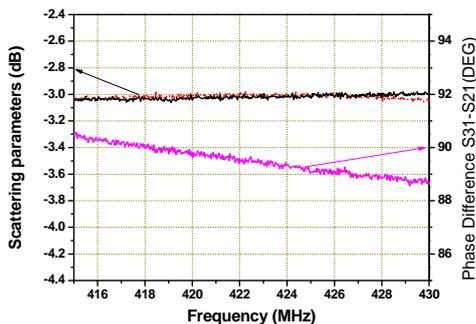
이상과 같이 컴퓨터 모의실험된 결과를 바탕으로 설계된 layout을 바탕으로 초전도 박막을 이용하여 전력 분배기를 제작하였다. 제작에 사용된 초전도체는 독일 Theva사에서 제작된 두께 0.5 mm 직경 2.54 cm의 MgO 기판 위에 증착된 YBaCuO 고온초전도 박막이었다. 설계된 layout을 고온초전도체로 구현하기 위해 표준 습식 식각법을 사용하였으며 이때 사용된 식각액은 EDTA 수용액이었다. 그림 5에 제작된 초전도 전력 분배기의 사진과 냉각 시스템을 제시하고 있다. 전력분배기의 하우징에 사용된 물질은 타이타늄이었으며 양호한 표면 특성을 얻기위해 금도금을 실시하였다.

4. 실험 결과 및 특성 해석

그림 6의 (a)에 제작된 소형화된 집중정수형 초전도 전력 분배기의 s 파라미터 특성을 제시하였다. 여기서 S₁₁과 S₄₁는 각각 전력 분배기에서 반사손실과 isolation을 나타낸다. 먼저 S₁₁의 경우 중심 주파수 과 S₄₁의 경우를 먼저 고찰해 보면 S₁₁은 그림 2에서 제시된 컴퓨터 모의실험한 결과와 거의 동일하게 중심 주파수인 421 MHz에서 -25 dB의 반사손실 특성을 보여준다. 동시에 전력분배기의 isolation을 나타내는 S₄₁의 경우도 역시 중심 주파수 421 MHz에서 -23 dB의 신호



(a)



(b)

그림 6 제작된 소형화된 집중정수형 초전도 전력분배기의 측정결과

(a) s 파라미터 특성 (b) 위상 특성

Fig. 6 Experimental results of miniaturized lumped element-type superconducting power dividers

(a) S-parameter characteristics

(b) phase characteristics

격리 특성을 보여주고 있다. S_{11} 과 S_{41} 의 경우 그 차이는 -2 dB로서 3dB 결합기의 성능에는 별다른 지장을 초래하지 않을 것으로 보인다. 통과 특성을 나타내는 S_{21} 의 경우 전체 대역폭은 409 MHz ~ 430 MHz로 총 21 MHz의 대역폭을 나타내고 있어 그림 4에서 제시한 Sonnet을 이용한 컴퓨터 모의실험 결과와 거의 정확한 일치를 보여주고 있다. 다만 여기서 주목해야할 것은 중심주파수의 이동이 12 MHz 정도 보여진다는 것이다. 일반적으로 전력 분배기에서 중심주파수의 이동은 직렬 인덕턴스의 부정확에서 발생한다. 좀더 구체적으로 설명한다면 결합기 회로에서 직렬 인덕턴스의 증가는 중심 주파수의 하락을 직렬 인덕턴스의 감소는 중심 주파수의 상승을 야기한다. 이러한 사실은 집중 정수 회로를 이용한 ADS 프로그램 시뮬레이션을 통해서도 쉽게 확인할 수 있었다. 인덕턴스가 발생하는 주요 원인은 컴퓨터 시뮬레이션 시 정확도를 나타내는 계산 cell의 크기에서 기인하는 것으로 보여진다. 현재 저자들이 보유하고 있는 pc로는 최대 2 μm 선폭의 cell까지 사용할 수 있다. 그러나 이 정도 미소 선폭의 사용은 역시 2 μm 의 선폭으로 이루어진 meander 선로 형태의 인덕턴스 계산에 부정확성을 야기하는 것으로 보인다. 본 연구팀에서는 이를 위해 전체 회로에서 인덕턴스만을 따로 시뮬레이션해 본 결과 약 2.3 nH의

오차가 발생하고 있음을 확인할 수 있었지만 전체 회로를 1 μm 선폭 cell 이하로 시뮬레이션할 경우 컴퓨터가 breakdown 현상을 나타내어 계산 불능 상태로 이어져 전체적으로 정확한 layout을 산출할 수 없었다. 정확한 계산을 위해서는 최소 3 G byte의 계산 메모리를 필요로 하지만 현재 pc가 채용할 수 있는 최대 계산 메모리인 최대 2 G byte를 초과한다. 따라서 이러한 문제의 해결은 반복 실험을 통해 중심 주파수를 원하는 값으로 이동시키거나 좀더 정확한 계산을 위한 워크스테이션급 컴퓨터를 사용해야할 것으로 보인다.

그림 6의 (b)는 제작된 전력 분배기의 통과 특성을 나타내는 대역폭 내에서 S_{12} 와 S_{13} 의 반전력 통과 특성을 보여주고 있다. 그림에서 보여지는 것처럼 S_{12} 와 S_{13} 의 반전력 분배 특성은 최대 -3.05dB에서 최소 -3dB 까지 0.05 dB의 오차를 보여주고 있다. 이러한 통과 특성은 거의 완벽하게 port 2와 port 3로 반전력 분배가 이루어지고 있음을 나타내는 것이다. 더불어 오른쪽 좌표에 제시되어 있는 위상 특성 또한 88.8°에서 90.4°에 이르는 이상적인 위상 특성을 보여주고 있다. 이러한 결과는 2.1절에서 제시한 전송선로 행렬을 이용, 집중 정수 회로를 이용한 전력 분배기 설계 방식이 타당한 것임을 보여주는 좋은 예라고 할 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 고온초전도체로 제작된 소형화된 전력 분배기 설계방식을 제시하고 이를 바탕으로 집중정수형 전력 분배기를 제작한 후 실험을 통하여 그 특성을 보고하였다. 설계 방식은 기존의 브랜치형 전력 분배기를 우수 모드와 기수모드 시 전송선로 행렬을 구한 다음, 여기로부터 집중 정수 소자 값을 도출하였으며 이를 바탕으로 집중 정수 등가회로를 도출하였다. 이어서 집중 정수 등가회로를 기반으로 소형화된 집중정수형 전력분배기를 설계하였으며 타당성 조사를 위해 상업용 전자장 해석 프로그램인 em Sonnet을 이용하여 컴퓨터 모의실험을 실시하였다. 측정결과와 모의실험결과를 분석한 결과 성공적인 통과특성을 보여주었음에도 불구하고 중심 주파수 차가 약 12 MHz 정도의 오차를 나타내었는데 이는 개인용 컴퓨터의 메모리 한계로 인한 것으로 보여진다.

감사의 글

이 논문은 우석대학교 학술연구비 지원에 의해서 이루어졌으며 이에 감사를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

- [1] M. J. Lancaster, Passive Microwave Device application of high temperature superconductors, Cambridge University Press. Cambridge UK, 1997
- [2] 김향곤, 최충석, 김동욱, 최효상, "비닐절연선의 산화물 성장특성과 화재조사에의 적용", 전기학회 논문지 P권, vol. 56, no. 1, pp.37-44, 2007.
- [3] 조용선, 박형민, 정수복, 최효상, "2차권선의 연결방법에 따른 변압기형 초전도 한류기 특성", 전기학회 논문지 P권, vol. 52, no. 12, pp.2078~3083, 2007.

[4] M. A. Richard, K. B. Bashin, and P. C. Clasp, "Superconducting microstrip antennas: an experimental comparison of two feeding methods," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.41, No.7, pp.967-974, 1993.

[5] Dong Chul. Chung et. al., "Comparison Between High-Tc Superconducting Microstrip Filters and Normal Conducting Counterparts", IEEE Trans on Applied supercond., vol. 9 no. 2 pp.3882-3885, 1999.

[6] David M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, NewYork, USA, 1998.



한 병 성 (韓 秉 誠)

1975년 2월 전북대학교 전기공학과 졸업, 1981년 동대학원 졸업 (공학석사), 1988년 프랑스 루이파스퇴르대학 졸업 (공학박사), 1982년 3월 - 현재 전북대학교 전기공학과 교수
 관심분야 : 초전도 전자소자 및 전력기기 설계, 반도체 재료 및 소자 설계

저 자 소 개



정 동 철 (鄭 東 哲)

1967년 8월20일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000년 ~ 현재, 우석대학교 전기전자공학과 교수.
 관심분야 : 초전도 한류기, 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 무선전력전송



유 병 환 (兪 炳 和)

1983년 5월17일생. 2009년 우석대학교 정보통신공학과 졸업. 2009년 ~ 현재, 동대학원 전기전자공학과 석사과정
 관심분야 : 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 무선전력전송



곽 민 환 (郭 玟 煥)

1970년 1월25일생. 1995년 경상대학교 전자재료공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년 ~ 현재, 전자통신연구원 테라전자팀 선임연구원.
 관심분야 : 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 초전도 전자소자 설계



강 광 응 (姜 光 鏞)

1975년 2월 서울대학교 섬유고분자공학과 졸업, 1988년 부산대학교 물리학과 졸업 (이학박사), 1989년 1월 - 현재 전자통신연구원 테라전자팀 책임연구원.
 관심분야 : 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 강상관전자계 소자 설계.