



دانشگاه زنجان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه برق مخابرات

عنوان پایان نامه:

تغییر دهنده های فاز فریتی

استاد راهنما:

دکتر حبیب اله زلفخانی

ارائه دهنده:

رامین ستاری

شماره دانشجویی:

87442142

تابستان 1392

با بیان نامه کارشناسی

تقدیم به همسر مهربانم که یاور آزمایشگاه پروژه برق

همیشگی من در زندگی ام بوده و

اگر دلگرمی های او نمی بود به

یقین امروز انجام این مهم برایم

ممکن نبود.

پایان نامه کارشناسی

با تشکر فراوان نجاج از اشکحات و

راهنمایی های استاد محترم جناب

آقای دکتر زلفخانی

فهرست

پیش مقدمه	1
تاریخچه	1
عناوین پایان نامه	4
فصل اول : مقدمه	5
1.1 خصوصیات اساسی مواد فری مغناطیس	6
1.1.1 تانسور ضریب نفوذ مغناطیسی	7
2.1.1 میدان های دایروی پلاریزه شده	17
3.1.1 اثر تلفات	18
4.1.1 فاکتورهای از بین برنده ی خاصیت مغناطیسی	22
2.1 انتشار موج مسطح در یک محیط فریتی	25
1.2.1 انتشار در جهت بایاس (چرخش فارادی)	26
2.2.1 انتشار عمود بر بایاس (شکست دوگانه)	27
3.1 انتشار امواج در موجبر مستطیلی فریت دار	28
فصل دوم : بنیادی از تغییر دهنده های فاز فریتی	29
2.1 تعاریف اساسی	29
2.2 دسته بندی تغییر دهنده های فاز فریتی	31
1.2.2 کلاس بندی در روابط واسطه ی انتقال	31
2.2.2 مغناطیس شدگی طولی در برابر متقاطع	32
3.2.2 عملکرد دوسویه در برابر غیر دوسویه	32
4.2.2 عملکرد چفت شدنی در برابر چفت نشدنی	33
5.2.2 عملکرد دیجیتال در برابر آنالوگی	34
3.2 مشخصات کارای تغییر دهنده های فاز فریتی	35
1.3.2 درج تلفات	35
2.3.2 دقت فاز	36

38	3.3.2 زمان سوئیچینگ.....
38	4.3.2 قابلیت دستکاری توان.....
39	5.3.2 وزن و اندازه ی فیزیکی.....
39	6.3.2 ساختار مناسب.....
40	4.2 توپولوژی های تغییر دهنده های فاز فریتی.....
40	1.4.2 تغییر دهنده ی فاز فریتی رجیا-اسپنسر.....
41	2.4.2 تغییر دهنده ی فاز فریتی چنبره -دوقلو.....
44	3.4.2 تغییر دهنده ی فاز فریتی چرخش فارادی.....
45	4.4.2 تغییر دهنده ی فاز فریتی تک -چنبره.....
46	5.4.2 تغییر دهنده ی فاز فریتی مد-دوتایی.....
47	6.4.2 تغییر دهنده ی فاز فریتی میدان دوار.....
51	7.4.2 تغییر دهنده ی فاز فریتی خط ماریچی.....
53	فصل سوم : آنالیز و طراحی تغییر دهنده ی فاز فریتی رجیا-اسپنسر.....
53	1.3 ملاحظات طراحی.....
54	1.1.3 تعیین کردن هندسه و پارامترهای ماده ی فریتی.....
57	2.3 آنالیزهای عددی.....
57	1.2.3 آنالیز DPS.....
59	2.2.3 اثر چرخش فارادی روی خصوصیات انتقال.....
60	3.2.3 تطبیق امپدانس.....
61	3.3 ملاحظات کاربردی و نتایج اندازه گیری.....
63	1.3.3 آزمایش اول.....
64	2.3.3 آزمایش دوم.....
66	3.3.3 آزمایش سوم.....
69	4.3 نتیجه.....
70	فصل 4 : آنالیز عددی و تحلیلی تغییر دهنده ی فاز فریتی چنبره -دوقلو.....
71	1.4 تقریب ورقه -دوقلو.....

1.1.4	قانون عملکرد	72
2.1.4	حل عددی و تحلیلی تغییر فاز تفاضلی	77
3.1.4	حل عددی و تحلیلی درج اتلاف	80
2.4	آنالیز عددی هندسه ی دقیق چنبره-دوقلو	84
1.2.4	شبیه سازی های مغناطیس ساکن شار مغناطیسی	84
2.2.4	شبیه سازی تغییر فاز تفاضلی	86
3.2.4	شبیه سازی مدل های مرتبه بالاتر	89
فصل 5: بهبود یابی های عملی		
1.5	جبران سازی دمایی	94
2.5	جبران سازی فرکانس	94
3.5	کارهای آینده	96
1.3.5	موقوف سازی مقاومتی	96
2.3.5	استفاده از مواد فریتی توان بالا	97
4.5	سرانجام	99

ضمایم

A	ویژگی های عمومی و خصوصیات ماکروویوی مواد فریتی	100
A.1	ویژگی های عمومی	100
A.2	هیستریزس مغناطیسی	101
A.2.1	حلقه های هیستریزس کوچکتتر	103
A.2.2	اثر دما بر روی مغناطیس شدگی	104
A.2.3	اثر فشار بر مغناطیس شدگی	105
B	خصوصیات برخی مواد فریتی میکروویوی	108
C	ثابت و تاثرات تلفات دی الکتریک برای برخی مواد	109
D	معماری شیفت دهنده ی فاز	110
D	تغییر دهنده های فاز دیجیتال	110
D.1	تغییر دهنده ی فاز خط سوئیچ شده	110

- 111..... (D.2) تغییر دهنده ی فاز نوع انعکاسی
- 112..... (D.3) تغییر دهنده ی فاز خط بارگذاری شده
- 113..... (D.4) تغییر دهنده ی فاز نوع بالا گذر - پایین گذر
- 116..... (D.5) تغییر دهنده های فاز دیجیتال چند بیتی
- 117 (A) تغییر دهنده های فاز پیوسته
- 118..... (A.1) تغییر دهنده ی فاز نوع انعکاسی آنالوگ
- 119..... (A.2) تغییر دهنده ی فاز نوع فیلتر تنظیم پذیر
- 120..... (A.3) تغییر دهنده ی فاز خط انتقال متناوبا بارگذاری شده
- 122..... (A.4) تغییر دهنده ی فاز نوع FET ورودی دو تایی
- 123..... (A.5) تغییر دهنده ی فاز الحاق فاز
- 127..... خلاصه ی معماری تغییر دهنده های فاز
- 127 کاربرهای دیگر تغییر دهنده های فاز
- 128 (1) درجه بندی I-Q
- 129..... (2) برگرداننده - مدولاتورهای فرکانس
- 130..... جمع بندی
- 131..... مراجع

پیش مقدمه

تغییر دهنده های فاز، وسیله های میکروویوی برای تغییر دادن فاز الحاقی سیگنالهای الکترومغناطیسی هستند.

اگرچه سیستم آنتن رادارهای آرایه فازی اصلی ترین کاربرد تغییر دهنده های فاز است، آنها در ابزارهای

سنجشی میکروویو و سیستم های اندازه گیری و تنظیم و نیز در صنعت به کار برده می شوند. [1]

سیستم های آرایه فازی مدرن گاهی نیازمند هزاران تغییر دهنده ی فاز هستند که مستلزم کنترل دقیق فاز برای

کنج ها و خطاهای هدایتی می باشند. بسته به الزامات سیستم، تغییر دهنده های فاز می توانند در ترازهای

مختلف توان از میکروویو تا میکروویو قرار گرفته و کنترل شوند.

تغییر دهنده های فاز را می توان در سه دسته اصلی براساس شرایط مواد اساسی به کار برده شده برای تغییر فاز

الحاقی به صورت: تغییر دهنده های فاز نیمه هادی نامی، تغییر دهنده های فاز فروالکتریک و تغییر دهنده های

فاز فریتی طبقه بندی کرد.

تغییر دهنده های فاز فریتی یک دسته ی بخصوص از کابل های تغییر دهنده ی فازند که در ترازهای توان

فرکانس رادیویی بالا به کار برده می شوند. تغییر دهنده های فاز فریتی می توانند از فرکانس رادیویی تا فرکانس

موج میلیمتری با درج تلفات کم عمل کنند. تغییر دهنده های فاز فریتی بعد از سال 1950 میلادی در سیستم

های آرایه فازی به کار برده می شوند، مخصوصا در کاربردهایی که دارای توان و قابلیت بالا می باشند.

تاریخچه

مواد فریتی مدرن برای اولین بار اواخر جنگ جهانی دوم در کار اسنوک و شرکت کارگران [2-4] ظاهر شدند.

این کار در تحقق بخشیدن به هسته ی ترانسفورماتورهای فرکانس بالای دارای نفوذپذیری مغناطیسی بالای

بدون تلفات جریان گردابی متمرکز شد. در سال 1948 روابط "فرومغناطیسی" و "فریت" ابتدا در مطبوعات

فنی، زمانی که نیل [5] ویژگی های مغناطیسی این مواد مغناطیسی را کشف کرده بود، ظاهر شد. در سال 1949

پولدر [6] فریت ها را در روابط حساسیت تانسور تشریح کرد و این مدل، پایه ی آنالیز واکنش فریت به تحریک

مایکروویوی قرار گرفت. قبلا برای ایجاد تغییر دهنده های فاز متغیر الکتریکی، از تغییر دهنده های فاز

مکانیکی استفاده می شد. تغییر دهنده ی فاز چرخان برای اولین بار به وسیله فکس در 1947 [7] پیشنهاد شد

و تغییر دهنده ی فاز خط هلیکال به وسیله استراک در 1957 [8] گزارش داده شد. این ها مثال هایی از تغییر

دهنده های فاز مکانیکی می باشند. اسپارفمن [9] سه دگرگونی از یک فریت طولی مغناطیس شده ی به کار

برده شده در موجبر را توضیح داد. در 1956 انجل ککس و کرمن [10] دریافتند که به عنوان تغییر دهنده ی فاز

تشعشع می تواند به وسیله ی عملکرد یک میدان DC در فریت مادون آن که برای تشدید فرومغناطیسی نیاز

بود، تغییر یابد. رجیا و اسپنسر [11] در سال 1957 اولین تغییر دهنده ی فاز کاربردی برای استفاده در آنتن های

آرایه ای را گزارش کردند. این قطعه ی دو سویه، تغییر دهنده ی فاز رجیا-اسپنسر نامیده می شود و باید به

صورت پیوسته برانگیخته شود. گونه ی چفت شدنی در ادامه توصیف شده بود. [12]

در سال 1958 کالوین [13] ورقه های فریتی را ابداع نمود که در مقابل دیواره های موجبر مستطیلی قرار می

گرفت. ترومافت و سیلبر [14] ابتدا چنبره های داخلی را برای فاز دهنده های موجبر غیر دو سویه جهت از بین

بردن مدارهای مغناطیسی خارجی پیشنهاد کرد. این رویکرد عملکرد چفت سازی را امکان پذیر ساخته و به

صورت قابل توجهی زمان و توان سویچ زنی را کاهش داد. تغییر دهنده ی فازی چنبره دوقلو (با اجتناب از سیم

های سویچ کننده برای کوپل میدان های RF بالا) به مشکلات انتشار مدهای مرتبه بالا در ساختارهای تک چنبره فائق

آمد. [15] همچنین با تولید ساختارهای موجبری با فلزی کردن ساختار چنبره-دوقلو، وزن و ابعاد تغییر دهنده ی فاز تا حد زیادی کاهش پیدا کرد.

در طول دهه های 1960 و 1970 سویچ زنی سریع، دیجیتالی، تغییر دهنده ی فاز چفت کننده یکی از عوامل

پیشرفت قطعات فریتی شده بود. [16] در سال 1970 تغییر دهنده ی فاز دو مده گزارش شده توسط بوید و ویکر

[17-18] جایگزینی برای تغییر دهنده ی فاز رجیا-اسپنسر به عنوان واحد تغییر فازی دو سویه شد. به علت اندازه

ی فیزیکی و قیمت تولید پایین تغییر دهنده های فاز دو مده، این قطعه در هر دو آرایه های فازی اسکن کننده

ی تک و دو محوره در مقادیر بزرگ به کار می روند. همچنین تغییر دهنده ی فاز فریتی دو مده باعث کاهش

اتلاف الحاقی در فرکانس های موج میلیمتری شدند. [1] هارد، روزنوم و بنت [19] تغییر دهنده ی فاز فریتی از

نوع چرخش فارادی را گزارش کردند. در سال 1972 بوید و کلینی [20] تغییر دهنده ی فاز میدان دوار با ویژگی

دوسویه و دقت تغییر دهندگی فاز را گزارش کردند. اندازه ی فیزیکی قطعه باعث می شد که این قطعه فقط در

سیستم های اسکن کننده ی تک محور، کاربرد داشته باشد. اتلاف الحاقی پایین و ویژگی تغییر فاز پیمانه 360

درجه از ویژگی های عملکردی اصلی تغییر دهنده های فاز فریتی میدان دوار می باشد. نوع چفت شدنی این

گونه از تغییر دهنده های فاز در سال 1995 توصیف شده است. [21] تغییر دهنده ی فاز میکرو استریپ خط

مارپیچ دار در مقایسه با تغییر دهنده ی فاز فریتی موجبری [22-23]، باعث کنترل فاز در ابعاد کوچکتر شده،

همچنین توان کاربردی لازم برای قطعات فریتی مسطح نسبت به قطعات موجبری بسیار کوچکتر است. اخیراً با

ترکیب سرامیک های ابر رسانای دمای بالا با مواد فریتی تلاش های فراوانی صورت گرفته است. برای دستیابی

به قطعات فریتی میکروویو با اتلاف کم و پهنای باند زیاد. [24] یک شیف فازی تفاضلی افزون بر 200 درجه با

یک اتلاف الحاقی زیر 4 دسی بل از 6 تا 12 گیگاهرتز توسط دیون گزارش شده بود. [25]

عناوین پایان نامه

در فصل یک سعی شده است تا مقدماتی از خواص فریت ها و نیز انتشار امواج با برخی پلاریزاسیون های

ساده و در حالت کلی مطالبی آورده شده تا مطالب فصول بعد، قابل هضم تر گردند.

در فصل دو خواص کلی تغییر دهنده های فاز فریتی توصیف شده است. طبقه بندی تغییر دهنده های فاز بر

اساس خواص الکتریکی ارائه شده است. چندین گونه ی مهم از تغییر دهنده های فاز نیز توصیف شده اند.

در فصل سه فرایند طراحی و ساخت تغییر دهنده ی فاز فریتی رچیا-اسپنسر دو سویه در باند X ارائه شده

است. نتایج اندازه گیری قطعات ساخته شده ارائه شده و با نتایج حاصل از شبیه سازی EM مقایسه شده است.

در فصل چهارم آنالیز عددی و تحلیلی تغییر دهنده ی فاز چنبره-دوقلو مورد بحث قرار گرفته است. مدل شبیه

سازی EM برای هندسه چنبره-دوقلو بر اساس نتایج تحلیلات ارائه شده در [26] بهبود یافته اند. این مدل ها

برای ساختار چنبره-دوقلو بسط داده شده و نتایج مدل با نتایج عملی اندازه گیری شده از تغییر دهنده ی فاز

چنبره-دوقلو در باند X مقایسه شده است. [27]

فصل پنجم مختصرتر از فصول دیگر می باشد و شامل نظراتی در راستای بهبود سازی ساختار تغییر دهنده ها

می باشد.

ضمایم را سعی کردیم شامل مطالبی کنیم که در صورت بروز ابهاماتی در متن پایان نامه، قابل رفع از طریق آن

ها باشند.

فصل 1

مقدمه [28]

در مایکروویو عناصر و شبکه های هم پاسخ وجود دارد، بدین معنی که پاسخ میان هر دو دهانه ی i و j در

یک عنصر بستگی به جهت جریان سیگنال ندارد ($S_{ij}=S_{ji}$). این اتفاق زمانی رخ می دهد که عنصر و شبکه ی

مورد بحث از مواد غیرفعال و متجانس تشکیل شده باشند، اما اگر موارد مورد استفاده نامتجانس (دارای خواص

متفاوت در جهات مختلف) باشند، در آن صورت رفتار غیرهم پاسخ به دست خواهد آمد.

کاربردی ترین مواد نامتجانس برای کاربردهای مایکروویو ترکیبات فرومغناطیس مانند YIG (گارت آهن ایتروم)

و فریت های مرکب از اکسیدهای آهن و سایر عناصر مختلف همچون آلومینیوم، کبالت، منگنز و نیکل.

برخلاف مواد فرومغناطیس (نظیر آهن و فولاد)، ترکیبات فری مغناطیس دارای مقاومت بالایی بوده و در فرکانس

های مایکروویو عدم تجانس قابل ملاحظه ای از خود نشان می دهند. عدم تجانس مغناطیسی یک ماده ی فری

مغناطیس به طور حقیقی توسط به کار بردن یک میدان بایاس مغناطیسی DC ایجاد می گردد. این میدان باعث

می گردد دوقطبی های مغناطیسی در مواد فریت تولید یک گشتاور خالص دوقطبی مغناطیسی (غیر صفر) نمایند

که در نتیجه دوقطبی های مغناطیسی در فرکانسی که توسط قدرت میدان بایاس کنترل می گردد تشکیل شوند.

یک سیگنال مایکروویو که به طور دایروی پلاریزه شده است و جهت پلاریزاسیون آن هم جهت با گشتاور

دوقطبی مغناطیسی فوق است، تعامل بسیار قوی با آن گشتاور خواهد داشت، در حالی که اگر جهت

پلاریزاسیون عکس جهت گشتاور باشد این تعامل ضعیف تر خواهد بود. (مرجع [28] را مطالعه فرمایید) بنابراین

برای یک جهت چرخش داده شده، نحوه ی پلاریزاسیون با توجه به جهت انتشار، تغییر خواهد کرد و سیگنال

مایکروویو در طول یک ماده ی فریت در جهات متفاوت به صورت های مختلف منتشر خواهد گردید. از این

اثر می توان در ساخت ادوات جهت دهنده مانند جداکننده ها (ایزولاتورها)، چرخش دهنده ها (سیرکولاتورها) و

ژیراتورها استفاده نمود. خاصیت مفید دیگر مواد فری مغناطیس آن است که تعامل این مواد با یک سیگنال

مایکروویو اعمالی به آنها را می توان با تنظیم قدرت میدان بایاس کنترل نمود. این اثر منجر به طراحی و ساخت

تعداد بسیاری از ادوات کنترلی مانند تغییر دهنده های فاز، سوئیچ ها و فیلترها و تشدیدگرهای قابل تنظیم می

شود.

ما بحث خود را با در نظر گرفتن رفتار میکروسکوپی یک ماده ی فری مغناطیس و تعامل آن با یک سیگنال

مایکروویو جهت بدست آوردن تانسور ضریب نفوذ مغناطیسی آغاز می نماییم. این توصیف ماکروسکوپی ماده

می تواند همراه با معادلات ماکسول جهت تجزیه و تحلیل نحوه ی انتشار موج در یک محیط فریت بی نهایت

و در یک موجبر که با ماده ی فریت بارگذاری شده است، به کار رود. این مسائل اصلی و مهم خواص انتشار

غیرهم پاسخ مواد فری مغناطیس شامل چرخش فارادی و اثرات مربوطه را نمایش می دهند که در بخش های

بعدی جهت بحث در مورد عملکرد و طراحی شیفت دهنده های فاز موجبر مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

1.1 خصوصیات اساسی مواد فری مغناطیس

در این بخش نشان خواهیم داد که چگونه تانسور ضریب نفوذپذیری مغناطیسی را می توان برای یک ماده ی

فری مغناطیس با استفاده از دید میکروسکوپی نسبتا ساده از اتم به دست آورد. همچنین در مورد اثرات تلفات

بر روی تانسور ضریب نفوذ مغناطیسی و میدان مغناطیس زدایی در داخل یک فریت با ابعاد محدود بحث خواهم نمود.

1.1.1 تانسور ضریب نفوذ مغناطیسی

خصوصیات مغناطیسی یک ماده مربوط به وجود گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی است که ناشی از حرکت چرخشی الکترون می باشد. با استفاده از مکانیک کوانتوم و فرضیات آن می توان نشان داد که گشتاور دوقطبی مغناطیسی یک الکترون که به حرکت چرخشی آن مربوط است، طبق رابطه ی زیر به دست می آید:

$$m = \frac{q\hbar}{2m_e} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2, \quad (1.1)$$

که در آن \hbar ثابت پلانک است که بر 2π تقسیم شده و q بار الکتریکی الکترون و m_e جرم الکترون است. چرخش یک الکترون در مدار خود به دور یک هسته باعث افزایش جریان مؤثر حلقه ای شده و بنابراین یک گشتاور مغناطیسی اضافی تولید می نماید، اما در حالت کلی این اثر در مقایسه با گشتاور مغناطیسی مربوط به چرخش الکترون به دور خودش ناچیز می باشد. فاکتور g یک وسیله ی اندازه گیری نسبی گشتاور مربوط به چرخش الکترون به دور خودش و حرکت مداری الکترون به دور هسته است که نسبت این گشتاور به کل گشتاور مغناطیسی را نشان می دهد، $g=1$ است، زمانی که گشتاور فقط مربوط به حرکت مداری باشد و $g=2$

است، زمانی که گشتاور فقط مربوط به حرکت چرخش الکترون به دور خودش است. برای اغلب مواد فریت میکروویو، g در محدوده ی 1.98 تا 2.01 است، بنابراین $g=2$ تقریب بسیار خوبی می باشد.

در اغلب جامدات، الکترون ها در جفت هایی با علامت های مخالف حرکت چرخشی را انجام می دهند، بنابراین گشتاور مغناطیسی کلی قابل صرف نظر می باشد. اما در یک ماده ی مغناطیسی یک کسر بزرگ از

چرخش های الکترونی غیر جفتی است (بیشتر چرخش ها به سمت چپ هستند یا راست) ، با این حال در حالت کلی انشاه زنجان دانشکده مهندسی کرود برق آناگاه پروژه برق دانشگاه زنجان

چون چرخش ها در جهات تصادفی هستند بنابراین گشتاور مغناطیسی خالص باز هم مقدار کوچکی است. اما

یک میدان مغناطیسی خارجی می تواند باعث گردد گشتاورهای دوقطبی در یک جهت متمرکز شده و بنابراین

یک گشتاور مغناطیسی کلی بزرگ تولید گردد. وجود نیروهای تبادلی باعث می گردد که چرخش های الکترون

های مجاور متمرکز باقی بماند حتی اگر میدان خارجی حذف گردد، در این صورت است که می گویند ماده به

طور دائمی مغناطیس شده است. همچنین یک الکترون در حالت چرخش دارای یک اندازه ی حرکت زاویه ای

$$S = \hbar/2 \quad (1.2)$$

چرخشی بر حسب ثابت پلانک به صورت زیر که در مراجع و بیان گردیده، می باشد.

جهت برداری این اندازه ی حرکت، خلاف جهت گشتاور دوقطبی مغناطیسی چرخشی است که این مساله در

شکل (1.1) نمایش داده شده است. نسبت گشتاور مغناطیسی چرخشی به اندازه ی حرکت زاویه ای چرخشی

$$\gamma = \frac{m}{s} = \frac{q}{m_e} = 1.759 \times 10^{11} \text{ C/kg}, \quad (1.3)$$

ثابتی است که نسبت ژیرومغناطیس نام دارد:

که در آن از روابط (1.1) و (1.2) استفاده شده است. حال می توان رابطه ی برداری زیر را میان گشتاور

$$\vec{m} = -\gamma \vec{s}, \quad (1.4)$$

مغناطیسی و اندازه ی حرکت زاویه ای به صورت زیر نوشت:

مراجع

[1] S. Koul and B. Bhat, "Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters," Volume

I. Boston, MA: Artech House, 1991.

[2] J. L. Snoek, "Magnetic and electrical properties of the binary System $MO Fe_2O_3$,"

Physics, vol. 3, pp. 463-483, June 1936.

[3] J. L. Snoek, "Non-metallic magnetic materials for high frequencies," Philips

Tech. Rev., vol. 8, pp. 353-360, Dec. 1946.

[4] J. L. Snoek, New Developments in Ferromagnetic Materials. New York, NY:

Elsevier, 1947.

[5] L. Neel, "Proprietes magnetiques des ferrites, ferrimagnetism et

antiferromagnetisme," Ann. Phys., vol. 3, pp. 137-198, Mar. 1948.

[6] D. Polder, "On the theory of ferromagnetic resonance," Phil. Mag., vol. 40, pp.

99-115, Jan. 1949

[7] A. G. Fox, "An adjustable wave-guide phase changer," Proc. IRE, pp. 1489-

1498, Dec. 1947.

[8] L. Stark, "A Helical Line Scanner for Beam Steering a Linear Array", IRE Trans.

On Antennas and Propagation, vol. AP-15, pp.211-216, April 1957.

[9] H. Scharfman, "Three new ferrite phase shifters," Proc. IRE, vol. 44, pp. 1456-

1459, Oct. 1956.

[10] D. J. Angelakos and M. M. Korman, "Radiation from ferrite filled apertures,"

Proc. IRE, vol. 44, pp. 1463-1468, Oct. 1956.

[11] F. Reggia and E. G. Spencer, "A new technique in ferrite phase shifting for

beam steering in microwave antennas," Proc. IRE, vol. 45, pp. 1510-1517, Nov.

1957.

[12] F. Reggia and T. Mak, "Reciprocal latching phase modulator for microwave

frequencies," IEEE Trans. Magn., vol. MAG-2, pp. 269-273, Sept. 1966.

[13] A. Clavin, "Reciprocal ferrite phase shifters in rectangular waveguide," IEEE

Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-6, p. 334, July 1958.

[14] M. A. Treuhaf and L. M. Silber, "Use of microwave ferrite toroids to eliminate

external magnets and reduce switching power," Proc. IRE, vol. 46, pp. 1538, Aug.

1958.

[15] W. J. Ince and E. Stern, "Nonreciprocal remanence phase shifters in rectangular

waveguide," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-15, pp. 87-95, Feb.

1967.

[16] G. F. Rodrigue, "A Generation of Microwave Ferrite Devices," Proc. IEEE, vol. 76, pp. 121-137, February 1988.

[17] C. R. Boyd, Jr., "A dual-mode latching reciprocal ferrite phase shifter," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-18, pp. 1119-1124, Dec. 1970.

[18] L. R. Whicker and C. R. Boyd, "A new reciprocal phaser for use at millimeter wavelengths," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTr-19, pp. 944-945, Dec. 1971.

[19] C. R. Boyd and G. Klein, "A precision analog duplexing phase shifter," in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 248-250, 1972.

[20] C. R. Boyd, Jr. "A Latching Ferrite Rotary-Field Phase Shifter", 1995 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp. 103-106, May, 1995

[21] R. R. Jones, "A slow wave digital ferrite stripline phase shifter," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-14, pp. 684-688, Dec. 1966.

[22] W. M. Libby, "Microstrip two-meander line on ferrite substrate," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-21.

[23] R. R. Romanofsky, "Array Phase Shifters: Theory and Technology," NASA Technical Memorandum TM-2007-214906, Oct. 2007.

[24] G. F. Dionne et al., "Superconductivity for Improved Ferrite Devices," Lincoln Laboratory Journal, vol. 9, no. 1, pp. 19-31, 1996.

[25] W.J. Ince, E. Stern, "Nonreciprocal remanence phase shifters in rectangular waveguide", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.15, pp. 87-95, 1967.

[26] J. Svedin, B. Carlegrim, S. Hagelin, "Accurate Design of Ferrite Toroid Phase Shifters - Theoretical and Experimental Results" 18th European Microwave Conference, pp. 391 - 396, 1988

[27] J. Braj and L. Roy, "Ferrite-filled, antisymmetrically-biased rectangular waveguide phase shifter." U.S. Patent 6 867 664, Mar. 15, 2005

[28] David M. Pozar, "Microwave engineering" fourth edition, season 9, theory and design of ferromagnetic components

[29] F. Reggia, E.G. Spencer. "A New Technique in Ferrite Phase Shifting for Beam Scanning of Microwave Antennas", Proc. IRE, vol. 45, pp. 1510-1517, November 1957.

[30] K. J. Button, B. Lax, "Perturbation Theory of the Reciprocal Ferrite Phase Shifter" Proc. IEE, vol. 109.B, .Supplement 21, 1962.

[31] P. A. Rizzi, B. Gatlin, "Rectangular Guide Ferrite Phase Shifters Employing Longitudinal magnetic Fields" Proc. IRE, vol. 47, pp. 1130-1137, June 1957.

[32] A. Clavin, "Reciprocal Ferrite Phase Shifters in Rectangular Waveguide" IRE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MMT-6, pp. 334, July 1958.

[33] W.E. Hord, F.J. Rosenbaum, C. R. Boyd, Jr., "Theory of the Suppressed-Rotation Reciprocal Ferrite Phase Shifter" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 16, pp. 902-910, 1968.

[34] J.A. Weiss, "A Phenomenological Theory of the Reggia-Spencer Phase Shifter" Proc. IRE, vol.47, pp. 1130-1137, June 1959.

[35] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", Second Edition, John Wiley & Sons, NY., 1998

[36] N. R. Landry et al., "Practical Aspects of Phase Shifter and Driver Design for a Tactical Multifunctional Phased Array Radar System", IEEE Trans. Microw. Theory Tech, vol. MMT-22, pp. 617-624, June 1974.

[37] G.N. Tsandoulas, D.H. Temme, F.G. Willwerth, "Longitudinal section mode analysis of dielectrically loaded rectangular waveguides with application to phase shifter design", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.18, pp. 88-95, 1970.

[38] W. J. Ince, D.H. Temme, F.G. Willwerth, "Toroid Corner Chamfering as a Method of Improving the Figure of Merit of Latching Ferrite Phasers", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. MMT-19, pp. 563-564, June 1971.

[39] C. R. Boyd, "Selected topics on reciprocal ferrite phase shifter design", IEEE S-MTT Workshop, June 2000

[40] W. Zieniutez, "Modes of Propagation in Slot Line with Layered Substrate Containing Magnetized Ferrite", Electronics Letters, vol. 19, pp. 135-136, 1983.

[41] W.E. Hord, F.J. Rosenbaum, C. R. Boyd, Jr., "Theory of the Suppressed-Rotation Reciprocal Ferrite Phase Shifter" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 16, pp. 902-910, 1968.

[42] W.P. Clark, "A High Power Phase Shifter for Phased-Array Systems" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 13, pp. 785 - 788, 1965.

[43] A. Clavin, "Reciprocal Ferrite Phase Shifters in Rectangular Waveguide" IRE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MMT-6 , pp. 334, July 1958.

[44] R. Kasevich, E. Wantuch, P. Mahalic, R. Moore, "High-performance high-power analog phase shifter " Proc. IEEE, vol. 57, pp. 1427 - 1429, 1969.

[45] AFT Ferrite Material Catalog, Revised: 2006

[46] E. Schloemann, "Theoretical analysis of twin-slab phase shifters in rectangular waveguide ", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 14, pp. 15-23, 1967.

[47] W.P. Clark, K.H. Hering, A. Charlton, "TE-mode solutions for partially ferrite filled rectangular waveguide using ABCD matrices", IEEE Int. Convention Record, vol. 14, (5), pp. 39-48, March 1966.

[48] G. Klein, "Transient thermal behavior of latching ferrite phase shifters", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.15, pp. 429-430, 1967.

[49] TCI Ferrite Material Catalog, Revised: 2007

[50] J.J. Green, H.J. Van Hook, "Microwave Properties of Lithium Ferrites (Short Papers)", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.25, pp. 155-159, 1977.

[51] W. Hauth, "Accurate analysis of latching phase shifters", IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 133, pp. 165-168, 1986

[52] G. Skutt, F.C. Lee, "Use of computer visualization tools for examining flux distributions in magnetic structures", APEC '95. Tenth Annual , vol.2, pp.567-573, 1995.

[53] J. M. Park; D.C. Park; "X-band ferrite phase shifter in waveguide geometry" TENCON '93 , vol.3, pp. 464 – 467, 1993.

[54] W.D. Callister, "Fundamentals of Materials Science and Engineering", Fifth Edition, John Wiley & Sons, NY., 2001

[55] E. Stern, W.J. Ince, "Design of Composite Magnetic Circuits for Temperature Stabilization of Microwave Ferrite Devices " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 15, pp. 295-300, 1967.

[56] G. Dionne, "Temperature and stress sensitivities of microwave ferrites" IEEE Trans. on Magnetics, vol. 8, pp. 439-443, 1972.

[57] G. Rodrigue, L. Lavedan, L. Hodges, G. Harrison, "Magnetostrictive effects on latching Ferrite devices " IEEE Trans. Magnetics, vol. 4, pp. 609-610, 1968.

[58] W.J. Ince, D.H. Temme, F.G. Willwerth, R.L. Hunt, "The Use of Manganese-Doped Iron Garnets and High Dielectric Constant Loading for Microwave Latching Ferrite Phasers " G-MTT Int. Microwave Symp. Dig., pp. 327-331, 1970.

[59] Trans-Tech, RF/Microwave Products Catalog, Revised: 2005

[60] J.J. Green, F. Sandy, "Microwave Characterization of Partially Magnetized Ferrites" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 22, pp. 641-645, 1974.

[61] A. Abuelma'atti, J. Zafar, I. Khairuddin, A.A.P. Gibson, A. Haigh, I. Morgan, "Variable toroidal ferrite phase shifter " IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 3, pp. 242-249, 2009.

[62] J.J. Green, F. Sandy, "A Catalog of Low Power Loss Parameters and High Power Thresholds for Partially Magnetized Ferrites " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 22, pp. 645-651, 1974.

[63] R. Garver, "Broad-band diode phase shifters," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 20, no. 5, pp. 314–323, May 1972.

[64] B.-W. Min and G. Rebeiz, "Single-Ended and Differential Ka-Band BiCMOS Phased Array Front-Ends," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, no. 10, pp. 2239–2250, Oct. 2008.

[65] D.-W. Kang and S. Hong, "A 4-bit cmos phase shifter using distributed active switches," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 55, no. 7, pp. 1476–1483, July 2007.

[66] F. Ellinger, R. Vogt, and W. Bachtold, "Compact reflective-type phase-shifter MMIC for C-band using a lumped-element coupler," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 5, pp. 913–917, May 2001.

[67] T. Hancock and G. Rebeiz, "A 12-GHz SiGe phase shifter with integrated LNA," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 3, pp. 977–983, March 2005.

[68] A. Nagra and R. York, "Distributed analog phase shifters with low insertion loss," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 9, pp. 1705–1711, Sep 1999.

[69] C. Tsironis and P. Harrop, "Dual gate GaAs MESFET phase shifter with gain at 12 GHz," *Electronics Letters*, vol. 16, no. 14, pp. 553–554, 3 1980.

[70] M. Kumar, R. Menna, and H.-C. Huang, "Broad-Band Active Phase Shifter Using Dual-Gate MESFET," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 29, no. 10, pp. 1098–1102, Oct 1981.

[71] A. Abidi, "Direct-conversion radio transceivers for digital communications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 30, no. 12, pp. 1399–1410, Dec 1995.

[72] B. Razavi, "Design considerations for direct-conversion receivers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 44, no. 6, pp. 428–435, Jun 1997.

[73] A. Tarighat, R. Bagheri, and A. Sayed, "Compensation schemes and performance analysis of IQ imbalances in OFDM receivers," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 8, pp. 3257–3268, Aug. 2005.