

Verifikasi Magnon Polariton Bahan Logam Antiferromagnet dengan Metode Pemantulan Total Teredam

Vincensius Gunawan S.K.

Laboratorium Fisika Zat Padat, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Diponegoro, Semarang

Abstrak

Telah dilakukan penelitian untuk membuktikan keberadaan ragam polariton magnetik yang dibangkitkan dalam bahan logam antiferromagnet dengan geometri semi-taktingga. Polariton magnetic dalam bahan magnet yang bersifat logam dapat dibangkitkan bila efek penyekatan oleh electron bebas dikurangi. Untuk mengurangi efek penyekatan tersebut, bahan logam antiferromagnet dibuat berlapis-lapis dengan bahan isolator nonmagnet sementara komponen medan E yang digunakan diarahkan tegak lurus terhadap antarmuka lapisan. Metode yang digunakan adalah pemantulan total teredam (*attenuated total reflection, ATR*). Keberadaan ragam polariton ditunjukkan dengan pengurangan nilai reflektivitas spektroskopi ATR. Keberadaan polariton bulk ditunjukkan dengan penurunan reflektivitas yang landai, sementara keberadaan polariton permukaan ditunjukkan dengan penurunan reflektivitas yang tajam. Hasil yang diperoleh menunjukkan kesesuaian dengan bentuk relasi dispersinya. Spektroskopi ATR ini juga menunjukkan sifat tak berbalik (*reciprocal*) ragam polariton permukaan bila medan magnet luar diterapkan pada sistem.

Pendahuluan

Magnon polariton didefinisikan sebagai keadaan kopling yang tersusun oleh gelombang elektromagnet dengan magnon (eksitasi gelombang spin terkuantisasi). Analisis terhadap ragam polariton magnetik menghasilkan suatu bentuk relasi dispersi yang mengkaitkan antara frekuensi dengan vektor gelombang polariton magnetik. Relasi dispersi tersebut bila diselesaikan menggunakan metoda numerik akan menghasilkan suatu grafik fungsi frekuensi terhadap vektor gelombang yang menunjukkan pengaruh parameter sifat magnet bahan terhadap perambatan gelombang elektromagnetik dalam bahan. Pada bahan antiferromagnet, frekuensi perambatan gelombang berorde THz yang berada dalam daerah infra merah. Karena frekuensi yang relatif tinggi, menyebabkan polariton dalam bahan antiferromagnet menarik untuk dikaji.

Kajian terhadap ragam polariton magnetic dalam bahan logam antiferromagnet telah dilakukan [1].

Pada bahan antiferromagnet jenis ini, diperlukan suatu perekayasa secara makroskopik agar polariton magnet dapat dibangkitkan [2]. Hal ini disebabkan sifat elektron bebas bahan logam yang akan menyekat gelombang elektromagnet, sehingga bagian interior bahan tidak dapat berinteraksi. Bahan logam antiferromagnet dibuat secara berlapis-lapis (*layered structure*) dengan bahan isolator nonmagnet serta komponen medan E yang digunakan berarah tegak lurus terhadap antarmuka lapisan, sehingga efek penyekatan dapat dikurangi dan polariton magnetik dapat dengan mudah dibangkitkan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sifat tak berbalik (*nonreciprocal*) pada magnon polariton permukaan akan muncul bila suatu medan magnet luar diterapkan ke dalam bahan. Sifat tak berbalik ini menunjukkan perubahan nilai frekuensi bila arah vektor gelombang dibalik, $\omega(k_x) \neq \omega(-k_x)$. Sementara untuk polariton *bulk*, diperoleh hasil bahwa perambatan gelombang bersifat berbalik

(reciprocal) dengan $\omega(k_x) = \omega(-k_x)$. Selain itu, konduktivitas yang dimiliki bahan logam antiferromagnet menyebabkan timbulnya redaman dalam polariton permukaan [1]. Hal ini ditunjukkan oleh keberadaan ragam tercampur (*mixture mode*), dengan polariton permukaan yang berada dalam daerah polariton *bulk*.

Untuk melengkapi kajian yang telah dilakukan, selanjutnya perlu dilakukan suatu analisis untuk membuktikan keberadaan ragam-ragam polariton magnetik tersebut. Suatu metode yang dapat digunakan untuk memverifikasi polariton adalah metode pemantulan total teredam (*Attenuated Total Reflection; ATR*) [3,4]. Konsep dasar metode ini adalah pemanfaatan efek pemantulan total pada bahan. Suatu gelombang datang diarahkan pada bahan dengan sudut datang melampaui sudut kritis sehingga terjadi pemantulan total. Tanpa keberadaan polariton magnet, reflektivitas akan bernilai satu, $R=1$. Namun, bila terjadi sambatan sehingga muncul ragam polariton, akan terjadi pengurangan reflektivitas sehingga $R < 1$. Keberadaan ragam polariton *bulk* ditunjukkan dengan penurunan reflektivitas yang bersifat landai, sementara keberadaan ragam polariton permukaan ditunjukkan dengan penurunan secara tajam reflektivitas dalam spektroskopi ATR.

Makalah ini bertujuan untuk membuktikan keberadaan polariton magnet dalam bahan berlapis yang tersusun dari bahan logam antiferromagnet dengan bahan isolator nonmagnet. Sampel bahan logam antiferromagnetik berupa chromium (Cr). Kajian dilakukan secara numerik terhadap reflektivitas ATR. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat melengkapi informasi yang telah diperoleh dalam penelitian sebelumnya, sehingga secara lengkap informasi-informasi tersebut dapat berguna sebagai penuntun (*guide*)

bagi pelaksanaan kajian secara eksperimen.

Teori

Spektroskopi ATR merupakan suatu piranti yang handal untuk mendeteksi keberadaan ragam polariton suatu bahan. Ditinjau suatu radiasi dalam daerah infra merah yang masuk ke dalam prisma dan mengalami pemantulan di dasar prisma tersebut (lihat Gb.1). Suatu pemantulan total internal terjadi bila sudut datang radiasi tersebut melebihi sudut kritis prisma yang dirumuskan dalam bentuk

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_p}{n_g} \right), \quad (1)$$

dengan θ_c menyatakan sudut kritis, n_p dan n_g masing-masing menyatakan indeks bias prisma dan indeks bias medium celah (gap).

Pemantulan total internal ini akan menciptakan suatu gelombang fana (*evanescent wave*) yang merambat sampai ke sampel. Melalui gelombang fana inilah polariton permukaan dapat terbangkitkan dengan nilai vektor gelombang yang sama dengan nilai komponen vektor gelombang datang yang sejajar permukaan sampel dalam bentuk [3,4]

$$k_x = n_p \frac{\omega}{c} \sin \theta. \quad (2)$$

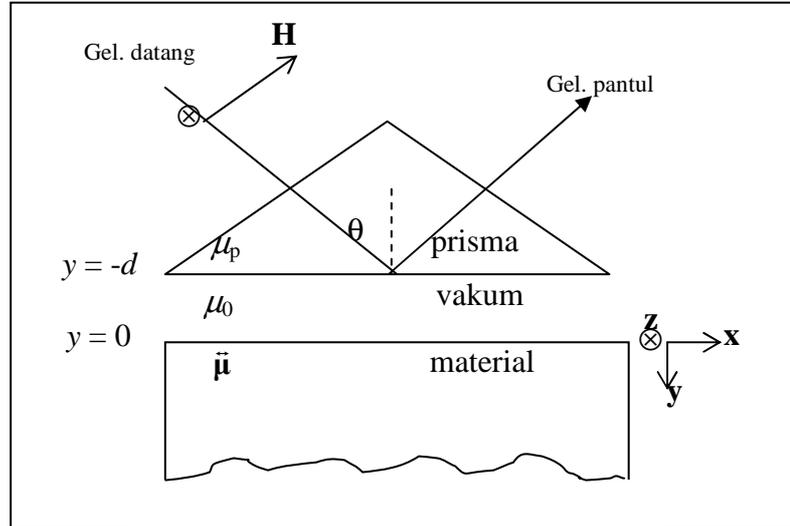
Nilai vektor gelombang pada pers.(2) di atas memiliki selang nilai antara

$$k_x = \frac{\omega}{c} \epsilon_i^{1/2} \quad (3)$$

yang menyatakan garis cahaya (*light line*) spektroskopi ATR, sampai dengan

$$k_x = \frac{\omega}{c} n_p \quad (4)$$

yang merupakan nilai maksimum menyatakan permitivitas celah.
 pers.(2). Pada pers.(3) di atas, ϵ_i



Gambar 1. Skema ATR dalam medium beralur dengan konfigurasi Voigt. Gelombang elektromagnetik yang digunakan terpolarisasi S Dengan medan \mathbf{E} berarah tegak lurus terhadap bidang datang gelombang

Pada selang nilai tersebut, gelombang fana dapat terkopling dengan polariton bahan bila nilai ω dan k_x gelombang datang yang dinyatakan pada pers.(2) memiliki nilai yang sama dengan ω dan k_x polariton bahan. Karena tenaga gelombang terdisipasi oleh polariton bahan, pemantulan total akan mengalami atenuasi ketika kopling terjadi.

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini berupa bahan berlapis (*layered structure*) yang tersusun dari bahan logam antiferromagnet dan bahan isolator nonmagnet dengan gelombang elektromagnetik yang digunakan memiliki komponen medan \mathbf{E} yang berarah tegak lurus terhadap antarmuka lapisan. Selanjutnya analisis dilakukan dengan menggunakan pendekatan teori medium efektif (*effective medium theory*). Dengan pendekatan tersebut, bahan berlapis dapat digantikan oleh suatu medium efektif dengan tensor dielektrik dan tensor permeabilitas yang tergantung oleh fraksi volume bahan logam antiferromagnet. [5].

Menggunakan sifat kontinuitas medan gelombang elektromagnetik pada antarmuka lapisan, dapat diperoleh tensor dielektrik (permitivitas) untuk medium efektif suatu struktur berlapis yang tersusun dari bahan logam antiferromagnet dan bahan isolator nonmagnet dalam bentuk [2,5]

$$\epsilon_{eff} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \epsilon_1 f_1 + \epsilon_2 f_2 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_1 f_1 + \epsilon_2 f_2 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{f_1}{\epsilon_1} + \frac{f_2}{\epsilon_2} \right)^{-1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

dengan $\epsilon_1 = \epsilon_0 + i \frac{\sigma}{\omega}$ menyatakan permitivitas bahan logam antiferromagnet dengan parameter ω

menyatakan frekuensi gelombang elektromagnetik dan σ menyatakan konduktivitas bahan logam antiferromagnet, sementara ϵ_2 menyatakan permitivitas bahan isolator nonmagnet.

$$\text{Fraksi bahan, } f_1 = \frac{d_1}{d_1 + d_2}$$

menyatakan fraksi volume logam antiferromagnet, sementara

$$f_2 = \frac{d_2}{d_1 + d_2} \text{ menyatakan fraksi}$$

volume bahan nonmagnet dengan d_1 menyatakan tebal lapisan-lapisan bahan logam antiferromagnet dan d_2 menyatakan tebal lapisan-lapisan bahan isolator nonmagnet.

Tensor permeabilitas untuk medium efektif dapat diturunkan dengan cara yang sama seperti dalam penurunan tensor dielektrik medium efektif, diperoleh [2,5]

$$\mu_{eff} = \begin{pmatrix} \mu_1 & i\mu_2 & 0 \\ -i\mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \mu_1^{xx} f_1 + \mu_2^{xx} f_2 & \mu_1^{xy} f_1 & 0 \\ \mu_1^{yx} f_1 & \mu_1^{yy} f_1 + \mu_2^{yy} f_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

dengan

$$\mu_1^{xx} = \mu_1^{yy} = \mu_0 [1 + \mu_0^2 \gamma^2 H_A M_s (Y^+ + Y^-)] \quad (7a)$$

$$\mu_1^{xy} = -\mu_1^{yx} = i\mu_0^3 \gamma^2 H_A M_s (Y^+ - Y^-) \quad (7b)$$

menyatakan komponen-komponen permeabilitas bahan logam antiferromagnet dan

$$Y^\pm = [\omega_r^2 - (\omega \pm \mu_0 \mathcal{H}_0)^2]^{-1} \quad (8)$$

H_A menyatakan medan anisotrop, M_s menyatakan magnetisasi subkisi dan γ menyatakan rasio gyromagnet.

Parameter $\omega_r = \gamma(2H_A H_E + H_A^2)^{1/2}$ menyatakan frekuensi resonansi dengan medan tukar H_E . Tensor permeabilitas bahan nonmagnet bernilai μ_0 yang merupakan permeabilitas untuk ruang vakum.

Metode Penelitian

Konfigurasi piranti ATR tersaji pada Gambar (1). Prisma yang digunakan berupa prisma silicon (Si) dengan permitivitas $\epsilon_p = 11,56$, indeks bias $n_p = 3,4$ serta sudut kritis $\theta_c = 17,1^\circ$. Prisma tersebut diletakkan sejarak $d = 16,5 \mu\text{m}$ diatas sampel. Celah yang memisahkan prisma dengan sampel berupa vakum. Bahan logam antiferromagnet yang menyusun system medium berlapis berupa chromium (Cr) yang memiliki medan tukar $H_E = 43,4 \text{ T}$, medan anisotrop $H_A = 14,9 \text{ T}$, magnetisasi subkisi $M_s = 0,06 \text{ T}$ dan konduktivitas sebesar $\sigma = 0,78 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ dengan fraks volume dipilih sebesar 0,8. Untuk bahan isolator nonmagnet dipilih nilai dielektriknya sebesar $\epsilon_2 = \epsilon_0$, dengan ϵ_0 menyatakan tetapan dielektrik medium vakum.

Penelitian ini terdiri dari dua prosedur pokok, yang pertama adalah penurunan perumusan reflektansi secara analitik, sementara yang kedua berupa penyelesaian perumusan reflektansi tersebut secara numerik. Penurunan perumusan reflektansi ATR secara analitik dilakukan dengan terlebih dulu menentukan bentuk gelombang medan \mathbf{E} di tiap-tiap daerah yang terlibat, yaitu di dalam sampel, vakum dan prisma (lihat Gb.1). Selanjutnya bentuk medan \mathbf{B} dan medan \mathbf{H} diturunkan dengan menggunakan perumusan rotasi medan \mathbf{E} pada persamaan Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (9)$$

serta bentuk perumusan

$$\mathbf{B} = \bar{\mu} \mathbf{H} \quad (10)$$

untuk menurunkan bentuk medan **H** dan **B** di tiap-tiap daerah tersebut.

Kontinuitas komponen normal medan **B** serta kontinuitas tangensial medan **H** yang diterapkan pada bidang batas medium-vakum akan menghasilkan nisbah gelombang pantul terhadap gelombang datang pada bidang tersebut. Penerapan syarat batas yang sama pada bidang batas prisma-vakum serta digunakan hasil yang diperoleh pada proses sebelumnya, dihasilkan nisbah gelombang pantul terhadap gelombang datang sistem secara keseluruhan. Hasil yang diperoleh pada proses terakhir inilah yang disebut dengan reflektansi sistem ATR.

Selanjutnya pada proses yang kedua, perhitungan dilakukan secara numerik untuk memperoleh grafik reflektansi spektroskopi ATR menggunakan perumusan reflektansi yang diperoleh pada proses perhitungan secara analitik. Pada perhitungan numerik ini digunakan pemrograman MATLAB[®] versi 5.3.

Hasil dan Pembahasan

Untuk menurunkan perumusan reflektivitas dalam sistem ATR, ditinjau terlebih dahulu pemantulan yang terjadi di permukaan bahan antiferromagnet yang terletak di $y = 0$. Dalam daerah di sekitar bidang tersebut komponen medan **E** gelombang elektromagnet berarah tegak lurus terhadap antarmuka lapisan-lapisan penyusun sampel, berbentuk

$$\mathbf{E}_0 = \hat{\mathbf{k}}(E_{oi}e^{-\alpha_0 y} + E_{or}e^{\alpha_0 y}) \times \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad \text{untuk } y < 0 \quad (11a)$$

dan

$$\mathbf{E} = \hat{\mathbf{k}}E_m e^{-\alpha y} \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad \text{untuk } y > 0 \quad (11b)$$

dengan E_{oi} , E_{or} dan E_m berturut-turut menyatakan amplitudo gelombang

datang, amplitudo gelombang pantul dan amplitudo gelombang yang diteruskan ke dalam medium. Parameter α_0 dan α masing-masing menyatakan tetapan atenuasi gelombang dalam ruang vakum dan tetapan atenuasi gelombang dalam medium efektif yang dinyatakan dalam persamaan-persamaan

$$\alpha_o^2 = k_x^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \quad (12a)$$

dan

$$\alpha^2 = k_x^2 - \epsilon_2 \mu_v \omega^2, \quad (12b)$$

dengan $\mu_v = \frac{\mu_1^2 - \mu_2^2}{\mu_1}$ dinamakan permeabilitas Voigt.

Penurunan komponen-komponen medan **B** dan **H** medan dari komponen medan listrik **E** dilakukan menggunakan persamaan rotasi medan **E** pers.(9) serta persamaan yang mengkaitkan medan **B** dan medan **H** pada pers.(10). Komponen normal medan **B** diperoleh dalam bentuk

$$B_{oy} = \frac{-k}{\omega} (E_{oi}e^{-\alpha_0 y} + E_{or}e^{\alpha_0 y}) \times \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad \text{untuk } y < 0 \quad (13a)$$

di ruang vakum, dan

$$B_{my} = \frac{-k}{\omega} E_m e^{-\alpha y} \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad \text{untuk } y > 0 \quad (13b)$$

di dalam medium. Komponen tangensial medan **H** gelombang elektromagnet diperoleh dalam bentuk

$$H_{ox} = \frac{\alpha_o}{i\mu_o \omega} (-E_{oi}e^{-\alpha_0 y} + E_{or}e^{\alpha_0 y}) \times \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad (14a)$$

ruang vakum, sementara komponen tangensial medan \mathbf{H} di dalam medium berbentuk

$$H_{mx} = \frac{-1}{i\omega(\mu_1^2 - \mu_2^2)} (\mu_1\alpha + \mu_2 k_x) E_m e^{-\alpha y} \times \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad (14b)$$

Syarat kontinuitas yang berlaku terhadap komponen normal medan \mathbf{B} di permukaan bahan ($y = 0$) bila diterapkan ke dalam pers.(13a) dan pers.(13b) menghasilkan kaitan yang berbentuk

$$E_m = E_{oi} + E_{or}, \quad (15)$$

sementara kontinuitas komponen tangensial medan \mathbf{H} yang diterapkan di permukaan bahan terhadap pers.(14a) dan pers.(14b) menghasilkan bentuk persamaan

$$\alpha_o (E_{oi} - E_{or}) = \beta E_m. \quad (16)$$

Selanjutnya dari pers.(15) dan pers.(16) di atas, diperoleh nisbah gelombang pantul terhadap gelombang datang di permukaan medium dalam bentuk

$$r = \frac{E_{or}}{E_{oi}} = \frac{\alpha_o - \beta}{\alpha_o + \beta}. \quad (17)$$

Langkah berikutnya dilakukan dengan meninjau bidang batas prisma dan ruang vakum di $y = -d$. Bentuk gelombang medan \mathbf{E} yang berlaku dalam prisma dinyatakan dalam bentuk

$$\mathbf{E}_p = \hat{\mathbf{k}} (E_{pi} e^{ik_y y} + E_{pr} e^{-ik_y y}) \times \exp[i(k_x x - \omega t)], \quad (18)$$

dengan

$$k_y = n_p \frac{\omega}{c} \cos \theta \quad (19)$$

menyatakan komponen gelombang datang yang berarah tegak lurus

terhadap permukaan sampel bahan berlapis, sementara bentuk gelombang medan \mathbf{E} pada ruang vakum dinyatakan pada pers.(11a). Komponen normal medan \mathbf{B} dan tangensial medan \mathbf{H} dapat diperoleh dalam bentuk

$$B_{py} = \frac{-k_x}{\omega} (E_{pi} e^{ik_y y} + E_{pr} e^{-ik_y y}) \times \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad (20)$$

dan

$$H_{px} = \frac{k_y}{\omega \mu_p} (E_{pi} e^{ik_y y} - E_{pr} e^{-ik_y y}) \times \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad (21)$$

dengan μ_p berupa permeabilitas prisma.

Kontinuitas komponen normal medan \mathbf{B} di $y = -d$ yang diterapkan pada B_{py} dalam pers.(20) dan B_{oy} dalam pers.(13a) menghasilkan kaitan berbentuk

$$E_{pi} e^{-ik_y d} + E_{pr} e^{ik_y d} = E_{oi} (e^{\alpha_o d} + r e^{-\alpha_o d}) \quad (22)$$

dengan r dinyatakan dalam pers.(17). Kontinuitas komponen tangensial medan \mathbf{H} diterapkan di $y = -d$ terhadap H_{px} dalam pers.(21) dan H_{ox} dalam pers.(14a) menghasilkan persamaan berbentuk

$$i\alpha_o E_{oi} (e^{\alpha_o d} - r e^{-\alpha_o d}) = k_y \frac{\mu_p}{\mu_o} (E_{pi} e^{-ik_y d} - E_{pr} e^{ik_y d}). \quad (23)$$

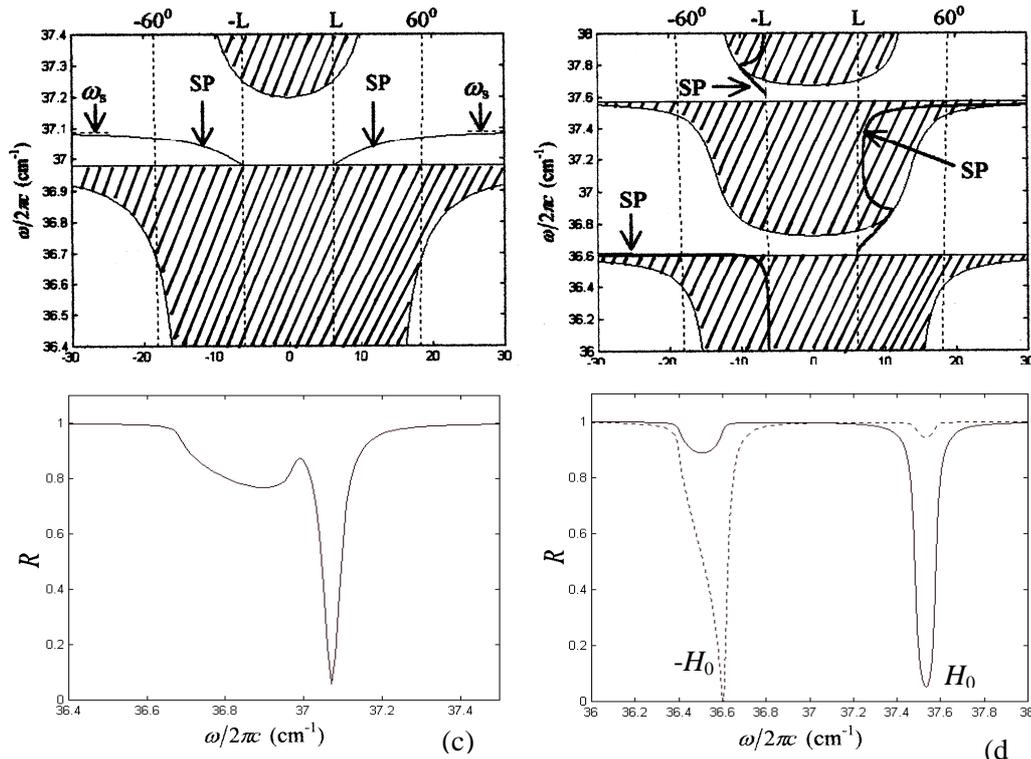
Selanjutnya, dari pers.(22) dan pers.(23) dapat diperoleh bentuk nisbah gelombang datang terhadap gelombang pantul sistem ATR secara keseluruhan yang berbentuk

$$r' = \frac{E_{pi}}{E_{pr}}$$

$$= \frac{[k_y(1+re^{-2\alpha_0 d}) - i\alpha_o(1-re^{-2\alpha_0 d})]}{[k_y(1+re^{-2\alpha_0 d}) + i\alpha_o(1-re^{-2\alpha_0 d})]} e^{-2ik_y d} \quad (24)$$

sehingga daya pantul (reflektivitas) sistem ATR yang terukur dapat dinyatakan dalam bentuk $R = r'(r')^*$

$$= \left| \frac{[k_y(1+re^{-2\alpha_0 d}) - i\alpha_o(1-re^{-2\alpha_0 d})]}{[k_y(1+re^{-2\alpha_0 d}) + i\alpha_o(1-re^{-2\alpha_0 d})]} \right|^2 \quad (25)$$



Gambar 2. (a) &(b) menyatakan relasi dispersi dalam kondisi tanpa medan magnet luar dan dengan medan sebesar $H_0=0,5$ T. dari ref.[1]. Daerah yang diarsir menyatakan daerah polariton *bulk*, sementara 'SP' menyatakan polariton permukaan. Pada relasi dispersi tersebut juga digambarkan garis cahaya (L) serta garis ATR pada sudut $\pm 60^\circ$. Gambar (c) & (d) menyatakan spektroskopi ATR yang diperoleh dalam penelitian ini, untuk keadaan tanpa medan luar (c) dan dengan medan sebesar $H_0=0,5$ T (d).

Hasil perhitungan secara numerik ditampilkan pada Gb.(2c&d). Pada Gb.(2a&b) ditampilkan pula bentuk relasi dispersi struktur berlapis dari ref.[1]. Ditinjau keadaan medium tanpa keberadaan medan luar yang bentuk relasi dispersinya dinyatakan dalam Gb.(2a). Bentuk spektroskopi ATR dengan sudut datang 60° tersaji dalam Gb.(2c). Bila dirunut garis ATR dalam relasi dispersi Gb.(2a), tampak adanya kesesuaian dengan spektrum ATR yang tersaji dalam Gb.(2c). Garis

ATR melewati pita ragam bulk di sekitar frekuensi $36,7$ cm^{-1} sampai frekuensi $36,98$ cm^{-1} , dalam spektrum ATR hal ini menyebabkan suatu penurunan yang bersifat landai terhadap nilai reflektivitas. Interaksi antara gelombang elektromagnet dengan ragam bulk bersifat lemah sehingga pengurangan nilai reflektivitas tidak tajam. Dalam daerah frekuensi antara $36,98$ cm^{-1} hingga sekitar $37,06$ cm^{-1} tidak terdapat ragam apapun sehingga nilai reflektivitas cenderung untuk

mendekati nilai satu. Dalam spektrum ATR, daerah celah ini ditandai dengan kenaikan nilai reflektivitas mendekati satu. Interaksi antara gelombang elektromagnet dengan ragam permukaan di sekitar frekuensi $37,07 \text{ cm}^{-1}$ ditandai dengan penurunan tajam garis spektrum ATR. Penurunan tajam inilah yang menunjukkan keberadaan polariton permukaan.

Untuk keadaan dengan medan magnet luar yang diterapkan sebesar $H_o = 0,5 \text{ T}$ yang tersaji dalam Gb.(2d) di atas menunjukkan bahwa polariton permukaan bersifat *nonreciprocal* yang ditandai penurunan tajam disekitar $\omega = 37,51 \text{ cm}^{-1}$ untuk $+H_o$, sementara untuk $-H_o$ penurunan tajam nilai reflektansi terjadi di sekitar $\omega = 36,60 \text{ cm}^{-1}$. Hasil tersebut bersesuaian dengan nilai frekuensi di tempat perpotongan garis ATR $\pm 60^\circ$ dengan garis polariton permukaan yang merambat ke arah $\pm k_x$ dalam relasi dispersi Gb.(2b). Mengacu dari bentuk relasi dispersi yang tersaji dalam gambar (2b) yang menunjukkan bahwa mode permukaan dengan arah rambat $+k_x$ merupakan mode bocor (*leaky mode*), maka hasil spektrum ATR dalam Gb.(2d) tersebut menunjukkan kemampuan ATR untuk mendeteksi keberadaan mode tersebut.

Bila analisis reflektansi dilakukan dengan $\theta = -60^\circ$ dalam medan magnet luar $H_o = 0,5 \text{ T}$, ternyata spektrum ATR yang diperoleh sama persis dengan spektrum yang dihasilkan dalam analisis reflektansi menggunakan $\theta = 60^\circ$ dalam medan magnet luar $H_o = -0,5 \text{ T}$. Hal ini menyatakan bahwa pembalikan arah medan magnet luar setara dengan pembalikan sudut datang. Karena jelas bahwa pembalikan sudut datang berarti juga pembalikan arah vektor gelombang, maka dapat

disimpulkan juga bahwa pembalikan arah medan magnet luar setara dengan pembalikan arah vektor gelombang.

Kesimpulan

Merujuk pada penelitian yang dilakukan, tampak bahwa keberadaan ragam polariton magnetik dalam bahan logam antiferromagnet dapat dibuktikan menggunakan metode pemantulan total teredam. Hasil spektroskopi ATR yang diperoleh menunjukkan kesesuaian dengan relasi dispersinya. Terbukti pula bahwa pembalikan arah gelombang datang setara dengan pembalikan arah medan magnet luar, sehingga dalam spektroskopi ATR bentuk nonreciprocal dinyatakan sebagai $R(\theta) \neq R(-\theta)$.

Daftar Pustaka

- [1]. Gunawan, V., 2003, *Kajian Teoretis Polariton Magnetik dalam Bahan Logam Antiferromagnet*, Thesis Univ. Gadjah Mada, Yogyakarta
- [2]. Camley, R.E., Parker, T.J. and Smith, S.R.P., 1996. *Reflection of electromagnetic radiation from structured metallic magnets*. Phys. Rev. B 53, 9, 5481-5487.
- [3]. Otto, A., 1976. *Spectroscopy of Surface Polaritons by Attenuated Total Reflection*. Optical Properties of Solids: New Development, edited: Seraphin, B.O., North Holland Co. Ltd, Oxford, 679-729.
- [4]. Abraha, K. and Tilley, D.R., 1996. *Theory of far infrared properties of magnetic surfaces, films and superlattices*. Surf. Sci. Rep. 24, 5/6.
- [5]. Raj, N. and Tilley, D.R., 1989. *The Electrodynamics of Superlattices. The Dielectric Function of Condensed Systems.*, edited by Keldish, L.V., Kirzhnitz, D.A. and Maradudin, A.A., Elsevier Science Publisher B.V., 459-507.