

УДК 772.932.45

В. И. Дашкевич, В. А. Окушко, Б. Н. Тюшкевич

(Минск, Беларусь)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГИСТРАЦИИ
ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА
НА ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ
НА ОСНОВЕ СМЕСИ СЕЛЕНИДОВ И ХАЛЬКОГЕНИДОВ МЫШЬЯКА*

Исследована зависимость дифракционной эффективности голограммы, регистрируемой на фототермопластическом материале с использованием импульсного рубинового лазера, от времени экспозиции. Показано, что фототермопластические материалы на основе смеси селенидов и халькогенидов мышьяка не теряют чувствительности при изменении длительности экспозиции от десятков до единиц наносекунд и могут быть успешно использованы в качестве регистрирующей среды в голографических исследованиях быстротекущих процессов.

Эффективность голографической регистрации быстротекущих процессов излучением импульсных лазеров в значительной степени определяется спектральными и временными параметрами используемых лазеров и их согласованием с характеристиками регистрирующих сред. Известно, что для галогенидосеребряных сред наиболее эффективным является процесс записи при экспонировании серией импульсов общей длительностью от 10 до 300 мкс (параметры записи близки к получаемым в непрерывном режиме экспонирования). Переход к экспозиции наносекундного диапазона сопровождается потерей светочувствительности [1].

Измерения электрофотографической чувствительности отдельных материалов, применяемых в фототермопластическом (ФТП) процессе записи, показали, что эта величина не уменьшается в области коротких времен экспозиции, а в некоторых случаях даже возрастает [2—5]. В работе [2] исследования выполнены в слоях ПВК : Se, ПВК : ТНФ при экспозициях $1,5 \cdot 10^{-8}$ и 15 с. Для слоев ПВК : ТНФ обнаружено увеличение светочувствительности при наносекундных выдержках. Сокращение времени экспонирования вплоть до 10^{-11} — 10^{-10} с не приводит к потере чувствительности [3, 4]. Так, в работе [3] обнаружено возрастание светочувствительности при выдержках от 10^{-6} до 10^{-10} с (слой на основе поли—N—винилкарбазола, сенсibilизированного к излучению в видимой области спектра формированием комплексов с переносом заряда). Для слоев поли—N—винилкарбазола, инжекционно сенсibilизированного подслоем селенида кадмия, чувствительность практически не зависит от выдержки. В [4] увеличение светочувствительности обнаружено для ПЭПК, сенсibilизированного 2, 4, 7-ТНФ (длительность экспонирования $3 \cdot 10^{-11}$ с). В отличие от [2—4] в работе [5] результат оценивался по высоте канавки, полученной при сканировании ФТП-материала сфокусированным пучком лазера. Было обнаружено нарушение закона взаимозаместимости в диапазоне экспонирования от 580 до 70 нс. На основании статистического

* Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.

анализа полученных результатов сделан вывод, что чувствительность исследуемого ФТП-материала имеет тенденцию к увеличению.

Следует отметить, что исследование процесса записи на ФТП-материалах короткими световыми импульсами представляет интерес при разработке новых типов ФТП-материалов и в связи со все более широким применением их в импульсной голографии и голографической интерферометрии быстротекающих процессов. Сокращение времени экспонирования значительно расширяет круг проводимых исследований.

Возможность и перспективность использования ФТП-материалов на базе неорганических полупроводников в импульсной голографии и голографической интерферометрии показаны в [6, 7]. Длительность экспозиции составляла ~50 нс. В настоящей работе приведены результаты исследования процесса записи при более коротких экспозициях.

Исследование зависимости дифракционной эффективности регистрируемой на ФТП-материале голограммы от времени экспозиции проводилось с использованием импульсного излучения рубиновых лазеров. Регистрирующим материалом служил ленточный (шириной 35 мм) носитель типа ФТПН-Л. Состав ФТПН-Л: $As_{3,8}Se_{3,8}S_3Sb_{0,2}$ толщиной фотополупроводникового слоя S 1,8 мкм и термопластического слоя из диализифталата толщиной 0,5 мкм.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источниками излучения при записи служили два рубиновых лазера $1, 1'$ с пассивной модуляцией добротности. Оптические схемы обоих лазеров одинаковые. В лазере используется полуконцентрический резонатор, в котором различие в величине потерь для основного типа колебаний и колебаний более высоких порядков по сравнению с другими видами резонаторов выражено очень резко [8], что дает возможность осуществить селекцию основного поперечного колебания с очень малыми дополнительными потерями. Сферическое «глухое» зеркало резонатора имело радиус кривизны ~1 м. В качестве выходного отражателя применялась плоскопараллельная кварцевая пластина толщиной ~10 мм. Активным элементом лазера являлся рубиновый стержень РЛС $8 \times 120/180$,

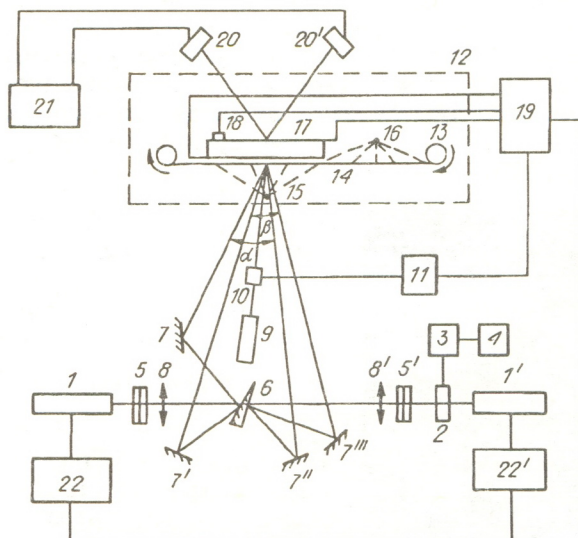


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:

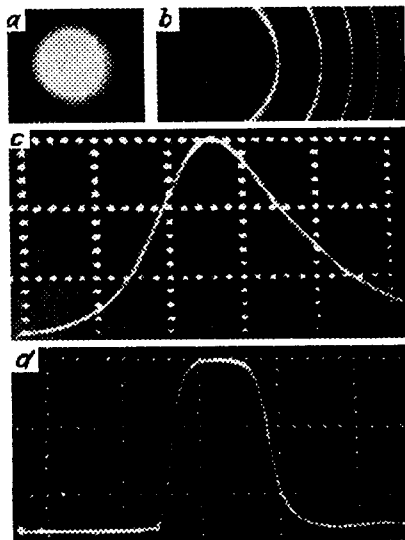
$1, 1'$ — рубиновый лазер; 2 — электрооптический затвор; 3 — разрядник с формирующей линией; 4 — высоковольтный источник питания; 5, 5' — нейтральные светофильтры; 6 — светоделиватель; 7, 7', 7'', 7''' — зеркала; 8, 8' — расширяющие линзы; 9 — зондирующий лазер; 10 — электромеханический затвор; 11 — линия задержки; 12 — ФТП-регистратор; 13 — лентопротяжный механизм; 14 — ФТП-материал; 15 — коронатор; 16 — электриватор; 17 — нагреватель; 18 — датчик температуры; 19 — блок управления ФТП-записью; 20, 20' — фотодиоды; 21 — осциллограф; 22, 22' — блоки питания лазера

по своей оптической однородности удовлетворяющий требованию пригодности для применения в голографических лазерах (0,5 интерференционной полосы на 1 мм [9]). Модуляция добротности резонатора осуществлялась пассивным способом на основе использования просветляющего фильтра, представляющего собой разъюстированную кювету толщиной 5 мм с раствором красителя 1044 в этаноле, которая располагалась между рубином и сферическим зеркалом и имела начальное пропускание 60 %.

В описанном резонаторе при расстоянии между зеркалами, соответствующем приблизительно полуконцентрической конфигурации резонатора, имел место одномодовый режим генерации низшего поперечного типа TEM_{00} . Однако он был очень критичен к величине накачки активного элемента и обеспечивался с вероятностью 80 % только при ее уровне, близком к пороговому. Стабильная селекция основной поперечной TEM_{00} -моды резонатора наблюдалась при введении в него дополнительной диафрагмы диаметром $\sim 1,5$ мм, которая располагалась между рубином и выходным отражателем. При этом резко уменьшалась критичность одномодовой генерации в отношении выбора оптической длины резонатора и уровня накачки лазера. Типичная картина структуры поля на выходе лазера приведена на рис. 2, *a*. Как видно, она соответствует излучению только основного поперечного типа колебаний.

В рассматриваемом лазере селективные свойства резонатора обеспечивались за счет использования в качестве выходного зеркала плоскопараллельной пластины и ее юстировки с интерферометрической точностью относительно нескошенного торца рубинового элемента. Такой способ селекции оказался вполне достаточным для получения генерации на одной продольной моде резонатора, о чем свидетельствует одна линия в спектре излучения (рис. 2, *b*) и гладкая форма огибающей импульса (рис. 2, *c*). При полученной одночастотной генерации энергия импульса на выходе лазера с указанными выше параметрами $8 \cdot 10^{-3}$ Дж. Его длительность, оцениваемая по полуширине, при оптической длине резонатора 80 см составляла ~ 50 нс (см. рис. 2, *c*).

Сокращение длительности импульса проводилось с помощью электрооптической системы (см. рис. 1), расположенной на выходе одного из лазеров. Система включала в себя электрооптический элемент на основе эффекта Поккельса, изготовленный из кристалла KDP Z-среза, поляризационное зеркало, имеющее при угле падения 57° коэффициенты отражения и пропускания для двух взаимно ортогональных поляризаций соответственно 99,5 и 93 %, искровой разрядник $З$ с формирующей линией в виде отрезков коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом. В схеме использован газонаполненный разрядник высокого давления с временем переключения ≤ 1 нс.



На рис. 2, *d* представлена типичная осциллограмма сформированного с помощью рассмотренной системы светового импульса. Как видно, его форма близка к прямоугольной, а длительность уменьшилась до ~ 6 нс. Максимальная энергия в импульсе достигается естественно в случае его «вырезания» в области максимума исходного гауссова импульса (см. рис. 2, *c*), что осуществляется подбором соответствующего коэффициента пропускания нейтральных светофильтров, расположенных

Рис. 2. Картина поля (*a*), интерферограмма (*b*) и осциллограммы (*c*, *d*) лазерной моноимпульсной генерации.

Дисперсия интерферометра 3 ПГц (*b*), длительность развертки 20 (*c*) и 5 нс/см (*d*)

на выходе разрядника. Энергия получаемого импульса $1,1 \cdot 10^{-3}$ Дж. Энергия генерации контролировалась на выходе лазеров измерителями энергии ИМО-2Н и выравнивалась с помощью нейтральных светофильтров. Формирующие линзы расширяли пучок до размеров кадра записи. Светоделитель совместно с зеркалами обеспечивал схему записи дифракционных решеток по обычной двухлучевой схеме. При необходимости оптическая схема записи перестраивалась для регистрации диффузно отражающих объектов. Энергия излучения лазеров после нейтральных светофильтров ~ 1 мДж. Угол схождения интерферирующих пучков 30° . По изменению интенсивности в первых порядках дифракции исследовался процесс рельефообразования. Для этого использовался He—Ne-лазер, фотодиоды ФД-24К и двухлучевой запоминающий осциллограф С8-14.

Сравнение голографической чувствительности ФТП-материала при изменении длительности экспозиции от 50 до 6 нс осуществлялось как в статике (по конечному значению дифракционной эффективности), так и в динамике (при исследовании процесса образования фазового рельефа на поверхности ФТП-материала). Во втором случае использовался метод зондирования ФТП-материала световым сигналом (см. лазер 9 на рис. 1). Для сведения к минимуму влияния зондирующего излучения ($\lambda = 0,633$ мкм, $P = 1$ мВт) на фоточувствительный слой излучение лазера с помощью электромеханического затвора включалось с определенной задержкой t_{33} по отношению к началу рельефообразования. При образовании рельефа доминирующим фактором является процесс усиления за счет перераспределения зарядов на начальных деформациях [10]. С целью исключения зависимости временных характеристик и величины дифракционной эффективности от пространственной частоты записи [11, 12] регистрация голограмм осуществлялась на одинаковых пространственных частотах (см. $\angle\alpha = \angle\beta$, рис. 1).

Соблюдение всех вышеперечисленных условий позволило провести сравнительный анализ дифракционных эффективностей и особенностей рельефообразования при изменении длительности экспозиции непосредственно по полученным осциллограммам.

Задержка включения зондирующего излучения отсчитывалась от момента времени включения экспозиции. Временная диаграмма процесса записи представлена на рис. 3, а.

Установлено, что зондирующее излучение практически не влияет на процесс рельефообразования, если оно включено в момент времени, когда деформации достигают некоторой величины. Так, при $t_{33} = 0,1$ с $\eta = 0,25\eta_{\max}$, где η_{\max} — величина дифракционной эффективности, измеренной в статическом режиме, при $t_{33} = 0,2$ с $\eta = 0,5\eta_{\max}$ и, наконец, $\eta = \eta_{\max}$ при $t_{33} = 1$ с.

Регистрация голограмм импульсами длительностью 6 и 50 нс осуществлялась на различных кадрах.

Результаты исследований показали, что при сокращении времени экспонирования с 50 до 6 нс чувствительность используемого ФТП-материала не теряется. Величина дифракционной эффективности при экспозиции $1,4 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² $\sim 3\%$. При этом не установлено существенных отличий и в кинетике рельефообразования. На рис. 4, а представлена типичная осциллограмма изменения интенсивности в первом порядке дифракции голограммы, характеризующая процесс рельефообразования (корень квадратный из дифракционной эффективности с точностью до 5% характеризует глубину рельефа [13]).

В работе исследовалась возможность усиления деформаций за счет повторной зарядки ФТП-материала. На рис. 4, б—д представлены осциллограммы изменения интенсивности в первом порядке дифракции голограммы для двух длительностей импульса проявления: 225 (б) и 380 мс (с, д). Повторное включение «короны» осуществлялось через 4 (б, д) и 6 с (с) после включения экспозиции. При этом возрастание величины дифракционной эффективности за счет повторной зарядки не превышало ее значения, полученного при оптимальных режимах записи (см. для сравнения рис. 4, б и рис. 4, с, д).

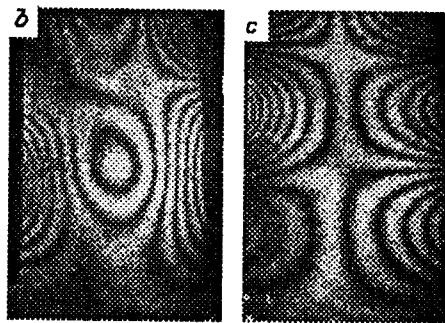
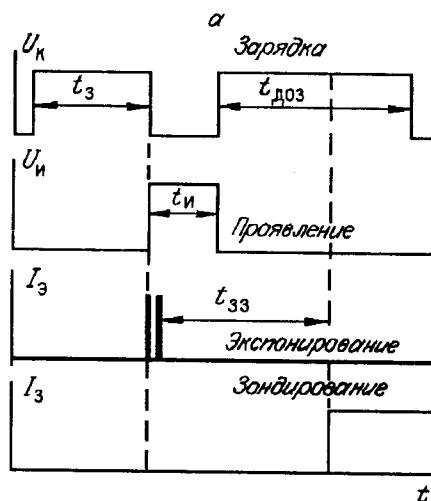


Рис. 3. Временная диаграмма процесса ФТП-записи (а) и двухэкспозиционные голографические интерферограммы лопатки газотурбинного двигателя: частота возбуждения 1125 (b) и 9950 Гц (с)

Результаты исследований использовались при регистрации на ФТП-материале двухэкспозиционных голографических интерферограмм. В частности, на рис. 3, b, c представлены голографические интерферограммы лопатки газотурбинного двигателя размером 40×60 мм, возбуждаемой на частотах 1125 и 9950 Гц. Интерферограмма (см. рис. 3, b) получена за две вспышки лазера с временным интервалом между экспозициями ~ 30 с. Время экспонирования 6 нс. В другом эксперименте интерферограмма (см. рис. 3, c) получена в режиме двухимпульсной генерации рубинового лазера с временным интервалом между экспозициями ~ 150 мкс. Длительность экспозиции ~ 50 нс. В этом случае режимы записи и временная диаграмма процесса записи соответствуют рис. 3, a, 4, a. При регистрации двухэкспозиционных голографических интерферограмм за две вспышки лазера с временным интервалом между экспозициями ~ 30 с использовалось два цикла зарядки [14]. Длительность

первой зарядки выбиралась с условием, чтобы деформации первой голограммы не проявлялись, а длительность второй зарядки и дозарядки — с условием получения максимальной дифракционной эффективности.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают, что ФТП-материалы на основе смеси селенидов и халькогенидов мышьяка не теряют чувствительности при изменении длительности экспозиции от десятков до единиц наносекунд и могут быть использованы в качестве регист-

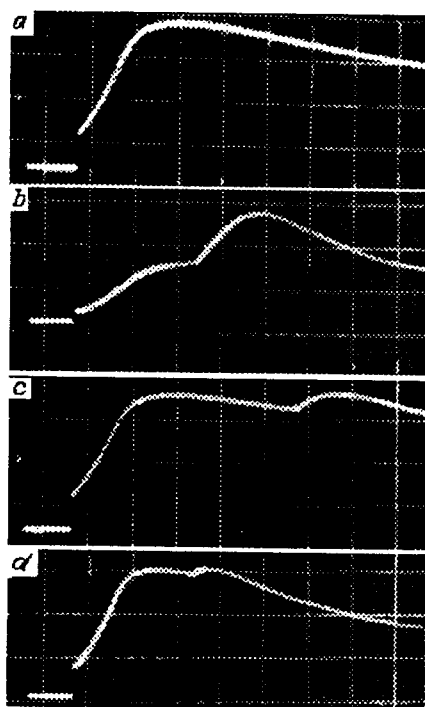


Рис. 4. Осциллограммы, характеризующие изменение интенсивности в первом порядке дифракции голограммы на этапе рельефообразования (а) и при повторном включении «короны» (b—d):

$U_k = 12$ кВ; $t_3 = t_{доз} = 1,5$ с; температура поднагрева $T_0 = 333$ К; $U_{и} = 175$ В, $t_{и} = 380$ (a, c, d), 225 мс (b); $t_3 = 6$ нс. Развертка 1 с/дел. Начало развертки соответствует моменту включения экспозиции. Повторное включение «короны» ($t_k = 1,5$ с) осуществляется через 4 (b, d) и 6 с (c) после включения экспозиции

рирующей среды в голографических исследованиях быстротекущих процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворзобова Н. Д., Семенова Н. Н. Об эффективности голографической записи излучением с различными спектральными и временными параметрами // Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстротекущих процессов: Тез. докл. 16 науч.-техн. конф. М.: ВНИИОФИ, 1993.
2. Черкасов Ю. А., Крюков В. В., Лопатко А. Д. и др. Светочувствительность электрофотографических молекулярных регистрирующих сред при наносекундных выдержках // ЖНиПФиК. 1980. 25, вып. 2.
3. Гренишин С. Г., Черкасов Ю. А. Исследование фототермопластического процесса для высокоскоростной фотографии в реальном масштабе времени // Труды 14 Междунар. конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике. М.: АПН, 1980.
4. Гайдялис В., Еленскис Л., Каладе Ю. и др. Особенности фоторазрядки органических электрофотографических слоев при освещении короткими импульсами // Литовский физический сборник. Вильнюс: Макелас, 1984. 24, № 4.
5. Бородкина М. С., Костюк А. В., Полупан А. Н. и др. Запись информации на фототермопластическом носителе сканирующим лазерным лучом // Труды 14 Междунар. конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике. М.: АПН, 1980.
6. Галабурда О. В., Окушко В. А., Тюшкевич Б. Н. Голографический интерферометр на базе двухимпульсного рубинового лазера с фототермопластической регистрацией // Автометрия. 1991. № 1.
7. Галабурда О. В., Окушко В. А., Тюшкевич Б. Н. Динамика двухэкспозиционной записи на фототермопластический носитель излучением импульсного лазера // Там же.
8. Микаэлян А. Л., Тер-Микаэлян М. Л., Турков Ю. Г. Оптические генераторы на твердом теле. М.: Сов. радио, 1967.
9. Оптическая голография /Под ред. В. М. Гинзбург. М.: Сов. радио, 1978.
10. Находкин Н. Г., Новоселец М. К. Проявление ТП-записи и электрокапиллярный эффект. III. Происхождение «морозной» деформации // ЖНиПФиК. 1977. 22, вып. 5.
11. Димов Ф. И., Музалевский А. А., Панасюк Л. М. Влияние условий записи на эффективность дифракционных решеток, регистрируемых на ФТПН // Бессеребряные и необычные фотографические процессы. Секция II. Фототермопластика: Тез. докл. III Всесоюз. конф. Вильнюс: Вильнюсский госуниверситет, 1980.
12. Баженов М. Ю., Кувшинский Н. Г., Находкин Н. Г. Проявление скрытого изображения на термопластических средах при высоких скоростях нарастания температуры // Фундаментальные основы оптической памяти и среды. Киев: Віща школа, 1979. Вып. 10.
13. Urbach J. G., Meer R. W. Properties and limitations of hologram recording materials // Appl. Opt. 1969. 8, N 11. P. 2269.
14. А. с. 1762295 СССР. Способ регистрации двухэкспозиционной голографической интерферограммы /Б. Н. Тюшкевич, В. А. Окушко. Оpubл. 1992, Бюл. № 34.

Поступила в редакцию 12 июля 1994 г.