

## Лазерный метод проявления и микроструктура рельефно-фазовых голограмм на фототермопластических материалах

С. Н. ЖДАНОВИЧ, А. А. КОВАЛЕВ

При использовании фототермопластических (ФТП) материалов в системах неразрушающего контроля и технической диагностики важна оперативность записи оптической информации. Эта способность определяется физическим механизмом записи, для которого характерно отсутствие химических процессов обработки. Однако скорость теплового проявления скрытого электростатического изображения (СЭИ) и результирующие параметры регистрируемых голограмм зависят от выбранного метода и средства теплового воздействия.

Режимы оптимального проявления записи в широком диапазоне пространственных частот разработаны, в основном, для ФТП носителей на жесткой основе [1]. При этом для получения высокой голографической чувствительности по визуализированному изображению  $S_{дэ=1\%}$  используют импульсы проявления миллисекундной длительности, обеспечивающие высокие ( $\geq 10^4$  °C/c) темпы нагрева. В случае ленточных ФТП носителей применение резистивных нагревателей с таким темпом нагрева приводит к короблению гибкой основы носителя. Кроме того, выбор способа записи и метода проявления зависит от типа используемого ФТП материала и его удельного электрического сопротивления. Для материалов с малым удельным электрическим сопротивлением, как правило, используют одновременный способ записи. Этот способ предусматривает одновременную зарядку и экспонирование предварительно нагретого до температуры записи носителя. Оба процесса проводят одновременно, чтобы обеспечить сохраняемость СЭИ при записи. При этом материал термопластического слоя находится в жестких условиях одновременного воздействия электростатических зарядов и температуры. Это приводит к усталости материала и развитию нерегулярных деформаций, являющихся источником шума.

Необходима разработка специальных методов проявления, обеспечивающих эффективное формирование рельефно-фазовых голограмм в условиях нежесткого воздействия указанных выше факторов. Нами предложен [2] бесконтактный лазерный метод проявления, основанный на использовании теплового воздействия инфракрасного (ИК) излучения ( $\lambda=1,064$  мкм) импульсного твердотельного Nd:YAG-лазера с ламповой накачкой. Предложено использовать квазистационарный режим генерации лазера, позволяющий получать “гладкие” импульсы излучения. Это необходимо для устранения характерной для твердотельных лазеров “пиковой” структуры излучения и обеспечение высокой равномерности пространственного распределения излучения в поперечном сечении пучка.

Задача состоит в том, чтобы при воздействии ИК лазерного излучения на ФТП носитель обеспечить его нагрев и изменение реологического состояния и в то же время сохранить СЭИ.

Эффективность регистрации рельефно-фазовой голограммы зависит от соотношения реологических и электрофизических параметров активных слоев ФТП носителя на стадии проявления и его изменения в процессе нагрева. Оно определяется законом изменения температуры, темпом нагрева, временем нахождения рабочего слоя в вязкотекучем состоянии. Способность к деформированию у регистрирующего верхнего слоя появляется при снижении вязкости  $\mu$  термопластического материала. Процесс нагрева сопровождается наряду со снижением вязкости термической активацией электропроводности  $\rho_v$ . В результате проводимость структуры в области вязкотекучего состояния термопластического слоя воз растает. Это вызывает понижение зарядового контраста в СЭИ и уменьшение потенциала поверхности. Вязкое движение и изменение СЭИ характеризуются, соответственно, временами течения  $\tau_0$  и релаксации потенциала  $\tau_v$ . Они определяются выражениями

$$\tau_0 [T(t)] = 2\mu [T(t)] \cdot d / \alpha \quad \text{и} \quad \tau_v [T(t)] = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \rho_v [T(t)],$$

где  $d$  - толщина слоя,  $\alpha$  - коэффициент поверхностного натяжения,  $T(t)$  - изменение температуры во времени. Релаксация потенциала за время формирования рельефа тем меньше, чем больше  $\tau_0$ . Рост объемной проводимости ведет к уменьшению действующих на термопластический слой сил, а поверхностной - к снижению разрешающей способности носителя. Одновременно при деформировании слоя происходит перераспределение зарядов, увлекаемых движущимися участками термопластического слоя. Наши исследования показали, что это приводит к появлению дополнительной модуляции зарядов, влекущей за собой увеличение электростатических сил между зарядами, усилению скрытого изображения и увеличению дифракционной эффективности (ДЭ) голограммы.

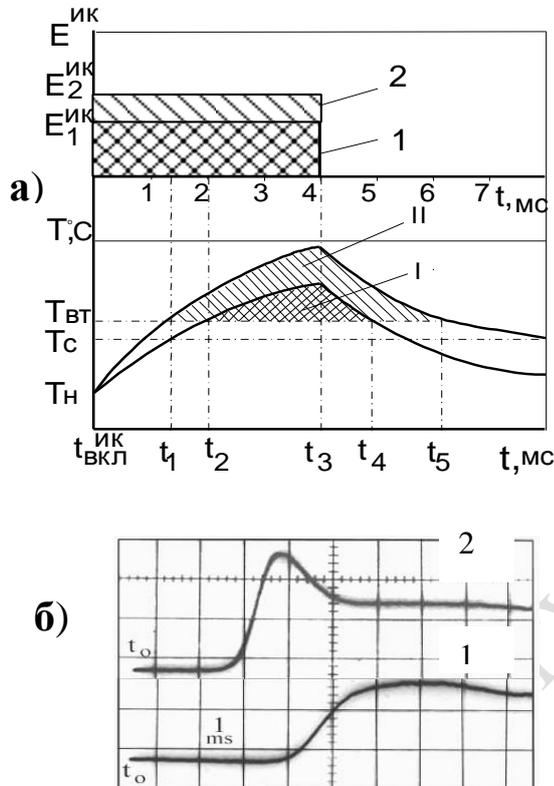


Рис.1. Изменения реологического состояния термопластического слоя (а) и дифракционной эффективности голограмм (б) при неизотермическом проявлении лазерными импульсами ИК излучения различной энергии  $E_1^{\text{ИК}}$  и  $E_2^{\text{ИК}}$ :

а - области I и II вязкотекучего состояния термопластического слоя; б- динамика формирования 1, 2 дифракционной эффективности голограмм в процессе проявления при различных плотностях энергии ИК лазерного излучения в области проявления ( $\text{Дж}/\text{см}^2$ ): 1- 0,8; 2- 1,5.

На рисунке 1,а представлена диаграмма, иллюстрирующая зависимость температуры от времени в неизотермическом режиме для различных значений энергии лазерных импульсов ( $E_2^{\text{ИК}} > E_1^{\text{ИК}}$ ) при заданной ( $\tau_{\text{и}} = 4$  мс) длительности импульса. Выделены области I и II вязкотекучего состояния деформируемого термопластического слоя, характерные для различных температурных кривых  $T_1(t)$  и  $T_2(t)$ . Максимум температуры достигается к моменту времени  $t_3$  окончания импульса. Для каждой области I и II существует отрезок времени, в течение которого текущее значение  $T_{1,2}(t)$  температуры превышает уровень  $T_{\text{вт}}$ , соответствующий вязкотекучему состоянию т.е.  $T_{1,2}(t) > T_{\text{вт}}$ . Длительность этого отрезка времени зависит от энергии  $E_{1,2}^{\text{ИК}}$  лазерного импульса и возрастает от значений  $t_4 - t_2$  для  $E_1^{\text{ИК}}$  до  $t_5 - t_1$  для  $E_2^{\text{ИК}}$ . В этих областях созданы условия для формирования рельефно-фазовых голограмм при различных энергиях проявления.

С ростом энергии лазерного импульса время достижения вязкотекучего состояния сокращается от значений  $t_2$  для  $E_1^{\text{ИК}}$  до  $t_1$  для  $E_2^{\text{ИК}}$ . Крутизна фронта кривой на отрезке времени  $\Delta t = t_3 - t_{\text{вкл}}^{\text{ИК}}$  характеризует темп нагрева ( $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) во время действия лазерного излучения. В зависимости от уровня  $T_{\text{н}}$  и темпа нагрева время пребывания деформируемого материала в вязкотекучем состоянии изменяется. Для больших значений энергии излучения оно возрастает. Однако одновременно активизируются процессы термической активации электропроводности, снижающие пороговый потенциал зарядов на поверхности. При энергии  $E_1^{\text{ИК}}$  ре-

лаксация продолжается в течение отрезка времени  $t_4-t_3$  после прекращения облучения. С ростом энергии импульса это время возрастает до  $t_5-t_3$  для  $E_2^{\text{ИК}}$ . Поэтому соотношения между силами СЭИ, стремящимися деформировать верхний слой, и вязкоупругими силами материала, препятствующими этому, на отрезках времени  $t_1-t_3$  и  $t_5-t_3$  качественно отличаются.

Энергия импульса и темп нагрева должны быть такими, чтобы обеспечить благоприятное для развития деформаций реологическое состояние материала термопластического слоя и в тоже время не допустить регрессии СЭИ. Эти параметры определяют взаимодействие сил на этапе формирования рельефно-фазовой голограммы. Сложившееся к моментам времени  $t_4$  и  $t_5$  соотношение сил определяет результирующее значение ДЭ рельефно-фазовой голограммы (рисунок 1,б).

Оптимальная плотность энергии проявления при выбранном уровне  $T_n$  зависит от сил СЭИ, которое формируется на этапах зарядки в поле коронного разряда ( $U_{\text{кор.}}$ ,  $\tau_{\text{кор.}}$ ) и экспонирования.

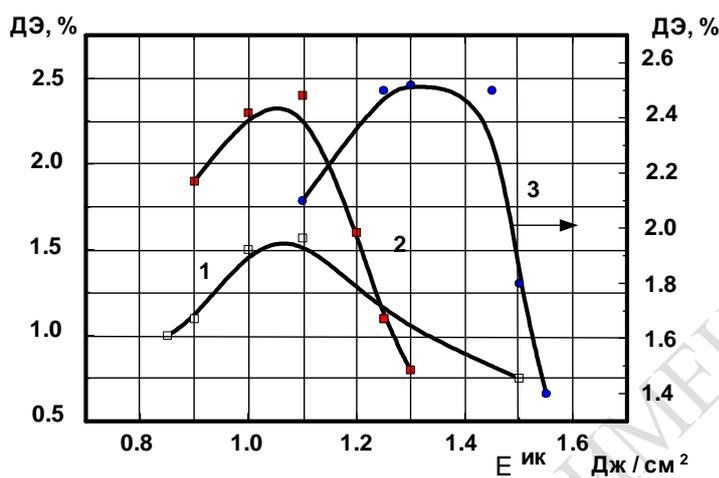


Рис. 2. Зависимость результирующих значений ДЭ голограмм от плотности энергии ИК лазерного излучения при различных экспозициях и значениях  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). Экспозиция: ( $\text{Дж/см}^2$ ): 1 -  $4,5 \cdot 10^{-4}$ ; 2 -  $5,7 \cdot 10^{-4}$ ; 3 -  $6,3 \cdot 10^{-4}$ ;  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ): 1 - 10; 2 - 30; 3 - 20.

На рисунке 2 представлена зависимость результирующих значений ДЭ голограмм от плотности энергии ИК лазерного излучения при фиксированных параметрах зарядки поверхности носителя ( $U_{\text{кор.}} = 7 \text{ кВ}$ ,  $\tau_{\text{кор.}} = 350 \text{ мс}$ ,  $\tau_{\text{зад.}} = 350-400 \text{ мс}$ ), различных экспозициях и значениях  $\Delta t$ . Видно, что ДЭ изменяется по кривой с максимумом, величина и положение которого определяются экспозицией и величиной  $\Delta t$ . В зависимости от величины экспозиции и  $\Delta t$  максимальные значения ДЭ голограмм достигаются при различных плотностях энергии ИК лазерного излучения. Для получения определенных значений ДЭ (например,  $\sim 3\%$ , кривая 3) запись необходимо осуществлять при экспозиции  $6,3 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/см}^2$  и  $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$  в диапазоне плотностей энергии ИК излучения  $1,2-1,45 \text{ Дж/см}^2$ . Эксперименты показали, что качественная запись возможна при задержке включения импульса проявления, большей длительности процесса зарядки. Это означает, что процессы зарядки и проявления можно разделить во времени и осуществлять последовательно. Тем самым исключается одновременное воздействие на носитель зарядов и высокой температуры ( $T_{\text{зап.}}$ ), как при одновременном способе записи. При этом дополнительная зарядка после проявления не требуется.

У ФТП материалов после проявления записи информация представляется в виде рельефа поверхности верхнего термопластического слоя. От микроструктуры рельефа этого слоя зависят параметры восстанавливаемого голограммой изображения. При этом степень развития регулярных деформаций определяет величину ДЭ рельефно-фазовой голограммы, а соотношение регулярных и хаотических деформаций в области записи - отношение сигнал-шум (с/ш) голограммы.

Исследования микроструктуры поверхности были проведены на растровом электронном микроскопе BS-350 фирмы TESLA. Они позволяют определить влияние режимов проявления на параметры результирующего изображения.

На рисунке 3 представлены фотографии снимков поверхности рельефно-фазовой голограммы, полученные при различных углах наблюдения и режимах сканирования. На ФТП носитель по известной двухлучевой схеме записывались простые интерференционные решётки. Пространственная частота решеток устанавливалась углом схождения пучков и составляла 450 - 700 мм<sup>-1</sup>. На снимках видны направления регулярных деформаций, соответствующие структуре фазовой решетки. Коэффициент увеличения изображений, представленных на рисунке 3, составляет  $\sim 10^4$ . Видно, что визуализированное изображение рельефно-фазовых голограмм имеет сложную микроструктуру, обусловленную существованием двух видов деформаций.

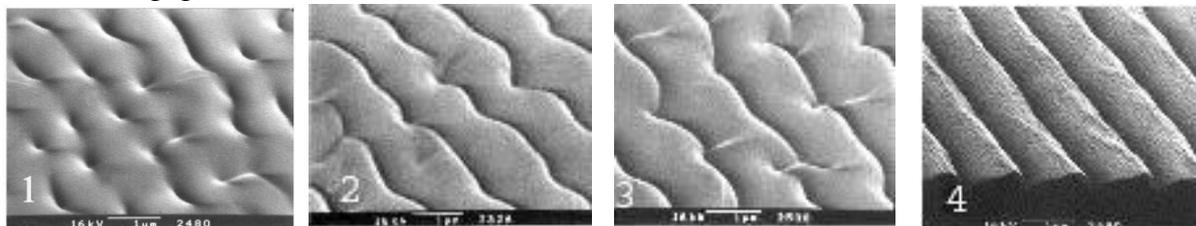


Рис. 3. Снимки микроструктуры поверхности термопластического слоя при проявлении рельефно-фазовых голограмм лазерным методом

Голограммы, имеющие малую ( $\sim 0,5\%$ ) ДЭ (фото 1) характеризуются отсутствием ярко выраженных направлений регулярных деформаций. В структуре выражены локальные продавливания поверхности. Они ориентированы вдоль полос проецируемого интерференционного поля. Такая структура рельефа характерна для режимов записи, когда экспонирования ниже оптимального значения. Снимки поверхности рельефно-фазовых голограмм с ДЭ, равной 2-3% представлены на фото 2, 3, 4. Видно, что микроструктура рельефа характеризуется достаточно развитыми регулярными деформациями. В то же время их структура может существенно различаться (фото 2,3). Исследования показали, что при лазерном методе проявления при оптимизации параметров может быть получено хорошее качество записи. На фото 4 представлена голограмма, ДЭ которой равна 3%, отношение с/ш равно 20:1.

Лазерный метод проявления рельефно-фазовых голограмм на ФТП носителях обладает большими потенциальными возможностями. Они основаны на использовании излучения с различной поляризацией и управлении параметрами излучения в процессе проявления. Увеличить поглощение лазерного излучения при различных углах падения на материал и повысить эффективность воздействия можно путем использования излучения с осесимметричной поляризацией, в частности, радиально поляризованного излучения.

**Abstract.** Parameters of the laser development of the latent image are optimized, their influence on a microstructure of the photothermoplastic holograms is investigated.

### Литература

1. Новоселец М.К., Саркисов С.С. Оптимальное управление динамическими процессами в регистрирующих средах // Квантовая электроника (Киев).-1993.-№ 44.-С. 3-20.
2. Ковалев А.А., Жданович С.Н. Лазерный метод проявления рельефно-фазовых голограмм на фототермопластических материалах для систем оперативной диагностики // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Матер. 16 научн.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. Судак, 24-30 мая 2004 г./ Под ред. В.Н. Азарова. – М.: МГИЭМ, 2004. – С.252-253.