

# Исследование связи фотоиндуцированных периодических структур с волноводными модами.

## Введение

При описании природы ПС было указано на их непосредственную связь с волноводными модами, возбуждаемыми при Рэлеевском рассеянии падающего света в пленке. Эта связь легко устанавливается при сравнении экспериментальных и расчетных зависимостей периодов  $d$  ПС от толщины  $h$  пленки (рис. 1). Однако, получение подобных зависимостей в широком интервале толщин при точных измерениях  $d$  и  $h$  является трудоемкой задачей, требующей больших затрат времени. В учебном эксперименте можно ограничиться изучением участка зависимости  $d(h)$ , который соответствует образованию ПС на  $TE_0$  модах. Один из возможных вариантов такого эксперимента, который можно выполнить в течении учебного времени, отводимого на лабораторные занятия, предлагается в настоящем описании.

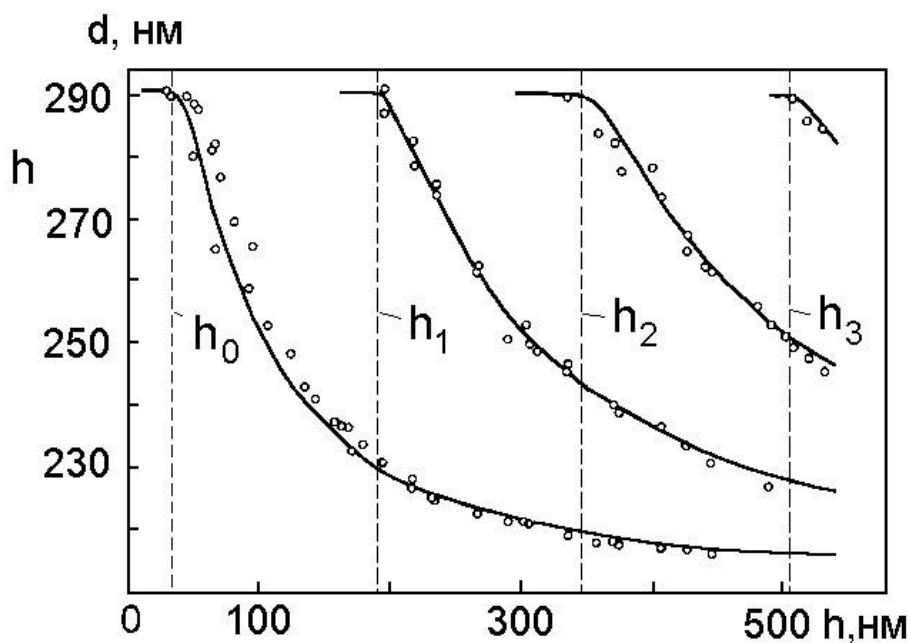


Рис. 1. Зависимости периодов структур от толщины пленки AgCl.

## Выполнение эксперимента

Для выполнения работы приготавливают пленку AgCl-Ag в виде клина с плавно меняющейся толщиной  $h$  слоя AgCl. Пленку AgCl наносят на длинную стеклянную подложку в соответствии со схемой **рис. 7**.

**рис. 7(2)**

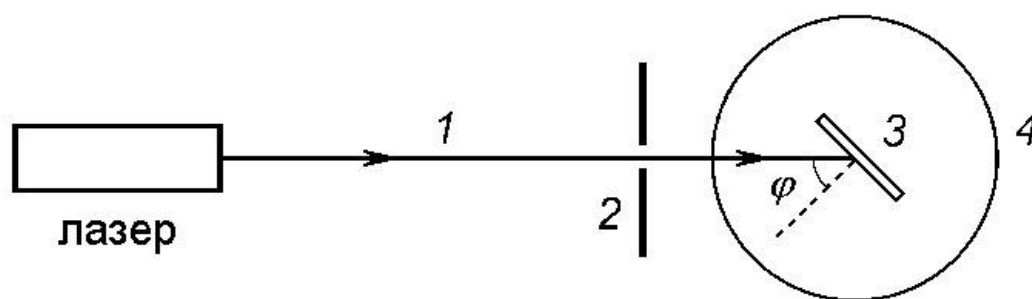
Распределение толщины вдоль подложки примерно будет описываться формулой (1). Примем, что толщина в точке О непосредственно над испарителем равна  $h_{\max}$ . Переменное расстояние от О до любой точки А пусть равно  $l$ . Толщину в точке А обозначим  $h_l$ . Тогда из (1) следует формула для  $h_l$ , [1]:

$$h = \frac{M \times \cos^2 \alpha}{\pi \times \rho \times r^2} \quad (1)$$

$$h_l = h_{\max} \cdot [1 + (l \cdot r_0^{-1})^2]^{-2} \quad (2)$$

Выберем максимальную толщину пленки AgCl  $h_{\max} \approx 150$  нм и расстояние  $r_0 = 15$  см от испарителя до точки О на подложке, где должна получиться эта толщина. Тогда из формулы (18) при  $a = 0$ ,  $r = r_0$  и  $\rho_{\text{AgCl}} = 5,56 \text{ г·см}^{-3}$  получаем, что необходимо испарить навеску AgCl массы  $M \approx 60$  мг. Наименьшее значение  $h_l$  на конце подложки, удаленном от точки О, должно равняться  $h_{\min} \approx 50$  нм (выбор необходимого интервала толщин 50-150 нм обоснован ниже). Заданный интервал  $h$  определяет необходимую длину подложки  $l \approx 13$  см, которую находим из формулы (2). Стеклянную подложку такой длины, с шириной примерно 2 см и толщиной 1,5-2 мм, удобнее всего вырезать стеклорезом из стекла от фотопластинок. После испарения клиновидного слоя AgCl на него напыляют тонкий (примерно 10 нм) слой Ag. При напылении пленки Ag подложку с клиновидным слоем AgCl помещают так, чтобы над испарителем, на расстоянии  $r_0 = 15$  см, примерно находился ее центр. Неизбежная неравномерность толщины пленки Ag существенной роли при последующем формировании ПС не играет.

Для индуцирования ПС на подготовленном образце удобно использовать линейно поляризованный одномодовый гауссов пучок непрерывно излучающего He-Ne лазера с длиной волны излучения  $\lambda_0 = 633$  нм и мощностью  $W \approx 10$  мВт (например, лазер типа ЛГ-79-1, завод "Газотрон", г.Ровно, Украина). Для облучения образца и измерения периодов индуцированных ПС используется оптическая схема, показанная на рис. 3. Линейная поляризация пучка, излучаемого газовым лазером, задается наклоном окон газоразрядной трубки под углом Брюстера к ее оси [2]. Конструкция лазера ЛГ-79-1 такова, что при его расположении на горизонтальной поверхности направление вектора  $E_0$ , задающего линейную поляризацию пучка составляет угол примерно  $45^\circ$  с горизонтом. В то же время, удобным для работы является вертикальное направление  $E_0$ . Поэтому следует предусмотреть приспособление, которое позволяет установить это направление путем поворота корпуса лазера вокруг его оси. Предварительную установку поляризации по вертикали производят с помощью поляризатора с известным направлением поляризации. Затем эта установка проверяется и корректируется по визуальному наблюдению на экране (рис. 3) полосы малоуглового рассеяния, возникающего при формировании ПС. Направление этой полосы для ПС, формируемых ТЕ модами, точно совпадает с направлением  $E_0$ .



*Рис. 3. Схема облучения пленки при формировании в ней периодической структуры.*

В схеме (рис. 3) используют небольшой гониометр с горизонтальным вращающимся столиком и точностью отсчета углов поворота не хуже  $0,1^\circ$ .

Подходящими являются гониометры от теодолитов, нивелиров, поляризационных микроскопов и др. им подобные. Устанавливают гониометр так, чтобы лазерный пучок проходил строго над его центром. Расстояние от выходного зеркала лазера до этого центра должно составлять примерно 60-80 см. Как можно ближе к гониометру помещают плоский белый экран размером примерно 15x20 см и с отверстием в центре диаметром 2-3 мм для свободного прохождения лазерного пучка. Образец устанавливают на столике гониометра так, чтобы плоскость пленки в месте облучения совпадала с центром гониометра. Лазерный пучок направляют на пленку под углом падения  $\varphi = 0^\circ$ , что легко контролируется по распространению отраженного образцом пучка навстречу падающему.

Образец на гониометре поочередно устанавливают так, чтобы облучать разные его участки. Начинать рекомендуется с облучения на конце образца, где толщина пленки AgCl равна максимальной. ПС формируются в пределах небольшого пятна, диаметр которого соответствует эффективному сечению гауссова пучка. Экспозиция должна обеспечить полное развитие ПС с максимальной величиной дифракционной эффективности. За развитием ПС удобно следить по возникновению и разгоранию полосы малоуглового рассеяния на экране. При указанных выше мощности пучка и расстоянии от лазера до образца время экспозиции, при котором развитие ПС достигает насыщения, составляет примерно 10-15 мин. После завершения экспозиции поворачивают столик гониометра с образцом и увеличивают угол падения  $\varphi$  пучка на ПС до появления на экране серповидного (рис. 4) пучка дифракции от ПС и далее выводят центр этого пучка навстречу падающему, т.е. направляют его в отверстие на экране. При этом угол падения равен углу дифракции, в этом положении делают отсчет угла  $\varphi$  и вычисляют период  $d$  ПС по формуле  $d = \lambda_0 \times (2 \times \sin \varphi)^{-1}$  с точностью  $\pm 1$  нм. Измерения выполняют максимально быстро, на время отсчета угла  $\varphi$  лазерный

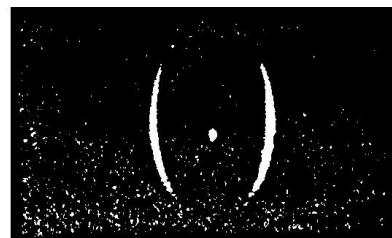


Рис. 4. Дугообразные световые пятна на экране от пучков дифракции на периодической структуре.

пучок перекрывают, чтобы предотвратить перестройку исходной ПС при ее облучении наклонно падающим пучком. Далее, путем перемещения образца на заданные расстояния (примерно 1 см) от первого облученного пятна, при нормальном падении и той же экспозиции получают ПС на участках с разными толщинами AgCl и выполняют затем измерения их периодов. По мере уменьшения толщины пленки периоды ПС должны увеличиваться (см. рис. 1). Записывают в таблицу значения  $d$  и измеренные миллиметровой линейкой соответствующие расстояния  $l$  облученных пятен, отсчитанные от первого пятна. При реальной точности в определении толщины пленки AgCl в этом эксперименте не имеет смысла делать более 10 измерений. Число измерений можно сократить при ограничении времени, выделенного на выполнение работы.

### Обработка результатов эксперимента

Обрабатывать измерения рекомендуется следующим образом. Исследованные в эксперименте ПС образованы ТЕ модами и их периоды связаны с постоянными распространения мод  $\beta$  и толщиной  $h$  условиями  $d = 2\pi \times \beta^{-1}$  (3) и  $bh = \arctg \frac{(\beta^2 - k^2 n_1^2)^{1/2}}{b} + \arctg \frac{(\beta^2 - k^2 n_2^2)^{1/2}}{b} + m\pi$  (4). При формировании ПС до стадии насыщения в дисперсионное уравнение (4) следует подставлять толщину  $h$  как толщину пленки AgCl, без учета толщины напыленного на исходный образец тонкого слоя Ag. Действительно, при формировании ПС серебро распределяется в объеме пленки AgCl, (рис. 9,б) и накапливается в минимумах интерференции, образованной падающей волной и модой. По этой же причине в (4) входит показатель преломления  $n$  пленки AgCl [3]. Таким образом можно считать, что при известных значениях  $n$ , входящих в формулу (4), измеренные  $d$  ПС должны давать более точные значения толщин  $h$  пленки AgCl по сравнению с вычисленными по формуле (2). Поэтому целью работы может быть проверка применимости формулы (2) для определения толщин в клиновидном слое AgCl.

рис. 9б (5)

Прежде всего следует рассчитать теоретическую зависимость  $d(h)$  по формуле (3), (4). Для данного эксперимента параметры в формуле (4) имеют следующие значения:  $n_1 = 1$  (воздух),  $n_2 = 1,515$  (стеклянная подложка) и для пленки AgCl  $n = 2,06$  при  $\lambda_0 = 632,8$  нм [4]. Минимальное значение постоянной распространения волноводной моды в соответствии с условием  $kn_2 \leq \beta \leq kn$  (5) равно  $\beta_{\min} = (2\pi \cdot \lambda_0^{-1}) \cdot n_2 = 15,04$  мкм<sup>-1</sup> и согласно условию синхронизма (3) значение  $\beta_{\min}$  определяет максимальное значение периода ПС  $d_{\max} = \lambda_0 \cdot n_0^{-1} = 418$  нм. Мода TE<sub>0</sub>  $\beta = \beta_{\min}$  является предельной поскольку при меньших  $\beta$  существуют только излучательные моды, а волноводные моды в пленке могут быть возбуждены при  $\beta \geq \beta_{\min}$ . Это же значение  $\beta_{\min}$  определяет и толщину отсечки или, другими словами, наименьшую толщину  $h_0$ , начиная с которой в пленке могут существовать волноводные TE<sub>0</sub> моды. Из  $h_m = \frac{1}{b} \left[ \arctg \frac{(\beta^2 - n_1^2)^{1/2}}{b} + m\pi \right]$  (6), полагая  $m = 0$ , находим  $h_0 = 49$  нм и это значение определяет выбор наименьшей толщины в клиновидном слое AgCl, приготавливаемом для проведения эксперимента. Затем задают с определенным шагом произвольные значения  $\beta_i > \beta_{\min}$  и из (3) находят соответствующие им толщины  $h_i$ , а из (4) отвечающие этим толщинам значения периодов ПС  $d_i$ . Составляют таблицу  $d_i(h_i)$  и строят график  $d(h)$  (рис. 6). На графике расчетная зависимость  $d(h)$  показана сплошной линией. Горизонтальная пунктирная линия показывает значение  $d_{\max}$ , вертикальная – значение  $h_0$ . Далее, на расчетную кривую наносят измеренные значения  $d$  (точки на рис. 6) и находят соответствующие им толщины пленки  $h$ . Из графика видно, что выбранная для проведения эксперимента максимальная толщина пленки  $h \approx 150$  нм вполне достаточна для изучения закономерности в уменьшении  $d$  TE<sub>0</sub>–ПС с ростом  $h$ .

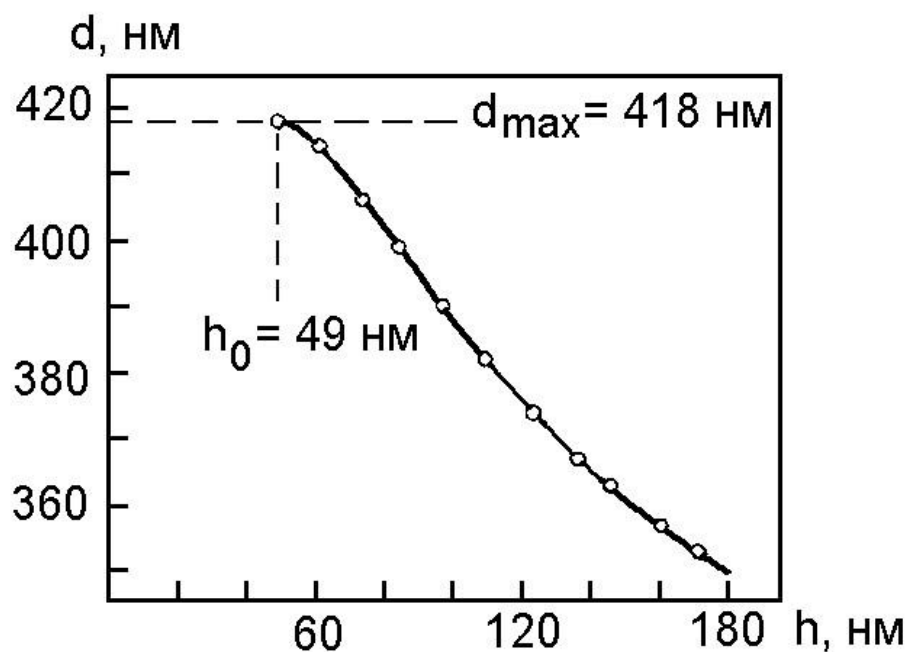
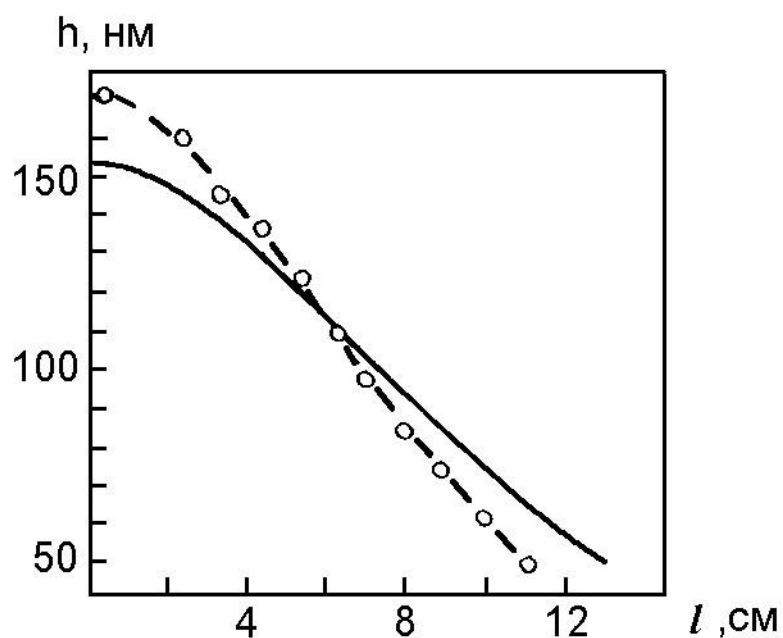


Рис. 6. Расчетная зависимость периодов  $d$  ПС от толщины  $h$  пленки  $\text{AgCl}$ . Точки на расчетной кривой – экспериментальные значения  $d$ , нанесенные на кривую с целью определения соответствующих им толщин  $h$  пленки.

Таким образом, по измеренным значениям  $d$  на разных участках образца с координатами  $l$  с помощью расчетного графика на рис. 6 находят соответствующие этим координатам толщины  $h$  и строят зависимость  $h(l)$  (рис. 7).



*Рис. 7. Зависимости толщины  $h$  пленки  $\text{AgCl}$  от координаты  $l$  на подложке. Пунктирная кривая с точками – эксперимент на основе измерений периодов  $d$  ПС; сплошная кривая – расчет по формуле (2).*

Полученная из измерений  $d$  зависимость показана точками и проведенной по ним пунктирной кривой. Наконец, строят расчетную кривую  $h(l)$  по формуле (2) (показана сплошной линией) и сравнивают с найденной из измерений  $d$ . Видно, что рассматриваемый здесь пример эксперимента дает довольно существенное отклонение измеренной кривой от расчетной. Это различие в основном связано с тем, что реальный испаритель все же не соответствует точно модели плоского испарителя. Действительно, как показано на **рис. 8**, начиная с  $h > 100$  нм становится заметным увеличение измеренной толщины пленки в точке О (рис. 7), т.е. при  $l = 0$ , по сравнению с рассчитанной. При  $h \approx 150$  нм и измерения, приведенные на **рис. 8**, и рассмотренный здесь эксперимент находятся в согласии и дают завышение толщины примерно на 10-20 нм по сравнению с расчетной. Такой рост  $h$  может быть связан не только с пористостью напыляемой пленки, но и с тем, что навеска  $\text{AgCl}$  не растекается равномерным слоем по плоскости испарителя, а сосредотачивается в виде смачивающего расплава в некоторой его части. Это обстоятельство, а также экранирование молекулярного потока при испарении бортиками "лодочки" (**рис. 6 и 7**), по-видимому, могут объяснить более быстрое уменьшение  $h$  с ростом  $l$  (рис. 7) по сравнению с расчетом.

**рис. 8** (8)

**рис. 6** (9)

### **Заключение**

Несмотря на то, что количественной оценки ошибок измерений здесь не делается, рассмотренные результаты все же наглядно показывают возможности контроля толщины пленки  $\text{AgCl}$  двумя методами – по измерениям периодов фотоиндуцированных ПС и по массе напыляемой навески в модели плоского испарителя. Однако главный результат данной работы состоит в том, что рассмотренный эксперимент позволяет выявить природу фотоиндуцированных ПС



и убедиться в их связи с возбуждаемыми в пленке AgCl-Ag падающим лазерным пучком волноводными модами.

## Литература

1. Слуцкая В.В. Тонкие пленки в технике сверхвысоких частот. –М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962. –С.28–29, 148–160.
2. Звелто О. Принципы лазеров. –М.: Мир, 1984. –С.276–280.
3. Ageev L.A., Miloslavsky V.K. Photoinduced effects in light-sensltive films // Opt. Engineering. –1995. –34, '4. –Р.960—972.
4. Акустические кристаллы / Под ред. Шаскольской М.П. –М.: Наука, 1982. – С.122.