

## GaAs MMIC상에서 주기적 접지구조를 가지는 결합선로의 절연특성에 관한 연구

김세호\* · 강석엽\*\* · 윤 영†

(원고접수일 : 2008년 11월 3일, 원고수정일 : 2009년 1월 13일, 심사완료일 : 2009년 1월 13일)

### A Study on Characteristics of Coupled Line Employing Periodical Ground Structure on GaAs MMIC

Se-Ho Kim\* · Suk-Youb Kang\*\* and Young Yun†

**Abstract :** In this study, using a periodical ground structure (PGS) on GaAs monolithic microwave integrated circuit (MMIC), transmission line with a high isolation characteristic was developed for application to compact signal/bias lines of highly integrated MMIC. And the origin of the high isolation characteristic was theoretically investigated. The high isolation characteristic was originated from a resonance between adjacent microstrip lines employing PGS. With only a spacing of 20  $\mu\text{m}$ , the coupled microstrip line employing PGS showed an isolation value of -47 dB at 60 GHz. The frequency range for high isolation was easily controlled by changing the PGS structure. Above results indicate that microstrip lines employing PGS are very useful for application to compact signal/bias lines of highly integrated MMIC requiring a high isolation characteristics between lines. In addition, equivalent circuit employing closed-form equation for the coupled line with PGS was also extracted.

**Key words :** Coupled line(결합선로), Periodical ground structure(PGS)(주기적 접지구조), GaAs, Monolithic microwave integrated circuit(MMIC)(모놀리식 마이크로웨이브 집적 회로)

### 1. 서 론

RF 기술의 발전과 함께 고집적의 디지털 회로와 RF 단말기 부분의 회로가 동일한 반도체 기판에 집적됨에 따라, 반도체 회로의 집적도가 높아지고 회로를 통과하는 신호의 주파수는 수~수십 GHz

단위까지 높아지고 있다. 이에 따라 거리가 가까운 소자 혹은 선로간의 커플링이 가장 큰 문제로 대두 되고 있으며, 집적도가 높은 배선부분을 통과하는 신호간의 커플링에 의한 회로의 오동작이 가장 큰 문제가 되고 있다. 특히 고주파 신호가 통과하는 RF용 신호 배선에서 발생하는 인접선로간 커플링

† 교신저자(한국해양대학교 전파공학과, E-mail: yunyoung@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4426)

\* 한국해양대학교 전파공학과

\*\* 한국해양대학교 전파공학과

은 무선통신회로의 오동작을 유발하는 가장 큰 요인이다. 따라서 배선을 통과하는 신호사이의 커플링을 줄이기 위해서는 선로간격을 일정이상으로 띄워야 하며, 이는 실리콘 반도체 집적회로 칩 사이즈를 줄이는데 있어서 가장 큰 장애요인이 되고 있다<sup>(1),(2)</sup>. 예를 들어, 100 $\mu$ m 두께의 GaAs 기판 상에서 20 $\mu$ m의 선로 폭을 가지는 기존의 마이크로스트립 선로의 경우<sup>(3)</sup>, 60GHz에서 -20dB 이상의 절연특성을 얻기 위해서는 인접한 선로들 사이의 간격이 140 $\mu$ m 이상이 되어야만 하며, 이는 RF 칩 사이즈를 크게 증가시키는 요인 중의 하나이다.

본 논문에서는 주기적 접지구조, 즉, periodical ground structure (PGS)<sup>(4)</sup>를 이용한 높은 절연특성을 가지는 마이크로스트립 결합선로 구조를 개발하였다. 또한, PGS를 이용한 마이크로스트립 선로들 사이의 높은 절연특성의 기원을 등가 회로를 이용하여 이론상으로 분석하였다. 그리고 PGS를 이용한 마이크로스트립 선로에 대한 등가회로 및 closed-form 수식을 확립하였다.

## 2. 등가회로를 이용한 PGS 선로구조의 공진특성해석

Fig. 1(a)는 PGS를 이용한 결합 마이크로스트립 선로의 윗면을 보여준다. 그리고 Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 X-X방향을 자른 단면도에 해당한다. PGS는 SiN 막과 GaAs 기판사이의 경계면에 삽입되어있다. 그리고 PGS는 비아 홀을 통해서 뒷면의 그라운드 패탈에 전기적으로 연결되었기 때문에 그라운드면의 역할을 한다. Fig. 2는 Fig. 1의 결합선로에 대한 등가 회로를 보여주며, Fig. 1의 네모 박스에 둘러싸인 주기적 구조의 N번째 구성 요소의 등가 회로이다.  $C_b$ 는 최상위 선로와 PGS 사이의 용량과 일치한다. 이것은 Fig. 1(b)에 나타난다. 그리고 상기용량은 선로부분과 PGS의 교차면적인,  $W \cdot T$ 에 비례한다(Fig. 1(a)에서 보는 것처럼  $W$ 와  $T$ 는 각각 최상위 선로와 PGS의 선로 폭이다).  $R_g$ 와  $L_g$ 는 각각 폭  $T$ 를 가지는 PGS의 주기적인 스트립의 손실과 전류 흐름에서 비롯된 인덕턴스이다.  $C_g$ 는 PGS와 GaAs 기판의 뒷면

패탈 사이의 정전용량과 일치한다.  $L_p$ 는 비아 홀에서 비롯된 기생 인덕턴스이다.  $C_c$ 는 인접한 선로들 사이의 커플링 정전용량이다. 각각의 값들은 다음 식(1)로 나타낼 수 있다. 상기 등가회로에서 알 수

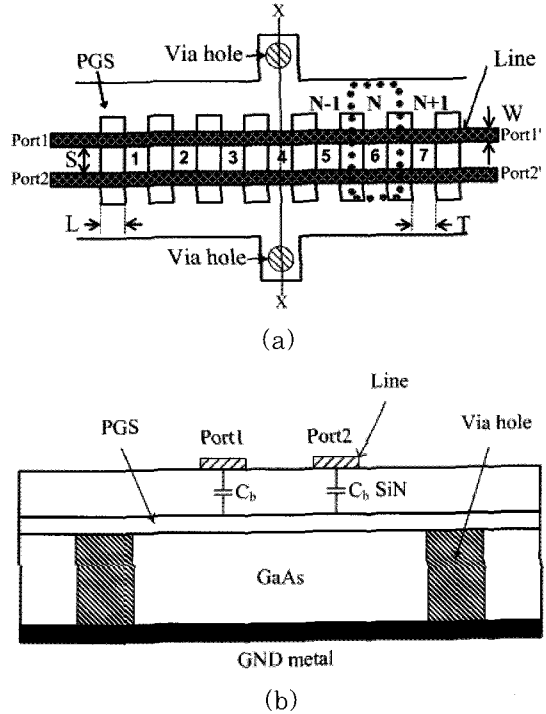


Fig. 1 (a) Top view of the coupled microstrip line structure employing PGS. (b) A cross-sectional view according to X-X direction

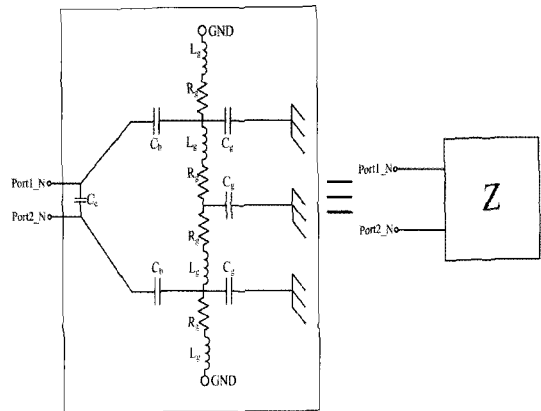


Fig. 2 Equivalent circuit for a unit section of the adjacent two lines of coupled microstrip employing PGS

있는 바와 같이 PGS를 이용한 결합선로는 공진회로 구조를 보여주고 있으며, 이러한 공진회로구조에 의해 PGS 선로구조는 종래의 전송선로에 비해 매우 높은 절연특성을 가진다. PGS 선로구조가 고절연 특성을 가지는 이유는 다음과 같이 해석될 수 있다.  $N$ 번째 구성요소(Fig. 2의 포트 1 $_N$ 과 포트 2 $_N$  사이)의 인접한 두 선로사이의 임피던스  $Z$ 는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{2}{j\omega C_c} \left\{ \frac{\frac{2L_g + L_p}{C_b} - \omega^2 L_g \cdot (L_g + L_p) \cdot \left(-\frac{C_g}{C_b} + 1\right)}{\frac{2L_g + L_p}{C_{bc}} - \omega^2 L_g \cdot (L_g + L_p) \cdot \left(-\frac{C_g}{C_{bc}} + 2\right)} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{1}{C_{bc}} = \frac{1}{C_c} + \frac{2}{C_b}$$

위의 식으로부터 Fig. 2의 회로구조는 위의 식의 분모가 0이 되는 주파수에서 공진 특성을 보여주는 것을 알 수 있다. 그리고 공진 주파수는 다음 식으로 표현된다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{L_g} + \frac{1}{L_g + L_p}\right) \cdot \frac{1}{(C_g + 2C_{bc})}} \quad (2)$$

$$\approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{L_g} + \frac{1}{L_g + L_p}\right) \left(\frac{1}{C_c} + \frac{2}{C_b}\right)}$$

상기 식들에서 SiN 막보다 GaAs 기판이 매우 얇으므로  $C_g$ 가  $C_{bc}$ 보다 매우 작으므로  $C_g$ 는 무시되며, 저항  $R_g$ 는 공진 주파수 근처에서  $j\omega(L_g + L_p)$ 보다 매우 작으므로  $R_g$ 도 무시되었다. 실제로 본 논문에서 공진은 40~60GHz 범위에서 발생하였고,  $R_g$ 는 0.5Ω보다 작았다. 따라서 상기 식을 만족하는 주파수에서 결합선로는 공진특성을 보임을 알 수 있다. Fig. 3은  $T = 5\mu\text{m}$ 이고  $S = 20\mu\text{m}$ 인 PGS 구조의 단일 구성요소에 대해 Fig. 2의 등가회로를 이용하여 계산한 절연특성을 보여준다. 그리고 계산된 회로의 파라미터들은 다음과 같다:  $R_g = 0.5\Omega$ ,  $C_g = 0.00005\text{pF}$ ,  $L_g = 0.031\text{nH}$ . 예상했던 대로 60GHz 근처에서 공진 특성을 관찰할 수 있으며, 상기 결과는 PGS를 사용한 결합 선로는 본질적으로 공진 특성을 보인다는 것을 보여준다. 상기 결과는 PGS 구조를 사용함으로써

공진특성에 기인하는 선로간 높은 절연특성을 얻을 수 있음을 암시한다.

### 3. PGS 선로구조의 공진특성에 의한 선로간 절연특성 개선효과

실험적으로 공진특성에 의한 절연특성 개선효과를 입증하기 위하여 PGS를 사용한 결합 마이크로스트립 선로를 제작하였다. 온 웨이퍼(on-wafer) 측정 기법을 사용하여 포트 1-2(Fig. 1(a)) 사이의 아이솔레이션 특성  $S_{12}$ 를 측정했다. Fig. 4는 GaAs 기판 상에 제작된 PGS를 이용한 결합선로의 사진이다.

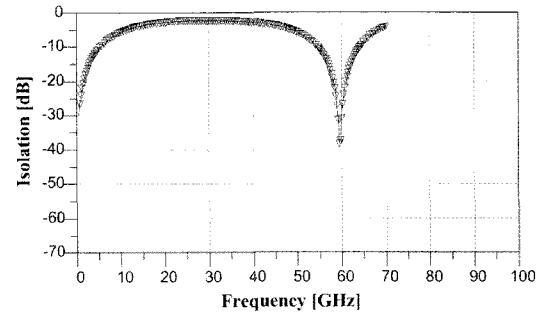


Fig. 3 Calculated isolation characteristic of the equivalent circuit for a unit section of the adjacent two lines with  $T=5\mu\text{m}$  and  $S=20\mu\text{m}$

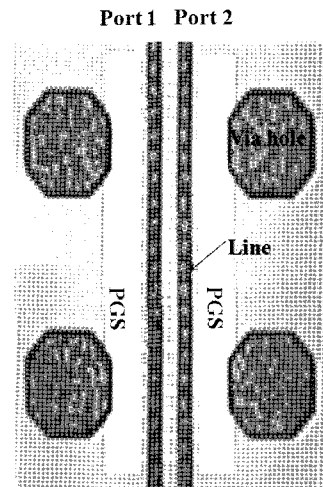


Fig. 4 A photograph of the coupled microstrip line structure employing PGS

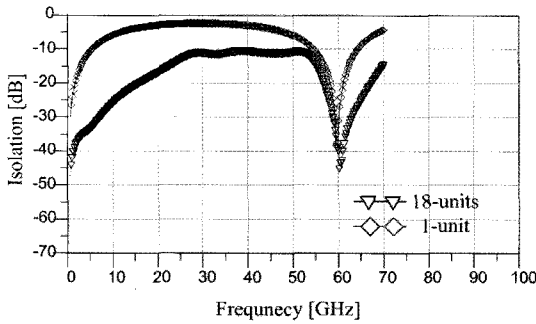


Fig. 5 Calculated isolation characteristic of the unit section of Fig. 2 and measured isolation characteristic of the microstrip line with 18-units section of PGS shown in Fig. 4

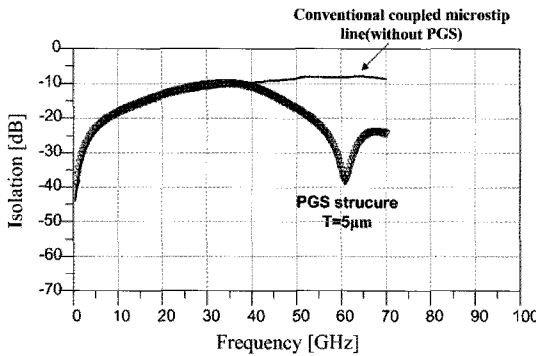


Fig. 6 Measured isolation characteristic  $S_{12}$  of the coupled microstrip line employing PGS and conventional coupled microstrip line

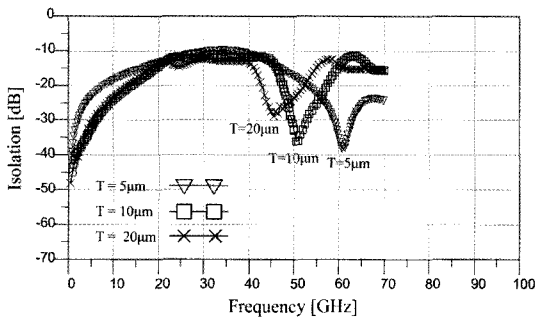


Fig. 7 Measured isolation characteristic  $S_{12}$  of the coupled microstrip line employing PGS with various values of  $T$

Fig. 3에서 관찰했던 공진특성이 PGS 선로구조에서 실제 발생하는지를 확인하기 위해 Fig. 4의 PGS 선로구조에 대한 선로간 절연특성  $S_{12}$  측정

하였으며, 측정결과는 Fig. 5에 나타내었다. 비교를 위해 Fig. 2의 단위 셀에 대한 해석결과, 즉 Fig. 3의 결과도 추가하였다. 측정치는 전체 단위 셀이 18개인 Fig. 4의 PGS 구조에 해당된다. 예상했던 대로 단위 셀에서 보이는 공진특성이 18개 셀로 구성된 PGS 회로구조에 그대로 반영되어 나타난다. 이 결과는 앞 절에서 설명하였던 사실, 즉 PGS 선로구조의 기생 LC성분은 선로간 공진을 야기시킨다는 사실이 타당함을 보여준다. PGS가 없는 기존의 마이크로스트립 결합선로간 절연특성과 PGS 결합선로구조의 선로간 절연특성 측정결과는 Fig. 6에 보여진다. 공진특성에 의해 PGS 구조는 기존의 결합선로보다 상당히 개선된 절연특성을 보여준다. 특히, 공진주파수 부근에서 절연특성이 상당히 개선됨을 알 수 있으며, 이는 PGS 선로구조는 공진주파수 부근에서 최적의 절연특성을 가짐을 의미한다. 그리고 비교를 위해 다양한 단위 셀 두께  $T$ 를 가지는 PGS 선로구조에 대한 절연특성 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다. 기본 구조는 Fig. 4와 같이 18개의 단위 셀을 가지며, 단지 단위 셀 두께  $T$ 만을 변화시켰다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 주기적 구조의 단위 셀 두께  $T$ 가 증가할수록 공진주파수가 낮아진다. 이 결과는 식 (2)로부터 쉽게 알 수 있다. 즉, 앞에서 설명한 바와 같이  $C_b$ 는 Fig. 1(a)에서 보이는 선로와 PGS가 교차하는 면적  $W \cdot T$ 에 비례하며, 따라서,  $T$ 의 증가는  $C_b$ 의 증가를 가져온다. 그러므로 식 (2)로부터  $T$ 의 증가는 공진 주파수의 감소를 가져오는 것을 쉽게 추론할 수 있다. 위의 결과로부터 단위 셀 두께  $T$ 를 변화시킴으로써 PGS 결합선로구조의 공진주파수를 쉽게 조절할 수 있음을 알 수 있으며, 이는 PGS 구조가 고절연 선로로써 다양한 시스템에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 의미한다. 즉, 시스템의 동작주파수가 결정되면 그 동작주파수에서 공진하도록 단위 셀 두께  $T$ 만 조절하면, 상기 동작주파수에서 최적의 절연특성을 가지는 PGS 선로구조를 얻을 수 있다. 그리고 상기 결과로부터 PGS 구조가 고집적 회로를 내장한 고주파 집적회로의 소형화에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다. 즉,  $T$ 가  $5\mu\text{m}$ 인 PGS 구조의 경

우, 선로간격 20 $\mu\text{m}$ 만 취하여도 60GHz에서 -47dB의 절연특성을 얻을 수 있으나, 기존의 결합선로의 경우 20 $\mu\text{m}$ 의 선로간격에 대해 -8dB의 절연특성을 보여준다. 기존의 마이크로스트립 결합선로의 경우, 60GHz에서 -47dB의 절연특성을 얻기 위해서는 선로간격이 2000 $\mu\text{m}$ 가 되어야 한다. 따라서 상기 PGS 선로구조가 MMIC상의 신호/바이어스 선로로써 사용되면, 선로간격을 매우 줄일 수 있으므로 MMIC의 크기는 매우 축소될 수 있다.

#### 4. PGS를 이용한 결합선로구조에 대한 등가회로 및 closed-form 수식추출

Fig. 1에서 보는 바와 같이 종래의 마이크로스트립 결합선로에 비해 PGS 선로구조는 매우 복잡한 형태를 취하고 있다. 따라서 공진주파수를 예측하기 위해 PGS 선로구조를 해석하기 위해서는 일반적으로 전자계 해석을 이용해야 한다. 그러나 전자계 해석의 경우는 많은 시간이 소요되고, 이는 전체 RF 회로설계의 효율성을 떨어뜨린다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 RLC 등가회로와 closed-form 수식을 추출하였다. Fig. 8은 Fig. 1의 PGS 결합선로구조에 대한 등가회로이며, 각각의 박스는 Fig. 2와 같은 RLC 구조의 등가회로이다. 단, Fig. 2에서는 공진주파수만을 구하기 위해서 최상부의 결합선로를 단지 커플링 용량  $C_c$ 로 단순화하였으나, 정확한 등가회로를 구현하기 위해서 Fig. 8에서는  $C_c$ 를 기존의 결합 마이크로스트립 라인 모델<sup>[5]</sup>을 대체하였다. 그리고 Fig. 1에 보이는 비아 홀은 인덕터로 대체하였다. Fig. 2에서 보이는 각각의 RLC값은 측정값과 등가회로로부터 계산 값과의 curve-fitting으로 구하였으며 다음과 같다.

$$C_b = \left[ 0.019 + \left( \frac{T}{d_i} \right) \times 7 \times 10^{-5} - \left( \frac{T}{d_i} \right)^2 \times 2 \times 10^{-7} \right] (pF) \quad (3)$$

$$C_g = \frac{T}{d_s} \times 10^{-3} (pF) \quad (4)$$

$$L_g = \frac{l_s}{T} \times 1.875 \times 10^{-3} (nH) \quad (5)$$

$$R_g = \frac{l_s}{T} \times 3.125 \times 10^{-2} (\Omega) \quad (6)$$

상기 식에서  $d_s, l_s$ 는 각각 100 nm와 80  $\mu\text{m}$ 이다.

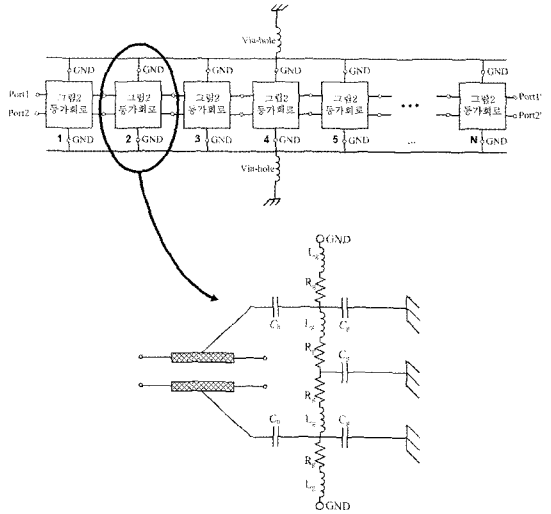


Fig. 8 Equivalent circuit for coupled microstrip line employing PGS with n-units sections

Fig. 8에서는 PGS 구조의 전체 구성요소 수만큼 등가회로를 연결하며, 그라운드 포트끼리는 서로 연결하고 실제 PGS 구조의 비아 홀이 위치하는 부분에 비아 홀의 등가 인덕터를 연결한다. Fig. 9-11은 각각  $T = 5, 10, 20\mu\text{m}$ 인 PGS구조의 절연특성 측정결과와 Fig. 8의 등가회로와 식 (3)-(6)의 closed-form 수식을 이용한 계산결과

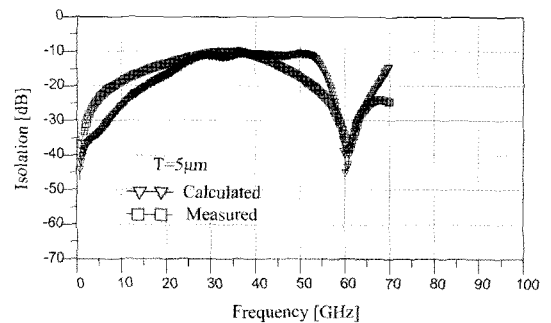


Fig. 9 Measured and calculated isolation characteristic  $S_{12}$  of the coupled microstrip line employing PGS ( $T = 5\mu\text{m}$ )

를 비교한 그래프이다. 선로간 간격은  $S = 20\mu\text{m}$ 로 고정되었으며, 전체 셀 수는 18개이다. 그림에서 보는 바와 같이 측정결과와 계산결과가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

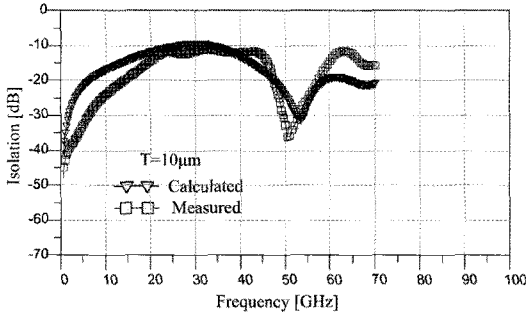


Fig. 10 Measured and calculated isolation characteristic  $S_{12}$  of the coupled microstrip line employing PGS ( $T = 10\mu\text{m}$ )

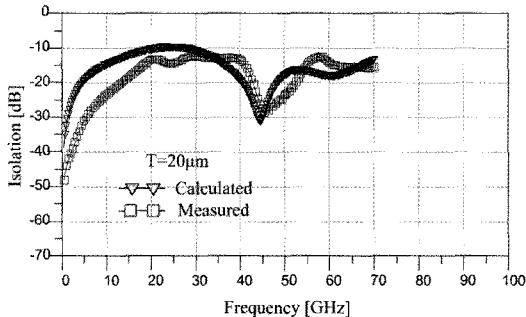


Fig. 11 Measured and calculated isolation characteristic  $S_{12}$  of the coupled microstrip line employing PGS ( $T = 20\mu\text{m}$ )

#### 4. 결 론

PGS 구조를 사용함으로써 높은 절연특성을 가지는 마이크로스트립 선로 구조를 개발하였다. 그리고 등가회로를 통한 해석결과에 의하면 PGS 선로구조의 양호한 절연특성은 기생 LC성분의 공진 특성에 기인하였다. 측정결과에 의하면 PGS 선로구조는 종래의 마이크로스트립 결합선로보다 훨씬 양호한 절연특성을 보여주었다. 구체적으로,  $T$ 가  $5\mu\text{m}$ 인 PGS 구조의 경우, 선로간격  $20\mu\text{m}$ 만 취하여도 60 GHz에서 -47 dB의 절연특성을 얻을 수

있었으나, 기존의 결합선로의 경우  $20\mu\text{m}$ 의 선로 간격에 대해 -8 dB의 절연특성을 보여주었다. 기존의 마이크로스트립 결합선로의 경우, 60GHz에서 동일한 절연특성을 얻기 위해서는 선로간격이  $2000\mu\text{m}$ 가 되어야 함을 알 수 있었다. 그리고 PGS 선로구조의 공진 주파수는 오직  $T$ 를 변화시킴으로써 쉽게 조절할 수 있었다. 상기 결과로부터 고집적 신호/바이어스 선로가 존재하는 RF 집적회로 상에 PGS 선로구조가 고절연 배선으로써 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있으며, PGS 선로구조를 이러한 배선에 사용하면 선로간 간격을 매우 좁게 취할 수 있어 RF 집적회로의 사이즈가 크게 축소될 수 있음을 알 수 있다.

#### 후 기

이 논문 또는 저서는 2008년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임 (지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단). 본 연구는 ETRI SoC산업진흥센터 IT SoC 핵심설계인력양성사업의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 부분적으로 전자부품연구원 (KETI)의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] John R. Long, "Passive Componets for Silicon RF and MMIC Design", IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, No. 6, pp. 1022-1031
- [2] Kazuya Masu, Kenichi OKADA, and Hiroyuki ITO, "RF Passive Componets Using Metal Line on Si CMOS", IEICE Trans. Electron., Vol. E89-C, No. 6, pp. 681-691
- [3] D. M. Pozar, Microwave Engineering. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990, pp. 183-190.
- [4] Y. Yun, K. S. Lee, C. R. Kim, K. M. Kim, and J. W. Jung, "Basic RF

characteristics of the microstrip line employing periodically perforated ground metal and its application to highly miniaturized on-chip passive components on GaAs MMIC", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 54, No. 10, pp. 3805-3817, Oct. 2006.

- [5] B. C. Wadell, Transmission Line Design Handbook. Boston, MA: Artech House, 1991, Ch. 3.

## 저 자 소 개



### 김세호(金世浩)

2007년 8월: 한국해양대학교 전자공학과 (공학사) 2007년 9월~현재: 한국해양대학교 전자공학과 석사과정 [주 관심분야] 무선통신용 MMIC/RFIC 등



### 강석엽(姜錫燁)

1997년 2월: 인천대학교 전자공학과(공학사) 1999년 2월: 인하대학교 전자공학과(공학석사) 2005년 8월: 인하대학교 전자공학과(공학박사) 2001년 7월~2006년 8월: (주)아이엔텍 대표이사 2006년 8월~현재: 한국해양대학교 전자공학과 연구교수 [주 관심분야] 무선통신 시스템, 초고주파 회로, 항공통신 시스템, 안테나 설계, RFID/USN 기술



### 윤영(尹榮)

1993년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사) 1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사) 1999년 3월: 일본 오사카 대학교 전기공학과 (공학박사) 1999년 4월~2003년 9월: 마쯔시타전기 반도체 디바이스 연구센터 MMIC/RFIC 연구그룹 2003년 9월~현재: 한국해양대학교 전자공학과 부교수 [주 관심분야] 무선통신용 MMIC/RFIC 등