The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 10, No. 4, pp,399-404,1997.

광전자용 GaAs 링 공진기의 연구 동향

기술해설

Research Trends in GaAs Ring Resonators on Optolectronic Applications

이종철
(Lee, Jong-Chul)

Key Words(중요용어) : OEIC:Opto-Electronic Integrated Circuit(광전자 집적회로), ring resonator(링공진기), GaAs, RF(radio frequency), LO(local oscillator), IF(intermediate frequency), microstrip, CPW (Coplanar Waveguide), Slotline, 믹서, down-converted, up-converted, parametric amplifier

1. 서 론

최근 반도체 기판위에 광소자 및 전자 소자들을 집적시키는 광전자 집적회로 기술(OEIC)의 발달로 고주파 대역의 광통신 시스템의 전성기를 가능케 해 주고 있다. DFB 레이저 다이오드, PIN 또는 Avalanche 포토다이오드등과 같은 고속의 광원 및 디텍터의 개발과 더불어, 우수한 전송 특성과 넓은 통신 대역폭을 갖는 광파이버의 등장, 그리고 광파(lightwave) 가 갖는, 전자기학적 간섭으로부터 무관한 특성이 결합되어 마이크로웨이브-광전자 분야에의 관심과 연구의 필요성을 한층 더해주고 있다. 하지만 현재는 광파이버를 통해 전송된 신호를 포토다이오드, 믹서, 전치증폭기(preamplifier), 발진기등과 같은 개별적인 광소자 및 전자소자들을 통해 전기적인 신호로 변환시켜 주고 있는 실정이다. 따라서 초고속 광학 소자와 전자 소자를 동일 반도체 상에 단일 집적하는 광전자 마이크로웨이브 단일 집적 회로 분야(OEMMIC: Opto-Electronic Monolithic Microwave Integrated Circuit)가 매우 중요한 연구 과제가 되고 있다.

마이크로스트립 링 공진기는 일반적으로 분산, 페이즈 속도, 실효 유전율 측정등에 많이 사용되어져 왔으나, 최근에는 그 우수한 공진특성을 이용하여 마이크로파 시스템의 핵심 부품들인 믹서, 발진기, IF(Intermediate Frequency) 증폭기등에도 응용되고 있다. 이러한 마이크로스트립 링 공진기를 SI(Semi-insulating) GaAs기판위에 제작하여, 레이저 다이오드를 이용한 광여기에 의한 분석 방법이 최근 발표되었다. 레이저 다이오드의 광출력을 직접 세기 변조(Direct intensity modulation)시켜 RF (radio frequency) 신호를 회로에 인가하고, 외부에서 독립적으로 마이크로파 인 LO(Local oscillator) 신호를 인가하여, 광신호와 마이크로파 신호와의 혼합(mixing) 효과와, 회로내에 단일 집적된 쇼키(Schottky) 다이오드의 시변환 리액턴스 성분을 이용한 파라메트릭 증폭 현상등을 분석하여, 차세대 광통신 및 마이크로파 통신 시스템에의 응용 가능성을 보여 주고 있다.

본 고에서는 최근 활발한 연구가 진행되고 있으며, 광전자 분야에 응용할 수 있는, SI GaAs 기판위에 제작된 마이크로웨이브 링 공진기의 설계 및 제작 과정, 제작된 소자의 마이크로웨이브, 광특성 등에 대한 실험 결과들을 소개하고, 그 응용 분야에 대해 고찰해 본다.

2.. 링 공진기의 설계 및 제작

일반적으로 링 공진기는 그림 1에서 보여지는 것과 같이 Feed line과 coupling gap, 그리고 링공진기로 구성되며, 이러한 링 공진기 구조에서는 마이크로웨이브 경로가 링에 guide되는 파장, λ_g의 정수배가 될 때 공진(resonance) 현상이 발생한다. 이것을 식으로 표현해 보면 다음과 같다.

$$n\lambda_g = 2\pi R, \qquad n = 1,2,3,\ldots \tag{1}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{2}$$

여기서 n은 모드 수, R은 링의 평균 반지름, 그리고 ε_{eff} 은 실효 유전율이다. 따라서, 링 공진기에서는 공진 주파수를 결정하는 가장 중요한 파라미터

가 링의 평균 반지름이 된다. 링의 크기를 조절하므로써 필요로하는 공진 주파수 특성을 얻을 수 있게 된다. 또한, gap size에 따라 입출력 신호가 링 공진기에 coupling되는 정도가 결정된다. 즉, gap size가 작으면 coupling 효과가 크게되며, gap size가 크게 되면, 그만큼 couplig 효과도 줄어들게 된다. 일반적으로는 마이크로스트립이 가장 널리 사용되고있는 전송로 구조이지만, 이 구조에서는 back-side metalization을 필요로 하며, ground면의 연결을 위해 기판에 via-hole을 뚫어야 하는 과정이 필요하므로 집적 회로 제작시 제약 사항이 되고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해, 단일 평면상에 모든 회로 요소를 집적할 수 있는 전송로인, CPW(Coplanar Waveguide), Slotline등이 마이크로스트립에 대한 대체 전송로로 각광을 받기 시작하고 있다.

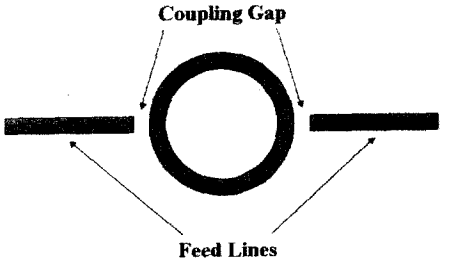
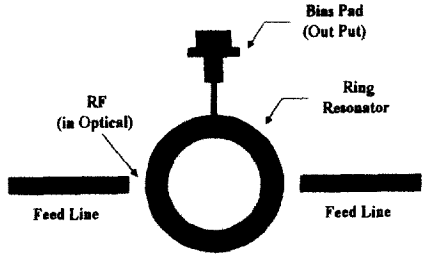


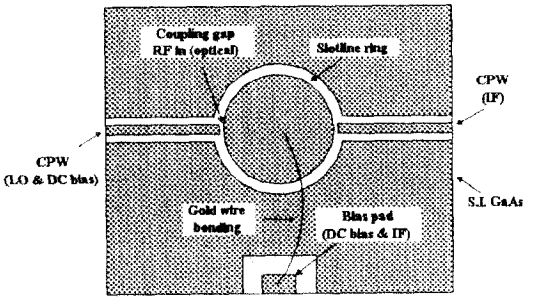
그림 1. 링 공진기 구조

그림 2에는 SI GaAs 기판위에 제작된 광전자용 마이크로스립 링 공진기(a)와 CPW-fed-Slotline 링 공진기(b)를 나타내었다. 그림 1과 비교하여 외부에서 바이어스를 걸어 주기 위한 바이어스 회로가 추가되었으며, 이것은 또한 cut-off 주파수가 1-2 GHz인 저역통과필터(Low-pass filter)로도 겸용으로 사용할수 있도록 설계되었다. 이러한 광전자용 링 공진기에서는 RF 신호가 feedline을 통해서 인가되는 것이 아니라 laser diode에서 나오는 광신호에 변조되어 feedline과 링 공진기 사이의 gap에 단일 집적된 Schottky 디텍터에 광신호로 인가된다. 이러한 광여기 방식은 제어하는 소자와 제어받는 소자간에 거의 완벽한 격리(isolation), 전자기학적 간섭(interference)으로부터 무관함, 낮은 정적, 동적 삽입 손실, 제3의 제어 포트, 고속의 반응 속도, 단일 집적의 가능성등의 많은 장점을 갖고 있으며, 이를 이용한 레이저 다이오드, FET, 모듈레이터, 발진기등에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

그림 2(a)의 링 공진기에 대한 마이크로파 공진



(a) 마이크로스트립 링 공진기



(b) CPW-fed-Slotline 링 공진기

그림 2. 광전자용 링 공진기

특성을 HP 8510C Network Analyzer로 측정하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 보는 것과 같이 이러한 링 공진기는 기본 모드(Fundamental mode)뿐만 아니라 부고조파(Harmonics)를 발생하게 되며, 이 신호들은 이 회로가 믹서로 사용될 때 아주 유용한 신호원으로 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 안정된 LO 신호를 제공해 주는 국부 발진기로도 응용될 수 있다.

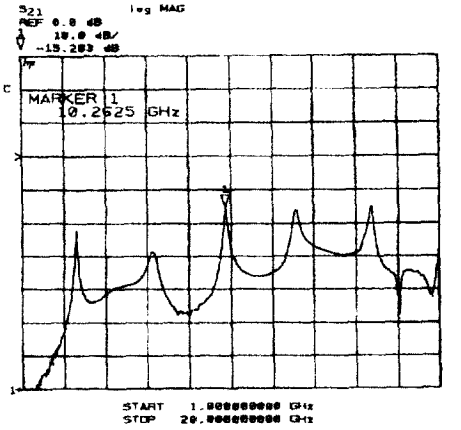


그림 3. 광전자용 마이크로스트립 링공진기의 마이크로웨이브 특성

이러한 링 공진기는 그 구조가 간단하여, 반도체 기판 위에 제작하기가 무척 용이하다. 그림 4에 그 대략적인 제조 과정을 도식적으로 나타내었다. SI GaAs 기판을 회로의 크기만큼 적절히 절단(scribing)한 다음 Clean room에서 아세톤, 메탄올, 프로판올등으로 기판을 세척한 후 AZ5214E 포토레지스트를 기판위에 도포하고, UV mask aligner를 사용하여, 원하는 회로 패턴을 만든다(photolithography). 다음 공정으로, E-beam 증착법을 통해 금속을 반도체에 증착시킨후, 아세톤에 GaAs 기판을 담가 포토레지스트 부분을 제거하고(lift-off), 최종 원하는 회로의 금속 패턴을 얻게 된다. 이 링 공진기는 고주파용 소자이기 때문에 가능한 금속 부분이 두꺼울수록 손실이 적게 되며, 그림 2의 링 공진기들의 경우 약 2.3 ~ 3.0 μm 정도의 금속 두께를 얻었다. 이러한 두꺼운 금속 증착을 위해서는 E-beam 증착법보다는 금도금법(Gold Plating)이 더 적절한 프로세스라고 고려된다. 링 공진기의 제작 공정은 간단하고, 특히 CPW-fed-Slotline 링 공진기의 경우, back metalization이 필요없는 단일 평면 상에서 모든 회로 요소들이 제작되기 때문에 추후 MMIC 혹은 OEMMIC 의 중요 소자로 이용될 수 있을 것이다.

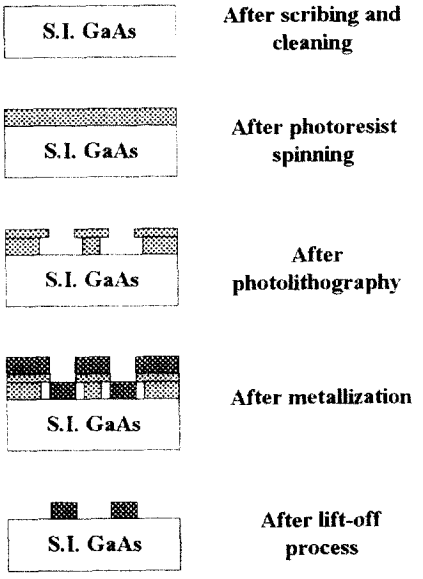


그림 4. 광전자용 링 공진기의 제작 과정

3. 실험 및 결과

앞에서 기술한 제작 과정을 거쳐 제작된 링 공진기는 실험을 위해 테스트 구조물에 부착되게 된다. 마이크로스트립 링 공진기의 경우, 알루미늄 블록에 고정되고, CPW-fed-Slotline 링 공진기의 경우 비도전체인 테플론 계열의 블록에 고정시키고 외부에서 SMA 커넥터를 각각 feedline과 바이어스 회로에 연결하게 된다. 후자의 경우, 그림2(b)에 나타낸대로 바이어스 인가를 위해 gold-wire 본딩을 사용하였다. 이 링 공진기에서 광신호와 마이크로파 신호와의 상호 작용을 조사 하기위한 실험 장치를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 반도체 레이저 다이오드를 마이크로파 신호 발생기(sweeper)를 통해 직접 세기 변조시켜서 이를 두 렌즈 시스템을 사용하여 시준(colimation) 및 초점을 맞추어 RF 신호를 광신호의 형태로 링 공진기의 갭(gap) 영역에 입사하게 된다. 최적 정렬 여부는 이 부분의 포토 전류량을 측정하여, 그 양이 최대가 될 때 정렬이 최적화되었다고 간주하게 된다. 한편 다른 마이크로파 신호 발생기로부터 LO 신호를 한쪽 feedline을 통해 링공진기에 공급하게 된다. 링 공진기는 자연적인 협대역 대역통과 필터이므로, 만일 RF 신호와 LO 신호가 링 공진기의 공진 주파수 근처의 신호라면, 믹서로서의 기능을 수행할 수 있으며, 이 결과 혼합 신호인 IF 신호가 발생하게 되며, 이것을 수학적으로 표현하면 다음과 같다

$$f_{IF} = |f_{LO} \pm f_{RF}| \qquad (3)$$

이 IF 신호는 down-convert되어 저역 통과 필터이기도 한 바이어스 회로단에서 출력될 수 있으며, 또한 up-convert 된 신호는 다른 feedline을 통해 출력될 수 있다. 출력된 신호는 증폭기를 거쳐 스펙트럼 분석기에서 관찰하게 된다.

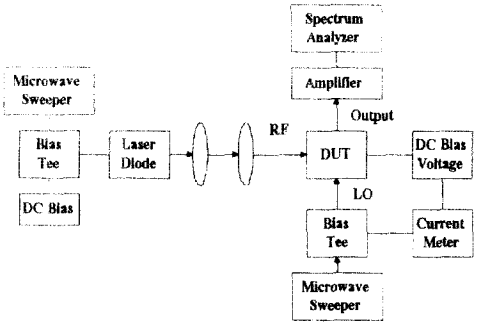
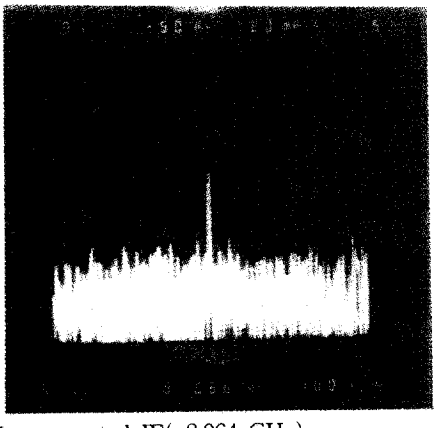


그림 5. 광전자용 링 공진기의 실험 장치

그림 6에는 이러한 혼합(mixing) 효과에 대한 실험을 CPW-fed-Slotline 링 공진기에서 수행한

결과를 스펙트럼으로 나타내었다. RF 신호가 링 공진기의 1차 공진 주파수인 4.09 GHz, LO 신호는 공진 주파수 근처인 3.974 GHz로 링 공진기에 각각 인가될 때 down-convert 된 IF 신호(a) 및 up-convert된 IF 신호(b)에 대한 스펙트럼을 각각 보여 주고 있다. 식 (3)에 주어진 대로 두 주파수의 차와 합에 해당되는 주파수에서 각각 IF 신호의 스펙트럼을 관측할 수 있었다. 이러한 믹서에서 down-convert된 IF power와 입력으로 인가되는 RF power의 관계를 측정하여 그림 7에 나타내었다. 적어도 -10 dBm의 입력 power 레벨까지는 IF 신호의 power가 RF power 의 증가에 따라 선형적으로 같이 증가함을 볼 수 있다. 실험결과 그밖에도 IF 신호는 LO power 및 외부에서 걸어주는 바이어스 전압에도 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

(a) Down-converted IF(=116 MHz).



(b) Up-converted IF(=8.064 GHz).

그림 6. 광신호(RF) 와 마이크로파 신호(LO)와의 혼합 신호(IF) 스펙트럼.
RF:4.09 GHz, LO: 3.974 GHz.

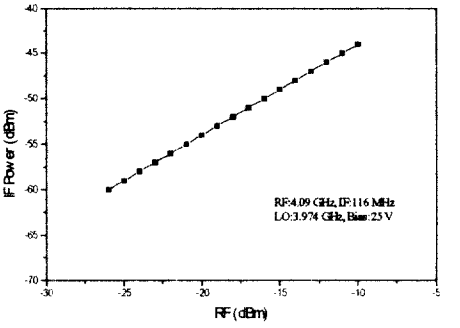


그림 7. IF power와 RF 입력 power와의 관계

한편 이 광전자용 CPW-fed-Slotline 링 공진기 믹서의 변환 손실(conversion loss)은, 레이저 다이오드에 인가되는 RF power에 대한 스펙트럼 분석기에서 관찰되는 IF power에 대한 비로써 정의되는 데 이는 레이저 다이오드와 믹서 전체의 시스템 변환 손실 특성을 나타내며, 그 실험 결과를 LO 주파수의 함수로 그림 8에 표시하였다. 비교를 위하여, 비슷한 실험 구조를 갖는 다른 링 공진기의 특성을 함께 표시하였다. 그림으로부터 CPW-fed- Slotline 링 공진기는 SI GaAs 마이크로스트립 링 공진기보다는 특성이 약간 좋고, Heterostructure 마이크로스트립 링 공진기보다는 LO 주파수가 3.9 GHz 이후에는 변환 특성이 좋아짐을 볼 수 있으며, 만일 Heterostructure 기판을 사용하여 회로를 제작할 경우, 특성이 향상될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

광전자용 링 공진기는 믹서뿐만이 아니라 파라메트릭 IF 증폭기로도 사용할 수 있다. 단일 집적된 숏키 다이오드의 시변환 커패시턴스 값에 기인하여, 만일 LO 신호가 RF 신호의 2배되는 공진 주파수로 회로에 인가될 때, 식 (3)에 따라 IF 신호는 RF 신호와 주파수가 정확히 일치하게 되며, 이 주파수에서 증폭 효과가 발생하게 된다. 그

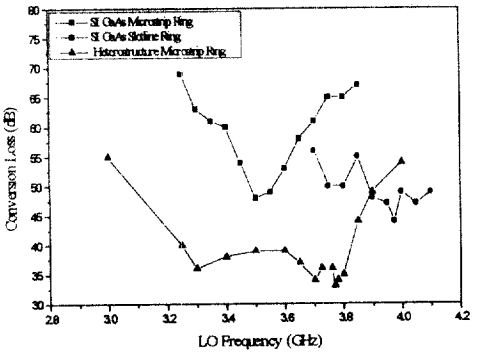
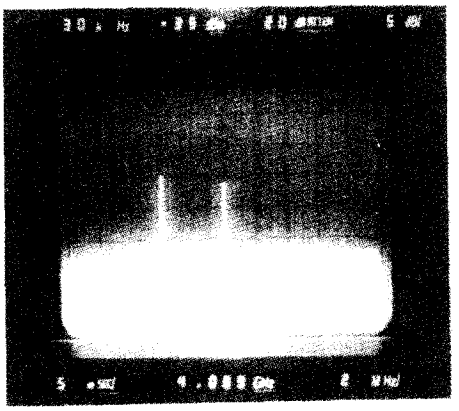
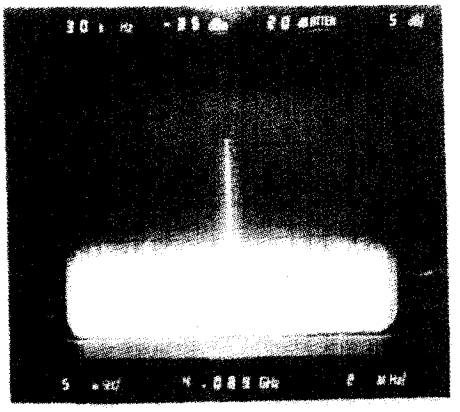


그림 8. 변환 손실과 LO 주파수.

림 9에 CPW-fed- Slotline 링 공진기에서 이러한 degenerate 파라메트릭 증폭 효과를 스펙트럼으로 나타내었다. 그림 9 (a)에서 RF 신호는 4.09 GHz(오른쪽), LO 신호는 8.176 GHz, 그리고 이 RF와 LO 신호의 혼합으로 발생하는 IF 신호는 4.086 GHz에서 관측되며(왼쪽), LO 주파수를 8.176 GHz에서 RF 신호 주파수의 2배인 8.18 GHz로 이동시키자, 그림 9(b)에서와 같이 IF 신호는 4.09 GHz에서 약 6 dB 정도의 전력 이득(gain)을 얻을 수 있었다.



(a) LO:8.176 GHz, IF:4.086 GHz(왼쪽), RF: 4.09 GHz



(b) 증폭된 RF 신호 (IF=RF=4.09 GHz)

그림 9. 파라메트릭 증폭 효과에 대한 스펙트럼

이러한 파라메트릭 증폭 효과를 외부 바이어스 전압에 따라 실험한 결과를 그림 10에 나타내었다. 외부에서 전압을 가하지 않았을 때 거의 20 dB의 전력이득을 얻을 수 있었으며, 전압을 증가시킴에 따라 비선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이와같은 높은 이득은 마이크로파통신 시스템에서 IF 증폭기로 이러한 광전자용 링 공진기가 사용될 수 있음을 보여주고 있다. 또한 믹서로서의 링 공진기는 광통신-마이크로파 링크에서 광전자용 믹서의 대용으로 사용될 수 있을 것이다. 이러한 응용 예를

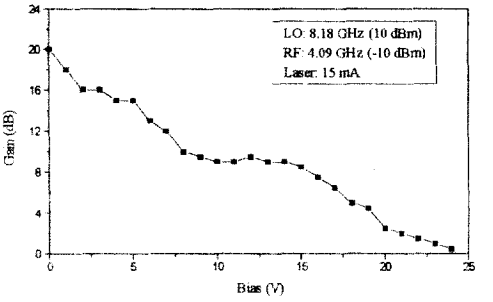


그림 10. 바이어스에 따른 전력 이득

그림 11에 나타내었다. 마지막으로 광통신 시스템에서 헤테로다인 리시버 시스템의 전치단인 믹서, 포토디텍터 부분을 이러한 링 공진기로 대체하는 것도 가능하리라 기대된다.

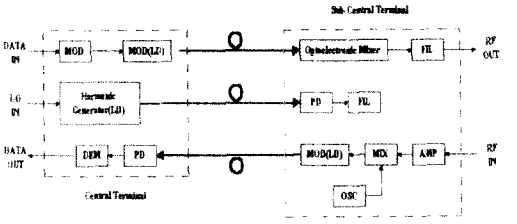


그림 11. 광전자용 링 공진기의 응용 예

4. 맺 음 말

링 공진기는 그 구조가 간단하고 설계 및 제작이 용이하며, 그 응용 분야가 다양하여, 앞으로 초고속 소자로서, 초고주파용 핵심 부품들로서의 개발이 기대되고 있다. 특히 광전자용 GaAs 링 공진기는 포토디텍터가 반도체 기판위에 단일 집적된 OEMMIC 형태로 구성되어 있으며, 광신호에 의해 변조된 RF 신호와 마이크로파 LO 신호와의 혼합(mixing) 효과를 성공적으로 나타내보임으로써, 광통신 시스템에서의 믹서(mixer)로서의 응용 가능성을 보여 주고 있으며, 시변환 리액턴스 성분에 기인하는 비선형적 파라메트릭 증폭 효과를 보여줌으로써 광통신-마이크로파 통신 시스템의 리시버 단에서의 IF 증폭기등으로도 응용될 수 있음을 보여 주고 있다. 또한 반도체 소자 설계 및 제조 기

술이 날로 발달함에따라 이러한 링 공진기를 이용한 국부 발진기, 필터, 또는 안테나등과 같은 마이크로웨이브 소자 및 광전자용 소자들의 출현도 기대가 된다.

저자소개

이종철

1960년9월10일생. 한양대학교 전자공학과 졸업(B.S., 1983.2), 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(M.S., 1985.2). 미국 Arizona State Univ. 전기과(EE) 졸업(M.S., 1989.12). 미국 Texas A&M Univ. 전기과(EE) 졸업(Ph. D., 1994.5). 현대전자 시스템 IC 연구소 광소자 개발실 선임연구원(1994.6-1996.2). 현재 광운대학교 전파공학과 전임강사(1996.3-). 관심분야: 광전자공학, 초고주파응용, MMIC.

▶ 1997년도 6월호의 기술해설 제목과 저자는 다음과 같으니 많은 참고 바랍니다. ◀

題 目	著 者 및 所 屬
고주파 유전체 재료를 이용한 고주파 통신용 부품	윤중락, 정태석, 홍진배, 이석원, 이헌용
고체산화물 연료전지 기술 및 전망	김선재, 황종선