

## Влияние интерференции в тонких пленках на оптические характеристики голограмм, зарегистрированных на слоях As—Se

© Н.М. Ганжерли

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: nina.holo@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 14.04.2023 г.

В окончательной редакции 14.04.2023 г.

Принята к публикации 08.05.2023 г.

Проведена оценка влияния интерференции в тонких пленках на оптические характеристики голограмм, зарегистрированных на слоях халькогенидного стеклообразного полупроводника системы As-Se. Измерены изменения величины отражения, пропускания и оптической разности хода лучей в процессе воздействия актиничного излучения He—Ne-лазера на слои. Показано, что интерференционные явления в тонких пленках приводят к колебаниям этих характеристик, а также к колебанию дифракционной эффективности голограмм при изменении толщины слоя.

**Ключевые слова:** интерференция в тонких пленках, халькогенидные стеклообразные полупроводники, показатель преломления, отражение, пропускание, оптическая разность хода лучей, дифракционная эффективность голограмм.

DOI: 10.61011/OS.2023.08.56299.4859-23

### Введение

С развитием оптических методов регистрации, хранения и обработки информации продолжается интенсивное создание и изучение светочувствительных материалов [1]. Исследование халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) как светочувствительной среды является перспективным ввиду обнаруженного у ХСП ряда достоинств, таких как высокое разрешение до  $10000 \text{ nm}^{-1}$  и фотостимулированные изменения коэффициента поглощения и показателя преломления наряду с присущим ХСП высоким значением показателя преломления.

Возможность использования ХСП для голографической регистрации информации продемонстрирована уже достаточно давно [2,3]. Исследованию записи и считывания голограмм на пленках ХСП когерентным излучением посвящено большое число работ, в которых обсуждаются наиболее общие свойства и характеристики, механизмы фотоиндуцированных изменений в ХСП под действием излучения, возможности создания новых типов ХСП по составу и возникающие при этом перспективы новых использований [4–11].

Материалы ХСП допускают многократную перезапись информации, что удобно в оперативных системах хранения и обработки информации. Стирание информации происходит обычно при нагревании ХСП до температуры близкой к температуре размягчения и выдержке при этой температуре в течение нескольких минут [4]. ХСП используются для создания однослойных и многослойных оптических покрытий, охватывающих видимый и инфракрасный диапазоны спектра в качестве

интерференционных фильтров, светоделителей [5]. На ХСП реализуется также регистрация микрорельефа на поверхности и получение рельефно-фазовых и рельефных голографических решеток, которые могут быть изготовлены непосредственно в процессе их записи [6,7]. Перспективно использование ХСП в электронике в качестве переключателей, датчиков, элементов фазовой памяти и т.д. [8]. Использование материалов с высоким показателем преломления для создания голограммных оптических элементов позволяет уменьшить толщину и вес элемента и, как следствие, увеличить пропускание [9,10]. В результате воздействия оптического излучения на ХСП в материале происходит сдвиг края полосы поглощения, как правило, в длинноволновую область спектра, а также изменение показателя преломления, в результате чего возможно осуществить амплитудно-фазовую запись информации [11,12].

Если при считывании зарегистрированной информации используется излучение, не поглощаемое материалом, то запись будет чисто фазовой. В этом случае зарегистрированная информация при восстановлении не будет уничтожаться, и можно достичь высоких значений дифракционной эффективности (ДЭ). Исследование возможности записи и считывания информации при использовании излучения с одной длиной волны (например,  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ) представляется не менее важным. В этом случае при восстановлении записанной информации не требуется изменения геометрии оптической схемы, а в восстановленном изображении будут отсутствовать aberrации, возникающие из-за различия в длине волны.

Целью настоящей работы стало исследование влияния интерференции в тонких пленках на оптические

характеристики материала и ДЭ голограмм, зарегистрированных на слоях AsSe излучением He–Ne-лазера с длиной волны  $0.63 \mu\text{m}$ . Для оценки эффективности регистрируемых на ХСП голограмм необходимо проведение предварительных исследований, которые показали бы, как меняются в процессе воздействия излучения такие характеристики среды как пропускание, поглощение и показатель преломления, которые влияют на величину ДЭ.

## 1. Исследование влияния интерференции в тонких пленках на оптические характеристики голограмм на слоях AsSe

### 1.1. Постановка эксперимента

Для исследования влияния интерференции в тонких пленках на оптические характеристики материала, оптимизации параметров материала и условий регистрации и восстановления голограмм излучением He–Ne-лазера с длиной волны  $0.63 \mu\text{m}$  были выбраны пленки AsSe толщиной  $0.5\text{--}3.5 \mu\text{m}$ . Коэффициент поглощения и показатель преломления пленок на длине волны  $0.63 \mu\text{m}$ , измеренные после напыления, были равны соответственно  $0.5 \mu\text{m}^{-1}$  и 2.8.

В первых экспериментах был обнаружен разброс получаемых значений пропускания, отражения и оптической разности хода лучей при одном и том же энергетическом воздействии излучения на слой ХСП уже в самом начале процесса. Причиной нестабильности отклика, как будет показано ниже, являются интерференционные эффекты в исследуемых тонких пленках.

Если в результате напыления ХСП пленка оказывается неравномерной по толщине, то в отраженном или прошедшем свете можно наблюдать интерференционные полосы равной толщины. Толщина пленки  $d$  в месте падения луча, соответствующая максимуму или минимуму отражения, вычисляется по известной формуле  $d = \lambda m / 2n \cos \beta$ , где  $\lambda$  — длина волны в вакууме,  $n$  — показатель преломления пленки,  $\beta$  — угол падения света на пленку,  $m$  — целое число, причем четные числа  $m$  соответствуют максимумам отражения, а нечетные — минимумам [13].

В случае падения света перпендикулярно поверхности образца при  $n = 2.8$  и  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$  величины пропускания и отражения колеблются с периодом  $0.113 \mu\text{m}$  из-за интерференционных эффектов, особенно заметных из-за высокого показателя преломления ХСП. Аналогичные колебания имеют место и в величине поглощения света в пленке. В местах с максимальным пропусканием наблюдается минимальное поглощение и соответственно в областях с минимальной величиной пропускания — максимальное поглощение. С ростом толщины пленки вследствие увеличения поглощения амплитуда таких колебаний уменьшается.

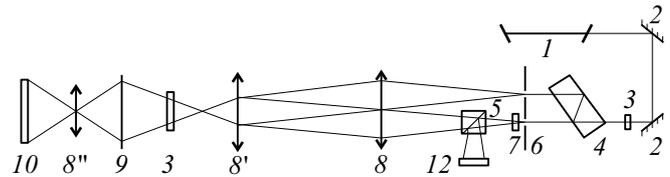


Рис. 1. Схема установки для исследования изменения величины пропускания и оптической разности хода лучей.

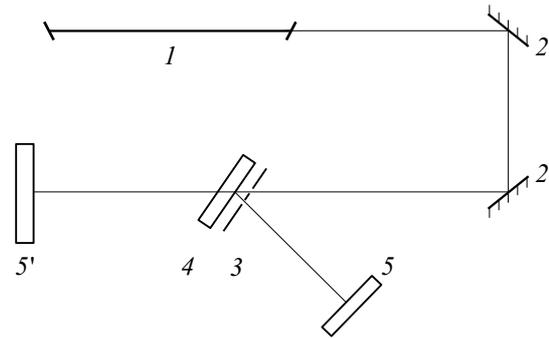
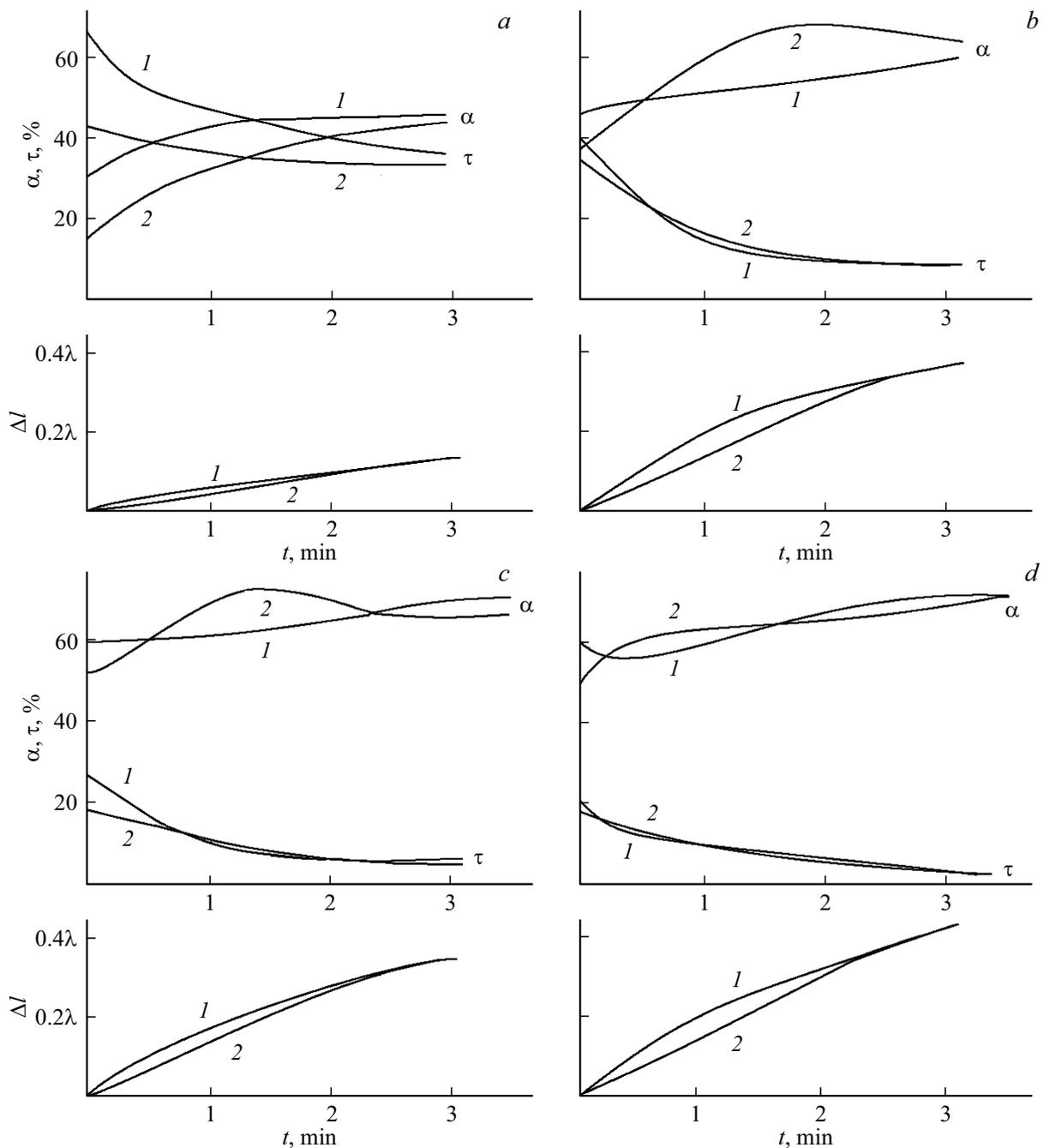


Рис. 2. Схема установки для исследования изменения пропускания и отражения.

Изменение величины пропускания и оптической разности хода лучей от времени экспонирования при различных плотностях мощности воздействующего излучения изучалось на установке, показанной на рис. 1. Пучок света от лазера 1, отражаясь от зеркал 2, с помощью плоскопараллельной пластинки 4 делился на две части. Более интенсивный пучок, проходя через диафрагму 6, падал на образец ХСП 7, вызывая в нем фотоиндуцированные изменения оптических параметров. Далее этот пучок попадал на светоделитель 5, после которого часть излучения поступала на фотодиод 12 для регистрации изменения пропускания. Второй пучок и часть первого, прошедшая через делитель 5, создавали в фокальной плоскости линзы 8 интерференционную картину, которая в увеличенном масштабе с помощью линзы 8' проецировалась в плоскость щели 9. Направление щели было перпендикулярно направлению интерференционных полос. Изображение щели с помощью линзы 8'' проецировалось на фоторегистратор 10.

При воздействии излучения на ХСП происходит индуцированное изменение показателя преломления, что приводит к смещению интерференционной картины вдоль щели. Регистрируя в автоматическом режиме величину перемещения интерференционной полосы  $\Delta x$ , можно получить динамику изменения оптической разности хода  $\Delta l$  в пленке под действием излучения от времени экспонирования  $t$ .

Для получения однородного распределения излучения на пленке ХСП использовалась диафрагма 6, вырезающая в лазерном пучке центральную область диаметром  $0.8 \text{ mm}$ . Для подбора режима экспонирования использовались ослабляющие фильтры 3.



**Рис. 3.** Зависимости поглощения  $\alpha$ , пропускания  $\tau$  и оптической разности хода  $\Delta l$  пленок AsSe толщиной  $d = 0.4$  (a),  $1.18$  (b),  $2$  (c),  $2.95 \mu\text{m}$  (d) от времени экспонирования  $t$ .

Для измерения изменений отражения и пропускания пленок ХСП при воздействии излучения использовалась установка, оптическая схемы которой дана на рис. 2. Излучение гелий-неонового лазера  $1$  направлялось с помощью зеркал  $2$  через ограничивающую диафрагму  $3$  диаметром  $0.8 \text{ mm}$  на исследуемый образец  $4$ . Регистрация интенсивности отраженного и прошедшего света производилась с помощью фотодиодов  $5$  и  $5'$ .

Все измерения проводились на пленках ХСП одинаковой толщины, которая контролировалась по величине

начального пропускания. Из зависимостей пропускания и отражения от времени экспонирования рассчитывалась зависимость величины поглощения от времени экспонирования. Без учета незначительных потерь на рассеяние света в слое ХСП интенсивность поглощенного света равна интенсивности падающего света за вычетом интенсивностей отраженного и прошедшего света. Во всех экспериментах угол падения излучения на поверхность слоя не менялся, и его влияние на получаемые характеристики образца не учитывалось.

## 1.2. Результаты экспериментов

На рис. 3 показан пример зависимости величин поглощения  $\alpha$ , пропускания  $\tau$  и оптической разности хода  $\Delta l$  от времени экспонирования  $t$  для пленок разной толщины  $d$  для плотности мощности действующего излучения  $0.3 \text{ W/cm}^2$ . Оптическая разность хода  $\Delta l$  вычислялась из регистрируемого в эксперименте сдвига интерференционной полосы  $\Delta x$ , который обусловлен набегом фазы  $\Delta\varphi$  просвечиваемой волны, прошедшей через всю толщу слоя ХСП. Сдвиг интерференционной полосы  $\Delta x$  определяется числом длин волн (в данном случае долей длин волн), на которое смещается интерференционная полоса.  $\Delta l$  пропорциональна  $\Delta x$ :  $\Delta l = \lambda \Delta x$ , где  $\lambda$  — длина волны.

Из-за влияния интерференционных эффектов наблюдаются заметные отличия в характеристиках пленок для толщин, соответствующих максимуму (кривая 1) и минимуму (кривая 2) начального пропускания. Так, например, на рис. 3, а начальные значения эффективного поглощения слоя  $\alpha$ , соответствующие минимуму и максимуму, различаются практически в 2 раза. Кривые изменения пропускания определяются наложением фотоиндуцированного потемнения, с одной стороны, и изменений условий интерференции, с другой.

Изменение оптической разности хода  $\Delta l$  более значительно на начальном этапе воздействия излучения в области пленки с толщиной, соответствующей максимуму начального пропускания, что может быть связано с воздействием большей начальной интенсивности света. Как и следовало ожидать, с увеличением толщины пленки различия в характеристиках, соответствующих максимумам и минимумам начального пропускания, уменьшаются.

При увеличении мощности действующего на ХСП излучения удается получить большие изменения пропускания и оптической разности хода. Так, при воздействии излучения плотности мощности порядка  $1.2 \text{ W/cm}^2$  величина пропускания пленки толщиной  $1.2\text{--}1.3 \mu\text{m}$  уменьшалась за время экспонирования 3 мин в 10 раз, а изменение оптической разности хода  $\Delta l$  достигло  $0.55\lambda$ . Для пленки толщиной  $2.9 \mu\text{m}$  величина пропускания пленки за то же время экспонирования уменьшилась в 20 раз, а  $\Delta l$  достигла  $0.72\lambda$ .

Надо отметить, что увеличение толщины пленки более чем в 2 раза не привело к пропорциональному увеличению оптической разности хода. Это указывает на неоднородность фотоиндуцированных изменений оптических характеристик ХСП по глубине слоя в направлении распространения действующего излучения, поглощение которого сопровождается потемнением более интенсивным в приповерхностных слоях. Из этого следует, что запись излучением на  $0.63 \mu\text{m}$  происходит лишь в тонком слое ХСП, и использование пленок исследуемого типа с толщиной более  $3 \mu\text{m}$  нецелесообразно.

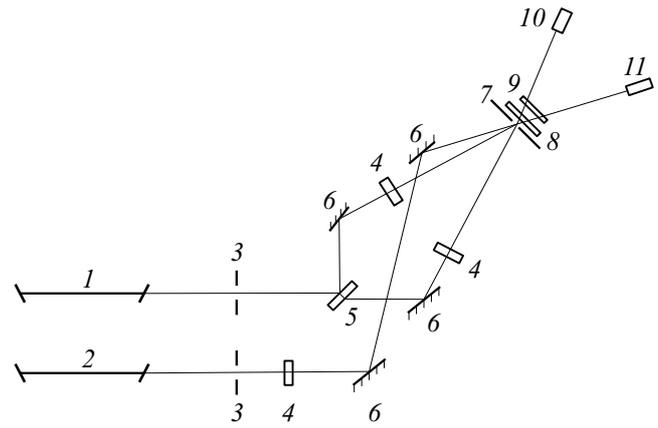


Рис. 4. Схема установки для записи голограмм и измерения дифракционной эффективности.

## 2. Запись и считывание голограмм на пленках AsSe

Не в меньшей степени влияние интерференции проявляется и при регистрации и восстановлении голограмм на ХСП. На рис. 4 приведена оптическая схема установки для исследования дифракционной эффективности голограмм частотой  $\nu$  около  $600 \text{ nm}^{-1}$ , зарегистрированных по симметричной схеме гелий-неоновым лазером 1 мощностью около  $40 \text{ mW}$  в одномодовом режиме при равных интенсивностях интерферирующих пучков. Плотность мощности излучения при записи составляла  $1 \text{ W/cm}^2$ .

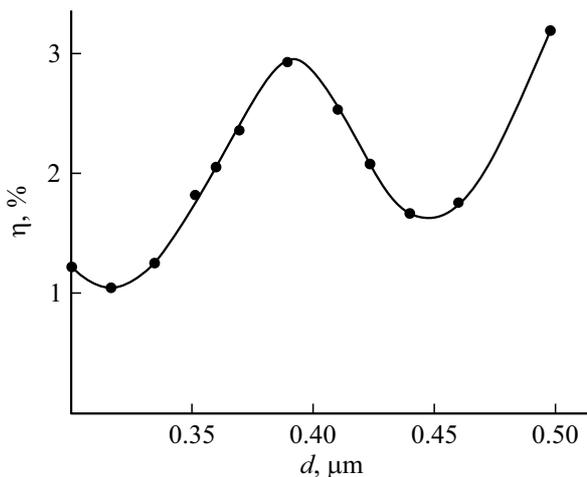
Для восстановления голограмм использовался существенно менее мощный He–Ne-лазер 2, направление распространения излучения которого близко к направлению распространения одного из записывающих пучков. Мощность считывающего лазера подбиралась так, чтобы излучение не воздействовало существенным образом на пленки во время записи голограмм. Направления поляризации записывающего и считывающего излучения взаимно перпендикулярны. Использование второго лазера для восстановления голограммы было необходимо для непрерывной регистрации с помощью фотоприемника 10 интенсивности первого порядка дифракции в процессе записи голограммы.

При использованных параметрах оптической схемы и толщинах пленок AsSe  $d$  до  $3 \mu\text{m}$  голограммы, согласно введенному в работе [14] критерию  $Q$ , можно считать тонкими:

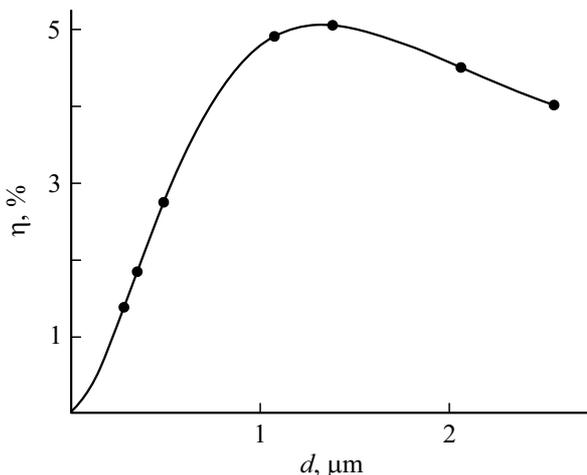
$$Q = 2\pi d \lambda \nu^2 / n < 1,$$

где  $d$  — толщина голограммы,  $\nu$  — пространственная частота,  $n$  — показатель преломления пленки.

Для исследования влияния интерференции в тонких пленках ХСП на величину ДЭ использовались образцы с клинообразным изменением толщины  $d$  слоя ХСП от  $0.2$  до  $3.2 \mu\text{m}$ . На рис. 5 приведена часть экспериментальной зависимости максимально достижимой ДЭ —



**Рис. 5.** Зависимость величины максимально достижимой дифракционной эффективности голограмм  $\eta$  от толщины пленки  $d$ .



**Рис. 6.** Зависимость усредненной максимально достижимой дифракционной эффективности голограмм  $\eta$  от толщины пленки  $d$ .

от толщины пленки  $d$ . Минимумы кривой разнесены на расстояние близкое к приведенной выше величине порядка  $0.11 \mu\text{m}$  для полос равной толщины при  $n = 2.8$  и  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ .

При изменении геометрии оптической схемы изменятся условия интерференции, что вызовет сдвиг максимумов и минимумов колебаний величины максимально достижимой ДЭ в зависимости от толщины. На практике большой интерес представляет усредненная кривая (рис. 6) с максимумом около 5% в области толщин  $1.5\text{--}2.0 \mu\text{m}$ .

В первом приближении ДЭ амплитудно-фазовой голограммы на тонких пленках описывается формулой [15,16]

$$\eta = \tau_0^2 J_1^2(\Delta\varphi),$$

где  $\tau_0$  — среднее амплитудное пропускание голограммы,  $J_1$  — функция Бесселя первого рода первого порядка,  $\Delta\varphi$  — изменение фазы, вычисляемое по формуле  $\Delta\varphi = 2\pi\Delta l/\lambda$ , где  $\Delta l$  — оптическая разность хода лучей,  $\lambda$  — длина волны.

Из полученных значений параметра  $\Delta l$  можно вычислить изменение фазы  $\Delta\varphi$  волны по следующей формуле:  $\Delta\varphi = 2\pi\Delta l/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны. На толщинах  $1.5\text{--}2 \mu\text{m}$  при плотности мощности воздействующего излучения порядка  $1 \text{ W/cm}^2$  параметр  $\Delta\varphi$  находится в интервале  $1.57\text{--}1.88 \text{ rad}$ . В этой области функция Бесселя  $J_1(\Delta\varphi)$  достигает своего максимума при  $\Delta\varphi = 1.86 \text{ rad}$ . Таким образом, ДЭ, являющаяся произведением экспоненциально убывающей от толщины функции  $\tau_0^2$  и функции  $J_1(\Delta\varphi)$  с максимумом, также будет иметь максимум в области указанных толщин, что согласуется с экспериментально полученной зависимостью  $\eta$  от  $d$  (рис. 6).

При уменьшении мощности воздействующего излучения уменьшается изменение величин пропускания и оптической разности хода, что приводит к снижению величины максимума на кривой рис. 6.

## Выводы

Продемонстрировано сильное влияние интерференции в тонких пленках на оптические характеристики материала ХСП системы As-Se. Высокое значение показателя преломления усиливает эффект воздействия интерференции на величины пропускания, поглощения и оптической разности хода в интерферирующих пучках при записи голограмм, а также на величину ДЭ. Влияние интерференции в последнем случае приводит к значительным колебаниям максимально достижимой ДЭ в зависимости от толщины слоя ХСП в области толщин до  $1.5 \mu\text{m}$ .

Следует отметить, что влияние интерференции в тонких пленках существенно для любых светочувствительных слоев, особенно в пленках материалов с высоким показателем преломления.

Можно рекомендовать контролировать толщину слоя при изготовлении по отражению или пропусканию таким образом, чтобы толщина соответствовала максимуму величины начального отражения или пропускания.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.А. Барачевский Опт. и спектр, **124** (3), 371 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.03.45659.238-17 [V.A. Barachevsky. Opt. Spectrosc, **124** (3), 373 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18030062].
- [2] G. Brandes, F.P. Laming, A.D. Pearson. Applied Optics, **9** (7), 1712 (1970). DOI: 10.1364/AO.9.001712

- [3] A.D. Pearson, V.G. Bagley. *Mat. Res. Bull.*, **42** (12), 4908 (1971).
- [4] В.Е. Карнатовский, В.И. Наливайко, В.Г. Цукерман. *Квант. электрон.*, **3** (1), 219 (1976) [V.E. Karnatovskiy, V.N. Naliwaiko, V.G. Zukerman. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, **6** (1), 121 (1976). DOI: 10.1070/QE1976v006n01ABEN010856].
- [5] А.Н. Покровский, М.А. Пономарев, О.Я. Абель, А.Н. Соснов. *В сб.: VIII Междунар. науч. конгресс Интерэкспо Гео-Сибирь-2012* (СГГА, Новосибирск, 2012), т. 1, с. 121–125.
- [6] Н.А. Ивлиев, А.П. Порфирьев, В.В. Подлипов, С.Н. Хонина, А.Ю. Мешалкин. *В сб.: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям*, под ред. А.Ю. Жердева (МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2021), с. 178–181.
- [7] А.М. Настас, М.С. Иову, А.Л. Толстик. *Опт. и спектр.*, **128** (2), 236 (2020). DOI: 10.21883/0000000000 [A.M. Nastas, M.S. Iovu, A.L. Tolstik. *Opt. Spectrosc.*, **128** (2), 231 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20020174].
- [8] Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. *ФТП*, **46** (5), 577 (2012).
- [9] В.Н. Борисов, Н.В. Муравьев, М.В. Попов, Р.А. Окунь, А.Е. Ангервакс, Г.Н. Востриков, С.А. Козюхин, С.А. Иванов. *В сб.: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям*, под ред. А.Ю. Жердева (МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2021), с. 276–284.
- [10] Е.Н. Борисов, А.С. Тверьянович. Способ записи информации на халькогенидных пленках. Патент РФ №2298839. 10.05.2007.
- [11] А.М. Настас, А.М. Андриеш, В.В. Бивол, А.М. Присакар, Г.М. Тридух. *Письма в ЖТФ*, **32** (1), 89 (2006) [A.M. Nastas, A.M. Andriesh, V.V. Bivol, G.M. Prisakar, G.M. Tridukh. *Tech. Phys. Lett.*, **32** (1), 45 (2006)].
- [12] О.В. Ясенюк. Оптическая спектроскопия халькогенидных стекол  $(As_4S_3Se_3)_{1-x}Sn_x$  Автореф. докт. дис. (Институт прикладной физики. Кишинёв, 2015), 130 с. [http://www.cnaa.md/files/theses/2015/23259/oxana\\_iaseniuc\\_abstract\\_ru.pdf](http://www.cnaa.md/files/theses/2015/23259/oxana_iaseniuc_abstract_ru.pdf)
- [13] А.В. Михельсон, Т.И. Папушина, А.А. Повзнер, А.Г. Гофман. *Волновая оптика: учебное пособие* под общ. ред. А.А. Повзнера (Изд-во Урал. ун-та, Екатеринбург, 2013), с. 11–12.
- [14] W.B. Klein, V.D. Cook, W.G. Mayer. *Acustica*, **15** (2), 67 (1965).
- [15] Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. *Оптическая голография*. Пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского (Мир, М., 1973), с. 256–259 [Robert I. Collier, Christoph V. Burckhart, Lawrence H. Lin. *Optical Holography* (Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey. Academic Press, New York and London, 1971), 605 p.
- [16] С.Н. Корешев. *Основы голографии и голограммной оптики* (Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 2016), с. 35–38.