

APLIKASI BAHAN FERRIT

Kiki Rezki Lestari

BUKU AJAR

APLIKASI BAHAN FERRIT

KIKI REZKI LESTARI

LP UNAS

Aplikasi Bahan Ferrit

Oleh : Kiki Rezki Lestari

Hak Cipta© 2020 pada Penulis

Editor : Fitria Hidayanti

Penyunting : Fitri Rahma

Desain Cover : Erna Kusuma Wati

ISBN: 978-623-7376-67-5

Hak Cipta dilindungi Undang-undang.

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin dari Penulis.

Penerbit : LP_UNAS

Jl.Sawo Manila, Pejaten Pasar Minggu, Jakarta Selatan

Telp. 021-78067000 (Hunting) ext.172

Faks. 021-7802718

Email : bee_bers@yahoo.com

ISBN 978-623-7376-67-5



KATA PENGANTAR

Dalam pembuatan buku ajar **Aplikasi Bahan Ferrit** ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah banyak membantu. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. El Amry Bermawi Putra, MA selaku Rektor Universitas Nasional
2. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Nasional
3. LP Unas
4. Jajaran dosen dan karyawan di lingkungan Universitas Nasional

Demikianlah semoga buku ajar **Aplikasi Bahan Ferrit** ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa termasuk mahasiswa Program Studi Teknik Fisika Universitas Nasional. Tentunya dalam pembuatan buku ajar ini, tidak luput dari kesalahan. Untuk itu, kami mohon masukan dari para pembaca untuk perbaikan buku ajar ini.

Jakarta, November 2020

Penulis

Kiki Rezki Lestari

DAFTAR ISI

BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Sejarah penelitian ferit	1
1.2. Penerapan ferit	6
1.2.1. Inti ferit.....	6
1.2.2. Induktor Chip Ferit Multilayer	7
1.2.3. Ferit Microwave	8
1.2.4. Peredam Gelombang Ferit.....	9
1.2.5. Media Perekaman Magnetik	10
1.3. Jenis ferit	10
1.3.1. Spinel	10
1.3.2. Hexaferrites	11
1.3.3. Garnet	12
1.4. Penelitian terbaru dalam bahan ferit	13
1.5. Jenis bahan magnet	15
1.5.1. Diamagnetisme	15
1.5.2. Paramagnetik.....	16
1.5.3. Ferromagnetik	17
1.5.4. Antiferromagnetik	18
1.5.5. Ferrimagnetik	19
1.6. Sifat magnet dasar	21
1.6.1. Loop Histerisis	21

1.6.2. Anisotropi magnetokristalin	24
Daftar Pustaka	28
BAB 2. STRUKTUR KRISTAL DAN SIFAT FISIK FERIT .	32
2.1. Jenis Ferrit	33
2.1.1 Ferrit Spinel	33
2.1.2. Ferit heksagonal	37
2.1.3 Ferit Garnet	44
2.2. Teknik persiapan ferit	47
2.2.1. Nanopartikel.....	47
2.2.2. Metode Sol-gel.....	51
2.2.3. Metode Presipitasi	51
2.2.4. Ball Milling	52
2.2.5. Metode Reaksi Solid-State	53
2.3. Film tipis.....	53
2.3.1. Sol-gel	53
2.3.2. PLD (Deposisi Laser Berdenyut)	55
2.3.3. MBE (Molecular Beam Epitaxy).....	57
2.3.4. CVD (Deposisi Uap Kimia)	59
2.4. Sifat ferit.....	61
2.4.1. Sifat struktur ferit.....	61
2.4.2. Sifat magnet ferit	64
2.4.3. Sifat listrik ferit.....	68
2.4.4. Komposit nano	70

2.4.5. Core-shell	74
2.5. Aplikasi ferit	76
2.5.1 Nanopartikel.....	76
2.5.2. Film tipis	79
Daftar Pustaka	82
BAB 3. SIFAT MICROWAVE DARI FERIT	87
3.1. Kerugian Eddy Saat Ini.....	89
3.2. Permeabilitas	95
3.3. Kerugian inti.....	99
3.4. Barium Hexaferrite (BaM) dan Yttrium iron garnet (YIG).....	102
3.4.1. Hexaferrite tipe-M (BaM).....	102
3.4.2. Garnet besi itrium (YIG)	110
Daftar Pustaka	118
BAB 4. FERIT UNTUK PENEKANAN EMI	121
4.1. Perlunya penekanan EMI.....	126
4.1.1. Pemilihan Ukuran Kapal SMD	126
4.1.2. Pemilihan Bahan Ferit Lembut	127
4.1.3. Pemilihan Material Konduktif	128
4.1.4. Pemilihan Struktur Induktor	128
4.2. Karakteristik perangkat penekan EMI	131
4.2.1. Impedansi Karakteristik.....	132
4.2.2. Ukuran Pesawat Metal Ground	136
4.3. Bahan dan properti untuk penekanan EMI	142

4.3.1. Ferit untuk Supresi EMI.....	142
4.3.2. Ferit sebagai Suppressors	145
4.4. Komponen untuk penekanan EMI.....	148
4.4.1. Manik-manik ferit	148
4.4.2. Beaddcores Silinder	150
4.4.3. Manik-manik Ferit yang Dibelah.....	151
4.4.4. Manik-manik Pelana	152
4.4.5. Manik-manik Chip Ferit	153
4.4.6. Proses Pembuatan Bead Chip Ferit	154
4.4.7. Induktor Chip Padat.....	157
4.4.8. Filter LC Monolitik Chip.....	159
Daftar Pustaka.....	161
BAB 5. KOMPONEN FERIT MICROWAVE.....	163
5.1. Prinsip operasi.....	166
5.1.1. Rotasi Faraday.....	169
5.1.2. Efek magnetoelctric	174
5.2. Isolator.....	182
5.2.1. Isolator Pita Lebar	188
5.3. Pengalih fase	191
5.4. Circulator	197
5.4.1. Circulator Pita Lebar	202
Daftar Pustaka.....	205
Tentang Penulis.....	207

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. SEJARAH PENELITIAN FERIT

Ferit adalah oksida dengan sifat magnet luar biasa, bahan ferit telah lama memainkan peran penting dalam pengkondisian daya, konversi, dan pembangkitan di berbagai spektrum frekuensi (hingga 10 dekade)^[1]. Ferit secara diyakini berkembang sepenuhnya di semua bidang sains, teknologi, dan aplikasi. Bahan ferit dianggap lebih penting dan esensial untuk perkembangan elektronik lebih lanjut daripada sebelumnya, dan diyakini bahwa produksi ferit akan meningkat dari tahun ke tahun karena aplikasinya menjadi lebih beragam^[2].

Ferit dapat diperoleh dalam tiga sistem kristal yang berbeda dengan banyak metode, dan kelayakan untuk menyiapkan larutan padat dalam jumlah yang hampir tidak terbatas membuka cara

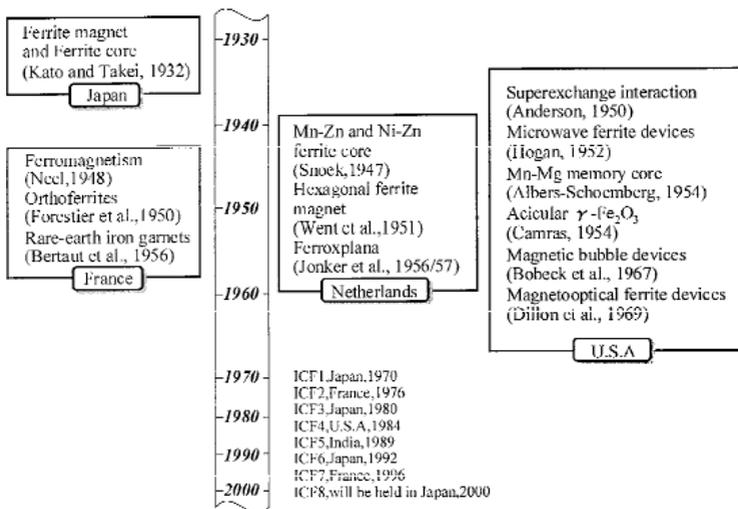
untuk menyesuaikan propertinya untuk banyak aplikasi^[3].

Kemungkinan pembuatan ferit dalam bentuk nanopartikel telah membuka bidang penelitian baru dan menarik, dengan aplikasi revolusioner tidak hanya dalam teknologi elektronik tetapi juga di bidang bioteknologi^[3].

Banyak laporan telah diberikan tentang perkembangan sejarah ilmu pengetahuan dan teknologi ferit yang telah terjadi sejak sekitar 1940^[4,5]. Perhatian publik benar-benar dibangkitkan mengenai pentingnya ferit setelah 1950-an^[2].

Studi sistematis pertama tentang hubungan antara komposisi kimia dan sifat magnetik berbagai ferit dilaporkan oleh Hilpert pada tahun 1909^[6,7]. Hilpert telah berhasil mengolah ferit spinel, seperti mangan, tembaga, kobalt, magnesium, dan seng. Aspek mengagumkan dari karyanya adalah bahwa ia telah mencoba untuk menyiapkan barium,

kalsium, dan ferit timbal dan mengajukan permohonan paten Jerman^[8] atas idenya yang berpandangan jauh ke depan tentang inti ferit. Sekitar 20 tahun setelah karya Hilpert, Forestier^[9], di Prancis, memulai studi kimianya tentang persiapan berbagai ferit dan pengukuran magnetisasi jenuhnya serta suhu Curie.



Gambar 1.1 Skala waktu merupakan langkah utama dalam pengembangan bahan ferit dan aplikasinya. (Mitsuo Sugimoto, Jepang 1999)

Namun, dia tidak berhasil meningkatkan sifat magnetis ferit ke tingkat komersial. Peristiwa luar biasa dalam sejarah ferit, diatur sehubungan dengan negara, ditunjukkan pada Gambar. 1.1

Mekanisme peningkatan magnetisasi dengan penambahan seng ferit berhasil dijelaskan oleh Néel dari Perancis pada tahun 1948^[10]. Ilmuwan Prancis lainnya juga mencapai kesuksesan besar, seperti yang ditunjukkan oleh pencapaian dalam studi fundamental ortoferrit oleh Forestier dan Guoit Guillaïn^[11] dan ferit garnet oleh Bertaut dan Forrat^[12].

Banyak peneliti Philips di Belanda telah menjadi kontributor yang signifikan bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi ferit. Di Amerika Serikat, banyak peneliti terlibat dalam studi ferit dari tahun 1950 sampai 1970, dan mereka mencapai hasil yang sangat bermanfaat baik dalam penelitian fundamental maupun dalam studi

terapan ferit^[2]. Selain itu, kemajuan luar biasa dalam industri elektronik AS dan industri otomotif AS telah mendorong perluasan industri ferit di seluruh dunia. Selain itu, para peneliti AS dalam biokimia telah menjelaskan keberadaan magnetit dalam tubuh merpati^[13], lebah madu^[14], dan bakteri^[15], yang telah membawa impian bagi industri ferit di masa depan.

Periode dari 1935 hingga 1970 adalah periode yang dapat disebut sebagai masa keemasan ferit, masa di mana perkembangan terbesar terlihat dalam ilmu pengetahuan dan teknologi ferit. Beberapa kesalahpahaman di atas bahwa industri ferit menyusut setelah zaman keemasan, tetapi situasinya justru sebaliknya^[2].

Konferensi internasional pertama tentang ferit, ICF, diadakan pada tahun 1970 di Jepang, dan, hingga saat ini, sebelas konferensi telah diselenggarakan (konferensi terakhir ICF 11 di

Jepang 2013). Konferensi-konferensi ini telah memberikan kontribusi besar bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi ferit^[2].

1.2. PENERAPAN FERIT

Ferit ini telah menjadi bahan yang sangat penting secara komersial dan teknologi, terhitung sebagian besar dari total bahan magnet yang diproduksi secara global, dan mereka memiliki banyak kegunaan dan aplikasi. Selain penggunaannya sebagai magnet permanen, aplikasi umum adalah sebagai bahan perekam magnetik dan penyimpanan data, dan sebagai komponen dalam perangkat listrik, terutama yang beroperasi pada frekuensi gelombang mikro / GHz^[16].

1.2.1. INTI FERIT

Kemajuan ferit lunak yang stabil, yang telah dibuat sejak produksi dimulai pada tahun 1936, terutama merupakan hasil dari upaya konsisten yang dilakukan oleh banyak pekerja di bidang

kimia. Ferit Cu - Zn diproduksi sebagai inti ferit untuk antena dan transformator frekuensi menengah (IFT) di radio untuk pertama kalinya di Jepang. Produksinya, bagaimanapun, dihentikan sekitar tahun 1970, dan ferit Ni - Cu - Zn [17,18] sekarang sedang diproduksi dan digunakan. Ferit Ni - Cu - Zn saat ini memiliki banyak aplikasi, termasuk transformator putar, filter noise, dan komponen chip ferit multilayer^[2].

1.2.2. INDUKTOR CHIP FERIT MULTILAYER

Kecenderungan untuk mengurangi komponen elektronik dimulai pada 1990-an. Secara bersamaan, kemajuan juga terjadi dalam teknologi pemasangan-permukaan, dan upaya telah dilakukan untuk mencapai penggabungan induktor ferit dengan kepadatan tinggi^[19] ke dalam papan sirkuit tercetak. Akibatnya, memungkinkan berbagai jenis induktor chip ferit multilayer, 45 dengan panjang 10 mm dan lebar 0,5 mm, untuk digunakan pada penerima

televisi, peralatan video, stereo headphone, sistem penggerak hard disk, komputer pribadi, telepon nirkabel, suku cadang mobil, dll. Induktor chip ferit multilayer diproduksi menggunakan metode pencetakan film tebal, dan induktor chip terbaru berhasil dibuat sebagai struktur monolitik tunggal yang menggabungkan induktor dengan elemen pasif lainnya, seperti kapasitor dan resistor^[2].

1.2.3. FERIT MICROWAVE

Garnet besi yttrium curah dan film (YIG)^[20,21], Ni - Zn tipe spinel, Mn - Mg - Zn, dan lithium ferit^[22], serta barium ferit tipe heksagonal^[23] adalah yang paling sering digunakan sebagai ferit microwave. Pertumbuhan eksponensial baru-baru ini dalam komunikasi gelombang mikro melalui komunikasi seluler dan satelit semakin menekankan kebutuhan dunia akan perangkat gelombang mikro dengan kerugian yang sangat rendah dan ekonomis yang menggunakan bahan ferit. Oleh karena itu,

dalam pembuatan bahan ferit gelombang mikro, perhatian khusus harus diberikan pada kemurnian bahan baku, stoikiometri komposisi, dan porositas serta karakteristik butir dari produk akhir^[2].

1.2.4. PEREDAM GELOMBANG FERIT

Penyerap gelombang ferit^[24-27] telah menerima banyak perhatian dunia sebagai tanggapan atas meningkatnya permintaan rencana tandingan untuk kompatibilitas elektromagnetik (EMC). Penyerap ferit ini diperkirakan akan mengalami kerusakan, misalnya ghosting televisi, gema yang ditempa pada sinyal radar kapal, dan kebocoran gelombang elektromagnetik dari berbagai peralatan listrik. Penyerap gelombang elektromagnetik khas adalah pelat ferit yang didukung dengan pelat logam konduktif. Cu - Zn, Mn - Zn, Ni - Zn, dan ferit lunak tersubstitusi lainnya digunakan sebagai bahan untuk peredam gelombang ferit^[2].

1.2.5. MEDIA PEREKAMAN MAGNETIK

Pengembangan Fe_2O_3 acicular oleh Camras pada tahun 1954 memungkinkan pengenalan pita perekam magnetik berkualitas tinggi yang berharga, yang mempengaruhi kinerja perekaman, telah diizinkan oleh peningkatan teknologi doping kobalt^[28,29] dan pelapisan kobalt^[30]. Kepala ferit Mn-Zn digantikan oleh kepala resistansi magnet (MR) atau kepala resistensi magnetis raksasa (GMR)^[31], yang dengan cepat menyebar ke pasar. Banyak peneliti sedang terlibat dalam studi tentang media magnetik dan kepala untuk perekaman tegak lurus magnetis^[32].

1.3. JENIS FERIT

1.3.1. SPINEL

Struktur kristal spinel isomorf dengan mineral Mg^{2+} # . Ketika trivalen Al digantikan oleh Fe^{3+} , magnesium ferit $\text{Mg}^{2+} / \text{Al}^{3+}$ # terbentuk. Ferit Mg sangat cocok untuk aplikasi

gelombang mikro, karena memiliki resistansi spesifik yang sangat tinggi ($10^8 - 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$). Ketika Mg divalen digantikan oleh Fe^{2+} , magnetit, Fe_3O_4 , terbentuk. Praktisnya, setiap ion logam divalen (Ni, Co, Mn, Cu, dll.) Dapat disubstitusikan untuk membentuk spinel ferit. Sel unit kubik berisi delapan unit rumus, dengan 16! dan delapan kation ! . Dalam spinel normal, ion 8 ! menempati delapan situs tetrahedral A, dan ion 16 ! menempati situs oktahedral 16 B. Dalam spinel terbalik, delapan dari 16 ! menempati semua situs tetrahedral^[33].

1.3.2. HEXAFERRITES

Oksida ferrimagnetik, yang memiliki struktur kristal yang mirip dengan mineral magnetoplumbite, disebut heksaferit. Hexaferrites biasanya merupakan material bermagnet keras, memiliki koersivitas tinggi, dan digunakan sebagai magnet permanen. Hexaferrites memiliki medan

anisotropi internal hingga 35 kG, magnetisasi hingga 5 kG, dan suhu Néel tinggi sekitar 500°C. Rentang operasi mereka berada di sekitar sisa loop histeresis persegi panjang. Karena heksaferrit keadaan Fe^{3+} tunggal adalah isolator yang baik, memiliki kerugian dielektrik yang sangat rendah. Ketergantungan suhu magnetisasi agak lemah, menjamin stabilitas yang baik. Ada beberapa jenis heksaferrit, dilambangkan sebagai M, W, Y dan Z^[33].

1.3.3. GARNET

Garnet ferrimagnetik bersifat isomorfik dengan garnet $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ yang terbentuk secara alami. Sejak ditemukan pada tahun 1956, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, YIG, tetap menjadi material gelombang mikro terbaik di pita frekuensi 1 - 10 GHz. Mirip dengan spinel, struktur garnet terdiri dari polihedra oksigen, yang mengelilingi kation. Ukuran ion terbesar, sebagai ion Y^{3+} nonmagnetik, dikelilingi oleh delapan ion oksigen dalam lingkungan

dodecahedral terdistorsi (situs c), sedangkan lima Fe^{3+} terbagi antara tiga situs tetrahedral d dan dua oktahedral a [33]. Sifat magnetik YIG dapat diubah dalam batas yang sangat luas, karena tiga situs kristalografi yang berbeda, tersedia untuk kation yang berbeda, dan status valensi yang berbeda. Garnet adalah bahan yang sangat terkenal, sehingga komposisi untuk spesifikasi tertentu dapat dirancang secara numerik. Parameter kisi, magnetostriksi, linewidth semuanya dapat disesuaikan dengan kombinasi ion pengganti. Garnet lebih sensitif terhadap tegangan daripada spinel, namun substitusi Mn kecil, yang digunakan secara komersial, meminimalkan tegangan magnetostriktif dalam garnet YGd[33].

1.4. PENELITIAN TERBARU DALAM BAHAN FERIT

Perkembangan terbaru industri ferit telah dikaitkan dengan kemajuan peralatan produksi sistem, dan efisiensi tinggi mereka secara langsung tercermin dalam kinerja tinggi produk ferit[2].

Meskipun banyak ferit telah digunakan dalam komponen kelistrikan mobil konvensional, salah satu aplikasi baru yang menarik dari ferit adalah bagian magnetik dari motor penggerak arus searah pada mobil bertenaga listrik. Meskipun keluarga magnet Nd - B - Fe dan Sm - Co saat ini diyakini menjadi kandidat untuk aplikasi ini, mereka memiliki beberapa masalah, seperti suhu Curie yang rendah untuk bekas dan kehilangan arus eddy yang besar yang disebabkan oleh medan magnet frekuensi tinggi yang terjadi dalam rotasi pada frekuensi tinggi untuk yang terakhir. Kerugian seperti itu tidak terjadi pada ferit, dan harga ferit sangat rendah. Penerapan magnet ferit pada mobil bertenaga listrik sangat diharapkan, walaupun ada banyak kesulitan yang perlu diatasi.

Penelitian tentang biomagnetisme juga sedang diselidiki secara aktif. Sebagai contoh, penelitian sedang dilakukan pada pelapisan lapisan Fe_3O_4 pada partikel SiO_2 halus berdiameter $3,2 \mu\text{m}$

untuk aplikasi sebagai agen kontras ultrasonik^[34] dan pada pemisahan partikel Fe_3O_4 halus^[35] dari bakteri magnetik. Tampaknya penelitian biomagnetik akan segera berkontribusi pada perbaikan kehidupan kita sehari-hari. Selain itu, penelitian sedang dilakukan pada sistem daur ulang yang memanfaatkan MnO_2 , seng, dan ZnCl_2 dari limbah sel kering mangan atau mangan-alkali untuk memproduksi ferit Mn-Mg-Zn^[36]. Penerapan ferit sebagai sensor kelembaban^[37] dan thermojunctions^[38] akan dikembangkan sebagai kategori penelitian baru.

1.5. JENIS BAHAN MAGNET

Perilaku magnetik material dapat diklasifikasikan ke dalam lima kelompok utama berikut: diamagnetisme, paramagnetisme, ferromagnetisme, antiferromagnetisme, dan ferrimagnetisme.

1.5.1. DIAMAGNETISME

Bahan diamagnetik terdiri dari atom yang tidak memiliki momen magnet bersih (yaitu, semua kulit orbital terisi dan tidak ada elektron yang tidak berpasangan). Namun, ketika terkena medan magnet, magnetisasi negatif dihasilkan terhadap medan magnet yang diterapkan dan dengan demikian kerentanan magnetik (χ) (respons magnet yang diterapkan) adalah nilai kecil dan negatif, misalnya, -1.6×10^{-4} untuk Bismut. Oleh karena itu magnetisasi M berubah secara linier dengan diterapkannya medan magnet H dengan kemiringan negatif. Karakteristik lain yang terkenal dari bahan diamagnetik adalah bahwa suseptibilitasnya tidak bergantung pada suhu^[39].

1.5.2. PARAMAGNETIK

Berbeda dari material diamagnetik, jika ketidakseimbangan antara elektron dengan spin berlawanan diatur di bawah medan yang diterapkan, magnetisasi rendah dalam arah yang

sama dengan medan yang diterapkan akan dihasilkan. Magnetisasi M vs kurva H medan magnet dalam bahan paramagnetik mengikuti hubungan linier dengan kemiringan positif, yang menyiratkan kerentanan positif medan magnet menciptakan sedikit kesejajaran dari momen-momen ini dan dengan demikian magnetisasi rendah searah dengan medan yang diterapkan^[39]. Ketika suhu meningkat, bagaimanapun, retensi penyelarasan menjadi lebih keras karena agitasi termal dan dengan demikian kerentanan menurun, seperti yang dijelaskan oleh Hukum Curie.

1.5.3. FERROMAGNETIK

Bahan ferromagnetik seperti besi dapat memiliki magnetisasi permanen yang besar bahkan tanpa adanya medan magnet yang diterapkan, yang disebut momen magnet spontan. Namun, dalam mekanika kuantum, model ferromagnetisme

Heisenberg digunakan, yang menjelaskan kesejajaran paralel momen magnetik dalam kaitannya dengan interaksi pertukaran antara momen yang berdekatan. Di antara unsur-unsur hanya Fe, Co dan Ni yang bersifat feromagnetik pada dan di atas suhu kamar. Di bawah suhu kritis yang disebut suhu Curie, kurva magnetisasi M vs. H untuk feromagnet menunjukkan histeresis. Di atas suhu Curie, agitasi termal menjadi sangat besar sehingga material berubah menjadi paramagnetik. Suhu Curie untuk elemen feromagnetik alami tersebut di atas adalah T_C (Fe) = 1.043 K, T_C (Co) = 1.404 K dan T_C (Ni) = 631 K [39].

1.5.4. ANTIFERROMAGNETIK

Dalam kasus ekstrim di mana sublattices dengan momen magnet anti-selaras menghasilkan magnetisasi nol bersih, terlepas dari urutan magnet, bahan tersebut menunjukkan antiferromagnetisme. Semua efek antialignment ini hanya berlangsung

pada suhu di bawah suhu Curie, T_C (untuk feromagnet dan ferrimagnets) atau suhu Néel, T_N (untuk antiferromagnet). Bahan antiferromagnetik biasanya menjadi paramagnetik di atas suhu Néel. Satu-satunya elemen yang menunjukkan antiferromagnetisme pada suhu kamar adalah kromium dengan suhu Néel 37°C [39]. Petunjuk untuk antiferromagnetism adalah perilaku kerentanan di atas suhu Néel di mana kerentanan mematuhi hukum Curie-Weiss untuk paramagnet tetapi dengan intersep negatif yang menunjukkan interaksi pertukaran negatif. Bahan antiferromagnetik memiliki kerentanan yang kecil tetapi positif.

1.5.5. FERRIMAGNETIK

Bahan ferrimagnetik seperti ferit yang memanfaatkan elemen transisi Fe seperti pada Fe_2O_3 menunjukkan kemagnetan yang mirip dengan bahan feromagnetik di bawah suhu Curie, T_C . Di

atas suhu ini, mereka menjadi paramagnetik seperti dalam kasus bahan feromagnetik. Ferrimagnetisme hanya diamati pada senyawa dengan struktur kristal kompleks. Dalam bahan ini interaksi pertukaran menyebabkan keselarasan paralel atom di beberapa situs kristal, sublattice A, dan antiparalel lainnya, di sublattice B. Bahan terurai menjadi domain magnet, seperti pada bahan feromagnetik^[40]. Perbedaan utama antara bahan ferrimagnetik dan antiferromagnetik adalah bahwa momen magnet yang terkait dengan atom sublattice **A** lebih besar daripada momen magnet sublattice **B** sehingga tidak saling menihilkan. Perilaku magnet dalam bahan ferrimagnetik dan feromagnetik juga sangat mirip. Namun, bahan ferrimagnetik umumnya memiliki magnetisasi saturasi yang lebih rendah. Pada akhirnya, besarnya magnetisasi spontan bergantung pada seberapa baik momen sublattice sejajar, karena getaran termal atom

menyebabkan misalignment momen dan pengurangan magnetisasi.

Untuk bahan ferrimagnetik tidak semua momen sejajar, bahkan pada nol Kelvin, dan karenanya magnetisasi spontan akan bergantung pada kesejajaran relatif momen serta suhu. Sebagai contoh, dalam Barium ferrite ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) sel satuan mengandung 64 ion dimana ion barium dan oksigen tidak memiliki momen magnet, 16 ion Fe^{3+} memiliki momen sejajar paralel dan 8 ion Fe^{3+} sejajar anti-paralel sehingga menghasilkan magnetisasi paralel ke bidang terapan^[39].

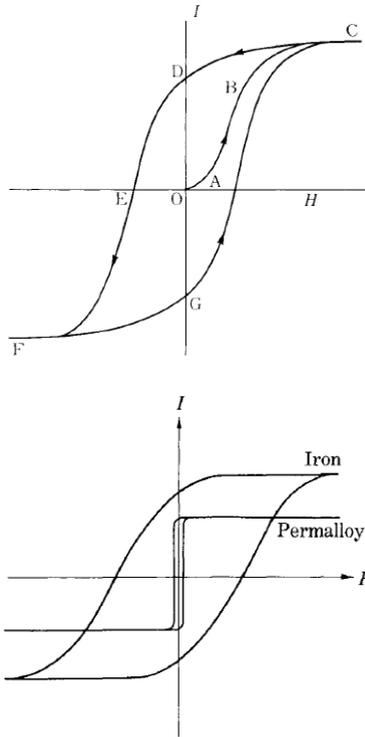
1.6. SIFAT MAGNET DASAR

1.6.1. LOOP HISTERISIS

Loop histerisis adalah perilaku magnetisasi (M) versus intensitas medan magnet yang diterapkan (H) atau B versus H dari zat feromagnetik (atau ferrimagnetik) melalui satu

siklus karena berulang kali dimagnetisasi dan didemagnetisasi.

Jika medan magnet berkurang dari keadaan jenuh C (Gambar. 1.2 a), magnetisasi I secara bertahap menurun sepanjang CD, tidak sepanjang CBAO, dan pada $H = 0$ ia mencapai nilai bukan nol I_r (= OD), yang disebut magnetisasi sisa atau remanen. Peningkatan lebih lanjut dari medan magnet dalam arti negatif menghasilkan penurunan terus menerus dari intensitas magnetisasi, yang akhirnya jatuh ke nol. Nilai absolut medan pada titik ini disebut gaya koersif atau medan koersif H_c (= OE). Bagian ini, DE, dari kurva magnetisasi sering disebut sebagai kurva demagnetisasi. Peningkatan H lebih lanjut dalam arti negatif menghasilkan peningkatan intensitas magnetisasi dalam arti negatif dan akhirnya magnetisasi saturasi negatif. Jika medan tersebut kemudian dibalik lagi ke arti positif, magnetisasi akan berubah sepanjang FGC. Loop tertutup CDEFGC disebut loop histeresis^[41].



Gambar 1.2. (a) Lingkaran histeresis; (b) Perbandingan loop histeresis besi lunak dan permallo.

Pada awal abad ke-20, besi lunak hampir merupakan satu-satunya bahan magnet lunak yang tersedia. Bahan ini memiliki lingkaran histeresis yang sangat lebar dibandingkan dengan Permalloy,

bahan magnet lunak modern berkualitas tinggi^[41], seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2 b. Demikian pula, baja karbon yang dikeraskan adalah bahan magnet permanen standar hingga awal abad kedua puluh.

1.6.2. ANISOTROPI MAGNETOKRISTALIN

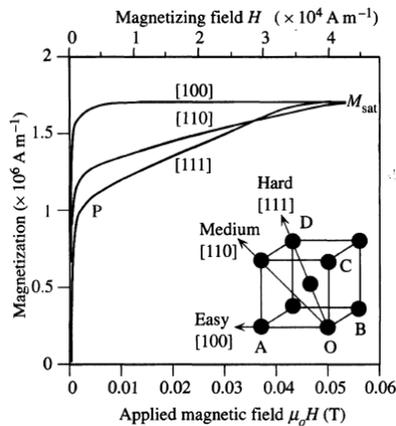
Kristal feromagnetik secara khas menunjukkan anisotropi magnet, yang berarti bahwa sifat magnetis berbeda di sepanjang arah kristal yang berbeda. Dalam kasus besi (BCC), putaran dalam domain paling mudah disejajarkan di salah satu dari enam arah tipe $[100]$, secara kolektif diberi label sebagai (100) , dan sesuai dengan enam tepi sel unit kubik.

Di sisi lain, jika kita ingin memagnetisasi kristal sepanjang arah $[111]$ dengan menerapkan medan di sepanjang arah ini^[42], maka kita harus menerapkan medan yang lebih kuat dari yang sepanjang arah $[100]$. Hal ini jelas ditunjukkan pada

Gambar. 2, di mana magnetisasi yang dihasilkan di sepanjang $[111]$ lebih kecil daripada magnetisasi di sepanjang $[100]$ untuk besaran medan terapan yang sama. Akibatnya, arah $[111]$ dalam kristal besi dikenal sebagai arah keras. Perilaku M versus H sepanjang arah $[100]$, $[110]$, dan $[111]$ dalam kristal besi dan anisotropi terkait ditunjukkan pada Gambar. 1.2.

Ketika bidang eksternal diterapkan di sepanjang arah diagonal OD pada Gambar. 1.2, awalnya semua domain dengan M sepanjang OA , OB , dan OC , yaitu domain dengan komponen magnetisasi di sepanjang OD , tumbuh dengan memakan domain dengan M di arah yang salah dan akhirnya mengambil alih seluruh spesimen. Ini adalah proses yang mudah (mirip dengan proses sepanjang $[100]$)^[42] dan membutuhkan medan kecil dan merepresentasikan proses dari 0 ke P pada kurva magnetisasi untuk $[111]$ pada Gambar. 1.3. Namun, dari P dan seterusnya, magnetisasi di

domain harus diputar menjauh dari arah yang mudah, yaitu dari OA, OB, dan OC menuju OD. Proses ini menghabiskan energi yang besar dan karenanya membutuhkan bidang terapan yang lebih kuat.



Gambar 1.3 Anisotropi magnetokristalin dalam kristal besi tunggal.

Jelas bahwa magnetisasi kristal di sepanjang [100] membutuhkan energi paling sedikit, sedangkan magnetisasi [111] menghabiskan energi terbesar. Energi berlebih yang diperlukan untuk memagnetisasi volume satuan kristal dalam arah

tertentu sehubungan dengan arah yang mudah disebut energi anisotropi magnetokristalin dan dilambangkan dengan K . Untuk besi, energi anisotropi adalah nol untuk $[100]$ dan terbesar untuk arah $[111]$, sekitar 48 kJ m^{-3} or $3,5 \times 10^6 \text{ eV}$ per atom.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Harris V. G. *Frontiers of Ferrite Materials Research*. Northeastern University.
- [2] Sugimoto Mitsuo. *J. Am. Ceram. Soc***82**(2) (1999), 269-80.
- [3] Valenzuela R. *Phys. Research Int.* Volume 2012, Article ID 591839.
- [4] C. D. Owens. *Proc. IRE.* **44** (1956), 1234–48.
- [5] H. P. J. Wijn. *Proceedings of the International Conference on Ferrites*(1970).
- [6] S. Hilpert. *Ber. Dtsch. Chem. Ge***42** (1909), 2248–61.
- [7] (a) S. Hilpert and A. Wille. *Phys. Chem***B18** (1932), 291–315. (b) S. Hilpert and A. Lindner. *Z. Phys. Chem* **B22** (1933), 395–405. (c) S. Hilpert and R. Schweinhagen. *Z. Phys. Chem* **B31** (1935), 1–11.
- [8] S. Hilpert. German Pat. Nos. 226,347 (1909) and 227,787 (1909).
- [9] H. Forestier. *Ann. Chim.(Paris)*. **9** (1928), 316–401.
- [10] L. Néel. *Ann. Phys. (Paris)* **3** (1948), 137–98.
- [11] (a) H. Forestier and G. Guiot-Guillain. *Compt. Rend***230** (1950), 1844–45. (b) H. Forestier and G. Guiot-Guillain. *Compt. Rend***235** (1952), 48–50.
- [12] F. J. Bertaut and F. Forrat. *Compt. Rend***242** (1956), 382–4.
- [13] C. Walcott, J. L. Gould, and J. L. Kirschvink. *Science (Washington, D.C.)* **205** (1979), 1027–9.
- [14] J. L. Gould, J. L. Kirschvink, and K. S. Deffeyes. *Science (Washington, D.C.)***201** (1978), 1026–8.

- [15] R. B. Frankel, R. P. Blakemore, and R. S. Wolfe. *Science (Washington, D.C.)***203 (1979)**, 1355–8.
- [16] Pullar Robert C. *Progress in Materials Science***57 (2012)**, 1191-334.
- [17] S. Murayama, M. Kumagai, and Y. Ikeda. *Proceedings of 6th International Conference on Ferrites***(1992)**.
- [18] T. Nakamura and Y. Okano. *J. Phys. IV (Paris)***(1997)**, 91–92.
- [19] (a) T. Nomura and M. Takaya. *Hybrids*. **3 (1987)**, 15–19.
(b) M. Takaya. *Proceedings of International Symposium on Microelectronics***(1988)**.
- [20] O. Prakash and R. S. Paraolia. *Proceedings of 3rd International Conference on Ferrites***(1980)**, 815-7.
- [21] M. Kim, D. S. Jun, J. R. Park, and S. S. Lee. *J. Magn. Soc. Jpn*, **22 (1998)**, 363–65.
- [22] F. Wei, L. Baoshun, Y. Jizhong, L. Xi, and Z. Muyu. *J. Magn. Soc. Jpn***22 (1998)**, 366-8.
- [23] J. B. Ings, J. J. Simmins, J. L. May, and D. Tolino. *Fabrication of Thin Bulk Ceramics for Microwave Circulator Applications***Ref. 43, 227–40**.
- [24] Y. Naito and T. Mizumoto. *Ferrite Electromagnetic Wave Absorbers with Wide-Band Characteristic***Ref. 33, 1320–25**.
- [25] H. Ueno, T. Yasuyoshi, and S. Yoshikado. *J. Magn. Soc. Jpn* **22 (1998)**, 369–71.
- [26] H. J. Kwon, D. H. Han, J. T. Yoo, T. H. Kong, and W. D. Hur. *J. Magn. Soc. Jpn***22 (1998)**, 372–4.
- [27] Y. S. Kim and S. S. Kim. *J. Magn. Soc. Jpn***22 (1998)**, 375–77.

- [28] D. E. Speliotis, J. R. Morrison, and G. Bate. *British Physical Society, London, U.K.*(1965), 623–5.
- [29] A. H. Morrish and G. A. Sawatzky. *Mössbauer Study of the Gamma to Alpha Transformation in Pure and Cobalt Doped Ferric Oxide*Ref. 3, 144–7.
- [30] (a) S. Umeki, S. Saitoh, and Y. Imaoka. *IEEE Trans. Magn.* **MAG-10** (1974), 655–59. (b) Y. Imaoka, T. Tada, T. Ishikawa, and T. Uehori. *U.S. Pat. No. 3,770,500* (1973). (c) Y. Imaoka, S. Umeki, Y. Kubota, and Y. Tokuda. *IEEE Trans. Magn.* **MAG-14** (1978), 649–54.
- [31] (a) C. Tsang, M-M. Chen, T. Yogi, and K. Ju. *IEEE Trans. Magn.* **MAG-26** (1990), 1689–93. (b) M. M. Dovek, D. J. Seagle, T. J. Beaulieu, E. R. Christensen, and R. E. Fontana Jr. *IEEE Trans. Magn.* **MAG-28** (1992), 2301–303.
- [32] (a) S. Iwasaki and Y. Nakamura. *IEEE Trans. Magn.* **MAG-13** (1977), 1272–7. (b) S. Iwasaki. *Solid State Phys* **12** (1977), 39–45.
- [33] Pardavi-Horvath M. *J. Magn. Magn. Mater***215-216** (2000), 171-183.
- [34] M. Zhang, Y. Kitamoto, and M. Abe. *J. Phys. IV (Paris)* [Suppl. III]669–70 (1997).
- [35] T. Matsunaga, H. Takeyama, N. Tsujimura, and S. Kamiya. *J. Magn. Soc. Jpr***22**[Suppl. S1] (1998), 434–36.
- [36] T. Ochiai. *J. Magn. Soc. Jpr***22** [Suppl. S1] (1998), 9–13.
- [37] A. S. Waingankar, S. G. Kulkarni, and M. S. Sagare. *J. Phys. IV (Paris)* [Suppl. III] (1997), 155–56.
- [38] O. H. Kwon, Y. Fukushima, M. Sugimoto, and N. Hiratsuka. *J. Phys. IV (Paris)*[Suppl. III] (1997), 165–6.
- [39] Ö z g ü r Ü m i t , A l i v o v Y a M a t a r , M o r k o
Sci. **20** (2009), 789-834.

- [40] C. Kittel, *Rev. Mod. Phys.* **21**, 541 (1949).
doi:10.1103/RevMod Phys.21.541.
- [41] Chikazumi Soshin. *Physics of Ferromagnetism 2nd edition* (1997).
- [42] Kasap S. O. *Principles of Electronic Materials and Devices 3rd edition*(2006).

BAB 2. STRUKTUR KRISTAL DAN SIFAT FISIK FERIT

Oksida dengan logam transisi (atau tanah jarang) sebagai penyusunnya memiliki minat khusus karena menunjukkan permeabilitas yang besar yang besarnya bergantung pada banyak kasus pada variasi sifat struktural (susunan atom) yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti regangan yang dapat diterapkan secara eksternal. Di antara subkelas oksida yang menggunakan Fe sebagai konstituen dan menunjukkan antiferromagnetisme adalah kelas bahan yang dinamai ferrimagnets. Varietas ferrimagnet resistivitas tinggi (kehilangan rendah) menemukan sejumlah besar aplikasi dalam komponen gelombang mikro pasif seperti isolator, sirkulator, pemindah fase, dan antena miniatur yang beroperasi pada berbagai frekuensi (1-100 GHz) dan sebagai media perekam magnetik yang

menggunakan sifat fisik baru untuk mengutip beberapa^[1].

2.1. JENIS FERRIT

Sifat struktur material yang mengandung ion magnet dan posisi serta keadaan muatan elemen magnet menentukan besarnya kemagnetan. Di bawah ini kita akan membahas jenis bahan magnet kubik, spinel, garnet, dan heksaferit yang menunjukkan sifat visceral mereka dan bagaimana posisi atom mempengaruhi magnetisme mereka^[2].

2.1.1 FERRIT SPINEL

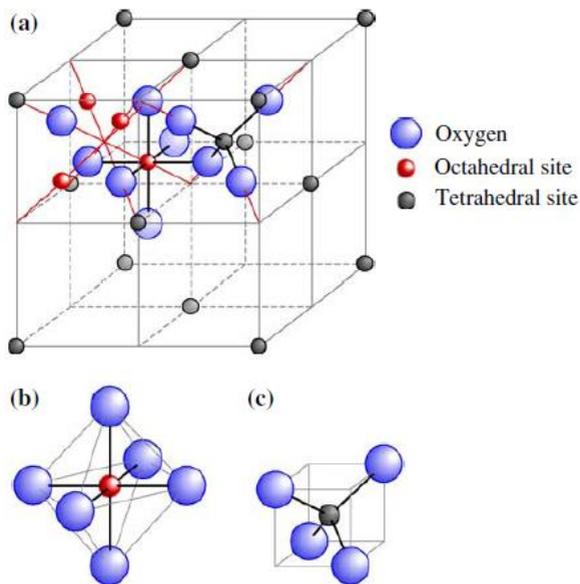
Material struktur spinel berbentuk kubik tertutup dan memiliki bentuk AB_2O_4 dimana A mewakili kation divalen dan kation B trivalen. Interaksi pertukaran antara situs A dan B adalah negatif dan terkuat di antara kation sehingga magnetisasi bersih dihasilkan dari perbedaan momen magnet antara situs A dan B. Ferit spinel atau ferrosipinel adalah bahan feromagnetik dengan

komposisi kimia umum $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ dimana Me adalah logam divalen seperti besi, mangan, magnesium, nikel, seng, kadmium, kobalt, tembaga, atau kombinasi dari semuanya. Sel satuan yang mewakili blok penyusun tiga dimensi terkecil dari struktur kristal spinel ditunjukkan pada Gambar. 2.1 dari mana simetri kubik dapat diamati. Sel satuan mengandung 32 anion oksigen (muatan negatif ganda untuk setiap total -64), 16 kation trivalen (muatan positif rangkap tiga untuk masing-masing berjumlah 48) dan 8 kation divalen (muatan positif ganda berjumlah 16) dengan tetap menjaga keseimbangan muatan yang diperlukan untuk setiap unit sel. Karena dua kation valensi yang berbeda tersedia dua jenis situs kristalografi yang terdapat dalam struktur spinel. Salah satunya adalah situs tetrahedral " A " yang dikelilingi oleh empat ion oksigen sedangkan yang lainnya adalah situs oktahedral " B " yang dikelilingi oleh enam ion oksigen.

Struktur kristal yang dijelaskan di atas untuk Fe_3O_4 mewakili struktur spinel terbalik. Susunan spinel normal mensyaratkan bahwa delapan ion logam divalen dari sel satuan, yaitu ion Me^{2+} , menempati 8 situs A dan 16 ion logam trivalen, yaitu ion Fe^{3+} , menempati situs 16 B. Selanjutnya terdapat dua rongga tetrahedral dan satu rongga oktahedral untuk masing-masing atom O yaitu 64 tetrahedral dan 32 rongga oktahedral. Karena hanya ada tiga ion logam per molekul selain 4 anion O, hanya $1/4$ dari 12 rongga yang terisi dalam satu molekul.

Selain itu, ion kation divalen (Mg dalam spinel) hanya menempati satu-delapan dari rongga tetrahedral yang lebih kecil, sedangkan kation trivalen mengisi setengah dari rongga oktahedral yang lebih besar. Dalam basis oksigen fcc yang sederhana dan ideal, keberadaan kation di beberapa rongga menyebabkan penyusutan basis oksigen fcc dan ideal, keberadaan kation di beberapa rongga menyebabkan penyusutan rongga yang tidak

dihuni, dengan tetap mempertahankan simetri keseluruhan kubik^[2]. Konstanta kisi ferit bergantung pada kandungan ion logam, bervariasi dengan ion logam yang berbeda dari sisi kubus sekitar 8,3–8,5 Å.



Gambar 2.1. (a) Struktur sel unit spinel, (b) celah oktahedral (sisi B: 32 per sel unit, 16 terisi), dan (c) celah tetrahedral (sisi A: 64 per sel unit, 8 terisi). Dalam posisi ionik adalah sama pada oktan yang berbagi hanya satu sisi dan berbeda dalam oktan yang berbagi satu sisi. Setiap oktan mengandung 4 ion Oksigen. (Ü. Özgür., Dkk [2])

2.1.2. FERIT HEKSAGONAL

Ferit heksagonal semuanya adalah bahan ferrimagnetik, dan sifat magnetisnya secara intrinsik terkait dengan struktur kristalnya. Mereka semua memiliki anisotropi magnetokristalin (MCA), yaitu magnetisasi yang diinduksi memiliki orientasi yang lebih disukai di dalam struktur kristal, dan mereka dapat dibagi menjadi dua kelompok utama, kelompok dengan sumbu magnetisasi mudah, heksaferit uniaksial, dan kelompok dengan bidang mudah (atau kerucut) magnetisasi, yang dikenal sebagai ferroplana atau hexaplana ferit^[3]. Ada sejumlah heksaferrit, seperti tipe M, U, X, YZ, dan W, varietas tipe M adalah yang paling menarik. Sejak penemuan mereka pada awal 1950-an^[4,5] heksaferrit tipe-M terus-menerus membuat terobosan dalam aplikasi seperti magnet permanen, plastroferit, potongan cetakan injeksi,

perangkat gelombang mikro, dan media perekam magnetik.

Minat ini didorong oleh biaya rendah, koersivitas relatif tinggi, stabilitas kimiawi yang sangat baik, dan ketahanan korosi. Meskipun magnetisasi dan koersivitas ferit ini lebih rendah daripada senyawa tanah jarang, bahan ini mewakili lebih dari setengah pasar magnet permanen.

Contoh heksaferit yang paling terkenal adalah Barium heksaferit ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ atau $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$)^[4], nama dagangnya adalah Ferroxdure dan Indox^[6,7]. Ion Ba yang besar [kadang-kadang digantikan oleh Sr di Strontium heksaferit ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ atau $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$)], yang menyebabkan sedikit gangguan pada kisi di sekelilingnya, bertanggung jawab atas anisotropi uniaksial magnet yang besar ditampilkan oleh kelompok ferrimagnets ini, di mana sumbu c kristalografi adalah sumbu mudah magnet.

Tabel 2.1 Komposisi kimia dan keterkaitan ferit heksagonal (Ü. Özgür., Dkk [2])

Jenis heksaferit	Komposisi (rumus kimia)	Menumpuk ordera	Keterkaitan
S-spinel	$2 \text{ Me}^{2+} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_4$ atau $2 \text{ MeO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$		S
M	$\text{Ba}^{2+}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ atau $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	RSR * S *	M
W	$\text{Ba}^{2+}\text{Me}_2^{2+}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ atau $\text{BaO} \cdot 2 \text{ MeO} \cdot 8\text{Fe}_2\text{O}_3$	RSSR * S * S *	M + S
Y	$\text{Ba}_2^{2+}\text{Me}_2^{2+}\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ atau $2\text{BaO} \cdot 2 \text{ MeO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	TSTSTS	Y
Z	$\text{Ba}_3^{2+}\text{Me}_2^{2+}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ atau $3\text{BaO} \cdot 2 \text{ MeO} \cdot 12\text{Fe}_2\text{O}_3$	RSTSR * S * T * S *	M + Y
U	$\text{Ba}_4^{2+}\text{Me}_2^{2+}\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$ atau $4\text{BaO} \cdot 2 \text{ MeO} \cdot 18\text{Fe}_2\text{O}_3$	RSR * S * T * S *	2M + Y

X	$Ba_2^{2+}Me_2^{2+}Fe_{28}O_{46}$ atau $2BaO.2$ $MeO.14Fe_2O_3$	RSR * S * S *	2M + S
---	--	---------------	--------

Sebuah Sub-unit untuk susunan susun menggunakan, Me = Fe: S = Fe_6O_8 (spinel), R = $BaFe_6O_{11}$ (heksagonal), dan T = $Ba_2Fe_8O_{14}$ (heksagonal).

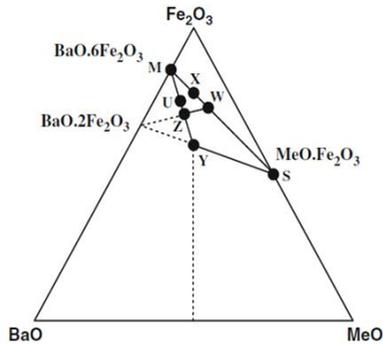
Seperti yang dapat dilihat dari Tabel 1 struktur kristal dan magnet dari berbagai jenis heksaferit sangat kompleks, tetapi semua jenis saling terkait.

Untuk menguraikan lebih lanjut, memanfaatkan struktur spinel S = $2 Me^{2+}Fe_2O_4$ atau $2 MeO.2Fe_2O_3$, (dimana Me = Fe, Co, Mn, Ni, Cu, Mg, Zn mewakili kation logam) dan M = $BaFe_{12}O_{19}$ atau $BaO.6Fe_2O_3$, heksaferit tipe-W dengan rumus kimia $BaMe_2Fe_{16}O_{27}$ dapat direpresentasikan sebagai $W = M + S$. Heksaferit tipe-Y, $Y = Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$, adalah heksaferit planar, dan Mg_2Y dikenal sebagai Ferroplana. Heksaferit planar

lainnya, $3\text{BaO} \cdot 2\text{MeO} \cdot 12\text{Fe}_2\text{O}_3$, dapat dibangun dengan $Z = M + Y$ [2].

Heksaferit tipe-X, $X = 2M + S$, dibentuk dengan menumpuk blok R- dan S- sepanjang sumbu c heksagonal menggunakan model $\text{RSR}^* \text{S}^* \text{S}^*$, di mana R adalah blok lapisan tiga oksigen heksagonal dengan komposisi $\text{BaFe}_6\text{O}_{11}$, dan tanda bintang menunjukkan bahwa blok yang bersangkutan diputar 180° mengelilingi sumbu heksagonal. Terlihat bahwa struktur senyawa tipe-X sangat erat kaitannya dengan struktur senyawa tipe-M dan W.

Heksaferit tipe-U dapat dibangun dengan $U = 2M + Y$ seperti yang terlihat dari diagram fasa pada Gambar 2.2 Struktur umum heksaferit tipe M ($\text{AO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ atau $\text{AFe}_{12}\text{O}_{19}$, dimana A adalah ion divalen seperti Ba^{2+} , Sr^{2+} , Pb^{2+} , dll.), Yang berbentuk heksagonal dengan kelompok spasi $P63/mmc$, dibangun dari 4 blok bangunan, yaitu S, S^* , R, dan R^* .

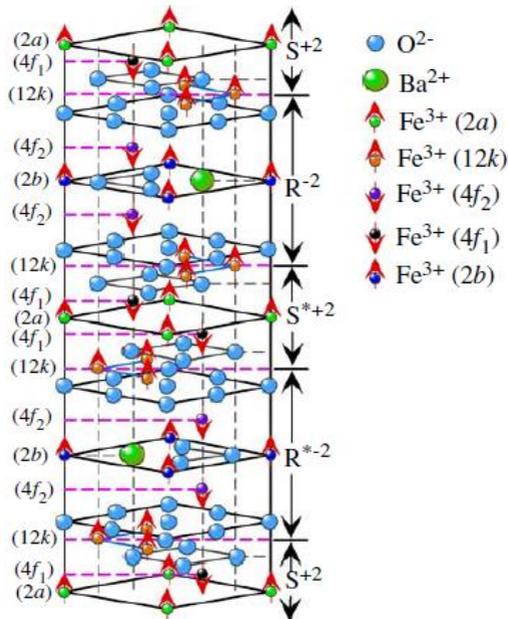


Gambar 2.2 Diagram komposisi kimia yang menunjukkan bagaimana ferit heksagonal berasal dari struktur spinel $\text{MeO.Fe}_2\text{O}_3$. (Ü. Özgür., Dkk [2])

Kation Fe adalah satu-satunya sumber momen magnet: situs $12k$, $2a$, dan $2b$ berputar ke atas dan situs $4f_1$ dan $4f_2$ berputar ke bawah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.3, di mana angka-angka di lokasi penunjukan menunjukkan jumlah total situs tersebut di sel unit.

Panah pada ion Fe mewakili arah polarisasi spin. $2a$, $12k$, dan $4f_2$ adalah oktahedral, $4f_1$ adalah tetrahedral, dan $2b$ adalah situs heksahedral (trigonal bipiramidal)^[2]. Sel satuan berisi total 38 ion O^{2-} , 2 ion Ba^{2+} , dan 24 ion Fe^{3+} . Ion Fe^{3+} di situs $12k$,

2a, dan 2b (total 16 per unit sel) berputar ke atas, sedangkan ion Fe^{3+} di situs $4f_1$ dan $4f_2$ (total 8 per sel unit) berputar ke bawah, yang menghasilkan total bersih dari 8 berputar, dan oleh karena itu, momen total $8 \times 5 \mu\text{B} = 40 \mu\text{B}$ per unit sel yang mengandung dua ion Ba^{2+} .



Gambar 2.3 Struktur skema heksaferrit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Asterix (*) menunjukkan bahwa sub-unit yang bersangkutan diputar 180° di sekitar sumbu heksagonal. (Ü. Özgür., Dkk [2])

Sub-unit R dan S yang ditunjukkan pada Gambar. 2.3 memiliki rumus kimia $R = (\text{Ba}^{2+})$ dan $S =$

2.1.3 FERIT GARNET

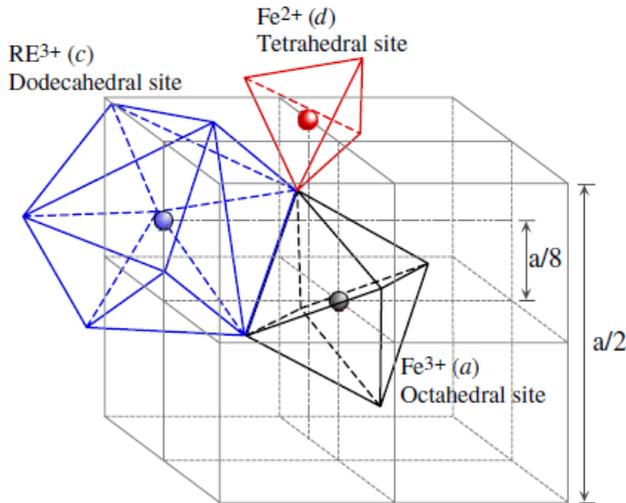
Struktur garnet adalah salah satu struktur kristal yang paling rumit dan sulit untuk menggambarkan representasi dua dimensi yang menunjukkan dengan jelas semua ion (160) dalam sel satuan. Garnet memiliki struktur kristal ortorombik (polihedra oksigen, mengelilingi kation) tetapi dengan kation trivalen (termasuk tanah jarang dan Fe^{3+}) menempati tetrahedral (d), oktahedral (a), atau dodekahedral – polihedral terdistorsi 12 sisi – (c). Interaksi antara situs tetrahedral dan oktahedral adalah antiparalel, dan momen magnet bersih antiparalel dengan ion tanah jarang di situs c^[2]. Berbeda dengan ferit seperti Fe_3O_4 yang pada beberapa atom Fe bersifat divalen dan beberapa trivalen, semua kation tanah jarang dalam garnet

bersifat trivalen. Akibatnya, elektron melompat melalui material dicegah,

Menggali lebih dalam struktur garnet, seperti yang disebutkan di atas sebenarnya ada empat unit $3\text{Me}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ atau delapan unit $\text{Me}_3\text{Fe}_2(\text{FeO}_4)_3$ di sel unit. Enam belas dari empat puluh kation Fe^{3+} menempati situs oktahedral masing-masing di pusat oktahedron^[8] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Situs ini mewakili sublattice magnetik yang disebut A sublattice atau situs. 24 ion Fe^{2+} yang tersisa menempati situs d di pusat tetrahedron, dan situs ini membentuk subkisi magnetik D. Semua 24 kation Me (singkatan dari logam secara umum dan bila secara khusus mengacu pada tanah jarang, RE menggantikan Me) kation terletak di situs 24 c, masing-masing situs berada di tengah polihedron 12 sisi bersudut 8.

Berbeda dengan spinel ferit, yang memiliki dua jenis situs kristalografi seperti yang akan

dijelaskan di bawah, struktur garnet memiliki tiga jenis situs kisi yang tersedia untuk ion logam.



Gambar 2.4 Deskripsi berbagai sublattices (Ü. Özgür., Et al [2])

Besarnya interaksi pertukaran super antara pasangan sublattices sangat bergantung pada sudut antara ion magnet.

Ferit tanah jarang (RE) berbeda dari yang lain karena momen magnet per ion dalam RE ditentukan tidak hanya oleh nilai spin (beberapa logam tanah jarang yang digunakan bahkan tidak memiliki

elektron tak berpasangan spin seperti yttrium), tetapi juga oleh kontribusi orbital karena Lapisan $4f$ yang tidak lengkap dalam elemen RE sebagian disaring dari bidang kristal oleh lapisan $5s$ dan $5p$ dari inti xenon. Interaksi terkuat pada RE garnet masih interaksi $Fe^{3+} - O^{2-} - Fe^{3+}$ yang memiliki sudut $126,6^\circ$.

2.2. TEKNIK PERSIAPAN FERIT

Istilah ferit umumnya digunakan secara umum untuk menggambarkan kelas senyawa oksida magnetik yang mengandung oksida besi sebagai komponen utamanya. Ferit adalah golongan senyawa unik yang terdiri dari lantanida dan logam transisi cepat, khususnya besi, kromium, dan mangan^[9].

2.2.1. NANOPARTIKEL

Sintesis nanopartikel bahan magnet (ferit) telah dilaporkan menggunakan metode kimia yang berbeda; yaitu sol-gel, ball milling, solid state, dan

presipitasi^[10-13]. Berbagai metode digunakan untuk sintesis spinel ferit^[10-20]. Metode pengendapan bersama poliol dan air yang dapat dengan mudah disesuaikan dengan sintesis skala industri untuk memenuhi permintaan berbagai aplikasi komersial.

Nanopartikel ferit superparamagnetik (MFe_2O_4 , di mana $M = Fe, Co, Mn$) disintesis melalui metode kopresipitasi air satu langkah baru berdasarkan penggunaan jenis zat alkali baru: alkanolamin isopropanolamin dan diisopropanolamin. Nanomaterial baru MFe_2O_4 menyajikan ukuran partikel yang lebih kecil (hingga 6 kali) dan meningkatkan magnetisasi saturasi (hingga 1,3 kali) relatif terhadap yang dibuat dengan NaOH. Selanjutnya, nanomaterials menunjukkan peningkatan sifat magnetik bila dibandingkan dengan nanoferrit dengan ukuran yang sama disintesis oleh kopresipitasi dengan basa lain atau dengan metode lain yang dilaporkan dalam literatur. Alkanolamin bertanggung jawab atas

pencapaian ini dengan bertindak baik sebagai agen alkali dan sebagai agen pengompleks yang mengontrol ukuran partikel selama proses sintesis dan meningkatkan penataan ulang spin di permukaan (lapisan "mati" magnetik yang lebih tipis) [21].

Beberapa metode telah dikembangkan untuk sintesis nanopartikel magnetik (MNPs), termasuk kopresipitasi, dekomposisi termal, mikroemulsi, dan sintesis hidrotermal^[22,23]. Kopresipitasi dan dekomposisi termal telah menjadi metode yang paling umum untuk mensintesis oksida besi dan MNP MFe_2O_4 . Yang pertama melibatkan presipitasi simultan ion M^{2+} dan Fe^{3+} dalam larutan air yang diinduksi oleh basa. Dalam rute dekomposisi termal, MNP dihasilkan oleh dekomposisi prekursor kompleks logam [misalnya, logam-kompleks cupferronate (cup = N-nitrosophenylhydroxylamine), logam asetilasetonat, atau logam karbonil] pada suhu

tinggi dalam pelarut organik dengan titik didih tinggi yang mengandung surfaktan^[22,23].

Rute kopresipitasi berair terus menjadi salah satu pilihan yang disukai untuk memproduksi MNP yang dapat terdispersi dalam air dalam hasil tinggi, karena biayanya-efektif, tidak memakan waktu, dan mudah diskalakan untuk aplikasi industri. Selain itu, ini menyediakan rute ramah lingkungan yang menghindari penggunaan pelarut dan reagen berbahaya serta suhu atau tekanan reaksi tinggi. Namun demikian, kontrol ukuran partikel, kristalinitas, dan sifat magnetik melalui jalur ini masih terbatas^[22-24]. Di sisi lain, dekomposisi termal memberikan penyetulan yang lebih baik untuk morfologi, ukuran, dan monodispersi MNP. Namun, penggunaan reagen / pelarut yang mahal dan berbahaya serta suhu reaksi yang tinggi masih merupakan kelemahan utama untuk aplikasi teknologi yang lebih ramah lingkungan^[22,23].

2.2.2. METODE SOL-GEL

Dalam metode ini, pembentukan gel memberikan tingkat homogenitas yang tinggi dan mengurangi kebutuhan untuk difusi atom selama kalsinasi keadaan padat ^[14]. Larutan prekursor yang sesuai dibentuk terlebih dahulu, diikuti dengan konversi menjadi oksida homogen (gel) setelah hidrolisis dan kondensasi. Pengeringan dan kalsinasi gel selanjutnya menghasilkan produk oksida. Biasanya, untuk pembuatan oksida multikomponen, alkoksida dicampur bersama dalam alkohol. Komponen yang tidak mengandung alkoksida dimasukkan sebagai garam, seperti asetat. Hidrolisis dilakukan di bawah suhu terkontrol, pH, dan konsentrasi alkoksida, air tambahan, dan alkohol. Teknik sol-gel adalah teknik yang murah dan bersuhu rendah yang memungkinkan pengontrolan komposisi kimia produk dengan baik.

2.2.3. METODE PRESIPITASI

Dalam metode presipitasi, pengendapan zat yang biasanya larut dalam kondisi yang digunakan. Inklusi terjadi ketika pengotor menempati situs kisi dalam struktur kristal pembawa, mengakibatkan cacat kristalografi, yang dapat terjadi ketika jari-jari ionik dan muatan pengotor serupa dengan yang ada di pembawa. Adsorbat adalah pengotor yang terikat lemah (teradsorpsi) ke permukaan endapan. Oklusi terjadi ketika pengotor yang teradsorpsi terperangkap secara fisik di dalam kristal saat ia tumbuh^[16].

2.2.4. BALL MILLING

Ball mill adalah bagian penting dari peralatan untuk menggiling. Ini banyak digunakan untuk semen, produk silikat, bahan bangunan tipe baru, bahan tahan api, pupuk kimia, logam hitam dan nonferrous, kaca, keramik, dll. Ball mill dapat menggiling bijih atau bahan lain yang dapat digiling dengan basah atau proses kering^[17]. Ball milling

meningkatkan luas permukaan material padat dan memungkinkan persiapan ukuran butiran yang diinginkan.

2.2.5. METODE REAKSI SOLID-STATE

Metode sintesis solid-state adalah yang paling banyak digunakan. Metode ini melibatkan pencampuran bahan mentah dan dapat dilakukan dengan proses basah dan kering. Suspensi berair, gilingan agitator, atau drum getaran digunakan dalam metode pencampuran basah. Metode ini sangat efektif tetapi membutuhkan energi untuk pengeringan dan pengeringan^[9]. Pencampuran kering dilakukan baik dengan menggiling dan mencampur dalam drum atau ball mill.

2.3. FILM TIPIS

2.3.1. SOL-GEL

Proses sol-gel telah terbukti menjadi metode yang efisien untuk menyiapkan partikel ultra halus yang terdispersi dalam berbagai matriks dan,

khususnya, untuk menghasilkan film tipis. Melalui metode ini, kontrol yang baik dari sampel morfologi, tekstur, struktur, dan komposisi kimia dapat dicapai dengan memantau parameter preparasi secara cermat^[25-28]. Penggunaan matriks anorganik memungkinkan dispersi sempit ukuran partikel, dan distribusi homogen.

Film dibuat dengan 30% berat ferit yang didispersikan dalam matriks silika. Larutan prekursor diaduk selama 1 jam untuk homogenisasi dan diistirahatkan hingga viskositas mencapai kondisi nilai terbaik (2-5 cp) untuk proses dipcoating. Film disiapkan pada substrat kuarsa bersih menggunakan kecepatan penarikan 0,6 mm / s. Setelah proses pelapisan, sampel dikeringkan di udara pada suhu kamar ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) selama 24 jam, dikeringkan pada 80°C selama 1 jam dan akhirnya diperlakukan pada 550 , 750 , dan 950°C selama 10 menit ^[29].

Ketebalan film bervariasi dari 500 hingga 400nm dengan suhu perlakuan yang lebih tinggi. Mikroskopi gaya atom menunjukkan bahwa film-film tersebut menyajikan topografi homogen berpori, berubah menjadi morfologi partikel nano dengan perlakuan panas di atas 550° C, menampilkan ukuran partikel Co ferit dalam urutan 20 nm pada 950° C. Ukuran partikel meningkat dengan panas suhu yang lebih tinggi pengobatan. Perilaku superparamagnetik diamati pada suhu kamar serta histeresis karena pemblokiran dinamika magnet pada suhu rendah [29].

2.3.2. PLD (DEPOSISI LASER BERDENYUT)

Teknik pulsed laser deposisi (PLD) muncul sebagai teknik yang layak untuk menyiapkan film berkualitas tinggi dari bahan ferit. Fasilitas pertumbuhan sedang disiapkan untuk menyiapkan ferit dari berbagai komposisi dan struktur [30]. Teknik deposisi laser berdenyut menggunakan laser

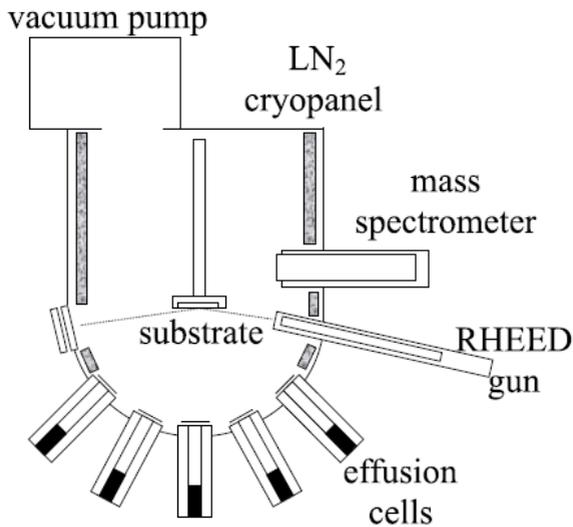
excimer KrF ($\lambda = 248 \text{ nm}$) dengan dalam ruang vakum dengan tekanan dasar 3×10^{-6} Torr. Laser difokuskan pada kepadatan energi $\sim 3 \text{ J/cm}^2$ ke target YIG polikristalin standar yang diputar (6 rpm) selama proses deposisi. Bahan yang diuapkan dari target diendapkan ke substrat gadolinium gallium garnet (GGG) kristal tunggal berukuran $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ (111) yang diikat ke pemanas resistif yang ditempatkan 4 cm dari target. Film ditanam pada berbagai suhu substrat dan tekanan parsial oksigen mulai dari 700 hingga $850 \text{ }^\circ\text{C}$ dan 50 hingga 1000 mTorr, masing-masing [30].

Secara umum, film garnet dapat memiliki anisotropi magnetik uniaksial yang disebabkan oleh istilah stres dan istilah yang diinduksi pertumbuhan yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti ketidakcocokan kisi, konsentrasi doping, dan pendinginan super.[31-34]. Biasanya suhu yang diinduksi stres kurang signifikan daripada suhu yang diinduksi pertumbuhan dan memang dalam

kasus film PLD YIG, anil pada 700, 800, dan 900 °C selama 2 jam masing-masing tidak menghasilkan perubahan dalam sifat magnetik film.

2.3.3. MBE (MOLECULAR BEAM EPITAXY)

Epitaksi berkas molekul adalah teknik pertumbuhan epitaksial melalui interaksi satu atau beberapa berkas molekul atau atom yang terjadi pada permukaan benda yang dipanaskan. substrat kristal. Pada Gambar 2.5 skema sistem MBE tipikal ditampilkan. Bahan sumber padat ditempatkan dalam sel penguapan untuk memberikan distribusi sudut atom atau molekul dalam sebuah berkas [35].



Gambar 2.5 Sistem MBE yang khas. (F. Rinaldi [31])

Sampel ditumbuhkan di bawah vakum sangat tinggi dalam ruang deposisi film tipis molekul-beam epitaxy (MBE) dengan tekanan dasar $<1 \times 10^{-9}$ Torr. Wafer kristal tunggal MgO kelas epitaxial diperoleh secara komersial dipotong dalam $\pm 1^\circ$ dari bidang kristal (001) dan dimasukkan langsung ke dalam vakum. Kami memperoleh permukaan yang bersih dan tatanan kristal yang baik dengan memanaskan substrat dalam vakum

600°C selama 20-30 menit. Setelah perlakuan tersebut, pola RHEED yang tertata rapi (refleksi diraksi elektron berenergi tinggi) menunjukkan keteraturan kristal permukaan jarak jauh dan kerataan. Deposisi Fe₃O₄ dan NiO diperoleh dari fluks efusif logam kemurnian tinggi Fe dan Ni dari dua sumber penguapan berkas elektron Temescal 15 kW, dengan laju fluks logam diatur ke $\sim 2.0 \text{ \AA} / \text{s}$, dan ditutup secara bergantian untuk pertumbuhan dua bahan penyusun [36].

Ketergantungan suhu, magnetisasi menunjukkan peningkatan momen pengamatan pada 300 K, dan respon yang dapat menjadi indikasi ferrimagnetisme dengan suhu Curie yang lebih rendah untuk sublattice magnetisasi minoritas daripada untuk sublattice mayoritas.

2.3.4. CVD (DEPOSISI UAP KIMIA)

Deposisi uap kimia (CVD) adalah proses pelepasan material padat ke substrat yang

dipanaskan melalui reaksi kimia pada permukaan substrat dari reaktan fasa gas. Pengendapan NiFe_2O_4 menggunakan CVD dalam kondisi tekanan rendah untuk berbagai manfaat yang meliputi kemurnian tinggi dan keseragaman film tipis, relatif mudah untuk dilakukan di laboratorium dan mereproduksi hasil. CVD pada tekanan rendah cenderung mengurangi reaksi fase gas yang dapat membuat partikulat dan menyebabkan cacat pada lapisan tipis yang diendapkan. CVD juga memungkinkan peningkatan kontrol atas rasio stoikiometri gas reaktan dan mampu menutupi area yang luas tanpa menghasilkan ketebalan film yang tidak rata [37].

Wafer silikon berukuran 1 cm x 1 cm digunakan sebagai substrat untuk pengendapan film tipis Fe_2O_3 , NiO dan NiFe_2O_4 . Wafer dibersihkan dengan air deionisasi. Mereka kemudian dikeringkan menggunakan nitrogen. Lapisan oksida silikon asli memiliki ketebalan

sekitar 10 - 15 Å di permukaan. Tekanan dasar sistem pada kondisi ini adalah 60 mTorr. Untuk pengendapan siklik, kondisi yang digunakan adalah 60 °C untuk sublimator nikel, 65 °C untuk bubbler n-butylferosen, dan temperatur reaktor 400 °C. Setiap siklus terdiri dari 60 detik pengendapan NiO diikuti oleh 30 detik pengendapan Fe₂O₃ [37]. Percobaan dijalankan selama 5 siklus. Film yang tumbuh dapat berupa lapisan laminasi oksida nikel dan oksida besi.

Unsur logam dalam film memiliki status kimia Fe³⁺, Ni²⁺ dan Ni³⁺, yang menunjukkan status oksidasi mereka. Struktur kristal akan bervariasi tergantung pada suhu pengendapan [38]. Jika film tipis NiFe₂O₄ adalah amorf atau mengandung cacat pada kisi kristalnya, penyesuaian suhu reaksi atau anil pada suhu tinggi mungkin diperlukan.

2.4. SIFAT FERIT

2.4.1. SIFAT STRUKTUR FERIT

Oksida dengan logam transisi (atau tanah jarang) sebagai penyusunnya memiliki minat khusus karena menunjukkan permeabilitas yang besar yang besarnya bergantung pada banyak kasus pada variasi sifat struktural (susunan atom) yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti regangan yang dapat diterapkan secara eksternal [2].

Sel satuan ferit spinel terdiri dari 32 atom oksigen dalam susunan kubik tertutup yang didistribusikan dalam tetrahedral ("A") dan situs oktahedral ("B"). Sifat kimia dan struktur nanokristal spinel ferit dipengaruhi oleh komposisi dan metode sintesisnya, dan sifat listrik dan magnet yang sesuai bergantung pada substitusi kation.

Jika situs A terisi penuh oleh kation Fe^{3+} dan situs B secara acak ditempati oleh kation Me^{2+} dan Fe^{3+} , struktur ini disebut sebagai spinel terbalik. Dalam kebanyakan spinel, distribusi kation memiliki tingkat inversi menengah di mana kedua

situs mengandung sebagian kecil kation Me^{2+} dan Fe^{3+} [39].

Kimia kristal menunjukkan bagaimana komposisi kimia (rumus kimia), struktur internal, dan sifat fisik mineral saling terkait. Menurut distribusi kation, ada jenis ferrospinels berikut:

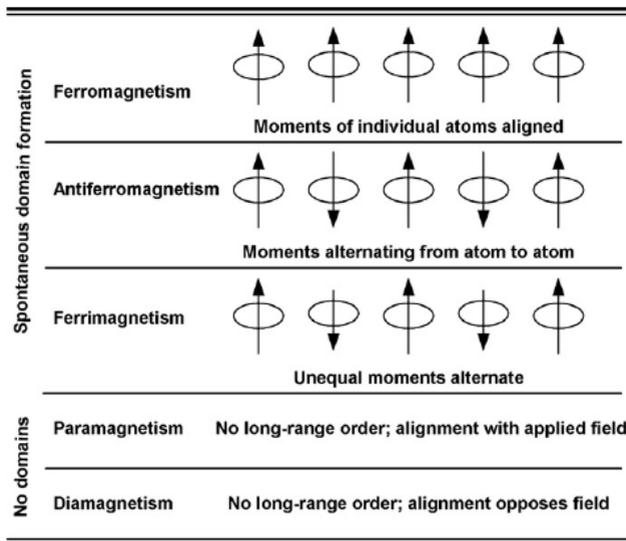
- 1) Struktur spinel normal, di mana semua Me^{2+} ion menempati situs-A; rumus struktur seperti itu ferit adalah $Me^{2+}[Fe_2^{3+}]O_4^{2-}$. Jenis distribusi ini terjadi pada seng ferit $Zn^{2+}[Fe^{2+} Fe^{3+}] O_4^{2-}$.
- 2) Struktur spinel terbalik, tempat semua Me^{2+} berada di posisi-B dan ion Fe^{3+} sama didistribusikan antara A dan B-situs: rumus struktur ferit ini $Fe^{3+}[Me^{2+}Fe^{3+}]O_4^{2-}$. Magnetit Fe_3O_4 , ferit $NiFe_2O_4$ dan $CoFe_2O_4$ telah terbalik struktur spinel.

3) Struktur spinel campuran, saat kation Me^{2+} dan Fe^{3+} menempati posisi A dan B; rumus struktur ferit ini adalah $Me_{1-2\delta}Fe_{2\delta}O_4$, dengan δ adalah derajatnya inversi. $MnFe_2O_4$ mewakili jenis struktur ini dan memiliki derajat inversi $\delta = 0.2$ dan rumus strukturnya adalah $Mn_{0.8}Fe_{0.2}O_4$. $Mn - Zn$ ferit juga memiliki struktur spinel campuran (Zn^{2+} lebih suka menempati A-sites) $Zn_xMn_yFe_{1-x-y}O_4$, dimana $\delta = 1$

2.4.2. SIFAT MAGNET FERIT

Efek ukuran kuantum dan luas permukaan nanopartikel magnetik secara dramatis mengubah beberapa sifat magnetis dan menunjukkan fenomena superparamagnetik dan penerowongan kuantum magnetisasi, karena setiap partikel dapat

dianggap sebagai domain magnet tunggal. Bahan diklasifikasikan berdasarkan responsnya terhadap medan magnet yang diterapkan secara eksternal. Deskripsi orientasi momen magnet dalam bahan membantu mengidentifikasi berbagai bentuk magnet yang diamati di alam. Gambar 2.6.



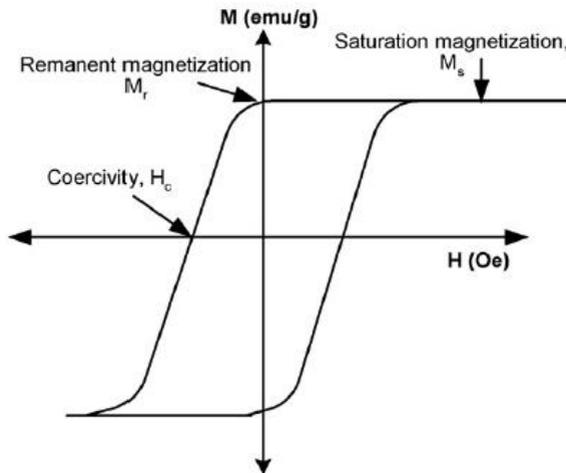
Gambar 2.6 Berbagai jenis perilaku magnet. (DS Mathew, dan R. -S. Juang. [39])

Lima tipe dasar magnet dapat dijelaskan: diamagnetisme, paramagnetisme, ferromagnetisme, antiferromagnetisme, dan ferrimagnetisme. Dengan

adanya medan magnet yang diterapkan secara eksternal, loop arus atom yang dibuat oleh gerakan orbital elektron merespons untuk menentang medan yang diterapkan. Bahan diamagnetik memiliki kerentanan negatif lemah menolak medan magnet yang diterapkan (misalnya kuarsa SiO_2 dan kalsit CaCO_3). Dengan demikian, momen material paramagnetik tidak memiliki urutan jarak jauh dan terdapat kerentanan magnetik positif ($\chi > 0$). Lebih lanjut, kecil momen-momen yang diselaraskan dalam material feromagnetik dapat menghasilkan magnetisasi spontan tanpa adanya medan magnet yang diterapkan.

Bahan yang memiliki momen magnet atom dengan besaran yang sama yang disusun dalam mode anti-paralel menampilkan anti-ferromagnetisme, interaksi pertukaran pasangan momen sedemikian rupa sehingga mereka antiparalel sehingga meninggalkan magnetisasi

bersih nol [40]. Ferrimagnetisme adalah sifat yang ditunjukkan oleh bahan yang atom atau ionnya cenderung memiliki susunan teratur tetapi tidak paralel dalam bidang yang diterapkan nol di bawah suhu karakteristik tertentu yang dikenal sebagai suhu Neel (misalnya, Fe_3O_4 dan Fe_3S_4).



Gambar 2.7 Siklus histeresis material magnet multidomain, dimana H adalah amplitudo medan magnet (Oe) dan M adalah magnetisasi material (emu / g). (DS Mathew, dan R. -S. Juang. [39])

Dalam kasus biasa, dalam domain magnet, hasil magnetisasi bersih substansial dari keselarasan antiparalel dari sublattice non-ekuivalen tetangga.

Parameter magnet yang paling umum diukur secara skematis diilustrasikan dalam loop histeresis (magnetisasi versus medan) yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Penerapan medan magnet yang cukup besar menyebabkan putaran di dalam material sejajar dengan medan. Nilai maksimum magnetisasi yang dicapai dalam keadaan ini disebut magnetisasi saturasi, M_s . Ketika besarnya medan magnet berkurang, putaran berhenti sejajar dengan medan dan magnetisasi total berkurang [39].

2.4.3. SIFAT LISTRIK FERIT

Untuk banyak aplikasi, sintesis nanopartikel berukuran seragam adalah kunci penting, karena sifat listrik, optik dan magnet dari nanopartikel ini sangat bergantung pada dimensinya. Pada skala nano, properti seperti konduktivitas listrik dan

kekuatan mekanik tidak sama seperti pada ukuran massal. Struktur elektroniknya juga berubah secara dramatis [39].

Sebagian besar bahan magnet yang berguna secara teknologi seperti besi dan paduan logam memiliki resistivitas listrik yang rendah. Ini membuatnya tidak berguna untuk aplikasi pada frekuensi tinggi, misalnya, sebagai inti induktor di sirkuit TV. Masalahnya adalah resistivitas listrik yang rendah memungkinkan arus induksi (disebut arus eddy) mengalir di dalam material itu sendiri, sehingga menghasilkan panas. Namun, ferit dapat bekerja lebih baik pada frekuensi tinggi karena memiliki resistivitas listrik yang tinggi.

Ferit nikel-seng adalah bahan magnetis yang banyak digunakan dalam industri elektronik modern. Hal ini terutama karena resistivitas listriknya yang tinggi, yang menyiratkan kerugian arus pusar rendah yang menjadi signifikan pada

frekuensi medan elektromagnetik yang lebih tinggi. Penggunaan penting ferit Mn - Zn lainnya adalah dalam pengembangan kendaraan listrik. Produsen mobil secara aktif meneliti pengembangan kendaraan listrik (EV), kendaraan listrik hibrida, dan kendaraan sel bahan bakar untuk melindungi lingkungan global di abad ke-21 [39].

2.4.4. KOMPOSIT NANO

Sifat magnetik nanokomposit sering diukur sebagai fungsi dari fraksi volume komponen magnet, dengan koersivitas maksimum terjadi pada fraksi volume di bawah konsentrasi perkolasi. Perkolasi mendorong pembentukan loop penutupan magnetik, yang menurunkan koersivitas [41].

Partikel feromagnetik dalam host nonmagnetik ("feromagnet granular") menunjukkan fenomena magnetoresistensi raksasa dan mungkin memiliki aplikasi di kepala perekam magnet. Isolasi

elektrik atau sifat konduktif dari matriks juga dapat mempengaruhi sifat magnetik dari nanokomposit. Seperti halnya partikel cangkang inti, nanokomposit mengisolasi dan melindungi komponen magnetis dengan biaya kemungkinan interaksi antara putaran permukaan dan matriks. Nanokomposit juga membantu mencegah aglomerasi partikel magnetik dengan cara mengikatnya dalam matriks, yang dapat memberikan cara untuk mengatur interaksi pada rentang yang lebih luas daripada di ferrofluida.

Salah satu subkelas nanokomposit yang paling menarik adalah koloid magnetik yang distabilkan sendiri: partikel magnetik tersuspensi dalam matriks polimer. Nanokomposit logam polimer / magnet memiliki aplikasi potensial dalam perisai elektromagnetik dan sebagai inang untuk partikel yang sangat reaktif. Karena banyak partikel ultrafine bersifat piroforik, matriks polimerik dapat memudahkan transportasi dan penyimpanan

partikel dengan kemungkinan pengambilan di masa mendatang. Seperti dengan semua jenis perantara, matriks polimer memisahkan partikel tetapi juga dapat menyediakan kopling magnetik antar partikel. Efek pada struktur polimer karena adanya partikel magnetik juga dimungkinkan. Dalam komposit dengan logam pengisi ukuran mikro [41], panjang rantai polimer utama berkurang dan jaringan yang lebih kaku di lapisan batas yang mengelilingi partikel terbentuk.

Nanokomposit partikel yang lebih kecil bersifat superparamagnetik, sedangkan nanokomposit partikel yang lebih besar (25 nm) bersifat feromagnetik pada suhu kamar. Nanokomposit magnetik juga menggunakan inang zeolit, meskipun templat zeolit sebelumnya terbatas pada ukuran partikel yang lebih kecil.^[42]

Ferit nikel - seng ($\text{Ni}(x)\text{Zn}(1-x)\text{Fe}_2\text{O}_4$) adalah sistem material penting secara teknologi yang

digunakan dalam berbagai aplikasi elektronika daya dan frekuensi radio (RF) karena kombinasi permeabilitas dan resistivitasnya yang relatif tinggi. Properti ini memungkinkan penggunaannya sebagai induktor rugi rendah dan inti transformator serta perangkat penekan gangguan elektromagnetik (EMI) pada frekuensi yang lebih tinggi daripada ferit mangan-seng ($\text{Mn}_{(x)}\text{Zn}_{(1-x)}\text{Fe}_2\text{O}_4$).

Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa badan federal AS telah menyatakan keprihatinannya atas efek karsinogenik, serta toksisitas lingkungan, dari senyawa yang mengandung nikel dan kobalt. Karena magnesium adalah divalen dan secara istimewa berada pada subkisi oktahedron yang mirip dengan nikel, salah satu bahan pengganti potensial adalah magnesium-seng spinel ferit ($\text{Mg}_{(x)}\text{Zn}_{(1-x)}\text{Fe}_2\text{O}_4$). Spinel dalam domain skala nano memiliki kegunaan besar karena sifat merdu dengan ukuran dan perlakuan termal. Ferit berdistribusi kation adalah ^[43,44] spinel oksida

dengan komposisi kimiawi ($M_{1-\delta}Fe_{\delta}$) [$M_{\delta}Fe_{2-\delta}$] O_4 , di mana δ adalah parameter menggambarkan distribusi kation pada sistem ferit. Distribusi kation di spinel dan pengaruhnya terhadap spektrum raman telah didokumentasikan dengan baik dalam literatur [45,46].

2.4.5. CORE-SHELL

Nanoclusters magnetik inti-cangkang memiliki minat khusus karena struktur nano heterogen menawarkan peluang untuk mengembangkan perangkat dan material yang dirakit kluster dengan fungsi baru untuk perekaman magnetik, bio, dan aplikasi medis. Ketergantungan struktur ini membuka kemungkinan untuk tuning properties dengan mengontrol komposisi kimianya dan ukuran relatif dari inti dan cangkang. Nanocluster inti-cangkang baru-baru ini mendapat perhatian yang cukup besar karena sifat fisik dan kimianya yang sangat

bergantung pada struktur inti, cangkang, dan antarmuka [47].

Struktur inti-cangkang mampu mempertahankan sifat magnetis besi logam yang menguntungkan sekaligus mencegah nanopartikel dari oksidasi. Material seperti logam-oksida (besi oksida), senyawa anorganik (SiO_2), dan logam mulia (emas dan perak) biasa digunakan sebagai pelapis nanopartikel besi. Emas telah menjadi salah satu bahan pelapis yang populer karena kelembaman kimianya, kompatibilitas-bio, tidak beracun, dan geometri cluster yang beragam seperti lembaran planar, sangkar, dan tabung [48-51]. Lapisan emas (cangkang) cenderung terdistribusi lebih merata pada partikel bola dibandingkan pada partikel asikuler. Lebih penting lagi, lapisan emas mampu mempertahankan banyak sifat magnet yang menguntungkan (seperti koersivitas atau suhu pemblokiran) dari inti. Nanopartikel Fe Au cangkang emas inti besi memiliki beberapa

keunggulan unik: pertama, dapat dengan mudah disiapkan baik dalam media berair atau organik. Kedua, partikel sering memiliki magnetisasi saturasi tinggi, dibandingkan dengan oksida besi dan bahan magnet lainnya. Ketiga, karena beragam fungsi permukaan emas, nanopartikel besi berlapis emas memiliki fungsi yang meningkat.

2.5. APLIKASI FERIT

Ferit memiliki jumlah aplikasi yang besar dan terus meningkat karena teknisi komponen dan sirkuit telah menganggapnya menguntungkan dalam mencapai tujuan tertentu. Dalam beberapa kasus, ferit menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi, volume yang lebih kecil, biaya lebih rendah, keseragaman yang lebih besar, atau pembuatan yang lebih mudah daripada yang dapat diperoleh dengan bahan lain [52].

2.5.1 NANOPARTIKEL

Pengendalian ukuran monodisperse sangat penting karena sifat dari nanocrystals sangat bergantung pada dimensi nanopartikel. Nanopartikel oksida besi superparamagnetik dengan kimia permukaan yang sesuai dapat digunakan untuk berbagai aplikasi *in vivo*, seperti peningkatan kontras MRI, perbaikan jaringan, immunoassay, detoksifikasi cairan biologis, hipertermia, pengiriman obat, dan pemisahan sel [53].

Semua aplikasi biomedis ini mengharuskan nanopartikel memiliki nilai magnetisasi yang tinggi, ukuran yang lebih kecil dari 100 nm, dan distribusi ukuran partikel yang sempit. Aplikasi ini juga membutuhkan lapisan permukaan khusus dari partikel magnetik, yang harus tidak beracun dan biokompatibel dan juga harus memungkinkan pengiriman yang dapat ditargetkan dengan lokalisasi partikel di area tertentu. Nanopartikel magnetis seperti itu dapat mengikat obat, protein,

enzim, antibodi, atau nukleotida dan dapat diarahkan ke organ, jaringan, atau tumor menggunakan medan magnet eksternal [54]. Sejumlah pendekatan telah dijelaskan untuk menghasilkan nanopartikel magnetik [55,56]. Nanopartikel ferit dalam kombinasi dengan nanotube karbon dapat secara efisien menyerap radiasi gelombang mikro [57].

Selama beberapa tahun terakhir ada peningkatan minat untuk mengembangkan bahan ferit nanokristalin karena partikel ferit berukuran nano mampu menunjukkan sifat magnet yang tidak biasa, seperti superparamagnetisme, peningkatan suhu Curie, distribusi kation metastabil, dll., Yang tidak diamati secara massal. bahan [58].

CoFe_2O_4 skala nano bisa menjadi dasar yang menjanjikan untuk magnet permanen, media perekam magnetik, dan bahkan aplikasi pengiriman obat [59]. Diantara material ferrite, zinc ferrite yang

telah banyak diaplikasikan di berbagai bidang industri diantaranya material magnetic, sensor gas dan material absorbent untuk hot-gas [60].

Sebagai kandidat potensial agen kontras dalam pencitraan MRI, NP superparamagnetik mangan ferit (MnFe_2O_4). Studi pencitraan MR in vivo dalam hubungannya dengan spektroskopi emisi plasma-atom yang digabungkan secara induktif menunjukkan bahwa NP MnFe_2O_4 terakumulasi secara istimewa di hati setelah injeksi intravena selama 4 jam. Hal ini menunjukkan bahwa MnFe_2O_4 NP yang dikembangkan dapat berfungsi sebagai agen kontras pencitraan MRI yang sensitif untuk pencitraan hati [61].

2.5.2. FILM TIPIS

Selain itu, meskipun studi struktural dan morfologi dapat menentukan kualitas lapisan tipis magnetik, metode ini tidak benar-benar memberikan indikasi praktis kualitas film dalam hal

kesesuaian untuk aplikasi perangkat gelombang mikro karena sifat magnetnya (misalnya, lebar garis resonansi magnetik).) benar-benar merupakan tokoh penting dari prestasi [30].

Film tipis ferit nanokristalin (10-50 nm) dengan struktur kubik spinel telah menjadi subjek penyelidikan ekstensif karena aplikasi potensial mereka dalam perangkat perekam magneto-optic densitas tinggi, pencitraan warna, bioproses, pendinginan magnetik dan ferrofluida [62,63].

Ferit kobalt memiliki peran penting sebagai kandidat potensial untuk media perekam magnetis, optik, dan sifat magnetostriksi. Koersivitas rendah dari film ferit kobalt merugikan untuk aplikasi media perekam [64].

Film NiFe_2O_4 stoikiometri menunjukkan konduktivitas listrik tipe-n. NiFe_2O_4 adalah material yang paling cocok untuk aplikasi perangkat di gelombang mikro atas dan gelombang milimeter

bawah. Terlepas dari kepentingan teknologinya dalam industri elektronik dan magnet [65].

Ferit Bismuth (BiFeO_3) adalah salah satu oksida perovskit yang paling banyak diteliti karena koeksistensi feroelektrik dan antiferromagnetisme pada suhu kamar, menunjukkan aplikasi potensial dalam memori dan perangkat logika [66].

Daftar Pustaka

- [1] R. E. Collin. *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd edn. (IEEE Press, New York, 2000).
- [2] Özgür Ü, Alivov Y, and Morkoç H. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 20 (2009), 789-834.
- [3] Pullar R. C. *Prog. Mater. Scien.* 57 (2012), 1191-334.
- [4] J.J. Went, G.W. Ratheneau, E.W. Gorter, and G.W. Van Oosterhout. *Philips Tech. Rev.* 13 (1952), 194.
- [5] G.H. Jonker, H.P. Wijn, and P.B. Braun. *Philips. Technol. Rev.* 18 (1956-1957), 145.
- [6] H.P.J. Wijn. *Nature.* 170 (1952), 707. doi:10.1038/170707a0.
- [7] P.B. Braun, *Nature.* 170 (1952), 708. doi:10.1038/170708a0.
- [8] S. Geller, and M.A. Gilleo. *J. Phys. Chem. Solids.* 3 (1957), 30. doi:10.1016/0022-3697(57)90044-6.
- [9] Srivastava R, and Yadav B. C. *Intl. J. Green Nanotech.* 4 (2012), 141-54.
- [10] Venkataramana, A. Hiremath, V. A. Date, and S. K. Kulkarni. *Bull. Mater. Sci.* 24 (2001), 617-21.
- [11] Ennas G, Marongiu G, Musinu A, Falqui A, Ballirano P, and Caminiti R. *J. Mater. Res.* 14 (1999), 1570-5.
- [12] Mizutani N, Iwasaki T, Watano S, Yanagida T, Tanaka H, and Kawai T. *Bull. Mater. Sci.* 31 (2008), 713-7.
- [13] Narasimhan B. R. V, Prabhakar S, Manohar P, and Gnanam F. D. *Mater. Lett.* 52 (2002), 295-300.
- [14] Zayat M, and Ley D. *Chem. Mater.* 12 (2002), 2763-9.
- [15] Hench L. L, and West J. K. *Chem. Rev.* 90 (1990), 33-72.

- [16] Harvey D. *Modern Analytical Chemistry*, 1st edn. McGraw-Hill: New York, (2000).
- [17] Chatterjee A, Das D, Pradhan, S. K, and Chakravorty D. J. *Magn. Magn. Mater.* 127 (1993), 214.
- [18] Grave E. D, Govaert A, Chambaere D, and Robbrecht G. *Phys. B Condens. Matter.* 96 (1979), 103.
- [19] Jakubovics J. P. *Magnetism and Magnetic Materials*, 2nd edn. Cambridge University Press: Cambridge, UK, (1994).
- [20] Cross W. B, Affleck L, Kuznetsov M. V, Parkin I. P, and Pankhurst Q. A. J. *Mater. Chem.* 9 (1999), 2545-52.
- [21] C. Pereira, et al. *Chem. Mater.* 24 (2012), 1496-1504.
- [22] Lu A.-H., Salabas E. L., and Schüth F. *Angew. Chem., Int. Ed.* 46 (2007), 1222.
- [23] Laurent S., Forge D., Port M., Roch. A., Robic C., Elst L. V., Muller R. N. *Chem. Rev.* 108 (2008), 2064.
- [24] Salazar J. S., Perez L., de Abril O., Phuoc L. T., Ihiawakrim D., Vazquez M., Greneche J.-M., Begin-Colin S., Pourrov G. *Chem. Mater.* 23 (2011), 1379.
- [25] L. Zhang, G. C. Papaefthymiou, R. F. Ziolo, and J. Y. Ying. *Nanostructured Materials.* 9 (1997), 185.
- [26] C. Yan, F. Cheng, C. Liao, J. Kuang, Z. Xu, L. Chen, H. Zhao, Z. Liu, Y. Wang, T. Zhu, and G. He. *J. Magn. Magn. Mater.* 192 (1999), 396.
- [27] C. J. Brinker (Ed.). *The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, Academic Press, San Diego, (1990).
- [28] N. D. S. Mohallem, and L. M. Seara. *App. Surf. Sci.* 214 (2003), 143.
- [29] Mohallem N. D. S, M. Seara L, Novak M. A, and P. Sinnecker E. H. C. *Brazilian J. Phys.* 3B(36) (2006), 1078-80.

- [30] Dorsey P. C, Bushnell S. E, Seed R. G, and Vittoria C. J. *Appl. Phys.* 74(2) (1993), 1242-6.
- [31] P. Hansen, K. Witter, and W. Tolksdorf. *J. Appl. Phys.* 55 (1984), 1052.
- [32] P Hansen, C.-P. Klages, and K. Witter. *J. Appl. Phys.* 60 (1986), 721.
- [33] P: Hansen, K. Witter, and W. Tolksdorf. *Phys. Rev. B.* 27 (1983), 6608.
- [34] A. H. Bobeck, E. G. Spencer, L. G. Van Uitert, S. C. Abrahams, R. L. Barns, W. H. Grodkiewicz, R. C. Sherwood, P. A. Schmidt, D. H. Smith, and E. M. Walters. *Appl. Phys. Lett.* 17 (1970), 131.
- [35] Rinaldi F. *Basics of Molecular Beam Epitaxy (MBE). Annual Report* (2002).
- [36] Lind D. M, Berry S. D, Chern G, Mathias H, and Testardi L. R. *J. Appl. Phys.* 70(10) (1991), 6218-20.
- [37] Kimbell M. A, Singh M, Yang Y, and Takoudis C. G. *Journal of Undergraduate Research* 3(1) (2010), 1-5.
- [38] J. K. Kang and S. W. Rhee. *Thin Solid Films.* 391 (2001), 57.
- [39] D. S. Mathew, and R. -S. Juang. *Chemical Engineering Journal* 129 (2007), 51-65.
- [40] C. M. Sorensen, in: K. J. Klabunde (Ed.), *Nanoscale Materials in Chemistry*, Wiley, New York (2001).
- [41] Laslie-Pelecky D. L, and Rieke R. D. *Chem. Meter.* 8 (1996), 1770-83.
- [42] L á z a r o F . J , G a r c í a J . L , S c h ü n e m X. *IEEE Trans. Magn.* 29 (1993), 2652.
- [43] Z. J. Zhang, Z. L. Wang, B. Chakoumaks, J. S. Yin. *Journal of American Chemical Society* 120 (1998) 4.

- [44] T. Yu, Z. X. Shen, Y. Shi, J. Ding. *Journal of Physics: Condensed Matter* 37 (2002) L613.
- [45] L. M. Fraas, J. E. Moore, J. B. Salzberg. *The Journal of Chemical Physics* 58 (9) (1973) 3585-3592.
- [46] Z. Cvejic, S. Rakic, A. Kremenovic, B. Antic, C. Jovalekic, P. Colombari. *Solid State Sciences* 8 (8) (2006) 908-915.
- [47] Wang Jinlan, and Zeng X. C. *Core-Shell Magnetic Nanoclusters. Nanoscale Magnetic Materials and Applications*. doi:10.1007/978-0-387-85600-1_2, (2009).
- [48] Pyykkö P. *Theoretical chemistry of gold*. *Angew. Chem. Int. Ed.* 43 (2004), 4412-56.
- [49] Johansson M. P, Sundholm D, Vaara J. Au₃₂: A 24-carat golden fullerene. *Angew. Chem. Int. Ed.* 43 (2004), 2678-81.
- [50] Wang J, Jelinek J, Zhao J, Chen Z, King R. B, von Rague Schleyer P. J. *Phys. Chem. A.* 109 (2005), 9265-9.
- [51] Kondo Y, and Takayanagi K. *Synthesis and characterization of helical multi-shell gold nanowires*. *Science*. 289 (2000), 606-8.
- [52] Owens C. Dale. *A Survey of the Properties and Applications of Ferrites Below Microwave Frequencies*. *Proceedings of The IRE.* (1956).
- [53] Gupta A. K, and Gupta M. *Biomaterials*. 26(18) (2005), 3995.
- [54] Chastellain M, Petri A, Gupta A, Rao K. V, and Hofmann H. *Adv. Eng. Mater.* 6(4) (2004), 235.
- [55] Willard M. A, Kurihara L. K, Carpenter E. E, Calvin S, and Harris V. G. *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*. Nalwa H. S. Ed. *American Scientific Publishers: Valencia, CA*, (2004) Vol. 1, 815.

- [56] Tartaj P, Morales M. P, Veintemillas-Verdaguer S, Gonzalez-Carreño T, Serna C. J. Handbook of Magnetic Materials. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, (2006), 403.
- [57] R. Valenzuela. Physics Research International (2012), 1-9.
- [58] B. S. Yoo, Y. G. Chae, Y. M. Kwon, D. H. Kim, B. W. Lee, and C. Lee. J. Magn. 18(3) (2013), 230-234.
- [59] R. D. Desautels, J. van Lierop, and J. M. Cadogan. J. Phys.: Conference Series 217 (2010) 012105.
- [60] N. M. Deraz, and A. Alarifi. Int. J. Electrochem. Sci. 7 (2012), 6501-6511.
- [61] H. Yang, et al. Biomaterials 31 (2010) 3667-3673.
- [62] E.S. Murdock, R.F. Simmons, and R. Davidson. IEEE Trans. Magn. 28 (1992) 3078.
- [63] F. Bodker, S. Morup, and S. Linderöth. Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 282.
- [64] S. D. Sathaye, et al. J. Mater. Sci. 38 (2003) 29-33.
- [65] J. L. Gunjekar, A. M. More, V. R. Shinde, and C. D. Lokhande. J. Alloys and Compounds 465 (2008) 468-473.
- [66] X. Chen, H. Zhang, K. Ruan, and W. Shi. J. Alloys and Compounds 529 (2012) 108-112.

BAB 3. SIFAT MICROWAVE DARI FERIT

Sifat magnetik ferit pada dasarnya sama dengan besi dan logam feromagnetik lainnya. Karakteristik luar biasa yang membedakan ferit gelombang mikro yang baik dari logam magnet dan yang menimbulkan perilaku gelombang mikro yang unik adalah resistivitasnya yang sangat tinggi (biasanya dari 10^{+6} hingga 10^{+8} ohm-cm untuk ferit relatif terhadap 10^{-5} untuk besi). Dalam prosesnya, gelombang memiliki peluang untuk interaksi yang kuat dengan elektron yang berputar yang bertanggung jawab atas sifat magnet material. Sebagai hasil dari interaksi ini, rotasi Faraday dan properti non-timbal balik lainnya dapat terwujud.

Konstanta dielektrik yang tinggi dapat menyebabkan refleksi daya yang cukup besar pada batas udara-ferit, dan pantulan tersebut dapat dikurangi sedikit oleh kerucut pengikat polistiren

yang kadang-kadang telah digunakan. Juga, keberadaan bahan konstanta dielektrik tinggi dalam pandu gelombang mode tunggal biasanya dapat menimbulkan konversi mode (konversi daya dari gelombang yang diinginkan ke gelombang yang tidak diinginkan di bagian yang memuat ferit) bahkan tanpa adanya medan magnet yang diterapkan. Kedua efek ini dapat sangat mengubah sifat transmisi timbal balik dan non-timbal balik dari wilayah muatan ferit, dan banyak hasil yang berubah-ubah diperoleh. dalam studi awal ferit disebabkan kesulitan refleksi dan konversi mode.

Sifat penting ferit yang membuatnya sangat berguna dalam seni gelombang mikro adalah permeabilitasnya yang unik. Ada dua cara of mendefinisikan permeabilitas ferit, satu dalam hal permeabilitas tensor untuk gelombang terpolarisasi linier dan yang lainnya dalam hal permeabilitas skalar untuk gelombang terpolarisasi sirkuler.

3.1. KERUGIAN EDDY SAAT INI

Resonansi magnetik dari komponen pasif dapat disetel dengan menggunakan medan magnet statis pada rentang frekuensi yang luas, di mana frekuensi operasi yang lebih tinggi memerlukan bias magnet yang lebih tinggi kecuali menggunakan heksaferrit dengan anisotropi kristal besar^[1]. Namun, penyyetelan listrik frekuensi operasi, yang dapat dicapai jika sifat magnetis material sensitif terhadap medan melalui kopling magnetoelektrik (ME), lebih menarik daripada penyyetelan magnetis.

Untuk memaksimalkan besarnya efek ME, transfer regangan antara konstituen piezoelektrik dan magnetostriktif idealnya harus lossless. Namun, dalam komposit, efek ME dibatasi oleh kualitas antarmuka selain kualitas material setiap lapisan. Inilah alasan mengapa teori melebih-lebihkan koefisien kopling menggunakan Persamaan 3.1 dibandingkan dengan percobaan pada komposit, di mana penggunaan prosedur

sintering yang berbeda, dopan, ukuran butir, dan fraksi mol tidak memberikan bantuan apapun [1]. Masalahnya beragam seperti reaksi kimia antar konstituen selama proses sintering suhu tinggi dari komposit partikulat, cacat mekanis berupa pori-pori atau retakan akibat kesesuaian kisi yang tidak sempurna antara kedua konstituen, adanya beberapa orientasi pada satu atau keduanya. konstituen yang memiliki respon berbeda sepanjang orientasi kristal yang berbeda, dan medan magnet AC menginduksi arus eddy atau resistivitas rendah dari bahan magnetostrictive yang membuat kutub listrik sulit, sehingga terjadi kebocoran arus [2].

$$\alpha_E = \frac{1}{V} \frac{dP}{df} = \frac{1}{V} \frac{d}{df} \left(\sum p \right)$$

$$= \frac{1}{V} \sum \frac{dp}{df} \quad (3.1)$$

Selain itu, ketika konsentrasi fase piezoelektrik ditingkatkan dalam komposit untuk meningkatkan kopling ME, resonansi feromagnetik

diperluas, mengaburkan efek medan listrik pada bidang resonansi. Hambatan ini dapat diatasi dengan menggunakan komposit laminasi sebagai pengganti partikulat. Dalam komposit laminasi, dua konstituen dapat dibuat secara terpisah dan kemudian diikat bersama; oleh karena itu reaksi kimia di antara mereka dihindari.

Kehilangan arus eddy medan jauh dari resonansi pada frekuensi gelombang mikro dapat dianalisis berdasarkan model sederhana. Pertama, medan magnet gelombang mikro eksternal membangkitkan respons magnetis mode seragam dalam disk seperti yang diberikan oleh Persamaan. (3.2) - (3.7). Kedua, kontribusi yang bergantung pada waktu pada induksi magnet $b(r) = h(\dot{t}) + 4mn(\dot{t})$ menimbulkan medan listrik gelombang mikro bentuk $e(z, r)$ yang menghasilkan arus eddy dan menyebabkan kerugian tambahan. Medan listrik bergantung-z ini khusus untuk geometri pelat tipis saat ini. Kehilangan arus eddy rata-rata dari sampel

disk diperoleh dengan integrasi sederhana pada ketebalan disk. Sama seperti kerugian magnetis akibat respon $m(t)$ sesuai dengan ekor medan tinggi kurva penyerapan dan dispersi FMR (resonansi feromagnetik), kerugian arus eddy yang didorong oleh respons ini juga berkontribusi pada kurva penyerapan FMR secara keseluruhan, respons ekor medan tinggi yang diamati secara eksperimental [3]. Bidang gelombang mikro bidang xy melintang yang seragam $h(t) =$ tinggi amplitudo h dan frekuensi w menghasilkan respons magnetisasi dinamis $m(t) = m_0 e^{i\omega t}$ di mana m menunjukkan amplitudo magnetisasi dinamis kompleks. Pada batas respon linier daya rendah, hanya komponen x dan y dari m , m_x , dan m_y , yang perlu dipertimbangkan. Respon linier dinamis ini dapat ditulis sebagai hanya komponen x dan y dari m , m_x , dan m_y , yang perlu diperhatikan. Respon linier dinamis ini dapat ditulis sebagai hanya komponen x dan y dari m , m_x , dan

my, yang perlu diperhatikan. Respon linier dinamis ini dapat ditulis sebagai

$$4 \pi \quad = \quad 4 \pi h \quad h \quad (3.2)$$

Komponen tensor kerentanan χ_{mag} dan k_{mag} dapat dipisahkan menjadi imajiner nyata dan negatif. Magnetisasi terhadap saturasi oleh medan magnet luar H_{ext} tegak lurus dengan bidang disk, H_0 diberikan oleh

$$H_0 = H_{ext} + H_A - (A(N_z - N_x)) \quad (3.3)$$

Linewidth efektif medan tinggi $\langle H_{FE} \rangle$ ini kemudian dapat diambil sebagai konstanta independen bidang yang mewakili kerugian intrinsik dalam material [3]. Dalam rezim medan tinggi kondisi $H^0 > \langle H_{FE} \rangle$ terpenuhi dan fungsi respon $4 \pi \tilde{M}_{ag}$ dan $L \tilde{M}_{ag}$ dapat digantikan \tilde{M}_{FE} dengan dan eksplis diberikan di bawah ini (subskrip HFE adalah singkatan dari "efektif medan tinggi" dalam rezim medan tinggi):

$$4 \pi = \frac{\dots}{\dots} \quad (3.4)$$

$$4 \pi = \frac{\dots}{\dots} \quad (3.5)$$

Perhatikan bahwa ekspresi 4π di bandingkan \dots sekarang tidak berisi parameter linewidth. Perhatikan juga bahwa ekspresi 4π di bandingkan \dots dengan \dots sekarang berisi parameter linewidth hanya sebagai faktor perkalian $\langle HFE \rangle$ dalam pembilangnya. Seperti yang ditunjukkan di atas, dalam rezim medan tinggi ini lebar garis intrinsik dilambangkan dengan parameter lebar garis efektif bidang tinggi $\langle HFE \rangle$. Ekspresi batas bidang tinggi yang sesuai untuk 4π dan 4π diberikan di bawah ini:

$$4 \pi = \frac{\dots}{\dots} \quad (3.6)$$

$$4 \pi = \frac{\dots}{\dots} \quad (3.7)$$

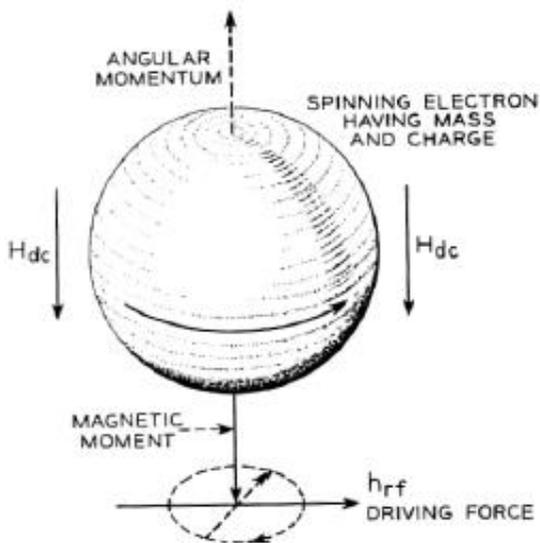
Parameter ini tidak diperlukan untuk analisis linewidth efektif bidang tinggi; mereka diperlukan untuk analisis ekor konduktivitas efektif (ECT) dari bagian berikut [3].

3.2. PERMEABILITAS

Permeabilitas gelombang mikro ferit disebabkan oleh efek elektron tertentu, yang berperilaku secara gyrosopical secara en mass menurut gambar klasik Gambar 3.1. Diketahui bahwa muatan, massa dan spin elektron ini berhubungan dengan momentum sudut dan magnet. momen dalam arah yang ditunjukkan [4], yang dapat dicatat sama dengan yang diharapkan untuk massa positif dan muatan negatif yang berputar.

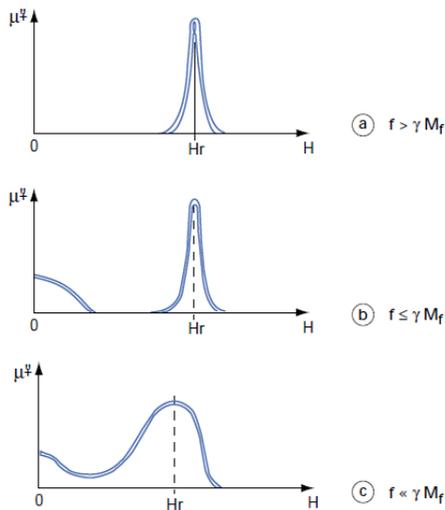
Dengan penerapan medan magnet dc (H_{dc}), sumbu spin elektron sejajar dengan medan dc. Jika sumbu putar dibelokkan sejenak dari paralelisme dengan medan dc, ia tidak akan segera kembali ke

posisi semula tetapi akan berpresesi sebagai giroskop tentang H_{dc} pada frekuensi yang sebanding dengan magnitudo H_{dc} . Frekuensi ini kami sebut frekuensi resonansi gyromagnetic, dan perilaku ferit sangat bergantung pada apakah frekuensi gelombang radio yang diterapkan lebih besar atau lebih kecil dari frekuensi resonansi gyromagnetik [4].



Gambar 3.1. Representasi skematis dari sebuah elektron (AG Fox., Et al [4])

Jika medan magnet bolak-balik (h_{rf}) diterapkan tegak lurus ke H_{dc} preresi yang dihasilkan akan menyebabkan ujung vektor momen magnet menggambarkan jalur elips seperti yang ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 1. Arah putaran di sekitar elips akan selalu searah jarum jam jika melihat sepanjang H_{dc} . Akibatnya, elektron akan menghasilkan komponen fluks magnet yang tegak lurus dengan H_{dc} dan h_{rf} .



Gambar. 3.2. Permeabilitas versus diterapkan bidang statis H (TEMEX [5]).

Peralatan gelombang mikro memanfaatkan permeabilitas ferit, yang ditentukan oleh fenomena resonansi magnetik. Dengan demikian, permeabilitas tergantung di satu sisi, pada magnetisasi dan medan magnet statis yang diterapkan dan di sisi lain, pada frekuensi dan polarisasi gelombang elektromagnetik.^[5], terkait dengan bidang statis. Dengan gelombang terpolarisasi melingkar yang merambat sejajar dengan medan statis, permeabilitas akan bergantung pada tanda polarisasi (positif atau negatif mengacu pada arah rotasi vektor dasar sehubungan dengan arah propagasi). Bidang H yang diterapkan bisa lebih rendah atau lebih tinggi dari bidang resonansi H_r ditunjukkan pada Gbr.2. Solusi pertama seringkali lebih disukai, untuk pengurangan ukuran, karena magnet yang dibutuhkan lebih kecil dan pengoptimalan beberapa karakteristik.

Magnetisasi adalah faktor perkalian dalam semua hal kerentanan magnetik. Efisiensi terbesar terkait dengan tingkat magnetisasi tertinggi^[5]. Namun, fenomena resonansi alami pada material tak jenuh harus diperhitungkan, karena hal ini menyebabkan "kehilangan medan rendah". Akibatnya, untuk frekuensi material yang dipilih harus memiliki magnetisasi yang lebih rendah dari Z' , kecuali jika harus digunakan di atas frekuensi resonansi.

3.3. KERUGIAN INTI

Jumlah kerugian histeresis dan arus eddy disebut kehilangan inti karena kedua kerugian tersebut terjadi di dalam inti (bahan magnetis) ^[6]. Kerugian inti perlu ditentukan untuk desain komponen induktif. Persamaan yang paling banyak digunakan yang mencirikan rugi-rugi inti ^[7] adalah persamaan pangkat (8).

$$P_v = k \tag{3.8}$$

Dimana P_v puncak induksi eksitasi sinusoidal dengan frekuensi f ; P_v adalah kehilangan daya rata-rata waktu per unit volume; dan k_i dan k_r adalah parameter material. Persamaan tersebut disebut persamaan Steinmetz (setelah Charles P. Steinmetz). Parameter material k_i dan k_r juga disebut sebagai parameter Steinmetz. Mereka valid untuk rentang frekuensi dan kerapatan fluks yang terbatas. Kelemahan utama persamaan Steinmetz adalah persamaan ini hanya berlaku untuk eksitasi sinusoidal. Ini adalah kerugian besar, karena, seperti yang dinyatakan sebelumnya, dalam aplikasi elektronika daya, bahan biasanya terpapar pada bentuk gelombang fluks non sinusoidal.

$$P_v = - \frac{1}{T} \int_0^T \Delta B \frac{d\Delta B}{dt} dt \quad (3.9)$$

Di mana ΔB adalah kerapatan fluks puncak dan

$$k_i = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta B \frac{d\Delta B}{dt} dt \quad (3.10)$$

Perbaiki persamaan Steinmetz (3.8): misalnya, analisis dalam [8] dimotivasi oleh fakta bahwa kerugian akibat gerakan dinding domain memiliki ketergantungan langsung dB / dt . Persamaan Steinmetz umum yang ditingkatkan (iGSE). Parameter α dan β adalah parameter yang sama seperti yang digunakan dalam persamaan Steinmetz (3.8). Dengan menggunakan iGSE, kerugian dari setiap bentuk gelombang fluks dapat dihitung, tanpa memerlukan karakterisasi tambahan dari parameter material di luar persamaan Steinmetz [9,10].

Persamaan Steinmetz (3.8) dan ekstensi iGSE (9) adalah model yang relatif akurat untuk menggambarkan kerugian inti. Namun, beberapa mekanisme core-loss tidak dapat dijelaskan dengan persamaan yang hanya terdiri dari tiga parameter. Parameter Steinmetz saja tidak cukup untuk menjelaskan kerugian inti [11].

3.4. BARIUM HEXAFERRITE (BAM) DAN YTTRIUM IRON GARNET (YIG)

Tunggal ferit kristal garnet besi tanah jarang dan Hexaferrites tipe-M digunakan sebagai komponen perangkat yang dapat disetel secara magnetis pada frekuensi tinggi untuk aplikasi gelombang mikro dan milimeter.

3.4.1. HEXAFERRITE TIPE-M (BAM)

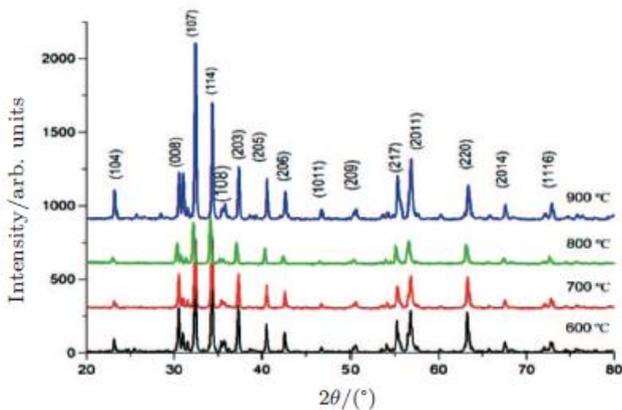
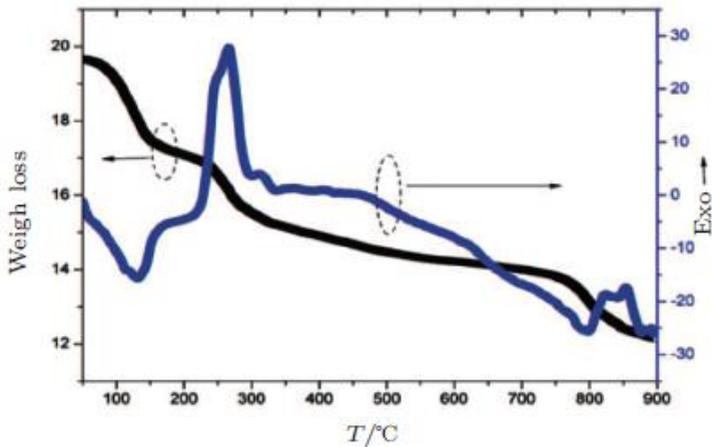
Ferit barium dengan rumus kimia $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (BaM) banyak digunakan di bidang magnet permanen, media perekam magnetik, dan perangkat gelombang milimeter karena sifatnya yang koersif tinggi, magnetisasi saturasi tinggi, dan loss rendah pada frekuensi tinggi [12-18]. BaM memiliki struktur magnetoplumbit, dengan kelompok ruang / *mmc*. Struktur magnetik barium ferit tipe-M terdiri dari lima lapisan, yang masing-masing memiliki satu dari lima situs kristalografi Fe yang berbeda dalam strukturnya, tiga situs oktahedral ($12k$, $4f_2$

dan 2a), satu situs tetrahedral ($4f1$) dan satu trigonal. situs bipiramida (2b). Selain itu, ion Fe^{3+} yang terdistribusi pada situs 12k, 2a, dan 2b juga diketahui memiliki konfigurasi elektron spin-up, sedangkan ion-ion yang terletak di $4f1$ dan $4f2$ adalah spin-down. Selanjutnya, ion Fe^{3+} di situs yang berbeda memainkan peran yang berbeda dalam sifat magnet [19]. Oleh karena itu, sifat magnetik BaM dapat disesuaikan dengan menggantikan ion lain untuk Fe^{3+} .

Karena substitusi kation merupakan salah satu cara untuk memodifikasi sifat-sifat BaM untuk memenuhi persyaratan penggunaan tertentu, peneliti telah memodifikasi dan memperbaiki sifat ferit tipe-M dengan mengganti ion Ba^{2+} dengan ion $Sr^{2+}/ La^{3+}/ Pb^{2+}$ [20, 21] atau mensubstitusi ion Fe^{3+} dengan ion trivalen seperti $Al^{3+}, Ga^{3+}, Mn^{3+}$ [16,17] atau dengan substitusi gabungan kation divalen ($Zn^{2+}, Co^{2+}, Mg^{2+}, Zr^{2+}$, dll) dan kation tetravalen ($Ti^{4+}, Sn^{4+}, Ir^{4+}$, dll.) [22-24]. Dalam semua ferit yang

dimodifikasi tersebut, ion tersubstitusi perlu menjaga netralitas listrik dan juga memiliki jari-jari ionik yang mendekati jari-jari aslinya [24]. Berdasarkan teori substitusi pada material barium ferit tipe M, akan dibahas beberapa proyek substitusi.

Pertama, aluminium telah ditambahkan dengan sejumlah ion divalen untuk menghasilkan senyawa $BaAl_xFe_{12-x}O_{19}$ menggunakan sodium citrate (SC) sebagai chelating agent dengan proses kimiawi. Gambar 3.2 dan 3.3 menunjukkan bahwa dalam analisis TGA / DTA dan XRD kristalisasi dan pembentukan BaM fasa tunggal selesai sebelum 860°C . Data XRD juga mengkonfirmasi substitusi Al ke situs Fe. Ukuran partikel dan morfologi tidak dipengaruhi oleh doping Al. Substitusi Al berperan penting dalam sifat magnet.

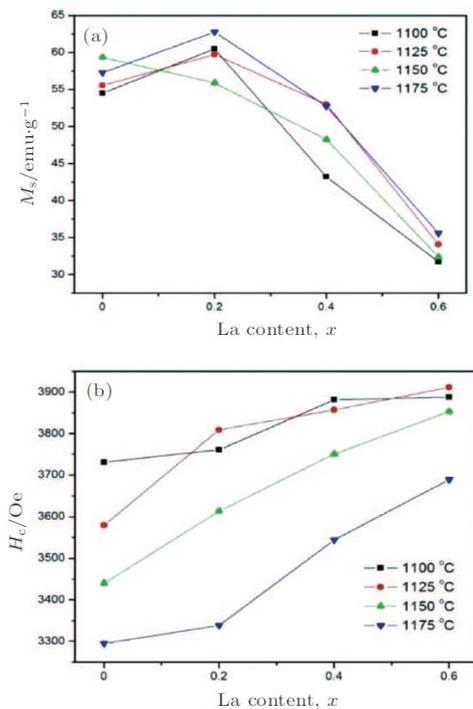


Gambar 3.2 dan 3.3 untuk kurva TGA / DTA dari BaFe₁₂O₁₉ yang dibakar dan XRD dari BaFe₁₂O₁₉ yang diperoleh pada berbagai suhu sinte, masing-masing (Z. Huai-Wu., et al [25]).

Magnetisasi saturasi (M_s) dari $BaAl_xFe_{12-x}O_{19}$ berkurang dari 51,43 emu/g untuk sampel dengan $x = 0$ menjadi 28,32 emu/g pada $x = 1.5$. Namun, bidang anisotropi (H_a) meningkat dari 16,21 kOe ($1 \text{ Oe} = 79,5775 \text{ A/m}$) menjadi 25,01 kOe. Selain itu, M_s meningkat dengan meningkatkan rasio SC/Ba^{2+} (rasio molar), mencapai maksimum ketika SC/Ba^{2+} adalah 13 [25].

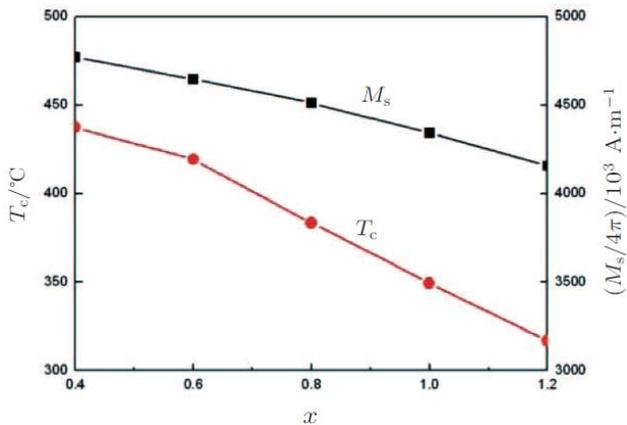
Kedua, ferit barium tipe-M dengan unsur langka La juga telah dilaporkan menghasilkan sifat yang sangat baik [26]. Pengaruh La^{3+} pada struktur dan sifat magnetis barium ferit ($Ba_{1-x}La_xFe_{12}O_{19}$) diselidiki. Ferit barium tipe-M fase tunggal dengan komposisi kimia $Ba_{1-x}La_xFe_{12}O_{19}$ dibentuk dengan sintering pada suhu $1100^\circ\text{C} - 1175^\circ\text{C}$ di udara. Seperti yang dapat kita lihat dari Gambar 4, dengan nilai x meningkat, magnetisasi saturasi (M_s) meningkat, mencapai maksimum pada $x = 0,2$ dan kemudian menurun, dan koersivitas sampel meningkat terus menerus. Nilai M_s mencapai nilai

maksimum 62,8 emu / g pada $x = 0,2$ dan 1175°C , dan H_c mencapai nilai maksimum 3911,5 Oe pada $x = 0,6$ dan 1125°C .



Gambar 3.4. Variasi M_s (a) dan H_c (b) dengan suhu sintering yang berbeda dalam sampel La-doped (Z. Huai-Wu., Et al [25]).

Ketiga, untuk mengadaptasi perkembangan teknologi ferit berbahan bakar bersama suhu rendah dan menghasilkan sirkulator dengan proses multilayer, efek substitusi Zn^{2+} dan Ti^{4+} pada mikrostruktur dan properti suhu rendah sinter tipe M barium hexaferrites $Ba(ZnTi)_xFe_{12-x}O_{19}$ telah dilaporkan [27].



Gambar 3.5. Ketergantungan M_s dan T_c pada jumlah substitusi (Z. Huai-Wu., Et al [25])

Diketahui bahwa beberapa ion Zn^{2+} dapat memasuki subkisi 2b, dan magnetisasi saturasi sampel menurun ketika x meningkat. Densitas

tinggi $4,85 \text{ g/cm}^3$ diperoleh pada sampel yang disinter pada suhu 900°C dengan aditif kaca 5 wt%. Magnetisasi saturasi mencapai $63,5 \text{ emu/g}$ (sekitar 308 kA/m) dan meningkat dengan naiknya suhu sinter, seperti pada Gambar 3.5.

Saat ini, untuk meningkatkan sifat magnet dan listrik yang relevan dari barium ferit tipe-M, pembuatan komposit barium ferit telah menjadi tren dan bidang penelitian yang penting. Berbagai aditif telah ditambahkan ke dalam barium ferrites untuk memenuhi berbagai kebutuhan praktis, dengan metode deposisi sputter, ball milling, evaporasi dan kimia. Secara umum, dua jenis bahan utama yang digunakan untuk membuat komposit dengan BaM: bahan organik dan anorganik. Bahan organik dan komposit ferit, atau bahan anorganik dan komposit ferit, dengan struktur terorganisir biasanya memberikan hibrida fungsional baru, dengan perilaku sinergis atau komplementer [27].

3.4.2. GARNET BESI ITRIUM (YIG)

Garnet besi Yttrium ($Y_3Fe_5O_{12}$; YIG) dan keluarganya telah banyak digunakan sebagai bahan magnet untuk perangkat optik dan gelombang mikro [28-30] karena interaksi yang kuat antara gelombang elektromagnetik dan materi, dan hilangnya penyerapan yang rendah. Karena karakteristik magnet, optik dan gelombang mikro dari kristal YIG dapat dimodifikasi dengan mengganti elemen lain untuk Y dan / atau Fe, banyak penelitian tentang kristal YIG tersubstitusi telah dilaporkan sehubungan dengan magnetisasi saturasi, rotasi Faraday optik dan absorpsi optik, terutama dari logam tanah jarang-tersubstitusi YIG ($Y_{3-x}R_xFe_5O_{12}$; R: YIG), dan garnet besi tanah jarang ($R_3Fe_5O_{12}$; RIG) di mana R menunjukkan unsur tanah jarang [31-33]. Namun, tidak ada laporan komprehensif tentang kristal R: YIG dan RIG untuk unsur tanah jarang mana pun yang telah disajikan sejauh pengetahuan kami, meskipun sifat masing-

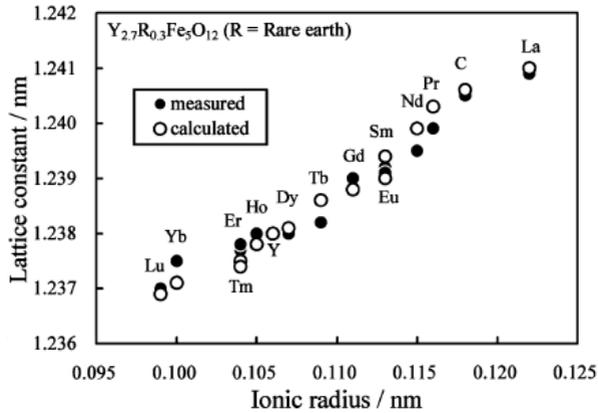
masing R: YIG dan RIG untuk beberapa unsur tanah jarang telah dilaporkan. Tampaknya juga penting untuk memahami perubahan konstanta kisi R: YIG untuk semua elemen tanah jarang untuk mengkompensasi distorsi kisi kristal R: YIG setelah penggabungan elemen tanah jarang lainnya selama pertumbuhan kristal. Selain itu, YIG baru-baru ini menarik banyak perhatian sebagai media untuk perangkat gelombang mikro yang memanfaatkan gelombang magnetostatis, di mana lebar penuh pada setengah maksimum (ΔH) resonansi feromagnetik merupakan faktor penting dalam hilangnya propagasi gelombang mikro, tetapi ini tidak ditetapkan untuk R : YIG. Kristal YIG setelah penggabungan elemen tanah jarang lainnya selama pertumbuhan kristal. Selain itu, YIG baru-baru ini menarik banyak perhatian sebagai media untuk perangkat gelombang mikro yang memanfaatkan gelombang magnetostatis, di mana lebar penuh pada setengah maksimum (ΔH)

feromagnetik merupakan faktor penting dalam hilangnya propagasi gelombang mikro, tetapi ini tidak ditetapkan untuk R : YIG. Kristal YIG setelah penggabungan elemen tanah jarang lainnya selama pertumbuhan kristal. Selain itu, YIG baru-baru ini menarik banyak perhatian sebagai media untuk perangkat gelombang mikro yang memanfaatkan gelombang magnetostatis, di mana lebar penuh pada setengah maksimum (Δ) resonansi feromagnetik merupakan faktor penting dalam hilangnya propagasi gelombang mikro, tetapi ini tidak ditetapkan untuk R : YIG.

Konstanta kisi dihitung dengan asumsi bahwa komposisi kristal tumbuh sama dengan komposisi awal, dan hasil yang dihitung juga ditunjukkan pada Gambar 3.6. Terlihat bahwa konstanta kisi R: YIG meningkat dengan peningkatan jari-jari ion dari ion tanah jarang tersubstitusi, dan nilai yang terukur sesuai dengan nilai yang dihitung. Hasil ini menunjukkan bahwa

semua unsur tanah jarang kecuali La berhasil menggantikan Y dalam kristal tunggal R: YIG kami pada rasio atom 0,3, dan memberikan informasi yang berguna untuk kompensasi distorsi kisi dengan penggabungan dua atau lebih tanah jarang elemen selama pertumbuhan kristal [34].

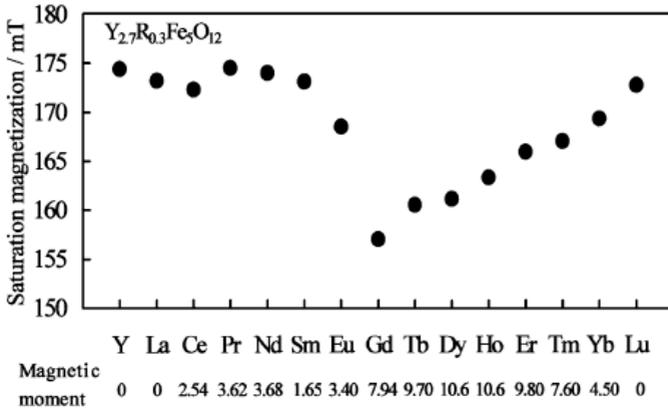
Bahwa magnetisasi saturasi kira-kira konstan untuk kristal R: YIG yang digantikan oleh unsur tanah jarang ringan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7, dapat dipahami, mengingat nilai absolut momen magnet relatif kecil dan momen magnet efektif μ_R berkurang banyak lebih atau menjadi sama dengan nol jika setiap momen R^{3+} dapat diorientasikan secara acak pada suhu kamar.



Gambar 3.6. Konstanta kisi kristal tunggal YIG tersubstitusi tanah jarang (T. Sekejima., Et al [34]).

Di sisi lain, Eu^{3+} dan Gd^{3+} diperkirakan berpasangan hampir secara antiferromagnetik dengan Fe^{3+} , berdasarkan fakta bahwa magnetisasi saturasi Eu: YIG dan Gd: YIG menurun secara tiba-tiba, sedangkan peningkatan magnetisasi saturasi kristal R: YIG digantikan oleh unsur tanah jarang berat dari Tb ke Lu diperkirakan bergantung pada besar dan sudut canting momen magnet dari ion R^{3+} . Sintesis famili kristal YIG dengan magnetisasi saturasi rendah, karena rotator Faraday dengan

magnetisasi saturasi rendah diinginkan untuk menghasilkan isolator optik yang lebih kompak baik dengan magnet yang lebih kecil atau tanpa magnet.



Gambar 3.7. Magnetisasi saturasi kristal tunggal YIG tersubstitusi rare-earth (T. Sekejima., Et al [34]).

Tabel 1 mencantumkan lebar penuh yang diukur pada setengah maksimum (ΔH) dari resonansi feromagnetik kristal R: YIG, di mana tanda bintang berarti tidak ada resonansi feromagnetik yang dapat dideteksi.

Tabel 3.1. Lebar penuh pada setengah maksimum (ΔH) resonansi feromagnetik dari kristal tunggal YIG tersubstitusi tanah jarang (T. Sekejima., Et al [34]).

	ΔH (A / m)
Y	110
La	630
Ce	6500
Pr	11000
Nd	8800
Sm	12000
Eu	1900
Gd	570
Tb	-
Dy	-

Ho	-
Er	6300
Tm	960
Yb	21.00
Lu	100

Ion tanah jarang dalam YIG umumnya diketahui meningkatkan χ'' dengan penggantian kuat momen magnetik elektron 4f dengan fonon kisi dan kisi besi [35], yaitu preresi momen magnet yang dieksitasi oleh gelombang mikro diredam oleh putaran Proses relaksasi - phonon yang khas untuk setiap ion tanah jarang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ü. Özgür, Y. Alivov, H. Morkoç. *J. Mater Sci: Mater Electron.* **20** (2009), 911-52.
- [2] M. Fiebig. *J. Phys. D.* **38**, R123 (2005).
- [3] R. Truedson J, McKinstry K. D, Kabos Pavel, and Patton C. E. *J. Appl. Phys.* **74** (4) (1993), 2706-18.
- [4] A. G. Fox, S. E. Miller and M. T. Weiss. *Behavior and Applications of Ferrites.* (1954)
- [5] TEMEX. *Microwave Ferrite Materials,* (2000).
- [6] Kharagpur. *Magnetic Circuits and Core Losses, Version 2 EE IIT.*
- [7] E. C. Snelling, *Soft Ferrites, Properties and Applications,* 2nd ed. London, U.K.: Butterworths, (1988).
- [8] J. Reinert, A. Brockmeyer, and R. De Doncker. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **4** (37) (2001), 1055-61.
- [9] J. Biela, U. Badstuebner, and J. W. Kolar. *IEEE Trans. Power Electron.* **1**(24) (2009), 288-300.
- [10] I. Villar, U. Viscarret, I. Etxeberria-Otadui, and A. Rufer. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **10**(56) (2009), 4132-40.
- [11] J. Mühlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, and A. Ecklebe. *Proc. IEEE/IEEJ Int. Power Electron. Conf. ECCE Asia.* (2010), 2430-2437.
- [12] Zou H, Li S. H, Zhang L. Q, Yan S. N, Wu H. G, Zhang S and Tian M. *J. Magn. Magn. Mater.* **323** (2011), 1643.
- [13] Y. Nie, I. Harward, K. Balin, A. Beaubien and Z. Celinski. *J. Appl. Phys.* **107** (2010), 073903.

- [14] A. S. Dehinger, M. Leberre, B. Canut, J. P. Chatelon, D. Albertini, S. Perrot, D. Givord, and J. J. Rousseau. *J. Magn. Mater.* **322** (2010), 3293.
- [15] A. Morisako, M. Matsumoto and M. Naoe. *J. Appl. Phys.* **79** (1996), 4881.
- [16] V. G. Harris, Z. H. Chen, Y. J. Chen, S. Yoon and T. Sakai. *J. Appl. Phys.* **99** (2006), 08M911
- [17] Y. J. Chen, A. L. Geiler, T. Y. Chen, T. Sakai, C. Vittoria and V. G. Harris. *J. Appl. Phys.* **101** (2007), 09M501.
- [18] S. Ounnunkad, S. Phanichphant, P. Winotai, and I. M. Tang. *Phys. Stat. Sol. (b)* **244** (2007), 2190.
- [19] Y. Xu, G. L. Yang, D. P. Chu, and H. R. Zhai. *Phys. Stat. Sol. (b)* **157** (1990), 685.
- [20] S. Singhal, T. Namgyal, J. Singh, K. Chandra, and S. Bansal. *Ceram. Int.* **37** (2011), 1833.
- [21] W. Onreabroy, K. Papato, G. Rujijanagul, K. Pengpat, and T. Tunkasiri. *Ceram. Int.* **38** (2012), S415.
- [22] P. A. Mariño-Castellanos, A. C. Moreno-Borges, G. Orozco-Melgar, J. A. Garcia, and E. Govea-Alcaide. *Physica B.* **406** (2011), 3130.
- [23] A. González-Angeles, J. Lipka, A. Grusková, J. Sláma, V. Jančířik, and V. Slučil. *J. Phys. Chem. B* **114** (2010), 012137.
- [24] T. M. Meaz and C. B. Koch. *Hyperfine Interaction.* **341** (2004), 156-157.
- [25] Z. Huai-Wu, Li Jie, Su Hua, Z. Ting-Chuan, Long Yang, and Z. Zong-Liang. *Chin. Phys. B.* **11**(22) (2013), 117504.
- [26] J. Li, H. W. Zhang, Y. X. Li, Q. Li, and J. F. Qin. *Acta Phys. Sin.* **61** (2012), 227501 (in Chinese).

- [27] Y. L. Liu, Y. X. Li, H. W. Zhang, D. M. Chen and Q. Y. Wen. *J. Appl. Phys.* **107** (2010), 09A507.
- [28] J. Helszajn. *YIG Resonators and Filters* (Wiley, New York, 1985) p. 1.
- [29] G. B. Scott and D. E. Lacklison. *IEEE Trans. Magn.* **12** (1976) 292.
- [30] T. Nomoto. *J. Magn. Soc. Jpn.* **21** (1997) 1230 [in Japanese].
- [31] R. Pauthenet. *J. Appl. Phys.* **29** (1958) 253.
- [32] S. H. Wemple, J. F. Dillon, L. G. Van Uitert and W. H. Grodkiewicz. *Appl. Phys. Lett.* **22** (1973) 331.
- [33] D. L. Wood and J. P. Remeika. *J. Appl. Phys.* **38** (1967) 1038.
- [34] T. Sekijima, H. Kishimoto, T. Fujii, T. Wakino, and M. Okada. *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999), 5874-8.
- [35] P.-G. de Gennes, C. Kittel and A. M. Portis. *Phys. Rev.* **116** (1959), 323.

BAB 4. FERIT UNTUK PENEKANAN EMI

Selama bertahun-tahun, Electromagnetic Interference (EMI) yang disebabkan oleh peralatan elektronik telah menjadi perhatian publik yang serius. Untuk menekan arus, produsen produk elektronik biasanya memasang inti ferit untuk melingkari kabel ini [1]. Meskipun produsen biasanya menggunakan inti ferit dalam produk elektronik mereka, namun hampir tidak diketahui seberapa efektif inti tersebut dapat menekan arus gangguan mode umum dan cara menggunakannya dalam aplikasi praktis.

Di lapangankompatibilitas elektromagnetik (EMC), beberapa tren, yang diarahkan ke peningkatan fungsional atau pengurangan biaya peralatan elektronik, pasti juga berkontribusi pada peningkatan tingkat emisi gangguan elektromagnetik (EMI). Pada frekuensi RF,

kumparan miniatur yang tertanam dalam ferit menunjukkan impedansi tinggi, yang menekan interferensi yang tidak diinginkan. Miniatur induktor (atau choke) terdiri dari lapisan yang sangat konduktif tertanam dalam struktur monolitik ferit, yang memberikan perisai magnet yang baik dan membuat induktor sangat cocok untuk pemasangan dengan kepadatan tinggi, biasanya sebagai perangkat pemasangan permukaan (SMD). Ukuran, kinerja, dan keandalan membuat induktor chip SMD sangat menarik untuk berbagai aplikasi, seperti penekanan EMI di universal series bus (USB), pensinyalan diferensial tegangan rendah dan dalam antarmuka digital berkecepatan tinggi lainnya yang tergabung dalam notebook dan komputer pribadi, kamera digital dan pemindai. Selain itu, penekan ferit telah berhasil digunakan untuk melemahkan EMI dalam catu daya switching atau sistem pengapian elektronik [2]. Komponen ferit efisien dan hemat biaya untuk pencegahan (dan

perlindungan terhadap) sinyal palsu yang ditransmisikan oleh konduksi dan radiasi. Komponen penekan ditawarkan dalam sejumlah bahan ferit, yang mengoptimalkan impedansi pada berbagai frekuensi. Komponen ferit efisien dan hemat biaya untuk pencegahan (dan perlindungan terhadap) sinyal palsu yang ditransmisikan oleh konduksi dan radiasi. Komponen penekan ditawarkan dalam sejumlah bahan ferit, yang mengoptimalkan impedansi pada berbagai frekuensi. Komponen ferit efisien dan hemat biaya untuk pencegahan (dan perlindungan terhadap) sinyal palsu yang ditransmisikan oleh konduksi dan radiasi. Komponen penekan ditawarkan dalam sejumlah bahan ferit, yang mengoptimalkan impedansi pada berbagai frekuensi.

BaruPerkembangan peralatan listrik dan elektronik telah meningkatkan kecemasan masyarakat tentang gangguan elektromagnetik (EMI) yang disebabkan oleh peralatan tersebut.

Salah satu sumber interferensi utama dalam rentang frekuensi di bawah 1000 MHz adalah arus gangguan yang mengalir di kabel yang terhubung ke peralatan. Oleh karena itu, untuk mengurangi arus, inti ferit biasanya melingkari kabel, seperti kabel listrik dan kabel perifer. Inti ferit berperilaku seperti induktor dan mencegah arus gangguan mode umum mengalir di kabel. Banyak makalah telah membahas impedansi inti ferit dengan asumsi itu menjadi elemen rangkaian terkumpul [3,4]. Namun, amplitudo arus dapat berkurang sekitar 30% di inti dalam rentang frekuensi di atas 30 MHz.

Komite Khusus Internasional untuk Interferensi Radio (CISPR) telah menetapkan standar tentang metode pengukuran kinerja filter penekan EMI [5]. Namun, itu tidak termasuk spesifikasi untuk mengukur kinerja inti ferit penekanan EMI. Oleh karena itu, metode pengukuran telah diselidiki untuk

mengkarakterisasi inti ferit dalam rentang frekuensi dari 30 hingga 1000 MHz.

Biasanya, jig pengukuran garis koaksial 50-Ω telah digunakan untuk mengukur kerugian penyisipan dan koefisien refleksi. Namun, ini tidak selalu berlaku untuk inti ferit EMI yang sebenarnya, karena inti tersebut memiliki berbagai macam dimensi, yang lebih kecil adalah 7 mm × 4 mm × 8 mm dan yang lebih besar adalah 37 mm × 24 mm × 15 mm atau lebih. [6], masing-masing pada diameter dan panjang luar dan dalam. Selain itu, sering kali ditutup dengan wadah plastik dan dalam beberapa kasus bentuk luarnya tidak silindris. Sehubungan dengan parameter hamburan (S-parameter) (koefisien refleksi dan kehilangan penyisipan) dari inti ferit, kalibrasi Thru-Reflect-Line (TRL) dianggap memberikan hasil pengukuran yang akurat [7-8]. Ada dua jenis jig saluran transmisi yang mengukur parameter-S inti ferit, yaitu, tipe garis koaksial dan tipe garis sejajar. Penyelidikan teoretis dilakukan

dengan menggunakan analisis numerik domain waktu perbedaan-hingga (FDTD) untuk menemukan impedansi karakteristik dan ukuran bidang tanah yang sesuai untuk jig pengukuran garis sejajar. Berdasarkan analisis, metode pengukuran sederhana diusulkan untuk kerugian penyisipan dan koefisien refleksi inti ferit penekanan EMI [6].

4.1. PERLUNYA PENEKANAN EMI

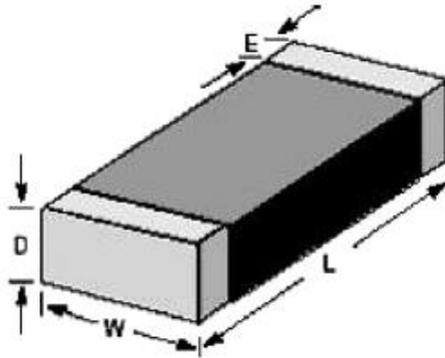
Langkah pertama dalam mendesain penekan EMI ferit adalah memilih salah satu ukuran standar induktor chip SMD. Setelah itu, material ferit yang dapat memberikan kinerja supresor terbaik harus dipilih.

4.1.1. PEMILIHAN UKURAN KAPAL SMD

Di alat perangkat lunak kami [2], pengguna dapat memilih salah satu ukuran standar untuk induktor SMD:

- 1210, ditunjukkan pada G

- 1206 ; atau 0805 .



Gambar 4.1. Konstruksi SMD tipikal untuk ukuran chip 1210 (M. D a m n j a n o v i ć . , E t a l [2]) .

4.1.2. PEMILIHAN BAHAN FERIT LEMBUT

Jika pemilihan material ferit harus dilakukan, maka perlu diperhatikan rentang frekuensi yang tidak diinginkan yang dapat terjadi. Kami telah menguji dua bahan ferit lunak, yang memiliki keterangan LP (bahan ferit permeabilitas rendah) dan HP (bahan ferit permeabilitas tinggi). Bahan-bahan ini tersedia secara komersial oleh Neosid. Ferit nikel-seng LP memiliki faktor kerugian rendah

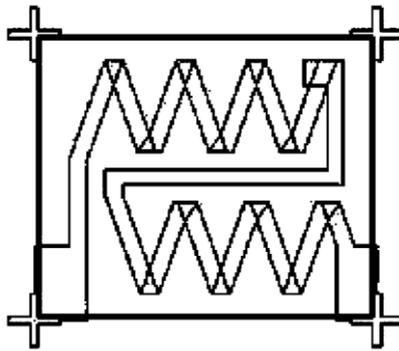
pada frekuensi sedang dan impedansi penekanan tinggi pada frekuensi tinggi (lebih dari 100 MHz). Bahan ferit HP adalah ferit nikel-seng, dengan permeabilitas awal 1000 (sedangkan LP memiliki permeabilitas awal 220) [2]. Aplikasi khas untuk bahan ferit ini ada di penekan EMI.

4.1.3. PEMILIHAN MATERIAL KONDUKTIF

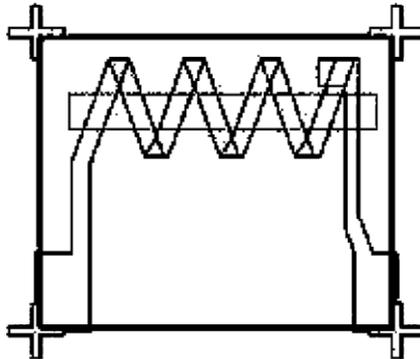
Di luar rentang frekuensi di mana EMI yang dilakukan harus dihilangkan, induktor harus memiliki kerugian yang rendah. Untuk mencapai tujuan tersebut, untuk lapisan konduktif harus dipilih material yang memiliki konduktivitas tinggi. Dalam SPIS, parameter untuk platina (Pt) dan paladium perak (PdAg) disertakan (Du Pont). Selain itu, pengguna dapat mengatur nilai yang diinginkan untuk nilai konduktivitas (atau resistivitas) pasta konduktif langsung di lapangan untuk data input^[2].

4.1.4. PEMILIHAN STRUKTUR INDUKTOR

Selain karakteristik material, seperti yang disebutkan sebelumnya, geometri lapisan konduktif juga menentukan induktansi atau impedansi total. Oleh karena itu, sangat penting untuk memilih struktur geometri induktor yang sesuai.



(a)



(b)

Gambar 4.2. Tata letak (a) kumparan ganda tanpa inti dan (b) kumparan tunggal dengan inti (M. Damjanović)

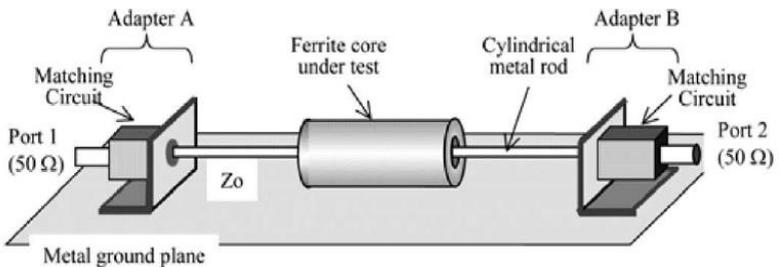
Struktur induktor yang dianalisis ditunjukkan pada Gambar 4.2. Lapisan konduktif memiliki struktur tipe kumparan tunggal atau kumparan ganda. Selain itu, pengguna dapat mengatur nilai yang diinginkan untuk garis konduktif lurus sederhana (panjang, lebar, tebal) dan, juga, sudut antara segmen konduktor yang berdekatan.[2].

Atas dasar semua nilai awal untuk input data, program akan menentukan jumlah maksimal belokan N_{max} pada ukuran chip yang tersedia. Parameter N_{max} memberikan informasi berapa banyak (maksimum) segmen konduktif dengan sudut yang sesuai di antara mereka dapat diatur pada area chip yang tersedia, yang ditentukan oleh ukuran chip SMD standar [2]. Pengguna dapat memilih jumlah belokan N tidak lebih dari N_{max} . Alat

simulasi SPIS (Simulator untuk Struktur Induktif Planar) menawarkan banyak kemungkinan untuk merancang penekan EMI dengan kinerja terbaik.

4.2. KARAKTERISTIK PERANGKAT PENEKAN EMI

jig garis sejajar diusulkan untuk mengukur karakteristik penekanan EMI dari inti ferit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 4.3. Jig terdiri dari batang logam silinder, bidang tanah, dan sepasang adaptor yang cocok untuk sambungan antara kabel koaksial dan bagian garis sejajar. S-parameter dari sistem ini diukur antara Port 1 dan 2 menggunakan penganalisis jaringan vektor (VNA) dengan kalibrasi Short-Open-Load-Thru (SOLT) [6].



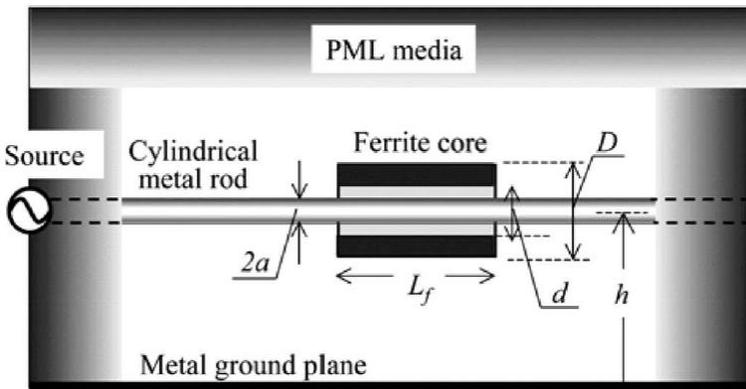
Gambar 4.3. Parallel-line jig untuk mengukur karakteristik inti ferit penekanan EMI (J. Urabe., Et al [6]).

4.2.1. IMPEDANSI KARAKTERISTIK

Inti ferit kecil biasanya dipasang pada kabel peralatan elektronik yang diletakkan di atas meja atau digantung di bawah peralatan. Bila kabel berdiameter 4 mm direntangkan pada ketinggian 20 mm di atas meja logam, maka terbentuklah transmisi saluran yang memiliki impedansi karakteristik sekitar 180Ω . Jadi, dalam banyak kasus, inti ferit dipasang ke kabel yang memiliki impedansi karakteristik yang jauh lebih tinggi dari 150Ω . Oleh karena itu, makalah ini mengasumsikan kondisi ruang bebas dekat untuk mewakili situasi aktual inti ferit. Oleh karena itu, simulasi numerik menggunakan metode FDTD [9] dilakukan untuk menentukan impedansi karakteristik jig pengukuran yang sesuai untuk menghasilkan nilai

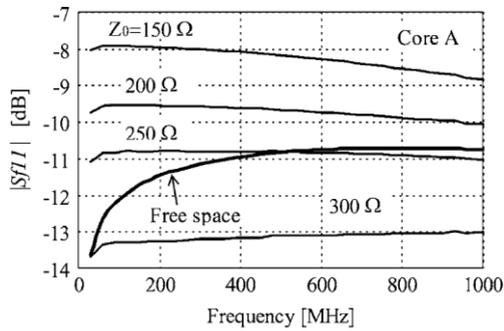
ruang bebas dari insertion loss dan koefisien refleksi inti ferit.

Model pengukuran jig yang dianalisis dalam simulasi FDTD ditunjukkan pada Gambar. 4, di mana inti ferit dipasang ke batang logam yang ditempatkan di atas bidang tanah yang dikelilingi oleh batas absorpsi PML [6]. Perhitungan numerik diterapkan pada berbagai inti ferit kecil di jig garis sejajar yang memiliki impedansi karakteristik berbeda Z_0 .

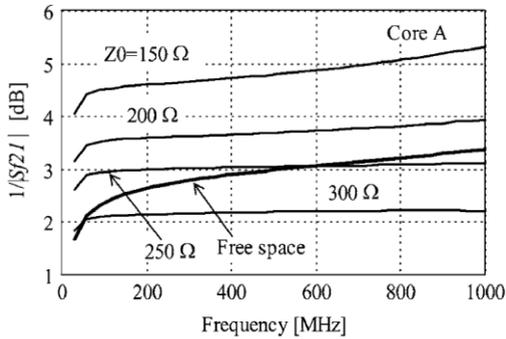


Gambar 4.4. Model FDTD yang dianalisis dari jig garis sejajar (J. Urabe., Et al [6]).

S-parameter S_{f11} dan S_{f21} dievaluasi dari arus yang mengalir di batang logam. Hasil perhitungan pada inti ferit tipikal dari dimensi yang berbeda diplot dalam Gambar. 4.4 dan 4.5. Dari analisis numerik ini, dapat disimpulkan bahwa jika jig garis sejajar memiliki impedansi karakteristik Z_0 sekitar 270Ω , nilai ruang penyisipan dan koefisien refleksi inti ferit dalam rentang frekuensi dari 30 hingga 1000 MHz dapat diperoleh.



(a)

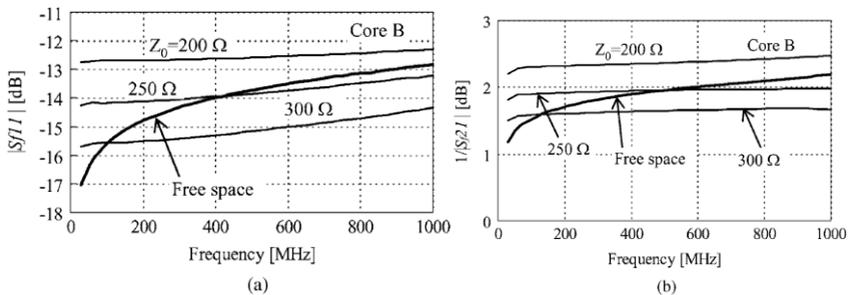


(b)

Gambar 4.5. Karakteristik teoritis dari inti ferit A yang dimuat pada jig paralel dengan impedansi karakteristik yang berbeda Z_0 (Inti A: TDK, $d = 13$ mm, $D = 26$ mm, $Lf = 29$ mm). (a) Koefisien refleksi. (b) Kehilangan penyisipan (J. Urabe., dkk [6]).

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 4.5 (b), $|Sf21|$ inti khas ada di sekitar 3 dB bahkan di ruang kosong di mana $Sf21$ ditentukan oleh rasio lancar l di luar/ l di dalam. Ini berarti bahwa

amplitudo arus berkurang sekitar 30% di inti pada rentang frekuensi di atas 30 MHz. Secara tradisional, inti telah dicirikan oleh impedansinya, tetapi parameter rangkaian terkumpul seperti itu mungkin tidak berlaku dalam rentang frekuensi ini [6].



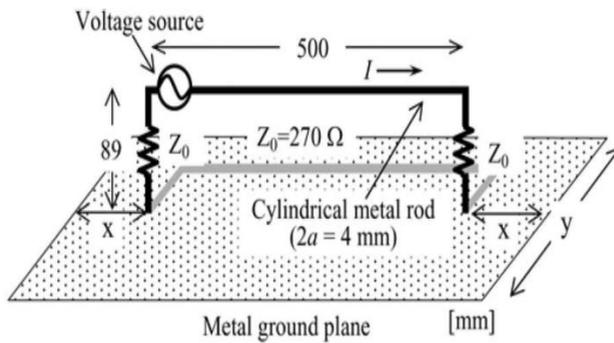
Gambar 4.6. Karakteristik teoritis dari inti ferit B yang dimuat di jig garis paralel dengan impedansi karakteristik yang berbeda Z_0 (Inti B: NEC-Tokin, $d = 8.6$ mm, $D = 20$ mm, $L_f = 20$ mm). (a) Koefisien refleksi. (b) Kehilangan penyisipan (J. Urabe., dkk [6]).

4.2.2. UKURAN PESAWAT METAL GROUND

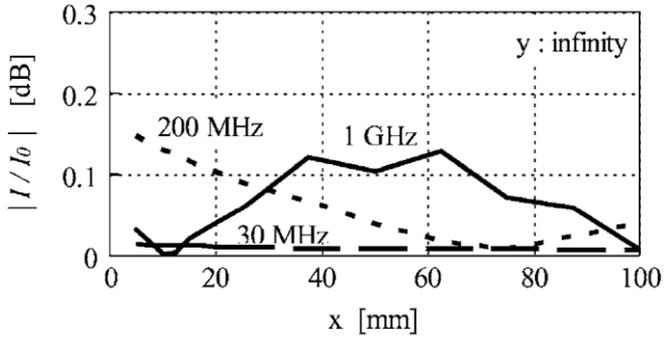
Simulasi numerik FDTD dilakukan untuk menentukan ukuran ground plane yang diperlukan. Jig pengukuran disederhanakan untuk simulasi,

seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 6, di mana kedua ujung penampang garis sejajar diakhiri dengan impedansi yang cocok Z_0 . Analisis numerik dibuat pada model yang disederhanakan ini yang dikelilingi oleh bahan penyerap PML [6], seperti yang disebutkan di bagian sebelumnya. Arus I yang mengalir pada batang silinder dievaluasi untuk berbagai ukuran bidang tanah dan dibandingkan dengan arus I_0 yang diperoleh dengan bidang tanah tak hingga.

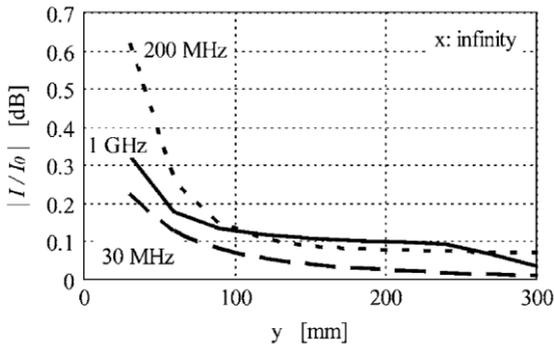
Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.8 dalam hal deviasi arus yang ditentukan oleh $|I/I_0|$. Jelas bahwa untuk membatasi deviasi dalam 0,1 dB, bidang tanah harus memiliki panjang yang lebih panjang dari batang silinder sebesar h pada arah x positif dan negatif, dan lebar y harus lebih lebar dari $3h$, di mana h adalah ketinggian batang silinder [6].



Gambar 4.7. Model FDTD sederhana dari jig garis sejajar (J. Urabe., Et al [6]).

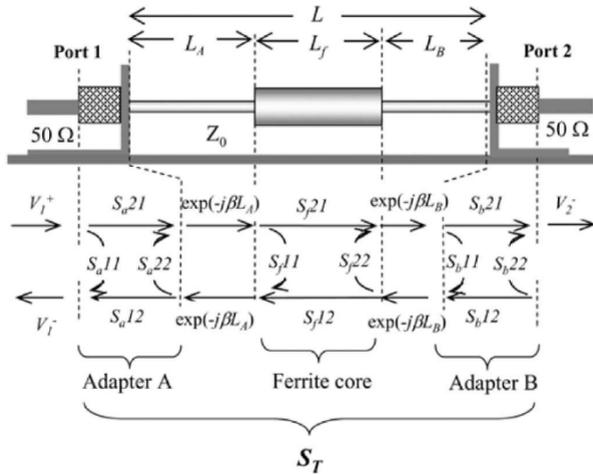


(a)



(b)

Gambar 4.8. Pengaruh ukuran bidang tanah pada arus yang mengalir pada batang logam jig garis sejajar. (a) Perpanjangan panjang x dari jig ground plane. (b) Lebar bidang tanah jig (J. Urabe., et al [6]).



Gambar 4.9. Representasi S-parameter dari pengukuran jig garis sejajar (J. Urabe., Et al [6]).

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 4.9, sistem pengukuran yang dimuat dengan inti ferit dapat dikarakterisasi dalam parameter S yang ditentukan antara Port 1 dan 2 sebagai,

$$\begin{aligned}
 (S_{T11})_{\text{inti}} &= S_{a11} + G \text{-----} \\
 &\approx S_{a11} + \text{-----} \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (ST21)_{\text{inti}} &= \frac{S_{21} - S_{11}S_{22}}{1 - S_{11}S_{22}} \\
 &\approx \frac{S_{21} - S_{11}S_{22}}{1 - S_{11}S_{22}} \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

di mana S_a , S_b , dan S_f mewakili S-parameter dari dua adaptor A dan B, dan inti ferit yang diuji. Simbol L_A dan L_B adalah jarak pemisah antara sayap adaptor dan permukaan ujung terdekat dari teras.

Inti ferit ini tampaknya sangat efektif untuk mencegah arus gangguan elektromagnetik mengalir di kabel. Namun, sulit untuk mengevaluasi kemampuan penekanan EMI dari inti ferit dalam penggunaan praktis, karena inti biasanya memiliki karakteristik dalam hal impedansinya. Investigasi teoritis dan eksperimental dilakukan untuk mengusulkan sistem pengukuran parameter ini dalam rentang frekuensi dari 30 hingga 1000 MHz [2]. Efektivitas dan akurasi dari metode yang diusulkan secara eksperimental dan teoritis

diperiksa dengan pengukuran TRL dan simulasi FDTD.

4.3. BAHAN DAN PROPERTI UNTUK PENEKANAN EMI

Bentuk paling sederhana dari penekanan dilakukan dengan menghubungkan induktansi secara seri atau kapasitor ke tanah. Filter pada dasarnya merupakan penghalang yang mencegah sinyal yang tidak diinginkan melintasi perbatasan antara dua zona, dan hanya memungkinkan sinyal yang berada di dalam pass-band untuk melewatinya. Filter pasif dibangun dengan elemen kapasitif dan induktif dalam berbagai kombinasi [10]. Konfigurasi khusus yang diperlukan dalam situasi khusus apa pun bergantung pada tingkat impedansi di setiap ujung filter.

4.3.1. FERIT UNTUK SUPRESI EMI

Ferit adalah senyawa keramik magnetik dari oksida logam (besi, manganesehickel, dan seng) dan dibuat dengan menggunakan teknologi bubuk.

Campuran oksida dibakar sebelumnya pada suhu ~ 1000 ° C dalam proses yang disebut kalsinasi. Bubuk yang telah dikalsinasi ini dicampur dengan erat dengan penambahan bahan pengikat organik dan bubuk digiling dan dikeringkan untuk menghilangkan kelembapan. Bubuk tersebut kemudian dicetak / diekstrusi ke bentuk yang diinginkan di bawah tekanan tinggi ^[10]. Bentuk cetakan ini ditembakkan pada suhu tinggi 1200 - 1350 °C (seringkali dalam keadaan terkendali di atmosfer). Ini menyusut selama proses ini yang disebut sintering. Komponen ferit dengan bentuk yang diinginkan kemudian diproduksi.

Ada banyak variasi formula stoikiometri dan tingkat kinerja mengenai hubungan listrik, magnet dan mekanik untuk komposisi ferit yang berbeda. Rumus kimia umum untuk ferit lunak adalah $MO.Fe_2O_3$ dimana MO adalah oksida logam divalen yang dicampur dengan 48 sampai 60 persen mol oksida besi. Ada tiga komposisi dasar bahan ferit.

(i) Seng mangan

Ini sepenuhnya yitrified dan memiliki porositas yang sangat rendah. Mereka memiliki permeabilitas tertinggi dan menunjukkan resistivitas volume mulai dari seratus hingga beberapa ribu ohm-sentimeter. Komponen ferit seng mangan digunakan di sirkuit yang disetel dan desain daya magnet dari kisaran kilohertz rendah ke spektrum siaran. Ferit ini memiliki koefisien muai panjang sekitar 100 ppm / °C.

(ii) Seng nikel

Ferit seng nikel bervariasi dalam porositas, dan sering mengandung oksida magnesium, mangan, tembaga atau kobalt. Resistivitas volume berkisar dari 10^2 hingga 10^4 ohm-cm.

perubahan suhu digunakan pada frekuensi yang lebih tinggi (di atas 1 MHz), dan cocok untuk aplikasi kepadatan fluks rendah. Ferit seng nikel memiliki koefisien muai panjang sekitar 8 ppm / °C.

(iii) Mangan

Ferit mangan adalah material padat dan stabil suhu yang menampilkan derajat persegi tinggi dalam loop histeresisnya. Itu membuat bahan ini secara unik cocok untuk aplikasi seperti kontrol beberapa keluaran dalam catu daya mode-aktif dan amplifier magnetik frekuensi tinggi.

4.3.2. FERIT SEBAGAI SUPPRESSORS

Bahan ferrite biasanya dikategorikan menurut permeabilitas awal (μ l). Ferit memperoleh

kegunaannya dari kombinasi dua karakteristik [10] prinsip.

1. Permeabilitas magnet tinggi yang memusatkan dan memperkuat medan magnet.
2. Resistivitas listrik yang tinggi yang membatasi besarnya aliran arus listrik di dalam ferit. Kerugian arus pusar berbanding terbalik dengan resistivitas dan kerugian meningkat dengan kuadrat frekuensi.

Aliran energi listrik (arus eddy) di inti, berlawanan dengan aliran yang diinginkan dan diubah menjadi panas. Karena dua karakteristik di atas, ferit menikmati kehilangan energi yang rendah, sangat efisien dan berfungsi pada frekuensi tinggi (1 kHz hingga 1 GHz). Karakteristik operasi, yang membuat ferit efektif dalam penekanan RFI / EMI, adalah sensitivitas variabelnya terhadap

frekuensi. Dengan ferit yang dipasang sebagai penekan, frekuensi yang lebih rendah akan berlalu tanpa kehilangan yang berarti. Namun, di atas frekuensi di mana ($\tan \delta/\mu$) naik tajam, sinyal berpasangan dengan ferit untuk menciptakan impedansi yang cukup tinggi dibandingkan dengan rangkaian lainnya [10]. RFI yang tidak diinginkan secara konsisten diblokir melalui redaman impedansi (komponen resistif) dari sinyal frekuensi tinggi yang tidak diinginkan.

Pemilihan material ferit terbaik sebagai penekan didasarkan pada frekuensi atau rentang frekuensi gangguan yang harus ditekan. Bahan seng dengan permeabilitas resistivitas volume rendah (10^2 ohm-cm) digunakan untuk menekan sinyal kurang dari 40 MHz. Bahan seng nikel penekan pita lebar dengan permeabilitas sedang ($850 \mu l$) resistivitas (ohm-cm) digunakan untuk menekan sinyal antara 25 dan 200 MHz [10]. Bahan nikel seng dengan

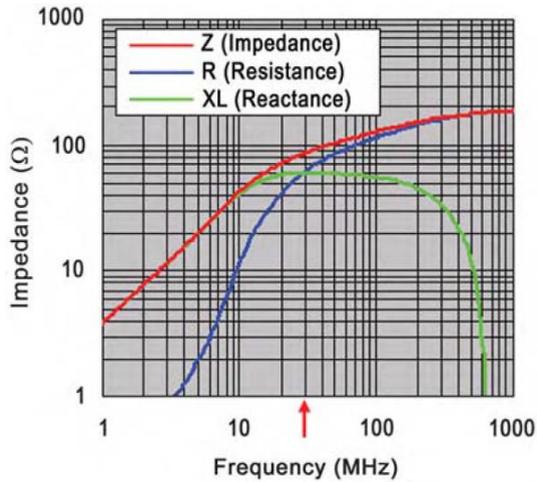
permeabilitas rendah ($125 \mu\text{i}$) dan resistivitas tinggi (10^8 ohm-cm) digunakan pada frekuensi di atas 200 MHz.

4.4. KOMPONEN UNTUK PENEKANAN EMI

4.4.1. MANIK-MANIK FERIT

Salah satu aspek fundamental menggunakan manik-manik ferit untuk aplikasi EMI adalah bahwa komponen tersebut harus dalam tahap resistif [11]. Manik-manik ferit adalah tabung silinder dengan panjang dan diameter yang bervariasi. Ini juga dapat dikonfigurasi dalam paket pemasangan permukaan. Ini digunakan untuk menyaring keluar EMI di pinggiran sumber kebisingan seperti IC dan antarmuka untuk mengurangi emisi kebisingan pada peralatan elektronik. Manik-manik ini digunakan sebagai filter karena kompak, murah dan mudah dipasang. Karakteristik peredam bisingsnya stabil serta manik-manik tidak memerlukan pentanahan. Manik-manik ferit akan terlepas saat

dimasukkan ke kabel atau tergelincir di atas pin, bertindak sebagai impedansi seri. Lebih banyak manik-manik seperti itu ketika ditambahkan meningkatkan impedansi. Impedansi selongsong ferit pada kabel tunggal biasanya 50 ohm pada 10 MHz dengan nilai yang naik hingga 100 - 200 ohm pada frekuensi tertentu yang di atasnya mulai berkurang ^[10]. Atenuasi sebenarnya tergantung pada karakteristik bahan ferit dan bervariasi dengan ukuran dan bentuknya. Karakteristik impedansi manik untuk nilai permeabilitas yang berbeda ditunjukkan pada Gambar. 4.10 dengan frekuensi cross-over yang ditandai, 30 MHz dalam contoh ini, dengan panah merah. Selongsong yang lebih besar memiliki impedansi yang lebih tinggi daripada manik-manik sma.



Gambar 4.10. Karakteristik Impedansi Manik untuk Berbagai Nilai Permeabilitas Ferit Lunak (CT Burket [11]).

4.4.2. BEADDCORES SILINDER

Manik-manik silinder adalah komponen penekan EMI yang paling sederhana. Ini disisipkan pada saluran untuk memblokir gangguan frekuensi tinggi dalam rentang frekuensi 10 MHz hingga 1 GHz. Impedansi manik-manik secara umum berbanding lurus dengan panjangnya pada frekuensi di atas kisaran optimal. Core multi

aperture berukuran kompak dan memberikan impedansi resistif tinggi pada pita frekuensi lebar^[10]. Inti ini menghindari efek resonansi diri yang dialami dengan luka inti apertur tunggal dengan beberapa putaran. Ini dipasang selama pembuatan peralatan. Ini dapat disematkan di penutup plastik kabel atau digeser sebelum memasang konektor.

4.4.3. MANIK-MANIK FERIT YANG DIBELAH

Ini adalah ketukan silinder yang dibelah menjadi dua bagian dan dapat dimasukkan untuk memenuhi persyaratan impedansi spesifik yang terdeteksi setelah perakitan peralatan. Celah udara fisik dalam manik-manik terbagi, sebenarnya memperpanjang kemampuan membawa arus dengan hanya sedikit pengurangan impedansi bila dibandingkan dengan inti ferit padat dari sue yang sama. Celah ini secara magnetis tidak signifikan sementara secara elektrik signifikan sebagai

penghentian sehingga menampung lebih banyak arus ^[10]. Manik-manik femte yang dibelah dapat dibuat dalam jumlah serpihan seperti cincin dengan diameter berbeda (ID dan OD) untuk menampung kabel / kawat dengan diameter berbeda dan kabel datar. Ferit yang dibelah memberikan manfaat sebagai berikut:

- (i) Mudah untuk meningkatkan atenuasi dengan mengubah ukuran atau jumlah belokan
- (ii) Nyaman untuk perkuatan mudah
- (iii) Resistensi yang diperpanjang terhadap saturasi inti di bawah beban arus searah

4.4.4. MANIK-MANIK PELANA

Manik ferit pelana hanyalah setengah dari bentuk fisik manik-manik silinder. Mereka cocok dengan nyaman di situasi di mana metode perisai lainnya tidak praktis. Ini dapat dipasang di dekat komponen dan menghasilkan karakteristik

penekanan yang lebih efektif daripada pelindung komponen dengan metode lain. Karena cara yang paling efektif untuk mengontrol interferensi adalah pada sumbernya, konsep saddle bead yang baru memungkinkan kemungkinan integrasi terdekat dari penekanan [10]. Derajat bukaan pada saddle bead juga berpengaruh signifikan terhadap karakteristik atenuasi.

4.4.5. MANIK-MANIK CHIP FERIT

Manik-manik silinder tidak cocok untuk papan sirkuit pemasangan permukaan dengan kepadatan tinggi dan pemasangan komponen kecepatan tinggi karena ukurannya yang besar dan kebutuhan ruang untuk pemasangannya. Manik-manik chip yang sangat kecil telah dikembangkan untuk situasi seperti itu. Chip dapat memberikan impedansi hingga 2000 ohm [10]. Ini dapat dengan mudah dikemas dalam pita dan gulungan dan

dipasang seperti resistor chip atau kapasitor pada papan pemasangan permukaan.

Komponen induktif dominan pada frekuensi rendah dan komponen resistif menjadi dominan pada frekuensi tinggi. Pada frekuensi di bawah 5 MHz, ferit ckp memberikan impedansi induktif kecil sekitar 150 ohm, sedangkan pada frekuensi di atas 100 MHz, impedansi meningkat hingga lebih dari 1000 ohm dan bersifat resistif. Oleh karena itu, chip ferit dapat diperlakukan sebagai resistor yang bergantung pada frekuensi [10]. Karena kebisingan adalah fenomena frekuensi tinggi, ketika chip ferit ini dimasukkan secara seri dengan garis sinyal, komponen resistif menghilangkan kebisingan frekuensi tinggi yang tidak diinginkan dalam bentuk panas.

4.4.6. PROSES PEMBUATAN BEAD CHIP FERIT

Manik-manik ini diproduksi menggunakan teknologi sablon dan laminasi. Prosesnya

melibatkan pengecoran ferit bersama dengan pengikat ke selotip atau film oveq yang pasta konduktif disaring dalam pola untuk membentuk jejak. Jejak konduktif memiliki tinggi kurang dari 0,015 mm dan lebar sekitar 0,13 hingga 0,25 mm untuk jenis impedansi tinggi dan arus rendah. Lapisan atas dan bawah dari film ferit diaplikasikan dan komponen tersebut kemudian diberikan terminasi pada setiap ujungnya dengan pasta konduktif untuk melengkapi jalur sirkuit [10]. Seluruh struktur kemudian disinter untuk membentuk manik chip. Penghalang nikel dan logam solder dilapisi untuk membentuk terminal ujung. Chip yang dapat menangani arus yang lebih besar memiliki penampang konduktor yang lebih besar, melalui konstruksi, pola jejak dan massa volume ferit yang mengelilingi jejak. Chip ini untuk sinyal frekuensi rendah dan arus rendah menggunakan bahan ferit dengan permeabilitas tinggi yang meningkatkan kinerja filter, terutama

pada frekuensi rendah. Pemasangan chip ferit 220-ohm menyebabkan pengurangan sekitar 10 dB μ V pada spektrum kebisingan. Sedangkan, penyisipan ferit 600-ohm menghasilkan pengurangan hampir 20 dB μ V. Jenis ini ideal untuk port I / O, saluran listrik IC, dan saluran sinyal.

Manik-manik chip ferit untuk aplikasi frekuensi ultra-tinggi melampaui 1 GHz dan memberikan impedansi yang signifikan pada frekuensi yang sangat tinggi. Ini sangat berguna di industri telekomunikasi dimana frekuensi pemancar dan penerima mendekati kisaran GHz [10]. Chip ferit saluran listrik dirancang untuk aplikasi arus tinggi. Ini dicapai dengan memodifikasi desain elektroda dalam untuk resistansi DC rendah, sehingga meningkatkan arus pengenalan. Mereka juga memberikan atenuasi pada rentang frekuensi yang luas. Oleh karena itu, karakteristiknya mirip dengan tipe standar. Dengan memasukkan chip ferit 30-ohm

dan 60-ohm, pengurangan kebisingan masing-masing 10 dB μ V dan 14 dB μ V diperoleh dalam kebisingan. Untuk menangani arus tinggi -3 A atau kondisi yang lebih besar, chip arus yang lebih tinggi harus digunakan untuk memberikan redaman yang diperlukan pada pita interferensi dan harus cukup kuat untuk terus menangani level arus yang lebih tinggi [10]. Saat ini chip tersedia untuk beroperasi pada 6 A dengan lonjakan sekitar 50% lebih tinggi.

4.4.7. INDUKTOR CHIP PADAT

Induktor chip dikembangkan untuk tujuan miniaturisasi. Induktor tipe kumparan dan filter yang dibuat dengan teknologi belitan konvensional memiliki batas untuk kemungkinan reduksi. Miniaturisasi produk ini membutuhkan permeabilitas awal yang lebih tinggi dan peningkatan kepadatan fluks saturasi terutama dalam aplikasi telekomunikasi.

MultiInduktor lapisan chip dirfer dari kumparan konvensional karena dibentuk tanpa kawat luka. Dalam proses pembuatan, lapisan alternatif bahan magnet dan konduktor dicetak. Urutan lapisan konduktif membuat kontinuitas membuat spiral (kumparan) tertanam di dalam material magnet. Lapisan bertumpuk ini ditembakkan pada suhu tinggi diikuti oleh metalisasi terminal untuk kontak eksternal. Struktur ini secara alami menghasilkan pelindung magnetik dan tidak adanya kebocoran fluks magnet sehingga cocok untuk pemasangan permukaan dengan kepadatan tinggi. Induktor / filter chip yang sangat kecil dapat dibuat dengan proses ini ^[10]. Stabilitas termal dari chip arus tinggi jauh lebih besar berdasarkan konstruksinya yang dimodifikasi.

Perbaikan bahan ferit dan elektroda internal telah menyebabkan perkembangan ukuran $2 \times 1,25 \times 0,9 \text{ mm}^3$ dengan nilai impedansi 20 kali lipat dari produk konvensional. Chip solid induktor array

dengan impedansi 600 Ohm dan ukuran 3,2 x 1,6 x 1,1 mm³ juga telah dikembangkan.

4.4.8. FILTER LC MONOLITIK CHIP

Ini adalah filter band pass yang ringkas, tipis, dan ringan yang dikembangkan menggunakan koil cetak untuk induktor yang dijelaskan di atas dan teknologi multilayer untuk kapasitor chip seperti yang dijelaskan dalam bab tentang kapasitor keramik. Struktur menahan kumparan di lapisan tengah dengan bagian kapasitor dan lapisan tertutup yang ditempatkan di lapisan di atas dan di bawah kumparan. Dimasukkannya lapisan tertutup memungkinkan untuk mengurangi efek elektromagnetik dari bagian luar perangkat [10]. Maternal dielektrik keramik dengan suhu pembakaran rendah digunakan. Tembaga digunakan sebagai elektroda internal untuk meningkatkan karakteristik frekuensi tinggi. Karena

struktur monolitik, ia memiliki ketahanan yang luar biasa terhadap elemen korosif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Urabe, K. Fujii, A. Mukifza Bin H, Y. Matsumoto, and A. Sugiura. 17th Int. Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. (2006)
- [2] M. Damnjanović, G. Stojanović, V. Raghavendra, P. Bellew, and N. Mcloughlin. IEEE Trans. Magn. 2(42) (2006), 270-277.
- [3] O. Fujiwara and T. Ichikawa. IEICE Trans. Commun. vol. J79-B-2, 11 (1996), 950-5.
- [4] A. Z. Samir, J. Wang, and O. Fujiwara. T. IEE Japan. vol. 120-C, 1 (2000), 8-13.
- [5] Methods of Measurement of the Suppression Characteristics of Passive Radio Interference Filters and Suppression Components, International Electrotechnical Commission/ International Special Committee on Radio Interference, CISPR 17, 2006.
- [6] J. Urabe, K. Fujii, Y. Dowaki, Y. Jito, Y. Matsumoto, and A. Sugiura. IEEE Trans. Electromag. Compatib. 4(48) (2006), 774-780.
- [7] G. F. Engen and C. A. Hoer. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. MTT-27, 12 (1979), 987-98.
- [8] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd ed. New York: Wiley. (1998), 217-21.
- [9] T. Uno, Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetic Field and Antennas (in Japanese). Tokyo, Japan: CORONA, 1998.
- [10] K. Kumar. Leadless Devices For EMI SUPPRESSION, Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. (1999).

[11] C. T. Burket, All Ferrite Beads Are Not Created Equal.
FEATURE, (2010).

BAB 5. KOMPONEN FERIT MICROWAVE

Teknologi gelombang mikro bergerak ke frekuensi yang lebih tinggi dan bandwidth yang lebih tinggi, ke dalam rentang gelombang mm, hingga 100 GHz. Bahan non-konduktor penting untuk memastikan penetrasi total medan elektromagnetik [1]. Bahan ferit digunakan secara luas dalam dua kelas perangkat gelombang mikro. Kelas pertama terdiri dari perangkat kendali sinyal seperti isolator dan sirkulator, di mana sifat non-timbal balik dari perambatan gelombang sangat penting. Kelas kedua, di sisi lain, terdiri dari perangkat kontrol sinyal, seperti pemindah fase filter merdu, garis penundaan, sakelar, dan atenuasi variabel, di mana non-timbal balik tidak memainkan peran penting. Perangkat berbasis semikonduktor alternatif yang memenuhi persyaratan serupa ada untuk sebagian besar perangkat di kelas kedua,

tetapi tidak untuk perangkat di kelas pertama, perangkat non-timbal balik [2].

Elemen ferit banyak digunakan dalam perangkat gelombang mikro, isolator, sirkulator, pemindah fase. Untuk aplikasi, yang memerlukan operasi non-resiprokal, seperti pada sirkulator dan isolator, tidak ada alternatif selain perangkat magnetis. Karena ketahanan spesifik yang sangat tinggi, fleksibilitas luar biasa dalam menyesuaikan sifat magnet, kemudahan persiapan, dan, yang tidak kalah pentingnya, pertimbangan harga dan kinerja menjadikan ferit bahan pilihan pertama untuk aplikasi microwave [1].

Dalam banyak aplikasi ferit dalam perangkat gelombang mikro seperti pemindah fase, sakelar, dan rotator, bahan magnetis hanya sebagian dimagnetisasi. Modus operasi ini memiliki keuntungan bahwa sifat gelombang mikro material dapat diubah secara signifikan dengan penerapan

medan magnet yang agak sederhana. Karena aplikasi praktis ini, perilaku gelombang mikro dari ferit yang termagnetisasi sebagian telah menjadi subjek penelitian yang cukup besar dari hari-hari awal teknologi gelombang mikro ferit hingga baru-baru ini. Telah ditemukan bahwa komponen off-diagonal dari tensor suseptibilitas secara substansial sebanding dengan magnetisasi bersih, dan bahwa komponen diagonal adalah negatif dan meningkat besarnya dengan meningkatnya magnetisasi saturasi dan penurunan frekuensi [3].

Ferrimagnet kerugian rendah adalah dasar untuk komponen gelombang mikro pasif yang beroperasi di berbagai frekuensi. Resonansi magnetik komponen pasif dapat disetel dengan menggunakan medan magnet statis pada rentang frekuensi yang luas, di mana frekuensi operasi yang lebih tinggi memerlukan bias magnet yang lebih tinggi kecuali digunakan heksaferrit dengan anisotropi kristal besar. Namun, penyyetelan listrik

frekuensi operasi, yang dapat dicapai jika sifat magnetis material sensitif terhadap medan melalui kopling magnetoelektrik (ME) [4], lebih menarik daripada penyyetelan magnetis.

Dalam struktur seperti itu, regangan yang diinduksi oleh medan listrik yang diterapkan di seluruh bahan piezoelektrik ditransfer secara mekanis ke bahan magnet, yang kemudian mengalami perubahan permeabilitas magnetnya melalui magnetostriksi. Selain itu, penysetelan listrik yang digabungkan dengan permitivitas dielektrik yang tinggi dan kerentanan magnetis dapat menyebabkan komponen gelombang mikro miniatur dan / atau memungkinkan pengoperasian pada frekuensi yang sangat tinggi tanpa perlu peningkatan ukuran dan berat yang umum dalam pendekatan konvensional [4].

5.1. PRINSIP OPERASI

Varietas ferit kerugian rendah, kelas khusus bahan magnet yang menggunakan Fe sebagai konstituen, menemukan banyak aplikasi dalam komponen gelombang mikro pasif seperti isolator, sirkulator, pemindah fase, dan antena miniatur yang beroperasi pada berbagai frekuensi (1-100) GHz) dan juga sebagai media perekam magnetik. Miniaturisasi komponen pasif juga bisa menjadi mungkin karena suceptibilitas magnetik yang tinggi dari feromagnet ditambah dengan permitivitas dielektrik yang tinggi dari beberapa feroelektrik [4].

Jika regangan yang mengubah sifat magnetis bahan ferrimagnetik ditransmisikan dari bahan piezoelektrik yang bersentuhan dengan ferrimagnet.[4], medan listrik yang diterapkan di seluruh bahan piezoelektrik dapat digunakan untuk menyetel sifat magnetis yang membuka kemungkinan untuk seluruh host komponen pasif gelombang mikro yang dapat disetel secara elektrik. Perilaku yang sama, meskipun pada tingkat yang

jauh lebih rendah, dapat diperoleh dalam material dengan kopling magnet-elektrik yang disebut multiferroics [4].

Perlu disebutkan bahwa bahan piezoelektrik adalah bahan yang merespons medan listrik yang diterapkan melalui perubahan dimensi atau sebaliknya. Bahan piezoelektrik dan ferrimagnet adalah subkelas oksida yang tidak memiliki sentrosimetri. Bahan yang kurang sentrosimetri juga menunjukkan sifat optik nonlinier yang berguna di berbagai bidang seperti komunikasi optik dan pemrosesan sinyal.[4]. Miniaturisasi komponen pasif juga dapat dimungkinkan karena susceptibilitas magnetik ferromagnet yang tinggi ditambah dengan permitivitas dielektrik yang tinggi dari ferroelektrik.

Untuk memahami sepenuhnya pertimbangan desain dan motivasi di balik ferit tertentu, penting untuk memiliki setidaknya pengetahuan tentang prinsip pengoperasian

komponen pasif yang dimaksudkan untuk aplikasi gelombang mikro [4]. Pada bagian berikut, dasar penyebut persekutuan dalam komponen pasif, rotasi Faraday, dibahas. Selanjutnya, efek penting yang memungkinkan penyetelan listrik dari sifat magnetik material, efek magnetoelectric.

5.1.1. ROTASI FARADAY

Rotasi Faraday adalah efek magneto-optic yang disebabkan oleh interaksi antara gelombang elektromagnetik (EM) terpolarisasi linier dan medan magnet yang diterapkan atau melekat pada material. Rotasi bidang polarisasi sebanding dengan intensitas komponen medan magnet searah gelombang EM dan panjang sampel [4]. Sebuah berkas gelombang EM terpolarisasi linier yang memiliki arah vektor-E medan listrik unik dapat diuraikan menjadi dua berkas terpolarisasi melingkar dengan intensitas yang sama.

Dalam medan magnet, media propagasi menjadi aktif secara elektromagnetik menghasilkan indeks bias / konstanta dielektrik yang berbeda untuk kedua balok sehingga keduanya bergerak pada kecepatan fase yang berbeda. Ketika dua balok keluar dari material, mereka memiliki hubungan fase yang berbeda, yang terwujud dalam rotasi vektor-E dari balok gabungan [4]. Untuk memberikan gambaran makroskopis dari bahan ferit dalam radiasi gelombang mikro, kita harus menyelesaikan persamaan Maxwell untuk perambatan gelombang dalam media ferrimagnetik. Persamaan Maxwell untuk ferit dapat dituliskan dalam bentuk fasor sebagai berikut:

$$\mathbf{E} = - \mathbf{H} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{E} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{D} = 0 \quad (5.3)$$

$$\mathbf{B} = 0 \quad (5.4)$$

Dimana $[\mu]$ adalah tensor permeabilitas dan ϵ adalah permitivitas ferit. Memecahkan persamaan ini untuk gelombang bidang dalam bentuk medan listrik dan magnet $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{j\mathbf{b}z}$ dan $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{j\mathbf{b}z}$ merambat sepanjang arah z dan memiliki konstanta propagasi mengarah ke ekspresi berikut untuk hand-hand circularly polarized (RHCP) dan medan listrik dan magnet sirkuler polarisasi sirkuler (LHCP):

$$\mathbf{E}_+ = \mathbf{E}_0 \quad (5.5)$$

$$\mathbf{H}_{.+} = H_0 \mathbf{Y}_+ \quad (\text{untuk RHCP})$$

$$\mathbf{E}_- = \mathbf{E}_0 \quad (5.6)$$

$$\mathbf{H}_{.-} = H_0 \mathbf{Y}_- \quad (\text{untuk LHCP})$$

$$\text{Dimana } \mathbf{Y}_+ = \frac{1}{\mu} \frac{\mathbf{E}_+}{\mathbf{H}_{.+}} \text{ dan } \mathbf{Y}_- = \frac{1}{\mu} \frac{\mathbf{E}_-}{\mathbf{H}_{.-}}$$

adalah penerimaan gelombang yang sesuai, dan μ dan κ adalah elemen tensor permeabilitas polder. Terlihat dari ekspresi ini gelombang bidang RHCP dan LHCP merambat melalui material ferit dengan

konstanta perambatan yang berbeda. Juga terlihat bahwa untuk gelombang RHCP ferit [4] dapat direpresentasikan dengan permeabilitas efektif $\mu + \kappa$, sedangkan untuk gelombang LHCP dapat direpresentasikan dengan $\mu - \kappa$. Sekarang mari kita pertimbangkan medan listrik terpolarisasi linier pada $z = 0$, direpresentasikan sebagai jumlah dari RHCP dan gelombang LHCP:

$$\mathbf{E}|_{z=0} = E_0 = \mathbf{E}_{RHCP} + \mathbf{E}_{LHCP} \quad (5.7)$$

Bidang total ini, dengan mempertimbangkan bahwa komponen RHCP akan menyebar ke arah z sebagai $e^{-\alpha z}$, dan komponen LHCP akan sama dengan

$$\mathbf{E}_{LHCP} = E_0 \frac{\mu - \kappa}{\mu + \kappa} \mathbf{e}^{-\alpha z} \quad (5.8)$$

Seperti yang bisa dilihat Persamaan. 5.8 polarisasi berputar saat gelombang merambat di sepanjang sumbu z . Pada titik tertentu di sepanjang

sumbu z sudut polarisasi yang diukur dari sumbu x diberikan oleh,

$$\theta = \arctan \left(\frac{E_y}{E_x} \right) \quad (5.9)$$

yang merupakan ekspresi matematika untuk rotasi Faraday. Seperti yang dapat dilihat dari Persamaan 5.9 untuk posisi tetap sepanjang sumbu z sudut polarisasi ditetapkan, sedangkan untuk gelombang terpolarisasi melingkar polarisasi berputar seiring waktu. Membalik arah bias magnet (H_0) mengubah tanda θ yang pada gilirannya mengubah arah putaran menjadi searah jarum jam [4]. Demikian pula, untuk bias +z, gelombang yang bergerak pada arah $+z$ akan memutar propagasinya searah jarum jam jika kita melihat ke arah propagasi, $-z$. Jadi, polarisasi gelombang yang bergerak dari $z = 0$ ke $z = L$ dan kembali lagi ke $z = 0$ berputar sebesar 2θ , yang dinyatakan dengan Persamaan 5.9 untuk $z = L$.

5.1.2. EFEK MAGNETOELECTRIC

Multiferroics adalah material atau struktur di mana ordo ferroic yang berbeda seperti feroelektrik, feromagnetik / antiferromagnetik, dan ferroelastik hidup berdampingan dalam satu material. Dalam magnetoelektrik multiferroik, polarisasi dielektrik dapat diinduksi oleh medan magnet eksternal atau sebaliknya, momen magnet dapat diinduksi oleh medan listrik eksternal. Fenomena ini digambarkan sebagai efek magnetoelektrik (ME) [5]. Dengan menggunakan koefisien ME α , polarisasi listrik P dan magnetisasi M dapat dituliskan sebagai

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} + \mathbf{H} \alpha \quad (5.10)$$

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} + \alpha^T \mathbf{E} \quad (5.11)$$

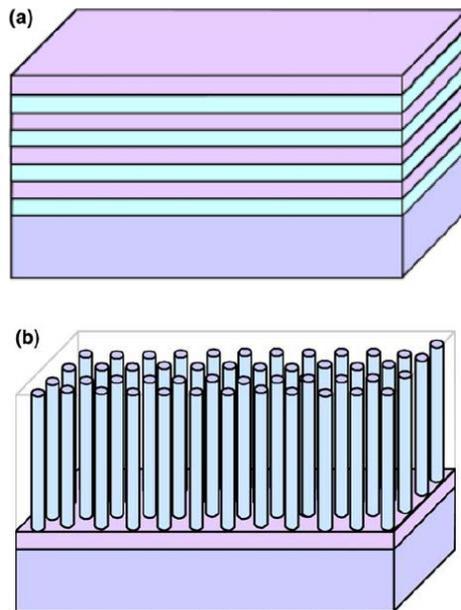
di mana χ adalah kerentanan dielektrik, χ_m adalah kerentanan magnetik, dan α adalah koefisien magnetoelektrik.

Efek ME diamati dalam dua kelas bahan: bahan multiferroic fase tunggal yang memiliki sifat

feroelektrik dan feromagnetik secara bersamaan dan komposit yang terdiri dari fasa feroelektrik dan feromagnetik. Efek ME dalam bahan fasa tunggal muncul dari interaksi jarak jauh antara momen atom dan dipol listrik dalam sublattice magnetik dan feroelektrik yang teratur. Koefisien ME yang dapat direalisasikan dalam material fase tunggal, bagaimanapun, sangat kecil ($1-20 \text{ mV} / \text{cm-Oe}$) dan tidak cukup untuk aplikasi praktis. Selain itu, efek ME di sebagian besar bahan fase tunggal ini diamati hanya pada suhu rendah karena suhu transisi feromagnetik (atau antiferromagnetik) atau feroelektrik sangat rendah [4]. Sebaliknya, bahan komposit,

Efek ME dalam komposit mungkin lebih dari beberapa kali lipat lebih tinggi daripada di bahan fase tunggal, yang terakhir membentuk dasar untuk multiferroics. Komposit semacam itu dapat diimplementasikan dalam bentuk "multilayers" yang terdiri dari lapisan bolak-balik dari fasa

feroelektrik dan fasa ferro- atau ferri-magnetik seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.1. (Sebuah).



Gambar 5.1 (a) Ilustrasi skema struktur multilayer dengan lapisan bolak-balik fase piezoelektrik dan ferro / ferromagnetik pada substrat, dan (b) film tipis berstruktur nano yang dirakit sendiri dari fase ferro / ferromagnetik yang tertanam dalam matriks feroelektrik pada substrat (Ü. Özgür., Dkk [4]).

Bilayers dan multilayers dari komposit sangat menjanjikan karena arus bocor yang rendah dan sifat poling yang superior. Namun, dalam multilayers, efek penggandengan magnetoelektrik melemah karena efek penjepitan substrat.^[6], kecuali jika multilayers dibuat sebagai membran berdiri bebas. Alternatifnya, heterostruktur yang terdiri dari nanopilar fasa ferro / ferrimagnetik yang tertanam dalam matriks feroelektrik dapat diterapkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1b.

Sebagian besar bahan feromagnetik menunjukkan magnetostriksi, yang menggambarkan perubahan regangan sebagai fungsi kuadrat dari medan magnet yang diterapkan. Perubahan regangan ini dapat menyebabkan polarisasi dalam fasa feroelektrik, yang bersentuhan dengan fasa feromagnetik / antiferromagnetik / feromagnetik (idealnya dalam register atom), melalui efek piezoelektrik. Tanda magnetostriksi

bisa positif atau negatif tergantung pada arah kristalografi dalam material [4]. Dengan asumsi bahwa keadaan demagnetisasi sebelum penerapan medan magnet adalah isotropik, magnetostriksi pembatas yang diukur sepanjang arah medan disebut magnetostriksi saturasi.

Efek ME dapat dicapai dengan menggabungkan bahan piezoelektrik (atau elektrostriktif) dan bahan piezomagnetik (atau magnetostriktif) melalui kontak mekanis yang baik. Sistem dua fase seperti itu dapat dicapai dalam bentuk komposit, laminasi, atau lapisan epitaxial. Sebuah medan magnet yang diterapkan menginduksi regangan dalam konstituen magnetostriktif, yang dapat ditransfer ke konstituen piezoelektrik sejauh diperbolehkan oleh kopling mekanis antara keduanya, dan regangan yang ditransfer menginduksi polarisasi listrik dalam konstituen piezoelektrik^[4]. Efek terbalik juga dimungkinkan, di mana medan listrik dapat

diterapkan ke bahan piezoelektrik untuk menginduksi regangan, yang kemudian ditransfer ke bahan magnetostriktif, di mana hal itu mempengaruhi magnetisasi.

$$ME = \frac{\dots}{\dots} \times \dots \quad (5.12)$$

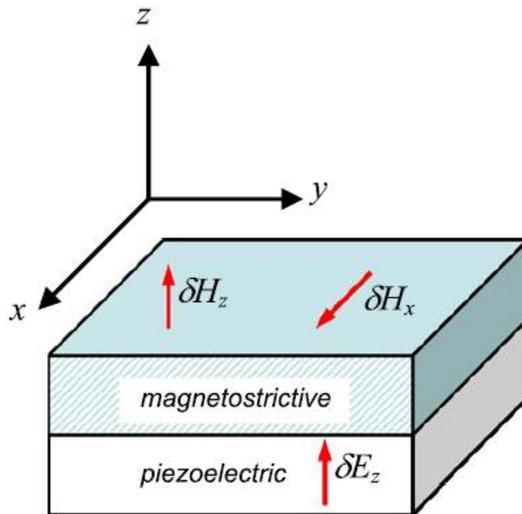
Medan listrik kemudian dihubungkan dengan penggunaan tegangan kondisi batas yang sesuai. Misalnya, untuk benda bebas dengan kedua fase terikat sempurna bersama kondisi batas sedemikian rupa sehingga tidak ada tegangan sepanjang arah tegak lurus dengan bidang ikatan, dan strain di kedua konstituen di sepanjang arah melintang adalah sama. Juga, gaya total yang bekerja pada sistem sepanjang arah melintang dan perpindahan listrik vektor di lapisan piezoelektrik di bawah sirkuit terbuka kondisi keduanya nol. Menggunakan koordinat 3 dimensi sistem dan menentukan arah seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 5.1 itu koefisien ME melintang (zx) dan longitudinal (zz) dapat diperoleh sebagai:

$$\begin{aligned}
 (\alpha \underline{E}) &= \frac{1}{V} \left(\frac{d_{zx}}{dH} \right) \frac{dH}{dE} \\
 (\alpha \underline{E}) &= \frac{1}{V} \left(\frac{d_{zz}}{dH} \right) \frac{dH}{dE}
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

Dimana S_{ij} adalah kesesuaian, q_{ij} adalah koefisien piezomagnetik, d_{zx} adalah koefisien piezoelektrik, ϵ adalah permitivitas dielektrik pada tegangan konstan, V adalah volume, dan superskrip m dan p masing-masing menunjukkan fase magnetostriktif dan piezoelektrik. Koefisien piezomagnetik $q_{ij} = d_{ij} / dH$ biasanya ditentukan dari ketergantungan medan magnet terukur dari magnetostriksi longitudinal () dan transversal

() [7]. Karena hanya medan listrik melintasi lapisan piezoelektrik yang di biasanya ditentukan per satuan ketebalan fasa piezoelektrik.



Gambar 5.2. Sistem koordinat untuk benda bebas terdiri dari lapisan magnetostruktif dan piezoelektrik. Untuk mengukur koefisien ME transversal dan longitudinal, medan magnet yang diterapkan masing-masing harus berada di bidang sampel dan normal ke bidang sampel (Ü. Özgür., Dkk [4]).

Salah satu tantangan utama selama pengukuran adalah membuat sampel cukup

terisolasi untuk mencegah arus bocor. Kopling ME dapat diukur juga secara tidak langsung dengan hanya merekam perubahan baik dalam magnetisasi dekat suhu transisi feroelektrik atau konstanta dielektrik di dekat suhu transisi magnet [4]. Skema pengukuran yang sama dapat diterapkan pada sistem 2-fase di mana pengukuran dapat dilakukan di dekat suhu transisi salah satu konstituen.

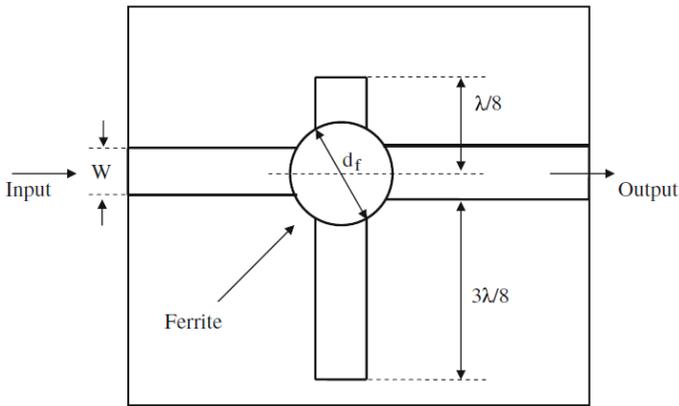
5.2. ISOLATOR

Isolator memiliki aplikasi penting dalam sistem gelombang mikro. Misalnya, satu aplikasi harus dilakukan dengan mengurangi tarikan frekuensi osilator yang disebabkan oleh refleksi dari beban. Aplikasi lain melibatkan amplifier tabung gelombang perjalanan gain tinggi. Isolator menawarkan keunggulan tertentu dibandingkan sirkulator dalam hal ukuran dan biaya. Isolator adalah perangkat dua port yang mentransfer daya maju dari input ke output dengan sedikit atenuasi tetapi menghilangkan daya yang merambat ke arah

yang berlawanan [4]. Aplikasi khas dari isolator termasuk kopling generator gelombang mikro RF ke beban.

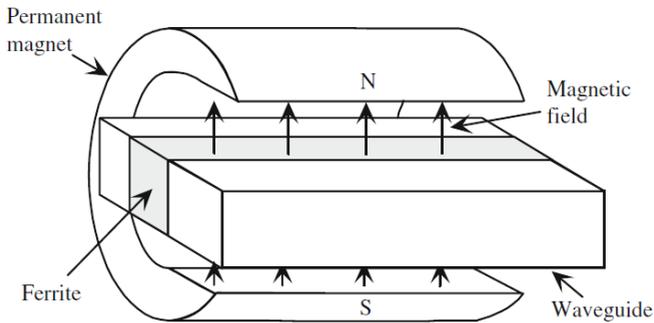
Dalam aplikasi yang tidak memerlukan kemampuan sirkulator lengkap, isolator kecil berbiaya rendah mungkin lebih disukai daripada sirkulator yang diubah menjadi isolator dengan menghubungkan beban yang sesuai ke salah satu portnya. Isolator ferit memiliki tiga komponen yang diperlukan: saluran transmisi, bagian ferit, dan medan magnet bias DC yang diterapkan pada ferit. Ada tiga jenis isolator yang diklasifikasikan berdasarkan prinsip operasinya: isolator resonansi, isolator perpindahan medan (juga dikenal sebagai mode tepi / samping atau mode perifer), dan isolator sambungan (isolator Faraday). Isolator persimpangan dapat direalisasikan dengan mengakhiri salah satu port sirkulator dengan beban yang sesuai seperti yang disebutkan di atas.

Pengoperasian isolator jenis ini memerlukan pembiasan bahan ferit pada resonansinya. Keunggulan isolator resonansi dibandingkan isolator lain adalah desainnya yang sederhana dan ukuran piringan ferit yang digunakan relatif kecil. Skema isolator resonansi ditunjukkan pada Gambar 3. Rintisan dari panjang $\lambda / 4$ panjang gelombang, dihubungkan ke saluran utama sehingga arus pada rintisan dan pada saluran utama berada dalam kuadratur. Sebuah piringan ferit ditempatkan di tengah persimpangan, dimana medan magnet terpolarisasi secara melingkar. Kompensasi reaktansi stub diperoleh dengan menggunakan stub tambahan dengan diameter (d_f) cakram harus sama dengan $2-3 W$, di mana W adalah lebar rintisan.



Gambar 5.3. Skema isolator resonansi (Ü. Özgür., Dkk [4]).

Isolator resonansi terdiri dari saluran transmisi yang beroperasi dalam mode yang menyediakan medan rf terpolarisasi melingkar di beberapa wilayah, dan sepotong ferit yang terletak di wilayah ini dan dimagnetisasi tegak lurus ke bidang polarisasi melingkar [4]. Ketika gelombang elektromagnetik merambat di sepanjang satu arah jalur transmisi, pengertian rotasi medan magnet rf terpolarisasi sedemikian rupa sehingga sinkron dengan gerakan presesi spin elektron tertentu dalam ferit.



Gambar 5.4. Isolator microwave ferit persimpangan sampel (Ü. Özgür., Dkk [4]).

Isolator ferit menggunakan saluran transmisi heliks telah dikembangkan beberapa dekade yang lalu^[8]. Keuntungan relatif utama dari jenis isolator ini adalah tidak diperlukan medan bias magnet eksternal. Ini telah dicapai dengan menggunakan cincin tertutup dari ferit lunak dengan kurva magnetisasi loop persegi. Isolator juga dapat dibuat dari sirkulator. Ketika satu port dari sirkulator tiga port diakhiri dalam beban yang cocok, itu akan berfungsi sebagai isolator. Gambar. 5.4. mengilustrasikan isolator gelombang mikro persimpangan sampel di mana elemen ferit ditempatkan di pandu gelombang, dan medan bias

magnet diterapkan secara eksternal (idealnya bias internal akan cukup besar meniadakan kebutuhan akan medan magnet eksternal untuk diterapkan).

Pandu gelombang, penampang melingkar untuk varietas koaksial, hampir diisi dengan bahan ferit. Gelombang elektromagnetik yang merambat dalam satu arah pada pelat ferit memiliki satu arah polarisasi melingkar, sedangkan yang berlawanan arah memiliki arah yang lain. Gelombang elektromagnetik yang merambat dalam arah sebaliknya, bagaimanapun, memiliki pengertian yang berlawanan dan tidak berinteraksi dengan putaran elektron sebelumnya [4]. Besarnya medan magnet dc yang diterapkan menentukan frekuensi presesi dan dipilih sehingga sama dengan frekuensi sinyal dari sinyal RF.

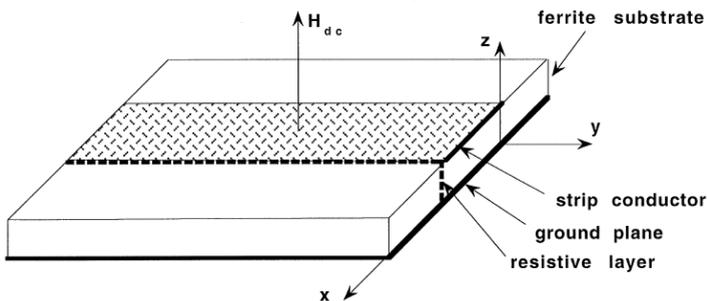
Isolator gelombang mikro juga telah dibangun dengan memanfaatkan rasio permeabilitas μ yang besar untuk dua polarisasi,

jauh dari resonansi. Untuk polarisasi yang memiliki permeabilitas lebih rendah, pandu gelombang memiliki frekuensi cutoff yang lebih tinggi daripada polarisasi yang berlawanan. Di daerah antara dua frekuensi cutoff pandu gelombang adalah searah, yang berarti gelombang di luar pita tidak ditransmisikan [4]. Energi yang tidak disebarkan di sini sebagian besar dipantulkan kembali ke sumbernya, yang dapat menyebabkan masalah pada perangkat ferit berdaya tinggi, karena suhu dapat naik di atas titik Curie karena disipasi daya.

5.2.1. ISOLATOR PITA LEBAR

Rugi penyisipan isolator, yang akan diperoleh dengan mengintegrasikan rugi per satuan panjang sepanjang konduktor pita, juga cenderung lebih besar pada frekuensi yang lebih rendah. Gambar 5 mengilustrasikan struktur penting dari isolator mode-tepi. Gambar tersebut dapat diartikan sebagai isolator mikrostrip, atau sebagai isolator

stripline dengan separuh bagian atas dilepas agar jelas. Lapisan resistif yang ditunjukkan pada Gambar. 5.5 sangat penting untuk menghasilkan sifat non-timbal balik perangkat [2], tetapi untuk pembahasan awal mari kita asumsikan bahwa tidak ada lapisan resistif.



Gambar 5.5 Diagram sederhana dari isolator mode tepi (E.Schloemann [2]).

Struktur Gambar 5.5 kemudian hanyalah mikrostrip atau garis strip pada substrat ferit termagnetisasi. Jika konduktor strip pada Gambar 5.5 jauh lebih lebar dari ketebalan substrat, kondisi batas aktual yang ada pada bidang yz yang berbatasan dengan konduktor strip dapat diganti dengan kondisi batas dinding magnet ($h_y = 0$)

dengan cara aproksimasi , karena arus dalam konduktor strip tidak dapat mengalir ortogonal ke tepi, dan karenanya tidak dapat menginduksi komponen medan magnet ke arah y . Hubungan dispersi untuk gelombang ini dapat dicirikan oleh permeabilitas skalar ('permeabilitas karakteristik'), yang ternyata sama dengan komponen diagonal tensor permeabilitas (bukan permeabilitas 'efektif') [2].

Sekarang perhatikan pengaruh lapisan resistif terhadap karakteristik perambatan struktur yang ditunjukkan pada Gambar 5.5 Karena efek perpindahan medan yang disebutkan di atas, redaman bergantung pada arah perambatan. Persamaan karakteristik resultan untuk konstanta propagasi kompleks sebagai fungsi frekuensi dapat dinyatakan sebagai $F(\beta, \omega) = 0$ di mana F adalah fungsi transendental yang relatif sederhana yang bergantung pada semua parameter perangkat yang relevan [9].

5.3. PENGALIH FASE

Pengenalan radar array fase telah melahirkan banyak minat dalam pemindah fase yang dikendalikan secara elektrik dan respons cepat. Pengalih fasa digital ferit, atau pengalih fasa penguncian seperti yang juga disebut, adalah perangkat pasif di mana toroid dari ferit loop persegi ditempatkan untuk berinteraksi dengan sinyal gelombang mikro. Pemrosesan sinyal membutuhkan perangkat gelombang mikro broadband, kerugian rendah, dan biaya rendah (sirkulator, isolator, pemindah fase, penyerap).

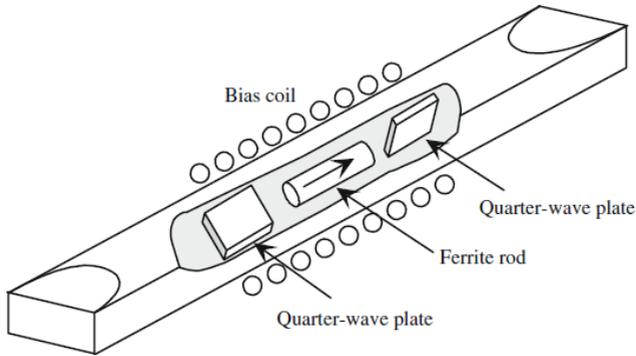
Pemindah fase gelombang mikro adalah elemen penting untuk digunakan dalam osilator dan sistem antena array bertahap. Pemindah fase ferit tradisional dari pita gelombang milimeter dan sub-milimeter didasarkan pada rotasi Faraday untuk gelombang elektromagnetik dalam batang ferit yang dimagnetisasi secara aksial di pandu gelombang. Misalnya, jika pelat ferit, yang

dimagnetisasi ke arah yang sama, memanjang dari atas ke bawah pandu gelombang ditempatkan pada masing-masing dinding samping pandu gelombang, pergeseran fasa 360° dapat diperoleh dengan kehilangan lebih sedikit. dari 1 dB di X band [10].

Bidang yang diterapkan tidak bisa terlalu tinggi untuk menyebabkan kerugian resonansi ferit. Oleh karena itu, untuk pergeseran fasa tertentu per satuan panjang, nilai maksimum bidang yang diterapkan menentukan ketebalan minimum pelat ferit yang diperlukan. Ada juga batas atas untuk ketebalan karena ketika lembaran ferit terlalu tebal, fenomena cutoff terjadi sehingga menimbulkan atenuasi tinggi bahkan pada medan magnet jauh di bawah yang sesuai dengan resonansi. Sebuah pemindah fasa non-resiprokal yang memiliki pergeseran fasa berbeda dalam arah berlawanan dari propagasi dalam pandu gelombang dapat diperoleh dengan satu pelat ferit atau dengan dua

pelat ditempatkan secara simetris, sehubungan dengan pusat pemandu, tetapi dimagnetisasi secara berlawanan.

Rotasi Faraday nonreciprocal pemindah fase ditunjukkan pada Gambar 5.6. Prinsip operasi pemindah fase dapat dijelaskan sebagai berikut. Mode pandu gelombang persegi panjang yang masuk di sebelah kiri diubah menjadi mode pemandu gelombang melingkar dengan bagian transisi pendek. Sebuah pelat dielektrik seperempat gelombang yang berorientasi 45° dari vektor medan listrik mengubah gelombang menjadi gelombang polarisasi sirkuler kanan dengan memberikan perbedaan fase 90° antara komponen medan yang sejajar dan tegak lurus dengan pelat [4]. Di daerah bermuatan ferit penundaan fase adalah $+z$, yang dapat dikontrol dengan kekuatan medan bias.

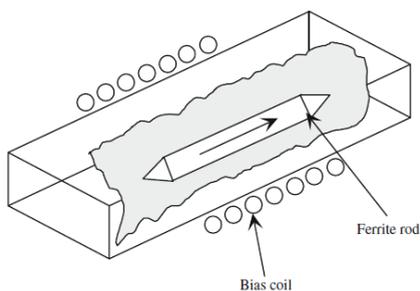


Gambar 5.6. Shifter fase rotasi Faraday nonreciprocal (Ü. Özgür., Dkk [4]).

Operasi ini serupa untuk gelombang yang masuk di sebelah kanan kecuali sekarang penundaan fasa adalah S_y yang berarti pergeseran fasa nonreciprocal. Batang ferit dibiaskan secara longitudinal ke arah propagasi dengan kumparan solenoida. Jenis pemindah fase ini dapat dibuat timbal balik dengan menggunakan pelat seperempat gelombang non-resiprokal untuk mengubah gelombang terpolarisasi linier menjadi polarisasi melingkar untuk kedua arah perambatan.

Garis penundaan miniatur ferit-film juga menarik untuk pemrosesan sinyal frekuensi tinggi

[11,12]. Perangkat ini didasarkan pada propagasi gelombang spin magnetostatis (MSWs) dalam film ferit yang terletak di dua transduser mikrostrip. Sinyal elektromagnetik (EM) yang diumpankan ke transduser masukan menggairahkan MSW dalam film yang menjalar ke mikrostrip keluaran di mana ia diubah kembali ke sinyal EM. Kecepatan kelompok dan panjang gelombang dari MSW adalah dua lipat lebih kecil dari pada gelombang EM pada frekuensi yang sama. Hal ini memungkinkan waktu tunda propagasi sekitar 10-500 ns untuk jarak propagasi beberapa milimeter dalam film [4].



Gambar 5.7. Pengalih fase timbal balik Reggia-Spencer (Ü. Özgür., Dkk [4]).

Sebuah pemindah fase ferit timbal balik yang menarik telah diteliti oleh Reggia dan Spencer ^[13] (Gbr. 7) di mana batang ferit bermagnet longitudinal secara koaksial dan terpusat terletak di pandu gelombang persegi panjang. Dalam konfigurasi ini pergeseran fasa besar telah diperoleh dengan medan magnet yang diterapkan rendah. Pengamatan telah dijelaskan oleh konsentrasi sebagian besar energi elektromagnetik dalam bahan ferit karena konstanta dielektrik yang relatif tinggi ($\sim 10 \epsilon_0$) yang menimbulkan pergeseran fasa besar karena medan yang diterapkan bervariasi dengan perubahan yang menyertai permeabilitas.

Semua perangkat yang disebutkan di atas memerlukan medan magnet elektromagnet atau solenoida untuk kontrol EM karena medan magnet bias H diperlukan untuk pengoperasian dan penyetelan frekuensi perangkat ini. Ini membutuhkan daya listrik yang tinggi untuk pengoperasian dan melibatkan disipasi daya yang

besar, dan ini besar [4]. Selain itu, penyetulan magnetis seperti itu pada dasarnya lambat dan berisik. Sama pentingnya, perlu dicatat bahwa ini membuat miniaturisasi perangkat menjadi sulit dan tidak kompatibel dengan teknologi sirkuit terintegrasi.

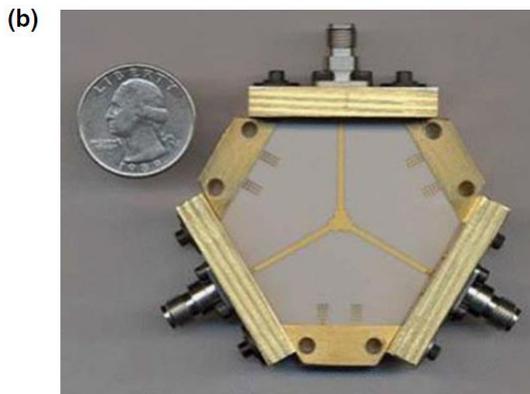
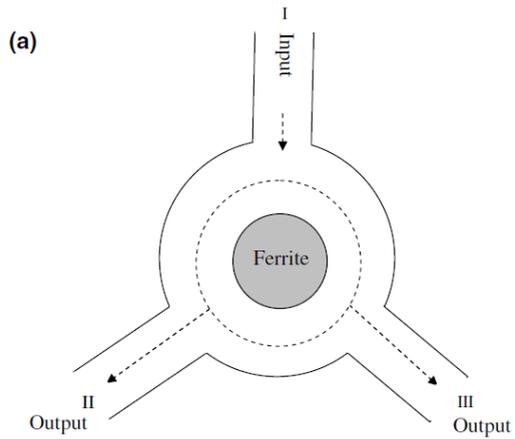
5.4. CIRCULATOR

Untuk kemajuan lebih lanjut dalam mencapai bandwidth yang lebih besar daripada yang saat ini tersedia di isolator dan sirkulator, akan sangat membantu untuk memahami sepenuhnya mekanisme fisik yang berkontribusi pada hilangnya yang diamati di tepi bawah pita frekuensi dalam kondisi operasi yang khas, yaitu, di bidang bias rendah [2]. Pada titik operasi sirkulator, prototipe perangkat ferit gelombang mikro, kerugian magnetis biasanya lebih kecil daripada kerugian logam dan dielektrik, sehingga penghapusan sumber kerugian nonmagnetik adalah yang terpenting.

Isolator dan sirkulator adalah komponen gelombang mikro pasif nonreciprocal jenis ferit yang paling banyak digunakan. Ada tiga jenis garis pandu gelombang yang sebagian besar digunakan dalam sistem gelombang mikro: pandu gelombang persegi panjang, garis koaksial, dan garis strip (mikrostrip) termasuk pandu gelombang co-planar [4]. Dalam semua kasus, kondisi propagasi mode tunggal dicoba. Sirkulator versi tiga port, yang disebut sirkulator persimpangan-Y dan isolator yang didasarkan padanya, adalah yang paling banyak digunakan dan dapat dibuat dalam bentuk pandu gelombang atau garis garis. Yang pertama biasanya versi H-plane meskipun versi E-plane juga bisa dibuat. Berbagai macam aplikasi disediakan oleh sirkulator 4-port dalam bentuk mikrostrip [10].

Sirkulator terbagi dalam dua kategori utama, yaitu sirkulator pandu gelombang 4-port dan sirkulator " pintu putar " 3-port atau " persimpangan-Y ". Sirkulator pandu gelombang 4-

port didasarkan pada rotasi Faraday dari gelombang rambat dalam bahan bermagnet. Dasar untuk sirkulator 3-port adalah pada pembatalan gelombang yang merambat melalui dua jalur berbeda di dekat material bermagnet. Seperti disinggung di atas, sirkulator tiga port adalah jenis sirkulator yang paling sering digunakan. Sirkulator yang memanfaatkan rotasi Faraday secara skematis ditunjukkan pada Gambar. 8. Seperti yang terlihat pada gambar, sirkulator adalah sambungan planar dengan tiga pandu gelombang yang ditempatkan pada interval sudut 120° . Pos ferit yang terletak di tengah, properti dan dimensinya diatur sedemikian rupa sehingga setiap lengan sangat cocok pada frekuensi tertentu, adalah kunci pengoperasian sirkulator. Seperti yang ditunjukkan oleh simetri geometris jika semua daya ke salah satu port dibuat untuk keluar dari port yang berdekatan, maka ini akan berlaku untuk ketiga port, dan perangkat akan berfungsi sebagai sirkulator [10,14-16].



Gambar 5.8. Diagram skematis (a) dan foto (b) sirkulator ferit fabrikasi. (Atas kebaikan J. Young dan Y.-K. Hong), (Ü. Özgür., Dkk [4]).

Pada perangkat yang ditunjukkan pada Gambar. 5.8, gelombang EM yang dimasukkan ke port 1 keluar melalui port pemandu gelombang 2, yang ke port 2 keluar dari 3, dan yang ke 3 keluar dari 1. Hal ini dimungkinkan jika pergeseran fasa antara Port adalah 60° dalam satu arah, tetapi 120° dalam arah yang berlawanan. Simetri perangkat membagi masukan di setiap port menjadi dua jalur [4]. Menggabungkan kembali di masing-masing dari dua port, dua bagian sinyal adalah 180° keluar dari fase pada satu (penolakan), tetapi tepat dalam fase pada yang lain (transmisi).

Sirkulator mikrostrip memerlukan toleransi yang ketat dari cakram ferit yang dipasang ke dalam lubang yang dibor di substrat dielektrik. Karena itu, biaya pembuatannya tinggi. Salah satu pendekatan di masa lalu adalah menggunakan sirkulator tipe " drop-in " pada frekuensi yang lebih tinggi di mana toleransikecil [17]. Sebuah sirkulator mikrostrip drop-in secara skematis ditunjukkan pada Gambar. 5.8b.

Ada kebutuhan untuk sirkulator tipe drop-in yang disederhanakan yang dapat dengan mudah digabungkan dalam geometri planar.

5.4.1. CIRCULATOR PITA LEBAR

Sirkulator jalur pita lebar biasanya terdiri dari sambungan tiga arah simetris dari konduktor strip yang terhubung ke cakram logam pusat dan diapit di antara substrat yang terdiri setidaknya sebagian dari ferit, yang dimagnetisasi ortogonal ke bidang substrat. Volume di bawah dan di atas cakram logam pusat umumnya ditempati oleh ferit, tetapi ferit dapat memanjang lebih jauh dari pusat persimpangan [18].

Matriks hamburan dari sirkulator kemudian dapat dihitung, dengan menggunakan asumsi bahwa komponen lingkaran medan magnet adalah nol di sepanjang pinggiran piringan, kecuali jika ia terhubung ke konduktor strip [2]. Di daerah terakhir,

medan magnet RF ditentukan oleh gelombang elektromagnetik yang masuk dan keluar.

Kinerja pita lebar yang dicapai dengan cara ini, dinyatakan sebagai rasio frekuensi yang menandai tepi pita kinerja, adalah $\sim 2: 1$. Operasi sirkulator dalam rentang frekuensi di mana μ_e negatif tampaknya dianggap tidak mungkin, karena fungsi Green dan matriks hamburan yang diturunkan darinya tampak menjadi sangat tunggal dalam batas μ_e yang sangat kecil. a Green fungsi $G(r, \theta; R, \theta')$ yang menghubungkan komponen aksial dari medan listrik "eld $e_z(r, \theta)$ dalam piringan ferit dengan komponen melingkar medan magnet (R, θ) di pinggiran (R, θ') dari disk [2]. Fungsi Green ini diturunkan dari persamaan Maxwell untuk wilayah yang ditempati oleh ferit, di mana permeabilitas RF memiliki bentuk yang diberikan dalam Persamaan (5.14) di bawah ini

$$\mathbf{b} = \mu_0 \quad (5.14)$$

Analisis teoritis perangkat gelombang mikro ferit umumnya didasarkan pada persamaan 'konstruktif', yang menyatakan hubungan antara fluks magnet RF \mathbf{b} dan medan magnet RF \mathbf{h} .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pardavi-Horvath M. J. *Magn. Magn. Mater.* **215-216** (2000), 171-83.
- [2] Schloemann Ernst. J. *Magn. Magn. Mater.* **209** (2000), 15-20.
- [3] Schlomann Ernst. J. *Appl. Phys.* **1(41)** (1970), 204-14.
- [4] Ü. Özgür, Y. Alivov, and H. Morkoç. *J. Mater. Sci : Mater. Electron.* **20** (2009), 911-52.
- [5] C.W. Nan, M. I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, and G. Srinivasan, *J. Appl. Phys.* **103**, 031101 (2008). doi:10.1063/1.2836410
- [6] K. Lefki, and G. J. M. Dormans. *J. Appl. Phys.* **76** (1994), 1764. doi:10.1063/1.357693
- [7] G. Srinivasan, and E.T. Rasmussen, B.J. Levin, R. Hayes. *Phys. Rev. B* **65** (2002), 134402. doi:10.1103/ Phys. Rev. B. 65.134402
- [8] B. N. Enander. *Proc. IRE* . **44** (1956), 1421.
- [9] M. E. Hines. *IEEE Trans. MTT.* **19** (1961), 442.
- [10] R. F. Soohoo. *IEEE Trans. Magn.* **4** (118) (1968). doi:10.1109/TMAG.1968.1066207.
- [11] L. R. Adkins, H. I. Glass, R .L. Carter, and C. K. Wai, J. M. Owens. *J. Appl. Phys.* **55** (1984), 2518. doi:10.1063/1.333714.
- [12] Y. K. Fetisov, and G. Srinivasan. *Appl. Phys. Lett.* **87** (2005), 103502. doi:10.1063/1.2037860.
- [13] F. Reggia, and E. G. Spencer. *Proc. IRE.* **45** (1957), 1510.
- [14] P. Shi, H. How, X. Zuo, S. D. Yoon, S. A. Oliver, C. Vittoria. *IEEE Trans. Magn.* **37** (2001), 2389. doi:10.1109/20.951181.

- [15] C. E. Fay, and R. L. Comstock. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **13** (1965), 15. doi:10.1109/TMTT.1965.1125923.
- [16] K. Okubo, and M. Tsutsumi. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. (2006), 548-551. doi:10.1109/MWSYM.2006.249633.
- [17] H. How, T.-M. Fang, and C. Vittoria. IEEE Trans. Magn. **31** (1995), 997. doi:10.1109/20.364774.
- [18] H. Bosma, IEEE Trans. MTT-12 (1964) 61.

TENTANG PENULIS



Kiki Rezki Lestari, S.T.,M.Sc.

Lulus S-1 pada program studi Teknik Fisika Universitas Nasional di tahun 2013.

Melalui pendanaan *National Research Foundation of Korea*

(*NRF*), berhasil mendapatkan beasiswa untuk *Research Assistantship of Basic Science Research Program* untuk menempuh jenjang Magister di Hankuk University of Foreign Studies, Korea Selatan pada program studi Fisika di tahun 2014. Saat ini menjabat sebagai Ketua Program Studi Teknik Fisika, Universitas Nasioanal. Pernah bekerja sebagai *Research Assistant* di *Center of Sustainable Energy and Resources Management* pada tahun 2016.



Kiki Rezki Lestari, S.T.,M.Sc.

Lulus S-1 pada program studi Teknik Fisika Universitas Nasional di tahun 2013. Melalui pendanaan *National Research Foundation of Korea (NRF)*, berhasil mendapatkan beasiswa untuk *Research Assistantship of Basic Science Research Program* untuk menempuh jenjang Magister di Hankuk University of Foreign Studies, Korea Selatan pada program studi Fisika di tahun 2014. Saat ini menjabat sebagai Ketua Program Studi Teknik Fisika, Universitas Nasioanal. Pernah bekerja sebagai *Research Assistant* di *Center of Sustainable Energy and Resources Management* pada tahun 2016.

ISBN 978-623-7376-67-5

