برپایی خودهمبسته‌ساز تداخلی فمتوثانیه به روش تولید هماهنگ دوم

صدیقه ملک‌محمدی [۱]، مهدی موسوی [۲]، امید پناهی [۳]، الهام نقدی [۴]، بهاره یحیایی [۵]، مهرداد خیرالهی [۶]، محمود سلطان الکتابی [۱]

[۱] گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان
[۲] گروه فیزیک، دانشگاه شیراز
[۳] پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی
[۴] گروه فیزیک، دانشگاه یاسوج
[۵] گروه شیمی فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا همدان
[۶] دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده –برپایی یک سامانه خودهمبسته ساز تداخلی برای اندازه‌گیری پهنای تپ لیزرتیتانیوم سفایر *۳۰fs* نشان داده شده است. سیگنال خودهمبستگی مرتبه دوم بر پایه تولید هارمونیک دوم با استفاده از بلور غیرخطی *BBO* با دقت مناسب اندازه‌گیری شده است.

کلید واژه- خودهمبسته ساز، تولید هماهنگ دوم.

Setup of Femtosecond Interferometric Auto-correlator Based on SHG

S. Malekmohamadi 1, M. Mousavi 2, O. Panahi 3, E. Naghdi 4, B. Yahyaei 5, M. Kheirolahi 6, M. Soltanolkotabi 1

1 Physics department, University of Isfahan, Isfahan, Iran
2 Physics department, University of Shiraz, Shiraz, Iran
3 Laser and Plasma Research Institution, Shahid Beheshti University
4 Physics department, University of Yasouj, Yasouj, Iran
5 Department of Physical Chemistry, Faculty of Chemistry, Bu-Ali Sina University
6 Department of Physics, Sharif University of Technology

Abstract- Design and manufacture of an Interferometric autocorrelator for a 30fs Ti:Sapphire laser is presented. Second-order autocorrelation signal based on second harmonic generation (SHG) has been detected with an appropriate accuracy.

Keywords: Auto-correlator, Second Harmonic Generation (SHG).

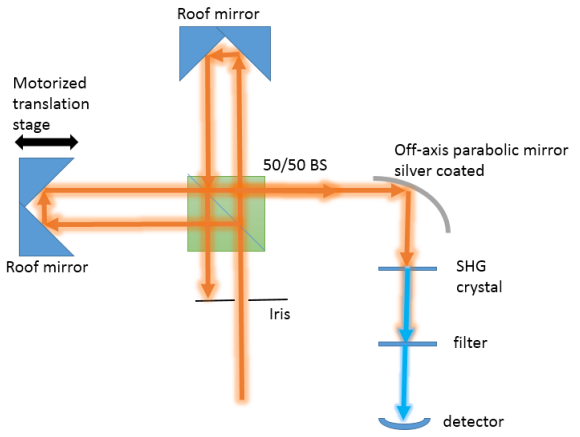
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت **www.opsi.ir** قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پیش از آنکه تپ‌های لیزر فمتوثانیه در آزمایش‌های گوناگون بکار برده شود لازم است که ویژگی تپ‌ها از جمله پهنای زمانی، نمایه، فاز و ویژگی‌های دیگر آنها مورد بررسی قرار گیرد. به دلیل اینکه مقیاس زمانی فمتوثانیه بسیار کمتر از زمان پاسخ سریعترین تجهیزات الکترونیکی است، باید تکنیک‌های اندازه‌گیری ویژه‌ای برای بررسی کامل دامنه و فاز میدان الکتریکی تپ‌ها طراحی شود. یکی از این روش‌ها سامانه خودهمبستگی‌ساز (Autocorrelator) است که بر مبنای تداخل‌سنج مایکلسون استوار است [۱]. در این مقاله روش طراحی و ساخت یک سامانه خودهمبستگی‌ساز تداخلی بر پایه تولید هارمونیک دوم (SHG) گزارش شده است.

۲- بررسی تولید هارمونیک دوم در بلور BBO

در یک خودهمبستگی‌ساز تداخلی توسط یک شکافنده پرتو ۵۰/۵۰ پرتو فرودی به دو بخش تقسیم می‌شود. مشابه تداخل‌سنج مایکلسون دو پرتو از دو بازو بازتاب می‌شود و در انتها بر روی یک بلور غیرخطی کانونی می‌شود. طول یکی از بازوها توسط موتور پله‌ای جاروب می‌شود و سیگنال خودهمبستگی بدست آمده توسط یک photo-multiplier به صورت تابعی از تاخیر زمانی Δt بین دو تپ آشکارسازی می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. طرحواره ای از خودهمبسته‌ساز تداخلی

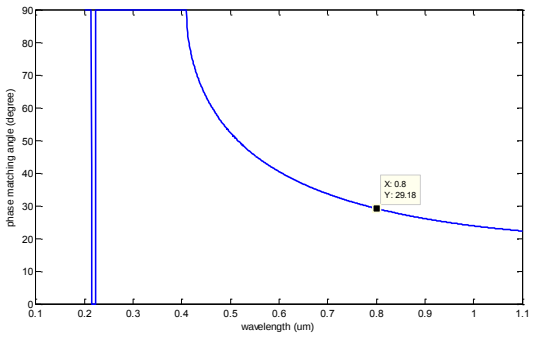
اساس تعیین ماندگاری تپ به این شکل است که یک شکل تپ را "فرض" می‌کنند (معمولا برای تپهای بدون چرپ و چرپ خطی، sech^2 یا یک شکل گاوسی را در نظر می‌گیرند) و ماندگاری تپ را از نسبت معین FWHM خودهمبستگی (auto-correlation) و پهنای تپ محاسبه می‌کنند[۲]. بلور BBOیک بلور تک محوری منفی است. بنابر این حالت های ممکن برای جور شدگی فازی در بلورهای تک محوری منفی را بررسی می‌کنیم. دو نوع جورشدگی فازی برای بلورهای تک محوری وجود دارد. نوع I که در آن قطبش دو موج ترکیب شونده یکسان و عمود بر قطبش موج هماهنگ تولید شده است (ooe و eeo). و نوع II که در آن قطبش دو موج ترکیب شونده بر هم عمود است(eoeیاoee و eooیاoeo). بلور BBO یک بلور تک محوری منفی است و در جورشدگی فازی نوع I فقط حالت ooe امکان‌پذیر است. رابطه این نوع جورشدگی فازی بصورت زیر است [۳].

$$\sin^2\theta_{pm}=\frac{(n^e_{2\omega})^2}{(n^o_{\omega})^2}\left[\frac{(n^o_{2\omega})^2-(n^o_{\omega})^2}{(n^o_{2\omega})^2-(n^e_{2\omega})^2}\right] \quad (۱)$$

که در آن ضرایب شکست عادی (o) و غیرعادی (e) از روابط سلمایر برای این بلور بدست می آید [۳]:

$$n_o^2=2.7359+0.01878/(\lambda^2-0.01822)-0.01354\lambda^2$$
$$n_e^2=2.3753+0.01224/(\lambda^2-0.01667)-0.01516\lambda^2$$

نمودار جورشدگی فازی این بلور را به ازای طول موجهای گوناگون در شکل زیر نشان داده‌ایم. با توجه به این نمودار زوایای جورشدگی در این بلور و در طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر برابر $\theta=29.18^\circ$ و $\varphi=0$ خواهد بود.



شکل۲. نمودار جورشدگی فازی بلور BBO نوع I (ooe)

برای پهنای بینابی مجاز نور دمش خواهیم داشت[۴]:

$$\Delta\nu_w=2\delta\nu_w=\frac{0.443}{\lambda_w L}\left[\frac{\partial n_{ow}}{\partial\lambda_w}-\frac{\partial n_{e2w}(\theta)}{\partial\lambda_{2w}}\right]^{-1} \quad (۲)$$

که L طول بلور غیرخطی است. برای طول‌موج‌های nm ۸۰۰=λ_w و nm ۴۰۰=λ_{2w} پهنای بینابی مجاز پرتوی دمشی برابر $\Delta\lambda_\omega L = 2\delta\lambda_\omega L = 2.023$ (nm mm) به دست آمد.

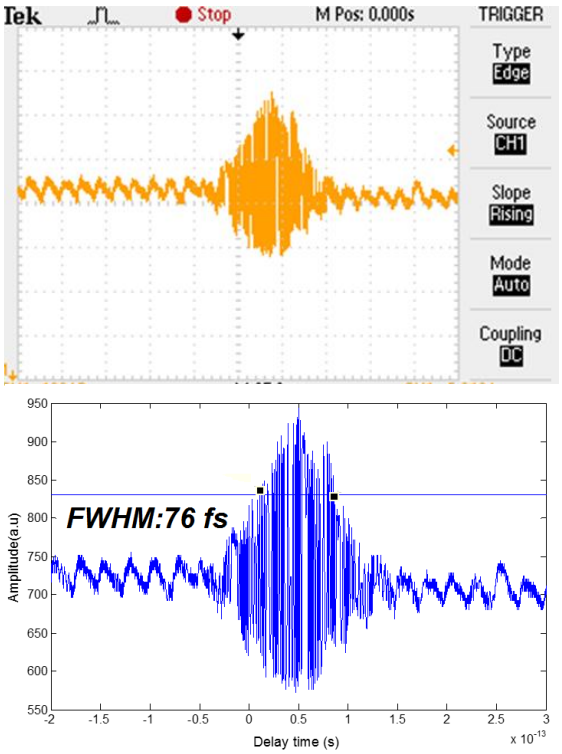
۳- چیدمان خودهمبسته ساز تداخلی

شکل ۱ طرح کلی چیدمان خودهمبسته‌ساز تداخلی طراحی شده را نشان می دهد. همانگونه که دیده می شود در این چیدمان در هر بازوی تداخل سنج از دو آینه استفاده شده است. در این چیدمان جلوگیری از برگشت نور لیزر درون خود لیزر بسیار اهمیت دارد. ازاین رو ما از دو آینه‌ی فلزی روف که سطح بارتابنده آنها با نقره لایه-نشانی شده بود استفاده کردیم. با توجه به اینکه نقره هم دارای بازتابندگی بالاتر در گستره ۷۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر و هم آستانه آسیب بزرگتری نسبت به آلومنیوم (۱۰ برابر بزرگتر از آلومنیوم) است از این لایه نشانی استفاده شد.

بلور BBO با ضخامت ۲۰۰میکرومتر نازکترین بلور موجود در آزمایشگاه برای تولید هارمونیک دوم (تولید نور آبی با طول‌موج مرکزی ۴۰۰) لیزر فمتوثانیه تیتانیوم سفایر با طول‌موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر و پهنای تپ ۳۰fs استفاده شد. برای انتقال نور لیزر درون چیدمان خودهمبسته ساز از آینه‌های بازتابنده نور ۸۰۰nm که قبلا اثرات پاشندگی آن‌ها را اندازه‌گیری کرده بودیم استفاده کردیم تا از اینکه این آینه‌ها بر پهنای تپ اثر قابل ملاحظه‌ای نداشته باشند اطمینان حاصل کنیم [۵].

لازم به ذکر است که این چیدمان بر اساس امکانات موجود در آزمایشگاه برپا شده است. در چیدمان و طرح اصلی تا جایی که ممکن است باید از تعداد ادوات اپتیکی که اثرات پاشندگی دارند کاست. این ادوات شامل شکافنده پرتو، آینه های اپتیکی غیر فلزی و عدسی هاست که همگی دارای اثرات پاشندگی بوده و منجر به تولید GVD: Group Velocity Dispersion مثبت و پهن شدن پهنای تپ لیزر می شوند.

باتنظیم دقیق و تغییر یکی از بازوها توسط موتور پله ای با سرعت پایین توانستیم فریزهای تداخلی را در حالتی که لیزر قفل بندی مدی شده بود بدست آوریم. برای اندازه گیری سیگنال Autocorrelation باید نوردر طول موج ۸۰۰ نانومتر را کاملا فیلتر کرده و فقط نور هارمونیک دوم آبی رنگ را آشکارسازی کنیم. برای این منظور از یک فیلتر نازک آبی استفاده کردیم که طول‌موج ۸۰۰nm را بطور کامل حذف می‌کرد. سپس با استفاده از photo multiplier tube توانستیم سیگنال خودهمبستگی را ثبت کنیم.



شکل ۳. سیگنال خودهمبستگی بر حسب تاخیر زمانی یکی از بازوها و FWHM سیگنال (شکل بالایی سیگنال ذخیره شده توسط اسکوپ و شکل پایین ترسیم همان سیگنال در MATLA است)

برای اندازه گیری پهنای تپ لیزر با استفاده از سیگنال اتوکورلیتور باید FWHM پوش بالایی را بدست آورده و با استفاده از رابطه $\tau_{ac}/\tau_{pulse}=1.41$ با فرض شکل تپ گاوسی و $\tau_{ac}/\tau_{pulse}=1.54$ برای تپ sech2 می توان پهنای تپ لیزر را محاسبه کرد.

FWHM سیگنال خودهمبستگی بر حسب تاخیر زمانی برابر ۷۶fs محاسبه شد. با فرض گاوسی بودن شکل پالس، پهنای تپ لیزر محاسبه شده به این روش برابر ۵۴ fs و بافرض sech^2 برابر ۴۹fs است.

بیشتر المان‌های اپتیکی دارای اثری به نام پاشندگی سرعت گروه (GVD: Group Velocity Dispersion) هستند که این اثر باعث می شود بسامدهای نوری تشکیل

دهنده تپ لیزر فمتوثانیه دچار تغییر سرعت گروه شده و بنابر این یک بسامد نسبت به دیگری جلو یا عقب بیافتد. این اثر منجر به پهن شدن تپ لیزر فوق‌کوتاه می شود. بنابراین تصحیحات لازم در اندازه‌گیری تپ لیزر ناشی از این اثر باید انجام شود.

می‌توان میزان پهن‌شدگی تپ لیزری در اثر عبور از المان اپتیکی را بصورت زیر بیان کرد[۲]:

$$\frac{\Delta t}{L}=\frac{K\lambda^2}{\pi c^2}\frac{\left[1+\sum_i\left(B_i\lambda/\lambda^2-C_i\right)\right]^{3/2}}{\sum_j\left(B_jC_j\lambda/\left(\lambda^2-C_j\right)^2\right)} \qquad (۳)$$

که $i,j=1,2,3$ ضرایب B و C در جدول زیر داده شده است:

جدول ۱: ضرایب B و C

coefficient	BK7	Fused silica
B1	1.03961212	0.683740494
B2	0.2317923441	0.420323613
B3	1.01046945	0.58502748
C1	0.000698671	0.00460352869
C2	0.0200179144	0.0133968856
C3	103.560653	64.4932732

با استفاده از رابطه بالا برای سه جنس مختلف جدول زیر بدست می آید:

جدول ۲. میزان پهن‌شدگی تپ لیزر ۳۰ فمتوثانیه برای سه نوع ماده گوناگون

Material	Spread(fs/cm)
BK7	5.1
SF11	10.86
Fused silica	4.86

پس با استفاده از جدول بالا میزان پهن‌شدگی تپ لیزر برای شکافنده پرتو با ضخامت ۲ سانتیمتر و طول انتشار ۳سانتیمتر برای نور و جنس BK7 برای پهنای تپ اولیه ۳۰ فمتوثانیه برابر ۱۵ فمتوثانیه محاسبه می شود. با این محاسبات میزان پهنای تپ لیزر برابر ۳۹ فمتوثانیه با فرض تپ گاوسی و ۳۴ فمتوثانیه با فرض تپ sech^2 بدست می‌آید. نکته بسیار مهم که باید به آن دقت کنیم حضور بلور BBO با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر در چیدمان است. این بلور با این ضخامت برای برآورده کردن شرط جورشدگی فازی یک لیزر با پهنای تپ نزدیک ۹۵ فمتوثانیه مناسب است. برای یک لیزر ۳۰ فمتوثانیه با فرض شکل تپ گاوسی این ضخامت باید برابر ۶۵ میکرومتر باشد. بنابراین برای تپ‌های باریکتر که معادل پهنای طول‌موج بالاتری است، این بلور بخشی از اطلاعات طیف تپ را به دلیل برآورده نشدن جورشدگی فازی برای کل پهنای طیفی از دست می‌دهد. در حقیقت این تنها بلور موجود در آزمایشگاه بود که برای لیزر ۳۰ فمتوثانیه مناسب نیست. بنابراین پهنای تپ بدست آمده در این چیدمان بزرگتر از مقدار واقعی آن است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش طراحی و ساخت یک سامانه خودهمبسته ساز تداخلی نشان داده شده است. برای تولید موثر هارمونیک دوم لیزر پهنای باند تیتانیوم سفایر فمتوثانیه، طول بلور باید بگونه‌ای برگزیده شود که شرط جورشدگی فازی به ازای تمام پهنای باند برآورده شود. ضخامت نازک بلور منجر به کاهش شدید بازده هارمونیک دوم شده بنابراین نور آبی تولید شده باید توسط یک آشکارساز چندفوتونی دریافت شود. در این مقاله با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه پهنای تپ لیزر ۳۰fs با دقت مناسبی اندازه‌گیری شده است.

مراجع

[1] Jens Möhring, Tiago Buckup, C. Stefan Lehmann, and Marcus Motzkus, "Generation of phase-controlled ultraviolet pulses and characterization by a simple autocorrelator setup", JOSA B, Vol. 26, Issue 8, pp. 1538-1544, 2009.

[2] C. Rulli`ere, *Femtosecond laser pulses: principles and experiments*, P. 300, New York: Springer Science Business Media, 2005.

[3] R. L. Sutherland, D. G. McLean, and S. Kirkpatrick, *Handbook of nonlinear optics*, CRC, 2003.

[4] G. Gurzadian, D. N. Nikogoskilan, and V. G. Dmitriev, *Handbook of nonlinear optical crystals*, p. 106, Springer-Verlag, 1999.

[۵] ص. ملک محمدی، ح. سلطانی و دیگران، "اندازه‌گیری پاشندگی تاخیر گروه آینه‌های پاشنده توسط تداخل‌سنج فابری پرو"، ۲۱امین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۱۳۹۳.