

УДК 772.932.45

В. А. Окушко, Б. Н. Тюшкевич

*(Минск, Беларусь)***РЕГИСТРАЦИЯ ДВУХЭКСПОЗИЦИОННЫХ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ
НА ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСТАТОЧНОЙ ПАМЯТИ**

Исследован процесс формирования фазового рельефа на поверхности фототермопластического материала при регистрации двухэкспозиционных голографических интерферограмм с использованием остаточной памяти. Установлено, что кинетика рельефообразования при записи голограммы и ее восстановлении за счет памяти различна. Разработан метод повышения контраста полос при фототермопластической регистрации двухэкспозиционных голографических интерферограмм.

Причины остаточной памяти фототермопластических (ФТП) материалов исследовались в ряде работ [1—9]. Суть такой памяти заключается в том, что после теплового стирания рельефозазовой голограммы последнюю можно восстановить, не прибегая к повторному экспонированию.

Исследование фотопроводимости в халькогенидных стеклообразных полупроводниках показало, что процесс прямой (межзонной) рекомбинации неравновесных носителей заряда в широкозонных полупроводниках маловероятен и преобладающую роль играет процесс ступенчатой рекомбинации, когда носители заряда предварительно захватываются на локальные уровни [10]. Для носителя, находящегося на рекомбинационном уровне, существует, однако, и некоторая вероятность возврата в свободное состояние. Воздействие сильного электрического поля (при зарядке ФТП-материала) существенно увеличивает эту вероятность, так что она начинает преобладать над вероятностью «окончательной» рекомбинации. Находящиеся на уровнях рекомбинации носители зарядов вновь освобождаются при повторном включении высокого напряжения. Таким образом, имеется пространственно-модулированная в соответствии с характером регистрируемой информации остаточная фотопроводимость, которая позволяет восстановить записанную ранее в виде рельефа информацию [2, 3].

В работах [5, 6] исследовалось явление остаточной памяти для органических (карбазолсодержащих) материалов и, в частности, обнаружено, что причиной памяти являются остаточные заряды на поверхности ФТП-материала вследствие ограниченного времени нагрева и отрицательные заряды в объеме рабочего слоя.

В [4] возможными причинами обнаруженного эффекта памяти ФТП-материала называются: поляризация в поле коронирующего электрода, большие времена механической релаксации, изменение надмолекулярной структуры термопластического слоя.

Причиной остаточной памяти, независимо от конструкции (количества слоев) ФТП-материала, может служить также остаточный микрорельеф поверхности вследствие неполного теплового стирания. При повторной зарядке за счет гидродинамического и электрокапиллярного усилений [11] происходит

рост начальных деформаций и восстановление ранее полученного микро-рельефа.

Остаточная память существенно ухудшает такие характеристики ФТП-материалов, как цикличность, реверсивность, отношение сигнал/шум, поэтому разработаны и успешно используются на практике способы управления ее величиной [2, 5, 7, 8]. Для этого нагретый ФТП-материал достаточно облучить светом, от интенсивности которого зависит величина остаточных зарядов. Величиной памяти ФТП-материалов можно управлять также на этапе изготовления за счет состава фото- и термопластического слоев [6, 9].

С другой стороны, эффект остаточной памяти может быть использован для увеличения дифракционной эффективности голограмм [12—18] за счет усиления на стадии образования скрытого электростатического изображения [13, 15, 18] и в процессе рельефообразования [12, 14, 16, 17], а также для получения двухэкспозиционных голографических интерферограмм [19, 20]. Общая методика получения двухэкспозиционных интерферограмм с использованием остаточной памяти дана в [19], там же проведен модельный эксперимент, который показал принципиальную возможность использования этого эффекта в голографической интерферометрии. Однако при исследовании реальных объектов в [20] с помощью созданного голографического интерферометра с ФТП-регистратором на базе неорганических полупроводников контраст полос не превышал 0,3, что в ряде случаев не обеспечивает надежность голографического неразрушающего контроля.

Настоящая работа посвящена исследованию процесса формирования фазового рельефа на поверхности ФТП-материала при регистрации двухэкспозиционных голографических интерферограмм с использованием остаточной памяти, разработке методов повышения контраста полос.

Исследования проведены с помощью голографического интерферометра на базе двухимпульсного рубинового лазера [21] и ФТП-регистратора [22]. Конструкция лазера обеспечивает перестройку временного интервала между экспозициями от единиц микросекунд. Временной интервал в сторону его увеличения не ограничен. Наряду с рубиновым лазером, использован непрерывный гелий-неоновый лазер ($\lambda = 0,6328$ мкм). Запись осуществлялась на ленточный двухслойный ФТП-материал шириной 35 мм типа ФТПН-Л: фото-полупроводник $As_{3,8}Se_{3,8}S_3Sb_{0,2}$ толщиной 1,8 мкм, термопластик — диализофтолат — толщиной 0,5 мкм.

Регистрация двухэкспозиционных голографических интерферограмм производилась по методике [20]: нагретый до определенной температуры записи (стирания) ФТП-материал экспонировался во время первого действия коронного разряда длительностью τ_1 , в паузе объект нагружался и происходило стирание первой голограммы. При повторном действии коронного разряда такой же длительности τ_1 и экспонировании нагруженного объекта происходило восстановление первой (за счет памяти) и второй голограммы. В результате проведенных операций регистрировалась двухэкспозиционная интерферограмма. При этом оказалось, что при длительных экспозициях, когда время экспонирования соответствовало времени зарядки (непрерывный лазер), интерферограммы получались всегда (хотя и с низким контрастом полос $K = 0,2 + 0,25$), а при коротких временах экспонирования (~ 50 нс) с использованием импульсного рубинового лазера результат был отрицательный (в основном записывалась лишь голограмма исходного состояния объекта).

Для выяснения причин, приводящих к регистрации интерферограмм с низким контрастом полос, проведен сравнительный анализ процесса рельефообразования при записи голограммы и ее восстановлении за счет памяти. Исследования осуществлялись при зондировании ФТП-материала световым сигналом. В качестве источника зондирующего излучения использован полупроводниковый лазер ИЛПН-205Б ($\lambda = 0,76$ мкм), что позволило свести к минимуму влияние зондирующего излучения на светочувствительный слой.

На рис. 1 представлены осциллограммы, характеризующие изменение интенсивности в первом порядке дифракции голограмм на этапе рельефообразования в случае записи (1) и последующего ее восстановления для первого

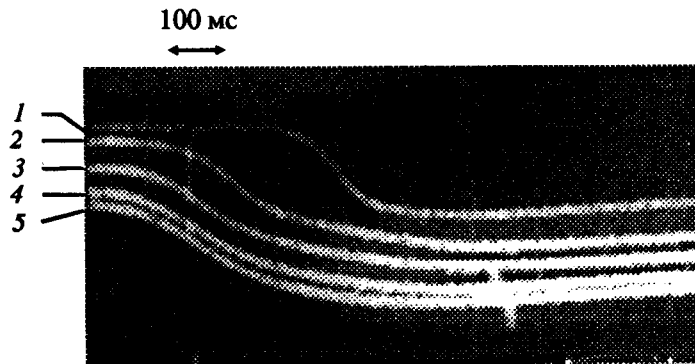


Рис. 1. Осциллограммы, характеризующие изменение интенсивности в первом порядке дифракции голограммы при записи (1) и последующих восстановлении (2—5): параметры записи: $\tau_k = 500$ мс (1—5); $\tau_{33} = 180$ мс (1); $U_k = 8,2$ кВ (1—5); $T = 343$ К; $\lambda_{\text{зап}} = 0,694$ мкм

действия коронного разряда (2), второго (3) и т. д. Исследования показали, что кинетика рельефообразования при записи голограммы и ее восстановлении за счет памяти отличается. Изменяются такие характеристики, как время задержки начала рельефообразования τ_2 , время развития и скорость роста деформаций. Так, например, для указанных на рис. 1 режимов записи время задержки начала рельефообразования τ_2 при записи составляло величину ~ 300 мс, при восстановлении — ~ 120 мс, а время развития деформаций — соответственно ~ 200 и ~ 400 мс.

Изменение τ_2 обусловлено, очевидно, наличием остаточных зарядов на поверхности ФТП-материала, что сокращает время зарядки, необходимое для достижения потенциала деформирования. Уменьшение же скорости роста деформаций по сравнению с процессом записи можно объяснить терморелаксацией зарядов скрытого электростатического изображения в промежутке между экспозициями на границе полупроводник — термопластик и ростом постоянной составляющей зарядов на указанной границе, снижающей эффективный коэффициент модуляции [23], что приводит к уменьшению величины деформирующих нагрузок.

Проведенные исследования показывают, что при регистрации двухэкспозиционных голографических интерферограмм описанным выше способом ухудшаются условия формирования второй голограммы. Длительные экспозиции с использованием лазера с непрерывной генерацией приводят, по сути дела, к различным временам экспонирования объекта в исходном состоянии и при его нагружении, поскольку в данном случае τ_2 определяет время формирования скрытого электростатического изображения. При развитии геометрического рельефа на поверхности ФТП-материала доминирующим фак-

тором является процесс усиления [11], что делает малоэффективным экспонирование во время рельефообразования. Очевидно, это и является одной из причин невысокого контраста полос.

Особенно существенно сказывается разница в задержке начала рельефообразования при записи и восстановлении голограммы, если в качестве источника излучения использовать импульсный

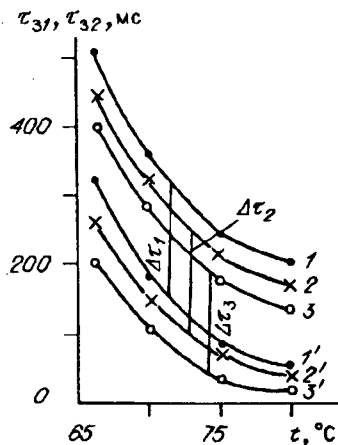


Рис. 2. Зависимость задержки начала рельефообразования при записи голограммы и ее восстановлении за счет памяти:

параметры записи: $\tau_k = 500$ мс (1—3; 1'—3'); $\tau_{33} = 180$ мс (1—3); $U_k = 7$ (1, 1'), 8 (2, 2'), 9 кВ (3, 3')

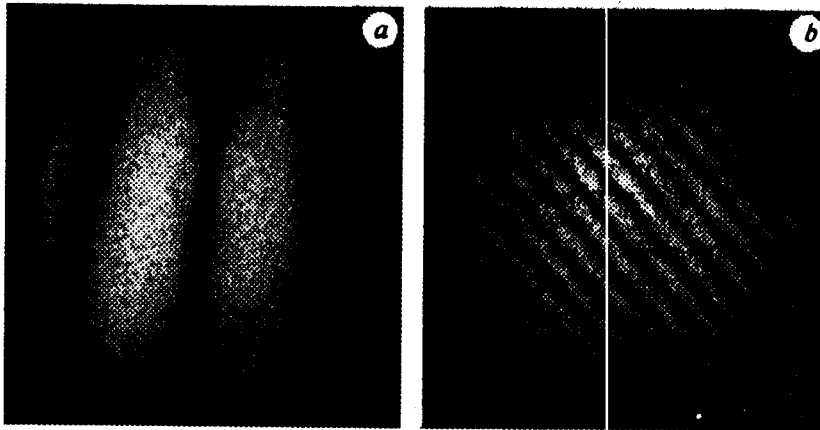


Рис. 3. Двухэкспозиционные голографические интерферограммы промежуточной среды: временной интервал между экспозициями 10 (а) и 50 с (б); поправка на задержку экспозиции $\Delta t = 180$ мс

лазер, где время экспонирования составляет $\sim 10^{-8}$ с.

Известно, что экспонирование в этом случае осуществляют с задержкой τ_{33} по отношению к началу зарядки (к моменту включения экспозиции ФТП-материал должен обладать необходимой зарядовой чувствительностью) [24]. Проведенные ранее исследования динамики двухэкспозиционной записи показали [25], что контраст интерференционных полос возрастает, если вторая экспозиция включена до начала рельефообразования первой голограммы. В связи с этим для повышения контраста двухэкспозиционных голографических интерферограмм с использованием остаточной памяти необходимо вводить корректировку момента времени включения второй экспозиции по отношению к началу второй зарядки [26].

Приведенные на рис. 2 зависимости задержки начала рельефообразования τ_{31} при записи (кривые 1—3) и τ_{32} при восстановлении голограммы за счет памяти (кривые 1'—3') от температуры проявления и параметров зарядки позволяют численно определять величину поправки. Время задержки включения второй экспозиции τ_{332} по отношению к началу второго цикла зарядки ограничивается неравенством $\tau_{332} \leq \tau_{31} - \Delta t$, где Δt определяется на основании кривых, представленных на рис. 2, и зависит от конкретных значений температуры проявления и напряжения коронного разряда. На рис. 3 представлены двухэкспозиционные голографические интерферограммы промежуточной среды для крепления и обработки оптических деталей, полученные с учетом поправки Δt для различных временных интервалов между экспозициями. Голографические интерферограммы записаны рубиновым лазером, работающим в режиме модулированной добротности, при термическом нагружении промежуточной среды. Учет приведенных выше результатов позволил проводить методом двух экспозиций голографические исследования изделий с фототермопластической регистрацией интерферограмм при временных интервалах между экспозициями до нескольких минут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saito T., Oshhina S., Honda T. et al. An improved technique for holographic recording on a thermoplastic photoconductor // Opt. Commun.—1976.—16, N 1.—P. 90.
2. Сорока С. И., Козак А. А. Исследование эффекта памяти фототермопластических носителей на основе неорганических полупроводников // Электрон. техн. Сер. 6. Материалы.—1981.—Вып. 7.
3. Сорока С. И., Козак А. А. Исследование реверсивных свойств фототермопластических носителей информации // Там же.—Вып. 6.

4. Килийская Е. А., Клишук П. В., Копачинский Г. Г. и др. О цикличности двухслойных ФТПН // Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Формирование оптического изображения и методы его обработки». — Кишинев, 1985. — Т. I.
5. Баженов М. Ю. Работа термопластических сред в реальном масштабе времени // Фундаментальные основы оптической памяти и среды. — Киев, 1979. — Вып. 10.
6. Кувшинский Н. Г. и др. Физические модели заряженной термопластической среды и скрытого изображения при фотопластическом способе регистрации голограмм // Там же.
7. Белоножко А. М., Кувшинский Н. Г., Павлов В. А. и др. Управление процессом стирания голограмм на пленках термопластических карбазолсодержащих полимерных полупроводников. Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Л., 1974.
10. Любин В. М. Фотоэлектрические явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Л., 1974.
11. Панасюк Л. М., Русанов М. М. Изменение плотности электрического заряда на деформируемой поверхности термопластического материала // ЖНИПФик. — 1974. — 19, вып. 4.
12. Gredell T. L., Spong F. J. Thermoplastic media for holographic recording // RCA Rev. — 1973. — 33, N 3. — P. 206.
13. Панасюк Л. М., Конзело А. А. О возможности получения усиления в системе полупроводник — модулирующая среда на стадии формирования электростатического контраста // Тез. докл. Всесоюз. конф. по процессам усиления в фотографических системах регистрации информации. — Минск, 1981.
14. Аязян А. А., Мамулия Л. К. Процессы усиления в фототермопластических системах регистрации информации // Там же.
15. А. с. 976425 СССР. Способ записи фазовых голограмм на однослойных фотопластических средах / М. Ю. Баженов. — Оpubл. 23.11.82, Бюл. № 43.
16. Friesem A. A., Katzir, Rav-Noy Z. et al. Photoconductor-thermoplastic devices for holographic nondestructive testing // Opt. Eng. — 1980. — 19, N 5. — P. 659.
17. Hirshfeld Z., Friesem A. A., Rav-Noy Z. Holographic recording mechanism in photoconductor-thermoplastic devices // Appl. Phys. — 1981. — 52, N 2. — P. 605.
18. Баженов М. Ю., Кувшинский Н. Г., Находкин Н. Г. Особенности управления тонкими пленками полимерных полупроводников при регистрации оптических голограмм // Фундаментальные основы оптической памяти и среды. — Киев, 1983. — Вып. 14.
19. Жовтанецкий О. И., Зюбрик А. И., Левченко О. Г., Фитьо В. М. Использование паразитной памяти фототермопластиков в голографической интерферометрии // Автометрия. — 1983. — № 1.
20. Анкин В. И. и др. Двухэкспозиционная интерферометрия и спекл-фотография на фототермопластических регистрирующих средах // Свойства светочувствительных материалов и их применение в голографии. — Л., 1987.
21. Тюшкевич Б. Н., Дашкевич В. И., Дробот И. Л. Двухимпульсный рубиновый лазер для голографической интерферометрии со сдвинутым во времени разрядом ламп накачки // Тез. докл. 12 Всесоюз. науч.-техн. конф. «Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстротекущих процессов». — М.: ВНИИОФИ, 1985.
22. Галабурда О. В., Окушко В. А., Тюшкевич Б. Н. Голографический интерферометр на базе двухимпульсного рубинового лазера с фототермопластической регистрацией // Автометрия. — 1991. — № 1.
23. Сорока С. И., Козак А. А. Исследование реверсивных свойств фототермопластических носителей информации // Электрон. техника: Сер. 6. Материалы. — 1981. — Вып. 6.
24. Сорока С. И., Ратников С. И. Запись голограмм на непрерывно движущийся фототермопластический носитель // Фундаментальные основы оптической памяти и среды. — Киев, 1980. — Вып. 11.
25. Галабурда О. В., Окушко В. А., Тюшкевич Б. Н. Динамика двухэкспозиционной записи на фототермопластический носитель излучением импульсного лазера // Автометрия. — 1991. — № 1.
26. Заявка 5021316 Россия. Способ регистрации двухэкспозиционной голографической интерферограммы / Б. Н. Тюшкевич, В. А. Окушко. — Оpubл. 13.03.92.

Поступила в редакцию 16 марта 1994 г.