

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ****ПЛОСКИЙ СПЕКТРОСКОП,
ИЛИ ГОЛОГРАММА СПЛОШНОГО СПЕКТРА
НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ТЕ-РЕШЕТОК***Л.А. Агеев, Х.И. Эль-Ашхаб*

(Харьковский государственный университет, Украина)

Плоским спектро스코пом можно назвать оптическое устройство, в котором в одной плоскости совмещены дисперсионные свойства и способность изображать спектральную линию. Такие свойства должны быть присущи дифракционной решетке переменного периода [1], называемой частотным мультиплексором, а также цветной фотографии Липпмана [2], если по этому методу сделать снимок сплошного спектра в спектрографе. Фотографию Липпмана можно рассматривать как голограмму спектра, где объектной волной является спектральное изображение щели спектрографа, а роль опорной выполняет отраженная волна. Оставляя в стороне вопросы качества спектрального изображения щели, учтем лишь принципиальную возможность реализации плоского спектроскопа указанными методами. В настоящей заметке описан новый способ получения голограммы сплошного спектра.

С 1984 г. известен эффект образования спонтанных периодических структур (СПС) в тонких пленках AgCl при их облучении линейно поляризованным излучением от непрерывных газовых лазеров видимого диапазона спектра [3, 4]. СПС связаны с волноводными свойствами пленок и образуются в результате интерференции падающего пучка с рассеянными волноводными ТЕ-модами. Зарождение СПС происходит на затравочных интерференционных картинах вблизи малых центров рассеяния рэлеевского типа, а последующее их развитие определяется положительной обратной связью, которая возникает из-за усиления ввода моды в пленку затравочной СПС. Такие представления о природе СПС подтверждены количественно на основе синхронной связи между волновыми векторами СПС $\mathbf{K}$, моды β и падающей волны $\mathbf{k}$:

$$\mathbf{K} = \beta - \mathbf{k}_x, \quad (1)$$

где $k_x = k \sin \varphi$, $k = 2\pi\lambda_0^{-1}$, λ_0 — длина волны облучающего света, φ — угол падения светового пучка на пленку. Для ТЕ_m-мод $\mathbf{K} \perp \mathbf{E}_0$ ($\mathbf{E}_0$ — вектор поляризации пучка), $|\mathbf{K}| = 2\pi d^{-1}$ (d — период СПС в плоскости пленки), и β находится из дисперсионного уравнения

$$khp = \arctg \frac{(n_1^2 - 1 - p^2)^{1/2}}{p} + \arctg \frac{(n_1^2 - n_2^2 - p^2)^{1/2}}{p} + m\pi, \quad (2)$$

где h — толщина пленки, $p = (n_1^2 - \beta^2 k^{-2})^{1/2}$, n_1, n_2 — показатели преломления пленки и подложки соответственно, $m = 0, 1, 2, \dots$.

Электронномикроскопические исследования СПС показали [4], что они представляют собой несовершенные дифракционные решетки, состоящие из микрорешеток-доменов, которые развиваются от отдельных центров рассеяния. Малый период СПС ($\lambda_0 n_2^{-1} \geq d > \lambda_0 n_1^{-1}$) и небольшая протяженность доменов (несколько мкм) указывают на то, что образование СПС может происходить и под действием нелазерного света с низкой когерентностью. Действительно, позже было показано [5], что СПС образуются при облучении пленок спектральными компонентами излучения газоразрядной ртутной лампы. Однако оставался открытым вопрос о возможности записи СПС при облучении пленки сплошным спектром. Основная трудность такого эксперимента определяется низкой светочувствительностью пленки и необходимостью применять большие экспозиции ($H \geq 1 - 10 \text{ Дж/см}^2$) для образования СПС. При таких H и использовании обычных источников время экспозиции t растягивается до нескольких часов. И все же постановка такого эксперимента представляет методический интерес, поскольку позволяет продемонстрировать возможность получения голограммы сплошного спектра с помощью самоорганизующихся TE_m -решеток.

В эксперименте источником белого света служила газоразрядная ксеноновая лампа ДКсШ-150, излучение от которой фокусировалось на щель спектрографа сферической и цилиндрической линзами (цилиндрическая растягивала пучок вдоль щели). Использован небольшой спектрограф со стеклянной призмой Аббе, дисперсией 15 нм/мм и спектральной шириной щели 3 нм в районе $\lambda_0 = 550 \text{ нм}$.

Напылением в вакууме на стеклянную подложку ($20 \times 30 \text{ мм}^2$) была приготовлена пленка AgCl с нанесенной сверху тонкой ($\approx 10 \text{ нм}$) пленкой Ag; измеренная толщина образца AgCl—Ag составила $h = 118 \text{ нм}$. В процессе напыления Ag пленка AgCl приобретает характерную окраску, свидетельствующую об образовании мелких коллоидных частиц Ag в AgCl. Коллоидная полоса поглощения с максимумом при $\lambda = 510 \text{ нм}$ охватывает всю видимую область спектра. Светочувствительность образца определяется взаимодействием света с коллоидом в матрице AgCl [6].

Приготовленная пленка AgCl—Ag устанавливалась в фокальной плоскости спектрографа и облучалась неполяризованным спектром. Наблюдение за изменением оптических свойств пленки в процессе облучения показывает, что уже через 5 — 10 мин становится заметным известное [7] явление фотоадаптации (окрашивание пленки в прошедшем свете в цвета действующего излучения). Фотоадаптация определяется деформацией коллоидной полосы под действием света, в результате которой уменьшается поглощение в районе λ_0 . Следствием фотоадаптации является уменьшение коэффициента затухания для рассеянных волноводных мод и постепенное возникновение и развитие СПС, которые уже можно наблюдать для красно-зеленой части спектра примерно через 1 ч после начала экспозиции. Дифракционная эффективность η СПС растет с ростом H , и они постепенно развиваются для все меньших λ_0 . Контроль за развитием СПС осуществлялся визуально по наблюдению дифракции в отраженном свете, при выключенном облучении и освещении пленки светом от лампы накаливания или ртутной лампы под углом, в пло-

скости падения, параллельной щели. Интересным фактом является преимущественное развитие СПС вдоль щели ($\mathbf{K} \parallel$ щели); слабая поляризация излучения в спектрографе практически не влияет на направление $\mathbf{K}$. При $\mathbf{K} \perp$ щели, т.е. при наблюдении вдоль линии спектра, η существенно меньше. Анизотропию в развитии СПС можно объяснить тем, что моды, рассеянные вдоль линии щели и отвечающие разным λ_0 в пределах ее спектральной ширины, практически не конкурируют друг с другом, тогда как по линии развертки спектра такая конкуренция существует и замедляет развитие решеток. Экспонирование образца было закончено ($t \approx 10$ ч), когда в дифрагированном свете от ртутной лампы стали хорошо наблюдаться зеленая (546 нм) и желтая (578 нм) линии Hg в тех же местах пленки, где они должны быть расположены в облучающем сплошном спектре (рис. 1).

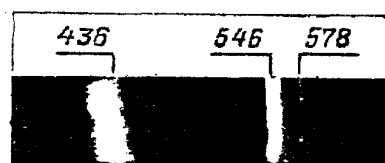


Рис. 1. Фотография спектральных Hg (желтая, зеленая, синяя), наблюдаемых по дифракции в отраженном свете на плоском спектрографе

Образование СПС для разных λ_0 можно рассматривать как голографическую запись спектральных изображений щели, при которой опорными волнами являются волноводные моды. Такая голограмма представляет собой своеобразный мультиплексор, в котором d решеток с $\mathbf{K} \parallel$ щели изменяется по спектру в соответствии с дисперсией спектрографа. Для точного воспроизведения спектра необходимо было бы ввести в пленку белое излучение $\parallel \mathbf{K}$. Однако практически сделать это невозможно, так как пленка является плохим волноводом из-за сильного затухания мод прежде всего на неэкспонированных участках. Поэтому удобнее наблюдать записанный спектр при внешнем освещении и φ , при котором воспроизводимый спектр соответствует исходному. Из-за низкой η яркое изображение можно наблюдать для интенсивных источников. Поскольку экспонированная пленка AgCl—Ag сохраняет светочувствительность, то ее освещение интенсивным излучением постепенно разрушает голограмму. Для длительного хранения и демонстрации образец закрепляется в фиксаже, растворяющем AgCl ; серебро, образующее СПС, остается на подложке. Для повышения η в отраженном свете образец затем покрывается пленкой Al . Эти операции не меняют d остающихся СПС по сравнению с исходными. Фотография на рис. 1 сделана для обработанного образца при его освещении светом от ртутной лампы по углом падения $\varphi \approx 70^\circ$ и наблюдении спектра по дифракции под углом $\varphi' \approx 59^\circ$. С фиксированного образца сделан электронномикроскопический снимок СПС, отвечающий $\lambda_0 \approx 550$ нм (рис. 2). На первый взгляд СПС имеет вид нерегулярной сетки, как должно быть при действии неполяризованного света [5]. Однако при рассматривании снимка под большим углом и при разных азимутах нетрудно обнаружить преимущественно направление $\mathbf{K}$ линейных микрорешеток с $d \approx 312$ нм.

Основные свойства полученной голограммы определяются зависимостью d СПС от λ_0 . Измерения $d(\lambda_0)$ выполнены в пучке от N_2 -лазера с $\lambda = 337$ нм, который падал на образец, закрепленный в препаратодитеle на гониометре. Период находился по измеренному φ , при котором дифрагированный пучок в отраженном свете, наблюдаемый на люминесцирующем экране, идет на-

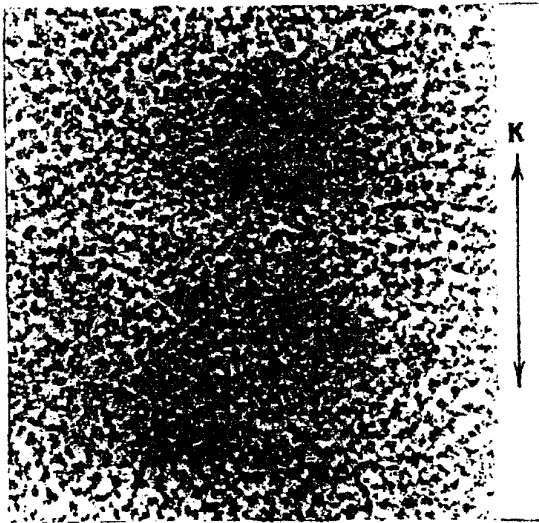


Рис. 2. Электронномикроскопический снимок СПС, получающейся при облучении пленки AgCl-Ag $\lambda_0 \approx 550$ нм. Стрелкой показано преимущественное направление вектора $\mathbf{K}$ микрорешеток

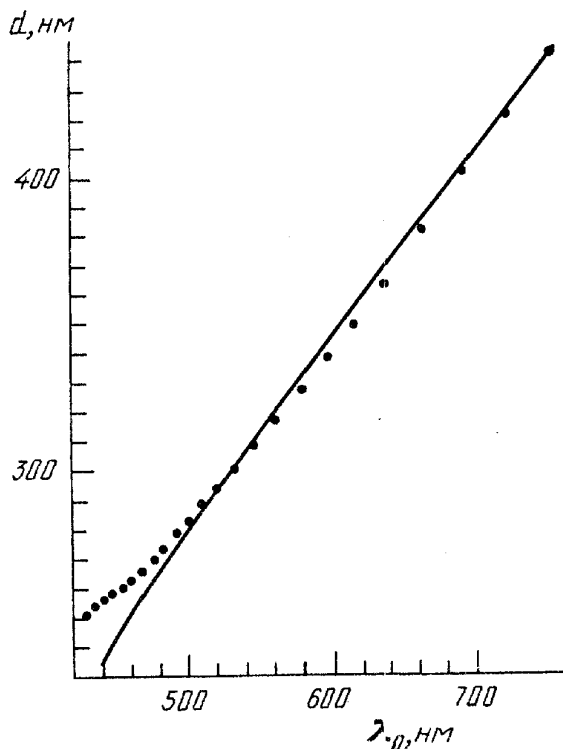


Рис. 3. Зависимость периода d СПС от λ_0 . Сплошная линия — расчет по формулам (1), (2). Точки — эксперимент

к размытию наблюдаемой по дифракции спектральной линии (см. рис. 1; $\lambda = 436$ нм).

Изложенные результаты показывают, что с помощью пленок AgCl-Ag можно получить плоский спектроскоп, удовлетворительно воспроизводящий спектр интенсивных источников в красно-зеленой области. Его можно применять в познавательных целях как пример использования спонтанного волноводного рассеяния в тонкой пленке для записи спектра и как индивидуальный демонстрационный спектроскоп. Способность к записи СПС присуща и другим светочувствительным пленкам [9, 10], но в более узких участках спектра, и с точки зрения широты спектральной чувствительности пленки AgCl-Ag уникальны. Для улучшения качества голограммы спектра следует приме-

встречу падающему, при этом $d = \lambda(2 \sin \varphi)^{-1}$. С другой стороны, $d(\lambda_0)$ рассчитано по (1), (2) при известных h , n_1 , $n_2 = 1,515$. При расчете учитывалась дисперсия n_1 для AgCl [8] и отклонение от нормального падения при экспонировании пленки разными λ_0 (рис. 3). Отклонение экспериментальных точек от расчетной зависимости, особенно сильное в области $\lambda_0 < 500$ нм, объясняется неучетом аномальной дисперсии эффективного значения n_1 в коллоидной полосе Ag . При $\lambda_0 > 500$ нм экспериментальная зависимость мало отличается от линейной, и этим определяется возможность хорошего согласования наблюдаемого спектра с исходным (см. рис. 1). При $\lambda_0 < 500$ нм d слабее меняется с изменением λ_0 , что, особенно с учетом несовершенства решеток, приводит

нять более интенсивные источники, линейнополяризованное облучение и спектрограф на основе дифракционной решетки с небольшой и постоянной по спектру линейной дисперсией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яриш А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. — М.: Мир, 1987. — С. 507 — 509.
2. Сорока Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. — М.: Наука, 1971. — С. 469 — 481.
3. Агеев Л.А., Милославский В.К.// ЖТФ. 1984. Т. 54. С. 888.
4. Агеев Л.А., Блоха В.Б., Милославский В.К.// Укр. физ. ж. 1985. Т. 30. С. 511.
5. Агеев Л.А., Милославский В.К., Ассаад Н.// Опт. и спектр. 1988. Т. 65. С. 147.
6. Агеев Л.А., Милославский В.К.//Ibidem. 1978. Т. 45. С. 537.
7. Блистанов А.А., Гераськин В.В., Козлова Н.С., Седов В.В.// Ж. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр. — 1984. Т. 29. С. 27.
8. Акустические кристаллы: Справочник/А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, В.В. Чкалова и др. Под ред. М.П. Шаскольской. — М.: Наука, 1982. — С. 122.
9. Агеев Л.А., Милославский В.К., Блоха В.Б., Ассаад И.// Поверхность. Физ., хим., мех. 1987. Т. 12. С. 31.
10. Агеев Л.А., Милославский В.К., Штайнборн Т., Лымарь В.И.// Автометрия. 1992. №2. С. 1.