

**Одиннадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 27 — 30 июня 2011 г.**

УДК 532.68

Е.Л.Бубис, А.З.Матвеев

*Институт прикладной физики РАН, Россия.
Россия, Нижний Новгород, Ульянова, 46, E-mail: bel@appl.sci-nnov.ru*

К РАСЧЕТУ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ФИЛЬТРА ЦЕРНИКЕ

Приведены результаты расчетов характеристик термокапиллярного фильтра Цернике. Результаты анализа процесса визуализации в схеме с термокапиллярной ячейкой в ряде случаев сравниваются с результатами, полученными в той же схеме с ячейкой Цернике на основе локальной керровской нелинейности, и с традиционной линейной пластинкой Цернике.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, на горизонтальной поверхности жидкости, поглощающей лазерное излучение, формируется термокапиллярная линза или асферическое зеркало [1-4]. В работе [5] было предложено использовать данный эффект для визуализации фазовых объектов по методу Цернике [6]. В настоящей работе приведены результаты численного исследования процесса визуализации фазовых объектов ячейкой Цернике, основанной на термокапиллярном эффекте (далее – термокапиллярная ячейка Цернике). Для сравнения также приводятся характеристики восстановления фазовых объектов с помощью фототермической ячейки Цернике, подробно исследованной в работе [7]. Схема визуализации фазовых объектов представлена на рис. 1. На расстоянии $2f$ от линзы 1 , где f – фокусное расстояние линзы 1 , располагался фазовый объект O . Он освещался лазерным пучком с гауссовым профилем интенсивности и плоским волновым фронтом. В фокальной плоскости линзы 1 располагалась термокапиллярная ячейка Цернике 2 . Распределение интенсивности излучения, отраженного термокапиллярным зеркалом 2 , анализировалось с помощью фотокамеры 3 , расположенной на расстоянии $2f$ за линзой 1 .

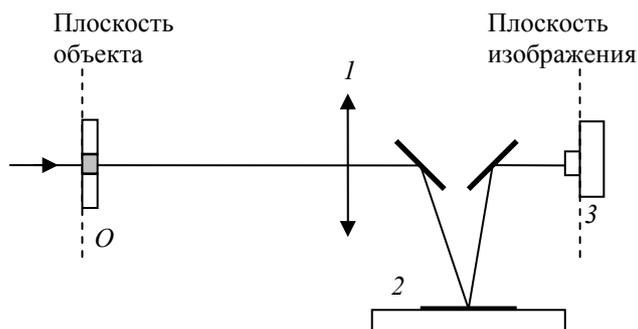


Рис. 1. Схема визуализации фазовых объектов. O – объект, 1 – линза, 2 – термокапиллярная ячейка, 3 – фотокамера, расположенная в плоскости изображения

Термокапиллярная ячейка Цернике представляла из себя толстый слой воды, на который наносился тонкий слой поглощающей свет жидкости (в данном случае – нефти). Использовалось когерентное излучение с длиной волны 0.63 мкм. Излучение поглощалась в тонкой пленке нефти, имеющей коэффициент поглощения ~ 100 см $^{-1}$. При расчете профиля термокапиллярной линзы $h(r)$ распределение интенсивности света в ячейке Цернике предполагалось гауссовым. Иными словами, считалось, что наличие прозрачного объекта практически не меняет распределение $h(r)$. Для определения последнего были использованы результаты работы [5]. Предполагалось, что радиус (по уровню e^{-2} интенсивности) греющего гауссова пучка $w_f \gg h_0$ толщины пленки поглощающей жидкости; в тоже время считалось, что w_f меньше капиллярной постоянной. Кроме того, предполагалось, что изменение толщины пленки вследствие термокапиллярного механизма много меньше толщины самой пленки. Распределение интенсивности в плоскости изображения (камеры) определялось с помощью дифракционного интеграла Френеля – Кирхгофа в параксиальном приближении. При этом пленка поглощающей жидкости рассматривалась в качестве зеркала с найденным согласно работе [3] профилем $h(r)$. Вначале обсудим особенности профиля $h(r)$, возникающего в тонком слое поглощающей свет жидкости. Профиль $h(r)$ рассчитывался при следующих параметрах: радиус освещающего гауссова пучка в плоскости объекта O $w_0 = 0.17$ см; фокусное расстояние линзы 1 $f=35$ см (на поглощающей пленке радиус гауссова пучка $w_f = 41$ мкм); исходная толщина поглощающей пленки $h_0 = 20$ мкм; коэффициент линейного поглощения в этой пленке был принят равным 100 см $^{-1}$; коэффициент теплопроводности пленки – 0.14 Вт/(м·К); коэффициент, характеризующий теплообмен между пленкой и воздухом, $\beta=5$ Вт/(м 2 ·К); принималась линейная зависимость от температуры коэффициента поверхностного натяжения пленки $\sigma = \sigma_0[1-\alpha(T-T_0)]$, $\alpha = 0.01$ К $^{-1}$; пленка располагалась поверх слоя воды толщиной 0.5 см; коэффициент теплопроводности воды был принят равным 1.0 Вт/(м·К); вода располагалась в чашке Петри с радиусом 1.0 см.

Характерное распределение $h(r)$ представлено на рис. 2, кривая 1. Само распределение интенсивности греющего излучения представлено на этом же рисунке кривой 2. Напомним, что обычная ячейка Цернике представляет из себя расположенный в фокусе линзы тонкий прозрачный слой вещества. Он вносит в спектр фазового объекта некоторый сдвиг фаз между нулевой и высшими пространственными частотами. Сравнивая распределение $h(r)$ с требуемым, заключаем, что оно далеко от идеального. Ранее, в работе [7] исследовалась фототермическая ячейка Цернике. Распределение вносимой ею фазы в угловой спектр прозрачного объекта также было далеким от идеального. Тем не менее, использование этой ячейки приводило к удовлетворительной визуализации фазовых объектов. Следствия такого распределения $h(r)$ обсуждаются ниже. Рассмотрим в качестве фазового объекта O одномерную фазовую щель шириной $d_{sl} = 0.04$ см, ориентированную вдоль оси y . Вносимый ею фазовый скачок обозначим через φ_{sl} . *A priori* нам известно, что освещающий пучок

является гауссовым. Эта информация позволяет восстановить распределение фазы исходного фазового объекта: $\varphi_{res} \sim I_{res} = I_0(x)/f_g(x)$, где $I_0(x)$ – распределение интенсивности, полученное в плоскости изображения 3 (см. рис. 1), $f_g(x) = \exp\{-2x^2/w_f^2\}$. Далее под термином «восстановление» будет пониматься данная простейшая математическая процедура. Дифракционный интеграл вычислялся численно на сетке размером 512×512 элементов. Результат восстановления изображения данного объекта с помощью термокапиллярной ячейки Цернике (мощность освещающего гауссова пучка $P_0 = 1$ мкВт, скачок фазы $\varphi_{sl} = 0.1\pi$ рад.) приведен на рис. 3. На рис.3а приведено двумерное распределение интенсивности света I_0 в плоскости изображения. Восстановленное распределение в сечении $y=0$ приведено на рис.3б, кривая 1. Отметим, что визуализация фазовой щели имеет место. Однако при этом присутствуют существенные искажения, обусловленные эффектом усиления краев. У кривой $I_{res}(x)$ можно выделить 3 характерных значения, отмеченных на рис. 3б как I_{max} , I_{min} , I_0 . Величины $1-I_{min}$, $I_{max}-I_0$ характеризуют эффект усиления краев, Величина же I_0-1 дает соответствие между исходным скачком фазы φ_{sl} у щели и скачком интенсивности у восстановленного изображения. Для сравнения качества визуализации на том же рис. 3б, кривая 2, приведен результат восстановления данной фазовой щели с помощью фототермической ячейки Цернике.

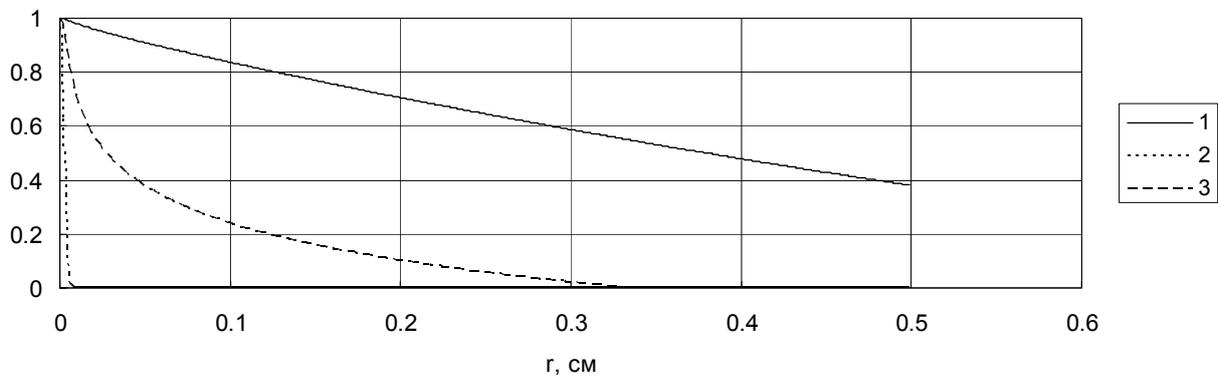
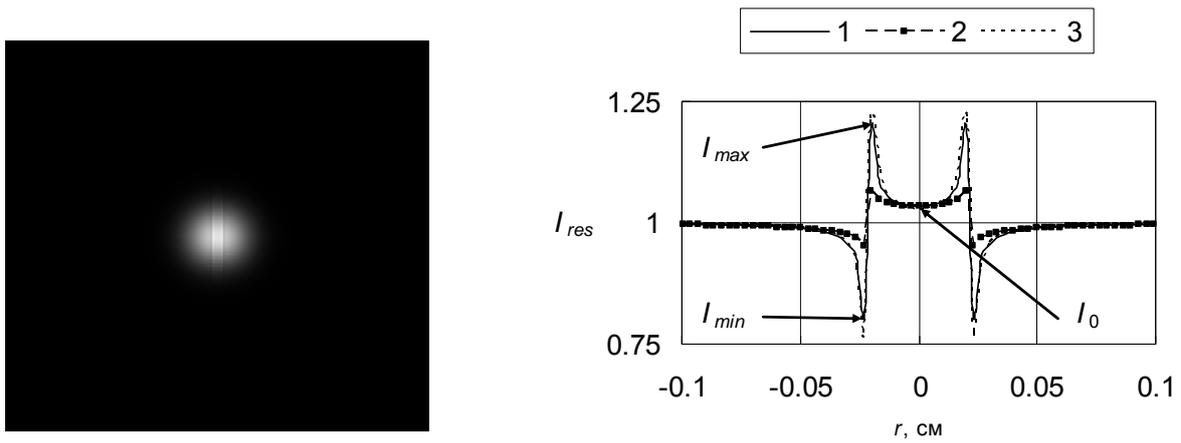


Рис. 2. Профили термокапиллярного зеркала $h(r)$ (кривая 1); формирующего данное зеркало гауссова пучка (кривая 2); фазы, формируемой в фототермической ячейки Цернике (кривая 3)

Параметр ячейки Θ_z ($\Theta_z \sim P_0$ – см. [7]) был подобран таким образом ($\Theta_z = 0.102\pi$), чтобы величина I_0 была одинаковой в обоих случаях использования термокапиллярной и фототермической ячеек. Видно, что фототермическая ячейка Цернике дает более качественную визуализацию фазовых объектов. Представленная на рис. 2, кривая 1, зависимость $h(r)$ близка к линейной. Чтобы выяснить, какая из частей распределения $h(r)$ отвечает за эффект усиления краев, зависимость $h(r)$ была заменена на линейную. Наклон этой прямой был принят равным наклону исходной кривой $h(r)$, взятым при $r=0$ (в центре ямки). Иными словами, расчетное углубление в пленке нефти было заменено углублением в виде конуса. Результат восстановления изображения фазовой щели в этом случае представлен на рис. 3б, кривая 3. Видна близость кривых 1 и 3.



а)

б)

Рис. 3. Результат восстановления изображения объекта с помощью термокапиллярной ячейки Цернике

Согласно рис. 3, мощность освещающего гауссова пучка, требуемая для визуализации фазовых объектов, невелика. В данном примере эта мощность $P_0 = 1$ мкВт. Соответствующая этой мощности интенсивность греющего пучка на пленке нефти $I_0 = 9.5$ мВт/см². Данная величина существенно меньше требуемой для проявления эффекта самофокусировки самого греющего пучка. В отсутствии фазовой щели изменения в поперечном распределении греющего пучка на трассе, расположенной после отражения от пленки нефти, практически не заметны. В примере, приведенном на рис. 3, глубина ямки, образуемой в пленке нефти греющим пучком, в центре этого пучка $h_0 - h(0) = 0.15$ мкм и составляет величину порядка 0.24 длины волны греющего пучка. Если фазовый объект отсутствует, то наибольшие изменения исходного гауссова пучка имеют место на расстояниях от пленки, порядка длины перетяжки сфокусированного гауссова пучка. За счет фокусирующего действия пленки интенсивность пучка в этой области несколько возрастает (на величину $\sim 1.5\%$) по сравнению со случаем плоской пленки, когда мы имеем дело с неискаженным гауссовым пучком. Такие изменения в пучке обнаружить довольно сложно. В тоже время на рис. 3а отчетливо видна фазовая щель. Ее появление обусловлено наличием профилированной поверхности на пленке нефти. Таким образом, изучаемый метод визуализации фазовых объектов, помимо самой визуализации, позволяет на более чувствительном уровне определять изменения формы поверхности самой пленки, вызываемые греющим пучком.

Рассмотрим, как ведет себя термокапиллярная ячейка Цернике при визуализации фазовых объектов в зависимости от мощности освещающего ее гауссова пучка P_0 . В качестве фазового объекта по-прежнему будем использовать фазовую щель с шириной $d_{sl} = 0.04$ см и величиной фазового скачка $\varphi_{sl} = 0.1\pi$. Характеризовать процесс визуализации будем следующими параметрами (см. рис. 3б): $dI_1 = I_{max} - I_0$, $dI_2 = 1 - I_{min}$, $dI_0 = I_0 - 1$. Как отмечалось выше, собственно процесс визуализации определяется параметром dI_0 , а эффект усиления краев – параметрами dI_1 , dI_2 . На рис. 4а приведена зависимость данных параметров от мощности гауссова пучка P_0 . Для сравнения на рис. 4б приведена аналогичная зависимость, полученная при использовании фототермической ячейки Цернике. На обоих рисунках начальный линейный участок зависимости $y(x)$ в первую очередь заканчивается для величин dI_1 , dI_2 . Зависимости $dI_0(P_0)$, $dI_0(\Theta_Z)$ имеют более протяженные начальные линейные участки. Как показывает анализ визуализации с помощью термокапиллярной ячейки различных фазовых объектов, их визуализация с минимальными искажениями (за исключением эффекта усиления краев) осуществляется именно на линейных участках величин dI_1 , dI_2 . Таким образом, термокапиллярная ячейка с параметрами, описанными выше, может быть использована для адекватной визуализации фазовых объектов при освещении ее гауссовым пучком с мощностью $P_0 \leq 1$ мкВт.

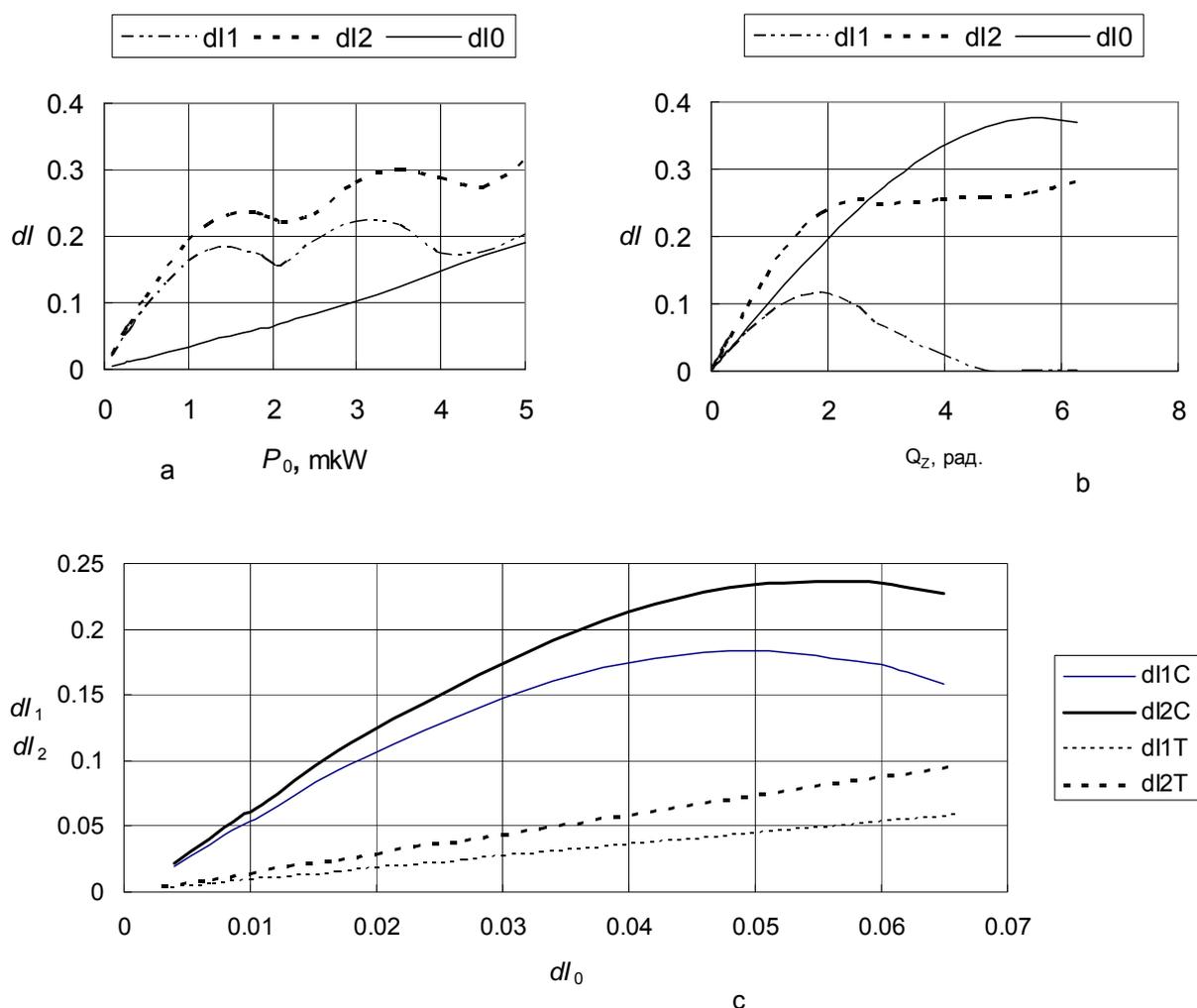


Рис. 4. Зависимость характеристик термокапиллярной ячейки Цернике от мощности P_0 освещающего ее гауссова пучка. Сравнение с аналогичным поведением фототермической ячейки Цернике. Роль эффекта усиления краев

Сравним между собой с точки зрения проявления эффекта усиления краев термокапиллярную и фототермическую ячейки Цернике. Для этого удобно данные рис. 4а, б представить в виде зависимостей $dl_1(dl_0)$, $dl_2(dl_0)$. Начальные участки этих зависимостей даны на рис. 4с. Индекс «Т» относится к фототермической, а индекс «С» – к термокапиллярной ячейкам. Как следует из этого рисунка, эффект усиления краев (тангенс наклона начального участка кривых $dl_1(dl_0)$, $dl_2(dl_0)$) примерно в 5 раз сильнее у термокапиллярной ячейки. С точки зрения визуализации это обстоятельство говорит о преимуществе использования фототермической ячейки относительно термокапиллярной. Однако в ряде задач бывает важна не столько визуализация, сколько выделение границ фазовых объектов. В этом случае более полезным может оказаться использование термокапиллярной ячейки.

Как отмечалось в [7], при использовании ячейки Цернике важна ее передаточная характеристика. В случае фазовой щели речь идет о соотношении между скачком фазы у щели φ_{sl} и результатом визуализации этого скачка, т.е. величиной dl_0 . Данная зависимость определялась при мощности освещающего щель гауссова пучка $P_0=1$ мВт (радиус пучка $w_0 = 0.17$ см ширина щели $d_{sl} = 0.04$ см). Она представлена на рис. 5. Начальный участок этой кривой может быть аппроксимирован линейной зависимостью $\varphi_{sl} = 9.52 \cdot dl_0$, где величина φ_{sl} дается в радианах. Линейная зависимость φ_{sl} от dl_0 имеет место при изменении φ_{sl} от 0 до 0.6 радиан или 0.2π . Можно ожидать, что термокапиллярная ячейка Цернике будет верно визуализировать фазовые объекты с максимальными изменениями фазы в пределах объекта

$|\delta\varphi| \leq 0.2 \cdot \pi$. При этом изображения объектов будут страдать от эффекта усиления краев. Чем резче края у исходного объекта, тем сильнее будет проявление данного искажающего эффекта.

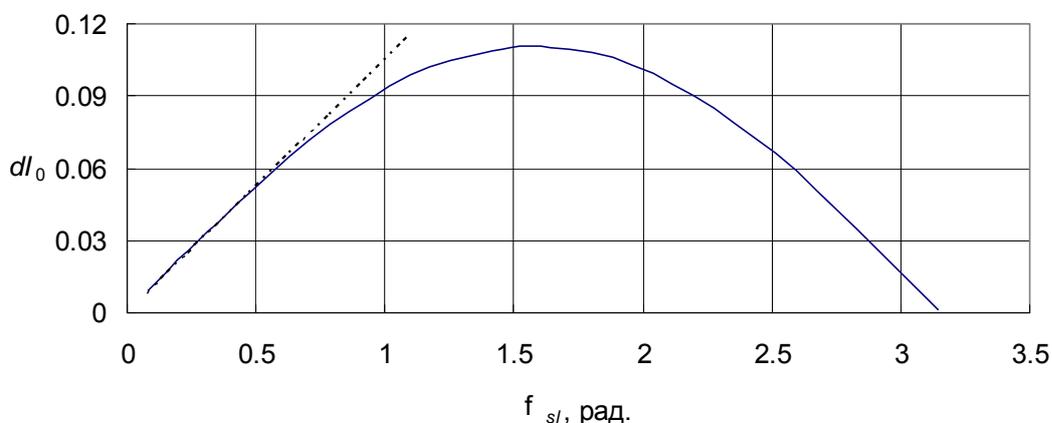


Рис. 5. Передаточная характеристика термокапиллярной ячейки Цернике

До сих пор рассматривалась визуализация относительно простых фазовых объектов. Интересно рассмотреть возможности предлагаемого метода визуализации на примере более сложного фазового объекта. Численно моделировался следующий фазовый объект. Была сделана фотография набора оптических элементов. В результате оцифровки фотографии было найдено распределение интенсивности изображения $I(x,y)$. Далее считалось, что на пути освещающего гауссова пучка в плоскости объекта располагается экран с комплексным коэффициентом пропускания $T(x,y) = \exp\{i \cdot \varphi_0 \cdot I(x,y) / \max(I)\}$. Другими словами, первоначально амплитудная информация переводилась в фазовую. Полученное в плоскости изображения при $\varphi_0 = 0.1\pi$ и $P_0 = 1$ мкВт распределение интенсивности представлено на рис. 6. Полученное изображение можно признать вполне удовлетворительным.



Рис. 6. Визуализация сложного фазового объекта термокапиллярной ячейкой Цернике

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены основные особенности и характеристики термокапиллярной ячейки Цернике. Для визуализации фазовых объектов в схеме Цернике использовался термокапиллярный эффект, возникающий на поверхности поглощающей свет тонкой пленки – пленки нефти. Используя подход, развитый в работе [7], была рассчитана форма поверхности термокапиллярного зеркала. Процесс визуализации фазовых

объектов с помощью такого зеркала анализировался в параксиальном приближении. В численном эксперименте при освещении пленки нефти сфокусированным гауссовым пучком на ее поверхности формировалось углубление, близкое по форме к конусу. Эта поверхность далека от требуемой в идеале для ячейки Цернике. Тем не менее, продемонстрировано, что с ее помощью реализуется визуализация как простых, так и сложных фазовых объектов. Характерной особенностью визуализации фазовых объектов с помощью термокапиллярной ячейки Цернике является присутствие довольно сильного эффекта усиления краев. Данный эффект может быть использован в ряде задач, где требуется выделение границ фазовых объектов. На примере простого объекта – фазовая щель – сравнивались характеристики фототермической и термокапиллярной ячеек Цернике. В частности, показано, что термокапиллярная ячейка в силу формы формируемого термокапиллярного зеркала проявляет более сильный (примерно, в 5 раз) эффект усиления краев. Определена передаточная характеристика термокапиллярной ячейки. Найдены диапазоны по мощности освещающего ячейку гауссова пучка и по изменению фазы в пределах визуализируемого объекта, внутри которых реализуется линейная связь между изменением интенсивности в изображении и изменением фазы в объекте.

Отмечено, что процесс визуализации фазовых объектов с помощью термокапиллярной ячейки является более чувствительным инструментом анализа формы термокапиллярного зеркала, чем процесс самофокусировки исходного, освещающего ячейку пучка. В тоже время термокапиллярная ячейка более проста в реализации, чем различные интерферометрические методики, с помощью которых возможен точный и тонкий анализ формы термокапиллярного зеркала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Da Costa, Galantroni G.** J.Phys., No.10, 1508(1982).
2. **Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Зуева А.Ю.** ПМТФ, т.42, №3, 130 (2001).
3. **Визнюк С.А., Суходольский А.Т.** Квантовая электроника, 15, №4, 767(1988).
4. **Тарасов О.А.** Опт. и спектр. Т.99, №6, 1006 (2005).
5. **Бубис Е.Л.** Письма в Ж Т Ф, **34**, №12, 29 (2008).
6. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики, Изд-во М. “Наука”, 1973, 720с.
7. **Bubis E.L., Matveev F.Z.** Preprint IAP RAS, №737, N.-Novgorod-2007.