

## **Демонстрация самоорганизующегося расщепления лазерного пучка.**

### **Введение**

В последнее время в научной литературе все большее внимание уделяется изучению процессов самоорганизации в различных органических и неорганических объектах. Признаком самоорганизации является образование диссипативных структур. По определению, приведенному в "Физической энциклопедии" [3], диссипативными структурами называют "устойчивые пространственно неоднородные структуры, возникающие в результате развития неустойчивостей в однородной неравновесной диссипативной среде". Однако, не любая неоднородная структура является результатом процесса самоорганизации. Для самоорганизации присущи два основных признака [4]: 1) самопроизвольность процесса в том смысле, что во внешнем воздействии должны отсутствовать какие-либо организующие факторы; 2) установление в неравновесных диссипативных средах, в результате указанного воздействия, устойчивых *регулярных* структур. Наиболее известным примером самоорганизации являются "ячейки Бенара", развивающиеся в плоскопараллельном слое жидкости при его нагревании снизу до температуры тепловой конвекции [5]. Область науки, которая занимается изучением процессов самопроизвольного формирования регулярных структур, называют *синергетикой*.

Заметим, что сведений, накопленных к настоящему моменту о реальных процессах самоорганизации, не так уж много. Поэтому любой новый пример самоорганизации представляет несомненный интерес. Сведений о природе фотоиндуцированных периодических структур (ПС), вполне достаточно, чтобы понять, что ПС подпадают под определение самоорганизующихся диссипативных структур. Действительно, исходный объект — тонкая светочувствительная пленка  $\text{AgCl-Ag}$  является однородной неравновесной диссипативной средой для падающего на нее монохроматического света. В падающем световом пучке, в отличие от двух или нескольких пучков, отсутствует информация о последующем развитии регулярных структур. Тем не менее, когда экспозиция превышает пороговую величину (для пленки  $\text{AgCl-Ag}$  примерно  $10 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$  [1]), в пленке самопроизвольно возникают неустойчивости, развитие которых, в конечном итоге, приводит к образованию устойчивых пространственно неоднородных регулярных структур в виде ПС.

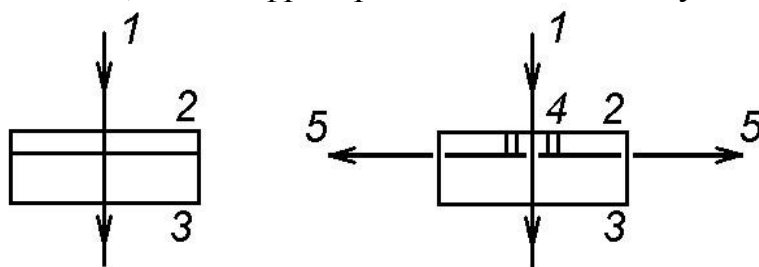
С точки зрения самоорганизации отметим, что ПС, развившись в процессе возбуждения, не исчезают после выключения индуцирующего пучка. Очевидно, что такое "замораживание" структуры возможно в твердых телах. В жидкости ячейки Бенара разрушаются после прекращения теплового возбуждения. Стабильность диссипативной структуры облегчает ее исследования. Нам представляется, что фотоиндуцированные ПС демонстрируют новый пример самоорганизации в твердых телах.

### **Условия наблюдения ПС в режиме их формирования**

Внешним признаком самоорганизации ПС является возникновение и развитие дифракции индуцирующего светового пучка на этой структуре в

процессе экспозиции. Однако, периоды и ПС малы по сравнению с длиной волны  $\lambda_0$  индуцирующего света и для случая формирования ПС нормально падающим пучком заключены в пределах, задаваемых формулами  $\lambda_0 \times n_2^{-1} \geq d > \lambda_0 \times n^{-1}$  (1). Из (1) и  $d = (n^* \cdot \sin \phi_l - n_1 \cdot \sin \varphi) = l \cdot \lambda_0$  (2) следует, что при образовании ПС на волноводных модах дифрагированное излучение представляет собой волноводную моду в пленке. Это дифрагированное излучение возбуждается на ПС но не распространяется за ее пределы из-за сильного затухания на неэкспонированных участках пленки и наблюдать выход этого излучения из пленки при формировании ПС практически невозможно. В этих условиях косвенным признаком развития ПС и возникновения дифракции является только малоугловое рассеяние и малоугловая дифракция, описанные в лаб. III.2 и III.4. В то же время, наиболее эффектным наблюдением самоорганизации ПС является такое, которое позволяет непосредственно увидеть развитие дифрагированных пучков во время экспозиции.

Из формул (1) и (2) следует, что выход дифрагированных пучков в воздух при формировании ПС в асимметричном диэлектрическом планарном волноводе нормально падающим пучком будет наблюдаться в одном случае, когда ПС образуется на предельной моде с постоянной распространения  $\beta = k n_2$ . В этом случае в (2)  $\varphi = 0^\circ$ ,  $n^* = n_2$ ,  $|l| = 1$  и  $|\psi_l| = 90^\circ$ . Предельная мода распространяется вдоль границы пленка–подложка и при развитии ПС выводится в воздух через торцы подложки в виде скользящих по границе дифрагированных пучков (рис. 1). На рисунке схематически показано исходное состояние образца (а) в начале экспонирования, когда ПС еще не образовалась и дифрагированные пучки отсутствуют. На схеме (б) ПС образована и из торцов подложки выходят дифрагированные пучки. Цифрами показаны: 1 — индуцирующий лазерный пучок; 2 — пленка AgCl–Ag; 3 — подложка; 4 — образовавшаяся в результате экспозиции ПС; 5 — дифрагированные боковые пучки



*Рис. 1. Схема образца (а) и образования на нем ПС, дающей дифрагированные пучки, распространяющиеся вдоль границы пленка–подложка.*

#### **Выполнение эксперимента**

Для реализации эксперимента готовят тонкую пленку AgCl–Ag на стеклянной подложке с размерами примерно 30x10x1,5 мм. При использовании в качестве источника излучения He-Ne лазера типа ЛГ-79-1 толщина  $h$  пленки AgCl должна быть меньше толщины отсечки  $h_0 = 49$  нм волноводной  $TE_0$  моды (рекомендуется толщина  $h \approx 30$  нм). Толщина наносимой затем пленки Ag должна быть примерно 10 нм. Последующее облучение подготовленного образца при

строго нормальном падении лазерного пучка производят по схеме рис.2.

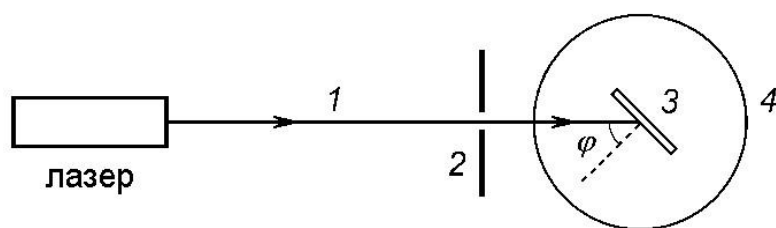


Рис. 2. Схема облучения пленки при формировании в ней периодической структуры.

Цель демонстрации состоит в том, чтобы показать саморазвитие боковых дифрагированных пучков, которые являются прямым указанием на самоорганизацию в образце ПС. Поэтому схему следует дополнить боковыми экранами, поставленными против торцов подложки. Как и в предыдущих работах направление  $E_0$  линейной поляризации лазерного пучка ориентируют вертикально. При  $h < h_0$  ПС развивается на излучательной ТЕ моде и ее штрихи ориентированы преимущественно вдоль  $E_0$ , а дифракция возникает в направлении  $\perp E_0$ . Рекомендуется установить образец длинной стороной вдоль  $E_0$  и боковые экраны поместить соответственно напротив длинных торцов подложки на расстоянии в несколько сантиметров от них. Облучаемый участок пленки должен находиться на одинаковых расстояниях от этих торцов.

Наблюдения в реальном эксперименте дают следующие результаты. В момент включения экспозиции и в течение нескольких последующих секунд боковые пучки, как и малоугловое рассеяние (рис. 3,а), на экранах не видны. Затем пучки появляются и их интенсивность нарастает. Увеличение интенсивности пучков со временем экспозиции происходит в результате роста ПС за счет положительной обратной связи, что характерно для самоорганизующихся структур. Излучение из торцов вначале слабое и заполняет торцы подложки почти равномерно. По мере развития ПС дифрагированное через торцы излучение все сильнее прижимается к поверхности подложки, на которой находится пленка, и к соответствующему краю торца. При развитии ПС до насыщения (примерно после 0,5 часа) на боковых экранах наблюдаются яркие и довольно узкие полосы света, вытянутые вдоль направления  $E_0$ . Следует заметить, что при выходе из торцов подложки пучки немного отклоняются в сторону подложки из-за преломления. Качество пучков зависит также от состояния торцов. Они искажаются из-за преломления на неплоских торцах, которые получаются при вырезании подложки стеклорезом. Однако, указанные искажения не столь уж сильно влияют на основной результат. Поэтому можно рекомендовать использование подложки с плоскими полированными торцами, но при качественных наблюдениях эта рекомендация не является обязательной.

Фотография картины самоиндуцированного расщепления лазерного пучка в стадии насыщения показана на рис. 3. Цифрами показаны: 1 — отверстие в основном экране (рис. 3) для прохождения лазерного пучка к образцу (отверстие выглядит размытым из-за малой глубины фокусировки; объектив фотоаппарата

фокусировался на образец); 2 — лазерный пучок (виден из-за рассеяния в дыму от сигареты при фотографировании); 3 — образец; 4 — малоугловое рассеяние на основном экране; 5 — боковые экраны, расположенные против торцов образца и слегка повернутые в сторону объектива фотоаппарата; 6 — полосы света на боковых экранах от выходящих из торцов дифрагированных пучков. Фотография наглядно показывает, что лазерный пучок 2, нормально падающий на образец 3 и формирующий в нем ПС на предельной моде, в результате самопроизвольно расщепляется на два симметричных пучка, выходящих из торцов подложки.

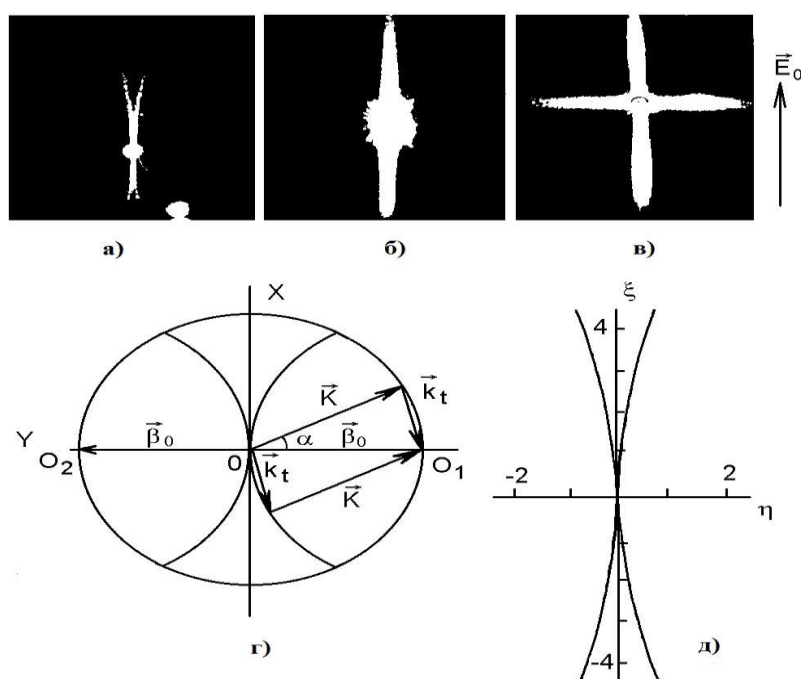


Рис. 3. Картины малоуглового рассеяния (а, б, в) линейно-поляризованного лазерного пучка от образованных им периодических структур; г — полярная диаграмма, поясняющая возникновение МР; д — расчетная картина МР на экране.

Измерить интенсивность боковых пучков трудно из-за их растянутости вдоль  $\vec{E}_0$ . Однако оценки, сделанные на основании измерения мощности в центральной части этих пучков с помощью измерителя мощности лазерного излучения типа ИМО-2Н, показали, что их интенсивность составляет несколько процентов от интенсивности лазерного пучка. При такой дифракционной эффективности, несмотря на расхожимость, пучки хорошо наблюдаются на расстоянии более одного метра от образца.

### Заключение

В заключение отметим, что пленки  $\text{AgCl-Ag}$  не являются единственным объектом, в котором образуются ПС. Эффективность этого процесса высока также в чистых пленках  $\text{AgI}$ , которые легко получают методом полного иодирования тонких пленок  $\text{Ag}$  [2]. В пленках  $\text{AgI}$  действует специфический механизм образования ПС, основанный на обратимом фотолизе, и ПС в них

имеют вид периодического рельефа, образованного в результате массопереноса AgI по поверхности образца в интерференционном поле. Для лазерного пучка с  $\lambda_0 = 633$  нм пленки AgI прозрачны и светочувствительность в этом случае определяется слабым нелинейным поглощением [6]. Поэтому, для формирования ПС таким пучком требуется мощность не менее 10 мВт. Однако, с другой стороны, из-за очень низкого коэффициента поглощения, ПС в этих пленках для излучения с  $\lambda_0 = 633$  нм ведут себя как фазовые решетки. Известно, что дифракционная эффективность фазовых решеток может быть гораздо выше, чем у амплитудных. По этой причине ПС на предельной ТЕ моде в пленках AgI дает более яркие дифрагированные пучки по сравнению с пленками AgCl–Ag. Дифракционная эффективность в этом случае может превышать 10 % и пучки, несмотря на их расходимость, в затемненном помещении хорошо наблюдаются на боковых экранах, удаленных от образца на несколько метров. Поэтому, для усиления зрительного восприятия эффекта самоиндуцированного расщепления лазерного пучка можно рекомендовать применение пленок AgI.

## Литература

1. Ageev L.A., Miloslavsky V.K. Photoinduced effects in light-sensitive films // Opt. Engineering. –1995. –34, 14. –P.960—972.
2. Агеев Л.А., Милославский В.К., Блоха В.Б., Ассаад Н.  
Фотоиндуцированные периодические структуры в тонких пленках  $\text{AgI}$  и механизм их формирования // Поверхность. Физ., хим., мех. –1987. –12. – С.31–37
3. Физическая энциклопедия. –М.: Сов. энциклопедия, 1988. –Т.1. – 704 с.
4. Физическая энциклопедия. –М.: Сов. энциклопедия, 1994. –Т.4. –704 с.
5. Николис Г., Пригожий И. Познание сложного. –М.:Мир, 1990. –344 с.
6. Агеев Л.А., Эль-Ашхаб Х.И., Ревуцкая О.Ф. Фотоиндуцированные периодические структуры в тонких пленках  $\text{AgI}$  // Функциональные материалы. – 1994. –1, №2. –С.16–21.