

اثر پدیده مگی-ریگی-لدوک روی موج صوتی ترموالاستیک و موج گرمایی ایجادشده با پالس لیزر

عبدالرضا اسرار

physics_asrar@yahoo.com

دکترای فیزیک ذرات بنیادی و انرژی بالا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز

تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲۰

چکیده

در این مقاله به مطالعه اثر میدان مگنتواستاتیک بر انتشار امواج صوتی ترموالاستیک و موج گرمایی ایجادشده با تابش لیزر روی فلز خواهیم پرداخت. مکانیزم مشترک در تمام برهم کنش های پالس لیزر با فلزات، ایجاد موج صوتی ترموالاستیک و موج گرمایی است. در پالس های با انرژی های زیاد، امکان وقوع فرایندهای مخرب نیز وجود دارد. بر اساس پدیده مگی-ریگی-لدوک، وجود میدان مغناطیسی استاتیک عمود بر صفحه برهم کنش، می تواند انتشار موج گرمایی ایجادشده در همه فرایندها را تا حدودی محدود سازد. فرایند فیزیکی به دام افتادن گرما و آزمایش تجربی این فرایند در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. حداکثر کاهش انتشار جبهه موج گرمایی ایجادشده در شبیه سازی و در حضور میدان ۱ تسلا به میزان $1 \pm 18\%$ درصد به دست آمد. در تصویر گرمایی گرفته شده از محل برهم کنش، این کاهش به میزان $1/1 \pm 4/5$ درصد مشاهده شد.

واژگان کلیدی: پدیده مگی-ریگی-لدوک، تصویر گرمایی، موج ترموالاستیک، موج گرمایی.

۱. مقدمه

برای نخستین بار برهم کنش لیزر با ماده به منظور ایجاد موج صوتی توسط کروزر [۱] انجام شد. پیشرفت در علم و فن آوری لیزر در تولید پالس های فوق کوتاه و پرتوان، دریچه جدیدی به روی تحقیق و بررسی نحوه ایجاد پالس های فوق کوتاه آکوستیکی گشود [۲].

روش های متفاوتی از جمله برهم کنش لیزر با فلز، برهم کنش لیزر با مایعات گوناگون و برهم کنش لیزر با بلورهای

نیمه هادی در این زمینه پیشنهاد شده است [۸-۱]. بسته به نوع کاربرد، می توان از انواع لیزر با مشخصات مختلف و از برهم کنش آن با محیط های مختلف بهره برد. در مراجع [۱-۸] چهار نوع فرایند برای برهم کنش لیزر با ماده و ایجاد صوت پیشنهاد شده است.

- برهم کنش لیزر با مایعات و جامدات در رژیم غیر مخرب [۱، ۲ و ۶] (روش ترموالاستیک)؛

انتشار می‌یابد [۱۱].

بر این اساس به منظور شبیه‌سازی این اثر، حرکت الکترون‌ها را متأثر از یک نیروی سینوسی ناشی از ارتعاشات شبکه در اثر برخورد پالس لیزر و نیروی برهم‌کنش کولمبی بین الکترون‌ها در نظر می‌گیریم.

بنابراین دستگاه معادلات حاکم برای مجموعه‌ای از N الکترون مطابق رابطه (۱) خواهد بود:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \frac{1}{m_e} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j(\neq i)=1}^N \frac{(x_i - x_j)}{\left((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{F_{0x}}{m_e} \sin(\omega t) \right) \\ \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \frac{1}{m_e} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j(\neq i)=1}^N \frac{(y_i - y_j)}{\left((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{F_{0y}}{m_e} \sin(\omega t) \right) \end{aligned} \right. \quad i = 1 \dots N \quad (1)$$

که در آن x و y مؤلفه‌های موقعیت الکترون در صفحه مختصات، m_e جرم الکترون، e بار الکتریکی الکترون، F_{0x} و F_{0y} مؤلفه‌های نیروی وارد بر الکترون‌ها در حضور ارتعاش شبکه و ω فرکانس موج ترموالاستیک است. به دلیل حرکت تصادفی الکترون‌های رسانش، مکان اولیه الکترون‌ها x و y به صورت تصادفی انتخاب شده است. مقادیر اولیه سرعت الکترون‌ها نیز به صورت تصادفی از تابع توزیع گاوسی با مقدار بیشینه $v_{peak} = \sqrt{3K_B T / m_e}$ ، که در آن T دمای محیط و K_B ثابت بولتزمن است، انتخاب شده است.

دستگاه معادله‌های (۱) حرکت الکترون‌ها تحت تأثیر ارتعاش شبکه با طول موج $\lambda = \frac{2\pi v_a}{\omega}$ و دامنه $A = \frac{F_0}{m_e \omega^2}$ را نشان می‌داد. در حضور یک میدان مگنتواستاتیک یکنواخت B که عمود بر صفحه x - y اعمال می‌شود، دستگاه معادله‌های (۱) به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \dots + \frac{e}{m_e} \frac{dy_i}{dt} B_z \\ \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \dots - \frac{e}{m_e} \frac{dx_i}{dt} B_z \end{aligned} \right. , i = 1 \dots N \quad (2)$$

که در آن "..." معادل سمت راست رابطه (۱) است.

• برهم‌کنش لیزر با جامدات در رژیم مخرب [۱، ۲ و ۶] (روش مخرب)؛

• برهم‌کنش لیزر با مایعات در توان‌های متوسط، تبخیر آب و ایجاد موج شوک و موج صوتی [۶] (روش تبخیر)؛

• برهم‌کنش لیزر با مایعات در توان‌های بالا و ایجاد پلاسما، موج شوک و موج صوتی [۶] (روش پلاسما).

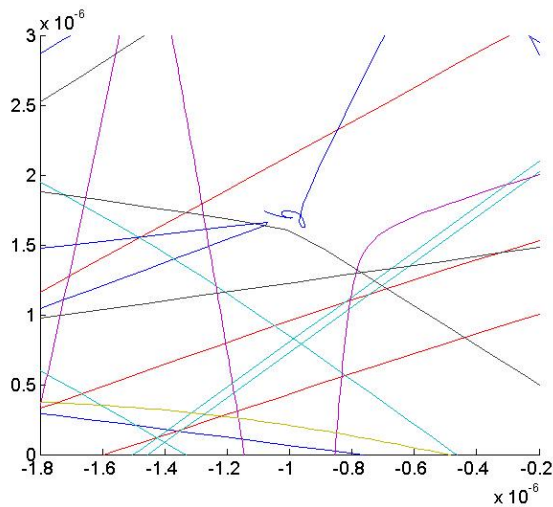
فرایند ترموالاستیک به‌طور جامع توسط رویلو و گوسو [۹] و برهم‌کنش لیزرهای فرکانس پایین با انواع مواد توسط تام [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی کامل فرایند ترموالاستیک در رژیم مخرب نیز توسط گوسو و همکارانش [۱۱ و ۱۲] ارائه شده است.

فرایند مشترک در برهم‌کنش لیزر با فلزات ایجاد موج صوتی ترموالاستیک و موج گرمایی است. هرچه جذب لیزر با ماده بیشتر باشد، این پدیده بازدهی بیشتری دارد. حضور میدان مغناطیسی عمود بر صفحه برهم‌کنش، می‌تواند از انتشار موج گرمایی بکاهد و باعث به دام افتادن بخشی از گرمای ایجادشده در فرایند جذب پالس لیزر در یک فضای محدود شود. در بخش دوم این مقاله دستگاه معادله‌های حرکت الکترون، به‌عنوان بخشی از حامل موج گرمایی که می‌تواند در حضور میدان به دام بیفتد را تشکیل خواهیم داد. در بخش سوم، این دستگاه معادله‌ها را به روش عددی حل و در مورد نتایج بحث خواهیم کرد. در نهایت در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی را با تصویر گرمایی گرفته شده از زمان و محل برهم‌کنش در حضور میدان مغناطیسی مقایسه خواهیم کرد.

۲. تشکیل دستگاه معادله‌های حرکت الکترون‌ها

طبق پدیده ریگی-لدوک، الکترون‌های آزاد سهم عمده‌ای از انتشار امواج گرمایی در فلزات بر عهده دارند [۱۳]. در واقع انرژی جذب شده پالس لیزر به‌وسیله فلز اغلب با استفاده از الکترون‌های رسانش انتقال می‌یابد و سهم ارتعاشات شبکه (شامل هسته اتم‌ها و الکترون‌های غیررسانشی) در فاصله کوتاهی از محل برهم‌کنش جذب می‌شود [۱۴]. به بیان دیگر سهم الکترون‌های رسانش پس از ضعیف شدن ارتعاش شبکه غالب است و موج گرمایی توسط این دسته از الکترون‌ها

اما الکترون‌ها تحت تأثیر نیروهای دیگری نیز هستند. همان‌طور که قبلاً بیان شد الکترون‌ها در شرایط اولیه و در دمای اتاق سرعت‌هایی با توزیع ماکسول-بولتزمن با مقدار بیشینه از مرتبه چند صد کیلومتر در ثانیه دارند و ما هنوز اثر ناشی از نیروی کولمبی وارد بر آن‌ها را نیز اعمال نکرده‌ایم. اثر هم‌زمان نیروی الکتریکی و مغناطیسی (نیروی لورنتز) به‌علاوه حضور نیروی ناشی از موج صوتی ترموالاستیک و اعمال شرایط اولیه سرعت گرمایی باعث حرکت پیچیده الکترون‌ها می‌شود. برای نمونه شکل ۲ را ببینید.



شکل ۲. حرکت پیچیده الکترون‌ها تحت اثر نیروی لورنتز و موج صوتی ترموالاستیک با سرعت اولیه گرمایی

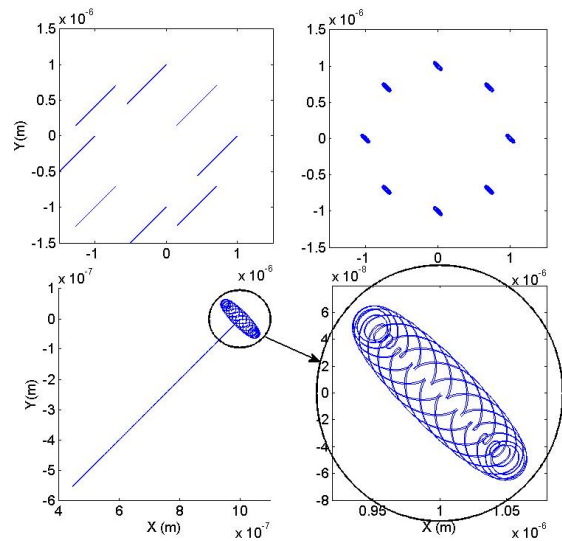
برای سادگی، بخش کوچکی از سطح آلومینیوم را در دو بعد و با مرز آزاد در نظر می‌گیریم. با در نظر گرفتن یک دایره اطراف مرکز توزیع مکانی منبع مولد موج ترموالاستیک (فرض می‌شود به‌صورت شعاعی نسبت به مرکز برخورد لیزر، الکترون‌ها را به نوسان وامی‌دارد)، اثر حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی بر انتشار شعاعی الکترون‌ها را با شمارش تعداد الکترون‌های عبوری از مرز این دایره فرضی می‌سنجیم (شکل ۳).

می‌دانیم که یک مول از فلزی تک‌ظرفیتی، شامل N_A الکترون است که N_A عدد آووگادرو است؛ بنابراین در سطح یک مکعب که شامل ۱ مول از آن ماده باشد، $N_A^{2/3}$ الکترون وجود دارد که عدد بسیار بزرگی است. با توجه به توانمندی رایانه در دسترس بخشی از سطح آلومینیوم به مساحت μm^2

طبق پدیده مگی-ریگی-لدوک [۱۳]، حضور یک میدان عمود مغناطیسی استاتیک، رسانایی گرمایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه اعمال یک میدان مغناطیسی با جهت و اندازه مناسب می‌تواند تا حدودی بر انتشار موج گرمایی ایجادشده توسط لیزر غلبه کند.

۳. شبیه‌سازی عددی انتشار موج گرمایی در فلز

برای حل دستگاه معادله‌های (۲) یک موج سینوسی با دامنه a و فرکانس ω که در سطح یک ورق آلومینیومی منتشر می‌شود را در نظر می‌گیریم. برای حل مسئله فرض می‌کنیم الکترون‌ها در آغاز در حال سکون هستند. انتشار موج ترموالاستیک درون ورق آلومینیوم باعث حرکت سینوسی الکترون‌ها در برخورد اولین جبهه موج با آن‌ها می‌شود. تعدادی از الکترون‌ها را در دریای الکترون‌های رسانش در نظر بگیرید. حضور میدان مغناطیسی عمود بر صفحه B باعث منحرف شدن مسیر حرکت الکترون‌ها می‌شود، شکل (۱).



شکل ۱. (بالا سمت چپ)، حرکت الکترون‌ها تحت نیروی حاصل از موج صوتی ترموالاستیک و بدون در نظر گرفتن سایر نیروها، (بالا سمت راست)، حرکت الکترون‌ها تحت تأثیر دو نیروی حاصل از موج ترموالاستیک و میدان مغناطیسی، (پایین سمت چپ)، حرکت یک الکترون تنها، در حالتی که تک الکترون تحت تأثیر موج ترموالاستیک است روی یک خط راست حرکت و برگشت دارد، اما با حضور میدان عمود B دامنه حرکت کم شده و الکترون در یک مسیر بسته با دامنه کمتر حرکت می‌کند. (پایین سمت راست) نمای نزدیک حرکت تک الکترون تحت تأثیر موج ترموالاستیک و در حضور میدان B .

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، نتایج شبیه سازی نشان می دهد که افزایش اندازه میدان مغناطیسی باعث کم شدن میزان انتشار موج ترموالاستیک در جهت شعاعی می شود. به دلیل انتخاب تصادفی، سرعت اولیه الکترون ها از توزیع گرمایی در شبیه سازی مقادیر متفاوتی برای نسبت $M'(B)/M$ به دست می آید. این بازه را با یک میله خطا در شکل ۴ نشان داده ایم.

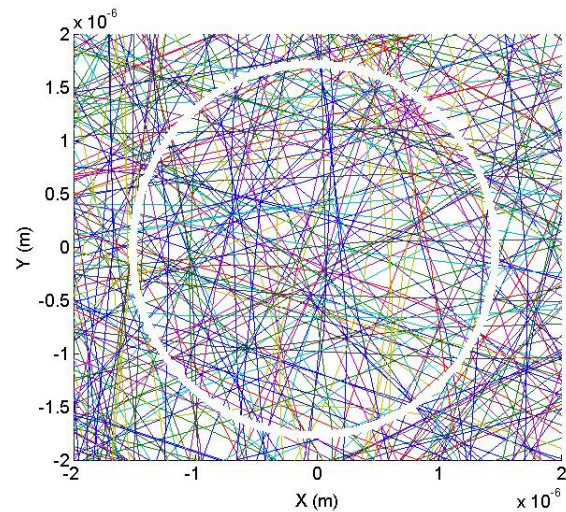
۴. مشاهدات تجربی و نتیجه گیری

برای مشاهده اثر حضور میدان مغناطیسی بر انتشار موج ترموالاستیک، با استفاده از دوربین حرارتی و در شرایط محیطی به نسبت مشابه، از سطح آلومینیوم در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی تحت تابش پالس لیزر عکس برداری کردیم. لیزر مورد استفاده، یک لیزر ۲۰۰ وات NdYAG پیوسته با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر است که ایجاد پالس در آن با سویچ های الکترونیکی و در اصل با قطع و وصل پمپ انجام می پذیرد. طول پالس این لیزر از ۱۰۰ میکروثانیه تا ۲۰ میلی ثانیه قابل تنظیم است. لیزر یاد شده می تواند (از نظر تعداد تکرار پالس) از ۰/۱ هرتز (هر ۱۰ ثانیه یک بار) تا ۵۰۰ هرتز (هر ۲ میلی ثانیه یک بار) پالس تولید کند که این بازه وابسته به پهنا و شدت پالس انتخاب شده است. از طریق عکس برداری با دوربینی حرارتی با حساسه CCD، عمق رنگ ۱۲ بیت و محدوده دینامیک ۷۲ دسی بل، به ظاهر عکس های مشابه و تمیزناپذیری تولید شد. سرعت شاتر دوربین استفاده شده بین ۱/۱۰۰۰۰ تا ۱/۱۵ ثانیه قابل تنظیم است. نسبت زمان باز بودن شاتر و پهنای پالس تنظیم شده برابر است با

$$R = \frac{1/15}{1/10000} \sim 666$$

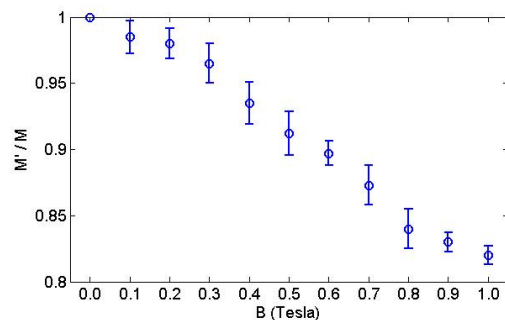
لیزر در دو مد نرم افزاری و پدالی فعال می شود. با اتصال دو سیم از پدال لیزر به یک میکروسویچ و قرار دادن میکروسویچ روی شاسی دوربین، می توان اختلاف زمانی تولید پالس و فعال سازی دوربین را به کمتر از ۱/۱۵ ثانیه رساند؛ اما نسبت زمان باز بودن شاتر و پهنای پالس طوری است که می توان مطمئن بود که کل بازه زمان نوردهی لیزر

۱۶ شامل $n \sim 10^7$ الکترون را برای شبیه سازی حرکت الکترون ها در نظر گرفتیم.



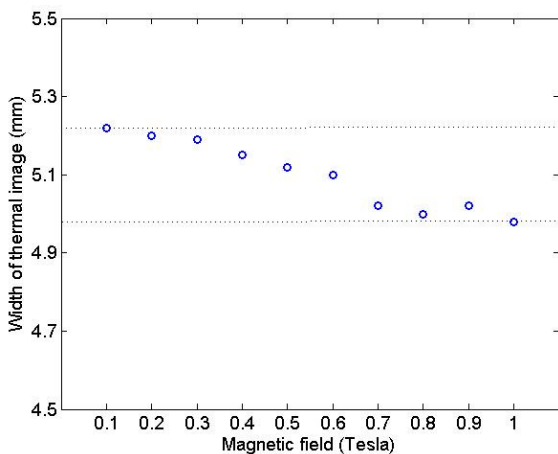
شکل ۳. با قرار دادن یک دایره هم مرکز با محل برخورد لیزر روی فلز به عنوان منبع نقطه ای موج ترموالاستیک تعداد دفعه های عبور الکترون ها از مرز دایره را در بازه زمانی t در دو حالت شمارش می کنیم: ۱- تعداد عبور تحت تأثیر میدان مغناطیسی را $M'(B)$ و ۲- تعداد عبور در غیاب میدان مغناطیسی را M می نامیم.

با شمارش تعداد دفعاتی که الکترون ها در یک بازه زمانی t در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی از دایره فرضی عبور می کنند و مقایسه این دو عدد، تأثیر نسبی حضور میدان مغناطیسی بر انتشار موج ترموالاستیک را محاسبه می کنیم. تعداد دفعه های عبور از مرز دایره در حضور میدان B را $M'(B)$ و تعداد دفعات عبور در شرایط عدم حضور میدان B را M می نامیم. در واقع نسبت $M'(B)/M$ نشان دهنده میزان تأثیر میدان مغناطیسی B بر انتشار موج ترموالاستیک است.



شکل ۴. اندازه نسبت $M'(B)/M$ با افزایش اندازه میدان مغناطیسی B کاهش می یابد. این تغییر نشان دهنده کاهش انتشار شعاعی موج ترموالاستیک در حضور میدان مغناطیسی عمود بر صفحه انتشار است.

فرایند ترموالاستیک است. شبیه‌سازی‌های مشابه با موج گاوسی به جای موج سینوسی با پهنا و فرکانس تکرار مشابه نیز انجام شد. در این شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد که تغییر شکل موج ترموالاستیک که اثر مستقیم تغییر توزیع مکانی و زمانی پالس لیزر است، تأثیر قابل توجهی روی نتایج شبیه‌سازی ندارد؛ اما نتایج حساسیت محسوسی نسبت به فرکانس موج ترموالاستیک داشت. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان داد که افزایش فرکانس از ۱ گیگاهرتز به ۱ تراهرتز موجب کاهش ۹۰ درصدی نسبت $M'(B)/M$ در میدان مغناطیسی ثابت می‌شود. به نظر می‌رسد دلیل این کاهش زیاد نزدیک شدن سرعت شعاعی الکترون‌ها تحت تأثیر موج ترموالاستیک، به سرعت گرمایی آن‌ها در دمای اتاق است. از سوی دیگر دامنه حرکت الکترون‌ها در اثر موج ترموالاستیک با فرکانس تراهرتز، به مقداری کمتر از فاصله متوسط حرکت آزاد الکترون‌ها کاهش می‌یابد.

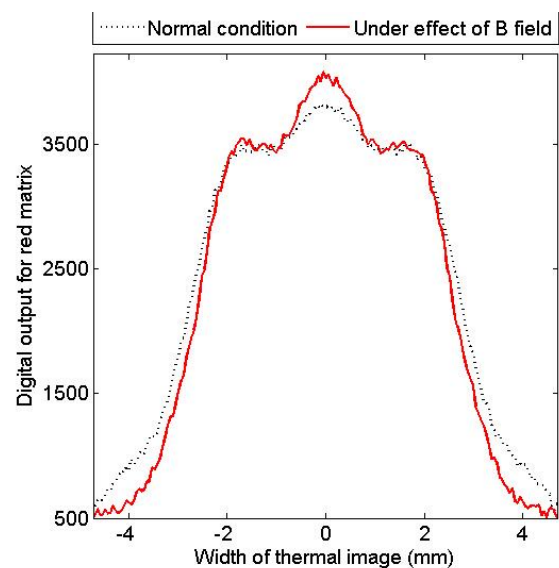


شکل ۶. نمودار پهنای تصویر حرارتی در حضور میدان مغناطیسی با شدت‌های متفاوت، با افزایش اندازه میدان مغناطیسی پهنای تصویر حرارتی کاهش بیشتری می‌یابد.

۵. جمع‌بندی

در این مقاله اثر پدیده مگی-ریگی-لدوک که در بعضی مقاله‌ها با عنوان اثر هال گرمایی [۱۵] نیز معرفی شده، پرداختیم. برای مشاهده این پدیده به صورت نظری، یک سطح دوبعدی از فلز آلومینیوم تحت اثر میدان مغناطیسی را در نظر گرفتیم که در آن مولد موج ترموالاستیک، پالس لیزر است. با در نظر گرفتن یک دایره و شمارش تعداد عبور الکترون‌ها در دو حالت حضور میدان و عدم حضور میدان،

در بازه نورگیری دوربین و باز بودن شاتر قرار می‌گیرد. برای مشاهده و تعیین تفاوت احتمالی موجود بین دو عکس دیجیتال، از ماتریس عددی مربوط به عکس‌ها، سطری که عدد بیشینه در ماتریس قرمز از تانسور RGB در آن قرار داشت را رسم کردیم. شکل ۵ نشان‌دهنده خروجی این سطر خاص از ماتریس رنگ قرمز عکس‌هاست. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اثر حضور میدان مغناطیسی B در مقدار بیشینه موجود در آزمون‌ها (حدود ۱ تسلا)، کاهش حدود $1 \pm 4/5$ درصد از پهنای نمودار در نیمه مقدار بیشینه نمودار است.



شکل ۵. نمودار مربوط به سطری از ماتریس قرمز تصویر حرارتی که مقدار بیشینه در آن قرار دارد. تصویر حرارتی از محل تابش پالس لیزر روی صفحه آلومینیومی در دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی ۱ تسلا و در شرایط محیطی نسبتاً برابر گرفته شده است. همان‌طور که پیداست، حضور میدان مغناطیسی باعث کاهش پهنای نمودار در نیمه مقدار بیشینه به اندازه $1 \pm 4/5$ درصد شده است.

کاهش پهنای این نمودار در میدان‌های مغناطیسی با مقدار کمتر در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که در توضیحات شکل ۴ بیان شد، کاهش نسبت $M'(B)/M$ در میدان مغناطیسی ۱ تسلا حدود 1 ± 18 درصد محاسبه شد. به طور منطقی مقایسه مقداری این عدد با عدد مربوط به کاهش پهنای مشاهده شده از تصویر حرارتی کار نادرستی است، اما به طور کیفی هر دو عدد نشانگر کاهش انتشار موج صوتی ایجادشده توسط تابش لیزر روی فلز در

- surfaces. Physical review letters. 1988 Apr 4;60(14):1438.
- [8] Murnane MM, Kapteyn HC, Falcone RW. High-density plasmas produced by ultrafast laser pulses. Physical review letters. 1989 Jan 9;62(2):155.
- [9] Ruello P, Gusev VE. Physical mechanisms of coherent acoustic phonons generation by ultrafast laser action. Ultrasonics. 2015 Feb 1;56:21-35.
- [10] Tam AC. Applications of photoacoustic sensing techniques. Reviews of Modern Physics. 1986 Apr 1;58(2):381.
- [11] Gusev VE, Karabutov AA. Laser optoacoustics. New York: American Institute of Physics, 1993.
- [12] Akhmanov SA, Gusev VÉ. Laser excitation of ultrashort acoustic pulses: New possibilities in solid-state spectroscopy, diagnostics of fast processes, and nonlinear acoustics. Physics-Uspokhi. 1992;35(3):153-91.
- [13]- Lalena JN, Cleary DA. Principle of inorganic material design. USA: John Wiley and sons; 2010.
- [14] Scruby CB, Drain LE. Laser Ultrasonics: Techniques and Applications. CRC Press; 1990
- [15] Strohm C, Rikken GL, Wyder P. Phenomenological evidence for the phonon Hall effect. Physical review letters. 2005 Oct 4;95(15):155901.
- [16] Blom FA, Burg JW. Some thermomagnetic transport effects of Cd3P2. Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1977 Jan 1;38(1):19-25.
- [17] Armitage D, Goldsmid HJ. The thermal conductivity of cadmium arsenide. Journal of Physics C: Solid State Physics. 1969 Nov;2(11):2138.

اثر کاهش حرکت شعاعی الکترون‌ها را مشاهده کردیم. حداکثر کاهش انتشار جبهه موج ترموالاستیک در شبیه‌سازی و در حضور میدان ۱ تسلا به میزان $1 \pm 18\%$ درصد به دست آمد. برای مقایسه این شبیه‌سازی با آزمایش، از محل برخورد لیزر روی ورق آلومینیوم در حضور میدان مغناطیسی تصویربرداری گرمایی انجام شد. در تصویر گرمایی ثبت شده از محل برهم‌کنش، حداکثر کاهش پهنای قله به وجود آمده که ناشی از ایجاد موج ترموالاستیک است، به میزان $1/5 \pm 4/1\%$ درصد در میدان ۱ تسلا مشاهده شد. بلام و برگ [۱۶] یکی از عوامل مغایرت نتایج تجربی با شبیه‌سازی را امکان برخورد غیر کشسان الکترون‌ها بیان دانسته‌اند. آرمیتاژ و گلداسمید [۱۷] که مشاهدات آنها در حضور میدان ۲ تسلا و در دمای اتاق انجام شده است، جدا شدن مؤلفه‌های انتشار موج ترموالاستیک از طریق الکترون‌ها و شبکه را علت اختلاف مشاهدات شبیه‌سازی و نتایج تجربی بیان کرده‌اند. از عوامل دیگر این مغایرت می‌تواند خلوص و عدم خلوص فلز باشد.

مراجع

- [1] Patel CK, Tam AC. Pulsed optoacoustic spectroscopy of condensed matter. Reviews of Modern Physics. 1981 Jul 1;53(3):517.
- [2] Akhmanov SA, Gusev VE, Karabutov AA. Pulsed laser optoacoustics: Achievements and perspective. Infrared Physics. 1989 May 1;29(2-4):815-38.
- [3] Akhmanov SA, Gusev VÉ. Laser excitation of ultrashort acoustic pulses: New possibilities in solid-state spectroscopy, diagnostics of fast processes, and nonlinear acoustics. Physics-Uspokhi. 1992;35(3):153-91.
- [4] Gauster WB, Habing DH. Electronic volume effect in silicon. Physical Review Letters. 1967 Jun 12;18(24):1058.
- [5] Pidgeon CR, Wherrett BS, Johnston AM, Dempsey J, Miller A. Two-photon absorption in zinc-blende semiconductors. Physical Review Letters. 1979 Jun 25;42(26):1785.
- [6] Thomsen C, Strait J, Vardeny Z, Maris HJ, Tauc J, Hauser JJ. Coherent phonon generation and detection by picosecond light pulses. Physical Review Letters. 1984 Sep 3;53(10):989.
- [7] Tom HW, Aumiller GD, Brito-Cruz CH. Time-resolved study of laser-induced disorder of Si