

07; 12

© 1991 г.

## ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ СТРУКТУР ZnSe—ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

В. В. Никитин, А. П. Онохов

Приводятся результаты измерений спектральной плотности шумов жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) в фурье-плоскости когерентного спектроанализатора. Показана существенная мультипликативность пространственного шума ПВМС, что проявляется в зависимости плотности шума от средней интенсивности управляющего излучения. Даны рекомендации по снижению шумов жидкокристаллических ПВМС.

Пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) являются ключевыми элементами когерентных оптических процессоров, систем ассоциативной памяти и других важнейших узлов оптоэлектронных информационно-вычислительных систем. К настоящему времени разработан ряд ПВМС с электрической и оптической адресацией, обладающих широкими функциональными возможностями [1]. Для корректного сравнения модуляторов различных типов необходима оценка шумовых характеристик ПВМС, определяющих эксплуатационные возможности этих приборов.

Ранее были исследованы пространственные шумы ПВМС типа ПРИЗ и жидкокристаллических (ЖК) модуляторов света с фотослоем CdS [2, 3]. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований оптических шумов ПВМС с напыленным фотополупроводниковым (ФП) слоем ZnSe и планарно ориентированным жидким кристаллом.

В нашем случае источниками случайного по апертуре ПВМС рассеяния света являются нарушения однородности исходной ориентации ЖК слоя и наличие в нем посторонних включений. Кроме того, при подаче на модулятор света питающего напряжения к шумам, связанным с оптическими неоднородностями жидкокристаллического каскада, добавляются шумы электрического поля, возникающие вследствие неоднородности по площади характеристик слоев, контактирующих с ЖК. В экспериментах измерялись статистические характеристики интенсивности пространственного шума (математическое ожидание  $I_{\phi}$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma_I$ , закон распределения) в спектральной плоскости когерентного Фурье-анализатора. Исследованные образцы ПВМС представляли собой сэндвич-структуру, заключенную между двумя стеклянными подложками, и работающую в проходящем свете. В качестве источника записывающего излучения был использован диапроектор с набором нейтральных и спектральных светофильтров; считывание изображения с ПВМС осуществлялось вертикально поляризованным излучением He—Ne лазера ( $\lambda = 0.63$  мкм). К электродам модулятора света прикладывалось постоянное напряжение 5—20 В. Измерение характеристик пространственного шума проводилось при помощи малокадровой телевизионной камеры ( $T_{\kappa} = 3$  с), снабженной блоком анализа видеосигнала.

В общем случае усреднять случайный процесс в фурье-плоскости спектроанализатора необходимо по ансамблю реализаций, соответствующих различ-

ным образцам ПВМС. При эргодической модели пространственного шума вероятностные характеристики могут быть найдены по одной реализации случайного процесса, т. е. по конкретному распределению в апертуре исследуемого модулятора функций  $\Delta t(x, y)$  и  $\Delta \psi(x, y)$ , описывающих стохастическое изменение амплитудного и фазового пропускания ПВМС. Эргодическая гипотеза может быть принята, исходя из того, что характер изменения корреляционной функции исследуемого процесса с ростом ее аргумента не противоречит такой гипотезе. Для экспериментальной проверки эргодичности пространственного шума ПВМС для трех образцов приборов регистрировались фурье-голограммы оптического сигнала, соответствующего модулятору света, равномерно освещенному записывающим излучением с интенсивностью, соответствующей точке насыщения его модуляционной характеристики. Запись фурье-голограмм осуществлялась в линейном режиме на фотопластинки «Микрат ЛОИ-2» в диапазоне пространственных частот  $5-25 \text{ мм}^{-1}$ . Результаты исследований, сформированных с помощью голограмм автокорреляционных функций реализаций случайных процессов  $\Delta t(x, y)$  и  $\Delta \psi(x, y)$ , свидетельствуют о их близости к  $\delta$ -функциям (радиус корреляции незначительно превышает радиус кружка рассеяния используемой оптики), что позволило отнести пространственные шумы ПВМС к классу стационарных процессов типа белого шума.

При усреднении шумов ПВМС по частоте в пределах участка спектра с приблизительно постоянной энергией шумовой компоненты разрешающая способность анализатора должна быть такой, чтобы в полосе усреднения находилось большое число разрешаемых областей. В эксперименте величина элемента разрешения телевизионной камеры ( $15 \text{ мкм}$ ) была в пять раз меньше размеров центрального лепестка Фурье-преобразования от рабочей апертуры спектроанализатора ( $XU=15 \times 12 \text{ мм}$ ), что позволило получить набор выборочных реализаций интенсивности шума в окрестности данной пространственной частоты. Все исследования проведены при фокусном расстоянии анализирующей линзы  $F=550 \text{ мм}$ .

Формирование изображения в ПВМС типа ФП— $\text{K}$  обусловлено перераспределением электрического поля в объеме  $\text{K}$  под воздействием пространственного заряда, генерируемого в ФП записывающим излучением. Считывание информации производится линейно поляризованным светом за счет  $T$ -ориентационного эффекта; при этом происходит фазовая модуляция считывающего излучения. Фазовый контраст может быть преобразован в амплитудный при помещении структуры в скрещенные поляриды. В проведенных экспериментах обнаружено уменьшение усредненной интенсивности пространственного шума при переходе от фазовой к амплитудной модуляции. Для выяснения механизма этого явления рассмотрим когерентную световую волну считывающего света непосредственно за модулятором света, функцию передачи модуляции (ФПМ) ПВМС будем считать постоянной в рабочем диапазоне пространственных частот.

Пусть модулятор света нечувствителен к считывающему излучению и характеризуется действительными функциями  $t(x, y)$  и  $\psi(x, y)$ , описывающими случайное изменение амплитудного и фазового пропускания ПВМС. Считывание изображения с модулятора света происходит световой волной  $R(x, y) = r(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]$  также со случайным распределением амплитуды и фазы в апертуре спектроанализатора. Если в процессе работы модулятор подвергся экспозиции записывающим излучением  $E(x, y)$ , то когерентное световое поле непосредственно за ПВМС в линейном приближении описывается выражением

$$A(x, y) = t(x, y) \cdot r(x, y) \cdot \exp\{i[\psi(x, y) + \varphi(x, y) + kE(x, y)]\}, \quad (1)$$

где  $k$  — крутизна сенситометрической характеристики ПВМС.

Будем считать, что случайные амплитудные  $\Delta t$  и фазовые  $\Delta \psi$  изменения пропускания ПВМС, а также вариации амплитуды  $\Delta r$  и фазы  $\Delta \varphi$  считывающего света относительно средних значений малы; величины средней фазы  $\psi_0$  и  $\varphi_0$  положим равными нулю. Разлагая фазовые множители в ряд и пренебре-

гая членами высоких порядков малости, выражение (1) можно преобразовать к виду

$$A(x, y) = t_0 r_0 \exp \{i[\Delta\phi + \Delta\varphi + kE(x, y)]\} + t_0 \Delta r(x, y) + r_0 \Delta t(x, y) + [t_0 \Delta r(x, y) + r_0 \Delta t(x, y)] \exp [ikE(x, y)], \quad (2)$$

где  $t_0$  — среднее пропускание ПВМС,  $r_0$  — средняя амплитуда считывающего света.

В спектральной плоскости интенсивность света будет пропорциональна квадрату модуля фурье-преобразования  $A(x, y)$ . Фурье-образ  $F\{r_0 \exp \times [i\Delta\varphi(x, y)] + \Delta r(x, y)\}$  описывает собственные шумы спектроанализатора, обусловленные дефектами и объемным рассеянием света в стекле оптических элементов. Введение в оптическую систему невозбужденного модулятора света приводит к увеличению интенсивности пространственного шума на

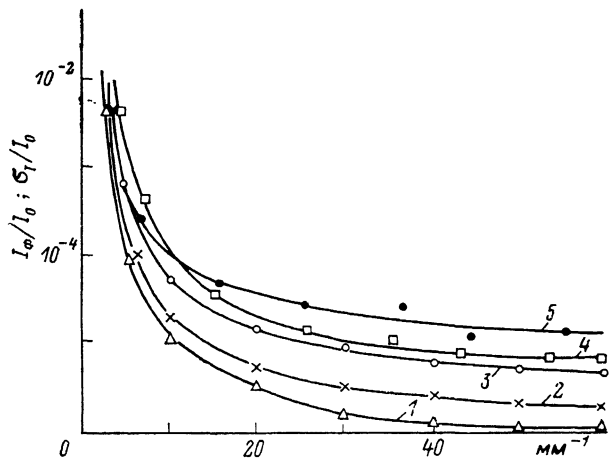


Рис. 1. Распределение усредненной интенсивности света  $I_\phi$  в спектральной плоскости анализатора, отнесенное к интенсивности света  $I_0$  в нулевом порядке дифракции.

1 — энергетический спектр собственных шумов Фурье-процессора, 2 — энергетический спектр пространственного шума невозбужденного ПВМС в режиме амплитудной модуляции, 3 — энергетический спектр пространственного шума невозбужденного ПВМС в режиме фазовой модуляции, 4 — энергетический спектр пространственного шума полностью просветленного ПВМС, 5 — зависимость среднеквадратического отклонения интенсивности фона  $\delta_I$  ПВМС от пространственной частоты.

величину, пропорциональную  $F\{t_0 \Delta r(x, y) + r_0 \Delta t(x, y) + t_0 r_0 \exp [i\Delta\phi(x, y)]\}$  вследствие дифракции света на амплитудных и фазовых дефектах структуры ФП—ЖК. Наконец, наличие экспонирующего излучения приводит к появлению мультипликативной составляющей шума  $F\{[t_0 \Delta r(x, y) + r_0 \Delta t(x, y)] \times \exp [ikE]\}$ , зависящей от величины управляющего воздействия.

На рис. 1 представлено экспериментально измеренное усредненное значение интенсивности пространственного шума в спектральной плоскости фурье-анализатора со скрещенными поляроидами в отсутствие ЖК ПВМС (кривая 1) и установленном модуляторе при поданном на его электроды постоянном напряжении (кривая 2). Здесь же приведены аналогичные зависимости для случая, когда ПВМС работает в режиме фазовой модуляции (кривая 3). Видно, что модулятор света вносит определенное изменение в начальное пропускание оптической системы. Установка в схему поляризационных элементов приводит к уменьшению стохастической компоненты прошедшего через ПВМС излучения вследствие подавления составляющих шума, продифрагировавших на неоднородностях ориентации директора. Заметим, что в области низких пространственных частот энергетический спектр шума неосвещенного ПВМС практически совпадает с энергетическим спектром шума свободной апертуры, что указывает на доминирующий характер шума процессора на этих частотах.

Для определения вклада в результирующий уровень фона мультипликативной составляющей собственных шумов ПВМС модулятор при поданном на его электроды напряжении равномерно освещался некогерентным светом со спектральным составом, близким к кривой спектральной чувствительности ZnSe. Исследования закона распределения интенсивности пространственного шума ПВМС проводилось для двух значений пространственных частот: 8 и 25  $\text{мм}^{-1}$ . Необходимый объем выборки ( $N=600$ ), обеспечивающий вероятность правильного заключения 0.95, определялся с помощью таблицы достаточно больших чисел [4]. Выборка значений интенсивности осуществлялась с интер-

валом  $\Delta \xi$ , значительно превосходящим радиус корреляции исследуемого случайного процесса ( $\Delta \xi = (20\lambda F)/X$ ). На рис. 2 приведены гистограммы отклонения величины интенсивности фона в спектральной плоскости от среднего значения. Наблюдаемые данные хорошо согласуются с нормальным распределением: критерий согласия  $P(\chi^2)$  для обоих случаев превышает 0.85.

В дальнейшем с целью сокращения объема вычислений при обработке данных применялись методы оценки среднего и среднеквадратического отклонений

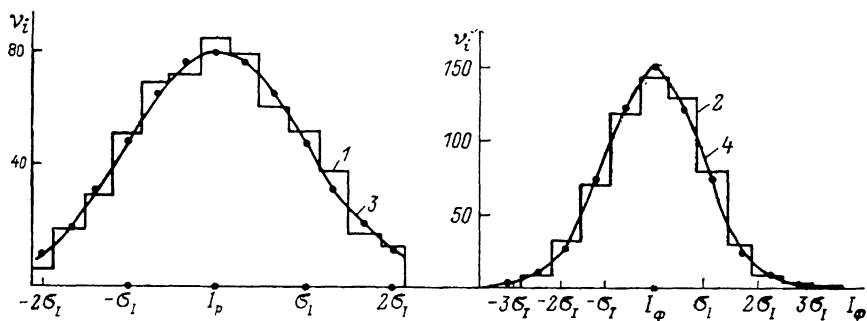


Рис. 2. Гистограммы отклонения интенсивности пространственного шума ПВМС от среднего значения для пространственных частот 8 (1) и 25  $\text{мм}^{-1}$  (2) и аппроксимирующие кривые нормального распределения плотности вероятности (3, 4).

случайного процесса по разности наибольшего и наименьшего значений выборки значительно меньшего объема ( $N=20$ ), разработанные в математической статистике [6]. При условии независимости отсчетов в выборке за оценку среднего принималась полусумма наибольшего и наименьшего значений выборки, а за оценку среднеквадратического отклонения — частное от деления разности наибольшего и наименьшего значений выборки на пик-фактор  $\beta$  (для нормального процесса при  $N=20$   $\beta=3.73$ ).

Как показали эксперименты (рис. 1, кривые 4 и 5), мультипликативная составляющая шу-

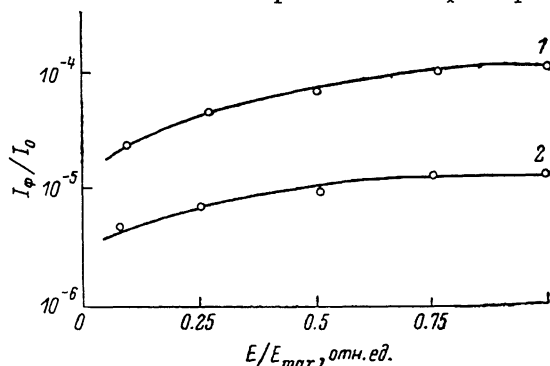


Рис. 3. Математическое ожидание интенсивности фона в спектральной плоскости при засветке ПВМС некогерентным светом на пространственной частоте 10 (1) и 40  $\text{мм}^{-1}$  (2).

$I_0$  — интенсивность света в нулевом порядке дифракции ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ).

мов ПВМС уменьшается с ростом пространственной частоты; в диапазоне от 10 до 40  $\text{мм}^{-1}$  энергетический спектр становится более плоским, что также свидетельствует о допустимости модели «белого» шума. При полностью просветленном модуляторе света уровень паразитного фона, создаваемого им в спектральной плоскости, более чем на порядок превышает собственные шумы спектроанализатора.

Влияние интенсивности экспонирующего излучения на уровень шумов ПВМС показано на рис. 3. Видно, что при различном уровне входной засветки различным является и уровень рассеянного в спектроанализаторе света.

В заключение отметим, что полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для расчета числа воспроизводимых модулятором света градаций сенситометрического клина, а также динамического диапазона и обнаружительной способности когерентно-оптических спектроанализаторов с ПВМС на входе.

### Список литературы

- [1] *Васильев А. А., Касасент Д., Парфенов А. В.* Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
- [2] *Шлягин М. Г., Хоменко А. В.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 6. С. 1201.
- [3] *Новиков А. В.* // Тез. докл. I Всесоюз. конф. по оптической обработке информации. Л., 1988. Т. 2. С. 44.
- [4] *Митропольский А. К.* Техника статистических вычислений. М.: Физматгиз, 1961. 480 с.
- [5] *Жовинский А. Н., Жовинский В. Н.* Инженерный экспресс-анализ случайных процессов. М.: Энергия, 1979. 128 с.

Поступило в Редакцию  
6 февраля 1990 г.  
В окончательной редакции  
22 мая 1990 г.

---