

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۱، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۰

### تداخلسنجى با استفاده از يک گوهٔ شفاف

محمدتقي توسلي'، کتايون سماواتي'، حجت الله سليماني'، حميد سلوداري' و خسرو حسني'

دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه تهران، تهران
 گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران
 ۳. گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام، ایلام

پست الكترونيكي: k\_samavati@iau-tnb.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۴/۱۶ / ۱۴۰۰/۱۴)

### چکیدہ

در این مقاله نشان میدهیم که از یک گوهٔ شفاف یا تیغهٔ تخت گوهدار میتوان به جای یک تداخلسنج با کاربردهای متعدد استفاده کرد. با استفاده از این تداخلسنج میتوان توزیع فاز را بر روی فریزهای تداخلی تحریر (مدوله) کرد و با استفاده از آن، به طور کمی، موازی بودن باریکهٔ نوری و ابیراهی جبههٔ موج را اندازه گرفت. همچنین برای تعیین شکل خط طیفی در گسترهٔ وسیع، اندازه گیری طول موج و ضریب شکست جامدات و مایعات میتوان از این تداخلسنج استفاده کرد. به علاوه با این وسیله میتوان باریکههای مناسب نور برای انجام تمام نگاری (هولو گرافی) و مطالعهٔ اجسام فازی و ساخت توریهای پراش ایجاد کرد.

**واژههای کلیدی**: تداخلسنجی، اندازه گیری، تقسیم باریکه، تحریر فریز، تکنیک ماره

### ۱. مقدمه

تداخلسنجی یک روش اندازه گیری اپتیکی شناخته شده با کاربردهای زیاد است [۱و۲]. تداخلسنجی بر اساس تداخل دو یا چند موج حاصل از تقسیم یک موج انجام می گیرد. تقسیم موج با تقسیم جبههٔ موج و یا با تقسیم دامنهٔ موج انجام می شود. از تقسیم جبههٔ موج در تداخلسنجهایی مثل دو شکافی یانگ، دو آینهٔ فرنل، و دو منشوری فرنل استفاده می شود [۳و۴]. این دستگاهها ساده هستند اما میدان تداخلی باریکی دارند و تعداد فریزهای تداخلی آنها کم است و کاربردهای محدودی دارند.

تقسیم دامنه در بسیاری از تداخلسنجها، مثل تداخلسنج مایکلسون، تداخلسنج ماخ زندر و تداخلسنجهای برشی استفاده میشود [۳، ۵]. میدان تداخلی این ابزارها به دلخواه میتواند پهن باشد و میتوان با آنها توزیع فاز در اجسام فازی را اندازه گرفت و کاربردهای بسیاری دارند [۶ و ۷]. ساختار آنها پیچیده است، اکثر آنها به ارتعاشات مکانیکی حساساند، برای تداخلسنجی با چشمههای نوری با طول همدوسی کم مناسب نیستند و در عمل تعداد کمی از فریزها را پوشش میدهند.

جلد ۲۱، شمارهٔ ۴



**شکل۱.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) وقتی باریکهٔ موازی نور از داخل و بالای یک گوهٔ شفاف عبور میکند به دو جبهه موج تداخل کننده با اختلاف فاز معین در دو سمت قاعدهٔ گوه تقسیم میشود و (ب) همچنین، تاباندن باریکهٔ موازی نور به یک PWP شفاف دو جبهه مـوج تـداخل کننده ایجاد میکند که منشأ آن تغییر ناپیوسته در شیب فاز موج فرودی است.

فرود باریکهٔ موازی نور بر PWP تعداد زیادی فریز خطی با اندرفریزهای مساوی ایجاد میکند که این فریزها می توانند با توزیع فاز اعمال شده روی باریکههای تداخل کننده تحریرشوند. توزیع فاز اعمال شده باعث تغییر در فاصله و جهت فریزهای تداخلی می شود که برای اندازه گیری آنها می توان از فریزهای ماره در حالت تکینگی استفاده کرد [۱۸ و ۱۹]. دراین گزارش نشان می دهیم که تیغه شفاف گوهدار یا PWP می تواند به جای یک تداخلی سنج که به آسانی قابل استفاده است و کاربردهای جالبی دارد به کار رود.

### ۲. رهیافت نظری

وقتی دو طرف قاعدهٔ یک گوهٔ شفاف مطابق شکل ۱. ال.ف، با باریکهٔ نور موازی روشن می شود، دو جبهه موج با مرز مشترک ایجاد می شود. زاویهٔ بین جبهه های موج با زاویهٔ رأس و ضریب شکست گوه،  $\alpha$  و N، مرتبط است. اختلاف فاز میان جبهه های موج در مرز مشترک دو موج برابر با جبهه های موج در مرز مشترک دو موج برابر با و طول قاعدهٔ گوه است. به منظور مشاهدهٔ فریزهای تداخلی با نورهایی که طول همدوسی کوتاهی دارند، PWP جایگزین گوه شده است (شکل ۱. ب). در این حالت اختلاف فاز روی صفحهٔ نیمساز دو جبهه موج صغر است. در شکل ۲ رد چنین

اخیرا کاربردهای پراش فرنل از پلهٔ فازی مورد توجه قرار گرفته است [۸-۱۷]. پلهٔ فازی جسمی است که باعث تغییر ناپیوسته در فاز یا شیب فاز در بخشی از یک باریکهٔ همدوس میشود. به عنوان مثال وقتمی باریکهٔ موازی نور از یک پلهٔ فیزیکی بازتاب پیدا میکند یا از بالا و داخل یک گوهٔ شفاف عبور مي كند (شكل ١. الف)، تغييرات ناپيوسته در فاز را تجربه میکند، اما وقتی باریکه از داخل یک تیغهٔ شفاف گوهدار ا (PWP) (شکل ۱. ب) عبور میکند تغییر ناپیوسته در گرادیان فاز رخ میدهد. این تغییرات، باریکهٔ فرودی را به دو جبهه موج پراشیدهٔ تداخل کننده با مرز مشترک تقسیم میکند. این نوع تقسیم موج برتری های ویژهای دارد و می تواند در تداخل سنجى مورد استفاده قرار گيرد. به عنوان مثال تـداخلسـنجى بـا PWP آسان است و مزایای متعددی دارد. اندازهٔ میدان تـداخلی با انتخاب PWP با اندازه و زاویهٔ مناسب، به طور دلخـواه قابـل تنظیم است. همچنین در این حالت دامنههای دو موج به کار رفته در تداخل با هم برابرند، بنابراین فریزهای تداخلی حاصل نمایانی خوبی دارند و تغییرات فاز با دقت بالا قابل اندازه گیری است. با توجه به این که تنها یک قطعهٔ اپتیکی در این تداخل-سنج به کار میرود، ارتعاشات مکانیکی در آن قابل چشمپوشسی است. همچنین، استفاده از نورهای با طول همدوسی کوتاه در این تداخلسنج در مقایسه با دیگر تداخل سنجها آسانتر است.

<sup>1.</sup> Plate with a wedge part



**شکل ۲.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) تقاطع جبهههای موجی که از دو طرف قاعدهٔ گوه پدیدار می شوند با صفحهٔ فرود نور بر گوه با Σ<sub>۱</sub> و Σ<sub>۲</sub> نشان داده شده است. در (الف) صفحهٔ مشاهده موازی با جبهه موج Σ<sub>۱</sub> و در (ب) عمود بر نیمساز زاویهٔ میان Σ<sub>۱</sub> و Σ<sub>۲</sub> است.

و

 $\gamma =$ 

9

یا

$$V_{1} = \frac{\sqrt{r}x}{\sqrt{\lambda R}}, \qquad V_{r} = \frac{\sqrt{r}\left(R\sin\gamma - x\cos\gamma\right)}{\sqrt{\lambda\left(R\cos\gamma + x\sin\gamma\right)}}, \qquad (\mathcal{P})$$

$$\varphi = \varphi_{*} + \frac{r\pi}{\lambda} \Big[ R \big( 1 - \cos \gamma \big) + x \sin \gamma \Big], \tag{V}$$

برای PWP، « صفر است و ما در ادامهٔ گزارش این حالت را در نظر می گیریم. برای طرح نشان داده شده در شکل ۲. ب، که صفحهٔ مشاهده عمود بر نیمساز زاویهٔ بین ,Σ و ,Σ است، معادلهٔ (۴) معتبر است؛ اما معادلات (۶) و (۷) با معادلات زیر جایگزین می شوند [۱۴]:

$$V_{\gamma} = \frac{r(R\sin\theta + x\cos\theta)}{\sqrt{r\lambda(R\cos\theta - x\sin\theta)}}, \quad V_{\gamma} = \frac{r(R\sin\theta - x\cos\theta)}{\sqrt{r\lambda(R\cos\theta + x\sin\theta)}},$$
(A)

$$\varphi = \frac{\epsilon \pi}{\lambda} x \sin \theta, \tag{9}$$

$$\Delta x = \frac{\lambda}{r \sin \theta} \quad ,$$

$$\rho = \frac{\lambda}{r \sin(\gamma/r)} . \tag{10}$$

با کمک مارپیچ کورنو درمییابیم که، بـرای |۷| و |۷| هـای بزرگ، مثلاً بزرگتر از ۱۰، اثرات پراش قابل اغماض هسـتند و جبهههای موجی روی صفحه عمود بر خط رأس گوه با Σ<sub>۱</sub> و Σ<sub>۲</sub> نشان داده شده است. جبهههای موج با هم زاویهٔ γ–π میسازند که درآن γ زاویهٔ میان باریکههای خروجی است. با استفاده از قانون شکست در سطح سمت راست گوه (شکل ۱. الف) داریم:

$$\sin\beta = N\sin\alpha,\tag{1}$$

و

$$\gamma = \beta - \alpha, \tag{(1)}$$

$$(N-1)\alpha,$$
 (m)

دامنهٔ موج در نقطهٔ P به فاصلهٔ آن نقطه از مرزهای اپتیک هندسی دو باریکه [ OZ و OZ]، یعنی  $PH_1$  و  $PH_1$  بستگی دارد. اختلاف فاز در نقطهٔ P با  $(\rho = \varphi_* + k(R - OH_{\gamma}) + \varphi = \varphi_*$  نشان داده می شود، که R و  $\gamma HO$  فاصلهٔ نقطهٔ P از  $\Sigma_1$  و  $\gamma_2$ است. با در نظر گرفتن اثر پراش، جمع دامنههای امواج در نقطهٔ P به صورت زیر در می آید [۱۴]:

$$U_P(x) = \frac{A(i-i)}{r} e^{ikR} \left\{ \left[ \left( \frac{1}{r} + C_1 \right) + i \left( \frac{1}{r} + S_1 \right) \right] + e^{i\varphi} \left[ \left( \frac{1}{r} + C_r \right) + i \left( \frac{1}{r} + S_r \right) \right] \right\}$$
(\*)

که A دامنهٔ موج فرودی است و

$$C_j + iS_j = \int_{\circ}^{V_j} e^{\frac{i\pi v'}{r}} dv, \qquad j = 1, r$$
 ( $\Delta$ )

انتگرال فرنل است با حدود زیر:

جلد ۲۱، شمارهٔ ۴

#### محمدتقی توسلی، کتایون سماواتی، حجت الله سلیمانی، حمید سلوداری و خسرو حسنی



**شکل ۳.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) حداکثر عرض میدان تداخل یک PWP با پارامترهای ارائه شده، در حدود AB است.

می توان <sub>C</sub> و <sub>S</sub> را برابر ۲/۲ گرفت. در این حالت معادلهٔ (۴) به شکل سادهٔ زیر در می آید:

$$U_{P} = A e^{ikR} \left( 1 + e^{i\phi} \right), \tag{11}$$

که همان رابطهٔ آشنای مربوط به تداخل دو موج تخت بی نهایت بزرگ است. برای به دست آوردن معیاری از بزرگی میدان تداخلی، تعداد فریزها و محدودهٔ اختلاف فاز، PWP در شکل ۳ را در نظر می گیریم. میدان تداخلی از نقطهٔ O شروع می شود و در فاصلهٔ R از PWP به مقدار بیشینهٔ A می رسد. می شود و در فاصلهٔ R از PWP به مقدار بیشینهٔ A می رسد. بیشینه اختلاف راه نوری در نقطهٔ A برابر با  $\gamma$  می دهد. برای بیشینه اختلاف راه نوری در محدودهٔ B جای می دهد. برای که تعداد  $\lambda = 0$  می داد د محدودهٔ R جای می دهد. برای فریز در فاصلهٔ n = 4 - 0 و n = 0 - 0 - 0 حدود 0 - 0بیشینه برابر با طول همدوسی نور است با پهنای خط بیشینه برابر با طول همدوسی نور است با پهنای خط ما حدود  $\alpha$  و  $\alpha = 0$  م ما حدود معدوری  $\alpha = 0$ 

# ۳. برخی از کاربردها

۳. ۱. تحریر فریزهای تداخلی

با فرود باریکهای موازی و شبه تکفام بر PWP، انتظار داریم که تعداد زیادی فریز خطی هم فاصله، موازی با خط تقاطع باریکههای خارج شده مشاهده کنیم. تغییر در زاویهٔ میان باریکهها باعث تغییر در اندرفریز، و تغییر در جهت خط

تقاطع باعث تغيير جهت فريزها مىشود. تغيير دوم زمانى رخ میدهد که پرتوهای فرودی موازی نباشند. بنابراین تغییرات در صفحهٔ جبهه موج فرودی، فریزهای تداخلی خطی PWP را تحرير ميكند. در واقع با محاسبهٔ تبديل فوريـه از نقـش تداخلی، تغییرات از نوع دوم به دست می آیند و از آنجا می-توان جبهه موج تابشی را بازسازی کرد. با این حال، یک روش جایگزین برای تعیین تغییرات از نوع دوم با دقت بالا، به کارگیری تکنیک ماره است [۱۸-۲۱]. وقتی دو توری دامنهای خطی با گام مساوی یا تقریباً مساوی با زاویهٔ کوچکی میان خطوطشان بر روی هم قرار میگیرند فریزهای مارهٔ خطی مشاهده می شود. در حالت کلی وقتی یک تـوری خطی بر روی توری مشابهی دارای تغییرات آهسته در پارامترهای توری قرار میگیرد، در حالت تکینگی فاز، فریزهای مارهای ظاهر می شوند که فاصله و جهت آنها به تغییرات پارامترهای توری بسیار حساس است [۱۹]. منظور ما از حالت تکینگی فاز، حالتی است که وقتی دو تـوری بـا گامهای دقیقاً مساوی برهمنهی میشوند هیچ فریز مارهای ظاهر نمی شود. در رابطه با فریزهای تداخلی PWP، برای ۷ و ۸ داده شده، برهمنهی توری تداخلی شبیهسازی شده با اندر فریزهای داده شده با رابطهٔ (۱۰) روی نقس تداخلی حاصل از آزمایش، در حالت تکنیگی فاز، فریزهای مارهای ایجاد می کند که در اثر تغییرات فریزهای تداخلی است. اگر فریزهای ماره ظاهر نشوند یا فریزهای با گام مساوی ایجاد شود، نشان میدهد که باریکههای به کار رفته در آزمایش

#### جلد ۲۱، شمارهٔ ۴

693

Archive of SID.ir

موازیاند. ظهور فریزهای ماره با گام متفاوت بیانگر این است که باریکههای فرودی موازی نبودهاند. تغییر در اندازهٔ زاویهٔ باریکه [۲] در محدودهٔ اندرفریزهای ماره، برابر است با نسبت اندرفریز تداخلی به گام فریزهای ماره ضربدر زاویهٔ متوسط باریکه. بنابراین توازی باریکهٔ فرودی را می توان با دقت بالا و به طور کمی ارزیابی کرد. فریزهای مارهای که در حالت تكينگى فاز ايجاد مىشوند نسبت به تغييرات فريزهاى تداخلی بسیار حساس تر از فریزهای ماره معمولی هستند که در حالت تداخل سنجی برشی به کار میروند [۲۲]. رهیافت فریزهای ماره برای اندازه گیری دقیق فاصلهٔ کانونی و ابیراهی جبها ما مرج (شامل ابیراهی رنگی) یک دستگاه تصویربردار، قابل استفاده است. در حقیقت با ارزیابی نتایج فریزهای ماره می توان جبهه موج فرودی را بازسازی کرد. علاوه بر این، با یادآوری این موضوع که تجزیه و تحلیل فریزهای تداخلی دو موج ناشناخته در دو یا چنـد محـل در فضا موجب بازسازی جبهه موج میشود [۲۳-۲۶]، یک PWP به سادگی می تواند برای بازسازی جبهه موج فرودی نامشخص با تغییر محل تشکیل تصویر (CCD) به کار رود. همچنین با قرار دادن یک شی فازی در جلوی قسمت تخت PWP، تغییرات توزیع فاز مرتبط با استفاده از تکنیک ماره در حالت تكنيكي قابل استفاده است. به علاوه، مي توان از PWP با اندازه و زاویهٔ رأس مناسب بـرای سـاخت تـوری پـراش خوب استفاده کرد. در ضمن، از جبهههای موج تختی که از PWP خارج می شوند می توان به جای جبهه های موج مرجع وشیئی در مطالعهٔ تمام نگاری اجسام فازی استفاده کرد.

### ۳. ۲. تعیین شکل خط طیفی

برای تعیین شکل خط طیفی از PWP شکل ۲. ب استفاده میکنیم که صفحهٔ مشاهده عمود بر صفحهٔ نیمساز جبهه موجها است. در این حالت اختلاف راه نوری در امتداد صفحهٔ x صفر است، ولی مطابق رابطهٔ (۹) با افزایش x به طور خطی افزایش مییابد. بنابراین با تاباندن باریکهٔ نوری با طول همدوسی کوتاه بر PWP، فریزهایی در صفحهٔ موازی با صفحهٔ

y مشاهده می کنیم که نمایانی آنها به طور متقارن کاهش می یابد. با رسم توزیع شدت بهنجار شده فریزها بر حسب x، و محاسبهٔ تبدیل فوریهٔ آن، شکل خط طیفی معین می شود [۲۷]. همانطور که در مثال عددی بند آخر بخش ۲ نشان دادیم، برای همانطور که در مثال عددی بند آخر بخش ۲ نشان دادیم، برای T mm T = a و  $\gamma = \gamma$  می توان پهنای خط طیفی تا حد nm /۱۰ را تعیین کرد. استفاده از این تکنیک بسیار ساده است، تنها نیاز به ثبت یک نقش تداخلی است و اغتشاشات مکانیکی موجود در روش های متداول تداخل سنجی در آن تأثیر ندارد.

۳.۳ اندازه گیری طول موج و ضریب شکست

می توانیم از PWP برای اندازه گیری ضریب شکست و طول موج استفاده کنیم. ابتدا به قسمت گوهٔ شکل PWP یک باریکهٔ موازی نور می تابانیم و زاویهٔ میان باریکهٔ نور فرودی و باریکهٔ نور شکسته،  $\gamma$ ، را مطابق شکل ۳ به دست می آوریم. بعد قانون شکست نور را به کار می بریم.

 $N = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha},\tag{11}$ 

با قرار دادن $eta = (\alpha + \gamma),$  (۱۳)

و با استفاده از زاویهٔ ۵ داده شده، ضریب شکست را به دست می آوریم. برای زوایای کوچک رابطهٔ (۱۲) می شود:

 $N = \left( l + \frac{\gamma}{\alpha} \right). \tag{14}$ 

برای α معلوم، دقت N با دقت اندازه گیری γ مشخص می شود. همچنین با داشتن یک منبع نور با طول موج معلوم و اندازه گیری اندرفریز و با استفاده از معادلهٔ (۱۰) زاویهٔ γ با دقت بالا تعیین می شود. بنابراین با ساخت یک PWP از مادهٔ شفاف، می توان ضریب شکست و پاشندگی را با دقت بالا به دست آورد.

برای اندازه گیری طول موج نور، اندرفریز  $\rho$  را اندازه می گیریم و  $\gamma$  و  $\rho$  را در معادلهٔ (۱۰) قرار می دهیم. در این روش دقت اندازه گیری  $\Lambda$  به دقت اندازه گیری  $\gamma$  و  $\rho$  مرتبط می شود. با تجهیزات عادی می توان به راحتی طول موج را با دقت ۳ یا ۴ رقم با معنی مشخص کرد.

جلد ۲۱، شمارهٔ ۴

#### محمدتقی توسلی، کتایون سماواتی، حجت الله سلیمانی، حمید سلوداری و خسرو حسنی



**شکل ۴.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرح برای ردیابی پرتوها در PWP قرارگرفته در ظرف مکعب مستطیل شکل حاوی آبگون.

$$N' = N - \frac{\lambda}{\rho' \alpha},\tag{11}$$

مطابق معادلهٔ (۱۸) بـرای N و x داده شـده، بـا انـدازهگیـری اندرفریزها، 'م ضریب شکست آبگون به دست می آیـد. دقـت N' بستگی به دقت اندازهگیری 'م دارد که این دقت در میدان تداخلی وسیع، بسیار بالا است.

### ۴. مطالعات تجربي

### ۱.۴. ارزیابی توازی باریکه

مطابق شکل ۵ با استفاده از یک شیئی میکروسکوپ 0، یک روزنهٔ *P*، و یک عدسی *L* با فاصلهٔ کانونی حدود mm ۵۰۰ از نور لیزر He-Ne یک باریکهٔ موازی و پهن ایجاد کردیم. نور را از داخل PWP با زاویهٔ رأس '۳۲, <sup>°</sup>۲ = ۵ که از شیشه BK7 با ضریب شکست N=۱/۵۱۵۱ ماخته شده است عبور دادیم و الگوی تداخلی حاصل را روی CCD با مشخصات: [ Canon الگوی تداخلی حاصل را روی CCD با مشخصات: [ EOS1000D; sensor size ۲۲/*۲mm*; pixel EOS1000D; sensor size ۲۲/*۲mm* ×۱۴/*۸mm*; pixel ilitردن EOS1000D; sensor size ۲۲/*۲mm* ×۱۴/*۸mm*; pixel نوردن Ditدرفریزهای میانگین مساوی برای فاصله های مختلف CCD، اندرفریزهای میانگین مساوی برای فاصله مای مختلف کانونی که برای باریکهٔ موازی انتظار میرود، چندین بار فاصلهٔ کانونی عدسی و روزنه را تغییر دادیم و بهترین فاصله را فاصلهٔ کانونی عدسی در نظر گرفتیم. الگوی تداخلی شکل ۶ یک الگوی نمونهٔ ثبت شده توسط CCD در فواصل (الف) mo ۱۰ و (ب) ۳. ۴. اندازه گیری ضریب شکست آبگون ها

برای اندازه گیری ضریب شکست آبگون، یک PWP با زاویهٔ رأس و ضریب شکست مشخص را داخل یک سلول مکعب مستطیلی پر از آبگون قرار می دهیم. در ایس حالت تداخل دو موجی را داریم که یکی از داخل آبگون و از بخش موازی PWP بدون شکست می گذرد ( $_{1}$  در شکل ۴) و دیگری در سطح شیبدار گوه و دیوارهٔ سلول متحمل شکست می شود ( $_{7}$  در شکل ۴). با در نظر گرفتن شکل ۴ و استفاده از قانون شکست و روابط زیر، ضریب شکست آبگون به دست می آید. (۱۵)

و

$$N' = \frac{N \sin \alpha}{\sin \beta'},\tag{19}$$

و

$$\sin \gamma' = \frac{\lambda}{\rho'},\tag{1V}$$

در معادلات بالا ' $\beta$ ، 'N، ' $\gamma$  و ' $\gamma$  به ترتیب زاویهٔ شکست در سطح گوه، ضریب شکست آبگون، اندرفریز و زاویهٔ میان باریکههای تداخل کننده را نشان میدهند. برای زاویهٔ  $\alpha$  داده شده، با اندازه گیری ' $\gamma$ ، از معادلهٔ (۱۵)، ' $\beta$  محاسبه میشود و با جایگذاری آن در معادلهٔ (۱۶)، ضریب شکست آبگون به دست میآید. برای زاویهٔ رأس کوچک معادلهٔ (۱۶) به صورت زیر در میآید:



**شکل ۵**. (رنگی در نسخه الکترونیکی) باریکهٔ نور لیزر که توسط شیئی میکروسکوپ O روی روزنهٔ P که در کانون عدسی L قـرار گرفتـه، کانونی شده است و برای مطالعهٔ موازی بودن نور خارج شده از PWP به کار میرود.

PWP



شکل ۶. نمونهای از نقش تداخل ایجاد شده توسط PWP توصیف شده دربند ۴. ۱، در فاصلهٔ (الف) mm و (ب) ۸۰۰ mm او PWP.



**شکل ۷**. فریزهای ماره حاصل از برهم نهی نقش تداخل آرمانی حاصل از شبیهسازی برای باریکهٔ موازی فرودی بر PWP با پارامترهای داده شده، بر روی نقش تداخل حاصل از آزمایش (الف) توسط بهترین پرتوهای موازی خارج شده با استفاده از عدسی با فاصلهٔ کانونی حدود mm (ب) و (ج) وقتی فاصلهٔ عدسی از منبع نور به ترتیب ۵۰۵mm و ۳۹۵ mm.

می دهد، اثرات پراش در فواصل نزدیک به PWP قابل ملاحظه است. برای ارزیابی کمّی توازی باریکهٔ نور، ابتدا یک نقش فریز خطی با اندرفریز مساوی با استفاده از رابطهٔ (۱۰) برای *K* و *Y* داده شده، شبیهسازی کردیم. سپس این نقش را روی طرح تداخلی ثبت شده از طریق آزمایش برای بهترین حالت توازی نور، در حالت تکینگی فاز، برهم نههی کردیم و فریزهای ماره شکل ۷. الف به دست آمد. با در نظر گرفتن شکل ۷. الف و استفاده از محاسبات توصیف شده در بخش ۳. ۱، تغییر در زاویهٔ *۲* در قسمت مرکزی نقش کمتر از ۲ دقیقه کمانی است،

اما تغییر در گوشهٔ بالا سمت چپ طرح با دو فریز ماره حدود چهار دقیقه کمان است. بنابراین توازی باریکهٔ فرودی محدود به بازهٔ چهار دقیقه کمانی است. برای نشان دادن تأثیر فاصلهٔ میان عدسی و روزنه روی توازی باریکه، فاصلهٔ نهایی میان این دو را به اندازه mm ± تغییر دادیم و الگوی حاصل از آزمایش را بر روی طرح شبیه سازی شده برهم نهی کردیم و به ترتیب فریزهای مارهٔ شکل ۷. ب و ۷. ج به دست آمد. فریزهای ماره نسبتاً خمیده با فواصل متفاوت، بیانگر این است که اندر فریزهای تداخلی در قسمتهای مختلف تغییر می کند و

محمدتقی توسلی، کتایون سماواتی، حجت الله سلیمانی، حمید سلوداری و خسرو حسنی

جلد ۲۱، شمارهٔ ۴



**شکل ۸**. فریزهای ماره حاصل از برهمنهی نقشهای تداخل بهدست آمده با PWP، قبل و بعد از قرار دادن جسم فازی در قسمت تخت PWP.



**شکل ۹**. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرح مربوط به چیدمان آزمایش ارزیابی ابیراهی جبهه موج تصویر شیئ نقطهای. باریکهٔ لیـزر توسط یـک شیئی میکروسکوپ O روی روزنهٔ P به جای شیء نقطهای، کانونی می شود. عدسی تحت آزمایش L تصویر شـیئ نقطـهای یعنـی PI را در کانون دوتایی D ایجاد میکند. ابیراهی جبهه موج خارج شده از PI نقش تداخل مربوط به باریکههای موازی را تغییر می دهد.

باریکههای فرودی متناظر موازی نیستند. با در نظر گرفتن تعداد فریزهای تـداخلی موجـود در نقـش مـاره مـیتـوان تغییـرات اندرفریز و زاویهٔ ۲ را محاسبه کرد [۱۹].

در آزمایش دیگر یک تیغهٔ شیشهای جلوی قسمت تخت PWP قرار دادیم و باریکهٔ نور موازی را بر آن تاباندیم. برهمنهی نقش تداخلی ثبت شده بعد از قرار دادن تیغه با نقش ثبت شده بدون تیغه، در حالت تکینگی فاز، فریزهای مارهای ایجاد کرد که در شکل ۸ نشان داده شده است. فریزهای ماره، تغییرات فاز در تیغه را نشان میدهد.

به منظور نمایش ابیراهیای که یک دستگاه تصویرساز بر جبه ه موج شی نقطهای اعمال میکند، مطابق شکل ۹ بر روزنهای با قطر ۱۵µm که مرکز آن روی محور عدسی L قرار دارد نور لیزر میتابانیم. عدسی دوتایی (doublet) را در سمت راست عدسی L طوری قرار میدهیم که کانون آن در محل تشکیل تصویر روزنه قرار گیرد تا نور عبوری موازی شود. نور را

طوری هدایت میکنیم که به طور عمود بر یک PWP بتابد و طرح تداخلی حاصل را ثبت میکنیم. حاصل برهمنهی این طرح بر روی طرح شبیهسازی شده برای باریکهٔ موازی، فریزهای ماره در شکل ۱۰ را ایجاد کرد. این فریزها به سبب ابیراهی در جبهه موج تصویر شئی نقطهای روی محور ایجاد شده است. برای نمایش ابیراهی حاصل از تصویر شئی نقطهای خارج از محور، عدسی L را از حالت محوری خارج میکنیم. بنابراین PWP است.

### ۲.۴. تعيين شکل خط طيفي

همانطورکه در بخش ۳–۲ ذکر شد، یک PWP با اندازه و زاویهٔ رأس مناسب می تواند به راحتی و با اطمینان برای اندازه گیری شکل خط طیفی در گسترهای نسبتا وسیع از طول همدوسی به کار رود. برای نشان دادن تجربی این ویژگی، PWP ای را که در



شکل ۱۰.فریزهای ماره حاصل از برهمنهی نقش تداخل آرمانی روی نقش تداخل بهدست آمده از آزمایش مربوط به چیدمان شکل ۹.



**شکل ۱۱.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) نقش تداخل ثبت شده با PWP توصیف شده در بخش ۱.۴ با استفاده از باریکهٔ موازی (الـف) LED زرد و (ب) LED سبز. نمایه شدتهای بهنجار متناظر به ترتیب در شکلهای (ج) و (د) نشان داده شدهاند.

شده در بخش ۴–۱ را در داخل یک ظرف شفاف مکعب مستطیل قرار دادیم و یک باریکهٔ نور موازی از لامپ سدیم با طول موج  $\alpha$  mm مور عمود بر ظرف تاباندیم و نقش تداخل حاصل را ثبت کردیم. سپس ظرف را با آبگون نمونه پر کردیم و نقش تداخل حاصل در این حالت را نیز ثبت کردیم. آزمایش را با LED زرد با طول موج ۵۹۳/۲nm = ۸ هم تکرار کردیم. در شکل ۱۲ برای نمونه دو نقش تداخل با استفاده از نور سدیم ثبت شده است: الف) وقتی ظرف خالی است و ب) وقتی ظرف با آبگون پر شده است (آب). همان طور که در بخش ۲۰ ۲ توضیح داده شد، برای N و  $\alpha$  داده شده، با بخش ۴. ۱ توصیف شد با باریکهٔ پهن و موازی نور LED روشن کردیم و CCD را برای مشاهدهٔ فریزهای تداخلی با کاهش نمایانی متقارن تنظیم کردیم. نقش تداخلی برای LEDهای با نور زرد و سبز به همراه با نمایههای توزیع شدت آنها در شکل ۱۱ آمده است. تبدیل فوریهٔ توزیع شدت بهنجار بر حسب اختلاف فاز (فاصله از محور تقارن نقش تداخل) شکل خط طیفی مورد نظر را به دست میدهد.

۴. ۳. اندازه گیری ضریب شکست آبگون
برای اندازه گیری ضریب شکست آبگونها، ابتدا PWP توصيف



**شکل ۱۲**.(رنگی در نسخه الکترونیکی) نقشهای تداخل ایجاد شده توسط PWP (الف) وقتی که ظرف خالی است و (ب) وقتی که در ظرف پر از آب است. برای تشکیل فریزها از نور زرد سدیم استفاده شده است.

<b>جدول ۱.</b> ضريب
آب
Ĩ
اس
اتا

اندازه گیری اندرفریزها در حالت (ب) ضریب شکست آبگون، N'، با استفاده از روابط (۱۵) تا (۱۷) با دقت بالا و با استفاده از رابطهٔ (۱۸) با دقت کمتر قابل محاسبه است. دقت اندازه گیری ضریب شکست بستگی به این دارد که اندرفریزها با چه دقتی اندازه گیری شوند. این دقت با افزایش اندازهٔ میدان تداخل و استفاده از CCD با پیکسلهای ریزتر به طور قابل ملاحظهای افزایش مییابد. در جدول ۱ ضریبهای شکست سه آبگون مختلف اندازه گرفته شده آمده است. با روش معرفی شده، وقتی N و  $\alpha$  با دقت معلوم باشند، ضریب شکست را میتوان تا پنج رقم با معنی تعیین کرد.

### ۵. نتیجه گیری

- این گزارش نشان میدهد که PWP یک تداخل سنج جدید.
   بسیار ساده و مفید با کاربردهای جالب و متعدد است.
- تداخل سنجی با PWP بر اساس تحریر توزیع فاز روی فریزهای تداخلی دو سطح موج تخت است. بنابراین، برای

ارزيابي تغييرات فاز، جابهجايي مكانيكي لازم نيست.

- امکان ارزیابی توزیع فاز با استفاده از فریزهای ماره در حالت
   تکینگی فاز باعث می شود که تغییرات بسیار آهسته در توزیع
   فاز با دقت بسیار بالا اندازه گیری شود، در حالی که انجام این
   کار در تداخل سنجهای متداول بسیار سخت است.
- با تاباندن جبهه موج نامشخص به یک PWP و ارزیابی فریزهای تداخلی حاصل با استفاده از تکنیک ماره، می توان جبهه موج را بدون نیاز به موج مرجع بازسازی کرد. استفاده از این ویژگی برای ارزیابی ابیراهی دستگاههای اپتیکی بسیار مفید است.
- یک PWP می تواند برای ارزیابی توازی باریکهٔ نور، تعیین
   دقیق نقطهٔ کانون، عمق کانون، و ابیراهی رنگی دستگاه
   اپتیکی به طور کمی به کار رود.
- تغییرات هر کمیت فیزیکی که قابل تبدیل به تغییرات اندرفریز و جهت فریزهای تداخلسنج PWP باشد، با روش ارائه شده به دقت قابل مطالعه است.
- 2. P Hariharan, "Optical Interferometry", 2<sup>nd</sup> ed.", Academic Press (2003).

### مراجع

1. R S Sirohi, "Introduction to Optical Metrology", CRC Press (2016).

(2018) 113701.

699

- 16.S M A Hosseini-Saber, E A Akhlaghi, and A Saber, Opt. Lett. 45 (2020) 3478.
- 17.H Hooshmand-Ziafi, M Dashtdar, and Kh Hassani, Opt. Lett. 45 (2020) 3737.
- 18. J Choi, G M Perera, M D Aggarwal, R P Shukla, and M. V. Mantravadi, *Appl. Opt.* 34 (1995) 3628.
- 19. M T Tavassoly and K Samavati, *Appl. Opt.* **53** (2014) 6612.
- 20. V Saveljev, J Y Son, Y Kim, J G Park, and G Heo, J. Opt. Soc. Am. A **37** (2020) 336.
- 21.K Samavati, M T Tavassoly and H Ghomi, *Appl. Opt.* **56** (2017) 324.
- 22. J S Darlin, K V Sriram, M P Kothiyal, and R S Sirohi, *Appl. Opt.* **34** (1995) 2886.
- 23.M T Tavassoly and A Darudi, *Opt. commun.* **175** (2000) 43.
- 24.E A Akhlaghi, A Darudi and M T Tavassoly, *Opt. Express* **19** (17) (2011) 15976.
- 25. R Yazdani and H Fallah, J. Opt. 21 (2019) 075702.
- 26.R Yazdani and H Fallah, J. Opt. Soc. Am. B 35 (2018) 3063.
- 27. Kh Jabbari Hassani and M T Tavassoly, *Appl. Opt.* **58** (2019) 5353.

- 3. E Hecht, "Optics", 5th ed., Pearson (2017).
- R S Sirohi, "Optical Methods of Measurement Whole field Techniques", 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press (2017).
- 5. M Strojnik, G Paez, and M Mantravadi, "Optical Shop Testing", ed. D. Malacara, ch. 4, John Wiley (2007).
- 6. M V R K Murty, Appl. Opt. 9 (1970) 1146.
- G Paez, M Strojnik, and G Garcia Torales, *Appl. Opt.* 39 (2000) 5172.
- M Amiri and M T Tavassoly, *Opt. Commun.* 272 (2007) 349.
- M T Tavassoly, M Amiri, A Darudi, R Aalipour, A Saber, and A R Moradi, J. Opt. Soc. Am. A 26 (2009) 540.
- M T Tavassoly, R Rezvani Naraghi, A Nahal, and Kh Hassani, Opt. Lett. 37 (2012) 1493.
- E V Basisty, and V A Komotskii, *Electronics Letters* 50 (2014) 693.
- 12.D W E Noom, K S E Eikema, and S Witte, *Opt. Lett.* **39** (2014) 193.
- 13. A Mahmoudi, Appl. Opt. 54 (2015) 7993.
- 14.M T Tavassoly and H Salvdari, J. Opt. Soc. Am. A 35 (2018) 2094.
- 15.S Ebrahimi, M Dashtdar, E Sanchez-Ortiga, M Martinez-Corral, and B Javidi, *Appl. Phys. Lett.* **112**

