بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تحلیل تولید هارمونیک دوم القای مغناطیسی در لایه‌ی نازک بس‌فرو (فریت بیسموت) با در نظر گرفتن حوزه‌های فروالکتریک

انسیه حق وردی[۲] ، زهرا سادات عزیزی[۱] ، محمد مهدی طهرانچی[۱و۲]
[۱]پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – فیلم‌های نازک بس فرو کاربرد وسیعی در قطعات میکروالکترونیکی دارند. از شدت تولید هارمونیک دوم (*SHG*) این مواد، به عنوان روبشگر حساس در مطالعه اثر ضعیف مگنتو الکتریک استفاده می‌شود. ضرایب غیرخطی در محاسبه و تخمین *SHG* به تقارن ساختاری و مشخصه حوزه‌های فرو الکتریک مجاز در آن، وابسته است. در این مقاله، ضرایب غیرخطی مغناطیسی لایه نازک بس‌فرو فریت بیسموت (*BFO*) با تقارن *3m* بررسی شده اند. با درنظر گرفتن حوزه‌های فروالکتریک در این لایه رابطه‌ی شدت *MSHG* ارائه شده است.

کلید واژه-بیسموت فریت، تولید هارمونیک القای مغناطیسی، تولید هارمونیک دوم، ، حوزه‌های فرو الکتریک، مگنتو الکتریک.

Magnetic induced harmonic generation in multi-ferric thin film (Bismuth ferrite) by ferroelectric domains consideration

Ensiye Haghverdi[1], Zahra Sadat Azizi[1], Mohammad Mehdi Tehranchi[1, 2]
[1]Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran
[2]Departman of physics, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract- The multiferroics thin films are widely used in microelectronic devices. The intensity of the second harmonic generation (SHG) in these films is as a sensitive probe to study the effects of weak magneto electric effects. In this paper, the nonlinear coefficients of magnetic bismuth ferrite (BFO) thin-film with 3m symmetry have been studied. Given ferroelectric domains in this layer, the MSHG relation is provided.

Keywords: Bismuth ferrite, Ferromagnetic domains, Magneto electric, Magnetic induced Second harmonic generation, Second harmonic generation, Transmission geometry.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-01]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

اخیرا، مطالعات بسیاری بر روی اکسیدهای بس فرو به دلیل تابعیت دو گانه آنها از جمله مگنتو الکتریک صورت می‌گیرد. از آنجایی که لایه‌های نازک کلید اصلی ساخت بسیاری از قطعات جدید مانند حافظه‌ها هستند؛ اطلاع از خواص مگنتو الکتریک آن‌ها ضروری است [۱]. از آنجایی که مقادیر کمیت‌های قابل اندازه‌گیری در این لایه‌ها بسیار کوچک هستند، از تولید هارمونیک دوم[1](SHG) به عنوان روبشگری حساس به خواص مگنتو الکتریک استفاده می‌شود. منشا این کارایی، حساسیت بسیار بالای عناصر تانسور پذیرفتاری SHG و جفت شدگی مگنتو الکتریک به تقارن‌های بلورین است.

از روش SHG در مطالعه بسیاری از اکسیدهای بس فرو استفاده شده است. از جمله این مواد، فریت بیسموت (BFO) است، که لایه نازک آن در دمای اتاق خواص فرو الکتریکی و آنتی فرومغناطیسی دارد. در اینجا با نگاه به اثر تولید هارمونیک دوم القای مغناطیسی[2]MSHG، خواص مگنتو الکتریک لایه نازک BFO بر روی $SrTiO_3$ بررسی می‌شود. از آنجایی که این زیرلایه دارای مرکز تقارن (مکعبی) است، به ازای هر توان ورودی، مداخله‌ای در خروجی SHG نخواهد داشت.

غالبا لایه‌های فروالکتریک، دارای حوزه‌هایی با مساحت کمتر از روبشگر هستند. بنابراین در این مقاله، بعد از مروری بر ساختار بلورین و حوزه‌های فروالکتریک لایه، با رویکرد تحلیلی، تانسور پذیرفتاری مغناطیسی محاسبه شده است. در نهایت شدت MSHG تولید شده توسط نمونه BFO مورد نظر، محاسبه و تحلیل شده است.

۲- مبانی نظری تولید هماهنگ دوم مغناطیده

در بلورهایی که دارای مغناطش خود به خود یا القایی توسط میدان مغناطیسی خارجی هستند؛ دارای $\mathbf{M}(0)$ هستند. قطبش اپتیکی غیر خطی محیط، در تقریب دو قطبی الکتریکی، بصورت زیر است[2]:

$$P_i(2\omega) = P_i^{cr}(2\omega) + P_i^{m}(2\omega) \qquad (۱)$$

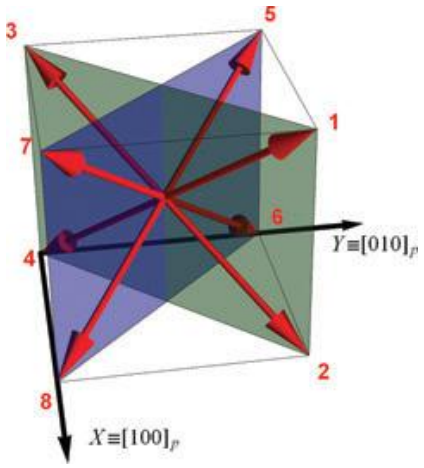
$$= d_{ijk}^{(2)}(2\omega,\omega,\omega)E_j(\omega)E_k(\omega)$$
$$+ d_{ijkl}^{(3)}(2\omega,\omega,\omega,0)E_j(\omega)E_k(\omega)M_l(0)$$

که در آن P_i^{cr} و P_i^{m} به ترتیب سهم‌های بلوری و مغناطیسی، $E_j(\omega)$ و $E_k(\omega)$ میدانهای ورودی اصلی و $M(0)$ مغناطش استاتیک خود به‌خود یا القایی توسط میدان مغناطیسی خارجی هستند.

سهم P_i^{cr}، توسط گروه‌های دیگر محاسبه شده است [۲]، در این مقاله به محاسبه جمله‌ی P_i^{m} و سهم آن در اثر MSHG، می‌پردازیم.

۳- تقارن ساختاری و حوزه‌های فرو الکتریک در BFO

فریت بیسموت یکی از مواد بس فرو شناخته شده است. لایه نازک آن که بر زیر لایه $SrTiO_3$ (100) رشد یافته است، دارای گروه تقارنی 3m است. چنین لایه‌ای، هشت حوزه مختلف فروالکتریک در راستای صفحات $\langle 111 \rangle$ شکل می‌دهد. در شکل (۱) راستای قطبش مغناطیسی و هشت حوزه مرتبط با آن (شماره ۱ تا ۸) معرفی شده اند.



شکل(۱). هشت حوزه ی مختلف لایه نازک BiFeO3//(100) SrTiO3. فلش قرمز تعیین کننده جهت قطبش فروالکتریک در هشت حوزه با توجه به سلول واحد زیر لایه است. [۱۰۰] و [۰۱۰] جهت های بلوری نسبت به زیر لایه هستند. دو صفحه آینه ای برای گروه تقارنی 3m به رنگ آبی و سبز نشان داده شده است[۲].

در این مقاله، جهت های مرجع دستگاه مختصات نمونه بر اساس راستای زیرلایه یعنی X = [100] و Y = [010] اختیار می‌شوند. در یک گروه تقارنی 3m راستای قطبش

[1] Second harmonic generation
[2] Magnetic induced second harmonic generation

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-01]

در راستای محور تقارنی سه تایه است. در هر حوزه جهت قطبش در راستای محور x_3 نمونه و محور x_1 عمود بر آن و صفحه آینه‌ای شامل آن، قرار داد می‌شود.
نور فرودی عمود بر نمونه و میدان الکتریکی آن در صفحه‌ی x-y با زاویه ϕ نسبت به محور y قرار دارد. نمونه تحت میدان مغناطیسی عرضی با زاویه انتخابی و $\mathbf{M}_z = 0$ است.

۴- سهم مغناطیسی در شدت SHG

در این بخش، با استفاده از مختصه های معرفی شده، سهم القای مغناطیسی، P_i^m، در رابطه (۱) محاسبه می‌شود. با استفاده از شرط تقارن نیومن

$$d_{ijki}^{new} = |\sigma| \sigma_{ip}\sigma_{jq}\sigma_{kr}\sigma_{ls} d_{pqrs}^{old}، \qquad (2)$$

که در آن سیگما عناصر ماتریس تقارن و d_{ijki}^{old} و d_{ijki}^{new} به ترتیب عنصری از ماتریس مرتبه سوم قبل و بعد از تبدیل هستند (زیروندها از یک تا سه مقدار می‌گیرند)، ضرایب غیر صفر تانسور پذیرفتاری عبارتند از:

$$\begin{aligned} &d_{2122} = -d_{1121},\ d_{1211} = -d_{1121} \\ &d_{1112} = -2d_{1211}(d_{1121}) - d_{2111} = -d_{2221} \\ &= 2d_{2122}(d_{2212}) + d_{1222} \end{aligned} \qquad (۳)$$

به دلیل پیچیدگی ساختار بلوری BFO روابط (از جمله تانسور غیرخطی) بر اساس دستگاه مختصات آزمایشگاه نوشته شده‌اند. تا حالا، تانسور پذیرفتاری مغناطیسی $D^{(3)}$ در هر حوزه نسبت به مرجع نمونه نوشته شده بود. برای بدست آوردن عناصر این تانسور در دستگاه مختصات آزمایشگاه، از ماتریس تبدیل

$$a = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & \sqrt{2/3} \\ 0 & -\sqrt{2/3} & 1/\sqrt{3} \end{pmatrix}، \qquad (۴)$$

برای حوزه ۱ استفاده شده است. این ماتریس، $D^{(3)}$ را به مقدار ($\pi/2+\varphi$) حول محور x دوران می‌دهد تا محور x_3 را بر راستای z دستگاه مختصات منطبق نماید. بنابراین روابط (۳) به صورت زیر تبدیل می‌شوند:

$$\begin{aligned} &d_{1211}^{new} = 1/\sqrt{3} d_{1211}^{old} = -d_{1121}^{new} \\ &d_{2122}^{new} = 1/(3\sqrt{3}) d_{2122}^{old} = -d_{2212}^{new} \\ &d_{1112}^{new} = 1/\sqrt{3} d_{1112}^{old} = -2d_{1211}^{new}(d_{1121}^{new}) - d_{2111}^{new} \\ &= -d_{2221}^{new} = 2d_{2122}^{new}(d_{2212}^{new}) + d_{1222}^{new} \end{aligned} \qquad (۵)$$

ماتریس دوران برای حوزه ی ۲، با تغییر علامت درایه های a_{22} و a_{33} بدست می‌آید، اجزای تانسور پذیرفتاری تحت این دوران عبارتند از:

$$\begin{aligned} &d_{1211}^{new} = -1/\sqrt{3} d_{1211}^{old} = -d_{1121}^{new} \\ &d_{2122}^{new} = -1/3\sqrt{3} d_{2122}^{old} = -d_{2212}^{new} \\ &d_{1112}^{new} = -1/\sqrt{3} d_{1112}^{old} = -2d_{1211}^{new}(d_{1121}^{new}) - d_{2111}^{new} \\ &= -d_{2221}^{new} = 2d_{2122}^{new}(d_{2212}^{new}) + d_{1222}^{new} \end{aligned} \qquad (۶)$$

و به همین ترتیب، برای سایر حوزه ها روابط فوق بدست آمدند. با جایگذاری عناصر تانسوری جدید رابطه (۵) در رابطه (۱)

$$\begin{aligned} P_x^{(1)} &= m_x d_{1211}\sin 2\varphi + \frac{1}{\sqrt{3}} m_y d_{1112} \\ &+ m_y(d_{2221} + d_{1222})\cos^2\varphi \qquad (۷) \\ p_y^{(1)} &= -\frac{1}{\sqrt{3}} d_{1112} m_x\left(2\sin^2\varphi + 1\right) + m_y d_{2122}\sin 2\varphi، \end{aligned}$$

بدست می‌آیند و به همین ترتیب برای حوزه ی ۲ داریم:

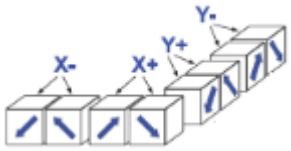
$$\begin{aligned} p_y^{(2)} &= +\frac{1}{\sqrt{3}} d_{1112} m_x\left(2\sin^2\varphi + 1\right) + m_y d_{2122}\sin 2\varphi \\ P_x^{(2)} &= m_x d_{1211}\sin 2\varphi - \frac{1}{\sqrt{3}} m_y d_{1112} \qquad (۸) \\ &+ m_y(d_{2221} + d_{1222})\cos^2\varphi \end{aligned}$$

با توجه به زاویه بین بردارهای قطبش و تصویر آنها در صفحه x-y، قطبش در هشت حوزه به صورت

$$\begin{aligned} p_x^{(6)} &= -p_x^{(8)} = -\frac{1}{\sqrt{3}} d_{1112} m_x\left(2\cos^2\varphi + 1\right) \\ &+ m_y d_{2122}\sin 2\varphi \\ p_x^{(5)} &= -p_x^{(7)} = \frac{1}{\sqrt{3}} d_{1112} m_x\left(2\cos^2\varphi + 1\right) \\ &+ m_y d_{2122}\sin 2\varphi \\ p_y^{(1)} &= -p_y^{(3)} \\ p_y^{(2)} &= -p_y^{(4)} \end{aligned}$$

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-01]

$$p_x^{(1)} = -p_x^{(3)} = -p_y^{(5)} = p_y^{(7)}$$
$$p_x^{(2)} = -p_x^{(4)} = -p_y^{(6)} = p_y^{(8)}$$



شکل ۲: رابطه حوزه های مختلف در BiFeO3//(100) SrTiO3

دسته بندی شده است. با توجه به شکل (۲) برای جمع قطبش در راستاهای مختلف داریم:

$$p_x^{x+} = P_x^{(7)} + P_x^{(8)} = -2m_y d_{2122}\sin 2\varphi$$
$$p_x^{x-} = P_x^{(5)} + P_x^{(6)} = -p_x^{x+}$$
$$p_x^{y+} = P_x^{(1)} + P_x^{(2)}$$
$$= 2m_x d_{1211}\sin 2\varphi + 2m_y(d_{2221}+d_{1222})\cos^2\varphi$$
$$p_x^{y-} = P_x^{(3)} + P_x^{(4)} = -p_x^{y+}$$
$$p_y^{x+} = P_y^{(7)} + P_y^{(8)}$$
$$= 2m_x d_{1211}\sin 2\varphi + 2m_y(d_{2221}+d_{1222})\cos^2\varphi$$
$$p_y^{x-} = P_y^{(5)} + P_y^{(6)} = -p_y^{x+}$$
$$p_y^{y+} = P_y^{(1)} + P_y^{(2)} = 2m_y d_{2122}\sin 2\varphi$$
$$p_y^{y-} = P_y^{(3)} + P_y^{(4)} = p_y^{y+}$$

به این ترتیب با نامگذاری، $k = 2m_y d_{2122}$، $B = 2m_x d_{1211}$، $C = 2m_y(d_{2221}+d_{1222})$ و با توجه به رابطه‌ی جمع

$$I_j^{2\omega} = |\sum A^{\nu} P_j^{\nu} e^{i\delta_{j\nu}}|^2$$

که در آن A^{ν} مساحت حوزه ν، و $e^{i\delta_{j\nu}}$ به دلیل اختلاف فازی بین حوزه ها وارد شده است، قطبش برآیند تمامی حوزه‌ها به صورت

$$p_x = A_x^{x+}p_x^{x+} + A_x^{x-}p_x^{x-} + (A_x^{y+}p_x^{y+} + A_x^{y-}p_x^{y-})e^{i\Gamma}$$
$$= \delta A_x^x p_x^{x+} + \delta A_x^y p_x^{y+} e^{i\Gamma} \qquad (۹)$$

$$p_y = A_y^{y+}p_y^{y+} + A_y^{y-}p_y^{y-} + (A_x^{x+}p_y^{x+} + A_y^{x-}p_y^{x-})e^{i\Gamma}$$
$$= \delta A_y^y p_y^{y+} + \delta A_y^x p_y^{x+} e^{i\Gamma} \qquad (۱۰)$$

بدست می‌آیند، که در آن $\delta A_x^x = A_x^{x+} - A_x^{x-}$ و $\delta A_y^y = A_y^{y+} - A_y^{y-}$ و Γ عامل فاز است. در نهایت با توجه به روابط (۹،۱۰) شدت MSHG متناظر با راستای x قطبش

$$I_x^{2\omega} \propto p_x^{2\omega}\left(p_x^{2\omega}\right)^*$$
$$= (\delta A_x^x)^2(K\sin 2\varphi)^2 + (\delta A_x^y)^2\left(B\sin 2\varphi + C\cos^2\varphi\right)^2$$
$$+ 2\delta A_x^x \delta A_x^y (K\sin 2\varphi)\left(B\sin 2\varphi + C\cos^2\varphi\right), \qquad (۱۱)$$

می‌شود. و به همین ترتیب برای $I_y^{2\omega}$

$$I_y^{2\omega} \propto p_y^{2\omega}\left(p_y^{2\omega}\right)^* = (\delta A_y^y p_y^{y+})^2 + (\delta A_y^x p_y^{x+})^2$$
$$+ 2\delta A_y^y \delta A_y^x p_y^{x+} p_y^{y+}\cos\Gamma = (\delta A_y^y)^2(K\sin 2\varphi)^2$$
$$+ (\delta A_y^x)^2\left(B\sin 2\varphi + C\cos^2\varphi\right)^2 \qquad (۱۲)$$
$$+ 2\delta A_y^x \delta A_y^y (K\sin 2\varphi)\left(B\sin 2\varphi + C\cos^2\varphi\right),$$

را داریم. در روابط فوق، چون ضرایب K، B و C به مغناطش وابسته‌اند، با قرار دادن $\mathbf{M} = 0$، شدت MSHG صفر می‌شود. مقدار ضرایب روابط (۱۱ و ۱۲) با مقایسه آن‌ها با شدت ثبت شده به ازای یک قطبش خاص خروجی و قطبش های فرودی مختلف، قابل محاسبه هستند. علاوه براین، از نسبت ضرایب، نسبت مساحت حوزه‌های فروالکتریک در لایه نازک محاسبه می‌شوند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با در نظر گرفتن حوزه‌های فرو الکتریک مختلف، شدت MSHG در لایه نازک بس فرو بیسموت فریت (3m)، به صورت تحلیلی، برحسب میدان مغناطیسی خارجی محاسبه شد. با بررسی این نتایج، مساحت حوزه‌ها، وابستگی ضرایب به میدان مغناطیسی اعمالی و ضرایب موثر در تولید MSHG تعیین می‌شوند.

مراجع

[1] Lofland S. E., McDonald K. F., C. J. Metting C. J., Knoese E., *Epitaxy, texturing, and second-harmonic generation in BiFeO3 thin films*, **Phys.Rev. B.**73.(2006) 092408.

[2] Denev S., Lummen, Eftihia Barnes T., Kumar A, Gopalan V., *Probing Ferroelectrics Using Optical Second Harmonic Generation*, **J. Am. Ceram. Soc.** 94, (2011) 2699–2727.

[3] Pavlov V. V., Pisarev R. V., Kirilyuk A., Rasing Th., *Observation of a Transversal Nonlinear Magneto-Optical Effect in thin Magnetic Garnet Films*, **Phys. Rev. Lett**. (1997) 78.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-01]