

60GHz 대역용 고격리도 pHEMT MMIC 스위치

문재경* · 김동영 · 임종원 · 안호균 · 김해천 · 유현규

한국전자통신연구원 IT · 융합부품연구소 초고주파소자팀

High Isolation pHEMT MMIC switch for 60GHz-band applications

Jae Kyoung Mun*, Dong-Young Kim, Jong-Won Lim, Ho-Kyun Ahn,
Haecheon Kim, and Hyun Kyu Yu

ETRI, ICCLE, Microwave Device Team, 161 Kajong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

This paper describes the design, fabrication and measurement of a single-pole-double-throw(SPDT) MMIC switch applicable to IEEE 802.15.3c standard wireless local area network(WLAN) using an ETRI's 0.12um GaAs/AlGaAs pHEMT switch library and high isolation switch cell design technologies. This SPDT switch has a measured insertion loss of -3.1dB~-4.2dB and isolation of -41.7dB~-42.5dB in the 59~63GHz frequency band. Thermal test was also performed to evaluate the thermal stability of switching performances from -50°C to +100°C with a step of 20°C in an atmosphere. The variations of insertion loss and isolation at a center frequency of 60 GHz were -2.17 ± 0.15 dB and -41.07 ± 0.85 dB, respectively. This means the SPDT switch is very stable at both high and low temperatures. Therefore we can conclude that the developed high isolation pHEMT SPDT MMIC switch is suitable for an Rx-Tx switch of WLAN system. However, the chip size of 3.0 mm×0.99 mm is still large and then we need an additional work for developing a new switch cell to decrease the chip size.

Keywords: 60 GHz band, pHEMT switch, single-pole-double-throw(SPDT), insertion loss, isolation, thermal test

1. 서 론

미래 무선통신 시스템의 키워드는 음성, 비디오, 데이터를 동시에 제공하는 "triple-play"이다. 이를 위하여 필요한 고속/광대역 특성은 mm-wave 대역에서 얻을 수 있다. 거대 데이터 파일 전송, 실시간 비디오 스트리밍 등과 같은 고속(>1Gbps) 멀티미디어 데이터 통신에 관한 수요 증가는 60GHz 대역 무선통신 시스템의 개발을 부추기고 있다. 특히 60GHz 부근의 주파수 대역은 산소흡수피크와 관련하여 채널 상호 간섭(co-channel interference)이 적은 장점을 가지며, 짧은 셀 재사용 거리로 인하여 단거리(<1 km) 무선통신을 가능하게 할 뿐만 아니라 국제적으로는 비규제 주파수 대역으로 사용자들로 하여금 다양한 응용 개발 기회를 제공할 수 있는 장점을 가지고 있다.

일반적으로 무선 통신 시스템은 송신부와 수신부로 구성되어 있다. 지난 수년 간 60GHz 응용을 위한 송신부 및 수신부

MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit)에 관한 우수한 연구 결과와 함께 단일칩(single-chip)화에 관한 연구결과도 상당수 보고되고 있다^[1-4]. 이러한 통신 시스템에서 송신신호와 수신신호의 흐름을 조절하기 위하여 안테나의 뒷단에 필수적으로 사용되는 가장 적절한 회로 컴포넌트가 스위칭 회로이며, 스위치의 성능이 전체 단말기의 성능을 결정할 정도로 매우 핵심적인 역할을 한다^[5].

송수신 경로의 선택을 위하여 사용되는 스위치 회로는 다이오드, MEMS, 트랜지스터 등 3가지 형태를 이용하여 구현할 수 있으나, MEMS스위치는 격리도(isolation), 삽입손실(insertion loss), 전력구동능력(power handling capability) 등에서 우수한 특성을 보이나, 아직은 높은 구동전압과 느린 스위칭 시간의 문제점 외 수명 및 신뢰성이 검증되지 않은 상태이며^[6], PIN 다이오드 스위치는 삽입손실과 격리도 특성이 우수함과 동시에 가격이 싸고 간단한 장점을 가지나 스위칭에 필요한 전류가 수 mA로 너무 높아 전원의 수명에 악영향을 초래하며 다중포트(multiport)를 위한 복잡성이 매우 증가하는 단점도 안고 있다.

*Corresponding author: jkmun@etri.re.kr

반면 트랜지스터를 이용한 스위치는 전력소모가 적고 스위칭 속도가 빠르고 SoC(System-on-a Chip)화가 가능하며 넓은 주파수 특성과 다중포트 회로의 구현이 쉬워 차세대의 개인휴대통신 단말기의 응용에 있어서 표준형 스위치 소자로 부상하고 있다^[7].

특히 MMIC 스위치는 능동소자와 동일한 제조공정을 사용하며 칩의 소형화가 가능하고 특성균일도가 우수한 장점을 가진다. 이로 인하여 Strategy Analytics 2002 자료에 의하면 MMIC형 스위치가 현재 설계에서 50% 이상을 차지하며 경제적 가치는 약 \$220million 정도에 해당한다.

MMIC스위치 제작을 위한 트랜지스터로는 MESFET^[8], HEMT^[9], HBT^[10] 모두가 사용되지만, planar 구조를 갖는 MESFET과 HEMT가 주로 사용된다. 특히 pHEMT는 MESFET에 비하여 낮은 On 저항과 작은 OFF 커패시턴스로 고주파수에서 삽입손실이 적고 우수한 격리도 특성을 보이며, 낮은 무릎전압(V_k)으로 저전압 동작이 가능할 뿐만 아니라 선형성이 우수하여 개인휴대통신 단말기등에 주로 채택되는 최첨단 스위치 기술이다^[11]. 그럼에도 불구하고 사용 주파수가 mm-Wave 대역으로 증가하면 pHEMT 소자의 소오스-게이트, 게이트-드레인, 반도체 기판등과 관련된 기생 캐패시턴스 성분으로 인하여 소자를 시리즈(series)로 연결할 경우 송신 경로와 수신 경로의 신호 분리를 위하여 필요한 30dB 이상의 격리도를 확보하기가 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 mm-Wave 대역에서 사용되는 스위치 회로는 일반적으로 소자를 션트(shunt) 형태로 연결하거나, 다단계 결합을 하여 구성한다.

본 논문에서는 ETRI에서 개발된 0.12 μm GaAs/AlGaAs pHEMT 스위치 기술과 고격리도 셀 설계 기술을 이용하여 최근 활발한 연구가 진행 중인 IEEE 802.15.3c 표준인 60 GHz대역 무선랜용 SPDT (Single-Pole-Double-throw) 스위치 MMIC를 설계·제작하였다. V-band에서 격리도 향상을 위하여 스위치 소자가 전송선로 내부에 집적화된 션트 구조를 채택하였으며, 송신 경로와 수신 경로는 대칭구조로 2단 스위치 셀을 사용하였다. 개발된 SPDT 스위치 회로는 RF 특성뿐만 아니라 열적 특성 평가를 통하여 60GHz 무선랜의 송·수신(Tx-Rx) 스위치로 사용될 가능성을 알아본다.

2. 본 론

그림 1은 본 연구에서 연구 개발된 Rx-Tx 송·수신 SPDT 스위치의 사용 위치를 보여주는 무선랜 단말기의 송수신 블록 다이어그램이다. 출력 전파는 필터(FLT), 저잡음증폭기(LNA), 전력증폭기(PA)에서 증폭된 후 안테나를 통하여 대기 중으로 방사되며 입력전파는 안테나, 필터, 저잡음 증폭기를 통하여 단말기로 전달된다. 여기서 송신 및 수신 경로를 선택하여 하나의 안테나와 상호 연결시켜 주는 기능을 수행하는 회로가 필요

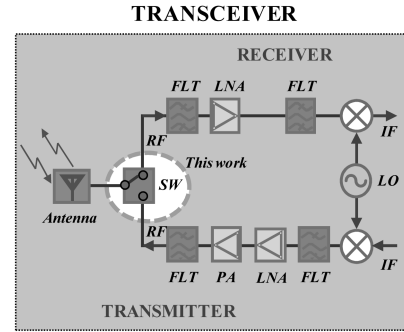


Fig. 1. Transceiver block diagram of wireless LAN terminal.

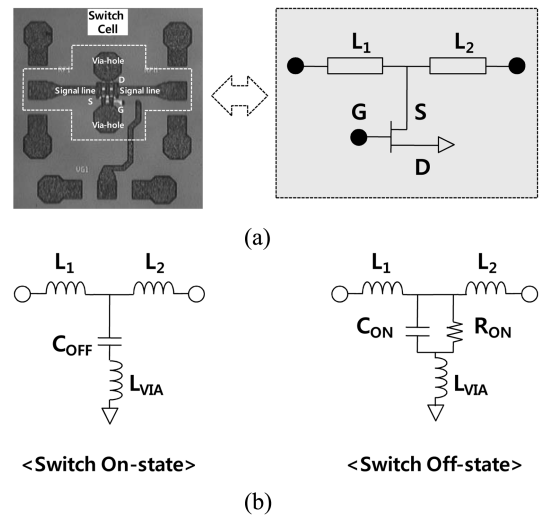


Fig. 2. (a) Switch cell with schematic and (b) equivalent circuit of the switch-on/off state of the adopted cell using FET-integrated transmission line structure.

하다. 이러한 Rx-Tx 스위치는 송신 및 수신 경로의 신호 간섭을 최소화하기 위한 높은 격리도(high isolation) 특성과 입력력 과정에서 낮은 신호 손실을 위한 저손실(low loss) 특성이 가장 중요하다.

그림 2는 SPDT 스위치 회로 설계를 위한 pHEMT 스위치 셀의 사진과 구성도(a) 및 스위치 셀의 온-상태와 오프-상태에 대한 등가회로(b)를 보여준다. 송·수신 스위치의 격리도 향상을 위하여 설계된 스위치 셀은 전송선에 내장된 pHEMT 소자와 수직방향으로 배치된 2개의 접지 비어홀로 구성된 구조적 특징을 갖는다.

즉, 전송선에 내장된 pHEMT 소자는 전송선과의 길이가 짧아져 기생 인덕턴스를 줄일 수 있으며, pHEMT 소자와 수직방향으로 배치된 2개의 접지 비어홀은 소자와 전송선의 연결부에서 임피던스를 최소화시켜 그림 2(b)의 등가회로에서 보는 바와 같이 스위치-오프를 위한 입력신호의 접지 저항을 줄여준다. 그리고 스위치 셀의 설계에 사용된 pHEMT 소자는 게이트 길이(L_g)가 0.12 μm , 게이트 폭(W_g)이 200 μm , 펀치-오프 전압

(V_p)은 $-1.0V$, 트랜스컨덕턴스(g_m)는 510 mS/mm 정도의 특성을 가진다.

그림 3은 설계된 스위치 셀의 특성을 보여준다. $50\text{GHz} \sim 70\text{GHz}$ 주파수 범위에서 삽입손실은 $-2.5\text{dB} \sim -4\text{dB}$, 격리도는 $-13.5 \sim -15\text{dB}$ 수준으로 우수하나 입출력 정합이 되어 있지 않아 상기 셀을 이용한 회로 설계 시 셀 사이의 정합 과정이 필요하다. 일반적으로 송·수신 스위치의 경로간 격리도는 -30dB 수준을 요구하므로 본 연구에서 제안된 스위치 셀을 사용할 경우 2단으로 연결할 필요가 있다.

그림 4는 상기 스위치 셀을 이용하여 SPDT형의 송·수신(Rx-Tx) 스위치 회로를 설계하기 위한 개념도(a)와 셀 및 입·출력단 정합을 위한 전송선로 최적화 후 회로도(b)를 보여준다. 송

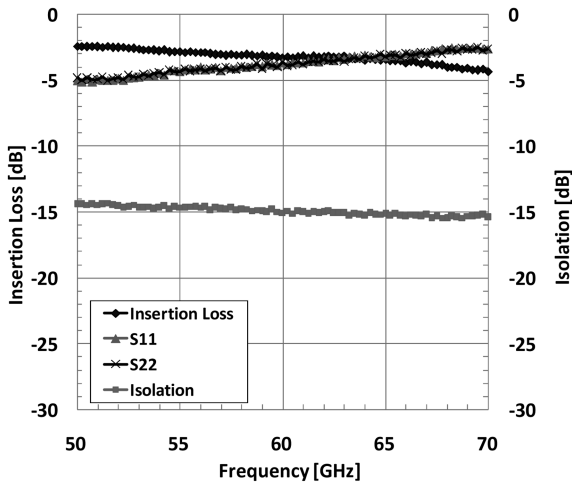


Fig. 3. Characteristics of designed switch cell (Fig. 2(a)).

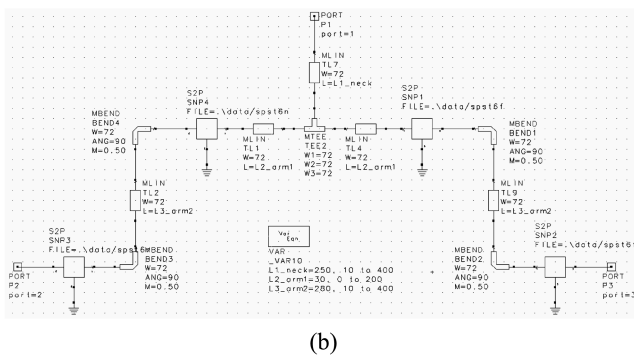
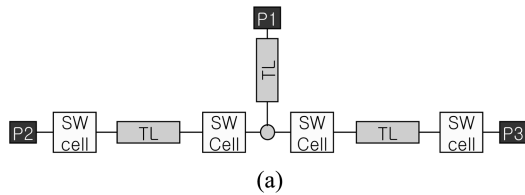


Fig. 4. (a) Design schematic of Rx-Tx SPDT switch and (b) Optimized circuit with cell and input/output matching.

신부(P2) 또는 수신부(P3) 경로는 2개의 스위치 셀과 정합을 위한 전송선로(TL)로 구성되며, 이 두 경로는 T-접합과 또 다른 전송선로(TL)를 이용하여 안테나(P1)과 연결되도록 하였다.

회로 설계 시 스위치 셀 사이의 정합과 입력(P1) 및 출력(P2, P3) 단의 정합은 모두 50Ω 을 기준으로 하였으며, 회로 시뮬레이터인 Series IV66과 ADS2004A를 함께 이용하여 설계 오차를 줄였다. 한편 레이아웃의 영향은 ETRI의 $0.12 \mu\text{m}$ pHEMT 공정 설계 규칙을 기반으로 모멘텀 시뮬레이션을 병행함으로써 최종 결과에 반영하였다. 뿐만 아니라 칩 사이즈를 줄이기 위하여 스위치 셀과 셀 사이의 정합용 전송선로는 양끝단에 직각으로 꺾인 전송선로를 활용하여 재배치하였다.

그림 5는 개발된 SPDT 스위치의 사진을 보여준다. 게이트 제어전압 V_{G1} 과 V_{G2} 의 조절에 의하여 송신 경로 P2와 수신 경로 P3를 선택할 수 있다. 가령 V_{G1} 이 $0V$ 이고 V_{G2} 이 $-3V$ 이면 P1-P2 경로에 배치된 스위치 셀의 트랜지스터 채널은 온-상태로 되어 신호가 모두 접지 비어홀로 빠져나가 포트 P2에는 전달되지 못하는 반면, 경로 P1-P3에 배치된 스위치 셀의 채널은 오프-상태가 되어 신호가 전송선로를 통하여 포트 P3에 도달된다. 즉, 안테나 P1을 통하여 입사되는 신호는 포트 P3으로 전달된다. 물론 제어전압이 정반대인 경우에는 포트 P2로 들어온 신호는 포트 P1을 통하여 안테나 밖으로 방사가 가능하다.

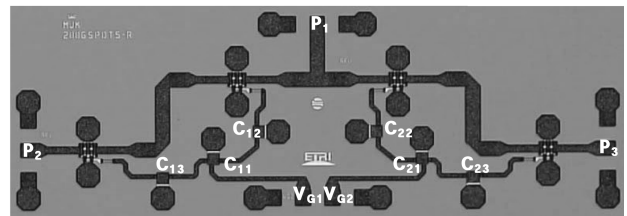


Fig. 5. Chip photograph of developed Rx-Tx SPDT switch.

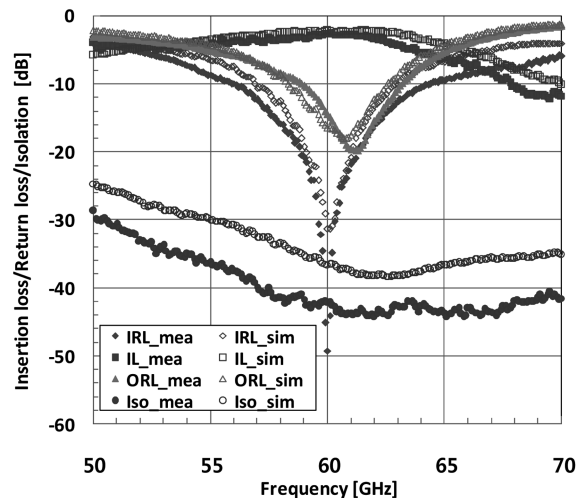
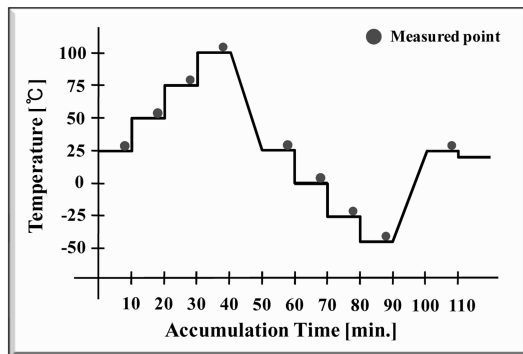


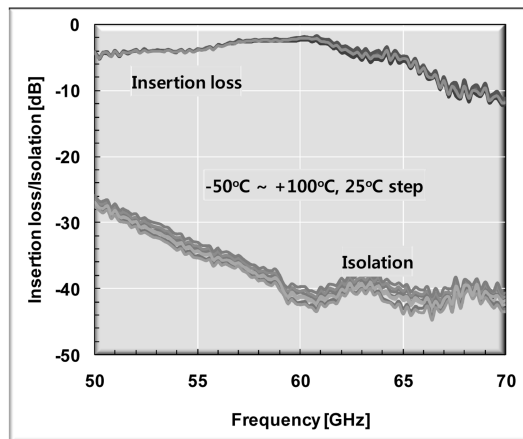
Fig. 6. Simulated and measured characteristics of developed SPDT switch.

Table 1. Comparison of simulated data with measured ones in narrow frequency bands

Freq.(GHz)	Measured data				Simulated data			
	IRL(dB)	IL(dB)	ORL(dB)	Iso(dB)	IRL(dB)	IL(dB)	ORL(dB)	Iso(dB)
59.5	-26.5	-2.7	-11.8	-42.4	-22.1	-2.2	-13.6	-35.3
60.0	-49.3	-2.6	-14.5	-42.2	-31.3	-2.1	-16.4	-36.6
60.5	-27.5	-2.7	-17.3	-43.3	-25.1	-2.3	-17.4	-37.3



(a)



(b)

Fig. 7. (a) Temperature profile for thermal test and (b) measured characteristics of developed SPDT switch.

개발된 SPDT 회로에는 제어용 게이트 전압의 요동이나 정전기 전압에 의한 회로의 고장을 방지하고 안정도를 향상시키기 위하여 d.c. 바이어스 (V_{G1} 과 V_{G2}) 패드와 스위치 셀 트랜지스터 사이에 각 3개씩(V_{G1} 경우 C_{11} , C_{12} , C_{13} , 그리고 V_{G2} 경우 C_{21} , C_{22} , C_{23})의 MIM(Metai-Insulator-Metal) 캐패시터를 배치하였다. 회로 안정화 캐패시터를 포함하는 칩의 크기는 $3.0 \times 0.99 \times 0.1 \text{ mm}^3$ 로, 60GHz 대역용 상용품인 Velocium사의 SPDT 스위치에 비하면 약 25% 정도 큰 수준이다. 따라서 보다 나은 경쟁력을 확보하기 위해서는 칩의 소형화를 위한 스위치 셀의 구조를 재설계할 필요성이 있다.

그림 6은 개발된 SPDT 스위치의 특성에 대한 설계 및 측정 결과를 비교하여 나타내었다. 스위치 특성 중 삽입손실(IL), 격

리도(Iso), 입·출력 반사손실(IRL, ORL)을 상호 비교하였으며, 측정결과는 그림에서 보는 바와 같이 설계와 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 격리도의 경우 설계 값보다 우수한 특성을 보였다. 표 1은 협대역 59.5GHz~60.5GHz에서의 특성을 요약하여 나타내었다.

그리고, 입·출력 반사손실이 10dB 보다 우수한 주파수 대역은 59~63GHz, 삽입손실 -3.1~-4.2dB, 그리고 격리도는 -41.7~-42.5dB의 특성을 나타내었다. 비록 삽입손실은 다소 높지만 격리도 측면에서 보면 pHEMT를 기반으로 하는 MMIC 스위치의 경우 V-band에서 세계 수준인 것으로 평가된다^[12].

개발된 스위치 회로의 열적 안정성을 평가하기 위하여 고온 및 저온 성능 시험을 수행하였다. 그림 7은 열시험(thermal test)을 위한 온도 프로파일(a)과 측정된 결과(b)를 보여준다. 열시험은 대기 중 분위기에서 바이어스 전압을 -3V(오프-상태)와 0V(온-상태)로 가한 상태에서 수행되었다. 온도는 -50°C에서 +100°C까지 25°C step으로 승온 및 강온을 하였으며 각 온도에서 10분간 유지한 후 망분석기(network analyzer)를 이용하여 주파수 50-70GHz 범위에서 S-parameter 측정하였다.

열시험은 온도 변화에 따른 특성 변화의 정도를 평가하기 위하여 수행되었기 때문에 그림 7(b)에서 각 온도에서 측정된 데이터에 대하여 해당 온도 표시는 편의상 생략하였다. 시험 결과에서 보는 바와 같이 고온과 저온에서의 특성 편차는 매우 적어 안정된 회로임을 알 수 있다. 중심 주파수 60GHz에서 특성을 조사한 결과 삽입손실은 $-2.17 \pm 0.15 \text{ dB}$, 격리도는 $-41.07 \pm 0.85 \text{ dB}$ 정도의 변화를 보였다.

3. 결 론

본 논문에서는 ETRI에서 독자적으로 개발된 $0.12 \mu\text{m}$ GaAs/AlGaAs pHEMT 스위치 기술과 고격리도 셀 설계 기술을 이용하여 최근 활발한 연구가 진행 중인 IEEE 802.15.3c 표준인 60 GHz대역 무선랜용 SPDT스위치 MMIC를 설계·제작하였다. 제작된 회로는 주파수 대역 59~63GHz, 삽입손실 -3.1~-4.2dB, 그리고 격리도 -41.7~-42.5dB의 특성을 나타내었다.

열적 안정성을 평가하기 위하여 수행한 고온 및 저온 성능 시험 결과 개발된 칩은 중심 주파수 60GHz에서 삽입손실은 $-2.17 \pm 0.15 \text{ dB}$, 격리도는 $-41.07 \pm 0.85 \text{ dB}$ 정도의 변화를 보여 매우 안정적임을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 개발된 SPDT 스위치는 60 GHz 무선랜의 송·수신(Tx-Rx)용 스위치로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 다만 삽입손실과 칩사이즈를 줄일 수 있는 새로운 스위치 셀의 설계 및 개발에 관한 연구가 더 필요할 것으로 여겨진다.

REFERENCES

1. M. Siddiqui, M. Quijije, A. Lawrence, B. Pitman, R. Katz, P. Tran, A. Chau, D. Davison, S. Din, R. Lai, and D. Streit, *GaAs Mantech Conference* (2002).
2. M. Schlechtweg, A. Tessmann, A. Leuther, C. Schworer, H. Massler, M. Mikulla, M. Walther, and M. Riessle, *IEEE Int. Workshop on Radio-Frequency Integration Technology*, pp. 46-49 (2005).
3. Y. Mimino, K. Nakamura, Y. Hasegawa, Y. Aoki, S. Kurada, and T. Tokumitsu, *IEEE MTT-S Int.* pp. 1721-1724 (2002).
4. Sten E. Gunnarsson, C. Karnfelt, H. Zirath, R. Kozhuharov, D. Kuylenstierna, C. Fager, and A. Alping, *IEEE MTT-S Int.*, pp. 801-804 (2006).
5. Kai Chang, Inder Bahl, and Vijay Nair, *RF and Microwave Circuit and Component Design for Wireless Systems*, pp. 221-270, John Wiley & Sons, New York (2002).
6. S. Pacheco, C. T. Nguyen, and L. P. B. Kathehi, *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1569-1572 (1998).
7. Yalcin Ayasli, *Microwave Journal*, pp. 61-74, November (1982).
8. H. Uda, T. Sawai, T. Yamada, K. Nogawa, and Y. Harada, *GaAs IC Symp.*, pp. 247-250 (1993).
9. M. Tutt, D. Pavlidis, G. I. Ng, M. Weiss, and J. L. Cazaux, *GaAs IC Symp.*, pp. 293-296 (1988).
10. R. Goetzfried, T. Itoh, J. F. Luy, and H. Schumacher, *IEEE MTT-S Digest*, pp. 651-653 (1996).
11. H. Tosaka, T. Fujii, K. Miyakoshi, K. Ikenaka, and M. Takahashi, *IEEE MTT-S Digest*, A5-A8 (2003).
12. H. Mizutani, N. Iwata, Y. Takayama, and K. Honjo, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **55**, 664-671 (2007).