



امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی بهینه مبتنی بر نانوساختارهای فرومغناطیسی / غیرمغناطیسی

سیده مریم حسینی، سیده مهری حمیدی*، فاضل جهانگیری

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.

چکیده: تابش الکترومغناطیسی تراهرتز برای کاربردهای فراوانی از جمله تصویربرداری و طیف‌سنجی سودمند است. در این مقاله، امیتر دولایه‌ای Fe/Pt با توجه به ضخامت لایه‌ها بهینه شد و با مدل‌سازی میدان تابشی تراهرتز، تاثیر زیرلایه‌های Glass, sapphire, MgO و Tungsten بر ضخامت بهینه امیتر تراهرتز اسپینترونیکی Fe/Pt بررسی شد. مدل استفاده شده در این مقاله، قطبش اسپینی، پخش و تجمع اسپینی در لایه‌های Fe و Pt و ویژگی‌های الکتریکی و نوری لایه‌ها را در نظر می‌گیرد.

واژگان کلیدی: تابش تراهرتز، جریان اسپینی، اثر اسپین‌هال معکوس، امیتر اسپینترونیکی تراهرتز بهینه.

*m_hamidi@sbu.ac.ir

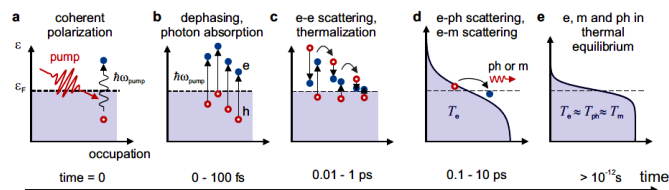
قدرتمند برای مطالعه ماده چگال [۳]، کاربردهای زیست‌پزشکی [۴] و آزمایش‌های غیرمخرب است [۵]. مجموعه این کاربردها، نویدبخش ورود روزافزون فناوری تراهرتز در زندگی روزمره ما در آینده نزدیک است و موجب توسعه سریع قطعات تراهرتز و مولفه‌های آن، به‌ویژه منابع تراهرتز پیوسته مثل افزایشده‌های مبتنی بر دیود شاتکی [۶]، مدارهای مجتمع مبتنی بر ترانزیستور [۷]، لیزرهای آبشاری کوانتومی [۸] و مخلوط‌کننده‌های نوری [۹] شده است.

امیترهای تراهرتز حالت‌جامد معمولی شامل آنتن‌های فوتوکاندکتیو [۱۰] و بلورهای غیرخطی مرتبه دوم [۱۱] مانند ZnTe, GaP, LiNbO₃ و بلورهای آلی [۱۲] می‌شوند که به صورت تجاری در دسترس هستند و در صدها آزمایشگاه پژوهشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزون بر این، پالس‌های تراهرتز با شدت بالا می‌توانند براساس تشکیل پلاسما ناشی از لیزر فمتوثانیه در گازها [۱۳] و حتی محیط مایع [۱۴] تولید شوند. بنابراین، هر چهار حالت ماده یعنی جامد، گاز، پلاسما و مایع برای

۱- مقدمه

گستره‌ی فرکانسی تراهرتز (0.1-10 THz) در طیف الکترومغناطیسی منطبق بر گذارهای چرخشی و ارتعاشی انواع مولکولها است، به طوری که که مواد متفاوت با مشخصه‌های جذبی منحصر بفردی در باند تراهرتز هستند. قابلیت تفکیک فضایی بالاتر این تابش در مقایسه با مایکروویو کاربردهای دانشی، دفاعی، پزشکی، امنیتی و صنعتی زیادی را مبتنی بر تصویربرداری پشتیبانی می‌کند [۱]. پهنای باند به نسبت بزرگ امیترهای^۱ تراهرتز (به‌طورمعمول بزرگتر از 20 GHz)، می‌تواند نرخ انتقال داده‌ی بیشتر از 100 Gbps از خود ارائه دهد که منجر به کاربرد باند تراهرتز در نسل جدید شبکه‌های ارتباطی بی‌سیم (6G) می‌شود [۲]. وقتی امیترهای تراهرتز با پالس‌های لیزری فمتوثانیه پمپاژ می‌شوند، پالس‌های تراهرتز فوق کوتاه تولید می‌شود. در نتیجه، طیف‌سنجی زمینه زمان تراهرتز، ابزاری

الکترون مبادله می‌شود. (d) در همین حال، انرژی بین سیستم-های الکترونیکی، مگنونی و فوتونی با دماهای T_e ، T_m و T_{ph} ؛ که کمتر از دمای T_e هستند، مبادله می‌شود. از طرفی دیگر، برهم‌کنش‌های الکترون-فونون و الکترون-مگنون، موجب تعادل سه زیرسیستم در مقیاس زمانی چند پیکوثانیه می‌شود. (e) سرانجام، پخش گرما منجر به تعادل سیستم با محیط و هم‌دما شدن الکترون‌ها و فونون‌ها می‌شوند [۱۶].



شکل ۱: برانگیختگی نوری فوق سریع در فلزات [۱۶]. فلز قبل برانگیختگی در تعادل حرارتی است.

سازوکار اصلی امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی در شکل ۲ قابل مشاهده است. لایه فرومغناطیسی آهن با جذب پالس لیزر فمتوثانیه برانگیخته می‌شود. برانگیختگی موجب انتقال الکترون‌ها از زیر تراز فرمی به باندهای بالای آن می‌شود و یک توزیع الکترونی نامتعادل، به عبارتی جریان اسپینی ایجاد می‌کند. الکترون‌های اسپین بالای اکثریت برانگیخته در آهن دارای شاخصه sp و سرعت ۵ برابر بالاتر از الکترون‌های اسپین پایین اقلیت برانگیخته با شاخصه d است. در واقع، در یک لایه فرومغناطیسی مغناطیسی شده، تحرک الکترون‌های اکثریت اسپین بالا بیشتر از تحرک الکترون‌های اقلیت اسپین پایین است. برهم‌کنش اسپین‌مدار، الکترون‌های اسپین اکثریت و اقلیت را منحرف می‌کند و در نتیجه جریان اسپینی به جریان بار عرضی تبدیل می‌شود [۱۵]. علامت جریان بار به جهت اسپین‌ها بستگی دارد. این جریان بار الکتریکی با مقیاس زمانی زیرپیکوثانیه به عنوان یک دوقطبی الکتریکی عمل می‌کند و منجر به تابش الکترومغناطیسی در باند تراهرتز در فضای آزاد می‌شود.

تولید موج تراهرتز با استفاده از درجه آزادی بار الکترون و پاسخ آن استفاده می‌شود.

به تازگی نوع جدیدی از امیترهای تراهرتز در سال ۲۰۱۳ پیشنهاد و نمایش داده شده که مبتنی بر اثرات مرتبط با اسپین الکترون در نانولایه‌های فرومغناطیسی/غیرمغناطیسی است و امیتر تراهرتز اسپینترونیکی نامیده می‌شود [۱۵]. استفاده از درجه آزادی اسپین الکترون دارای مزایایی قابل توجه مانند پهنای باند بسیار گسترده (تا ۳۰ تراهرتز) و قابلیت انعطاف‌پذیری از طریق مهندسی میدان-های مغناطیسی خارجی است. فرایند ساخت منعطف و کم‌هزینه این امیترها به علاوه عملکرد عالی آن‌ها در چیدمان‌های تجاری و کاربردها سودمند است.

در این مقاله، در ابتدا به معرفی اصول کلی امیتر تراهرتز اسپینترونیکی پرداختیم، سپس، راه‌های بهبود عملکرد این امیترها را مرور کردیم. برای این منظور، سازوکار تئوری تابش تراهرتز از سیستم Fe/Pt را بررسی کردیم. اثر زیرلایه‌ها و ضخامت هر کدام از لایه‌ها را بر دامنه تابش تراهرتز، با استفاده از مدلی مبتنی بر تولید قطبش اسپینی، پخش اسپینی، تجمع اسپینی و ویژگی-های الکتریکی و نوری دولایه‌ای‌ها نشان دادیم. هر دو سیگنال تراهرتز وابسته به ضخامت Pt و Fe ، ابتدا افزایش و سپس به سرعت کاهش می‌یابد. همچنین، تأثیر حذف زیرلایه با کمک روش‌های لیتوگرافی نیز در این کار دیده شده است.

۲- امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی

برهم‌کنش پالس‌های لیزر فمتوثانیه با یک فلز در نظر می‌گیریم. با جذب نور، سیستم از حالت تعادل خارج می‌شود. شکل ۱، برانگیختگی و فرایندهای تعادل را نشان می‌دهد. در واقع، (a) پالس لیزر فوق‌کوتاه فرودی موجب ایجاد حالت‌های قطبش همدوس در بالا و پایین تراز فرمی فلز می‌شود. (b) در عرض چند ده فمتوثانیه، قطبش ایجاد شده کاهش می‌یابد و جفت الکترون-حفره در بالا و پایین تراز فرمی تولید می‌شود. (c) برهم‌کنش‌ها و پراکندگی الکترون-الکترون، جفت الکترون-حفره بیشتری تولید کرده و سیستم الکترونیکی را در مقیاس زمانی زیرپیکوثانیه گرم می‌کند و پس از آن، احتمال اشغال الکترون با توزیع فرمی-دیراک توصیف می‌شود. انرژی الکترون‌های برانگیخته شده با الکترون‌های دیگر از طریق پراکندگی الکترون-

$$E_{THz} \propto \gamma_{NM} * \frac{P_{abs}}{d_{FM} + d_{NM}} * \tanh\left(\frac{d_{FM} - d_0}{2\lambda_{poi}}\right) * \tanh\left(\frac{d_{NM}}{2\lambda_{NM}}\right) * \frac{1}{n_{air} + n_{sub} + Z_0 * (\sigma_{FM} d_{FM} + \sigma_{NM} d_{NM})} * \frac{(d_{FM} + d_{NM})}{e^{S_{THz}}}$$

(۱)

که در آن، Z_c امپدانس خلا، $n_{air}(n_{sub})$ ضریب شکست هوا (زیر لایه) و $\sigma_{FM}(\sigma_{NM})$ رسانندگی الکتریکی لایه فرومغناطیسی (غیرمغناطیسی است).

جمله اول معادله (۱)، نشان دهنده‌ی زاویه اسپین‌هال است و بیان می‌کند که موادی با بازده تبدیل اسپین به بار بزرگتر، دامنه تابش تراهرتز بزرگتری دارند. جمله دوم، جذب لیزر در لایه‌های فلزی را در نظر می‌گیرد. تنها کسری از توان جذب‌شده در سیگنال تراهرتز تولیدشده سهمیم است زیرا که تنها الکترون‌های اسپین-قطبیده نزدیک مرز لایه فرومغناطیسی/غیرمغناطیسی به لایه غیرمغناطیسی خواهد رسید. جمله سوم رابطه بین قطبش اسپینی و ضخامت لایه فرومغناطیسی را توصیف می‌کند که d_0 ضخامت لایه مرده^۲ (نواحی غیرمغناطیسی لایه فرومغناطیسی در نزدیکی فصل مشترک) است و λ_{poi} اشباع قطبش اسپینی را با ضخامت لایه مشخصه‌یابی می‌کند. جمله چهارم بر تجمع اسپینی در لایه غیرمغناطیسی متناظر با مدل پخش اسپینی والت-فرت اشاره دارد که در آن λ_{NM} بر طول پخش جریان اسپینی در لایه غیرمغناطیسی دلالت می‌کند. جمله پنجم تابش الکترومغناطیسی از لایه نازک فلزی را توضیح می‌دهد که ناشی از حل معادله ماکسول با روش تابع گرین است. جمله پایانی معادله اتلافات موج تراهرتز در لایه‌های فلزی را توضیح می‌دهد که با فاکتور میرایی نمایی با ضریب میرایی معکوس موثر S_{THz} توصیف می‌شود.

با توجه به معادله (۱)، از روش‌هایی مانند انتخاب موادی با زاویه اسپین‌هال بزرگتر، بهینه‌سازی ضخامت لایه‌های فرومغناطیسی و غیرمغناطیسی، بهینه‌سازی ترابرد جریان اسپینی، بهبود فرایند پمپاژ اسپینی، بهبود فرایند تابش تراهرتز و افزایش انرژی پمپاژ برای بهبود شدت تابش تراهرتز می‌توان استفاده کرد.



شکل ۲. سازوکار امیتر تراهرتز اسپینترونیکی. (a) پالس لیزر فوق‌سریع، جریان اسپین‌قطبیده را تولید می‌کند و جریان اسپینی از طریق اثر اسپین‌مدار معکوس به جریان بار الکتریکی تبدیل می‌شود. (b) چگالی حالت اسپینی در Fe [۱۵].

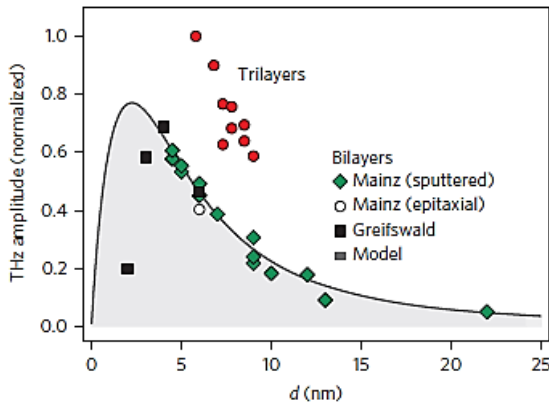
بیشترین سازوکار درگیر در تبدیل جریان اسپینی به جریان بار الکتریکی در امیتر اسپینترونیکی تراهرتز مبتنی بر اثر اسپین‌هال معکوس است. اثر اسپین‌هال معکوس، در واقع معکوس اثر اسپین‌هال است. الکترون‌های اسپین‌قطبیده به صورت نامتقارن به دلیل برهم‌کنش اسپین‌مدار منحرف می‌شوند، به طوری که یک جریان اسپینی خالص در ماده یک جریان بار الکتریکی عرضی تولید می‌کند. فلزات سنگین مثل Pt [۱۷] و W [۱۸] اثر اسپین-هال معکوس بزرگی دارند و به طور معمول در امیتر اسپینترونیکی تراهرتز استفاده می‌شوند.

۳- بهبود عملکرد امیتر تراهرتز اسپینترونیکی

در مقایسه با امیترهای تراهرتز استاندارد، از قبیل بلورهای نوری غیرخطی و سوئیچ‌های فوتوکاندکتیو، امیتر تراهرتز اسپینترونیکی برتری چشمگیری در پهنای باند بسیار گسترده از خود نشان می‌دهد به طوری که محدوده طیفی 0.3 تا 30 تراهرتز را بدون گاف پوشش می‌دهد [۱۹]. از این رو، این نوع از امیترهای تراهرتز مورد توجه قرار می‌گیرند. یکی از موضوعات کلیدی، بهبود دامنه تابش تراهرتز و بازده دستیابی به همین سطح از امیترهای تراهرتز استاندارد یا فراتر از آن است.

اگر بس ساختار^۱ فرومغناطیسی/غیرمغناطیسی (FM/NM) مبتنی بر اثر اسپین‌هال معکوس را در نظر بگیریم، دامنه تابش تراهرتز به زاویه هال لایه غیرمغناطیسی، جذب توان لیزر و ضخامت لایه فرومغناطیسی و غیرمغناطیسی بستگی دارد [۲۰].

۱-۳- انتخاب موادی با زاویه اسپین‌هال بزرگ‌تر



شکل ۴: وابستگی دامنه تراهرتز به ضخامت کل ساختار [۱۹].

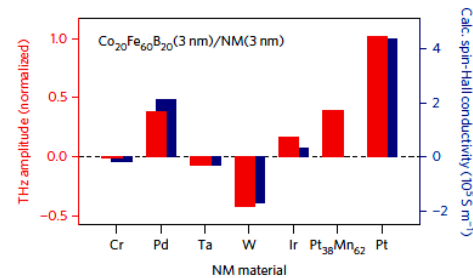
۳-۳- بهینه‌سازی ترابرد جریان اسپینی

ساختارهای دولایه‌ای FM/NM فقط از جریان اسپینی پیش‌رو^۱ استفاده می‌کنند. ساختارهای سه لایه‌ای $W/Co_{40}Fe_{40}B_{20}$ و Pt/W با بهره‌جستن از علامت‌های عکس زوایای اسپین‌هال W و Pt و ترکیب سازنده تابش تراهرتز با جریان‌های اسپینی پیش‌رو و به سمت عقب^۲، افزایش ۴۰ درصدی دامنه تراهرتز را نشان می‌دهند [۱۹]. در امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی با هندسه برهم‌کنش تبدالی ساختار پادفرومغناطیسی $Pt(2\text{ nm})/CoFeB(4\text{ nm})/Ru(0.8\text{ nm})/CoFeB(3\text{ nm})/Pt(2\text{ nm})$ ، وقتی جهت مغناطش دو لایه $CoFeB$ عکس هم هستند، تابش تراهرتز از دولایه Pt به طور سازنده نقش دارند. ویژگی‌های میکروساختاری شامل تبلور، زبری سطح و درآمیختگی سطحی^۳ بر عملکرد امیتر تراهرتز اسپینترونیکی تاثیر دارد [۲۱، ۲۲]. باز پخت نمونه‌ها عامل دیگری در افزایش تابش تراهرتز است که این افزایش را به افزایش مسیر آزاد میانگین الکترون‌های اسپین‌بالا λ_{up} نسبت می‌دهند. در واقع، بهبود تبلور بعد بازپخت، پراکندگی را متوقف کرده و بنابراین λ_{up} به اندازه چند نانومتر افزایش می‌یابد [۲۳].

۳-۴- بهبود فرایند پمپاژ اسپینی

جذب لیزر در ساختارهای دولایه‌ای و سه‌لایه‌ای نسبتاً محدود است و نمی‌تواند بزرگ‌تر از ۵۰ درصد در لایه فلزی با ضخامت چند نانومتر باشد. در ساختارهای بلور فوتونی فلز-دی‌الکترونیک

مواد غیرمغناطیسی متفاوت مانند Pt ، W ، Ta ، Ir و بسیاری دیگر برای بیشینه‌کردن خروجی تراهرتز بررسی شده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که دامنه تراهرتز متناسب با رسانندگی اسپین‌هال است [۱۹]. در این میان، Pt بالاترین دامنه تراهرتز را ارائه می‌دهد و قابل توجه است که تابش تراهرتز از W دارای علامت منفی است که ناشی از زاویه اسپین‌هال منفی است (شکل ۳).



شکل ۳: وابستگی دامنه تراهرتز به ماده غیرمغناطیسی [۱۹].

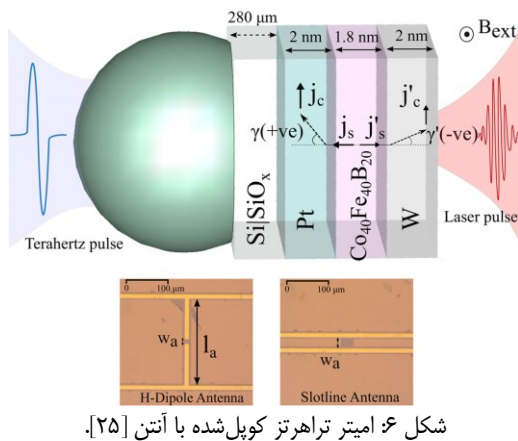
۲-۳- بهینه‌سازی ضخامت لایه‌های فرومغناطیسی و غیرمغناطیسی

همه جملات معادله (۱) به جز جمله نخست، به ضخامت لایه‌های فرومغناطیسی و غیرمغناطیسی بستگی دارد. دامنه تراهرتز با ضخامت لایه‌ها متناظر با جملات سوم و چهارم معادله (۱) افزایش می‌یابد، در حالی که متناظر با جملات دوم، پنجم و آخر کاهش می‌یابد. بنابراین، یک ضخامت لایه بهینه باید وجود داشته باشد تا تمام جملات معادله (۱) به بهترین تعادل برسند. در آزمایش‌ها، در ابتدا تابش تراهرتز با افزایش ضخامت لایه‌های فرومغناطیسی و غیرمغناطیسی افزایش می‌یابد (تا آنجا که لایه فرومغناطیسی از ضخامت لایه مرده تجاوز کند) [۲۰]. فراتر از ضخامت بهینه، تابش تراهرتز به تدریج کاهش می‌یابد. ضخامت بهینه برای هر دو لایه فرومغناطیسی و غیرمغناطیسی در حد چند نانومتر است (شکل ۴).

^۱ Forward
^۲ Backward
^۳ Interfacial intermixing

۳-۶- افزایش انرژی پمپاژ

راه دیگر برای افزایش چشمگیر دامنه تابش تراهرتز، استفاده از امیتر تراهرتز اسپینترونیکی با مساحت بالا برانگیخته شده با پالس‌های لیزر انرژی بالا است [۲۷]. برانگیختگی با پالس‌های پمپ نوری 5.5 mJ منجر به پالس‌های تراهرتز با میدان الکتریکی 300 kV/cm و انرژی پالس 5 nJ می‌شود.



شکل ۶: امیتر تراهرتز کوپل شده با آنتن [۲۵].

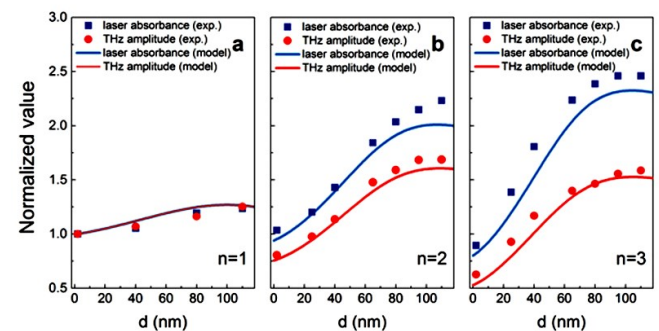
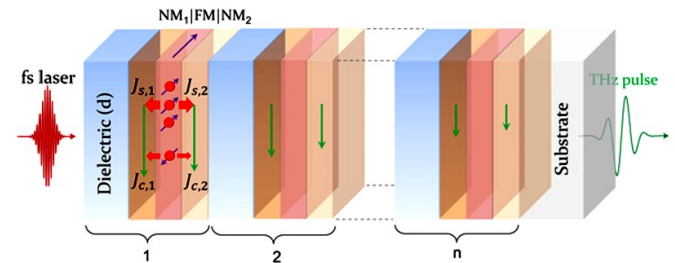
۴- تنظیم‌پذیری امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی

یکی از ویژگی‌های منحصر بفرد امیتر تراهرتز اسپینترونیکی، عدم وابستگی قطبش پالس‌های تراهرتز گسیل شده به جهت‌گیری پالس‌های لیزر فرودی قطبیده خطی یا ناهمسانگردی بلوری نانولایه‌ها است، که آن را از امیترهای تراهرتز متداول بدون فرایند اسپینی متمایز می‌کند. از طرفی قطبش پالس‌های تراهرتز همیشه عمود بر میدان مغناطیسی خارجی است. این موضوع یک درجه آزادی برای تنظیم تابش تراهرتز محسوب می‌شود و به تنظیم قطبش، دامنه و شکل خط طیف بستگی دارد.

۴-۱- چرخش قطبش

یکی از راهکارهای تنظیم امیترها، چرخش قطبش پالس‌های تراهرتز تولید شده با حفظ دامنه آن از طریق چرخش میدان مغناطیسی خارجی است. در یک حالت خاص، وقتی میدان مغناطیسی معکوس می‌شود، تابش تراهرتز اختلاف فاز π را تجربه می‌کند [۲۸]. از طرفی، وقتی امیتر تراهرتز اسپینترونیکی بین دو مگنت با پلاریته معکوس قرار می‌گیرد، قطبش چهار قطبی تولید می‌شود (شکل ۷) [۲۹]. در نتیجه، امواج تراهرتز

$[\text{SiO}_2/\text{Pt}/\text{Fe}/\text{W}]_n$ ، تداخل بین امواج پراکندگی چندگانه به طور هم‌زمان از بازتاب و عبور لیزر جلوگیری می‌کند و جذب را بهبود می‌بخشد؛ در نتیجه دامنه تراهرتز را در مقایسه با امیترهای Pt/Fe/W به اندازه ۱/۷ برابر بهبود خواهد داد (شکل ۵) [۲۴].

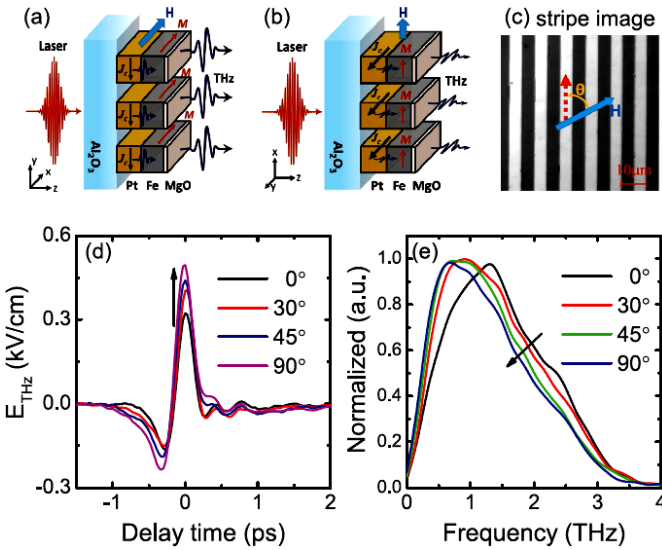


شکل ۵: ساختار بلور فوتونی فلز-دی الکتریک و سیگنال تابش تراهرتز ساختار [۲۴].

۳-۵- بهبود فرایند تابش تراهرتز

تلفیق امیتر تراهرتز اسپینترونیکی با مولفه‌های نوری با طراحی مناسب، می‌تواند فرایند تابش تراهرتز را بهبود بخشد. پرتوی تراهرتز به شدت واگرا، با چسباندن لنز سیلیکونی فرا-نیم‌کره‌ای^۱ به زیرلایه‌ی امیتر Fe/Pt هم‌راستا می‌شود [۲۰]. در امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی جفت شده با آنتن، نوع آنتن در افزایش دامنه تراهرتز تاثیرگذار است (شکل ۶) [۲۵]. همچنین، تابش تراهرتز در ساختار دولایه‌ای Co/Al تقریباً یک سوم تابش تراهرتز در ساختار Co/Pt است؛ اگرچه زاویه اسپین‌ها Al دو مرتبه کوچکتر از زاویه اسپین‌ها Pt است. زیرا وقتی ضخامت کمتر از 5 nm است، σ_{Al} خیلی کوچکتر از σ_{Pt} است و بنابراین، امپدانس بزرگتری برای بازده تابش تراهرتز بیشتر دارد [۲۶].

دامنه بالا می‌شود و برای دماهای بالاتر از دمای بحرانی، گشتاورهای دو لایه فری‌مغناطیسی هم‌راستا شده و منجر به جریان بار ناهم‌فاز و دامنه پایین می‌شود [۳۵].

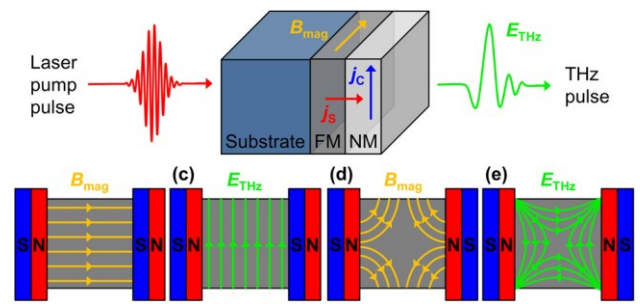


شکل ۸: تنظیم دامنه و شکل خط طیفی امیتر تراهرتز اسپینترونیکی طرح‌دار شده [۲۸].

در نمونه‌های طرح‌دار شده به صورت نوار، دامنه تراهرتز با تنظیم زاویه بین نوارها و میدان مغناطیسی از 90° به 0° و شکل خط طیفی با امیتر تراهرتز اسپینترونیکی طرح‌دار شده قابل تنظیم است؛ که به تجمع بار ناشی از ناپیوستگی نوار فلزی نسبت داده شده است، در نتیجه میدان الکتریکی مخالف تولید می‌کند و جریان بار الکتریکی اولیه را تغییر می‌دهد (شکل ۸) [۲۸].

امیتر تراهرتز اسپینترونیکی از طریق بایاس خارجی و پالس‌های لیزر هم مدوله می‌شود. در امیتر هیبریدی متشکل از هتروساختار فرومغناطیسی/غیرمغناطیسی با زیرلایه سیلیکونی با مقاومت بالا و الگوی سه سیمی با پد تماسی، تابش تراهرتز کل ناشی از هتروساختار فرومغناطیسی/غیرمغناطیسی و نیم‌رسانای بایاس شده است. دامنه تابش تراهرتز به اندازه دو مرتبه از طریق بایاس خارجی می‌تواند مدوله شود (شکل ۹) [۳۵]. هم‌چنین، دامنه و شکل خط طیفی با تحت تابش قرار دادن امیتر تراهرتز اسپینترونیکی با چند پالس لیزر فمتوثانیه قابل تنظیم است [۳۶].

قطبیده بیضوی تولید می‌شوند که تنظیم کایرالیته و زاویه سمتی در آن امکان‌پذیر است [۳۰]. یک روش برای تولید موج تراهرتز قطبیده، تلفیق امیتر تراهرتز اسپینترونیکی با المان‌های نوری تحت مثل تیغه‌ی موج، بلورهای مایع و سطوح متا است. در حالت تلفیقی امیتر تراهرتز اسپینترونیکی و بلورهای مایع با دوشکستی بالا، که اختلاف فاز در آن به طور پیوسته در گستره $[0, \pi/2]$ قابل تنظیم است، با چرخش میدان مغناطیسی خارجی، بیضویت تابش تراهرتز از 0 به 1 می‌تواند متغیر باشد [۳۱].



شکل ۹: کنترل قطبش امیتر تراهرتز اسپینترونیکی با استفاده از دو مغنت با پلاریته معکوس هم که قطبش چهارقطبی تولید می‌کند [۲۹].

۴-۲- تنظیم دامنه و شکل خط طیفی

دامنه‌ی تراهرتز تولید شده در امیتر تراهرتز اسپینترونیکی به مغناطش نمونه بستگی دارد که قطبش اسپینی را تعیین می‌کند. در عمل؛ امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی در یک شرایط بهینه عمل می‌کنند که در آن قطبش با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، کامل به اشباع می‌رسد. پیش از اشباع، با کاهش میدان مغناطیسی، دامنه تراهرتز افت می‌کند که به نوبه خود روش منعطفی برای تنظیم دامنه تراهرتز است [۳۲]. مواد فری-مغناطیس به جای مواد فرومغناطیسی می‌توانند در امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی به کار گرفته شوند. در این ساختارها، دامنه تراهرتز با مهندسی قطبش اسپینی خالص قابل تنظیم است که با تغییر کسری از Gd یا دما قابل فهم است [۳۳]. در امیترهای تراهرتز اسپینترونیکی مبتنی بر Pt و آلیاژ $Tb_x Fe_{1-x}$ ، با تغییر x محور آسان لایه TbFe تغییر می‌کند؛ در نتیجه قطبش خالص و دامنه تراهرتز تغییر می‌کند [۳۴]. افزون بر این، با تنظیم دما، دامنه تراهرتز به مقدار بیشینه و کمینه سوئیچ خواهد کرد. برای دماهای پایین‌تر از دمای بحرانی، گشتاورهای لایه مغناطیسی به صورت پادموازی قرار می‌گیرند و منجر به جریان بار هم‌فاز و

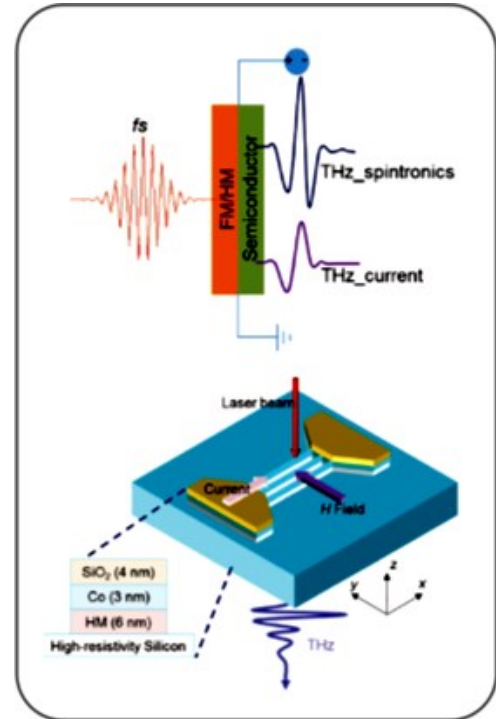
در ابتدا، ضخامت لایه Fe را ثابت فرض کردیم (15 nm) در حالیکه ضخامت لایه Pt از 0.1 تا 15 nm متغیر است. در مرحله بعد، ضخامت لایه Pt در 3.5 nm ثابت است و ضخامت لایه Fe از 1 تا 15 nm تغییر می‌کند. نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ثابت‌های استفاده شده برای بهینه‌سازی امیتر تراهرتز اسپینترونیکی در جدول ۱ خلاصه شده است [۳۷, ۳۸] و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است.

جدول ۱: پارامترهای ثابت استفاده شده در معادله ۱.

مقدار	ثابت
0.9 nm	d_0
0.3 nm	λ_{po}
2	n_{glass}
3.56	n_{sapphire}
3	n_{MgO}
3.65	n_w
$6 \cdot 10^6 \Omega^{-1} m^{-1}$	σ_{Fe}
$2 \cdot 10^6 \Omega^{-1} m^{-1}$	σ_{Pt}
1.40 nm	λ_{Pt}
22 nm	S_{THz}
377 Ω	Z_0

دامنه تراهرتز با افزایش ضخامت، ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که بهینه ضخامت لایه Pt برای بیشینه تولید تراهرتز بین 3 و 4 nm است. از ضخامت بهینه 3.5 nm لایه Pt برای تعیین بهینه ضخامت لایه Fe استفاده کردیم. برای ضخامت‌های پایین‌تر از 1.7 nm لایه Fe، کاهش در دامنه تراهرتز مشاهده می‌شود که نمی‌توان تنها به کاهش جذب نور پمپ نسبت داد. این کاهش در سیگنال را می‌توان به پخش اسپینی ناشی از لیزر و اتلافات ویژگی‌های مغناطیسی لایه Fe در ضخامت بحرانی d_0 نسبت داد.

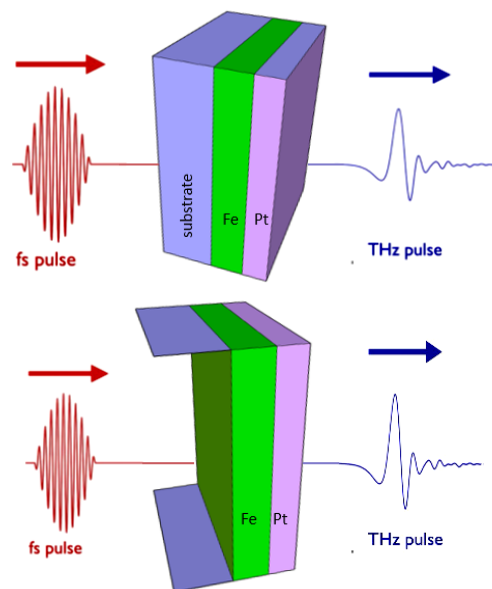
در نتیجه، دولایه‌ای Fe/Pt با ضخامت 1.7 nm برای Fe و 3.5 nm برای Pt، ساختار بهینه برای بیشینه‌شدن تولید تراهرتز است. نتایج مدل تئوری نشان می‌دهد که با حذف زیرلایه، بیشینه دامنه میدان الکتریکی تراهرتز افزایش می‌یابد و دولایه‌ای‌های لایه-نشانی‌شده بر روی زیرلایه‌های sapphire، glass و MgO به ترتیب دارای امواج تراهرتز قوی‌تری نسبت به زیرلایه تنگستن هستند. این حذف زیرلایه می‌تواند با استفاده از لیتوگرافی انجام شود تا بتوان بازدهی را افزایش داد.



شکل ۹: تنظیم دامنه و شکل خط طیفی امیتر تراهرتز اسپینترونیکی طرح‌دار شده با پد تماسی بر روی زیرلایه سیلیکونی [۳۵].

۵- نتایج و بحث

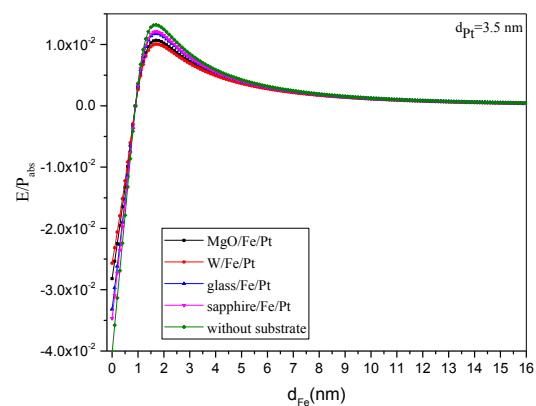
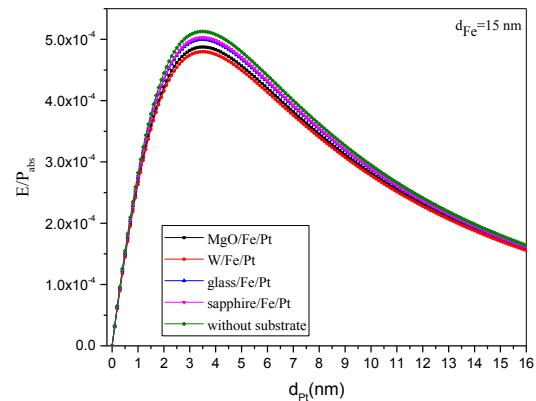
به منظور بهینه‌سازی امیتر تراهرتز، وابستگی دامنه تراهرتز به ضخامت لایه‌های Pt و Fe و تاثیر زیرلایه‌های glass، MgO، sapphire و W و همچنین، حذف زیرلایه بر میدان تابشی تراهرتز را بررسی کردیم. شکل ۱۰، ساختار مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: آرایش هندسی نمونه برای تولید تابش تراهرتز با وجود زیرلایه و حذف آن.

مراجع

- [1] K. B. Cooper and G. Chattopadhyay, "Submillimeter-wave radar: Solid-state system design and applications," IEEE microwave magazine, 15, 51-67, 2014.
- [2] I. F. Akyildiz, A. Kak, and S. Nie, "6G and beyond: The future of wireless communications systems," IEEE Access, 8, 133995-134030, 2020.
- [3] P. Salén, M. Basini, S. Bonetti, J. Hebling, M. Krasilnikov, A. Y. Nikitin, et al., "Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology," Physics reports, 836, 1-74, 2019.
- [4] Y. Peng, C. Shi, Y. Zhu, M. Gu, and S. Zhuang, "Terahertz spectroscopy in biomedical field: a review on signal-to-noise ratio improvement," PhotonIX, 1, 1-18, 2020.
- [5] P.U. Jepsen, D.G. Cooke, and M. Koch, "Terahertz spectroscopy and imaging—Modern techniques and applications," Laser & Photonics Reviews, 5, 124-166, 2011.
- [6] I. Mehdi, J. V. Siles, C. Lee, and E. Schlecht, "THz diode technology: status, prospects, and applications," Proceedings of the IEEE, 105, 990-1007, 2017.
- [7] L. John, A. Tessmann, A. Leuther, P. Neininger, T. Merkle, and T. Zwick, "Broadband 300-GHz power amplifier MMICs in InGaAs mHEMT technology," IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 10, 309-320, 2020.
- [8] R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H.E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, et al., "Terahertz semiconductor-heterostructure laser," Nature, 417, 156-159, 2002.
- [9] T. Nagatsuma, G. Ducournau, and C.C. Renaud, "Advances in terahertz communications accelerated by photonics," Nature Photonics, 10, 371-379, 2016.
- [10] S. Lepeshov, A. Gorodetsky, A. Krasnok, E. Rafailov, and P. Belov, "Enhancement of terahertz photoconductive antenna operation by optical nanoantennas," Laser & Photonics Reviews, 11, 1600199, 2017.
- [11] M. C. Hoffmann, K.-L. Yeh, J. Hebling, and K. A. Nelson, "Efficient terahertz



شکل ۱۱: بالا) وابستگی دامنه میدان تراهرتز به ضخامت Pt در ضخامت ثابت Pt (پایین) وابستگی دامنه میدان تراهرتز به ضخامت Fe در ضخامت ثابت Pt (ضخامتی که در آن، سیگنال پدل سمت بالا بیشینه است).

۶- نتیجه گیری

ما از تغییر ضخامت‌های لایه Fe و Pt برای بهینه‌سازی امیتر تراهرتز استفاده کردیم. با توجه به نتایج شکل ۱۱، نمونه‌هایی با ۱/۷ نانومتر Fe و ۳/۵ نانومتر Pt دارای بیشینه دامنه تراهرتز است. با حذف زیرلایه، امیتر Fe/Pt دارای بیشترین شدت میدان الکتریکی تراهرتز است. برای تعیین مقدار وابستگی دامنه تراهرتز به ضخامت لایه‌ها، از مدلی مبتنی بر جذب نوری در لایه‌های فلزی، تولید و پخش حامل‌ها در لایه Fe، تجمع اسپینی در لایه Pt و جذب تراهرتز در لایه Fe استفاده کردیم. بهینه‌سازی و مدل‌سازی تابش تراهرتز با ویژگی‌های مواد برای کاربردهای بیشتر این امیترها در فناوری کامپیوترها و جریان فوق‌سریع حیاتی است.

- intermixing," *Physical Review Materials*, vol. 3, p. 084415, 2019.
- [22] H. Qiu, K. Kato, K. Hirota, N. Sarukura, M. Yoshimura, and M. Nakajima, "Layer thickness dependence of the terahertz emission based on spin current in ferromagnetic heterostructures," *Optics express*, vol. 26, pp. 15247-15254, 2018.
- [23] Y. Sasaki, K. Suzuki, and S. Mizukami, "Annealing effect on laser pulse-induced THz wave emission in Ta/CoFeB/MgO films," *Applied physics letters*, vol. 111, p. 102401, 2017.
- [24] Z. Feng, R. Yu, Y. Zhou, H. Lu, W. Tan, H. Deng, et al., "Highly efficient spintronic terahertz emitter enabled by metal-dielectric photonic crystal," *Advanced Optical Materials*, vol. 6, p. 1800965, 2018.
- [25] U. Nandi, M. Abdelaziz, S. Jaiswal, G. Jakob, O. Gueckstock, S. M. Rouzegar, et al., "Antenna-coupled spintronic terahertz emitters driven by a 1550 nm femtosecond laser oscillator," *Applied Physics Letters*, vol. 115, p. 022405, 2019.
- [26] H. Zhang, Z. Feng, J. Zhang, H. Bai, H. Yang, J. Cai, et al., "Laser pulse induced efficient terahertz emission from Co/Al heterostructures," *Physical Review B*, vol. 102, p. 024435, 2020.
- [27] T. Seifert, S. Jaiswal, M. Sajadi, G. Jakob, S. Winnerl, M. Wolf, et al., "Ultrabroadband single-cycle terahertz pulses with peak fields of 300 kV cm^{-1} from a metallic spintronic emitter," *Applied Physics Letters*, 110, 252402, 2017.
- [28] D. Yang, J. Liang, C. Zhou, L. Sun, R. Zheng, S. Luo, et al., "Powerful and tunable THz emitters based on the Fe/Pt magnetic heterostructure," *Advanced Optical Materials*, 4, 1944-1949, 2016.
- [29] M. Hibberd, D. Lake, N. Johansson, T. Thomson, S. Jamison, and D. Graham, "Magnetic-field tailoring of the terahertz polarization emitted from a spintronic source," *Applied Physics Letters*, 114, 031101, 2019.
- [30] D. Kong, X. Wu, B. Wang, T. Nie, M. Xiao, C. Pandey, et al., "Broadband Spintronic Terahertz Emitter with Magnetic - Field Manipulated Polarizations," generation by optical rectification at 1035 nm," *Optics express*, 15, 11706-11713, 2007.
- [12] A. Schneider, M. Neis, M. Stillhart, B. Ruiz, R. U. Khan, and P. Günter, "Generation of terahertz pulses through optical rectification in organic DAST crystals: theory and experiment," *JOSA B*, 23, 1822-1835, 2006.
- [13] Y. You, T. Oh, and K. Kim, "Off-axis phase-matched terahertz emission from two-color laser-induced plasma filaments," *Physical review letters*, 109, 183902, 2012.
- [14] Q. Jin, J. Dai, Y. E, and X.-C. Zhang, "Terahertz wave emission from a liquid water film under the excitation of asymmetric optical fields," *Applied Physics Letters*, 113, 261101, 2018.
- [15] T. Kampfrath, M. Battiato, P. Maldonado, G. Eilers, J. Nötzold, S. Mährlein, et al., "Terahertz spin current pulses controlled by magnetic heterostructures," *Nature nanotechnology*, vol. 8, pp. 256-260, 2013.
- [16] T. S. Seifert, "Spintronics with Terahertz Radiation: Probing and driving spins at highest frequencies," 2018.
- [17] L. Wang, R. Wesselink, Y. Liu, Z. Yuan, K. Xia, and P. J. Kelly, "Giant room temperature interface spin Hall and inverse spin Hall effects," *Physical review letters*, vol. 116, p. 196602, 2016.
- [18] C.-F. Pai, L. Liu, Y. Li, H. Tseng, D. Ralph, and R. Buhrman, "Spin transfer torque devices utilizing the giant spin Hall effect of tungsten," *Applied Physics Letters*, vol. 101, p. 122404, 2012.
- [19] T. Seifert, S. Jaiswal, U. Martens, J. Hannegan, L. Braun, P. Maldonado, et al., "Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation," *Nature photonics*, vol. 10, pp. 483-488, 2016.
- [20] G. Torosyan, S. Keller, L. Scheuer, R. Beigang, and E. T. Papaioannou, "Optimized spintronic terahertz emitters based on epitaxial grown Fe/Pt layer structures," *Scientific reports*, 8, 1-9, 2018.
- [21] G. Li, R. Medapalli, R. Mikhaylovskiy, F. Spada, T. Rasing, E. Fullerton, et al., "THz emission from Co/Pt bilayers with varied roughness, crystal structure, and interface

- Advanced Optical Materials, 7, 1900487, 2019.
- [31] H. Qiu, L. Wang, Z. Shen, K. Kato, N. Sarukura, M. Yoshimura, et al., "Magnetically and electrically polarization-tunable THz emitter with integrated ferromagnetic heterostructure and large-birefringence liquid crystal," Applied Physics Express, 11, 092101, 2018.
- [32] R. Adam, G. Chen, D. E. Bürgler, T. Shou, I. Komissarov, S. Heidtfeld, et al., "Magnetically and optically tunable terahertz radiation from Ta/NiFe/Pt spintronic nanolayers generated by femtosecond laser pulses," Applied Physics Letters, 114, 212405, 2019.
- [33] M. Chen, R. Mishra, Y. Wu, K. Lee, and H. Yang, "Terahertz emission from compensated magnetic heterostructures," Advanced Optical Materials, 6, 1800430, 2018.
- [34] R. Schneider, M. Fix, R. Heming, S. Michaelis de Vasconcellos, M. Albrecht, and R. Bratschitsch, "Magnetic-field-dependent THz emission of spintronic TbFe/Pt layers," ACS Photonics, 5, 3936-3942, 2018.
- [35] M. Chen, Y. Wu, Y. Liu, K. Lee, X. Qiu, P. He, et al., "Current-Enhanced Broadband THz Emission from Spintronic Devices," Advanced Optical Materials, 7, 801608, 2019.
- [36] B. Wang, S. Shan, X. Wu, C. Wang, C. Pandey, T. Nie, et al., "Picosecond nonlinear spintronic dynamics investigated by terahertz emission spectroscopy," Applied Physics Letters, 115, 121104, 2019.
- [37] O. Panahi, B. Yahyaei, S. M. Mousavi, and A. M. Ghiasabadi, "High performance terahertz emitter based on inverse spin Hall effect in metallic Fe/Au heterostructure," Laser Physics, 30, 055001, 2020.
- [38] F. Sanjuan and J. O. Tocho, "Optical properties of silicon, sapphire, silica and glass in the terahertz range," in Latin America Optics and Photonics Conference, 2012.



Optimized Spin-Terahertz Emitters based on FM/NM Structures

S.M. Hosseini, S.M. Hamidi*, F.Jahangiri

Shahid beheshti University

Abstract: Terahertz electromagnetic emission is useful for many applications, including imaging and spectroscopy. In this paper, the emitter is optimized with respect to layer thickness by modeling the terahertz emission field. the effect of sapphire, glass, W and MgO substrates on the optimal thickness of the Fe/Pt spinterahertz emitter was investigated. The model used in this paper considers spin polarization, spin scattering and spin accumulation in Fe and Pt layers, and the electrical and optical properties of the layers.

Keywords: Terahertz emission, Spin current, Inverse Spin Hall effect, Optimized Spinterahertz emitter.