

서큘레이터 기술동향 (Technology Trend of Circulator)

전동석* 이창화** 이상석*** 최태구***
(D. S. Jun, C. H. Lee, S. S. Lee, T. G. Choy)

최근 통신서비스의 보급확대에 따른 통신용 단말기의 수요가 증가하고 있으나 단말기용 핵심 부품인 서큘레이터를 전량 수입에 의존하고 있다. 본 고에서는 페라이트 재료개발 및 측정, 접합 서큘레이터, 서큘레이터의 결합방법, 회전자와 평판 회로에 대한 수치해석, 주파수 선택의 한계, GaAs 복합물, Si에 사용하는 반도체 기술을 이용한 응용기술, 페라이트 구조에 가격과 크기를 줄이기위하여 보다 간단한 단일체 회로를 제시 그리고 새로운 구조 연구와 정확한 설계에 대한 이론 연구가 활발히 진행되고 있는 유럽, 미국 일본의 기술동향과 문제점 및 대책을 기술하였다

I. 서 론

서큘레이터는 통신기기 상호간의 간섭을 줄여 줄 뿐만 아니라 핵심 부품의 보호, 임피던스정합용으로 그 용도가 매우 넓으나 선진국에서는 이에 관한 부품기술을 전혀 제공하지 않고 있으며, 국내에서 이 소자에 대한 연구는 다른 RF분야에 비해서 매우 빈약한 실정이다. 선진국에서는 관련 소재기술과 설계기술이 상당히 성숙단계에 있으나, 아직도 소자의 크기를 줄이거나 사용주파수 대역을 넓히는 등 성능향상시키기 위한 연구를 꾸준히 진행하고 있다. 따라서 본 고에는 스트립라인 접합 서큘

레이터와 집중정수형 서큘레이터를 중심으로 유럽, 미국 및 일본의 기술동향을 기술하였다.

II. 유럽의 기술동향

마이크로파 페라이트와 관련하여 연구 활동이 활발한 나라는 프랑스, 독일, 스페인, 폴란드 및 영국이다. 이들 나라의 주요과제는 페라이트 재료개발 및 측정, 접합 서큘레이터, 서큘레이터의 결합방법, 회전자와 평판 회로에 대한 수치해석 및 주파수 선택의 한계 등을 연구하고 있다.

함부르크 기술대학에서는 고유치를 기반으로한 Cavity 영역 확장 방법으로 3포트 전계면[1]과 자계면[2] 도파관 서큘레이터를 분석 연구하고 있으며, 전계면 도파관 서큘레이터는 도파관 크기 R140에

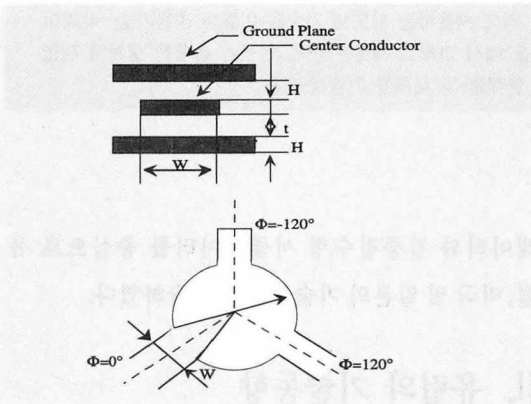
* 통신부품연구실 선임기술원

** 통신부품연구실 선임연구원

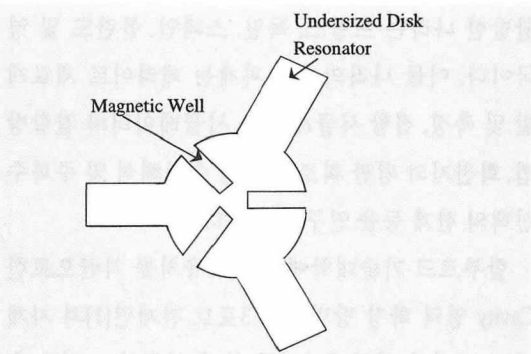
*** 통신부품연구실 책임연구원

서 R900내에 아이솔레이션이 20dB를 능가하며, 도파관 크기 R140에서 R900내에 대역폭 관계는 6%이고, 이것은 CEC-Marconi사에 의해 개발되었다[3].

광대역에서의 간결한 3포트 서큘레이터에 대한 제작 순서[3]는 임의 크기의 페라이트 판 위에 집중정수형 공진기와 폭이 좁은 결합각을 이용한 공진기를 놓고, 페라이트판 주위에 공진기 보다 고유전상수인 유전체로 둘러쌓는다. 이러한 구조에서 페라이트 원판과 내부 결합한 여분의 커패시턴스가 형성되는데, 이것을 이용한 1~2GHz 주파수대의 서큘레이터 연구가 진행중이다(그림 1, 2).

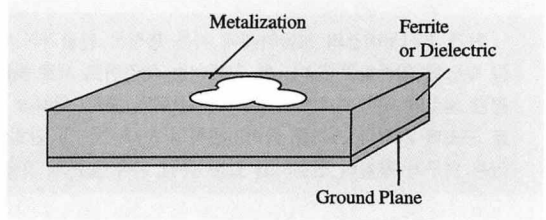


(그림 1) 스트립라인 서큘레이터

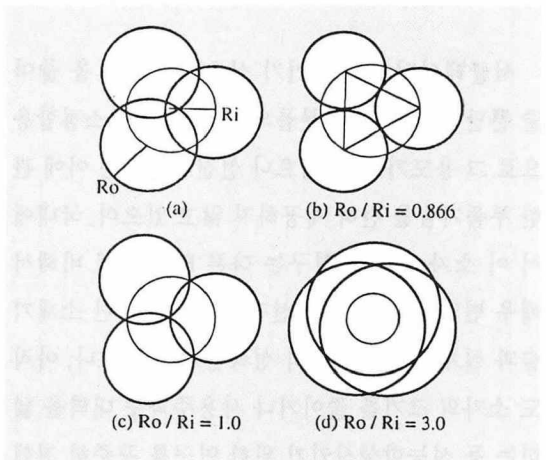


(그림 2) 자계벽을 가진 디스크 공진기

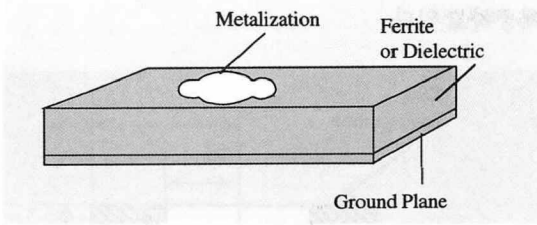
기본적으로 페라이트 모양은 3포트 혹은 4포트 접합 서큘레이터로서 디스크나 링형 모형이 대부분을 차지하고 있다. 왜냐하면, 이것이 접합의 3-fold 혹은 4-fold의 회전적인 대칭을 유지하는것은 제작과 분석하는데 용이하기 때문이며, 형상으로는 삼각형, Y자형 그리고 사각형도 사용된다. Hellszajn와 Lynch에 의해 전계벽과 자계벽의 경계조건을 이용한 크로바일(3-fold 혹은 4-fold)모양의 공진기에 대하여 해석하였다[4].



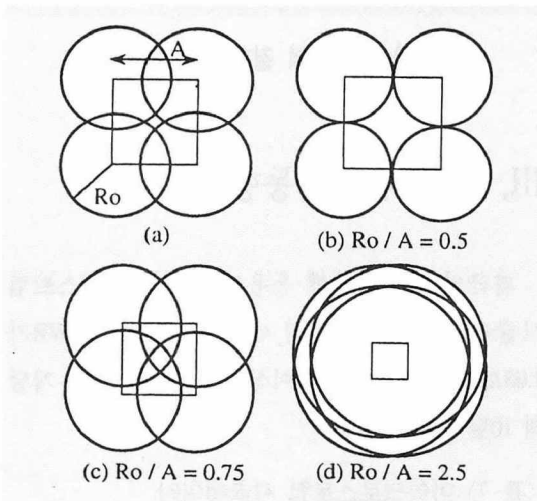
(그림 3) 대칭 3-fold로 구성된 크로바일형 평판 공진기 형태



(그림 4) (a)대칭 3-fold로 구성된 크로바일공진기에 사용된 좌표계, (b)최소의 표면적 $R_o/R_i=0.866$ 으로 구성된 크로바일 공진기 형태, (c)표면적 $R_o/R_i=1.0$ 으로 구성된 크로바일 공진기 형태, (d)표면적 $R_o/R_i=3.0$ 으로 구성된 크로바일 공진기의 형태



(그림 5) 대칭 4-fold 으로 구성된 크로바일 평판 공진기의 형태



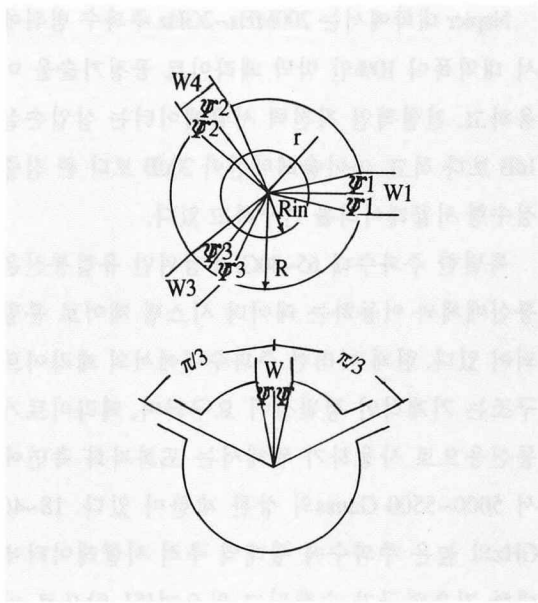
(그림 6) (a)대칭 4-fold로 구성된 크로바일 공진기에 사용한 좌표계, (b)최소 표면적 $Ro/A=0.5$ 으로 구성된 크로바일 공진기 형태, (c)표면적 $Ro/A=0.75$ 으로 구성된 크로바일 공진기 형태, (d)표면적 $Ro/A=2.5$ 으로 구성된 크로바일 공진기 형태.

(그림 3)에서 (그림 6)은 Helszajn와 Lynch가 해석할 때 사용한 모양이다. 육각형 모양의 페라이트는 중심 도체와 각 포트사이에는 대칭적으로 위치하는 토막내에 3-포트 스트립라인 서클레이터를 사용하는 것이며, 해석은 전송선과 접합 영역 사이의 정합 모드를 이용하였으며, 주파수 범위는 2~4GHz 이다.

Napier 대학에서는 200MHz~2GHz 주파수 범위에서 대역폭이 10%인 박막 페라이트 공정기술을 이용하고, 전형적인 저전력 서클레이터는 삽입손실 1dB 보다 적고, 아이솔레이션이 20dB 보다 큰 집중점수형 서클레이터를 연구하고 있다.

특별한 주파수대 65~80GHz 범위인 유럽통신은 통신매체와 이동하는 레이더 시스템 제어로 분할되어 있다. 현재 이러한 주파수대에서의 페라이트 구조는 기계적인 정밀성이 요구되며, 페라이트가 통신용으로 사용하기 위해서는 포화자화 측면에서 5000~5500 Gauss의 상한 제한이 있다. 18~40 GHz의 높은 주파수에 광대역 추적 서클레이터에 대한 기초연구가 수행되고 있으며 [5], 앞으로 이 분야에 대하여 더 연구가 되어야한다. 높은 마이크로파 주파수에서 기계적인 오차를 줄이기 위해서는 dominant 모드 대신에 고차모드의 서클레이터를 기본적으로 선택이 가능하다. 이것은 8GHz 이상일때 아이솔레이션이 15dB 이상 가지는 서클레이터($R=0.270mm$)의 dominant 모드 보다 큰 디스크 크기($R=0.467mm$)의 협대역폭(3GHz 아이솔레이션 > 15dB) 결과를 초래하게 되었고, 이는 94GHz 설계 및 trade off에 대한 이론적인 탐구로 이루어졌다 [6].

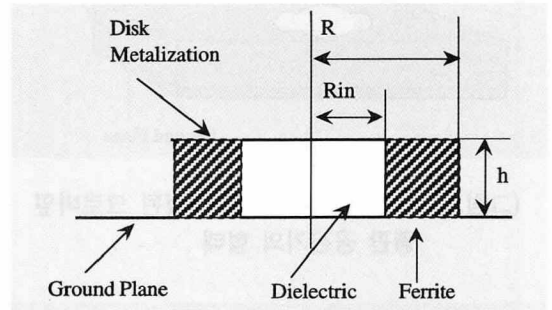
페라이트 판 혹은 링형을 사용한 비가역성 성분 에 대한 연구는 3 포트 링구조에 대한 서클레이터 조건이 자계벽인 링의 내외부 표면에 유래된다고 가정함으로써, 비대칭과 대칭 비가역성 성분을 가진다[7]. 대칭 3포트 서클레이터의 성능과 비대칭 3 포트 판 서클레이터에 대해서는 참고 문헌[8]을 참조하기 바란다. (그림 7a)는 Y형 서클레이터이고, (그림 7b)는 W형 서클레이터이다.



(그림 7) (a) 링형 페라이트의 Y형 서큘레이터 좌표계 (b) 디스크형 페라이트의 W형 서큘레이터 좌표계

서큘레이터는 일반적으로 사용하는 각도인 120°를 사용하지 않고 60°를 이용한 3포트 공간 면을 하면 내환경적 측면에서 신뢰성이 더 좋아진다[9]. 서큘레이터 조건, 실험 데이터 및 몇몇 페라이트/유전체 서큘레이터 성분에 대하여 전산화하였는데, 이것은 일찌기 가정한 자계벽에 대하여 단지 0.2보다 적은 외경과 내경 크기의 비율(Ri/Ro)이 근사하다[9]. 이것보다 큰 구멍에 대해서는 전체 페라이트/유전체 이론을 사용해야 한다는 것이다. (그림 8)은 평판 위에 Y-Ring 서큘레이터의 DF-ring에 대한 것이다. 반도체 접합 서큘레이터는 페라이트 기술[10]에서 온 것은 아니지만, 페라이트 서큘레이터와 유사하다는 점에서 기대된다. 반도체 접합 서큘레이터는 MMICs를 비가역성 성분의 새로운 가능성을

제공하고 있다.



(그림 8) DF 링의 결합되지 않은 구조

III. 미국의 기술동향

최근의 위상변위에 응용되는 마이크로스트립 서큘레이터는 <표 1>의 예와 같이[11], VSWR가 1.05보다 적은것이 90% 이상이고, 생산가격은 개당 약 10달러이다.

<표 1> 마이크로스트립 서큘레이터 (Electromagnetic Sciences사)

Frequency	7~11 GHz
Insertion Loss	0.35 dB
Isolation	25 dB
Reflection Uniformity	40 dB
Size	0.33 × 0.15 × 0.8"
Weight	12g

Raytheon사에서 최근 6~18GHz용 서큘레이터를 <표 2>와 같은 성능으로 개발하였다[12]. 이 서큘레이터는 페라이트 공간내에 포화자화 비균등함을 줄이기위해 페라이트 내에 낮은 포화자화 재료를 보충하였으며, 온도에 의한 손실을 최소화 하기위해 재료와 형상을 최적화한 점이다.

<표 2> 마이크로스트립 서큘레이터 (Raytheon사)

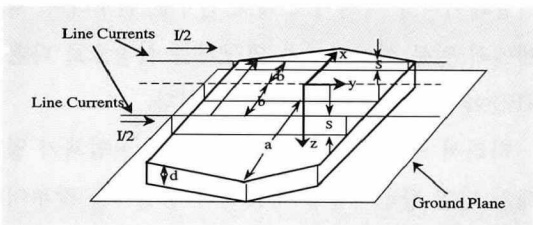
Frequency	6~18 GHz
Insertion Loss	≤ 1.0dB(≤ 0.6 dB from 6.5~17.5 GHz)
Isolation	≥ 14 dB(≥ 18 dB from 6.5~18GHz)
VSWR	<1.2:1
Phase Tracking	± 5°
Amplitude Tracking	± 0.1dB
Size	0.140 × 0.275 × 0.6"

집중정수형 서큘레이터의 일반적인 특징으로는 사용주파수가 광대역인 장점과 사용 대역폭의 제한 및 저항손실이 크다는 단점이 있다. 그러나 소형화가 요구되는 3GHz대 주파수영역에서 집중정수형 서큘레이터의 사용이 증가될 것으로 전망된다[13].

최근에 개발된 Raytheon사 집중정수형 서큘레이터의 예는 <표 3>과 (그림 9)에 나타내었다[14]. 유사한 모양은(0.1 넓은 육각형 디스크) 삽입손실이 0.3 dB 보다 적고, 아이솔레이션 대역폭이 5% 보다 크다.

<표 3> 집중정수형 서큘레이터 (Raytheon사)

Frequency	1.15~1.40 GHz
Insertion Loss	0.5 dB
Isolation	20 dB
Weight	1.8 g
Ferrite Size	0.2"(hex) × 0.02"



(그림 9) 결합계수 K와 확장 품질계수 Qe의 계산에 사용된 육각형 디스크와 결합라인의 기하학적 배열

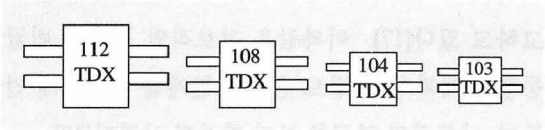
현재 서큘레이터 설계는 Bosma 이론을 기반으로 하고, 그것을 확장하였다[15]. 이 모델은 몇가지 비정확한 경계조건, 즉 손실 흡수 그리고 균등한 매체를 가정함으로써 이상적이다. 실질적으로 개선이 필요한 부분은 이들 제한을 제거하고, 몇몇 진보적인 결과를 얻기 위한 방법이다. 마이크로스트립 및 스트립라인에 대한 경계조건의 비정확성은 자계벽 경계조건 제한이 스트립라인 페라이트 공진기에 대하여 제거되어야 한다고 제시되고 있다[16]. 최근에 유전체, 자성체 그리고 저항손실은 Bosma 공식과 상호 연관 관계가 있는것이 아니라는 것을 보고하고 있다[17]. 이와같은 진보적인 생각은 비균등한 자계과 낮은 필드 손실의 관계를 이해하게 만들며, 이론적인 연구를 보다 활성화 시켰다[18].

IV. 일본의 기술동향

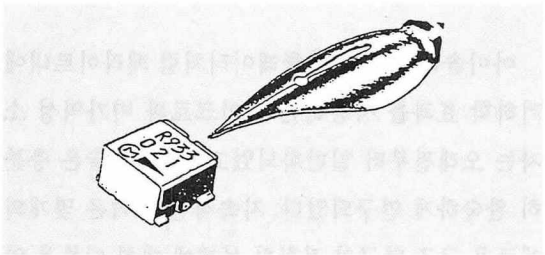
아이솔레이터 및 서큘레이터처럼 페라이트내에 기하학 효과를 사용하는 마이크로파 비가역성 소자는 오래전부터 일반화되었고, 이들 기술은 충분히 완숙하게 연구되었다. 지속적인 노력은 몇개의 새로운 구조 연구와 정확한 설계에 대한 이론을 연구하게 되었다. 몇가지 예로 3개의 YIG판과 완전 결합된 공진기를 이용한 스트립라인 Y접합 서큘레이터[19]와 YIG 단결정판을 사용한 edge-guided 모드를 이용한 서큘레이터 이다[20]. 보다 더 산업적인 관점에서 보면, 이들 마이크로파 소자의 응용은 최근 전화통신에서 가장 빠르게 확장되었고, 방송 혹은 소비자의 전자적 장비응용에 많이 사용되고 있다. 이것은 몇몇 단순한 크기, 경량, 저가 그리고 소비자의 응용에 대한 생산성을 많이 얻기위하여

기술향상에 대한 지속적인 노력이 가능하게 하였다. 이는 이동통신 시스템 사용하는 아이솔레이터의 발전이 그 예로 분명하게 보여주고 있다.

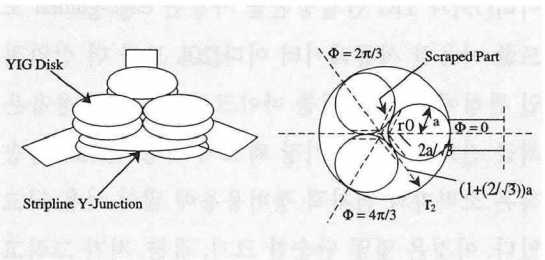
(그림 10)은 1984년~1991년까지 아이솔레이터의 소형화 추세이다. 가장 최근 휴대폰 전화에 사용된 아이솔레이터는 소형 SMD(surface mount device)형으로 (그림 11)과 같으며, 이것의 넓이는 $6.8 \times 6.9 \times 4 \text{ mm}^3$ 그리고 무게는 0.75g이다[21]. (그림 12)는 3개의 페라이트 접합을 가진 스트립라인 Y 서큘레이터의 구조이다.



(그림 10) TDK사에서 제공한 이동통신용 아이솔레이터 크기의 변화



(그림 11) Murata사에서 생산한 800MHz대 소형 아이솔레이터



(그림 12) Y-서큘레이터의 구조

V. 결 론

서큘레이터는 이동 및 위성통신 시스템의 RF송신 및 수신부에 주로 사용되며, 핵심부품의 보호, 임피던스 정합 및 간섭제거 등의 목적으로 주파수 대역이 높아감에 따라 사용용도가 많아질것이라고 전망되며, 현재의 Local통신방식에서 Global통신방식으로 채택됨에 따라 2000년대에는 더욱 많이 사용될것이라고 전망된다. 이러한 서큘레이터에 대한 선진국의 연구를 요약하면 다음과 같다.

유럽에서는 주로 페라이트 재료의 개발과 측정, 필터, 접합 서큘레이터, 서큘레이터의 결합방법, 회전자의 평판 회로에 대한 수치해석과 반도체 기술을 이용한 응용기술 등을 연구하고 있다.

미국은 최근에 GaAs, 복합물 그리고 Si에 사용하는 반도체 기술을 이용한 응용기술이 활발히 연구되고 있으며, 페라이트 구조에 가격과 크기를 줄이기 위하여 보다 간단한 단일체 회로가 연구되고 있으며, 그 결과로 하이브리드 설계 뿐만 아니라 기술이 단일체 구조로 유도되고 있다.

일본은 새로운 구조 연구와 정확한 설계에 대한 이론 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내에서 서큘레이터에 관한 연구에 있어서는 서큘레이터용 페라이트 재료 연구는 전무하며, 학계에서 일부 설계이론을 연구하는 실정으로 다른 RF분야에 비해서도 빈약한 실정이다.

따라서 연구소를 중심으로 학계와 산업체가 일체가 되어 관련기술을 확보하여 경쟁력을 갖추어야 한다. 여기에는 재료개발과 설계기술이 동시에 병행되어야 한다는 전제가 필요하다. 특히 이 부품은 통신분야에 주요한 부품이며, 통신의 품질에 관

련되는 부품으로 활용용도가 매우 크므로 시급히 개발해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Y.Y.Tsai and A.S.Omar, "Field Theoretical Treatment of E-Plane Waveguide Junction with Anisotropic Medium," *IEEE Trans.MTT*, vol.40, no.12, pp.2164-2171, Dec. 1992.
- [2] Y.Y.Tsai and A.S.Omar, "Field Theoretical Treatment of H-Plane Waveguide Junction with Anisotropic Medium," *IEEE Trans.MTT*, vol.41, no.2, pp.274-281, Feb. 1993.
- [3] J.Helszain and R.D.Baars, "Synthesis of Wide-Band Planar Circulators Using Narrow Coupling Angle and Undersized Disk Resonators," *IEEE Trans. MTT*, vol.39, no.10, pp.1681-1687, Oct. 1991.
- [4] J.Helszain and D.J.Lynch, "Cut-off Space of Cloverleaf Resonators with Electric and Magnetic Walls," *IEEE Trans.MTT*, vol. 40, no.8, pp.1620-1629, Aug 1992.
- [5] M.T.Hickson, L.E.Davis, D.K.Paul, and D.B.Sillars "Computer-Aided Design and Optimisation of Broadband Stripline Circulators for 18-30 GHz and 18-40 GHz," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, Boston, pp.961-964, June 1991.
- [6] L.E.Davis, "Computer-Aided Design of Ferrite Junction Circulators," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, Albuquerque, June, 1992.
- [7] V.A.Dmitryev and L.E.Davis, "Nonreciprocal Devices using Ferrite Ring Resonators," *Proc.IEE, Part H*, vol.139, no. 3, pp.257-263, June 1992.
- [8] A.M.Borjak and L.E.Davis, "More Compact Ferrite Circulator Junctions with Predicated Performance," *IEEE Trans.MTT*, vol.40, no.12, pp 2352-2358, Dec. 1992.
- [9] A.M.Borjak and L.E.Davis, "On Planar Y-Ring Circulators," *MTT* vol.42, no.2, Feb. 1994.
- [10] L.E.Davis and R.Sloan, "Semiconductor Junction Circulators," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, Atlanta, June 1993.
- [11] R.E.Blight and E.Schloemann, "A Compact broadband circulator for phased array antenna modules," 1992 *IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest*, pp.1389-1392, 1992.
- [12] E.Schloemann, "Lumped-element circulator optimization," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.Digest*, pp.757-759, 1988.
- [13] R.E.Blight, "Recent developments in the design of miniature lumped element L-band circulators for hybrid circuits," *1990 Microwave Hybrid Circuit Conference*, Nov. 1990.
- [14] H.Bosma, "On stripline Y-circulator at UHF," *IEEE Trans.MTT-12*, pp.61-72, Jan. 1964.
- [15] M.T.Latrach, T.Mondiere, and F.Jecko, "A new design of cylindrical closed triplate ferrite resonators compareed with magnetic wall approximation," *IEEE Trans.Magnetics*, no.26, pp.2856-2862, Sept. 1990.
- [16] R.E.Neidert and P.M.Phillips, "Losses in Y-junction stripline and microstrip ferrite circulators," *IEEE Trans.on MTT*, vol.41, pp.1081-1086, July 1993.
- [17] E.Schloemann, "Theory of low-field loss in partially magnetized ferrites," *IEEE Trans.on Magnetics*, no.28, pp.3300-3302, Sept. 1992.
- [18] A.M.Barjok and L.E.Davis, "More compact ferrite circulator junction with predicted performance," *IEEE Trans. on MTT*, vol.40, no.12, pp.2352-2358, Dec. 1992.
- [19] T.Nagao and Z.Tanaka, "Magnetically Tunable Stripline Y Circulator," *IEEE MTT-S Intl. Microwave Symp.Digest*, pp.1011-1014, 1990.
- [20] K.Okubo and M.Tsustumi, "The Edge-Guided Mode Isolator Using YIG Single Crystal Disk," *IEICE Japan Technical Report*, MW 92-33, pp.17-22, 1992.
- [21] Y.Ishikawa, T.Okuda, T.Kawanami, K.Okamura and T.Nishikawa, "A Miniature Isolator for 800 MHz Band Mobile Communication System," *Trans. IEICE Japan*, vol.E 74, no.5, pp.1226-1232, May 1991.