



پاشندگی غیرخطی سالیتون‌ها در فیلم‌های مگنتوآپتیکی

سپیده اسکندری^۱، نرگس انصاری^۱ و محمد مهدی طهرانچی^۲

^۱دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، آزمایشگاه مگنتوآپتیک

^۲دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده - اثرات غیرخطی انتشار امواج مگنتوآپتیک با اعمال توان بالا در فیلم مگنتوآپتیکی به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله تبدیل امواج اسپینی خطی به امواج سالیتونی و ثابت ماندن شکل این امواج در حین انتشار و کاهش تاخیر در رسیدن اطلاعات به مقصد مورد توجه قرار گرفت. با در نظر گرفتن شرایط مرزی، معادله پاشندگی غیرخطی محاسبه شده و پاسخ پاشندگی غیرخطی، سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه نسبت به تغییر توان ورودی و پارامترهای وابسته بدست آمده است.

کلیدواژه - امواج مگنتوآپتیک غیرخطی، رابطه پاشندگی غیرخطی، سالیتون، سرعت گروه

کد PACS: ۳۵۰،۴۰۱۰، ۲۳۰،۴۱۱۰، ۲۳۰،۳۸۱۰

۱- مقدمه

در برانگیختگی امواج اسپینی، با افزایش توان ورودی فیلم‌های مگنتوآپتیکی، پاسخ سیستم از حالت خطی به غیرخطی می‌رود و در این حالت امواج اسپینی غیرخطی در فرکانس مایکروویو در فیلم تحریک می‌شوند [۶]. امواج اسپینی غیرخطی دارای پایداری غیر خطی را سالیتون‌های مغناطیسی می‌نامند. سالیتون‌ها در نتیجه توازن بین دو پدیده پاشندگی و اثر غیرخطی بوجود می‌آیند که هر دوی این پدیده‌ها به توان موج ورودی اعمال شده وابسته می‌باشند. سالیتون‌ها در حین انتشار، شکل و سرعت‌شان محفوظ می‌ماند و معمولاً فقط دچار تغییر فاز می‌شوند در نتیجه استفاده از سالیتون‌ها برای کاهش اثر پاشندگی و حفظ شکل و سرعت موج در محیط‌های پاشنده مناسب است [۷-۸].

در بررسی محیط‌هایی با نظم مغناطیسی در طول موج‌های بلند و در حضور شرایط مرزی امواج مگنتوآپتیک جایگزین امواج اسپینی می‌شوند. طبیعت پاشنده امواج مگنتوآپتیک، یک پتانسیل برای پردازش سیگنال به

اخیرا استفاده از فیلم‌های مگنتوآپتیکی در تکنولوژی انتقال اطلاعات بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱] فیلم‌های مگنتوآپتیکی برای پرتوهای اپتیکی خصوصا در ناحیه ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر شفاف هستند [۲] و امواج در حین انتشار در داخل فیلم پاشیده می‌شوند. خصوصیت پاشندگی این فیلم‌ها باعث می‌شود اطلاعات با مولفه‌های متفاوتی از دامنه موج ورودی و در نتیجه با سرعت‌های متفاوتی منتقل شوند، بنابراین در زمانهای مختلف، اطلاعات نامنظم به مقصد می‌رسند [۳].

فیلم‌های مگنتوآپتیکی علاوه بر پاشنده بودن قابلیت انتشار امواج اسپینی در ناحیه ماکروویو را دارا هستند و از فرکانس تشدید در حدود گیگا هرتز برخوردار می‌باشند [۴]، استفاده همزمان از این دو قابلیت می‌تواند خواص جدیدی را در کنترل اثرات پاشندگی این فیلم‌ها و بکارگیری موثر در حوزه مخابرات نوری ارائه نماید [۵].

با اعمال توان ورودی بالا در فرکانس ماکروویو فیلم مگنتواپتیک و مگنتواپتیک و مگنتواپتیک وارد محدوده غیرخطی شده و جملات غیرخطی مغناطیسی با فرکانس‌های مرتبه دوم (2ω و 0) و مرتبه سوم (3ω و ω) و همچنین مراتب بالاتر برای مولفه‌های میدان و مغناطش تولید می‌شود که به صورت زیر می‌توان بیان نمود [۷ و ۱۳]:

$$H(R,t) = H_0 e_z + h^{(1)}(R,t) + h^{(2)}(R,t) + \dots, \quad (1)$$

$$M(R,t) = M_0 e_z + m^{(1)}(R,t) + m^{(2)}(R,t) + \dots \quad (2)$$

H_0, M_0 بخش dc و $h(R,t), m(R,t)$ بخش ac میدان مغناطیسی و مغناطش هستند $R = xe_x + ye_y + ze_z$ است. تبدیل فوریه روابط فوق برای میدان مغناطیسی به صورت زیر است:

$$h^{(1)}(R,t) = h^{(1)}(R,\omega)e^{-i\omega t} + c.c, \quad (3)$$

$$h^{(2)}(R,t) = h^{(2)}(R,0) + h^{(2)}(R,2\omega)e^{-2i\omega t} + c.c,$$

$$h^{(3)}(R,t) = h^{(3)}(R,\omega)e^{-i\omega t} + h^{(3)}(R,3\omega)e^{-3i\omega t} + c.c.$$

بخش $h^{(1)}(R,t)$ بخش خطی و $h^{(2)}(R,t), h^{(3)}(R,t)$ بخش غیر خطی ac میدان هستند. به طور مشابه روابط بالا برای مرتبه‌های مختلف مغناطش می‌توان نوشت:

$$m^{(1)}(R,t) = m^{(1)}(R,\omega)e^{-i\omega t} + c.c, \quad (4)$$

$$m^{(2)}(R,t) = m^{(2)}(R,0) + m^{(2)}(R,2\omega)e^{-2i\omega t} + c.c,$$

$$m^{(3)}(R,t) = m^{(3)}(R,\omega)e^{-i\omega t} + m^{(3)}(R,3\omega)e^{-3i\omega t} + c.c.$$

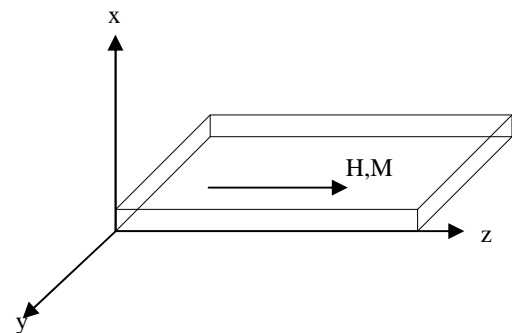
در فرکانس پایه ω ، بردار موج ورودی و $k_{2\omega}$ بردار موج هارمونیک دوم و $k_{3\omega}$ بردار موج هارمونیک سوم تولید شده می‌باشد. در انتقال موثر انرژی در فرکانس ω و فرکانس تولید شده 2ω هر دو شرط پایستگی تکانه و انرژی را باید در نظر گرفت:

$$k_{2\omega} = k_{\omega} + k_{\omega} \quad \text{شرط پایستگی تکانه}$$

$$2\omega = \omega + \omega \quad \text{شرط پایستگی انرژی}$$

صورت یگانه پیش‌بینی می‌کند، بنابراین با استفاده از امواج مگنتواستاتیک می‌توان تنوع فراوانی در کاربردهای پردازش سیگنال RF و مخابرات انتظار داشت. بدلیل خصلت وفق پذیری فرکانس در تکنولوژی امواج مگنتواستاتیک، فرکانس پاسخ می‌تواند به کمک تغییر شدت میدان مغناطیسی تغییر کند، همچنین اتلاف انتشار پایینی که در فرکانس بالا دارند، از مزایای کاربرد فراوان این امواج در مدولاتورها، سوئیچها و غیره می‌باشد [۹]. بررسی رفتار سالیتون‌ها در این فیلمها توسط اسلاوین^۱ و کوشیکف^۲. گزارش شد [۱۰ و ۱۱]. از آنجاییکه وابستگی به توان در برانگیختگی این امواج بسیار مهم می‌باشد، در این مقاله انتشار امواج مگنتواستاتیک و رابطه پاشندگی غیر خطی این امواج محاسبه شده است.

۲- هندسه فیلم مگنتواپتیک



شکل ۱: فیلم مغناطیسی را در صفحه xz نشان میدهد که دارای ضخامت M_0 در امتداد محور z می‌باشد. H_0 و M_0 مغناطش اشباع

برای محاسبه پاشندگی انتشار امواج مگنتواستاتیک سطحی، فیلم فرومغناطیس همگن (YIG-GGG) که دارای مغناطش اشباع M_0 در راستای میدان مغناطیسی استاتیک خارجی H_0 را در ناحیه $0 < x < d$ در نظر می‌گیریم و برای برانگیختگی امواج $MSSW^3$ میدان مغناطیسی را در راستای محور z موازی صفحه فیلم اعمال می‌کنیم که در شکل (۱) هندسه مورد نظر نشان داده شده است.

۳- محاسبات

¹ slavin
² kovshikov
³ Magnetostatic surface waves.



$$L_3 = \frac{(\chi_1 + \chi_2)(\chi_1^2 + \chi_2^2)\alpha^3 k^2 |A|^2}{2\mu_1 M_0^2},$$

$$L_4 = \frac{(\chi_1 - \chi_2)(\chi_1^2 + \chi_2^2) k^2 |A|^2}{2\mu_1 M_0^2}.$$

L_i ها ثابت‌های غیر خطی هستند که متناسب با توان موج مگنتواستاتیکی می‌باشند و در این روابط χ_1 و χ_2 به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\chi_1 = \frac{\omega_H \omega_M}{\omega^2 - \omega_H^2}, \quad \chi_2 = \frac{\omega \omega_M}{\omega^2 - \omega_H^2}. \quad (9)$$

$$\mu_1 = 1 + \chi_1, \quad \mu_2 = \chi_2. \quad (10)$$

برای بدست آوردن معادله پاشندگی لازم است که شرایط مرزی پیوستگی مولفه مماسی H و مولفه عمودی B، در سطوح $x = 0$ و $x = d$ اعمال شود که این شرایط عبارتند از:

$$\mu_1 \frac{\partial \psi^{in}}{\partial x} + i\mu_2 \frac{\partial \psi^{in}}{\partial y} = \frac{\partial \psi^{out}}{\partial x}, \quad (11)$$

$$\psi^{in} = \psi^{out}. \quad (12)$$

با جایگذاری ψ^{NL} به جای ψ^{in} ، داخل فیلم، و ψ_1 و ψ_3 به جای ψ^{out} ، خارج فیلم، به ترتیب برای $x = 0$ و $x = d$ رابطه پاشندگی غیرخطی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\omega^2 - [\omega_H^2 + \omega_H \omega_M + \frac{\omega_M^2}{4}(1 - e^{-2kd})] = G \quad (13)$$

$$G = \frac{\omega_H - \omega}{4} e^{-kd} F, \quad (14)$$

بطوریکه:

$$F = F_1 e^{-kd} + F_2 e^{kd} + F_3 e^{3kd} + F_4 e^{-3kd}, \quad (15)$$

$$F_1 = -(\mu_1 + \mu_2 - 1)(\mu_1 + \mu_2 + 1) \frac{L_2}{2}$$

$$+ (\mu_1 + \mu_2 - 1)(3\mu_1 + \mu_2 + 1)L_3$$

$$- (\mu_1 + \mu_2 - 1)(3\mu_1 - \mu_2 - 1)L_4$$

$$- (\mu_1 + \mu_2 - 1)(\mu_1 - \mu_2 - 1)L_2 kd$$

$$+ (\mu_1 - \mu_2 + 1)(\mu_1 - \mu_2 - 1) \frac{L_2}{2},$$

$\Delta k = k_\omega + k_\omega - k_{2\omega}$ ضریب تطابق فازی می‌باشد، که به ازای $\Delta k = 0$ شرط تطابق فازی برقرار است. این شرط در تمام روابط محاسبه شده که دارای ضریب $e^{\pm(2k_\omega - k_{2\omega}) \cdot r}$ می‌باشد در نظر گرفته شده و جمله‌هایی که این شرط در آنها رعایت نشده، حذف می‌شوند.

برای امواج مگنتواستاتیکی رابطه $h = \nabla \psi$ برقرار است، برای بدست آوردن معادله پاشندگی، با توجه به هندسه مورد نظر سه ناحیه وجود دارد که پتانسیل مربوط به هر ناحیه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\psi_1 = C e^{-kx} e^{iky}, \quad x \leq 0 \quad (5)$$

$$\psi_2 = A (e^{kx} + \alpha e^{-kx}) e^{iky}, \quad 0 \leq x \leq d$$

$$\psi_3 = D e^{kx} e^{iky}, \quad x \geq d$$

که ψ_1, ψ_2, ψ_3 پتانسیل‌های خطی هستند. پارامتر α با استفاده از شرایط مرزی در حالت خطی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\alpha = \frac{\mu_1 + \mu_2 - 1}{\mu_1 - \mu_2 + 1}. \quad (6)$$

با اعمال توان ورودی بالا، امواج اسپینی غیرخطی در فیلم منتشر می‌شود بنابراین بجای ψ_2 از ψ^{NL} برای توصیف موج در داخل فیلم استفاده می‌شود. با جایگذاری جملات غیرخطی مغناطش در معادله $-\nabla^2 \psi^{NL} = \nabla \cdot m^{NL}$ و با حل معادله دیفرانسیل غیر خطی به صورت زیر بدست می‌آید:

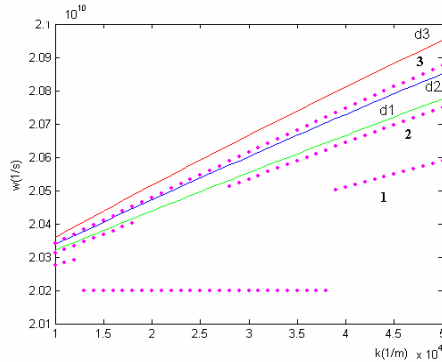
$$\psi^{NL} = A \{ (1 + L_1 kx + L_1 / 2) e^{-kx} + \alpha (1 + L_2 kx + L_2 / 2) e^{kx} + L_3 e^{-3kx} + L_4 e^{3kx} \} e^{iky} + c.c \quad (7)$$

که:

$$L_1 = -\frac{4\chi_1^2 (\chi_1 + \chi_2) \alpha k^2 |A|^2}{\mu_1 M_0^2}, \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{4\chi_1^2 (\chi_1 - \chi_2) \alpha k^2 |A|^2}{\mu_1 M_0^2},$$

پاشندگی با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد، اما این افزایش در توان بالا کندتر از افزایش پاشندگی در توان پایین است. منحنی ۱ نشان می‌دهد که در ضخامت‌های پایین و توان بالا، پاشندگی در بازه مشخصی از بردار موج، پایدار شده و امواج اسپینی غیر خطی به امواج سالیوتونی تبدیل می‌شوند



شکل (۳) تغییرات پاشندگی بر حسب ضخامت‌های $d_3 = 1.4 \mu\text{m}$ ، $d_2 = 1.2 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1 \mu\text{m}$ ، خطها برای توان $a_1 = 5 \text{mW}$ و نقاط برای توان $a_2 = 500 \text{mW}$ است.

شکل (۴) و (۵) کاهش سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه بر حسب فرکانس را با افزایش توان ورودی نشان می‌دهند، منحنی a_3 در شکل (۵) تاثیر موثر کاهش پاشندگی سرعت گروه با افزایش توان به 300mW را بیان می‌کند. علاوه بر نتایج نشان داده شده در نمودارهای بالا و با توجه به معادله (۱۳) پاشندگی، سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه با افزایش ضخامت، مغناطش و میدان مغناطیسی افزایش می‌یابند، ولی در توان‌های بالا این پدیده‌ها قابل کنترل می‌باشند، بنابراین می‌توان با افزایش توان بازدهی استفاده از سیستم‌های مغناطیسی را بالا برد و اختلال در انتقال اطلاعات را کمینه ساخت.

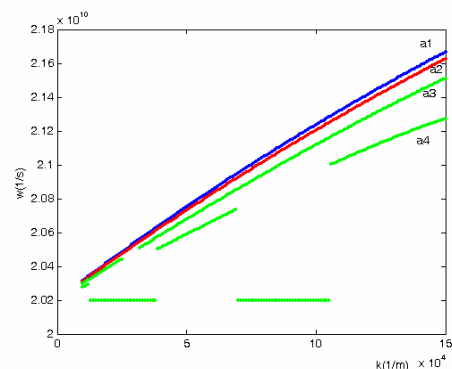
$$F_2 = (\mu_1 + \mu_2 + 1)(\mu_1 - \mu_2 + 1)L_1kd + (\mu_1 + \mu_2 + 1)(\mu_1 + \mu_2 - 1)\frac{L_1}{2} - (\mu_1 - \mu_2 - 1)(\mu_1 - \mu_2 + 1)\frac{L_2}{2},$$

$$F_3 = -(\mu_1 + \mu_2 + 1)(3\mu_1 + \mu_2 - 1)L_3e^{-3kd}$$

$$F_4 = (\mu_1 + \mu_2 + 1)(3\mu_1 - \mu_2 + 1)L_4e^{3kd}$$

رابطه (۱۳) نشان می‌دهد که معادله پاشندگی امواج غیرخطی علاوه بر وابستگی به پارامترهای $4\pi M_0$ ، H_0 و d (ضخامت فیلم) به دامنه موج فرودی، $|A|^2$ ، نیز وابسته می‌باشد که اگر G برابر با صفر قرار داده شود معادله پاشندگی غیر خطی به خطی تبدیل می‌شود. در منحنی‌های زیر وابستگی معادله پاشندگی به پارامترهای بیان شده را نشان خواهیم داد که در محاسبات $H_0 = 5700r$ ، $4\pi M_0 = 1750G$ ، $\omega_H = 1 \times 10^{10} \text{rads}^{-1}$ و ضخامت فیلم $d = 1 \mu\text{m}$ می‌باشد [۱۲ و ۱۳].

شکل (۲) پاشندگی غیر خطی بر حسب بردار موج را برای توان‌های $a_1 = 5 \text{mW}$ ، $a_2 = 100 \text{mW}$ ، $a_3 = 300 \text{mW}$ و $a_4 = 500 \text{mW}$ نشان می‌دهد. پاشندگی در بازه مشخصی از بردار موج در توان‌های $a_3 = 300 \text{mW}$ و $a_4 = 500 \text{mW}$ ثابت باقی می‌ماند. که این نشان دهنده مقابله اثر پاشندگی با اثر غیر خطی و برانگیختگی امواج سالیوتونی می‌باشد.

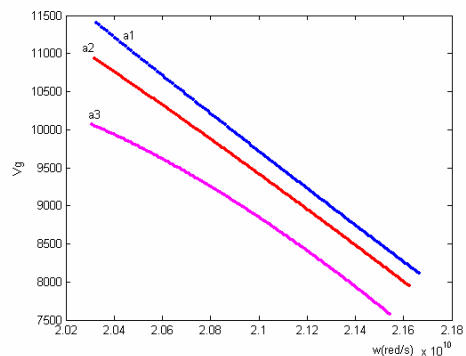


شکل (۲) تغییرات پاشندگی غیر خطی را متناسب با توان ورودی بیان می‌کند. توان ورودی $a_1 = 5 \text{mW}$ ، $a_2 = 100 \text{mW}$ ، $a_3 = 300 \text{mW}$ ، $a_4 = 500 \text{mW}$

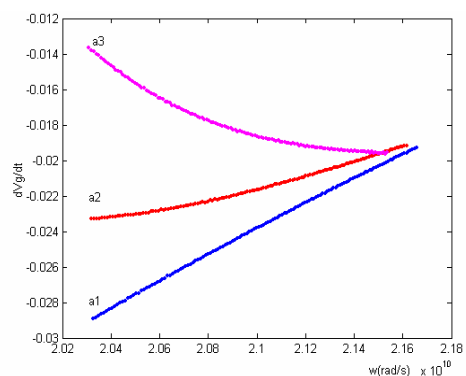
شکل (۳) تغییرات پاشندگی بر حسب ضخامت در توان پایین (خطهای توپر) $a_1 = 5 \text{mW}$ و توان بالا (نقطه چین‌ها)

مراجع

- [1] Su Jun, S.A.Nikitov, R.Marcelli and P.De Gasperis J. Appl. Phys.81(3).1997
 [2] V.G. Kostishyn, V.V. Medved', L.M. Letyuk, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215}216 (2000) 519}521
 [3] A. Hasegawa and Y. Kodama, Solitons in Optical Communication.s(Oxford University Press, Oxford, 1995).
 [4]. Chen S. Tasi, IEEE transations on magnetics, 32(5), 4118 (1996)
 [5] us Patent,6775052,Agust 10 2004]
 [6]C.S.Tsai,D.Young,S.A.Nikitiv J. Appl. Phys. 84.N.3(1998)
 [7] A.N. Slavin, C.E. Zaspel, Power and initial pulse width dependent soliton velocity in ferrite films, J. Appl. Phys. 91 (2002) 8673.
 [8] A. D. Boardman, Q. Wang, S. A. Nikitov, J. Shen, W. Chen, D.Mills, and J. S. Bao, IEEE Trans. Magn. MAG-30, 14 ~1994
 [۹] نرگس انصاری، محمد مهدی طهرانچی و مجید قناعت شعاری، "برانگیختگی امواج مغناطواستاتیک در مدولاتورهای مغناطواپتیکی فرکانس زیاد"، دهمین کنفرانس سالانه فوتونیک، ماهان، ۱۳۸۲.
 [10] B.A.Kalinokos, N.G.Kovshikov, and A.N.Slavin , Sov.Phys.JETPLett38,413(1983)
 [11]Hua Xia,Pavel Kabos,Carl E.Patton, and Harold E.Ensle J. Appl. Phys B,55(22).1997
 [1۲] A. D. Boardman, S. H. M.Mehta, and R. F. Wallis, Phys. Rev. B 57, 10 667 ~1998
 [1۳]Xuan-Zhang Wang;Shu-Rong Xu; Phys. Rev. B 55,054415(2001A. Nikitov, N. A. Waby, R. Putman,)



شکل (۴) تغییرات سرعت گروه غیرخطی بر حسب فرکانس را در توان‌های مختلف $a_3 = 300mW$ و $a_2 = 100mW$. $a_1 = 5mW$ نشان می‌دهد.



شکل (۵) تغییرات پاشندگی سرعت گروه غیرخطی بر حسب فرکانس در توان‌های مختلف $a_3 = 300mW$ و $a_2 = 100mW$. $a_1 = 5mW$ را بیان می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

انتشار امواج مگنتواستاتیک به پارامترهای ضخامت، مغناطش میدان مغناطیسی و توان ورودی وابسته می‌باشد. در این راستا معادله پاشندگی غیر خطی در فیلم را محاسبه کرده و کاهش پاشندگی، سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه با افزایش توان ورودی و وابستگی به متغیرهای ضخامت، مغناطش، میدان مغناطیسی را در نمودارهای مختلف نشان داده ایم. همانطور که در مقاله بیان شد با اعمال توان ورودی بالا فیلم مگنتواپتیکی از حالت خطی به حالت غیرخطی می‌رود و در نتیجه امواج اسپینی خطی به امواج سالیوتونی تبدیل می‌شود، مزیت این روش ثابت ماندن شکل این امواج در حین انتشار و به موقع رسیدن اطلاعات به مقصد است.