직류 전원 공급이 가능한 Folded Corrugated SIW

A New Folded Corrugated SIW with DC Biasing Capability

조 대 근 · 이 해 영

Daekeun Cho · Hai-Young Lee

요 약

기판 집적 도파관(SIW: Substrate Integrated Waveguide)는 양면 도체 기판과 도체 비아를 사용하여 매우 얇은 구형 도파관을 형성하는 것으로 사용되는 도체 모두가 직류적으로 하나로 연결되어 있어서 직류 전원 공급이 불가능하다. 본 논문에서는 직류 전원 공급이 가능한 folded corrugated substrate integrated waveguide(FCSIW)를 제안한다. 제안된 FCSIW는 SIW에 사용되는 전도성 비아를 구부러진 형태의 개방형 스텐드로 대체하여 직류 전원 공급이 가능하다. 이 FCSIW는 기존의 직류 전원 공급이 가능한 corrugated substrate integrated waveguide (CSIW)에서 나타나는 누설과 발생이 없어서 광대역 전송 특성이 우수하고, CSIW에 비하여 전송선의 단면 폭을 30 % 줄일 수 있다. 9~15 GHz 대역에서 측정된 154 mm 길이의 FCSIW의 평균 삽입 손실(1.49 dB)이 CSIW의 값(3.08 dB)에 비하여 매우 우수함을 확인하였으며, 상호 간섭 측정으로부터 누설과 발생이 발생되지 않음을 확인하였다.

Abstract

Substrate integrated waveguide(SIW) constructed by two metal planes and conductive vias in a dielectric substrate, have all the conductors connected each other and hence, cannot be biased by DC sources. We propose a new folded corrugated substrate integrated waveguide(FCSIW) that can be DC-biased. Since the proposed FCSIW replaces the SIW conducting vias by folded open subs, it can supply the DC sources. The FCSIW has better transmission characteristics and 30 % less width than the common corrugated substrate integrated waveguide(CSIW) having a serious leakage generation problem. The FCSIW shows better insertion loss(1.49 dB) compared with that(3.08 dB) of the CSIW measured for 154 mm length devices and averaged at 9~15 GHz frequency band. No leakage has been observed from crosstalk measurements of the FCSIW.

Key words : Broadband Transmission Characteristics, Corrugated Substrate Integrated Waveguide(CSIW), DC Biasing, Folded Corrugated Substrate Integrated Waveguide(FCSIW), Open Stub

I. 서 론

기판 집적 도파관(SIW: Substrate Integrated Waveguide)는 제작이 쉽고, 낮은 삽입 손실과 소형화의 장점을 가지고 있다. 또한, 높은 Q-factor를 지니고

있기 때문에 밀리미터파 회로에 적합한 전자기파 전송 방식으로 선택되어져 왔다. SIW는 일반적인 인쇄 회로 기판에 평행한 두 열의 전도성 비아 홀 또는 비아 월을 주기적으로 배열한 유사 구형 도파관이다. 일반적으로 기판 집적 도파관은 세로축 벽면이 메탈

「이 연구는 2013학년도 National Space Laboratory(NSL) 연구비의 지원으로 연구되었음(2012-000-9107).」

아주대학교 전자공학과 초고주파응용연구실(Microwave Application Laboratory, Department of Electronic Engineering, Ajou University)

· Manuscript received February 22, 2013 ; Revised April 2, 2013 ; Accepted April 8, 2013. (ID No. 20130222-028)

· Corresponding Author : Hai-Young Lee (e-mail : hylee@ajou.ac.kr)

릭 비아 홀로 구현하였기 때문에 표면 전류가 가로 방향으로 흐르지 않는다. 따라서 기판 집적 도파관은 TE_{m0} 모드만이 존재하며, 기본 전파 모드는 TE_{10} 모드이다^{[1][2]}. 이러한 기판 집적 도파관은 크기를 줄이기 위해서 하프 모드 기판 집적 도파관, 폴디드 기판 집적 도파관이 소개되어져 왔다^[3]. 이러한 전송 선로를 바탕으로 많은 수동 소자가 연구되어지고 있지만 기판 집적 도파관 기반의 능동소자에 대한 연구는 제한되어져 왔다^{[4][5]}. 일반적으로 마이크로스트립, CPW와 같은 전송 선로는 두 개의 격리된 DC 컨덕터가 존재하기 때문에 능동 소자들과의 집적이 쉽다. 그러나 기판 집적 도파관의 경우 기판의 전면이 차폐되어 있는 단락 회로 구조의 특성을 지니고 있어 DC 전원 공급이 불가능하다. 이와 유사하게 구형 도파관의 경우는 능동 소자와 집적하기 위해서는 diode mount라 불리는 복잡한 기계적 구조를 사용해야 한다^[6]. 그러나 이러한 방법은 비용이 비싸고, 복잡하여 기판 집적 도파관에 적용하기에는 어려움이 있다^{[7]~[11]}. 따라서 직류 전력이 가능한 코러게이티드 기판 집적 도파관(CSIW: Corrugated Substrate Integrated Waveguide)이 제안되었다^[12]. 이 CSIW는 SIW의 도체옆면(side electric walls) 형태인 전도성 비아를 $\lambda_g/4$ 마이크로스트립 개방형 스텐브로 대체한 것이다. 이 구조는 SIW와 동일하게 TE_{10} 모드가 기본 모드이지만 그라운드면과 SIW의 윗면이 완벽하게 격리되어 DC 전원 공급이 가능하다^[5]. 그러나 기존의 연구된 CSIW는 개방형 스텐브의 형태가 수평 방향으로 배열되어 단면적이 증가하기 때문에 다른 회로들과의 결합이 어렵다는 단점이 있고, CSIW은 한 파장의 마이크로스트립처럼 동작하여 누설 방사 모드가 기본적으로 발생한다. 따라서 발생하는 누설 방사는 근접한 회로와의 커플링으로 신호를 왜곡하며, 방사 손실도 증가하는 단점을 나타낸다^[13].

본 논문에서는 직류 전원 공급이 가능한 folded corrugated SIW(FCSIW)를 제안한다. 제안된 FCSIW는 SIW에 사용되는 전도성 비아를 구부러진 형태의 개방형 스텐브로 대체하여 직류 전원 공급이 가능하다. 제안된 구조는 수평 방향의 개방형 스텐브를 수직방향의 개방형 스텐브로 대체하여 기존의 DC 전원 공급이 가능한 CSIW의 단면 폭을 30 % 정도 감소할 수 있고, 감소한 단면 폭에 의해 누설 방사 모

드를 매우 높은 주파수로 이동시킨다. 따라서 가용 대역에서의 불필요한 방사를 억제할 수 있고, 우수한 광대역 전송 특성을 나타낸다. 측정 결과를 통해 제안된 FCSIW(1.49 dB)는 동일한 길이의 CSIW(3.08 dB)보다 가용 주파수 대역에서 평균 삽입 손실 1.59 dB 개선과 누화 잡음 측정을 통해 누설 방사로 인한 커플링이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

II. 본 론

2-1 FCSIW의 구조

그림 1(a)은 제안된 FCSIW의 구조를 나타낸다. FCSIW는 SIW의 도체 옆면(side electric walls) 형태의

그림 1. 제안된 FCSIW의 구조
Fig. 1. Proposed FCSIW structure.

표 1. 최적화된 구조 변수

Table 1. Optimized structural parameters.

a	15 mm	S_1	0.6 mm
S_2	1.079 mm	S_3	3.5 mm
H_1	0.787 mm	H_2	0.254 mm

비아 홀들을 $\lambda_g/4$ 길이의 구부러진 마이크로스트립 스테르브를 대체한다. FCSIW는 2개의 유전체 기판을 적층한 구조로써 3개의 전도체와 접착 시트로 이루어진다. 전도체 2는 접지면 역할을 하며, 비아 홀은 전도체 1과 3을 연결하는 역할을 한다.

그림 1(b), (c)는 제안된 구조의 평면도, 정면도를 나타낸다. 제안된 구조는 측정을 위해 FCSIW 구조와 마이크로스트립 전이 구조를 연결하여 back-to-back으로 설계하였다. 그림 1(b)는 제안된 구조의 평면도(윗면, 아랫면)를 보여준다. 제안된 구조의 단면 폭 감소를 위해 folded corrugated stub의 대부분의 전기적 길이를 기판의 아랫면에 구성한다. 그림 1(c)는 제안된 FCSIW의 정면도를 나타낸다. 중간 전도체면은 접지 층이며, 비아 홀과 단락되지 않도록 유격(guard ring)을 갖는다. 전체 구조에 사용한 유전체 기판은 Taconic TL5-5($\epsilon_r = 2.2$, 높이=0.787 mm, 0.254 mm, $\tan\delta = 0.0009$)를 사용했다.

2-2 Folded Corrugated Stub의 설계

Folded corrugated stub은 동작 주파수(10 GHz)의 $\lambda_g/4$ 길이의 스테르브를 설계한다. 이 스테르브들은 각각 전도체 1의 스테르브 길이, 유전체 기판의 비아 홀 높이, 그리고 전도체 3의 스테르브 길이로 구성되며, 총 길이의 합은 동작 주파수의 90도의 전기적 위상을 갖는다. Folded corrugated stub의 설계는 세 가지 설계요소가 필요하다. 설계 요소는 스테르브의 길이, 스테르브의 간격, 스테르브의 폭이다. 스테르브의 길이는 윗면과 아랫면 전도체 그리고 비아로 구성된다. 비아는 2개의 유전체 기판의 두께에 의해 전기적 길이가 변화한다. 따라서 folded corrugated stub에서 첫 번째 설계는 유전체 기판 두께의 선택이다. 일반적으로 SIW는 기판의 높이에 따라 사용의 목적이 달라진다. 기판의 높이는 SIW의 소자와 시스템의 집적, 손실, 전력 수용 능력에 영향을 준다. 따라서 제안된 FCSIW 구조도 두 개의 유전체 기판의 목적에 따라

그림 2. 제안된 유전체 기판 2의 높이 변화에 대한 삽입 손실 해석 결과

Fig. 2. Simulated insertion loss results of the substrate 2 to the substrate height.

높이를 다르게 해야 한다. 첫 번째, 유전체 기판 1은 SIW의 직접적인 특성에 영향을 주기 때문에 안테나 응용, 저 손실 특성의 소자를 위해서는 두꺼운 기판을 사용해야 한다. 두 번째, 유전체 기판 2는 folded corrugated stub의 불필요한 방사를 감소시키기 위해 얇은 기판을 사용한다. 그림 2은 유전체 기판 2의 두께 변화에 대한 삽입 손실 해석 결과이다. 유전체 기판 2의 마이크로스트립 스테르브는 유전체 두께가 낮을수록 방사되는 전력의 양을 감소시킬 수 있기 때문에 삽입 손실을 감소시킬 수 있다. 두 유전체 기판의 두께 합을 이용하여 HFSS v.13^[14]으로 해석한 결과, 비아의 전기적 길이는 21.16°이다. 두 번째로 윗면과 아랫면 스테르브의 길이를 다음의 공식을 통해 계산할 수 있다^[15]. 표 1은 HFSS v.13으로 최적화한 파라미터 변수이다.

$$L = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{c}{4f_0\sqrt{\epsilon_e}} \quad (1)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \quad (2)$$

f_0 는 동작 주파수, λ_g 는 유전체의 파장, ϵ_e 는 유효 유전율, c 는 빛의 속도, h 는 기판의 높이, W 는 스테르브의 폭을 나타낸다. Corrugated stub은 TE 모드에서 quasi-TEM 모드로 변화는 구간이다. 따라서 스테르브는 유효 유전율에 따라 변화는 마이크로스트

립 선로이다. 제안된 FCSIW 구조는 두 개의 유전체로 이루어져 있기 때문에 전도체 1과 전도체 3에 해당하는 스테브의 유효유전율이 다르다. 식 (2)를 통해 각각의 유효유전율을 계산하고, 식 (1)을 통해 각각의 스테브의 전기적 길이를 계산할 수 있다. 식 (2)를 통해 유전체 1의 유효유전율은 $\epsilon_e = 1.785$, 유전체 2의 유효유전율은 $\epsilon_e = 1.898$ 를 계산하였다. 계산된 스테브의 전기적 길이는 유전체 기판 $1(9.62^\circ)$ 이고, 유전체 기판 $2(57.88^\circ)$ 이다. 따라서 folded corrugated stub의 모든 구간의 전기적 길이의 합은 88.66° 이다. 따라서 사용주파수 10 GHz의 $\lambda_g/4$ 개방형 스테브를 설계할 수 있다.

2-3 해석 결과

그림 3은 제안된 FCSIW와 CSIW의 전력 손실을 비교한 해석 결과이다. 해석에 사용된 기판과 메탈은 유전체 손실과 도체 손실을 모두 무시하였다. 9 ~ 12 GHz의 주파수 대역에서 전력 손실을 비교하면 FCSIW는 전 대역에서 -10 dB 이하의 값을 나타냈으며, CSIW는 방사 손실로 인하여 매우 높은 전력 손실을 나타낸다.

그림 4(a)는 제안된 FCSIW와 CSIW의 전송 특성 해석 결과를 비교한 것이다. 두 구조 동일한 길이 (120 mm로 전이 구조를 제외한 길이임)로 해석하였다. 두 구조 모두 반사 손실 10 dB 이상의 주파수 대역을 만족하지만 제안된 FCSIW는 CSIW에 비해

그림 3. 제안된 FCSIW와 CSIW의 전력 손실 해석 결과

Fig. 3. Power loss simulated results of the FCSIW and CSIW.

(a) 전송 특성

(a) Transmission characteristic

(b) 평행한 FCSIW

(b) Parallel FCSIW

(c) 근단 및 원단 누화

(c) Near-end and far-end crosstalk

그림 4. 해석 결과

Fig. 4. Simulated results.

매칭 특성이 우수하여 가용 대역(10~13 GHz)에서는 반사 손실 20 dB 이상의 정합 특성을 나타냈다. 가용 대역에서의 FCSIW의 평균 삽입 손실(1.21 dB)이 CSIW의 평균 삽입 손실(2.71 dB)에 비하여 매우 우수함을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 FCSIW, CSIW의 구조를 가용 주파수 대역인 11 GHz의 한 파장의 간격(27 mm)에 FCSIW를 구성한 그림이다. CSIW 선

로도 동일하게 구성하여 간섭 효과를 해석하였다. 그림 4(c)를 통해 제안된 FCSIW는 CSIW와 동일한 간격 λ_0 (@ 11 GHz)의 조건에서 가용 주파수 전 대역에서 상호 간섭 특성이 크게 향상된 것을 확인할 수 있다.

III. 제작 및 측정

그림 5는 제작한 FCSIW 구조이다. 제작에 사용된 기판은 Taconic TLY-5($\epsilon_r=2.2$, 높이=0.787 mm, 0.254 mm, $\tan\delta=0.0009$)를 사용했다. 또한, 유전체 기판 1과 2를 접착하기 위하여 Rogers 3001 bonding sheet($\epsilon_r=2.55$, 높이=0.038 mm)를 사용했다. 제작된 FCSIW의 크기는 15.65 mm×154 mm×1.079 mm(가로×세로×높이)이고, 제작된 CSIW의 크기는 25.55 mm×154 mm×0.787 mm(가로×세로×높이)이다. 그림 6의 측정 결과는 마이크로스트립-FCSIW 전이 구조와 2.4 mm 커넥터의 손실을 포함한 측정 결과이다. 측정 장비는 20 GHz까지 측정이 가능한 vector network analyzer를 사용하였다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 FCSIW는 반사 손실이 -15 dB 이하로 우수한 정합 특성을 보이며, 가용 대역(9~15 GHz)의 평균 삽입 손실은 1.49 dB로 CSIW(3.08 dB)에 비하여 매우 우수하다. 그림 6(b),(c)는 누화 특성을 측정한 결과이다. 제안된 FCSIW 구조의 가용 대역에서의 누화 측정 결과는 모두 -40 dB(한 파장 간격)이하의 매우

그림 5. 제작된 FCSIW와 CSIW
Fig. 5. Fabricated FCSIW and SIW.

우수한 근단 누화(near-end crosstalk), 원단 누화(far-end crosstalk) 특성을 나타냈다. 또한, 제안된 구조의

그림 6. 측정 결과
Fig. 6. Measured results.

초 근접 회로와의 신호 왜곡을 확인하기 위한 최소 파장거리($0.66 \lambda_0$)에서의 누화 측정 결과도 -30 dB (근단 누화), -25 dB(원단 누화)로 나타났다. 결과적으로 제안된 구조는 개방형 SIW이지만 누설 방사로 인한 커플링이 나타나지 않음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 직류 전원 공급이 가능한 folded corrugated SIW(FCSIW)를 제안했다. 제안된 구조는 SIW의 전도성 비아를 구부러진 형태의 개방형 스테르브로 대체하여 직류 전원 공급이 가능하게 하였다. FCSIW는 기존의 직류 전원 공급이 가능한 CSIW 보다 30 %의 단면 폭을 감소하여 누설파의 방사를 억제하였다. 제작 및 측정을 통해 FCSIW는 기존의 DC 전원 공급이 가능한 CSIW와 비교하였다. FCSIW의 가용 주파수 대역($9 \sim 15$ GHz)의 삽입 손실(1.49 dB)은 CSIW의 삽입 손실(3.08 dB)에 비하여 우수한 결과와 누화 측정 결과, -40 dB 이하의 차폐 특성을 나타냈다. 따라서 제안된 FCSIW는 고밀도 SIW 능동회로 시스템에 활용될 것으로 기대되어진다.

참 고 문 헌

- [1] F. Xu, K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide", *IEEE Trans. Microw. Theory. Tech.*, vol. 53, no. 1, pp. 66-73, Jan. 2005.
- [2] D. Deslandes, K. Wu, "Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters", *IEEE Trans. Microw. Theory. Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 593-596. Feb. 2003.
- [3] W. Hong, K. Wu, "SIW-like guided wave structures and applications", *IEICE Trans. Electronics*, vol. E92.C, no. 9, pp. 1111-1123, Sep. 2009.
- [4] M. Armendariz, V. Sekar, and K. Entesari, "Tunable SIW bandpass filters with PIN diodes", in *Proc. 40th Eur. Microw. Conf.*, Paris, France, pp. 830-833, 2010.
- [5] K. W. Eccleston, "Mode analysis of the corrugated

- substrate integrated waveguide", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 10, pp. 3004-3012, Oct. 2012.
- [6] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd Ed., New York: McGraw-Hill, pp. 835-837, 1992.
- [7] M. Abdolhamidi, M. Shahabadi, "X-band substrate integrated waveguide amplifier", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 12, pp. 815-817, Dec. 2008.
- [8] Y. Cassivi, K. Wu, "Low cost microwave oscillator using substrate integrated waveguide cavity", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 13, no. 2, pp. 48-50, Feb. 2003.
- [9] J. -X. Chen, W. Hong, Z. -C. Hao, H. Li, and K. Wu, "Development of a low cost microwave mixer using a broadband substrate integrated waveguide (SIW) coupler", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 84-86, Feb. 2006.
- [10] F. F. He, K. Wu, W. Hong, H. J. Tang, H. B. Zhu, and J. X. Chen, "Suppression of second and third harmonics using low-impedance substrate integrated waveguide bias line in power amplifier", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 7, pp. 479-481, Jul. 2008.
- [11] A. Georgiadis, S. Via, A. Collado, and F. Mira, "Push-push oscillator design based on a substrate integrated waveguide(SIW) resonator", in *Proc. 39th Eur. Microw. Conf.*, Rome, pp. 1231-1234, 2009.
- [12] D. G. Chen, K. W. Eccleston, "Substrate integrated waveguide with corrugated wall", in *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf.*, 2008.
- [13] O. Losito, "Design of conformal tapered leaky wave antenna", *PIERS online*, vol. 3, no. 8, p. 1316, 2007.
- [14] Ansoft HFSS v13:www.ansoft.com
- [15] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Ed., John Wiley & Sons, 2005.

조 대 근

2011년 2월: 아주대학교 전자공학
부 (공학사)
2013년 2월: 아주대학교 전자공학
과 (공학석사)
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계,
SIW, 안테나 설계

이 해 영

1980년 2월: 아주대학교 전자공학
과 (공학사)
1982년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 (공학석사)
1982년~1986년: 국방부 연구사무
관
1989년 12월: The University of Te-
xas at Austin (공학박사)
1990년~1992년: LG 기술원 기초1실장
1992년~현재: 아주대학교 전자공학부 정교수
2010년: 한국전자과학회장
2011년: 한국전자과학회 명예회장
[주 관심분야] 초고속 System in Package, 마이크로파회로
및 광전소자의 설계/측정, 고속반도체테스트기술, SI/ EMI
기술