

07

© 1990 г.

ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ГОЛОГРАММ В ИК ДИАПАЗОНЕ НА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ

*Н. Г. Габриадзе, И. И. Комиссарова, Т. Н. Махарадзе,
Г. В. Островская, В. Н. Филиппов, Е. Н. Шедова*

Исследован процесс записи голограмм в ИК области спектра на новом полимерном материале, изготовленном на основе ацетобутиратцеллюлозы (АБЦ) с добавлением трифенилфосфата (ТФФ). Рассмотрено влияние контраста регистрируемой голографической структуры на дифракционную эффективность и энергетический порог записи голограмм. Показано, что добавление пластификатора ведет к повышению чувствительности полимерного материала. Проведены иммерсионные измерения, свидетельствующие о том, что запись голограмм происходит за счет возникновения поверхностного рельефа и не связана с изменением показателя преломления полимерного материала.

Введение

Среди сред, используемых для записи голограмм в инфракрасном (ИК) диапазоне, значительное место занимают полимерные материалы, в частности полиметилметакрилат [1-3], триацетатцеллюлоза (ТАЦ) [3, 4]. Характер голографической записи на этих материалах преимущественно фазовый, что обуславливает высокую дифракционную эффективность и существенную нелинейность голограмм, позволяющие использовать эти материалы для увеличения чувствительности голографической интерферометрии [5]. Недостатком этих материалов является их сравнительно невысокая чувствительность к ИК излучению (0.5—1 Дж/см²). Более чувствительным материалом по данным работы [6] являются пленки поливинилового спирта, позволяющие записывать как динамические, так и стационарные голограммы. Однако в цитированных выше работах не конкретизируется механизм записи голограмм на данных материалах и не выясняются физические параметры, которые определяют такие голографические характеристики, как чувствительность к ИК излучению, дифракционная эффективность (ДЭ) и т. д.

В настоящей работе исследуется механизм записи голограмм на полимерных пленках, состоящих из ацетобутиратцеллюлозы (АБЦ) и трифенилфосфата (ТФФ). Являясь пластификатором, ТФФ существенно влияет на температурный интервал, в котором имеет место высокоэластичное состояние полимерной композиции. Поэтому можно было ожидать, что добавление ТФФ к АБЦ приведет к изменению голографических характеристик этого материала, в частности его чувствительности.

Приготовление и исследование пленок

АБЦ представляет собой смешанный эфир целлюлозы. Он как полимерный материал обладает большей пластичностью, водостойкостью, лучшей совместимостью с пластификаторами и лучшей растворимостью, чем апетаты целлюлозы. Температура размягчения АБЦ лежит в интервале 170—180 °С. Для получения полимерных композиций нами был использован АБЦ марки САВ-381-20 (Easton Kodak Company). Пленки получали методом полива из поли-

мерного раствора в стеклянные поверхности. В качестве растворителя была взята смесь ацетона с дихлорэтаном в соотношении 1.5 : 1. Пленки высушивались в вакууме в течение 10 ч при 100 °С. На вид пленки прозрачные, гладкие (без пузырей и царапин).

Совместимость ТФФ и АБЦ достигает 33.3 % [7]. Нами были изготовлены образцы с концентрацией ТФФ от 5 до 60 %, причем образцы с содержанием ТФФ, превышающим предел совместимости, мутнели со временем тем быстрее, чем больше было это превышение.

Для различных образцов были измерены температуры стеклования (T_c), определяющие нижнюю границу области существования высокоэластичного состояния (рис. 1, а). Температура стеклования определялась по точке изгиба на термомеханической кривой.

Введение ТФФ влияет не только на теплофизические характеристики полимерной композиции, но также изменяет и ее оптические свойства, в частности

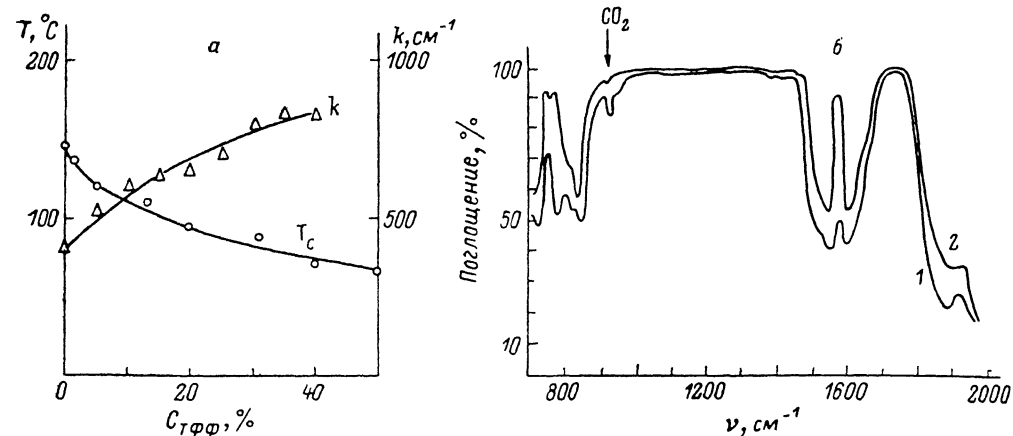


Рис. 1.

а — зависимость температуры стеклования T_c и коэффициента поглощения k от концентрации пластификатора; б — спектр пропускания в ИК диапазоне для пленки АБЦ при концентрации ТФФ, равной 0 (1) и 20 % (2). Толщина образцов 54 и 48 мкм соответственно. Область излучения CO_2 лазера показана стрелкой.

коэффициент поглощения, который в свою очередь определяет эффективность нагрева поверхности ИК излучением. На рис. 1, б представлен спектр поглощения в ИК диапазоне для пленки АБЦ без пластификатора (1) и с пластификатором (2). Как видно из рисунка, добавка пластификатора приводит к увеличению поглощения в этом диапазоне, в том числе и на длине волны CO_2 лазера 10.6 мкм ($\nu=940 \text{ см}^{-1}$). Результаты измерений коэффициента поглощения k на длине волны излучения CO_2 лазера 10.6 мкм для образцов с различным содержанием пластификатора ТФФ приведены на рис. 1, а. Как видно из рисунка, введение пластификатора, во-первых, приводит к существенному снижению T_c , а во-вторых, способствует более эффективному нагреву полимерного материала. Оба эти фактора позволяют ожидать снижения энергетического порога записи голограмм на данном материале.

Эксперимент

Схема установки для записи голограмм и определения их дифракционной эффективности приведена на рис. 2. Излучение импульсного CO_2 лазера 1 с длительностью импульсов около 2.5 мкс с помощью германиевой пластины 2 делилось на два пучка, которые плоским зеркалом 3 и вогнутыми зеркалами 4, 5 направлялись на поверхность регистрирующего материала 6. Плотность энергии в плоскости регистрации варьировалась как за счет изменения энергии накачки лазера, так и за счет изменения расстояния от зеркал 4, 5 до голограммы 6. Для измерения энергии излучения использовался прибор ИМО-2Н. Пространственная частота интерференционной структуры ν составила 12 лин./мм.

Голограмма просвечивалась пучком лазера 7. В фокусе линзы 8 помещалась диафрагма 9, выделяющая пучок первого порядка дифракции, который попадал на фотодиод 10 и регистрировался осциллографом 11. Установка позволяла измерять дифракционную эффективность стационарных голограмм, а также следить за изменением дифракционной эффективности в процессе записи. Типичные осциллограммы процесса записи голограмм при разных плотностях энергии приведены на рис. 3. При низких плотностях энергии (кривые 1, 2) наблюдается быстрый (в течение 20—30 мкс) рост дифрак-

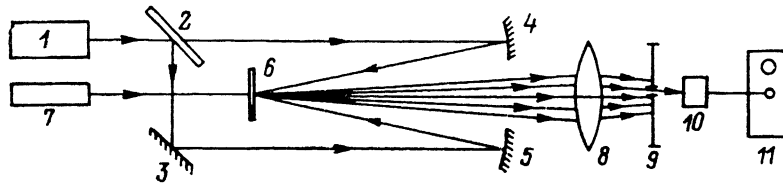
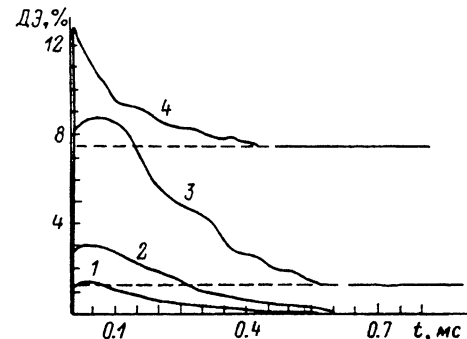


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования процесса записи голограмм.

ционной эффективности и затем ее спад практически до нуля в течение нескольких сотен мкс, т. е. имеет место запись чисто динамических голограмм. По мере увеличения плотности энергии не происходит полного стирания голограммы, т. е. записывается стационарная голограмма (кривые 3, 4). На рис. 4 приведены зависимости ДЭ стационарных (1, 2) и динамических (3, 4) голограмм от плотности энергии для одного из исследованных образцов пленок на основе АБЦ с содержанием ТФФ 20 %. По кривым такого рода можно определить порог записи стационарных голограмм $J_{\text{пор}}^{\text{ст}}$, соответствующий той плотности энергии, при которой ДЭ достигает 1 %. Аналогичным образом под $J_{\text{пор}}^{\text{дин}}$ мы будем понимать значение плотности энергии, при которой ДЭ динамических голограмм составляет 1 %.

Рис. 3. Типичные осциллограммы процесса записи голограмм на пленке из АБЦ с концентрацией пластификатора ТФФ 20 % при разных плотностях энергии.

1 — 10, 2 — 0.21, 3 — 0.34, 4 — 0.47 Дж/см².



В процессе исследования было обнаружено, что вид осциллограмм, а также вид кривых зависимости ДЭ от плотности энергии и соответственно значения $J_{\text{пор}}^{\text{ст}}$ и $J_{\text{пор}}^{\text{дин}}$ существенным образом зависят от контраста интерференционной структуры (на рис. 4 кривые 1, 3 соответствуют контрасту $p=0.9$, а кривые 2, 4 — контрасту $p=0.5$). Как видно из этого рисунка, уменьшение контраста приводит к возрастанию $J_{\text{пор}}$ как для динамических, так и для стационарных голограмм. Интересно отметить, что при ухудшении контраста ДЭ динамических голограмм резко падает, а ДЭ стационарных голограмм, напротив, возрастает. Как правило, в работах по исследованию материалов, пригодных для записи ИК голограмм, не проводился контроль за контрастом регистрируемой интерференционной структуры, чем, по-видимому, и объясняется большой разброс значений чувствительности и дифракционной эффективности одних и тех же материалов по данным разных авторов.

Как известно, контраст интерференционной структуры определяется соотношением интенсивностей интерферирующих пучков, когерентными свойствами лазерного излучения и точностью совмещения модовой структуры пучков в плоскости голограммы [8]. Мы определяли абсолютные значения контраста интерференционной структуры по ширинам полос на интерферограмме, зарегистрированной на пороговом материале, в качестве которого использовалось полупрозрачное алюминированное зеркало. При этом пороговое значение

интенсивности $J_{пор}$, при превышении которого происходит испарение алюминиевого слоя, связано с шириной светлых полос a и контрастом p соотношением

$$J_{пор} = J_{ср} \left(1 + p \cos \frac{\pi a}{d} \right), \quad (1)$$

где $J_{ср}$ — среднее значение интенсивности излучения, d — период интерференционной структуры.

Как следует из формулы (1), при $J_{ср} = J_{пор}$ ширины светлых и темных полос равны ($a = d/2$) при любых значениях p , что позволяет определить $J_{пор}$ для данного материала. Измерив значения a/d при других значениях $J_{ср} \neq J_{пор}$ из выражения (1) можно найти контраст. В последующих экспериментах при определении пороговых значений плотности энергии для образцов с различным содержанием пластификатора проводился контроль за контрастом интерференционной структуры.

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 приведены кривые зависимости порога стационарных голограмм от концентрации пластификатора при высоком и низком значениях контраста. Как и предполагалось, введение пластификатора привело к существенному

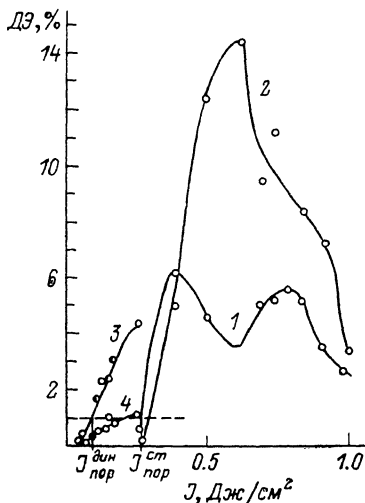


Рис. 4. Зависимость ДЭ стационарных (1, 2) и динамических (3, 4) голограмм на пленках из АБЦ ($C_{ТФФ} = 20\%$) от плотности энергии при контрасте $p = 0.9$ (1, 3) и 0.5 (2, 4).

снижению порога записи стационарных голограмм (от 0.7 для чистой АБЦ до 0.2 Дж/см² при концентрации ТФФ 35%). По-видимому, аналогичную роль играет пластификатор и в других полимерных композициях, в частности на основе ТАЦ. Измеренные нами значения плотности энергии для различных образцов на основе ТАЦ колеблются в пределах от 0.5 (основа кинопленки типа А-2) до 0.9 Дж/см² (чистая ТАЦ).

На том же рис. 5 приведена зависимость $J_{пор}^{дин}$ от концентрации пластификатора при высоком контрасте. Как видно, введение пластификатора практически не влияет на порог записи динамических голограмм. Кроме того, с ростом концентрации пластификатора наблюдается уменьшение максимальной ДЭ, достижимой в интервале интенсивностей от $J_{пор}^{дин}$ до $J_{пор}^{ст}$. Ухудшение же контраста приводит к очень резкому падению ДЭ динамических голограмм, так что для образцов с высоким содержанием ТФФ (свыше 25%) ДЭ динамических голограмм не достигает 1% даже при увеличении плотности энергии до $J_{пор}^{ст}$. Поэтому для записи динамических голограмм наиболее подходящим материалом являются образцы, не содержащие пластификатора. Этот вывод относится не только к образцам на основе АБЦ, но также и к исследованным нами образцам на основе ТАЦ.

Для понимания механизма записи голограмм на полимерных материалах прежде всего необходимо выяснить характер записи голограмм. С этой целью были проведены иммерсионные измерения, результаты которых иллюстрируются рис. 6, где приведены кривые зависимости ДЭ от плотности энергии для стационарных голограмм, записанных на двух образцах пленок из АБЦ. Кривые 1, 3 получены без погружения образцов в иммерсию, а кривые 2, 4 — при их погружении в глицерин (показатель преломления АБЦ равен 1.475, показатель преломления глицерина 1.474). Как видно из рис. 6, при плотностях энергии, меньших плотности энергии, соответствующей максимуму ДЭ, по-

гружение в иммерсию приводит к падению ДЭ практически до нуля. Это означает, что в данном диапазоне плотностей энергии стационарная голографическая запись обусловлена возникновением поверхностного рельефа и не связана с изменением показателя преломления материала, как предполагалось, например, в работе [4]. Наблюдаемый некоторый рост ДЭ в иммерсии для больших значений плотности энергии можно объяснить выгоранием или разрушением материала в максимумах интерференционной структуры, в результате чего голограмма становится амплитудно-фазовой.

К числу возможных механизмов формирования поверхностного рельефа относятся локальное испарение вещества (как предполагается, например, в [3]), а также деформация поверхности пленок вследствие пространственной модуляции температуры поверхности. В пользу последнего механизма свидетельствуют интерферограммы поверхности голограмм, полученные с помощью

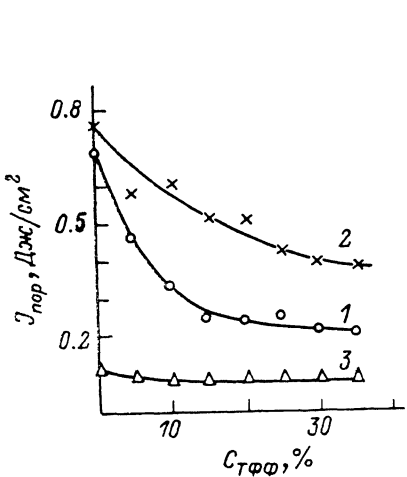


Рис. 5. Зависимость порога записи $J_{\text{пор}}^{\text{ст}}$ (1, 2) и $J_{\text{пор}}^{\text{лич}}$ (3) от концентрации пластификатора $p=0.9$ (1, 3) и 0.3 (2).

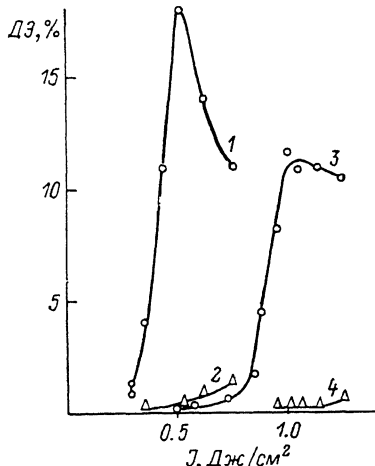


Рис. 6. Зависимость ДЭ от плотности энергии для голограмм, записанных на пленке из АБЦ (концентрация ГФФ 35 %) в воздухе (1) и в иммерсии (2) и на пленке АБЦ (без пластификатора) в воздухе (3) и в иммерсии (4).

интерференционного микроскопа (рис. 7). Из рис. 7 видно, что профиль штриха голографической решетки представляет собой канавку, края которой возвышаются над поверхностью пленки. Невозмущенные участки поверхности соответствуют минимумам интенсивности голографической структуры. Нетрудно видеть, что убыль вещества из области максимальной температуры в первом приближении компенсируется его увеличением по краям канавки. Глубина канавки возрастает при увеличении интенсивности излучения и составляет для приводимых на рис. 7 интерферограмм от 0.14 до 1 мкм.

Зная коэффициент поглощения для данного образца (рис. 1), можно считать температуру его поверхности при данных значениях плотности энергии. Количество тепла Q (кал/г·град.), выделенное в поверхностном слое толщиной dy , очевидно, равно

$$Q = 0.24 J k S dy, \quad (2)$$

где J — интенсивность падающего излучения в Дж/см², S — площадь слоя.

Поскольку масса нагреваемого вещества $m = \rho dy S$ (ρ — плотность вещества), а регистрируемое распределение интенсивности описывается выражением $J = J_{\text{ср}} (1 + p \cos 2\pi x)$, то для температуры нагрева поверхности пленки будем иметь

$$T(x) = T_1 + \frac{0.24 J k (1 + p \cos 2\pi x)}{\rho C}, \quad (3)$$

где C — теплоемкость вещества, T_1 — начальная температура, ν — пространственная частота голографической структуры.

Для образца с содержанием ТФФ 15 % измеренные нами значения $\rho = 1.12 \text{ г/см}^3$ и $k = 630 \text{ см}^{-1}$. Значения C в соответствии с [9] принимались равными $0.35 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$, а $p = 0.9$. Значения температуры поверхности в максимумах интерференционной картины при значениях $J_{\text{ср}} = 0.33, 0.40$ и 0.48 Дж/см^2 , соответствующих приведенным на рис. 7 интерферограммам, равна соответственно $260, 310$ и $370 \text{ }^\circ\text{C}$. Эти значения существенно превышают темпе-

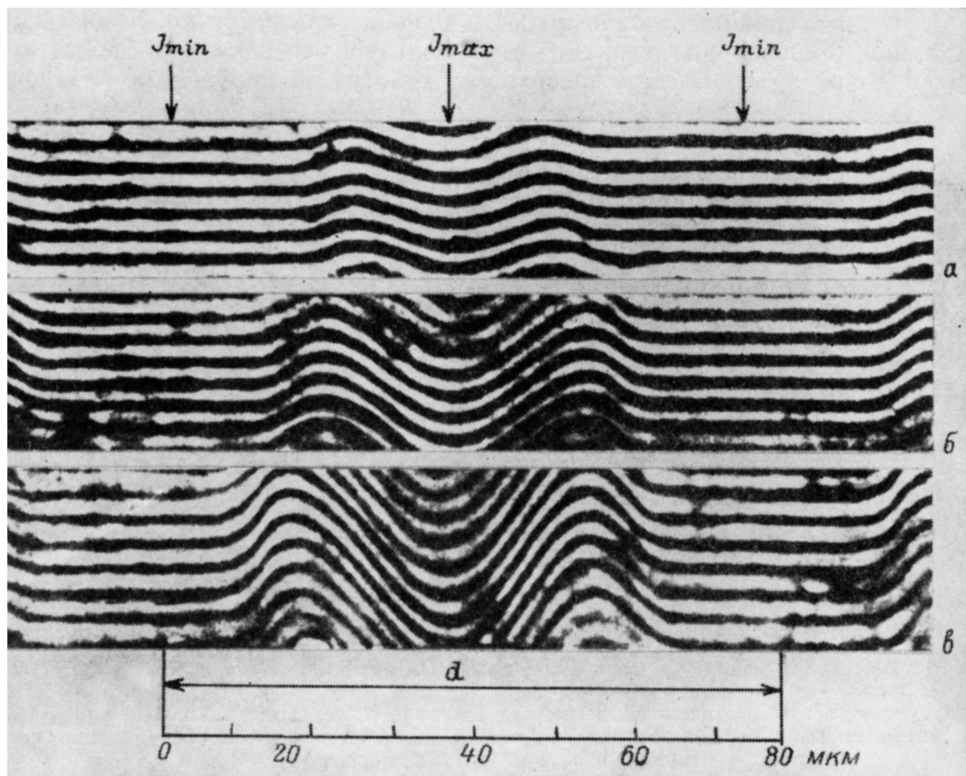


Рис. 7. Микроинтерферограммы поверхности голографической решетки, записанной на пленке из АБЦ с концентрацией пластификатора ТФФ 15 % при различных плотностях энергии излучения.

$a - 0.33, б - 0.40, в - 0.48 \text{ Дж/см}^2$.

ратуру стеклования для данного образца (рис. 1) и соответствуют, по-видимому, переходу его в область текучести. Деформация поверхности при этом может происходить за счет градиента поверхностного натяжения аналогично деформации поверхности жидкости при ее локальном нагреве (см., например, [10]).

Выводы

Таким образом, в настоящей работе исследованы особенности регистрации голограмм на полимерных пленках на основе АБЦ с различным содержанием пластификатора (ТФФ). Показано, что добавление пластификатора ведет к снижению энергетического порога записи стационарных голограмм. Установлено также, что как порог, так и максимальная ДЭ существенным образом зависят от контраста наложенной голографической структуры. Проведенные иммерсионные измерения показали, что в основе записи голограмм на этом материале лежит не изменение показателя преломления, а возникновение

поверхностного рельефа, который в свою очередь, по-видимому, является следствием деформации поверхности за счет локальных изменений коэффициента поверхностного натяжения.

Список литературы

- [1] Бархударов Э. М., Березовский В. Р., Гелашвили Г. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 23. С. 1079—1083.
- [2] Rioux M., Blanchard M., Cormier M. et al. // Appl. Opt. 1976. Vol. 16. P. 1876—1879.
- [3] Бархударов Э. М., Березовский В. Р., Мдивнишвили М. О. и др. // Тр. IV Всесоюз. конф. по голографии. Ереван, 1982. С. 570—573.
- [4] Бархударов Э. М., Березовский В. Р., Бродзели М. И. и др. // Опт. и спектр. 1980. Т. 48. Вып. 5. С. 820—822.
- [5] Комиссарова И. И., Островская Г. В., Филиппов В. Н., Шедова Е. Н. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 2. С. 251—257.
- [6] Дурасов В. М., Рубанов А. С., Сташкевич И. В., Чалей А. В. // Тр. IV Всесоюз. конф. по голографии. Ереван, 1982. С. 694—698.
- [7] Энциклопедия полимеров. М.: Сов. энциклопедия, 1974. Т. 2. 626 с.
- [8] Урсу И., Апостол Д., Апостол И. и др. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 7. С. 1432—1434.
- [9] Справочник по пластическим массам. М., 1969. Т. 2. 226 с.
- [10] Helmers H., Witte W. // Opt. Commun. 1984. Vol. 49. N 1. P. 21—23.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
30 мая 1989 г.