



## Photorefractive behavior of BaTiO<sub>3</sub> crystals and their application in optical metrology in real time

M. H. Majles Ara, M. Shaban

*Dept. of Physics Photonics Lab. Teacher Training University*

(Received: 4/2/2005, received in revised form: 27/11/2005)

**Abstract:** In this research we measure some of the optical parameters of Barium Titanate crystal (BaTiO<sub>3</sub>), such as signal beam gain, coupling constant (exponential gain coefficient), change in index refraction and photorefractive sensitivity, which are very significant for optical data storage. In all experiment, two-wave mixing configuration at 632.8 nm (He-Ne laser) were used. Experimental data for change in signal beam gain versus input angle of two beam, beam intensity ratio, pump beam intensity and grating vector, were plotted and compared with Kukhtarev theory. Using of experimental data, we calculated other optical parameters such as exponential gain coefficient, change in index refraction and photorefractive sensitivity. The results are good and the crystal can be used for optical data storage, dynamic holography, etc. For a - wave mixing configuration, the same crystal as a recording medium for real time displacement has been used. For measurement of distant object a high coherent source such as He-Ne laser has can be used. Long coherence length of the laser permit to study the objects which are far away from the crystal. The influence of intervening medium must be negligible.

**Keywords:** *Barium Titanate Crystal, Photorefractive Effect, Two-Wave Mixing, Real Time Displacement Measurement.*





## رفتار نورشکستی بلور تیتانات باریم و کاربردهای آن در اندازه‌گیری‌های اپتیکی در زمان واقعی

محمدحسین مجلس‌آرا، مجتبی شعبان

دانشگاه تربیت معلم تهران دانشکده علوم گروه فیزیک آزمایشگاه فوتونیک  
پست الکترونیکی: [ara@msrt.ir](mailto:ara@msrt.ir)

(دریافت مقاله ۱۳۸۳/۱۱/۱۳، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۴/۹/۶)

**چکیده:** در این مقاله بعضی از پارامترهای مهم اپتیکی بلور تیتانات باریم ( $\text{BaTiO}_3$ ) مانند بهره بلور، ثابت جفتیدگی (ضریب بهره‌نمایی)، تغییر در ضریب شکست بلور و حساسیت نورشکستی را که در ضبط اطلاعات اپتیکی از اهمیت زیادی برخوردارند اندازه‌گیری می‌کنیم. در تمام آزمایشها از چیدمان ترکیب دو موج (TWM) و طول موج  $632.8 \text{ nm}$  استفاده شده است. نتایج تجربی به دست آمده یعنی، تغییرات بهره بلور را نسبت به زاویه فرودی دو باریکه، شدت نسبی باریکه‌ها، شدت باریکه دم‌ش و بردار شبکه توری رسم و با محاسبات نظری که بر اساس نظریه کوختارو انجام داده‌ایم مقایسه می‌کنیم. برخی از پارامترهای اپتیکی بلور تیتانات باریم از قبیل: تغییر در ضریب شکست حالت پایا و حساسیت نورشکستی را با استفاده از نتایج تجربی، محاسبه می‌کنیم. نتایج به دست آمده برای بلور مورد نظر نتایج مطلوبی است و بیانگر کارایی این بلور در ضبط اطلاعات اپتیکی، هولوگرافی دینامیک و غیره است. سپس بر اساس پیکربندی ترکیب دو موج در این بلور، جا به جایی و تغییر مکان شیئی را در زمان واقعی مورد مطالعه قرار می‌دهیم. طول همدوسی مناسب لیزر هلیوم - نئون این امکان را فراهم می‌کند که مکان شیئی که در فاصله دور از بلور قرار گرفته است به خوبی مطالعه شود. آزمایش را باید در محیطی کاملاً آرام و خالی از نوسانها انجام داد و در عین حال تأثیر محیط را نادیده گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** ترکیب دو موج، اثر نورشکستی، بلور تیتانات باریم، اندازه‌گیری در زمان واقعی.

## مقدمه

در سالهای اخیر بلورهای نورشکستی (Photorefractive) مانند  $BaTiO_3$ ,  $KNbO_3$ ,  $Bi_4Ti_3O_{12}$ ,  $SNB$ ,  $KNSBN$ ,  $BSO$ ,  $BGO$ ,  $GaAs$ ,  $InP$ ,  $CdTe$ , فروالکتتریک، نافروالکتتریک و نیمرسانا هستند، به دلیل کاربرد گسترده آنها در ذخیره‌سازی اطلاعات اپتیکی، هولوگرافی دینامیک، احساسگرهای نورشکستی، تولید آینه‌های مزدوج فاز و غیره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۱-۳]. پدیده نورشکستی یکی از اثرهای مهم است که در ناحیه اپتیک غیرخطی از ترکیب امواج در محیط رخ می‌دهد [۴-۶]. هنگامی که به این مواد نور تابیده می‌شود فوتونها جذب ناخالصیهای درون بلور می‌شوند و تعدادی از الکترونها نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌روند و سپس به نواحی دیگری که بیشتر نواحی تاریک محسوب می‌شوند پخش می‌شوند و در آنجا عمل بازترکیب صورت می‌گیرد. نتیجه این فرایندها جدایی بار فضایی بوده که به نوبه خود باعث ایجاد میدان بار فضایی می‌شود. این میدان بنابر اثر پوکلز (Pockels effect) ضریب شکست بلور را تغییر داده و توریهایی در محیط ایجاد می‌کند که امکان ضبط اطلاعات اپتیکی را فراهم می‌آورد [۷ و ۴]. اثر نورشکستی در بلور تیتانات باریم اولین بار توسط تانزند و همکارانش مشاهده شد [۹]. برجسته‌ترین برتری این بلور در به کارگیری آن به عنوان بلور نورشکستی، آن است که ضریب الکترواپتیک آن ( $r_{42}$ ) نسبت به بلورهای دیگر مقدار قابل توجهی است که این منجر به افزایش بازده پراش می‌شود. این بلور به طور مکرر در ضبط اطلاعات اپتیکی، تقویت تصاویر همدوس، هولوگرافی دینامیک همیوگ فاز اپتیکی و هولوگرافی در زمان واقعی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰-۱۴]. اخیراً بلور تیتانات باریم به علت دارا بودن زمان پاسخگویی مناسب برای اندازه‌گیری اپتیکی در زمان واقعی مورد استفاده محققین بوده است [۱۵-۱۶]. معمولاً از چیدمان دو موج در بلور استفاده می‌کنیم. در این چیدمان فاز بین توری دینامیک و پرتوهای تداخلی به اندازه  $\Phi = \pm \frac{\pi}{2}$  جا به جا می‌شود [۹]. این دو نوع جا به جایی فاز به ترتیب باعث تقویت و تضعیف باریکه می‌شود، هر چند که سرشتی اپتیکی برای این دو پیکربندی متفاوت است [۱۶].

سپس برای مطالعه شیئی مورد نظر از پیکربندی ترکیب دو موج در فاصله چند متری از بلور تیتانات باریم، عکاسی خال‌دار [۱۶] و لیزر He-Ne استفاده می‌کنیم. آزمایش برای تعیین انحراف، خمیدگی یا شکستگی در شیئی مرکب که به عنوان یک تک شیئی به کار برده می‌شود و با استفاده از باریکه نقطه‌ای صورت می‌گیرد.

## آزمایش (الف) - اندازه‌گیری پارامترهای اپتیکی بلور تیتانات باریم

مطابق چیدمان نشان داده شده در شکل (۱)، با اندازه‌گیری شدت باریکه‌های دمش و شیئی پیش و پس از گذر از درون بلور، با استفاده از توان سنج رقمی مدل (Orion/TH) و احساسگر گرمایی مربوطه، به اندازه‌گیری تغییرات بهره باریکه شیئی نسبت به کمیت‌های مختلف

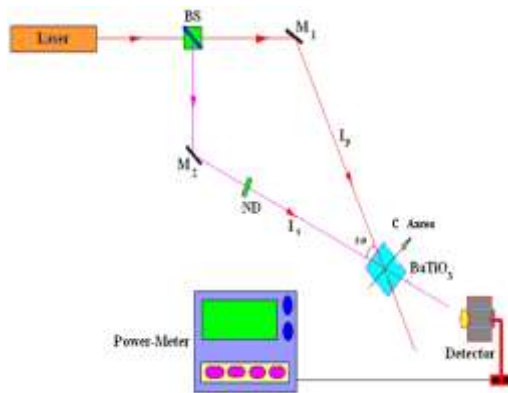
(شکلهای ۳، ۴، ۵ و ۶) می‌پردازیم. از طرف دیگر با استفاده از داده‌های تجربی و مراجع [۹ و ۸]، پارامترهای اپتیکی بلور تیتانات باریم (جدول ۱) مثل میدان بار فضایی، تغییر در ضریب شکست حالت پایا و حساسیت نورشکستی را محاسبه کردیم. با توجه به شکل (۳)، بیشینه بهره،  $g = \frac{Io(L)}{Io(0)}$  که در بهره بلور  $Io(L)$  شدت باریکه شیئی پس از بلور، و  $Io(0)$  شدت باریکه شیئی پیش از بلور) به ازای زاویه فرودی  $\theta = 17^\circ$  و بردار توری  $k = 5.14 \times 10^6 \text{ (m}^{-1}\text{)}$  مشاهده می‌شود. اکنون با استفاده از روابط زیر و نتایج مشاهده شده، پارامترهای اپتیکی مهم زیر را محاسبه می‌کنیم:

$$E_d = k \frac{k_B T}{q} = 133 \left( \frac{\text{kV}}{\text{m}} \right) \quad \Delta n_{ss} = \frac{1}{2} n_0^3 r_{\text{eff}} E_{Sc} = 8.2 \times 10^{-5}$$

$$E_q = \frac{q N_A}{k \epsilon} = 2 \times 10^{10} \left( \frac{\text{kV}}{\text{m}} \right) \quad S = \frac{\Delta n_{ss}}{\alpha I_o t} = 22.8 \times 10^{-9} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{J}} \right)$$

$$E_{Sc} = \frac{E_d E_q}{E_d + E_q} = 7.3 \times 10^{-12} \left( \frac{\text{kV}}{\text{m}} \right) \quad \Gamma = \frac{4\pi \delta n_{ss}}{\lambda} = 851/4 \text{ m}^{-1}$$

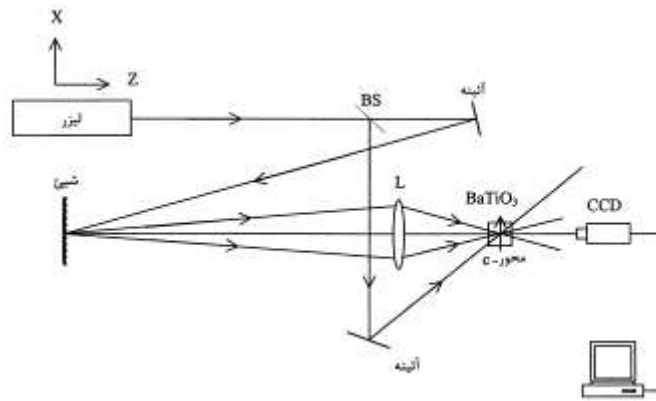
در روابط بالا  $\Delta n_{ss}$  تغییر در ضریب شکست بلور در حالت پایا،  $n_0$  ضریب شکست بلور،  $r_{\text{eff}}$  ضریب الکترو-اپتیک موثر بلور،  $E_{Sc}$  میدان بار فضایی،  $S$  حساسیت بلور،  $\alpha$  ضریب جذب اپتیکی،  $t$  زمان نوردهی،  $\Gamma$  ضریب بهره نمایی،  $2\theta$  زاویه بین دو باریکه،  $\lambda$  طول موج نور به کار رفته،  $E_d$  میدان پخش،  $E_q$  میدان اشباع،  $k_B$  ثابت بولتزمن،  $T$  دمای محیط بر حسب کلوین،  $k$  بردار توری،  $I_o$  شدت نور، و  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک بلور است [۱۰].



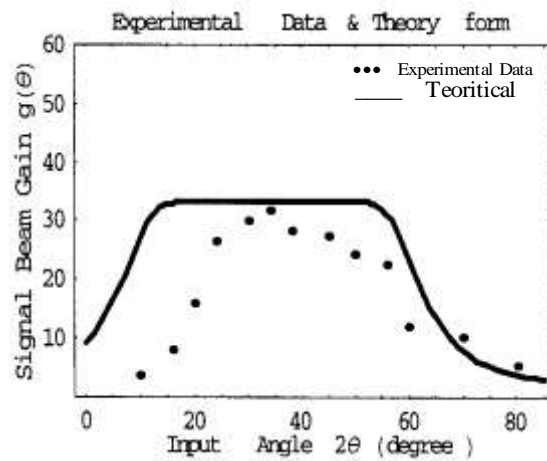
شکل ۱ چیدمان ترکیب دو باریکه در بلور نور شکستی ( $\text{BaTiO}_3$ ).

جدول ۱ مقادیر محاسبه شده پارامترهای اپتیکی بلور تیتانات باریم.

کمیت	طول موج لیزر استفاده شده	میدان بار فضایی	تغییر در ضریب شکست حالت پایا	ضریب بهره نمایی	حساسیت نور شکستی
علامت اختصاری	$\lambda$	$E_{Sc}$	$n_1 \equiv \Delta n_{ss}$	$\Gamma$	$S$
یکای	nm	V/m	-	$\text{m}^{-1}$	$\text{m}^3/\text{J}$
مقادیر اندازه‌گیری	۶۳۲٫۸	$۷٫۳ \times ۱۰^{-۱۲}$	$۸٫۲ \times ۱۰^{-۵}$	۸۵۱٫۴	$۲۲٫۸ \times ۱۰^{-۹}$

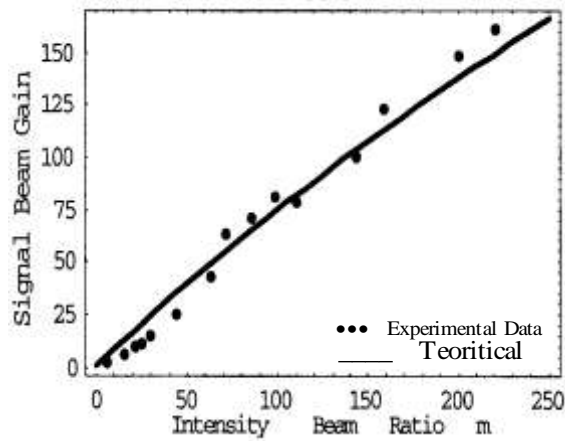


شکل ۲ چیدمان ترکیب دو باریکه در بلور به منظور تقویت باریکه شیء:

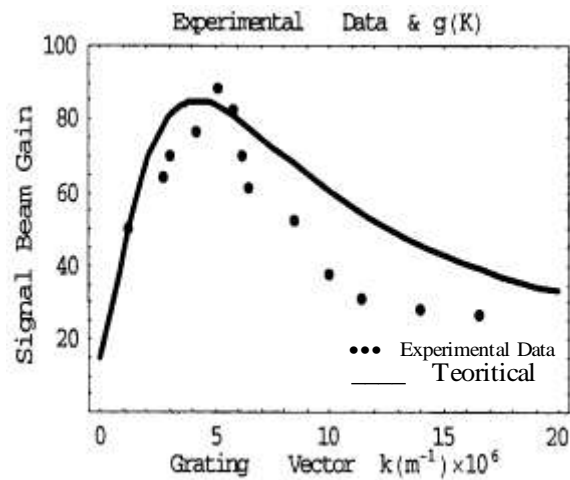


شکل ۳ تغییرات بهره بلور نسبت به زاویه بین دو باریکه.

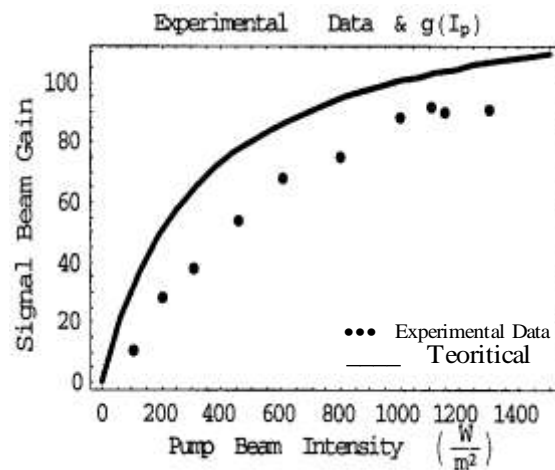
Experimental Data &  $g(m)$  for  $\alpha=0.3$  &  $\Gamma L=7$



شکل ۴ تغییرات بهره بلور نسبت به شدت نسبی دو باریکه.



شکل ۵ تغییرات بهره بلور نسبت به بردار شبکه .



شکل ۶ تغییرات بهره بلور نسبت به شدت باریکه دمش.

#### آزمایش (ب) - اندازه گیری اپتیکی در زمان واقعی

بنابر شکل (۲) در اینجا از چیدمان ترکیب دو موج استفاده می‌کنیم. باریکه لیزری ( $632.8\text{nm}$ ) He-Ne را با شکافنده باریکه به دو بخش تقسیم می‌کنیم.  $I_0$  (باریکه شیئی) به شیئی که در فاصله  $2.5$  متری روی میز اپتیکی قرار دارد می‌تابد. بازتاب نور از شیئی با یک عدسی به درون بلور تیتانات باریم می‌تابد.  $I_p$  (باریکه دمش) را به درون بلور اضافه می‌کنیم. در درون بلور دو باریکه  $I_0$  و  $I_p$  با هم تداخل می‌کنند. از آنجا که دو باریکه همدوس هستند، نمونه‌ای از تداخل پایدار در درون بلور شکل می‌گیرد. از ویژگی‌های بلور تیتانات باریم پاسخگویی کند آن است، لذا زمانی لازم است که دو باریکه به حالت پایدار برسند. محور  $c$  بلور را در جهت محور اپتیکی

قرار می‌دهیم لذا باریکه  $I_0$  با باریکه  $I_p$  تقویت خواهد شد. تقویت  $I_0$  به علت انرژی حاصل از ترکیب دو باریکه دمش و شیئی است. در نتیجه شدت باریکه شیئی افزایش می‌یابد. پس از اینکه فرایند ترکیب دو موج به حالت پایدار رسید شیئی را تحت فشار مختصری قرار می‌دهیم. تغییر مختصر در شیئی موجب تغییر باریکه شیئی در درون بلور شده و فرایند ترکیب دو موج را بر هم می‌زند. در این لحظه روی صفحه تصویر دو باریکه خواهیم داشت که یکی تابش حاصل از نور پراشیده از توری دینامیک و دیگری تابشی است که مستقیماً از بلور گذر کرده است. چون فرایند خوانش در بلور نورشکست ویرانگر است، شدت باریکه دمش پراشیده به طور پیوسته کاهش می‌یابد. وقتی که ترکیب دو موج جدید به حالت پایدار برسد شدت باریکه شیئی جدید افزایش می‌یابد، لذا در روی صفحه تصویر از تداخل این دو باریکه نمونه‌ای از نوارهای تداخلی یانگ حاصل خواهد شد. این نوارهای تداخلی را می‌توان مستقیماً در رایانه ذخیره کرد. پس از تغییر شکل شیئی دامنه باریکه جدید شیئی در صفحه به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶].

$$E_0 = A_0 + A_p \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{t_c}\right) \right] \quad (1)$$

$A_0$  دامنه باریکه شیئی است که مستقیماً از بلور می‌گذرد،  $A_p \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{t_c}\right) \right]$  دامنه باریکه پراشیده شده از توری جدید و  $t_c$  زمانی است که برای ایجاد ترکیب دو باریکه سپری می‌شود. دامنه باریکه پراشیده به صورت زیر است.

$$E_d = A_d \exp\left(\frac{-t}{t_c}\right) \quad (2)$$

$A_d$  دامنه باریکه پراشیده شده‌ای است که شدت آن در هر نقطه از صفحه تصویر از تداخل امواجی به دست می‌آید که با معادلات ۱ و ۲ داده شده‌اند.

$$I_{(t)} = \left[ \{A_0 + A_p [1 - \exp(\frac{-t}{t_c})]\} \exp(I_\delta) + A_d \exp(\frac{-t}{t_c}) \right]^2 \quad (3)$$

$\delta$  اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل شیئی است. در این پیکربندی به علت ترکیب دو موج جدید شدت باریکه شیئی پراشیده از توری رو به کاهش و شدت باریکه شیئی جدید رو به افزایش خواهد رفت. از آنجاکه شدت باریکه‌های تداخلی نسبت به زمان تغییر می‌کند، تفاوت بین نوارهای تداخلی به زمان سپری شده بستگی دارد. تفاوت نوارها  $V_{(t)}$  بر حسب زمان از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۶].

$$V_{(t)} = \frac{2\sqrt{I_0(t)I_d(t)}}{I_0(t) + I_d(t)} \quad (4)$$



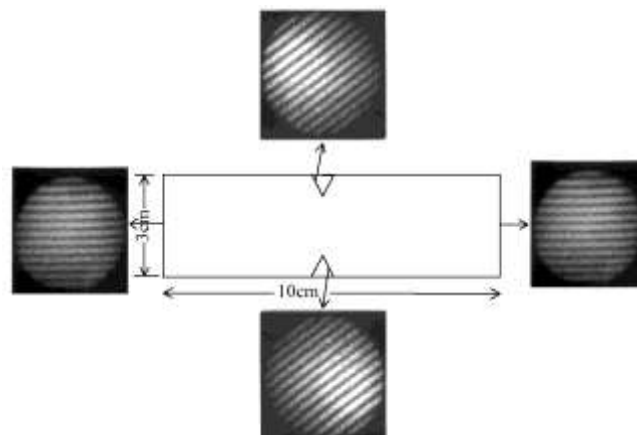
$I_d$  و  $I_o$  شدت باریکه‌های شیئی و پراشیده است. وقتی که شدت نوارهای تداخلی در صفحه تصویر مساوی باشد تفاوت نوارهای تداخلی در این چیدمان بیشینه خواهد بود. در روش تابش نقطه‌ای بیشینه تغییر مکانی که می‌توان اندازه‌گیری کرد به عواملی چون (الف) بزرگنمایی عدسی و (ب) اندازه جانبی باریکه دمش بستگی دارد. اندازه جابجایی  $d$  از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۶].

$$d = \frac{\lambda Z}{MB} \quad (5)$$

که در آن  $B$  پهناى نوارهای یانگ است که به وسیله CCD در رایانه ذخیره می‌شود،  $M$  بزرگنمایی دستگاه و  $Z$  فاصله بین سطح بلور تا صفحه تصویر است.

### نتایج

برای مطالعه جابه‌جایی در شیئی، چیدمان اپتیکی آماده و شیئی مورد نظر را به شکل دانه‌ای با رنگ سفید رنگ می‌کنیم. نور پس از برخورد در همه جهات پراکنده و وارد بلور تیتانات باریم می‌شود که در فاصله ۲/۵ متری از شیئی قرار دارد. چنانکه در شکل دیده می‌شود یک شکاف در شیئی ایجاد می‌کنیم. شیئی مورد نظر را تحت تابش نور لیزر He-Ne با توان ۳۵mw قرار می‌دهیم. نور پراشیده از شیئی را با یک عدسی ( $f=90\text{mm}$ ) به درون بلور تیتانات باریم با ابعاد  $5 \times 5 \times 5\text{mm}^3$  روانه می‌کنیم. باریکه دمش را طوری به باریکه شیئی اضافه می‌کنیم که زاویه بین آنها ۳۴ درجه باشد. باریکه‌های دمش و شیئی در درون بلور تداخل کرده و در آنجا هولوگرام لازم را به وجود می‌آورند. چنانکه قبلاً گفته شد چنانچه شیئی جابه‌جا شود هولوگرام ایجاد شده در درون بلور دستخوش تغییر می‌شود و این تغییر باعث تغییر در چگونگی ترکیب دو موج خواهد شد. در این لحظه در صفحه تصویر دو باریکه پراشیده خواهیم داشت که می‌توانند نوارهای تداخلی یانگ را به وجود آورند که با یک دوربین CCD به رایانه منتقل می‌شود. در این آزمایش یک سر شیئی را به جایی محکم کرده و سر دیگر آن در فشار مناسب قرار می‌دهیم. در همین آزمایش می‌توانیم نوارهای تداخلی مربوط به اطراف شکاف را ایجاد و با نوارهای قبلی مقایسه کنیم. (شکل ۷) نشان دهنده نوارهای تداخلی یانگ در دو سر شیئی از خطوط تاریک و روشن موازی است در حالیکه در اطراف شکافها به صورت مورب است. یعنی نوارهای تداخلی یانگ با توجه به مکان شیئی تغییر می‌کند. به طور کلی با همین آزمایش می‌توان از هر بخش شیئی به یاری فشار در جای مورد نظر، نوارهای تداخلی ایجاد کنیم و مکان شیئی را مورد مطالعه قرار دهیم و در زمان واقعی بدون تغییر چگونگی آزمایش، موارد بالا را بررسی کنیم.



شکل ۷ نوارهای تداخلی یانگ بدست آمده از شیئی که در فاصله ۲٫۵ متری از بلور قرار گرفته است.

#### جمع‌بندی

چنانکه اشاره شد در این مقاله با استفاده از نظریه کوختارو و نتایج تجربی، به محاسبه بهره بلور و سایر پارامترهای اپتیکی بلور تیتانات باریم پرداخته‌ایم. تغییر در ضریب شکست و حساسیت نور شکستی با به کارگیری لیزر هلیوم-نئون (۶۳۲٫۸ nm) به ترتیب ۵- $\times 10^{-5}$  و  $\Delta n = 8,2 \times 10^{-5}$  و  $S = 22,18 \times 10^{-9} \frac{m^3}{J}$  به دست می‌آید که در مقایسه با مقادیر گزارش شده، و  $\Delta n = 7,41 \times 10^{-5}$  و  $S = 35,18 \times 10^{-9} \frac{m^3}{J}$  سازگاری خوبی دارد [۳ و ۱۰]. همچنین با مشاهده نمودار شکل‌های (۶ تا ۳) و مقایسه با مراجع یاد شده، ملاحظه می‌شود که بلور BaTiO<sub>3</sub> نسبت به بلورهای نور شکستی دیگر مثل BSO دارای بهره بیشتر، زمان پاسخگویی طولانی‌تر و حساسیت نور شکستی کمتری است. نتایج به دست آمده بیانگر اینست که بلور تیتانات باریم مورد آزمایش رفتار نور شکستی مناسبی در کاربردهای مختلف مانند: ضبط اطلاعات اپتیکی، هولوگرافی دینامیک (تداخل‌سنجی هولوگرافی، تولید آینه‌های مزدوج فاز و غیره) و ضبط تصاویر سه بعدی با کیفیت عالی دارد. همچنین با چیدمان ترکیب دو موج و استفاده از این بلور به عنوان محیط ضبط اطلاعات مکان شیئی را که از بلور فاصله نسبتاً زیادی دارد مورد مطالعه قرار داده و برهمکنش محیط را نادیده فرض کنیم. در این آزمایش می‌توان جا به جایی انجام شده در شیئی را تا حدود کمتر از میکرون اندازه‌گیری کرد.

#### مراجع

- [1] P. Yeh, C. Gu, "Landmark Papers on Photorefractive Non-Linear Optics", World Scientific, Singapore 1995.
- [2] P. Gunter, P. Huignard, "Photorefractive Materials & Their Applications", Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1989.
- [3] M. H. Majles Ara, C. Vijayan, R. S. Sirohi, "Figure-of-Merit Parameter of Photorefractive Crystals", Proceedings of SPIE Vol. 4417 2001.
- [4] P. Yeh, "Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics", Jon Wiley &

Sons, Inc 1993.

[5] B. Valeria Damiao, "*Developments in Photorefractive Two- Beam Coupling Systems*", A Thesis for Degree of Doctor of Philosophy 2000.

[6] Z. Zhou, Y. Li, X. Sun, Q. Wan, "*Perturbative Analytical Solution of Two-Wave Coupling in Photorefractive Materials at Large Modulation Depth*", J. Appl. Phys. 80 (8), 15 October 1996.

[7] P. Hariharan, "*Optical Interferometry*", ademic Press Australia 1985.

[8] Ph. Delaye, J. M. C- Jonathan, G. Pauliat, G. Roosen, "*Photorefractive Materials: Specifications Relevant to Applications*", Pure Appl. Opt. 5 541-559. 1995

[9] R. L. Townsendand, J. T. LaMacchia, "*Optically induced refractive Index change in BaTiO<sub>3</sub>*", J.Appl. Phys., 41,1559-1562, 1970.

[10] H. Majles Ara, C. Vijayan, N. Krishna Mohan, R. S. Sirohi, "*Parametric Study of Photorefractive Beam Coupling in BaTiO<sub>3</sub> at Multiple Wavelengths*", Opt. Eng. 39(2) 535- 540, 2000.

[11] M. P. Petrov, S. I. Stepanov, A. V. Khomenko, "*Photorefractive Crystals in Cohernt Optical Systems*", Springer, Berlin, 1991.

[12] H. J. Tizani, "*Real time metrology with BSO crystal*", Opt. Acta, 29,463-73, 1982.

[13] M. H. Majles Ara, C. Vijayan, N. Krishna Mohan, R. S. Sirohi, "*Estimation of diffraction efficiency of holographic gratings in photorefractive BaTiO<sub>3</sub> and BaTiO<sub>3</sub>:Ce at multiple wavelengths*", Optik 110383-383, 1999.

[14] L. Liu, B. Helmers, K. Hinsch, "*Speckle metrology with novelty filtering using photorefractive two beam coupling in BaTiO<sub>3</sub> crystal*", Opt. commun, 100, 19-23, 1993.

[15] M. H. Majles Ara, R. S. Sirohi, "*Speckle shear photography using photorefractive crystals for in-plane strain measurement*", Proceeding of SPIE Vol. 5144, 2003.

[16] R. S. Sirohi, "*Speckle Metrology*", Marcel Dekker Inc., New York, 1993.