

УДК 772.932.45 : 620.179.1

М. Н. Нижник, Б. Н. Тюшкевич

(Минск, Беларусь)

**ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ
ИНТЕРФЕРОГРАММ ПРИ ДВУХЭКСПОЗИЦИОННОМ
НЕСИММЕТРИЧНОМ СТРОБИРОВАНИИ**

На основании проведенного численного расчета показан характер изменения распределения интенсивности на голографической интерферограмме, регистрируемой методом двухэкспозиционного несимметричного стробирования, когда фаза синхронизации одного из импульсов с колебательным процессом остается постоянной ($\pi/2$), а фаза синхронизации другого импульса изменяется в пределах от $-\pi/2$ до $+\pi/2$. Описана блок-схема экспериментальной установки, с помощью которой реализована фототермопластическая регистрация стробоголографических интерферограмм диффузно отражающих объектов, колеблющихся на резонансных частотах, при электрооптической модуляции излучения гелий-неонового и аргонового лазеров.

Метод стробоскопической голографической интерферометрии, впервые предложенный для изучения газоразрядной плазмы, питаемой переменным током [1], оказался наиболее плодотворным для вибрационного анализа [2—5]. Обычно рассматривают случаи симметричного стробирования и коротких световых импульсов, когда их длительность Δt намного меньше периода колебаний объекта T . Характеристическая функция, описывающая распределение интенсивности света в восстановленном голографическом изображении, в этом случае соответствует функции квадрата косинуса [4—6]. Применение при стробоголографическом экспонировании очень коротких световых импульсов приводит к существенному увеличению времени записи. Сокращения времени регистрации изображения можно добиться, увеличивая длительность стробирующих импульсов. С увеличением длительности стробимпульсов характеристическая функция интерферограммы аналитически не выражается, а записывается в виде разложения по функциям Бесселя [7]. Следует отметить, что наиболее благоприятной является синхронизация стробирующих импульсов с фазами колебательного процесса, близкими к $\pm \pi/2$ (крайние положения объекта), когда скорости виброперемещений минимальны. В некоторых случаях полезен сдвиг стробирующих импульсов относительно фаз $\pm \pi/2$ с целью изменения чувствительности измерений, особенно при исследовании колебаний с большими амплитудами, когда число интерференционных полос велико и они становятся неразрешимыми на изображении. При таком сдвиге стробимпульсов увеличение их длительности приводит к резкому уменьшению яркости полос высших порядков, что является недопустимым.

В настоящей работе исследован характер распределения интерференционной картины полос при двухэкспозиционном несимметричном стробировании, когда фаза синхронизации одного импульса постоянна ($\pi/2$), а фаза другого импульса изменяется в пределах от $-\pi/2$ до $+\pi/2$ в зависимости от амплитуды колебаний и скважности стробирования; описана блок-схема экспериментальной установки, с помощью которой реализована фототермопластическая регистрация стробоголографических интерферограмм диффузно отражающих объектов, колеблющихся на резонансных частотах, при электро-

оптической модуляции излучения непрерывных гелий-неонового и аргонового лазеров.

Теория. Характеристическую функцию интерферограммы для случая двухэкспозиционного несимметричного стробирования при фазовой синхронизации двух импульсов φ_1 и φ_2 , где $\varphi_{1,2} = \omega t_{p1,2}$, с учетом их длительности Δt можно записать в виде [7]

$$|M_T|^2 = \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(KA) \operatorname{sinc}(n\pi/k) \cos \frac{n(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} e^{i n(\varphi_1 + \varphi_2)/2} \right|^2, \quad (1)$$

где $J_n(KA)$ — функция Бесселя 1-го рода n -го порядка; $\operatorname{sinc}(n\pi/k) = \sin(n\pi/k)/(n\pi/k)$, k — скважность стробирования ($k = T/\Delta t$, T — период колебаний); A, ω — амплитуда и круговая частота колебаний; $K = K_1 - K_2$ — вектор чувствительности (K_1, K_2 — соответственно волновые векторы наблюдения и освещения, модули которых равны ($|K_1| = |K_2| = 2\pi/\lambda$)).

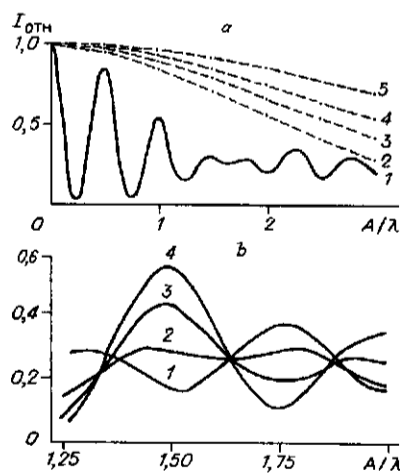
На рис. 1, а приведена зависимость интенсивности интерференционных полос от величины A/λ , рассчитанная для случая $K_1 = -K_2$, т. е. $KA = 4\pi A/\lambda$, для фаз синхронизации $\varphi_1 = \pi/2$ и $\varphi_2 = 0$ и скважности $k = 20$ (кривая 1), а также огибающие максимумов интенсивности полос для различных скважностей (штриховые кривые 2—5, на которых точками обозначены соответствующие максимумы полос). Следует отметить, что период интерференционной картины для больших скважностей стробирования ($\Delta t \ll T$) определяется косинусоидальной функцией типа [6]

$$|M_T|^2 = \cos^2 \left[\frac{KA}{2} (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) \right], \quad (2)$$

а с уменьшением скважности наблюдается не только спад интенсивности полос высоких порядков [7], но и увеличение интенсивности излучения в минимумах, а также нарушение периодичности интерференционной картины (см. кривые 1 и 2—5). Спад интенсивности излучения в максимуме и увеличение ее в минимуме приводят к тому, что для выбранной области амплитуд при определенной скважности наблюдается выравнивание их интенсивностей и, далее, с увеличением амплитуды и/или уменьшением скважности меняется характер интерференционной картины, т. е. для тех амплитуд колебаний, которым ранее соответствовал максимум интенсивности, теперь наблюдается минимум и наоборот (см. кривую 1). При этом происходит существенное снижение контраста (видности) полос. При заданной скважности стробирования ($k = 20$ для области амплитуд $A/\lambda > 1,5$) изменению интерференционной картины предшествует некоторая переходная область амплитуд, где картина смазывается или появляется низкоконтрастная уширенная полоса (см. рис. 1, а, кривая 1 в области $1,15 \div 2,0 A/\lambda$). Более детально характер изменения интенсивности излучения в этой области амплитуд представлен на рис. 1, б, из которого видно, как влияет скважность на смещение экстремумов полос и постепенный переход максимума полосы в минимум (см. в области $A/\lambda = 1,5$) и, наоборот, минимума в максимум (см. в области $A/\lambda = 1,75$).

Рис. 1. Зависимости интенсивностей интерференционных полос (а, 1 и б) и максимумов полос (а, 2—а, 5) от величины A/λ :

$\varphi_2 = 0$; $\varphi_1 = \pi/2$; $k = 15$ (б, 1), 20 (а, 1; б, 2), 25 (б, 3), 30 (б, 4), 40 (а, 2), 50 (а, 3), 60 (а, 4) и 80 (а, 5)



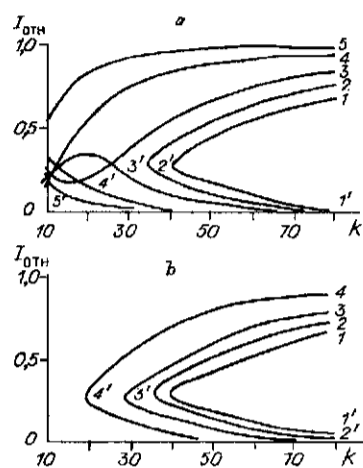


Рис. 2. Зависимости интенсивности максимумов и минимумов полос от скважности стробирования:

$\varphi_2 = -\pi/3$ (b, 1, 1'), $-\pi/6$ (b, 2, 2'), 0 (a, b, 4, 4') и $\pi/6$ (b, 3, 3'); $\varphi_1 = \pi/2$; $A/\lambda = 0,5$ (a, 5), 0,75 (a, 5'), 1 (a, 4), 1,25 (a, 4'), 2 (a, 3), 2,25 (a, 3'), 2,5 (a, 2), 2,75 (a, 2'), 3 (a, 1; b, 2 - b, 4), 3,1667 (b, 2'), 3,2154 (b, 1), 3,25 (a, 1'; b, 4'), 3,3493 (b, 1') и 3,5 (b, 3')

На рис. 2, а представлены зависимости интенсивности соседних максимумов и минимумов полос на голографической интерферограмме от скважности стробирования для различных величин амплитуд колебаний. Пересечения представленных кривых соответствуют выравниванию интенсивности соседних экстремумов для конкретных амплитуд колебаний и значений скважности. Следует отметить,

что с увеличением амплитуды колебаний наблюдается несколько точек пересечения кривых, соответствующих выравниванию интенсивности экстремумов полос, при различной скважности (см., например, кривые 3 и 3' на рис. 2, а). При этом скважность стробирования практически не влияет на уровень, при котором происходит выравнивание интенсивностей излучения в максимум и минимум. На рис. 2, б представлены зависимости интенсивности максимумов и минимумов полос от скважности стробирования для различных параметров фазовой синхронизации стробоимпульсов, которые выбирались в области значений амплитуд $3,0 \div 3,5 A/\lambda$. Чем ближе фаза синхронизации второго импульса к $-\pi/2$ (симметричное стробирование), тем более благоприятным является режим записи голографических интерферограмм (увеличивается контраст полос, возможно увеличение длительности светового импульса, сокращение времени экспонирования). Зависимости, представленные на рис. 2, можно рассматривать как некоторые оптимизационные кривые, которые позволяют выбирать для заданной области исследуемых амплитуд и фазовой синхронизации максимальную длительность световых стробоимпульсов, не допуская существенного снижения контраста (видности) полос высших порядков.

Эксперимент. Блок-схема экспериментальной установки, с помощью которой реализована фототермопластическая (ФТП) запись стробоголографических интерферограмм, представлена на рис. 3, а. Высокая светочувствительность ФТП-материалов, особенно в сине-зеленой области спектра ($10^{-7} \div 10^{-8}$ Дж/см²), позволяет достаточно эффективно использовать их в стробоголографии, где в связи с большой скважностью стробирования возрастает суммарное время экспонирования [8]. Управление излучением непрерывного лазера 1, используемого в качестве источника света, осуществлялось с помощью электрооптического модулятора 11 (типа МЛ-103), управляемого формирователем импульсов 26 [9], и электромеханического затвора 8. Запуск электронного блока 26 осуществлялся генераторами прямоугольных либо синусоидальных сигналов 25 амплитудой от 0,05 до 60 В, частотой 100 кГц. Длительность управляющих импульсов в блоке 26 могла регулироваться от 200 нс до 10 мс с шагом 100 нс. Коэффициент пропускания используемого электрооптического затвора 11 на длине волны лазерного излучения $\lambda = 0,5145$ мкм составлял не менее 80 % от максимального значения, которое на длине волны $\lambda = 0,6328$ мкм равнялось 0,94. Коэффициент контрастности составлял 230, статическое полуволновое напряжение — 262 В, полоса модулируемых частот — до 200 МГц, максимальная допустимая мощность лазерного излучения — 5 Вт.

Электромеханический затвор 8 управлялся генератором 24 (Г5-56) с помощью ключевого устройства 9 и его блока питания 10 (Б5-49). Запуск генератора 24 с необходимой временной задержкой относительно начала подачи на

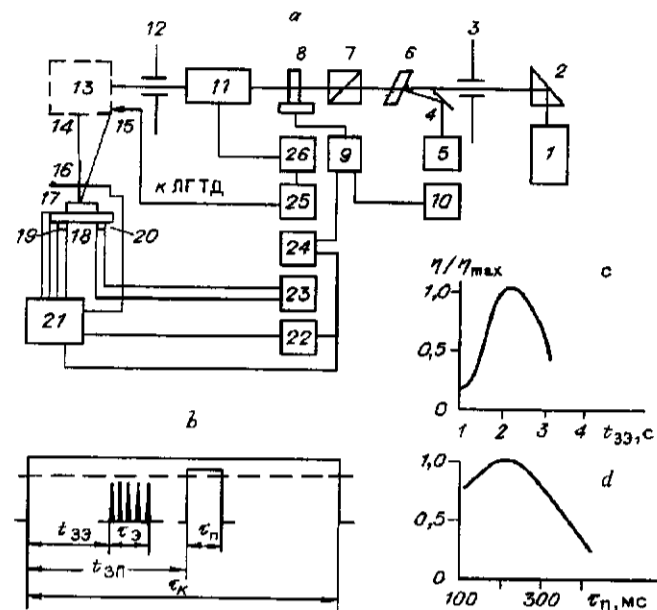


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки (а), временная диаграмма строболографической ФТП-записи (б) и зависимости относительной дифракционной эффективности голограммы от времени задержки экспонирования (с) и длительности проявляющего импульса (д):

1 - лазер; 2 - призма; 3, 12 - диафрагмы; 4 - зеркало; 5 - измеритель мощности ИМО-2Н; 6 - светоделительная пластина; 7 - призма Глана; 8 - электромеханический затвор; 9 - ключевое устройство; 10 - блок питания Б5-49; 11 - электрооптический затвор МЛ-103; 13 - оптическая схема записи; 14 и 15 - предметный и опорный пучки; 16 - коронирующая нить; 17 - ФТП-материал; 18 - пластина с проводящим покрытием; 19, 20 - датчики температуры; 21 - блок управления ФТП-записью; 22 - генератор Г5-60; 23 - цифровой вольтметр В7-27А; 24 - генератор Г5-56; 25 - генератор Г3-109; 26 - формирователь импульсов; $U_k = 10$ кВ; $T_0 = 64$ °С; $t_{п} = 200$ мс; $t_{33} = 2,0$ с; $t_{3п} = 2,0$ с (д)

тонкую коронирующую нить (вольфрамовая проволока диаметром ~ 30 мкм) высоковольтного импульса U_k (амплитудой 8—14 кВ и длительностью, регулируемой в пределах 0—5 с), формируемого блоком 21, осуществлялся генератором 22 (Г5-60). Запуск генератора 22 производился блоком 21. С помощью нити 16 в поле коронного разряда происходила зарядка поверхности ФТП-материала 17 (типа ФТПН-Л), используемого в качестве регистрирующей среды, до потенциала очувствления. К одной из сторон пластины 18 с двусторонним напылением подавалось низковольтное напряжение 15—25 В для установления начальной температуры предварительного нагрева, а к другой стороне пластины с задержкой относительно начала коронного разряда — импульс амплитудой ~ 130 В и длительностью, задаваемой генератором 22 (10—1000 мс), для окончательного теплового проявления. Датчик 19 (диод КД521В) служил для осуществления обратной связи по температуре с блоком 21, а датчик 20 и цифровой вольтметр 23 (В7-27А) использовались для контроля начальной температуры нагрева. Измеритель мощности 5 (ИМО-2Н), на который часть излучения попадала от светоделительной пластинки 6 и зеркала 4, использовался для контроля интенсивности лазерного излучения. При больших мощностях излучения для сужения спектральной линии генерации на выходе аргонового лазера применялся интерферометр Фабри — Перо с коэффициентом отражения зеркальных поверхностей для используемых при записи длин волн $\sim 0,8$. Схема блока 21 описана в [8].

Временная диаграмма строболографической ФТП-записи представлена на рис. 3, б, где приняты следующие обозначения: t_k — длительность коронного разряда, t_s — суммарное время экспонирования, $t_{п}$ — длительность импульс-

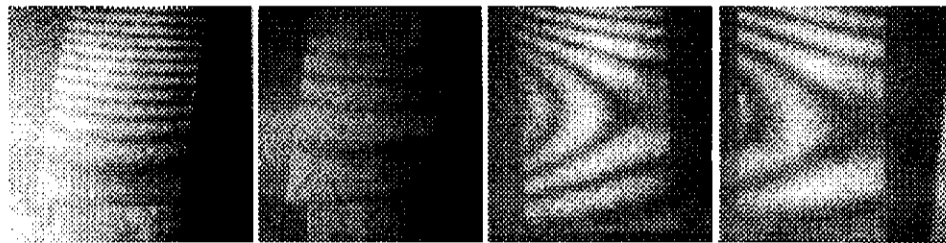


Рис. 4. Голографические интерферограммы лопаток ГТД:
 $\varphi_2 = -\pi/2$ (а, с), $-\pi/12$ (d) и 0 (b); $\varphi_1 = \pi/2$; $k = 25$ (а-с) и 40 (d); $\lambda = 0,633$ (а, b) и 0,5145 мкм (с, d); частота возбуждения
 $\nu = 710$ (а, b) и 3600 Гц (с, d)

ного проявления, τ_{3D} и $\tau_{3П}$ — соответственно времена задержки экспонирования и импульсного проявления относительно начала коронного разряда, штриховая линия условно обозначает уровень начальной температуры нагрева T_0 . При регистрации стробоголографических интерферограмм произведена оптимизация режимов и условий по основным параметрам ФТП-записи: временным, тепловому проявлению, напряжению коронного разряда, экспозиции. На рис. 3, с, d показаны зависимости относительной дифракционной эффективности η/η_{\max} от времени задержки экспонирования (с) и длительности проявляющего импульса (d).

Регистрация стробоголографических интерферограмм производилась при исследовании форм колебаний лопаток газотурбинного двигателя (ЛГТД), при этом импульсы от генератора звуковых сигналов 25 (ГЗ-109) использовались одновременно в качестве входных для устройства управления электрооптическим затвором и вибрационного возбуждения ЛГТД с помощью пьезокерамической пластины. Запись осуществлялась по обычной двухлучевой схеме. Оптическая схема, с помощью которой модулированное лазерное излучение разделялось на предметный 14 и опорный 15 пучки, на рис. 3, а условно обозначена квадратом 13. В качестве источников излучения 1 использовались непрерывный аргоновый лазер (типа ЛГН-503) с длиной волны $\lambda = 0,5145$ мкм, мощностью до 300 мВт и гелий-неоновый лазер с $\lambda = 0,633$ мкм, мощностью ~30 мВт. Следует отметить, что временная диаграмма, приведенная на рис. 3, б, применялась при регистрации интерферограмм более мощным аргоновым лазером, при этом суммарное время экспонирования τ , составляло ~100 мс, полный цикл записи не превышал 5 с, а при использовании гелий-неонового лазера стробоголографическое экспонирование производилось на протяжении всего времени зарядки (коронного разряда), при этом полное время записи увеличивалось и составляло 15—20 с. На рис. 4 приведены голографические интерферограммы лопаток ГТД, возбуждаемых пьезоэлементом на различных частотах, зарегистрированные излучением гелий-неонового (рис. 4, а, б) и аргонового (рис. 4, с, d) лазеров и иллюстрирующие характер изменений интерференционной картины для различных фаз синхронизации и скважности стробирования.

Таким образом, проведенный численный расчет дал возможность проследить характер изменения распределения интенсивности на голографической интерферограмме, регистрируемой методом двухэкспозиционного несимметричного стробирования, когда фаза синхронизации одного из импульсов с колебательным процессом остается постоянной ($\pi/2$), а фаза синхронизации другого импульса изменяется в пределах от $-\pi/2$ до $+\pi/2$. Полученные зависимости распределения интерференционной картины полос от амплитуды колебаний и скважности стробирования позволили реализовать ФТП-

регистрацию голографических интерферограмм с достаточно малой скважностью стробирования, обеспечивающей сокращение общей длительности экспонирования регистрирующей среды (что немаловажно для исключения влияния низкочастотных помех в процессе ФТП-записи) без существенного снижения видности полос высших порядков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zaidel A. N., Ostrovsky Yu. I. Holographic investigation of plasma // Proc. VIII Int. Cong. on Phen. in Ionis Gases. Vienna, 1967. P. 508.
2. Saenko P., Johnson C. D. Stroboscopic holographic interferometry // Appl. Phys. Lett. 1968. 13. P. 22.
3. Зайдель А. Н., Малхасян Л. Г., Маркова Г. В., Островский Ю. И. Стробоголографический метод исследования вибраций // ЖТФ. 1968. 37. С. 1824.
4. Vikram C. S. Further reduction of recording time in stroboscopic holographic interferometry // Opt. Commun. 1973. 7. P. 347.
5. Chopra K. N., Bhathagar G. S. Quadruple-exposure technique in stroboscopic holographic interferometry // Appl. Opt. 1974. 13. P. 2468.
6. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
7. Листовец В. С., Островский Ю. И. Интерференционно-голографические методы анализа вибраций // ЖТФ. 1974. 44. С. 1345.
8. Тюшкевич Б. Н., Окушко В. А., Павловец Ю. Е., Нижник М. Н. Фототермопластическая регистрация стробоскопических голографических интерферограмм // Дефектоскопия. 1994. № 6.
9. Тюшкевич Б. И., Павловец Ю. Е., Щая-Зубров П. Г. Устройства управления электрооптическими затворами // ПТЭ. 1991. № 4.

Поступила в редакцию 13 июня 1995 г.