

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЭЛЬ АНХАБ ХАСАН ИБРАГИМ



ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТОНКИХ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ  
ПЛЕНКАХ НА ОСНОВЕ ХЛОРИСТОГО И ИОДИСТОГО СЕРЕБРА

01.04.05 - "Оптика, лазерная физика"

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1995



ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**ЭЛЬ АНХАВ ХАСАН ИБРАГИМ**



**ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТОНКИХ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ  
ПЛЕНКАХ НА ОСНОВЕ ХЛОРИСТОГО И ИОДИСТОГО СЕРЕБРА**

01.04.05 - "Оптика, лазерная физика"

**АВТОРЕЗЮМЕ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1996

35.37

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в  
уни

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00761235 (0)

Научный руководитель:


Официальные оппоненты: Доктор физ.-мат. наук, профессор  
Попков Юрий Андронович  
(Харьковский госуниверситет)

Кандидат физ.-мат. наук, старший  
научный сотрудник  
Муссил Владимир Викторович  
(Харьковский государственный  
политехнический университет)

Ведущая организация: Институт Монокристаллов  
НАН Украины, г.Харьков

Защита состоится "13" Октября 1995 г. в 16<sup>00</sup> часов  
на заседании специализированного совета Д 02.02.15 в  
Харьковском государственном университете ( 310077,  
г.Харьков, пл.Свободы, 4, ауд. им. К.Д.Синельникова )  
С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной  
библиотеке ХГУ

Автореферат разослан "12" Сентября 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  В.П.Пойда

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень исследования тематики диссертации. Тонкие пленки  $AgHal$  ( $AgHal:AgBr, AgCl, AgI$ ), содержащие коллоидное серебро, являются моделью фотоэмульсионных слоев и кристаллов, в которых создано прямое почернение активной засветкой, и применяются при изучении физики фотографических процессов. Они, в частности, используются при исследованиях эффектов Гершеля (ЭГ) и фотоадаптации (ФАД) а также для исследований фотоиндуцированных периодических структур (ПС).

ЭГ заключается в ослаблении полосы поглощения коллоидного  $Ag$  под действием неактивного света. Эффект ФАД, в отличие от ЭГ, приводит к селективному ослаблению коллоидной полосы в районе длины волны  $\lambda_0$  облучающего света. Необходимость дальнейшего изучения ЭГ и ФАД определяется тем, что при использовании разных галогенидов серебра наблюдаются различия в проявлении этих эффектов и причины этих различий до сих пор не выяснены. Подобные исследования важны и в связи с тем, что в последнее время развиваются оптические методы регистрации информации на разнообразных объектах. Прямая светочувствительность в тонких пленках  $AgHal-Ag$  проявляется при экспозициях  $H > 0,1 \text{ Дж/см}^2$  и они относятся к специальным регистрирующим средам, используемым в исследовательских и технических целях при оптической записи информации.

ПС в светочувствительных пленках изучаются примерно 10 лет. Их возникновение связано с резонансным возбуждением волноводных мод падающим монохроматическим пучком света. Исследования ПС важны при изучении взаимодействия когерентного излучения с поверхностью твердых тел и тонкими пленками. При резонансном возбуждении электромагнитных мод падающим излучением возникает усиление светового поля, что приводит к гигантскому комбинационному рассеянию света, росту эффективности генерации второй гармоники, к изменению поглощательной способности поверхности, стимулированию фотохимических реакций и др. эффектам. ПС в светочувствительных пленках имеют прямое отношение и к лазерам на динамических решетках, поскольку образование ПС определяется взаимодействием падающего пучка с рассеянным в моду излучением и приводит к пере-

качке энергии в моду. ПС в светочувствительных пленках являются шумовыми голограммами и их исследования важны для решения проблемы шумов в оптической голографии.

Таким образом, исследования ЭГ, ФАД и ПС способствуют решению ряда проблем фотографии, фотофизики конденсированных сред, голографии, что и определяет актуальность темы.

Цель и основные задачи исследований. Цель работы заключалась в изучении фотоиндуцированных превращений, эффектов ФАД, ЭГ и ПС в тонких светочувствительных пленках на основе  $AgCl$  и  $AgI$ . Для достижения цели необходимо было исследовать фотоиндуцированные изменения в спектрах поглощения и в структуре пленок  $AgCl-Ag$ ,  $AgCl-Cu$ . Такие исследования дают сведения о механизме светочувствительности и условиях ее оптимального проявления. Необходимо было исследовать зависимость от частоты индуцирующего света эффекта ФАД в пленках  $AgCl-Ag$  и ЭГ в  $AgI-Ag$  для выяснения различий фотоиндуцированных превращений в этих пленках. Исследованы, также, различные условия образования ПС и их связь с эффектами ФАД и ЭГ. Для этого изучались ПС в пленках  $AgCl-Ag$  при облучении непрерывным спектром, ПС в  $AgCl-Ag$  на анизотропной подложке и рельефные ПС в пленках  $AgI$ .

Научная новизна работы определяется тем, что в ней: исследованы спектры поглощения облученных образцов  $AgCl-Ag$  и выявлены условия оптимального проявления их светочувствительности; - впервые исследована светочувствительность пленок  $AgCl-Cu$ ; - исследованы спектральные зависимости эффекта ФАД в пленках  $AgCl-Ag$  и ЭГ в пленках  $AgI-Ag$  при их облучении непрерывным видимым спектром, показано, что в пленках  $AgCl-Ag$  преобладает эффект ФАД, тогда как в пленках  $AgI-Ag$  он не наблюдается; - обнаружено образование ПС в пленках  $AgCl-Ag$  при их облучении непрерывным видимым спектром; - исследованы ПС в пленках  $AgCl-Ag$  на анизотропной подложке, обнаружено соответствие азимутальных зависимостей периода ПС и показателя преломления необыкновенной волны; - исследованы ПС в тонких пленках  $AgI$  и двуслойных пленках  $AgI-ZnS$ , впервые обнаружено образование ПС под действием пучка с  $\lambda_0 = 633$  нм.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Светочувствительность к неактиничному излучению в тонких

пленках  $AgCl-Ag$  возникает при диспергированном состоянии серебра и связана с понижением работы выхода  $\chi$  фотоэлектронов для малых, по сравнению с  $\lambda$ , частиц  $Ag$ , окруженных диэлектриком, по сравнению с  $\chi$  для плоской границы  $Ag$ -вакуум, а также с усилением светового поля в районе малых частиц.

2. Светочувствительность пленок  $AgCl-Cu$  связана с фотостимулированной химической реакцией обмена, приводящей к образованию  $CuCl$  и выделению коллоидного  $Ag$ .

3. Механизм массопереноса  $Ag$  в пленке  $AgCl$  частично связан с ионной проводимостью  $AgCl$ .

4. Эффект ФАД в пленках  $AgCl-Ag$  имеет смешанный частотно-интерференционный характер. Частотная ФАД связана с неоднородным уширением коллоидной полосы поглощения и приводит к ее селективной деформации. Интерференционная ФАД связана с ПС и создает интерференционные спектральные аномалии.

5. Частотная зависимость ЭГ в пленках  $AgI-Ag$  определяется потенциальными барьерами для электронов на границах зерен  $AgI$  и их понижением с ростом частоты облучающего света.

6. ПС в  $AgCl-Ag$  на анизотропной подложке связаны с возбуждением гибридных волноводных мод и волноводных мод  $TE$ - и  $TW$ -типа на обыкновенной и необыкновенной волнах.

7. Образование ПС в пленках  $AgI$  под действием лазерного пучка с  $\lambda_0 = 633$  нм определяется двухфотонным поглощением.

Теоретическая и практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты дают новые представления о природе ЭГ и ФАД и вносят вклад в развитие теории фотографических явлений. Обнаружение ПС при облучении пленок  $AgCl-Ag$  непрерывным спектром от нелазерного источника показывает новую возможность голографической записи непрерывного цветного спектра. Познавательное значение этого результата сравнимо с известным методом цветной фотографии Липпмана.

Практическая ценность работы определяется тем, что показана возможность использования ПС для измерения азимутального распределения показателя преломления необыкновенной волны в анизотропных подложках; для измерений толщины и показателя преломления волноводных пленок. Показано также, что ПС могут использоваться в сверхчувствительной лазерной спектроскопии как средство для выявления фотохимических пре-

вращений при низком уровне поглощения.

Личный вклад автора. Автор исследовал спектры поглощения пленок  $AgCl-Ag$ ,  $AgCl-Cu$  и получил данные о связи светочувствительности со структурой пленки  $Ag$  и фотохимическими превращениями в образцах. Автором исследованы эффекты ФАД и ЭГ в пленках  $AgCl-Ag$  и  $AgI-Ag$  и получены данные о зависимости этих эффектов от частоты облучающего света. Автор получил экспериментальные и теоретические зависимости периодов ПС от толщины пленок  $AgCl$  на подложке  $CaCO_3$ , обнаружил и исследовал образование ПС в пленках  $AgI$  за счет двухфотонного поглощения.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: VIII Международная школа "Взаимодействие лазерного излучения с веществом", Одесса - 1992 г.; V Українська конференція "Фізика і технологія тонких плівок складних напівпровідників", Ужгород - 1992 р.; I конференція "Фізические явления в твердых телах", ХГУ, Харьков - 1993 г.; IV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок, Івано-Франківськ - 1993 р.; II конференція "Фізические явления в твердых телах", ХГУ, Харьков - 1995 г.; International Conference OPTDIM'95, Kiev - 1995 р.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 13 печатных работах, в том числе в 7 статьях и в 6 тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключения и списка цитируемой литературы. Она содержит 145 стр. принтерного текста, включая 30 рисунков и библиографию из 113 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована цель работы. Кратко охарактеризована область исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе, посвященной обзору литературы, рассмотрены оптические свойства  $AgHal$ , сложившиеся к настоящему времени представления о природе светочувствительности в тонких пленках  $AgHal-Ag$ , экспериментальные и теоретические результаты исследований ЭГ и ФАД, данные о природе и основных свойствах ПС в этих пленках.

Вторая глава посвящена исследованиям светочувствительности в тонких пленках  $AgCl-Ag$  /1/ и  $AgCl-Cu$  /2/.

Измерены спектры пропускания и отражения в области спектра 360-1000 мμ для пленок  $AgCl-Ag$ , облучавшихся белым светом от лампы накаливания. Пленки приготавливались поочередным осаждением в вакууме  $AgCl$  (толщина  $h \approx 100$  мμ) и  $Ag$  ( $h \approx 10-15$  мμ) на стеклянные подложки при разном взаимном расположении этих слоев. Установлено, что измеренные спектры до облучения хорошо согласуются с рассчитанными, по интерференционным формулам для двух слоев, в образце с пленкой  $Ag$  ( $h \approx 15$  мμ) на подложке. В образце, где тот же слой  $Ag$  осажден на пленку  $AgCl$ , такого согласия нет, что связано с большей диспергированностью пленки  $Ag$  и частичной диффузией  $Ag$  в  $AgCl$  с образованием мелких гранул. Этот вывод подтвержден электронномикроскопическими исследованиями пленок  $Ag$ , осажденных на подложку и поверхность  $AgCl$ . В первом случае пленка имеет мозаичное строение, тогда как во втором она находится в предколлоидном состоянии. Показано, что светочувствительность, определяемая изменением оптической плотности  $\Delta D$  после облучения при заданной  $H$ , существенно выше в образце с пленкой  $Ag$  ( $h \approx 15$  мμ) на поверхности  $AgCl$  ( $|\Delta D|_{\max} = 0,58$ ) а не на подложке ( $|\Delta D|_{\max} = 0,15$ ). Сделан вывод о том, что наибольшую светочувствительность имеют образцы  $AgCl-Ag$ , в которых исходный слой  $Ag$  находится в предколлоидном состоянии и переходит в мелкодисперсный коллоид после облучения. Исследованы спектры отражения образца с пленкой  $AgCl$  на сплошном зеркале  $Ag$ . Облучение не приводит к заметным изменениям коэффициента отражения. Сделан вывод о том, что светочувствительность в  $AgCl-Ag$  связана с диспергированным состоянием  $Ag$ . Такое состояние  $Ag$ , распределенного в пленке  $AgCl$ , способствует снижению работы выхода  $\chi$  фотоэлектронов из  $Ag$  ( $\chi \approx 1,5$  эВ по сравнению с  $\chi \approx 4$  эВ для границы сплошное  $Ag$  - вакуум). Кроме того известно, что в районе малых частиц  $Ag$  имеет место резонансное усиление светового поля, что увеличивает выход фотоэлектронов и светочувствительность. На этом основании светочувствительность в  $AgHal-Ag$  можно поставить в один ряд с явлениями гигантского комбинационного рассеяния в адсорбированных молекулах и усиления генерации гармоник на

шероховатых поверхностях и островковых пленках.

Исследованы спектры поглощения тонких пленок  $AgCl-Cu$ , приготовленных вакуумным напылением на стеклянную подложку слоя  $AgCl$  ( $h \approx 100$  нм) и пленки  $Cu$  ( $h \approx 10$  нм). Анализ спектров показал, что сразу после приготовления в образцах обнаруживаются продукты обменной химической реакции, приводящей к выделению  $Ag$  и образованию  $CuCl$ . Полное протекание реакции стимулируется интенсивным белым светом от лампы накаливания или красным лазерным излучением. Облучение приводит к ослаблению длинноволнового поглощения, связанного с медью, к формированию коллоидной полосы поглощения  $Ag$  и к развитию характерного экситонного пика  $CuCl$ . Фотоиндуцированный массоперенос  $Ag$  в непрореагировавшем слое  $AgCl$  под действием линейно-поляризованного лазерного излучения с  $\lambda_c = 633$  нм приводит к дихроизму и формированию ПС, связанных с возбуждением волноводных мод в двуслойной пленке  $CuCl-AgCl(Ag)$ . Анализ дихроизма, точные измерения толщин пленок и периодов ПС позволили установить, что выделение  $Ag$  при фотостимулированной реакции происходит в слое  $AgCl$ . Обнаружение обменной реакции в  $AgCl-Cu$  позволило предположить, что в механизме светочувствительности пленок  $AgCl-Ag$  существенную роль играет обмен ионами между металлом и решеткой  $AgCl$ .

В третьей главе изложены результаты исследования спектральной ФАД в пленках  $AgCl-Ag$  /3,4/ и ЭГ в  $AgI-Ag$  /5/.

Пленки  $AgCl-Ag$  изготавливались вакуумным напылением  $AgCl$  ( $h \approx 120$  нм) на стеклянную подложку и затем тонкого ( $h \approx 15$  нм) слоя  $Ag$ . Образцы облучались в фокальной плоскости спектрографа непрерывным спектром от ксеноновой лампы ДКСШ-200, мощность излучения которой примерно одинакова по спектру в интервале 400-800 нм. При визуальном наблюдении ФАД проявляется в том, что в процессе облучения пленка  $AgCl-Ag$  приобретает в проходящем свете окраску с почти правильной передачей цвета от красного до синего участка спектра. Заметное окрашивание возникает при времени экспозиции  $t$  около 5 мин и насыщается при  $t > 1,5$  час. После  $H \approx 50$  Дж/см<sup>2</sup> на участках, облученных светом разных частот, измерялись спектры пропускания в интервале  $\lambda$  360-1000 нм. В спектрах наблюдается коллоидная полоса поглощения  $Ag$ , занимающая всю видимую

область. Положение максимума этой полосы соответствует резонансной частоте колебаний электронов в гранулах  $Ag$ , окруженных  $AgCl$ , с учетом дипольного взаимодействия между гранулами. ФАД приводит к селективной деформации коллоидной полосы в районе длины волны облучения  $\lambda_0$ . При анализе ФАД учтено соотношение между сравнимыми по величине ( $\approx 0,4$  эВ) однородным и неоднородным уширениями полосы, связанными, в основном, с дипольным взаимодействием гранул  $Ag$  в  $AgCl$ . В этом случае отклик на частоту облучения (частотная ФАД) проявляется в виде ослабления поглощения и сдвига коллоидной полосы при облучении частотами  $\omega_0$ , соответствующими краям полосы. При  $\omega_0$  близких к частоте  $\omega_m$  максимума полосы, может возникнуть спектральный провал, полуширина которого должна соответствовать однородной полуширине полосы. Такие особенности наблюдаются в эксперименте. Экспериментальные сдвиги  $\omega_m$  в зависимости от  $\omega_0$  согласуются с рассчитанными в предположении, что скорость уменьшения  $D$  при облучении светом частоты  $\omega_0$  пропорциональна поглощательной способности. Полуширина спектрального провала при  $\omega_0 \approx \omega_m$  согласуется с оценочным значением однородной полуширины полосы. Однако, наличие в эксперименте спектральных провалов на склонах полосы и, особенно, узких экстремумов на ее длинноволновом крае не может быть объяснено частотной ФАД. Эти особенности, как известно из литературы, могут быть связаны с образованием ПС за счет рассеяния и возбуждения в пленке волноводных ТЕ-мод. ПС действительно были обнаружены при  $H > 10$  Дж/см<sup>2</sup> по дифракции света. Так как ПС образуются за счет интерференции падающего света с модой, то их спектральное проявление в виде провалов и экстремумов связано с  $\lambda_0$  и соответствует интерференционной ФАД. Таким образом установлено, что спектральная ФАД в  $AgCl-Ag$  имеет смешанный частотно-интерференционный характер. Частотная ФАД способствует развитию ПС, так как снижает коэффициент затухания возбуждаемых мод.

При том же способе облучения, методами спектрофотометрии и электронной микроскопии исследованы фотоиндуцированные превращения в пленках  $AgI-Ag$ . Образцы приготавливались частичным иодированием гранулярных пленок  $Ag$ , приготовленных напылением на стеклянную подложку при  $300^\circ C$ . В облученных

образцах обнаружена характерная для ЭГ трансформация спектров поглощения, зависящая от  $\omega_0$  и определяемая частотно зависящими фотоструктурными превращениями гранулярного Ag. Спектральные изменения в основном проявляются в виде общего ослабления коллоидной полосы без выраженной селективности при  $\omega_0$ . Положение максимумов полос зависит от  $\omega_0$ , но близко к ней и для мельчайших гранул Ag согласуется с расчетными значениями  $\omega_m$  на основании формулы для резонансной частоты, учитывающей дипольное взаимодействие между гранулами Ag, находящимися в диэлектрическом окружении. Электронномикроскопические снимки пленок Ag, полученных после фиксирования пленок AgI-Ag, сопоставлены со спектрами пленок Ag, которые сохраняют основные особенности спектров образцов AgI-Ag. Микрофотографии показали, что при длинноволновом облучении исходный мелкодисперсный коллоид преобразуется в крупные, редко расположенные гранулы. С ростом  $\omega_0$  размеры гранул уменьшаются, приближаясь к среднему исходному размеру, и проявляется эффект декорирования этими гранулами границ зерен AgI. Для объяснения этих особенностей привлечена известная из литературы барьерная модель электронного спектра поликристаллических полупроводников с тетраэдрической межатомной связью, к которым относится AgI. По этой модели на границе двух кристаллических зерен существуют потенциальные барьеры для электронов за счет локализации электронов на квазиповерхностных состояниях ниже уровня Ферми. Взаимодействие света с границами способствует переходу электронов в зону проводимости при  $\omega_0 < \omega^*$ , где  $\omega^*$  - пороговая частота собственной полосы поглощения (для пленок AgI  $\omega^* \approx 2,76$  эВ). Следствием этого является фотостимулированное понижение потенциальных барьеров. В согласии с этой моделью при длинноволновом облучении центрами захвата фотоэлектронов и последующей конденсации Ag является глубокие локальные ловушки, не связанные с границами зерен AgI, что приводит к образованию крупных гранул Ag. По мере приближения  $\omega_0$  к  $\omega^*$  центрами конденсации Ag становятся границы, что способствует выделению более мелких гранул и декорированию границ. При  $\omega_0 > \omega^*$  по спектрам и микрофотографиям установлено, что на ЭГ влияет фотолиз AgI, который частично имеет обратимый характер и приводит к превращению

мельчайших гранул  $Ag$  снова в  $AgI$ . Сделано предположение, что отсутствие ПС в  $AgI-Ag$  связано с отсутствием эффекта ФАД и сильно выраженным ЭГ. Различие в фотопревращениях коллоидной полосы в  $AgI-Ag$  и  $AgCl-Ag$  связано с разными типами кристаллической решетки  $AgCl$  (тип  $NaCl$ ) и  $AgI$  (вюрцит), с соответствующим различием электронного состояния границ зерен и его зависимость от  $\omega_0$ .

Четвертая глава посвящена исследованиям ПС в пленках  $AgCl-Ag$  при их облучении непрерывным спектром /6/, в пленках  $AgCl-Ag$  на анизотропной подложке при лазерном облучении ( $\lambda_0 = 633$  нм) /7/ и рельефных ПС в пленках  $AgI$  и  $AgI-ZnS$ , индуцируемых лазерным излучением с  $\lambda_0 = 442$  нм и 633 нм /8/.

При изучении спектральной ФАД в пленках  $AgCl-Ag$  впервые получены ПС при облучении пленок в спектрографе непрерывным спектром от газоразрядной ксеноновой лампы. Возникновению ПС предшествует ФАД. В условиях выполненного эксперимента ПС начинают проявляться по дифракции света от пробного источника на участке, облучаемом красно-зеленой частью спектра, примерно через 1 час после начала экспозиции. Дифракционная эффективность  $\eta$  ПС растет с ростом  $H$  и они постепенно развиваются для все меньших  $\lambda_0$ . Образование ПС для разных  $\lambda_0$  можно рассматривать как голографическую запись спектральных изображений щели спектрографа, при которой опорными волнами являются возбуждаемые волноводные моды. Измеренный период  $d$  ПС в зависимости от  $\lambda_0$  неплохо согласуется с зависимостью, рассчитанной по дисперсионному уравнению для  $TE$ -мод в асимметричном диэлектрическом волноводе и условию синхронизма между  $d$  и постоянной распространения моды  $\beta$ . Указанная зависимость  $d(\lambda_0)$  соответствует дисперсии спектрографа. Обнаружено, что  $\eta$  максимальна для направления вдоль спектральных изображений щели. Анизотропия  $\eta$  связана с поляризацией света в спектрографе (степень поляризации около 23%) и подтверждается реальным строением ПС, которое наблюдается на полученном электронномикроскопическом снимке. Голограмма непрерывного спектра на основе ПС ведет себя как плоский спектроскоп и точно воспроизводит спектр интенсивных источников при ее освещении и наблюдении под определенными углами. Отмечается, что в отличие от классического метода цветной фотографии

Липмана, основанного на записи поля стоячих волн, ПС демонстрируют новую возможность записи спектра в тонкой пленке  $AgCl-Ag$  за счет генерации волноводных  $TE$ -мод.

Исследовано формирование ПС в тонких пленках  $AgCl-Ag$  на поверхности кристалла  $CaCO_3$ , вырезанной в оптической оси  $C$ . Выведено дисперсионное уравнение для волноводных мод в изотропной пленке на анизотропной подложке. Показано, что при произвольном азимуте  $\theta$  ( $\theta$  - угол между  $\vec{C}$  и  $\vec{\beta}$ ) для нормально падающего монохроматического пучка, возбуждающего моды в пленке, теряется различие между  $TE$ - и  $TM$ -модами и дисперсионное уравнение дает решения для  $\beta$  гибридных мод. При  $\theta=0$  и  $\theta=\pi/2$  общее уравнение дает дисперсионные уравнения для  $TE_m$ - и  $TM_m$ -мод, возбуждаемых обыкновенной и необыкновенной волнами. Для этих случаев измерены зависимости  $d$  ПС от толщины  $h$  пленки при индуцировании ПС линейно поляризованным лазерным пучком с  $\lambda_0=633$  нм при нормальном падении. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с рассчитанными из дисперсионных уравнений и условия синхронизма зависимостями  $d(h)$ . Измерениями и расчетами показано, что в малом интервале толщин  $h_{TE_0}^0 \geq h \geq h_{TE_0}^e$  ( $h_{TE_0}^{0,e}$  - толщины отсечек  $TE_0$ -мод для обыкновенной и необыкновенной волн) образуются  $TE_0$ -ПС на необыкновенной волне. Затем, при  $h_{TM_0}^{0,e} \geq h \geq h_{TE_0}^0$  ( $h_{TM_0}^{0,e}$  - совпадающие толщины отсечек  $TM_0$ -мод для двух волн), возникают и  $TE_0$ -ПС на обыкновенной волне. Наконец, при  $h \geq h_{TM_0}^{0,e}$  развиваются и  $TM_0$ -ПС на двух возбуждаемых волнах. По мере дальнейшего роста  $h$  различие в  $d$  ПС, связанных с необыкновенной и обыкновенной волнами, уменьшается. При малых  $h < h_{TE_0}^e$  исследована азимутальная зависимость  $d(\theta)$  для ПС, сформированных на предельных  $TE_0$ -модах. С этой целью образец облучался циркулярно поляризованным лазерным пучком с  $\lambda_c=633$  нм при нормальном падении. Полная картина дифракции, наблюдавшаяся в пучке с  $\lambda=337$  нм, в этом случае имеет форму овала, близкого к эллипсу. Главные оси овала расположены  $\parallel$  и  $\perp$  к оси  $C$ . Такая форма дифракционной картины соответствует азимутальной зависимости показателя преломления необыкновенной волны  $n_e(\theta)$ ; малой оси

овала соответствует  $n_e(\theta) = n_e$  и большой  $n_e(\theta) = n_o$ . Зависимость  $n_e(\theta)$ , найденная по дифракции, совпадает с расчетной. В овале проявляется зависимость  $\eta(\theta)$ ;  $\eta$  минимальна для ПС, формируемых обыкновенной волной. Качественно этот результат объяснен тем, что доля рассеянного в моду излучения от обыкновенной волны меньше, чем от необыкновенной. Отмечено, что выполненный эксперимент впервые дал визуальную картину зависимости  $n_e(\theta)$ .

Исследовано формирование рельефных ПС в тонких поликристаллических пленках  $AgI$  на стекле при их облучении линейно поляризованными пучками с  $\lambda_o = 442$  нм и 633 нм. Получены ПС, образованные не только  $TE_o$ -модами, но и  $TM_o$ -ПС. Измерены зависимости  $d(h)$ . Показано, что синхронизированная с модой рельефная ПС не влияет на  $\beta$  моды и  $d(h)$  хорошо описывается дисперсионным уравнением асимметричного волновода с плоскими границами. Отмечено, что с ростом  $h$  уменьшается  $\eta$  ПС и их образование прекращается при  $h > 150$  нм из-за роста объемного рассеяния света в пленке. ПС на  $TE_m$ - и  $TM_m$ -модах порядка  $m > 0$  получены в тонкой пленке  $AgI$  ( $h \approx 60$  нм), нанесенной на толстую ( $h \approx 400$  нм) нефоточувствительную пленку  $ZnS$  на стекле. Обнаружен рост  $\eta$  ПС при увеличении  $m$  моды, при возбуждении которой образуется данная ПС. Этот рост согласуется с распределением поверхностных потерь для мод разного порядка. Показано, что при наличии в пленке  $TE$ - и  $TM$ -ПС ее толщина  $h$  и показатель преломления  $n$ , а также эти параметры для нефоточувствительного волноводного слоя, могут быть получены из одних дифрактометрических измерений. ПС при облучении пленки  $AgI$  пучком с  $\lambda_o = 633$  нм, которая соответствует области прозрачности, наблюдались впервые. Предполагается, что образование ПС в этом случае связано с нелинейным двухступенчатым поглощением света через локальные уровни центров скрытого изображения или иных дефектов в запрещенной зоне. Отмечается, что способность ПС формироваться в условиях исчезающе малого поглощения может быть использована в сверхчувствительной лазерной спектроскопии.

В Заключении суммированы основные результаты и выводы диссертационной работы. Их краткая формулировка:

1. Установлено, что светочувствительность в пленках

$AgCl-Ag$  возникает при диспергированном состоянии серебра. Предполагается, что она связана с понижением работы выхода  $\chi$  фотоволн электронов из частиц  $Ag$ , окруженных  $AgCl$ , по сравнению с  $\chi$  для плоской границы  $Ag$ -вакуум, а также с локальным усилением светового поля на гранулах  $Ag$ .

2. Обнаружено, что светочувствительность в пленках  $AgCl-Si$  связана с фотостимулированной обменной реакцией, приводящей к образованию  $SiCl$  и выделению гранул  $Ag$  в  $AgCl$ . Предполагается, что обмен ионами между металлом и решеткой  $AgCl$  имеет место и в системе  $AgCl-Ag$ .

3. Показано, что в облучаемых непрерывным спектром пленках  $AgCl-Ag$  имеет место частотно-интерференционный эффект ФАД. Частотная ФАД способствует зарождению ПС, при развитии которых возникает интерференционная ФАД.

4. Показано, что в облучаемых непрерывным спектром пленках  $AgI-Ag$  имеет место ЭГ. Зависимость ЭГ от частоты облучающего света  $\omega_0$  объяснена на основе предположения о существовании потенциальных барьеров для электронов на границах зерен  $AgI$  и их понижении с ростом  $\omega_0$ . Предполагается, что отсутствие частотной ФАД в пленках  $AgI-Ag$  препятствует возникновению в них ПС.

5. Впервые получены ПС в пленках  $AgCl-Ag$  при их облучении непрерывным спектром, что является демонстрацией нового способа голографической записи спектра, основанного на возбуждении в тонкой светочувствительной пленке волноводных мод падающим квазимонохроматическим светом.

6. Впервые исследованы ПС в тонких пленках  $AgCl-Ag$  на анизотропной подложке, вырезанной в оптической оси  $C$ . Выведено дисперсионное уравнение, соответствующее гибридным волноводным модам в пленке при произвольном угле  $\theta$  между волновым вектором моды  $\beta$  и осью  $C$ . При  $\theta=0$  и  $\pi/2$  для ПС, образованных  $TE_0$  и  $TW_0$ -модами для необыкновенной и обыкновенной волн, получено хорошее согласие экспериментальных и рассчитанных зависимостей периодов ПС от толщины пленки. Показано, что предельная  $TE_0$ -мода на необыкновенной волне дает ПС, которые позволяют визуализировать и измерить азимутальную зависимость показателя преломления этой волны.

7. В тонких пленках  $AgI$  и  $AgI-ZnS$  экспериментально и

теоретически исследованы рельефные  $TE_m$ - и  $TM_m$ -ПС. Показана возможность их использования для определения толщин и показателей преломления волноводных пленок из дифрактометрических измерений. Впервые получены ПС при нелинейном поглощении света в пленке AgI.

Список литературы по теме диссертации:

1. Агеев Л.А., Эль-Ашхаб Х.М. Фотоиндуцированные изменения оптического поглощения тонкопленочной системы  $AgCl-Ag$ . // ЖПС.-1994.-Т.60, № 1-2.-С.152-157.
2. Ageev L.A., El-Ashhab H.I. Absorption spectra and photoinduced transformations in thin films of  $AgCl-Cu$ . // International Conference "OPTDIM'95", 11-13 May 1995, Kiev, P.187.
3. Агеев Л.А., Милославский В.К., Эль-Ашхаб Х.М. Спектральная фотоадаптация в тонких светочувствительных пленках  $AgCl-Ag$ . // Опт. и спектр.-1992.-Т.73, № 2.-С.364-370.
4. Эль-Ашхаб Х.М. Фотоадаптация и спонтанные периодические структуры в  $AgCl-Ag$ . // Сборник научных работ аспирантов ХГУ. (Естественные науки. Физико-математические науки).-Харьков.: Изд. "Основа" при ХГУ, 1992.-С.183-187.
5. Ageev L.A., Miloslavsky V.K., El-Ashhab H.I. Spectral Dependence of Hertzschel's Effect in Thin Photosensitive  $AgI-Ag$ -Films. // Functional materials.-1994.-V.1, № 1.-P.46-50.
6. Агеев Л.А., Эль-Ашхаб Х.М. Плоский спектроскоп или голограмма сплошного спектра на основе самоорганизующихся  $TE$ -решеток. // УФН.-1992.-Т.162, № 9.-С.153-157.
7. Агеев Л.А., Эль-Ашхаб Х.М., Милославский В.К. Спонтанные периодические структуры в светочувствительных волноводных пленках на анизотропных подложках. // Опт. и спектр.-1993.-Т. 75, № 5.-С.1079-1085.
8. Агеев Л.А., Эль-Ашхаб Х.М., Ревуцкая О.Ф. Фотоиндуцированные периодические структуры в тонких пленках AgI. // Функциональные материалы.-1994.-Т.1, № 2.-С.16-21.

Elashhab H.I. "Photoinduced effects in thin light-sensitive films on the basis of the chlorous and iodous silver"

The dissertation in manuscript form is submitted for a Candidate Degree in Physical and Mathematical Science, speciality 01.04.05 - Optics, Laser Physics. Kharkov State University. Kharkov. Ukraine. 1995.

8 scientific works is maintained. A light-sensitivity, effects of a photoadaptation (PAD), Hershel (EG) and periodic structures (PS) were investigated in films on basis of  $AgCl$  and  $AgI$ . It is shown: the light-sensitivity of the films take place at the disperse state of a  $Ag$  admixture; in the  $AgCl-Ag$  films the frequency-interference PAD is displayed but in the  $AgI-Ag - EG$ ; frequency PAD promotes the PS generation. A hologram of a visible spectrum, connected with the PS generation, was prepared first. A connection was established of the PS with anisotropy of refractive index of substrates. The PS, induced as a result of a two-photon absorption, were received first in  $AgI$  films.

Key words: thin films, light-sensitivity, effect of a photoadaptation, effect Hershel, periodic structures.

Ель Ашхаб Х.І. "Фотоіндуковані ефекти у тонких світлочутливих плівках на основі хлористого та йодистого срібла".

Дисертація у формі рукопису на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 - оптика, лазерна фізика. Харківський державний університет. Харків. Україна. 1995.

Робота ґрунтується на 8 наукових працях. Досліджені світлочутливість, ефекти фотоадаптації (ФАД), Гершеля (ЕГ) і періодичні структури (ПС) у плівках на основі  $AgCl$  та  $AgI$ . Показано, що світлочутливість плівок має місце при диспергованому стані домішкового срібла; в  $AgCl-Ag$  має місце частотно-інтерференційна ФАД, а в плівках  $AgI-Ag - EG$ ; частотна ФАД сприяє утворенню ПС. Вперше отримана голограма видимого спектра за рахунок утворення ПС. Встановлено зв'язок ПС з анізотропією показника заломлення підкладки. Вперше спостерігалися ПС за рахунок двофотонного поглинання в  $AgI$ .

Ключові слова: тонкі плівки, світлочутливість, ефект фотоадаптації, ефект Гершеля, періодичні структури.

Ответственный за выпуск О.Н.Пнакова

Подписано к печати 08.09.95 г. Формат 60x84 1/16.

Уч.-изд. л.1,0. Тираж 85. Зак. № 18. Бесплатно.

Ротапринт Института Монокристаллов, Харьков, пр. Ленина, 60  
30-70-97

44580

Ім. В. Стефан  
АН України

AB 33.017