

УДК 772.932.45 : 681.787 : 778.38

М. Н. Нижник, В. А. Окушко*(Минск, Беларусь)***ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ УСРЕДНЕННЫХ
ПО ВРЕМЕНИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ
СЕРИЕЙ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИКРО-
И НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Проведены экспериментальные исследования фототермопластической регистрации усредненных по времени голографических интерферограмм пугами импульсов микро- и наносекундной длительности с использованием импульсного твердотельного лазера на рубине и лазера на алюминате иттрия с удвоением частоты. Установлено, что при регистрации голографических интерферограмм серий хаотических пиков свободной генерации их хаотичность по интенсивности практически не оказывает влияния на распределение яркости в восстановленном изображении интерферограммы, если длительность генерации превышает несколько периодов колебаний объекта. Диапазон исследуемых амплитуд вибрирующих объектов ограничен сверху количеством экспонирующих импульсов на периоде колебаний. При определении указанного диапазона проведен расчет соответствующей характеристической функции для случая эквидистантности во времени импульсов пуга.

При голографическом анализе вибраций методом усреднения по времени наиболее широкое распространение получили непрерывные лазеры. В некоторых случаях целесообразно использовать для этих целей импульсные лазеры. В работе [1] рубиновый лазер, работающий в свободном режиме генерации, использовался при исследовании высокочастотных форм колебаний лопаток турбинных двигателей. Эффективная длительность свободного режима генерации импульсных твердотельных лазеров, состоящая из последовательности импульсов (как хаотических, так и регулярных), обеспечивает регистрацию усредненных по времени интерферограмм в довольно широкой области частот, начиная от единиц килогерц. При практическом использовании указанных режимов генерации необходимо учитывать особенности, связанные с длительностью генерации относительно периода колебаний объекта, хаотичностью отдельных пиков по интенсивности и во времени, ограниченным числом импульсов на периоде.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований фототермопластической (ФТП) регистрации усредненных по времени голографических интерферограмм излучением рубинового лазера, работающего в режиме хаотических пульсаций, и излучением второй гармоники лазера на алюминате иттрия с пассивной модуляцией добротности, обеспечи-

вающего генерацию последовательности гигантских импульсов наносекундной длительности. Использование последнего режима генерации представляет практический интерес с точки зрения спектральной чувствительности ФТП-материалов в видимой области спектра (чувствительность в сине-зеленой области спектра более чем на порядок превосходит чувствительность в красной) [2]. Кроме того, как показали проведенные ранее исследования, при сокращении времени экспонирования чувствительность ФТП-материалов не теряется [3], что выгодно отличает их от галогенидосеребряных материалов.

Схема экспериментальной установки включала в себя рубиновый лазер, работающий в свободном режиме генерации, лазер на алюминате иттрия с пассивной модуляцией добротности и удвоением частоты, систему ФТП-регистрации. Схема голографирования представляла собой обычную внеосевую схему записи Лейта – Упатниекса. В качестве модулятора были использованы кристаллы LiF. Резонаторы лазеров обеспечивали генерацию излучения на основной поперечной моде. Для удвоения частоты применялся кристалл KDP. Регистрирующим материалом служили ленточные шириной 35 мм носители на основе органического полупроводника (ПЭПК, сенсibilизированный тринитрофлуоренонадецианометиленом с толщиной слоя 0,5 мкм и с инжекционным подслоем из сополимера метакриловой кислоты с метакрилатом толщиной 0,3–0,8 мкм) для красной области спектра и на основе смеси сульфидов и селенидов мышьяка ($As_{3,8}Se_3S_3Sb_{0,2}$ с толщиной фотополупроводникового слоя 1,8 мкм и термопластичного слоя из диализифталата толщиной 0,5 мкм) для сине-зеленой области спектра. Устройство ФТП-записи описано в [4]. Нагретый до температуры, меньшей температуры проявления, ФТП-материал заряжался в поле коронного разряда и с определенной задержкой осуществлялось экспонирование и импульсное тепловое проявление. Наряду с указанным режимом, в работе использовался также изотермический режим теплового проявления. Длительности цугов импульсов подбирались таким образом, чтобы эффективная длительность экспонирования равнялась либо была кратной периоду колебаний исследуемых объектов, которыми служили лопатки газотурбинных двигателей. Управление длительностью генерации осуществлялось уровнем накачки активных элементов и выбором начального коэффициента пропускания пассивного фильтра. Для рубинового лазера длительность экспонирования варьировалась в пределах 100–700 мкс. Энергия излучения при этом изменялась от единиц до 35 мДж. Оптическая схема лазера на алюминате иттрия обеспечивала генерацию цуга импульсов (свыше 40) с эффективной длительностью до 400 мкс. Длительность и энергия каждого из импульсов цуга составляли 60–80 нс и ~0,5 мДж (вторая гармоника) соответственно.

Оптимизация ФТП-режимов записи осуществлялась по контрасту и дифракционной эффективности регистрируемых интерферограмм. Запись проводилась в два этапа. На первом этапе записывалась голографическая интерферограмма с максимальным контрастом полос, для чего использовалась методика, описанная в [5], которая обеспечивала в процессе рельефообразования измерение интенсивностей в восстановленном действительном изображении интерферограммы на интерференционных полосах с максимальной и минимальной яркостью, либо изотермический режим теплового проявления с зарядкой ФТП-материала при пониженных напряжениях на коронирующем электроде (в процессе записи поддерживался потенциал на поверхности ФТП-материала ниже критического, при котором не проявляются

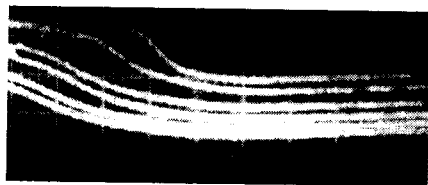


Рис. 1. Осциллограммы, характеризующие изменение интенсивности в первом порядке дифракции интерферограммы при рельефообразовании: верхняя осциллограмма – в процессе записи, последующие – при проведении цикла усиления. Режим проявления изотермический. Развертка 100 мс/дел.

хаотические деформации как один из источников шума). На втором этапе осуществлялось усиление по дифракционной эффективности. Для этого ФТП-материал подвергался повторной зарядке с более высоким потенциалом на коронирующем электроде. Несмотря на значительное увеличение времени регистрации (до 6–8 с), такой режим записи не теряет практического смысла (в особенности при использовании лазеров непрерывного действия с большими временами экспонирования). Представленные на рис. 1 осциллограммы характеризуют изменение интенсивности восстановленного изображения интерферограммы в процессе образования фазового рельефа при записи и последующих циклах усиления.

При идентификации формы полос проводился сравнительный анализ интерферограмм, зарегистрированных излучением цугов импульсов микро- и наносекундной длительности, и интерферограмм, полученных излучением непрерывных лазеров (гелий-неонового с $\lambda = 0,6328$ мкм и аргонового с $\lambda = 0,514$ мкм). Установлено, что при использовании для записи голографических интерферограмм рубинового лазера, генерирующего серию пиков микросекундной длительности, хаотичность пиков по интенсивности практически не оказывает влияния на распределение интенсивности в восстановленном изображении, если длительность генерации превышает несколько периодов колебаний, т. е. интерферограммы, зарегистрированные излучением гелий-неонового лазера и рубинового, идентичны. Исследование временных характеристик лазера на алюминате иттрия показало, что по сравнению со свободным режимом генерации рубинового лазера существенно устраняются флуктуации отдельных пиков по интенсивности и во времени. Соответствующие осциллограммы цугов импульсов представлены на рис. 2, *a*, *b*. При использовании для записи усредненных по времени голографических

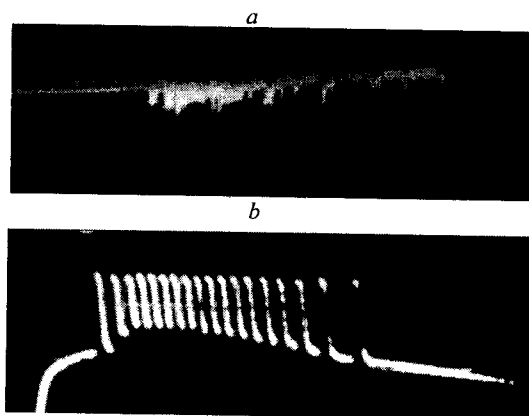


Рис. 2. Осциллограммы импульсной генерации лазеров с $\lambda = 0,694$ (*a*) и $0,54$ мкм (*b*). Развертка 100 мкс/дел.

интерферограмм лазера на алюминате иттрия для области амплитуд колебаний объектов $\sim 1,5-2$ мкм, если число экспонирующих импульсов на периоде колебаний превышает 20, то регистрируются голографические интерферограммы, характерные для метода усреднения по времени, т. е. усреднять периодический колебательный процесс можно конечным числом экспонирующих импульсов. На рис. 3, *a, b* представлены усредненные голографические интерферограммы, записанные излучением рубинового лазера и лазера на алюминате иттрия. Однако для больших амплитуд колебаний характер распределения интенсивности полос в восстановленном изображении существенно отличается от распределения в методе усреднения по времени. Соответствующие голографические интерферограммы для одинаковых режимов генерации, но различных амплитуд представлены на рис. 3, *c, d*. Для больших амплитуд начинают сказываться эффекты, характерные для многоэкспозиционной голографической интерферометрии (см. рис. 3, *d*), связанные с конечным числом импульсов на периоде колебаний. Другими словами, при заданных режимах генерации лазера в каждом конкретном случае необходимо знать границу применимости этих режимов при исследовании методом усреднения по времени различного вида процессов. Для определения этих границ, связанных с конечным числом импульсов на периоде колебаний, проведен расчет соответствующей характеристической функции, описываю-

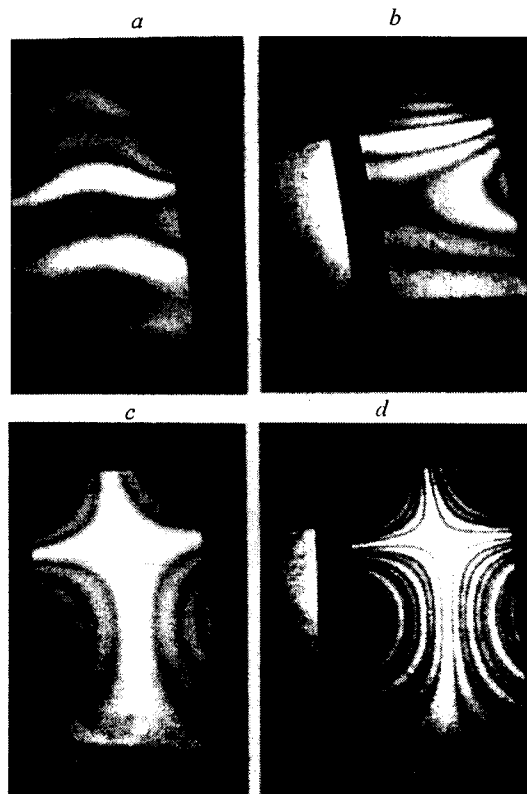


Рис. 3. Голографические интерферограммы лопатки газотурбинного двигателя размером 40×60 мм, записанные излучением рубинового лазера (*a, c, d*) и лазером на алюминате иттрия (*b*). Частота колебаний 11900 (*a*), 3150 (*b*), 5050 (*c, d*) Гц

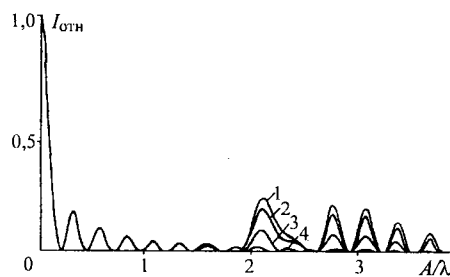


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности полос от величины A/λ для числа экспонирующих импульсов $N = 26$ и фазы синхронизации $\varphi = 0$ (кривая 1), $\pi/156$ (кривая 2), $\pi/78$ (кривая 3), $\pi/52$ (кривая 4)

щей распределение интенсивности на голографической интерферограмме в зависимости от амплитуды колебаний, для случая бесконечно малой длительности импульса цуга по отношению к периоду колебаний и эквидистантности импульсов по времени. В качестве параметров взято число экспонирующих импульсов и фаза синхронизации одного из импульсов цуга в колебательном процессе. В качестве примера на рис. 4 приведена зависимость относительной интенсивности полос от величины A/λ (A – амплитуда колебаний, λ – длина волны) для числа экспонирующих импульсов и фазы синхронизации. Значения параметров фазы выбирались из соображений повторяемости интерференционной картины с периодом $2\pi/N$ для четного N . Для большого числа экспонирующих импульсов на периоде колебаний в области малых амплитуд образуется стабильная интерференционная картина, не зависящая от N и φ , распределение интенсивности полос в которой характерно для метода усреднения по времени и описывается квадратом функции Бесселя первого рода нулевого порядка $J_0^2(4\pi A/\lambda)$. Для больших амплитуд (превышающих $2-3A/\lambda$) с целью описания характера распределения яркости полос необходимо учитывать функции Бесселя высших порядков в соответствующем разложении характеристической функции, а также фазу синхронизации одного из экспонирующих импульсов. Полученные результаты могут быть использованы как в многоэкспозиционной голографической интерферометрии, так и в методе усреднения по времени с применением лазеров, генерирующих серию эквидистантных по времени импульсов. Экспериментально проверено, что чувствительность используемых ФТП-материалов обеспечивала регистрацию диффузно отражающих объектов размером 60×60 мм при экспонировании одним пичком свободной генерации либо одним импульсом цуга лазера на алюминате иттрия с дифракционной эффективностью 0,25 и 1,2 % соответственно.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при регистрации усредненных по времени голографических интерферограмм серией хаотических по интенсивности и во времени пичков свободной генерации их хаотичность по интенсивности практически не оказывает влияния на распределение яркости в восстановленном изображении интерферограммы, если длительность генерации превышает несколько периодов колебаний исследуемого объекта, что подтверждает сравнительный анализ интерферограмм, записанных излучением рубинового и непрерывного гелий-неонового лазеров. При использовании для этих целей серии импульсов наносекундной длительности, где существенно устранены флуктуации и во времени, и по интенсивности, диапазон исследуемых амплитуд вибрирующих объектов ограничен сверху количеством экспонирующих импульсов на периоде колебаний. Проведенный расчет соответствующей характеристической функции для случая эквидистантности во времени импульсов цуга по-

казал, что для большого числа экспонирующих импульсов на периоде колебаний в области малых амплитуд образуется стабильная интерференционная картина, не зависящая от количества импульсов и фазы синхронизации. Для больших амплитуд (больше $2-3A/\lambda$) для описания характера распределения яркости полос необходимо учитывать функции Бесселя высших порядков в соответствующем разложении характеристической функции, а также фазу синхронизации одного из экспонирующих импульсов. Результаты работы использованы при исследовании резонансных форм колебаний изделий авиационной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Островский Ю. И., Щепинов В. П., Яковлев В. В.** Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988.
2. **Черкасов Ю. А., Бородкина М. С., Егоров Э. А. и др.** Исследование фототермопластического процесса для импульсной голографии // Новые регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1983. С. 109.
3. **Дашкевич В. И., Окушко В. А., Тюшкевич Б. Н.** Исследование процессов регистрации голографической информации наносекундными импульсами рубинового лазера на фототермопластических материалах на основе смеси селенидов и халькогенидов мышьяка // Автометрия. 1995. № 2. С. 62.
4. **Галабурда О. В., Окушко В. А., Тюшкевич Б. Н.** Динамика двухэкспозиционной записи на фототермопластический носитель излучением импульсного лазера // Автометрия. 1991. № 1. С. 18.
5. **Окушко В. А., Тюшкевич Б. Н.** Динамика голографической записи информации на фототермопластических материалах // Оптический журнал. 1997. 64, № 4. С. 147.

*Институт электроники НАН Беларуси,
E-mail: inel@inel.bas-net.by*

*Поступила в редакцию
31 мая 1999 г.*