07

О поляризационной записи голограмм при частичной поляризации регистрирующего излучения

© *Б.Н. Килосанидзе*

Институт кибернетики АН Грузии, Тбилиси

Поступило в Редакцию 11 октября 1996 г.

В работе развитый теоретический подход рассмотрен для сред, скалярный и анизотропный отклик которых противоположны по знаку. В этих условиях анализируются сформированные поляризационной голограммой недифрагированный пучок, мнимое и действительное изображения. Показано, что мнимое изображение преобразовано по поляризации по сравнению с объектным полем, а в действительном изображении формируется восстановленное по состоянию и степени поляризации псевдоскопическое поле объекта.

Ранее проведено исследование поляризационно-голографической записи и восстановления объектного поля при использовании частично поляризованного излучения на основе описанной в работах [1–3] модификации векторно-матричного метода Джонса [4,5] и закономерности Вейгерт-эффекта [6]. При этом было показано, что использование для записи поляризационно-чувствительных сред, характеристики которых подчиняются условию $\hat{s}-\hat{v}_L=0$, $\hat{s}+\hat{v}_L\neq 0$, $\hat{v}_L-\hat{v}_G\neq 0$, $\hat{v}_L+\hat{v}_G=0$, где $\hat{s}$, $\hat{v}_L$, $\hat{v}_G$ — соответственно так называемые скалярный, анизотропный и гиротропный отклики среды на воздействующую интенсивность поляризованного излучения, позволяет восстановить состояние частичной поляризации объектного поля в мнимом изображении. Среды с такими характеристиками были применены в поляризационно-голографическом эксперименте [1].

В предлагаемой работе рассматривается поляризационно-голографическая запись частично поляризованным излучением в регистрирующей среде с характеристиками, подчиняющимися отличным от рассмотренных ранее условиям:

$$\hat{s} - \hat{v}_L \neq 0, \qquad \hat{s} + \hat{v}_L \neq 0, \qquad \hat{v}_L - \hat{v}_G \neq 0, \qquad \hat{v}_L + \hat{v}_G = 0. \tag{1}$$

Пусть поляризационная голограмма записывается частично эллиптически поляризованной опорной волной, распространяющейся вдоль оси z, и объектной волной, формируемой при прохождении опорной волны сквозь произвольный (анизотропно-гиротропный) объект. Модифицированный вектор Джонса суммарной волны можно представить в виде [2]:

$$\mathbf{E}_\Sigma = \mathbf{E}_{\text{оп}} + \mathbf{E}_{\text{об}} = E_{\text{AX}} \exp i\big(\omega t + \varphi\big)\big[1 + \exp i\delta \cdot M_{\text{об}}\big] \begin{pmatrix} 1 \\ i\varepsilon \end{pmatrix}$$
$$\oplus\, E_{\text{BY}} \exp i\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right)\Big[1 + \exp i\delta \cdot M_{\text{об}}\Big] \begin{pmatrix} i\varepsilon \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где $\varepsilon = \frac{E_{\text{AY}}}{E_{\text{AX}}} = \frac{E_{\text{BX}}}{E_{\text{BY}}}$ $(0 \leqslant \varepsilon \leqslant 1)$, $\oplus$ — знак некогерентного суммирования амплитуд с правилами оперирования, приведенными в [2]; $E_{\text{AX}} \exp i\varphi$ — комплексная амплитуда компоненты одного базиса, а $E_{\text{BY}} \exp i\psi$ — комплексная амплитуда компоненты другого, ортогонального и некогерентного ему; $M_{\text{об}} = \begin{pmatrix} \hat{m}_{11} & \hat{m}_{12} \\ \hat{m}_{21} & \hat{m}_{22} \end{pmatrix}$ — комплексная матрица Джонса объекта; δ — набег фазы, вызванный наклонным распространением объектной волны.

Под воздействием поля частично эллиптически поляризованной суммарной волны (2) в регистрирующей среде наводится анизотропия-гиротропия, описываемая матрицей Джонса [7]:

$$M \approx M_0 + M_{-1} + M_{+1}, \tag{3}$$

где

$$M_0 \approx \exp -2i\, \varkappa d\, \hat{n}_0 \begin{pmatrix} (M_0)_{11} & (M_0)_{12} \\ (M_0)_{21} & (M_0)_{22} \end{pmatrix}, \tag{4}$$

$$(M_0)_{11,22} = 1 - \frac{i\varkappa d}{2\hat{n}_0}\Big[(\hat{s} \pm \hat{v}_L)\big(E^2_{\text{AX}} + \varepsilon^2 E^2_{\text{BY}}\big) + (\hat{s} \mp \hat{v}_L)\big(\varepsilon^2 E^2_{\text{AX}} + E^2_{\text{BY}}\big)\Big],$$
$$(M_0)_{12,21} = -\frac{i\varkappa d}{2\hat{n}_0}\Big\{2i\varepsilon\Big[(\hat{v}_L \pm \hat{v}_G)\, E^2_{\text{AX}} + (\hat{v}_L \mp \hat{v}_G)\, E^2_{\text{BY}}\Big]\Big\};$$

$$M_{-1} \approx -\frac{i\varkappa d}{2\hat{n}_0}\,\exp -2i\,\varkappa d\,\hat{n}_0 \cdot \exp i\delta \begin{pmatrix} (M_{-1})_{11} & (M_{-1})_{12} \\ (M_{-1})_{21} & (M_{-1})_{22} \end{pmatrix}, \tag{5}$$

$$(M_{-1})_{11,22} = \left(\hat{s} \pm \hat{v}_L\right)\Big[\left(E^2_{\mathrm{AX}} + \varepsilon^2 E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}_{11} + i\varepsilon\left(E^2_{\mathrm{AX}} - E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}_{12}\Big]$$
$$+ \left(\hat{s} \mp \hat{v}_L\right)\Big[-i\varepsilon\left(E^2_{\mathrm{AX}} - E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}_{21} + \left(\varepsilon^2 E^2_{\mathrm{AX}} + E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}_{22}\Big],$$

$$(M_{-1})_{12,21} = \left(\hat{v}_L \mp \hat{v}_G\right)\Big[-i\varepsilon\left(E^2_{\mathrm{AX}} - E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}_{11} + \left(\varepsilon^2 E^2_{\mathrm{AX}} + E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}_{12}\Big]$$
$$+ \left(\hat{v}_L \pm \hat{v}_G\right)\Big[\left(E^2_{\mathrm{AX}} + \varepsilon^2 E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}_{21} + i\varepsilon\left(E^2_{\mathrm{AX}} - E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}_{22}\Big];$$

$$M_{+1} \approx -\frac{i\varkappa d}{2\hat{n}_0}\,\exp -2i\,\varkappa d\,\hat{n}_0 \cdot \exp -i\delta \begin{pmatrix} (M_{+1})_{11} & (M_{+1})_{12} \\ (M_{+1})_{21} & (M_{+1})_{22} \end{pmatrix}, \tag{6}$$

$$(M_{+1})_{11,22} = \left(\hat{s} \pm \hat{v}_L\right)\Big[\left(E^2_{\mathrm{AX}} + \varepsilon^2 E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}^*_{11} - i\varepsilon\left(E^2_{\mathrm{AX}} - E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}^*_{12}\Big]$$
$$+ \left(\hat{s} \mp \hat{v}_L\right)\Big[i\varepsilon\left(E^2_{\mathrm{AX}} - E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}^*_{21} + \left(\varepsilon^2 E^2_{\mathrm{AX}} + E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}^*_{22}\Big],$$

$$(M_{+1})_{12,21} = \left(\hat{v}_L \pm \hat{v}_G\right)\Big[i\varepsilon\left(E^2_{\mathrm{AX}} - E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}^*_{11} + \left(\varepsilon^2 E^2_{\mathrm{AX}} + E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}^*_{12}\Big]$$
$$+ \left(\hat{v}_L \mp \hat{v}_G\right)\Big[\left(E^2_{\mathrm{AX}} + \varepsilon^2 E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}^*_{21} - i\varepsilon\left(E^2_{\mathrm{AX}} - E^2_{\mathrm{BY}}\right)\hat{m}^*_{22}\Big].$$

Здесь матрица M_0 ответственна за формирование недифрагированного пучка, матрицы M_{-1} и M_{+1} ответственны за формирование мнимого и действительного изображений соответственно. (Матрица, ответственная за формирование сверточной компоненты, в данной работе не рассматривается.) В (4)–(6) $\varkappa = \frac{2\pi}{\lambda}$, d — толщина регистрирующей среды; $\hat{n}_0$ — комплексный коэффициент преломления в исходном, незасвеченном состоянии ($\hat{n}_0 = n_0 - in_0\tau_0$, n_0 — коэффициент преломления, τ_0 — коэффициент экстинкции).

Используя условие (1), в выражениях (4)–(6) получаем:

$$M_0 \approx \exp\bigl(-2i\varkappa d\hat{n}_0\bigr)\left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \frac{i\varkappa d\hat{v}_L}{\hat{n}_0}\,P_0\right]; \tag{7}$$

$$M_{-1} \approx \frac{i\varkappa d\hat{v}_L}{\hat{n}_0}\,\exp\bigl(-2i\varkappa d\hat{n}_0\bigr)\exp i\delta \cdot P\bigl(ad_j M_{\text{об}}\bigr); \tag{8}$$

$$M_{+1} \approx \frac{i\varkappa d\hat{v}_L}{\hat{n}_0}\,\exp\bigl(-2i\varkappa d\hat{n}_0\bigr)\exp(-i\delta)\bigl(ad_j M^*_{\text{об}}\bigr)\,P, \tag{9}$$

где

$$P_0 = \begin{pmatrix} \varepsilon^2 E_{\text{AX}}^2 + E_{\text{BY}}^2 & -2i\varepsilon E_{\text{BY}}^2 \\ -2i\varepsilon E_{\text{AX}}^2 & E_{\text{AX}}^2 + \varepsilon^2 E_{\text{BY}}^2 \end{pmatrix},$$

$$P = \begin{pmatrix} \varepsilon^2 E_{\text{AX}}^2 + E_{\text{BY}}^2 & i\varepsilon(E_{\text{AX}}^2 - E_{\text{BY}}^2) \\ -i\varepsilon(E_{\text{AX}}^2 - E_{\text{BY}}^2) & E_{\text{AX}}^2 + \varepsilon^2 E_{\text{BY}}^2 \end{pmatrix};$$

$$\left(ad_j M_{\text{об}}\right) = \begin{pmatrix} \hat{m}_{22} & -\hat{m}_{21} \\ -\hat{m}_{12} & \hat{m}_{11} \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \left(ad_j M_{\text{об}}^*\right) = \begin{pmatrix} \hat{m}_{22}^* & -\hat{m}_{21}^* \\ -\hat{m}_{12}^* & \hat{m}_{11}^* \end{pmatrix}$$

— соответственно так называемые присоединенная и присоединенно-сопряженная матрицы объекта [8].

В процессе восстановления изображения просветим поляризационную голограмму реконструирующей волной, идентичной опорной. При этом прошедшая без дифракции волна представится в виде

$$\mathbf{E}_0 = M_0 \mathbf{E}_{\text{оп}} \approx \exp\left(-2i\varkappa d\hat{n}_0\right) \Bigg\{ E_{\text{AX}} \exp i(\omega t + \varphi) \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \frac{i\varkappa d\hat{v}_L}{\hat{n}_0} P_0 \right]$$
$$\times \begin{pmatrix} 1 \\ i\varepsilon \end{pmatrix} \oplus E_{\text{BY}} \exp i \left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right) \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \frac{i\varkappa d\hat{v}_L}{\hat{n}_0} P_0 \right] \begin{pmatrix} i\varepsilon \\ 1 \end{pmatrix} \Bigg\}. \tag{10}$$

Для сформированных поляризационной голограммой мнимого и действительного изображений получим соответственно:

$$\mathbf{E}_{-1} = M_{-1} \mathbf{E}_{\text{оп}} \approx \frac{i\varkappa d\hat{v}_L}{\hat{n}_0} \exp\left(-2i\varkappa d\hat{n}_0\right) \Bigg\{ E_{\text{AX}} \exp i\left(\omega t + \varphi + \delta\right) P\Big(ad_j$$
$$\times M_{\text{об}}\Big) \begin{pmatrix} 1 \\ i\varepsilon \end{pmatrix} \oplus E_{\text{BY}} \exp i \left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2} + \delta\right) P\left(ad_j M_{\text{об}}\right) \begin{pmatrix} i\varepsilon \\ 1 \end{pmatrix} \Bigg\}, \tag{11}$$

$$\mathbf{E}_{+1} = M_{+1} \mathbf{E}_{\text{оп}} \approx \frac{i\varkappa d\hat{v}_L}{\hat{n}_0} \exp\left(-2i\varkappa d\hat{n}_0\right)\left(1 + \varepsilon^2\right)$$
$$\times \Bigg\{ E_{\text{AX}} E_{\text{BY}}^2 \exp i\left(\omega t + \varphi - \delta\right) \left(ad_j M_{\text{об}}^*\right) \begin{pmatrix} 1 \\ i\varepsilon \end{pmatrix}$$
$$\oplus E_{\text{BY}} E_{\text{AX}}^2 \exp i \left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2} - \delta\right) \left(ad_j M_{\text{об}}^*\right) \begin{pmatrix} i\varepsilon \\ 1 \end{pmatrix} \Bigg\}. \tag{12}$$

Из (10) следует, что в недифрагированном пучке нет информации об объекте. Анализ (11) показывает, что в мнимом изображении поле объекта необратимо преобразовано по поляризации. В действительном же изображении, как следует из (12), формируется восстановленное по состоянию поляризации псевдоскопическое поле объекта.

В заключение отметим, что полученный результат может быть использован для создания нетрадиционных поляризационных устройств.

Автор приносит благодарность проф. Ш.Д. Какичашвили за интерес к работе и полезные обсуждения.

Осуществление исследования, описанного в этой публикации, стало возможным отчасти благодаря гранту № LC3200 Международного научного фонда и правительства Республики Грузия.

Список литературы

[1] *Какичашвили Ш.Д.* Поляризационная голография. Л., 1989. 142 с.
[2] *Какичашвили Ш.Д.* // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 7. С. 200–204.
[3] *Какичашвили Ш.Д., Килосанидзе Б.Н.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 23. С. 6–9.
[4] *Jones R.C.* // JOSA. 1941. V. 31. P. 488–493.
[5] *Hurwits H. Jr., Jones R.C.* // JOSA. 1941. V. 31. P. 493–499.
[6] *Weigert F.* // Verhandl. Dtschen Physik. Ges. 1919. Bd. 21. S. 479–483.
[7] *Какичашвили Ш.Д.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 2. С. 26–34.
[8] *Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А.* Матрицы и вычисления. М., 1984. 318 с.