

- [1] Lagreid T., Fosshelm K., Sandvold E., Julsrud S. // Nature. 1987. Vol. 330. P. 637.  
 [2] Yusheng He, Zhang Baiwen, Lin Sihan et al. // J. Phys. F. 1987. Vol. 17. P. 4243.  
 [3] Okamura F. P., Sueno S., Nakai J., Ono A. // Proc. Jap. Acad. B, 1987. Vol. 63. N 6. P. 165.  
 [4] Bhargava R. N., Herko S. P., Osborne N. W. // Amer. Phys. Soc. 1987. Vol. 59. N 13. P. 1468.  
 [5] Toulouse J., Wang X. M., Hong D. J. // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 38. N 10. P. 7077—7079.

Отделение института химической физики  
 АН СССР  
 п/о Черноголовка Московской обл.

Поступило в Редакцию  
 7 июля 1988 г.

06;07

Журнал технической физики, т. 60, в. 6, 1990

© 1990 г.

## КОНТРОЛЬ ФАЗОВОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Е. Ю. Арефьев, М. А. Голуб, К. В. Овчинников, С. Б. Попов,  
 И. Н. Сисакян, В. А. Сойфер, Д. Н. Тихонов, А. Г. Храмов, Г. В. Шамалова

### Введение

Плоские элементы компьютерной оптики представляют собой  $[1^{-3}]$  пропускающие или отражательные пластинки с многоградационным микро рельефом, нанесенным по зонам Френеля и имеющим скачки фазы на  $m \cdot 2\pi$ , где  $m = \text{const}$  — целое число. Процесс перехода от рассчитываемых на ЭВМ проектных значений фазы в интервале  $[0, m \cdot 2\pi]$  к физическому микро рельефу с максимальной оптической высотой  $m \cdot \lambda$  ( $\lambda$  — длина волны) включает мно-

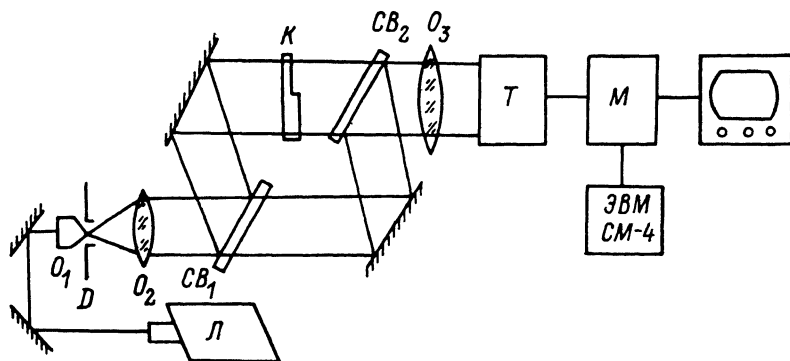


Рис. 1. Схема автоматизированного микроинтерферометра для контроля пропускающего фазового рельефа.

М — модуль ввода изображения.

жество технологических этапов изготовления фотшаблонов, контактного копирования, отбеливания, травления и т. д., вносящих нелинейные искажения фазового сдвига. Для отработки технологии формирования микро рельефа требуется контроль как условия соответствия фазы по максимальному значению  $m \cdot 2\pi$ , так и характера нелинейности передачи фазы в интервале  $[0, m \cdot 2\pi]$ . Использование механических профиллографов для измерения фазового рельефа сопряжено с частичным разрушением рабочей поверхности, серийные микроинтерферометры Линника типа МИИ-4, МИИ-10 дают большую погрешность при контроле микро рельефа для плоских элементов видимого диапазона длин волн, особенно с  $m=1$ . В данной работе контроль условия соответствия фазы и формы микро рельефа осуществлен в автоматизированном лазерном микроинтерферометре. Оценка сдвига интерференционных полос на микро рельефе производится по специально разработанному корреляционному алгоритму цифровой обработки интерферограмм.

Оптическая система микроинтерферометра собрана по схеме лазерного микроинтерферометра Маха—Цендера (рис. 1) на вертикальном столе голографической установки УГМ-1, дополненной необходимыми юстировочными приспособлениями. Использован лазер  $L$  типа ЛГ-79-1 с блоком коллиматора-расширителя, выполненным на  $10\times$  микрообъективе  $O_1$  с точечной диафрагмой диаметра 20 мкм и объективе  $O_2$  типа И-37. Разделение и сведение двух лучей интерферометра производится клиновидными светоделителями  $CB_1, CB_2$  и плоскими зеркалами  $З_1-З_4$ .

Контролируемый плоский элемент  $K$  компьютерной оптики устанавливается в плоский пучок рабочей ветви микроинтерферометра, выведенного на полосы. Объектив  $O_3$  типа Ю-11

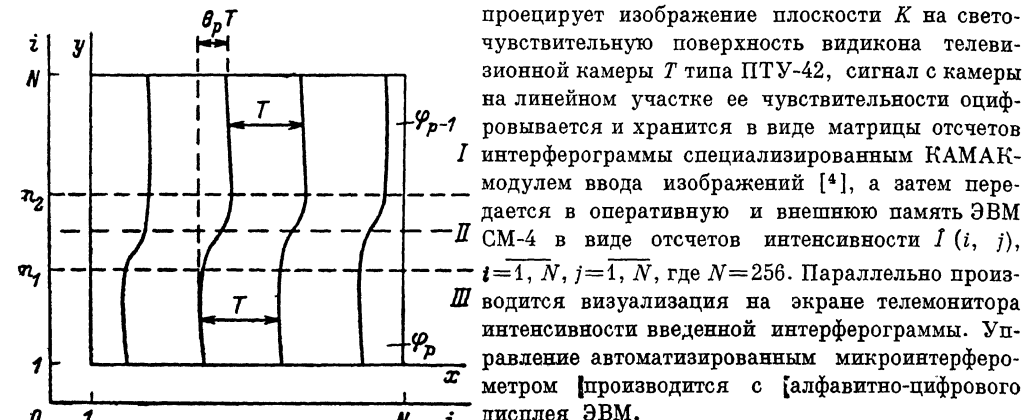


Рис. 2. Вид интерферограммы фазового скачка на прямолинейной границе ( $m=0$ ).

последовательно помещались по два соседних участка клина с фазами  $\varphi_{p-1}$  и  $\varphi_p$  с горизонтальной границей раздела (рис. 2). Горизонтальное расположение границы раздела и вертикальное направление интерференционных полос выставлялись механическими юстировками при визуальном контроле на экране телемонитора.

### Модель интерферограммы фазового скачка

Интерферограмма скачка от теоретического значения  $\varphi_{p-1}$  до  $\varphi_p$  состоит из трех областей (рис. 2) с граничными индексами  $i=n_1$  и  $n_2$ . Область II представляет переходную зону и позволяет выявить, на сколько целых полос  $m$  имеется сдвиг фаз между частями I и III. Доля интерференционной полосы, соответствующая фазовому скачку, определяется на этапе цифровой обработки интерферограммы по формуле

$$\theta_p = (\varphi_p - \varphi_{p-1} - m \cdot 2\pi) / 2\pi, \quad \theta_p \in (0, 1). \quad (1)$$

При ориентации полос перпендикулярно оси  $x$  непрерывная модель интерферограммы в областях I и III дается уравнением

$$I_p(x) = \bar{I} + A_p \cos(2\pi\nu x + \varphi_p), \quad (2)$$

где  $\nu=1/T$  — пространственная частота полос,  $T$  — период интерферограммы.

При дискретизации интерферограммы положим

$$\begin{aligned} x &= j \cdot \delta; \quad j = \overline{1, N}, \\ \nu &= N_0 \frac{1}{T} = \frac{N_0}{N} \frac{1}{\delta}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\delta$  — размер ячейки фотоприемника,  $N_0$  — число полос на интерферограмме.

Дискретная модель интерферограммы описывается уравнением

$$I_p(j) = \bar{I}_p + A_p \cos\left(2\pi \frac{N_0 j}{N} + \varphi_p\right), \quad j = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Предварительная обработка введенных в ЭВМ значений интенсивности интерферограммы  $I(i, j)$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, N}$  включала операции двумерной медианной фильтрации [5] и усреднения по строкам в областях I и III (рис. 2) согласно соотношениям

$$\hat{I}_{p-1}(j) = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} I(i, j); \quad j = \overline{1, N}, \quad (5)$$

$$\hat{I}_p(j) = \frac{1}{N - n_2} \sum_{i=n_2+1}^N I(i, j); \quad j = \overline{1, N}. \quad (6)$$

### Алгоритмы восстановления фазового сдвига по интерферограмме

Общие методы обработки интерферограмм с восстановлением полного поля фаз [6] не учитывают специфику данной задачи, где нужно определить всего одно значение фазы. В данной работе предложены и исследованы специальные методы обработки интерферограммы фазового скачка.

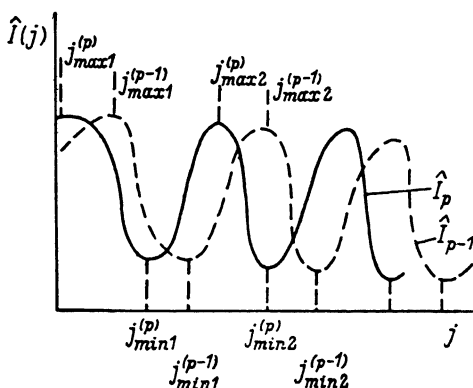


Рис. 3. Распределение интенсивности на интерферограмме.

Сплошные линии — область I, штриховые — область III.

Частота полос определялась по формуле (3). Для повышения достоверности измерений параллельно строились три оценки  $\hat{\theta}_p^{(1)}$ ,  $\hat{\theta}_p^{(2)}$ ,  $\hat{\theta}_p^{(3)}$  параметра  $\theta_p$  (1). При построении первой оценки  $\hat{\theta}_p^{(1)}$  вначале подсчитывалась оценка взаимной корреляционной функции сдвинутых частей интерферограммы

$$\hat{R}_p(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{j=1}^{N-k} \hat{I}_{p-1}(j) \hat{I}_p(j+k) - \hat{I}_{p-1} \hat{I}_p, \quad (7)$$

где

$$\hat{I}_p = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{I}_p(j). \quad (8)$$

Соответствующая непрерывная корреляционная функция определяется, согласно (2), формулой

$$\begin{aligned} R_p(\Delta x) &= \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1}{2a} \int_{-a}^a [I_{p-1}(x) - \bar{I}_{p-1}] [I_p(x + \Delta x) - \bar{I}_p] dx = \\ &= \frac{1}{2} A_{p-1} A_p \cos [2\pi (\nu \cdot \Delta x + \theta_p)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Значение параметра  $\theta_p$  оценивалось путем аппроксимации  $R_p(k\delta) \cong \hat{R}_p(k)$  методом наименьших квадратов согласно уравнениям

$$\operatorname{tg}(2\pi\theta) = [N_2 S_1 - (N + N_1) S_2] / [(N - N_1) S_1 - N_2 S_2], \quad (10)$$

$$\text{sign } \cos(2\pi\theta) = \text{sign} \frac{(N - N_1) S_1 - N_2 S_2}{N^2 - N_1^2 - N_2^2}, \quad (11)$$

где

$$S_1 = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{R}_p(k) \cos\left(2\pi \frac{N_0 k}{N}\right); \quad S_2 = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{R}_p(k) \sin\left(2\pi \frac{N_0 k}{N}\right), \quad (12)$$

$$N_1 = \cos\left[2\pi N_0 \left(1 + \frac{1}{N}\right)\right] \frac{\sin(2\pi N_0)}{\sin\left(2\pi \frac{N_0}{N}\right)},$$

$$N_2 = \sin\left[2\pi N_0 \left(1 + \frac{1}{N}\right)\right] \frac{\sin(2\pi N_0)}{\sin\left(2\pi \frac{N_0}{N}\right)}. \quad (13)$$

Вторая оценка  $\hat{\theta}_p^{(2)}$  формировалась путем аппроксимации  $I_p(j\delta) \cong I_p(j)$  непосредственно одномерных распределений интенсивности методом наименьших квадратов. Третья

### Результаты измерения фазового сдвига

Номер интерферограммы	Общее число полос $N_0$	Сдвиг на целое число полос $m$	$\theta \in [0, 1]$ на долю полосы				
			$\hat{\theta}^{(1)}$	$\hat{\theta}^{(2)}$	$\hat{\theta}^{(3)}$	$\hat{\theta}$	$\hat{\theta}_{\text{рпч}}$
1	4	0	0.90	0.99	0.95	0.97	0.91
2	13.5	1	0.96	0.97	0.94	0.96	0.94
3	2	1	0.12	0.13	0.11	0.12	0.08
4	9	2	0.25	0.23	0.24	0.23	0.22
5	5.5	2	0.19	0.20	0.21	0.20	0.19

оценка  $\hat{\theta}_p^{(3)}$  строилась путем анализа экстремумов функций  $I_p(j)$  и  $I_{p-1}(j)$ ,  $j = \overline{1, N}$  (рис. 3). Вначале находится

$$N_0 = \frac{1}{4} [N_{\min}^{(p-1)} + N_{\max}^{(p-1)} + N_{\min}^{(p)} + N_{\max}^{(p)}], \quad (14)$$

где  $N_{\min}^{(p)}$ ,  $N_{\max}^{(p)}$  — число минимумов и максимумов функции  $I_p(j)$  на рассматриваемом интервале.

Затем формируют оценку

$$\hat{\theta}_p^{(3)} = \frac{1}{2N_0} \sum_{k=1}^{N_0} (|j_{\min k}^{(p)} - j_{\min k}^{(p-1)}| + |j_{\max k}^{(p)} - j_{\max k}^{(p-1)}|), \quad (15)$$

где  $j_{\min k}^{(p)}$ ,  $j_{\max k}^{(p)}$  — координаты  $j$  для  $k$ -го минимума и  $k$ -го максимума функции  $I^{(p)}(j)$ . По трем оценкам строится результат измерения

$$\hat{\theta}_p = \frac{1}{3} [\hat{\theta}_p^{(1)} + \hat{\theta}_p^{(2)} + \hat{\theta}_p^{(3)}]. \quad (16)$$

Описанные алгоритмы реализованы в виде диалогового комплекса программ на языке ФОРТРАН ЭВМ СМ-4, работающих в составе пакета программ обработки изображений [7].

### Результаты контроля микро рельефа

Апробация автоматизированного микроинтерферометра производилась путем контроля тестовых фазовых скачков на прямолинейной границе. Результаты обработки интерферограмм сведены в таблицу. В таблице приведены оценки  $\hat{\theta}_{\text{рпч}}$ , полученные визуальным анализом графиков интенсивностей интерферограмм. Точность автоматизированного измерения фазового сдвига составляет 0.05 интерференционной полосы.

Авторы выражают благодарность С. В. Карпееву и В. Г. Васильеву за техническую помощь в создании оптической части интерферометра.

- [1] *Sissakian I. N., Soifer V. A.* // Intern. conf. and school «Laser and Applications». Bucharest, 1982. P. 853—882.
- [2] *Голуб М. А., Живописцев Е. С., Карнеев С. В.* и др. // ДАН СССР. 1980. Т. 253. № 5. С. 1104—1108.
- [3] *Голуб М. А., Карнеев С. В., Прохоров А. М.* и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 10. С. 619—623.
- [4] *Арефьев Е. Ю., Компанец В. К.* // Автоматизация экспериментальных исследований. Куйбышев, 1983. С. 125—128.
- [5] *Прэнтт У.* Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 2.
- [6] *Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С.* Цифровая голография. М.: Наука, 1982. С. 176—192.
- [7] *Виттик В. А., Сергеев В. В., Соيفер В. А.* Обработка изображений в автоматизированных системах научных исследований. М.: Наука, 1982.

Научно-техническое объединение  
Центральное конструкторское бюро  
уникального приборостроения АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
25 декабря 1987 г.  
В окончательной редакции  
27 декабря 1989 г.

04; 07; 12

Журнал технической физики, т. 60, в. 6, 1990

© 1990 г.

## МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ Н-ГЕКСАНА В НАНОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

В. Ф. Клишкин

Мнения относительно механизма электрического пробоя жидкостей в наносекундном диапазоне различны [1<sup>-3</sup>]. До настоящего времени дискутируется существование чисто электрического механизма пробоя даже в наилучших жидких диэлектриках [4]. В значительной степени это связано с некоторой противоречивостью экспериментальных данных. Например, отмечается слабое влияние внешнего давления и сильное влияние насыщения Н-гексана молекулами O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> на время запаздывания пробоя при наносекундных длительностях воздействия напряжения [5, 6]. В то же время результаты прямых оптических наблюдений указывают на важную роль кавитации в начальной стадии формирования электрического разряда даже при длительностях воздействия напряжения ~10—100 нс [7, 8]. Интересные особенности электрического пробоя Н-гексана в квазиоднородном поле обнаружены в работе [9]. Оказалось, что в наносекундном диапазоне сосуществуют и конкурируют между собой два механизма пробоя с анода, различающиеся своей структурой. Один из механизмов содержит начальную (более медленную) «пузырьковую» стадию, переходящую затем в быстро развивающийся кистевой разряд. В общих чертах картина развития пробоя соответствует установленной ранее для различных жидкостей [10]. Другой механизм имеет форму однородного разряда с размытыми границами. Характерным является то, что при его возникновении не удается обнаружить начальную «пузырьковой» стадии вблизи поверхности электрода. Скорости развития кистевого и однородного разрядов примерно одинаковые и для разрядного промежутка длиной 100 мкм составляют ~1—2·10<sup>6</sup> см/с. Следует отметить также сложную зависимость времени запаздывания пробоя от внешнего давления в этих условиях, установленную в [9]. Уточнение характера физических процессов, приводящих к развитию электрического разряда в жидкостях в наносекундном диапазоне, является важным, так как представляет теоретический и практический интерес.

В данной работе сообщаются дополнительные экспериментальные результаты, касающиеся механизмов электрического пробоя Н-гексана при длительностях воздействия напряжения ≤100 нс.

В опытах использовалась разрядная камера, в которой могло создаваться повышенное давление. Геометрия разрядного промежутка, генератор импульсных напряжений, лазерная шпирен-система, условия эксперимента аналогичны описанным в [8].

Одновременно с оптической визуализацией предпробивных явлений в разрядном промежутке проводился анализ статистических распределений времени запаздывания разряда в за-