

# Интерферометр для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления твердых веществ

*Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев*

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

В результате работ по усовершенствованию Государственного первичного эталона единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 была создана эталонная установка для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления твердых веществ. В докладе представлены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики эталонной установки, основу которой составляет цифровой интерферометр для измерения двумерного пространственного распределения (профиля) тонких срезов заготовок градиентных стекловолокон.

*Ключевые слова:* Государственный первичный эталон, стекловолокно, профиль показателя преломления, цифровой интерферометр.

*Цитирование:* Вишняков, Г. Н. Интерферометр для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления твердых веществ / Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 226–232..

## Введение

Измерения пространственного распределения (профиля) показателя преломления (ПП) обусловлено актуальностью таких измерений во многих областях науки и техники. Так, например, качество микрооптических устройств сильно зависит от правильного трехмерного распределения ПП внутри их объема. Такие устройства используются, например, в оптических сетях, микроэлектромеханических системах (MEMS), микролазерах. Особенно это важно для микроэлементов с модифицированным комплексным распределением ПП, к которым относятся оптические волокна, волноводы, линзы с градиентным показателем преломления и т.д.

Наиболее остро проблема измерения профиля ПП стоит при контроле качества изготовления оптического стекловолокна. Это связано с бурным развитием волоконно-оптических систем связи, а также с тем, что максимальная полоса пропускания волоконного световода достигается оптимизацией распределения ПП по сердцевине волокна.

Важное измерение при производстве оптического волокна — это определение профиля ПП заготовки, из которой вытягивается волокно. Информация о профиле ПП используется для прогнозирования характеристик волокна, которое в конечном итоге получается из заготовки, и для предоставления информации о размерах, которая необходима для управления окончательными процессами изготовления заготовки. Измерение профиля ПП

также периодически используется уже для вытянутых волокон, чтобы гарантировать, что процесс вытягивания существенно не изменил световодные свойства, предсказанные из анализа заготовки.

Измерения профиля ПП обычно выполняют на цилиндрических заготовках-преформах, поскольку форма профиля ПП после перетяжки в световод сохраняется с точностью до 0,1 %. Приборы для контроля профиля ПП оптических волокон являются неотъемлемой частью технологических линий по их производству. Профиль ПП определяет геометрические, волноводные и дисперсионные параметры световодов [1]. Чтобы эти параметры соответствовали международным коммерческим стандартам, профиль ПП необходимо контролировать с точностью от 5 до 10%.

В связи с этим к настоящему времени разработано большое количество разрушающих и неразрушающих методов измерения профиля ПП оптических волокон и их заготовок [2, 3]. Появились соответствующие средства измерений – оптические анализаторы заготовок волокна, например, приборы серии P-102 (York-Technology, США), P104 Preform Analyzer (Photon Kinetics, США). Есть также отечественные аналоги, так во Всесоюзном научно-исследовательском институте технической физики (РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск) разработана модель контрольно-измерительного прибора ИПП-1 для измерения профиля ПП заготовок [4].

После появления средств измерений профиля ПП встала необходимость метрологического обеспечения такого рода измерений. Так, например, в Национальной физической лаборатории (NPL, Англия), созданы два вида стандартных образцов волокна со ступенчатым профилем показателя преломления для калибровки анализаторов заготовок.

Поэтому в период с 2018 по 2020 год во ФГУП «ВНИИОФИ» была проведена модернизация эталона ГЭТ 138 в части обеспечения воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения единицы ПП в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,55 мкм. Результаты модернизации эталона ГЭТ 138 в части обеспечения воспроизведения, хранения и передачи единицы ПП твердых и жидких веществ на разных длинах волн из диапазона от 0,4 до 1,55 мкм были представлены в нашей предыдущей работе [5].

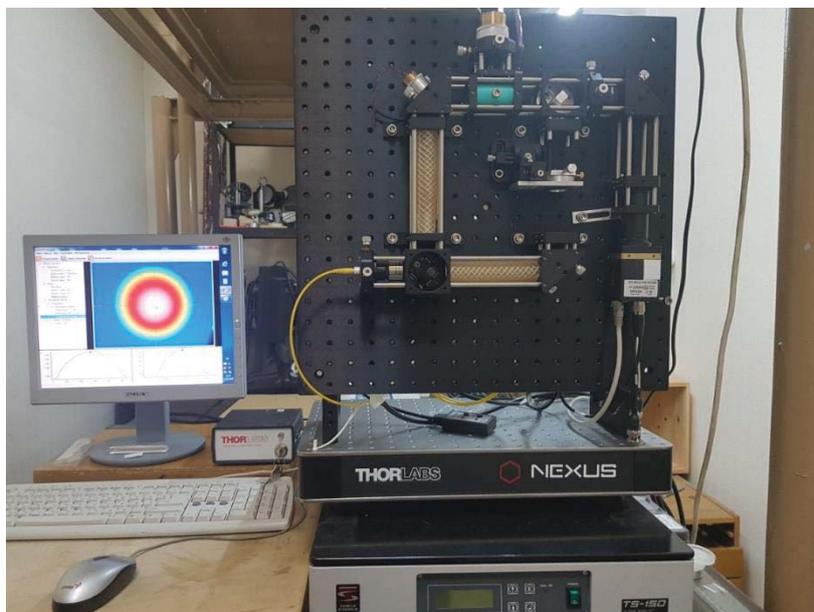
### **Описание цифрового интерферометра**

Для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы ПП твердых веществ в состав усовершенствованного ГЭТ 138-2021 вошел цифровой интерферометр со специализированным программным обеспечением WinPhast.

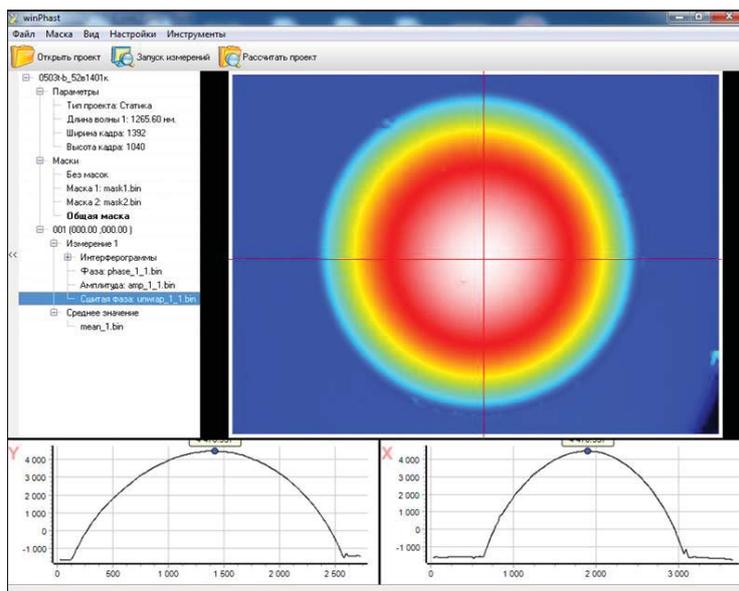
Основой эталонной установки служит цифровой интерферометр, собранный по схеме двухканального интерферометра Маха-Цандера (рис. 1). Для получения фазовых изображений объекта в нем реализован метод дискретного фазового сдвига при помощи управляемого от компьютера опорного зеркала, закрепленного на пьезоэлементе. Интерферограммы, получаемые при различных положениях зеркала, с помощью встроенной цифровой видеокамеры поступают в персональный компьютер, где производится их автоматическая обработка, в результате которой восстанавливается двумерное

распределение оптической разности хода. Зная толщину объекта по измеренной разности хода вычисляется двумерное пространственное распределение (профиль) ПП материала, из которого изготовлен объект.

В качестве материального носителя единицы двумерного пространственного распределения (профиля) ПП используется тонкий срез (толщиной около 100 мкм) заготовки градиентного волокна, которая представляет собой стеклянный цилиндр. Заготовка имеет нелинейный градиент показателя преломления от оси цилиндра к его боковой поверхности. Тонкий срез представляет собой диск с плоскопараллельными и полированными плоскостями. Для уменьшения относительного фазового набега исследуемый объект должен быть помещен в иммерсионную жидкость с показателем преломления близким по значению к ПП на боковой поверхности заготовки волокна. Результаты измерений в виде двумерного распределения ПП и графиков сечений отображаются на экране компьютера (рис. 2). Для управления вводом изображений, сдвигом пьезоэлемента и расшифровкой интерферограмм используется разработанное специализированное программное обеспечение WinPhast.



**Рис. 1.** Фотография цифрового интерферометра



**Рис. 2.** Восстановленная двумерная карта оптической разности хода излучения внутри тонкого среза заготовки градиентного волокна

В цифровом интерферометре измеряется разность оптических длин пути  $\Delta(x, y)$  изучения вдоль лучей, проходящих через срез и через иммерсионную жидкость. Искомое двумерное пространственное распределение (профиль) ПП вычисляется по следующей формуле (уравнение измерений):

$$n(x, y) = \frac{\Delta(x, y)}{d} + n_{им}, \quad (1)$$

где  $d$  — толщина среза,  $n_{им}$  — показатель преломления иммерсионной жидкости.

Функциональная схема цифрового интерферометра состоит из следующих блоков (рис. 3):

1 Цифровой интерферометр, включающий в себя:

- интерферометр Маха-Цандера;
- высокоразрешающую видеокамеру;
- лазерный модуль;
- блок питания лазерного модуля;
- блок управления пьезоэлемента.

2 Программно-аппаратный комплекс (ПАК) на основе ПЭВМ со специализированным программным обеспечением WinPhast.

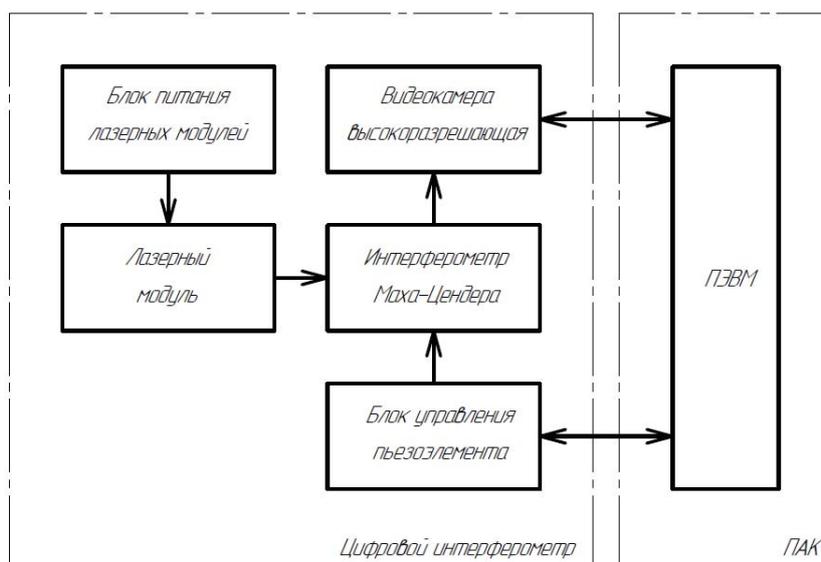


Рис. 3. Функциональная схема цифрового интерферометра

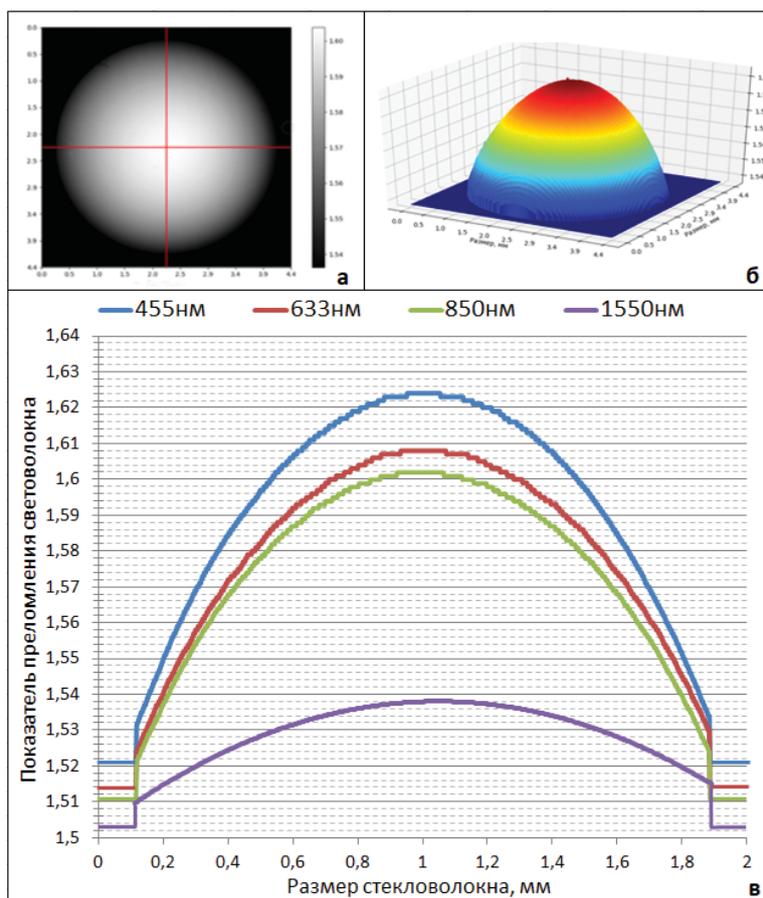
### Экспериментальные результаты

Исследование метрологических характеристик Государственного первичного эталона ГЭТ 138-2021 в части воспроизведения двумерного пространственного распределения (профиля) единицы ПП проводилось путем измерения на цифровом интерферометре двумерного профиля ПП эталонной меры, выполненной в виде тонкого среза заготовки градиентного волокна. Измеренный профиль ПП тонкого среза приписывается самой заготовке градиентного волокна, которая далее используется в качестве эталонной меры пространственного распределения ПП.

На цифровом интерферометре были проведены измерения пространственного распределения ПП тонкого среза толщиной 110 мкм заготовки градиентного волокна, изготовленного в Лаборатории специального стекла ООО НТО «ИРЭ-Полюс» (МО, г. Фрязино).

Тонкий срез стекловолокна был размещен между двух стеклянных пластин толщиной 1 мм, разделенных спейсером толщиной около 0,1 мм. Пространство между стеклянными пластинами было заполнено маслом иммерсионным для микроскопии в соответствии с ГОСТ 13739-78. ПП иммерсионного масла был предварительно измерен на рефрактометре Atago RX-9000α (Atago, Япония), а также на гониометре-спектрометре, входящем в состав ГЭТ 138-2021, с помощью полой призмы на различных длинах волн. Так, на длине волны излучения 633 нм, ПП масла составил 1,514126. В качестве исходной измеряемой величины была получена двумерная карта оптической разности хода (рис. 2).

Было проведено 10 измерений, на основании которых по формуле (1) производился расчет двумерного профиля ПП тонкого среза заготовки градиентного волокна на сетке 128×128 отсчетов для длины волны излучения 633 нм. Аналогичные измерения этого же среза с последующим расчетом двумерного профиля ПП были проведены на других длинах волн излучения 455, 850 и 1550 нм (рис. 4). Результаты исследования показывают, что с увеличением длины волны значение ПП в максимуме профиля уменьшается.



**Рис. 4.** Результаты измерений тонкого среза заготовки градиентного волокна: (а) полутоновое изображение двумерного распределения ПП на длине волны 633 нм, (б) аксонометрическое псевдоцветное изображение двумерного распределения ПП на длине волны 633 нм, (в) профили ПП на длинах волн 455, 633, 850 и 1550 нм

Измерение зависимости двумерного распределения ПП от длины волны излучения очень важно в оптическом производстве. Такие критические показатели характеристик волокна, как дисперсия и модальная эффективная площадь, можно наиболее точно предсказать, зная спектральную зависимость профиля ПП волокна. Поскольку большинство оптоволокон легированы сложной запатентованной смесью с несколькими видами добавок, которые могут оказывать неаддитивное влияние на показатель преломления самого волокна, в качестве производственного контроля может быть применяться метод анализа спектральной зависимости ПП волокна [6].

Исходя из уравнения измерений (1) вклад в расширенную неопределенность воспроизведения двумерного пространственного распределения единицы ПП вносят неопределенности измерений следующих величин:

- двумерной карты оптической разности хода  $\Delta(x, y)$  в мкм;
- показателя преломления иммерсионной жидкости  $n_{им}$ ;
- толщины среза  $d$  в мкм.

Проведенный расчет бюджета неопределенности показал, что расширенная неопределенность при коэффициенте охвата 2 не превышает  $5,0 \cdot 10^{-4}$  для диапазона длин волн от 0,44 до 0,7 мкм и не превышает величины  $4,4 \cdot 10^{-4}$  для диапазона от 0,7 до 1,55 мкм.

## Заключение

В соответствии с приказом Минпромторга России № 232 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений показателя преломления» от 01.02.2022. Государственный первичный эталон ГЭТ 138-2021 возглавляет Государственную поверочную схему. Наряду с другими единицами ГЭТ 138-2021 воспроизводит, хранит и передает двумерное пространственное распределение (профиль) единицы ПП рабочим эталонам 1-го разряда в виде эталонных мер профиля ПП и далее средствам измерения в виде анализаторов заготовок и самого стекловолокна. Модернизация Государственного первичного эталона единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 позволяет обеспечить единство измерений профиля ПП заготовок и самих оптических волокон, что важно для оптической промышленности и волоконно-оптических систем связи.

## Список источников

- [1] Гауэр, Д. Волоконно-оптические линии связи. М.: Радио и связь, 1992. 100 с.
- [2] Marcuse, D. Principles of Optical Fiber Measurement. New York: Academic Press. ch. 4. 1981. 360 p.
- [3] Philen D.L. Measurement and Characterization of Optical Fibers. In: Lin, C. (eds) Optoelectronic Technology and Lightwave Communications Systems. Springer, Dordrecht, 1989, [https://doi.org/10.1007/978-94-011-7035-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-011-7035-2_2).
- [4] Афанасьев, А.Н. Измеритель профиля показателя преломления показателя преломления оптических кварцевых заготовок / А.Н. Афанасьев, А.Ф. Иванов, В.И. Махров, А.А. Шибяев, Л.А. Мяслицин, Н.Н. Платонов // Известия Челябинского научного центра. - 2003. - №4. - С. 15-19.
- [5] Вишняков, Г.Н. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 / В.Л. Минаев, С.С. Бочкарева // Измерительная техника - 2022. - №5. - С. 4-9. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-4-9>.
- [6] Yablou A.D. Multiwavelength optical fiber refractive index profiling // Proc. SPIE. - 2010. - Vol. 7580. - P. 758015.

## Interferometer for reproducing, storing and transmitting a two-dimensional spatial distribution (profile) of a unit of refractive index of solids

*G. Vishnyakov, V. Minaev*

FGUP «VNIIOFI», Moscow, Russia

As a result of work on the improvement of the State Primary Standard of the unit of refractive index GET 138-2021, a reference setup was created for reproducing, storing and transmitting a two-dimensional spatial distribution (profile) of a unit of refractive index of solids. The report presents the composition, principle of operation and main metrological characteristics of the reference setup, which is based on a digital interferometer for measuring the two-dimensional spatial distribution (profile) of thin sections of preform of glass fibers.

*Keywords:* State primary standard, Glass fiber, Refractive index profile, Digital interferometer.