

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ, ЗАПИСАННЫХ В ФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ

*Д. А. Гурьев*

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

В последнее время публикуется много работ, посвященных записи оптических волноводов методом фемтосекундной лазерной записи в различных средах, являющихся активными средами твердотельных лазеров, с последующим их использованием в схемах волноводных лазеров или усилителей [1]. Но не во всех работах указываются характеристики получаемых волноводных структур.

Целью данной работы являлось исследование профиля показателя преломления волноводов, записанных с помощью метода лазерной фемтосекундной записи. Волноводы записывались в легированном ионами  $\text{Nd}^{3+}$  фосфатном стекле (ГЛС-24) с помощью лазера (1040 нм, 300 фс) с различными энергиями импульсов (200–400 нДж) и частотой повторения импульсов (100–400 кГц) и представляли собой набор уединенных треков на глубине 800 мкм на расстоянии 100 мкм друг от друга (рис. 1).

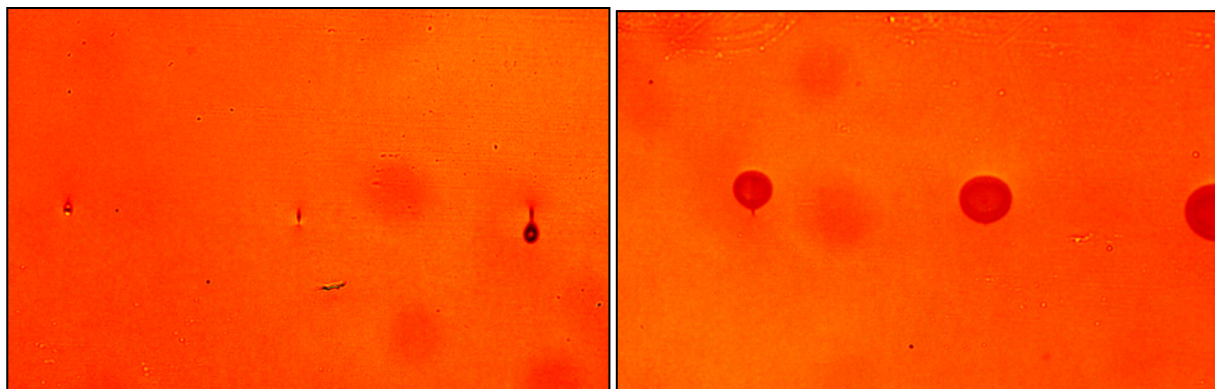


Рис. 1. Фотографии поперечных торцов волноводов

Исследование характеристик волноводов проводилось методами измерения выходной числовой апертуры [1] и количественной фазовой микроскопии [2]. Одновременное использование данных методов позволяет определить профиль показателя преломления, наведенного в волноводе.

Метод измерения выходной числовой апертуры позволяет оценить изменение показателя преломления в волноводе  $NA \approx \sqrt{n * \Delta n}$ , где  $n$  – показатель преломления среды, в которой записан волновод,  $\Delta n$  – амплитуда изменения показателя преломления. В данном методе пробное лазерное излучение вводится при помощи объектива в волновод и прошедшее через него излучение принимается на профилометр Ophir Beamstar FX-66 NT (рис. 2). По расходимости выходного излучения можно определить величину изменения показателя преломления.

Метод QPM основывается на анализе изображений, полученных симметрично вне фокуса исследуемой фазовой структуры (рис. 3). В данной работе для получения фазовых изображений исследуемых волноводов использовался лазерный конфокальный микроскоп LSM-710-NLO.

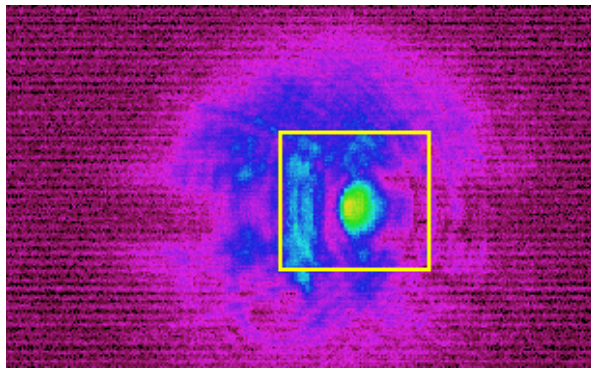


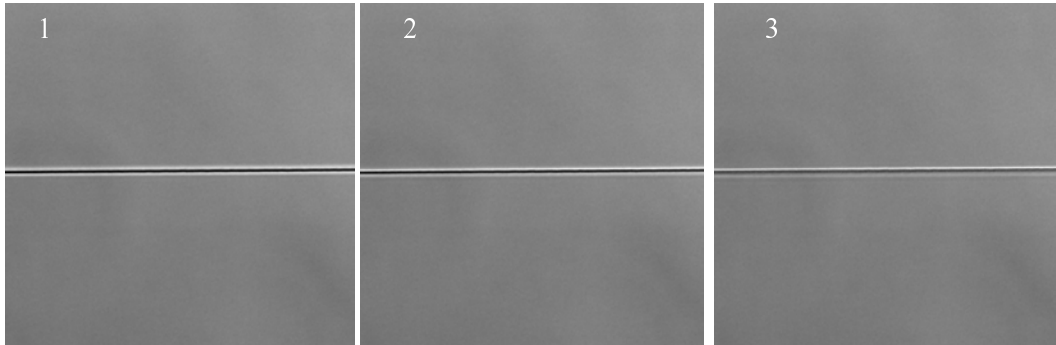
Рис. 2. Изображение, полученное с помощью профилометра на выходе из волновода

Анализируются изображения, полученные вне фокуса (рис. 3) (отклонение составляло 6–20 мкм, в зависимости от размера исследуемого объекта). Далее для определения относительного фазового сдвига использовалось обратное решение уравнения для интенсивности

$$-k \frac{\partial I(r_{\perp}, z)}{\partial z} = \nabla * [I(r_{\perp}, 0) * \nabla_{\perp} \varphi(r_{\perp}, 0)], \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число,  $I(r_{\perp}, z)$  – распределение интенсивности относительно поперечной координаты  $r_{\perp}$ ,  $I(r_{\perp}, 0)$  – распределение интенсивности полученное в фокусе,  $\varphi(r_{\perp}, 0)$  – набег фазы.

А)



Б)

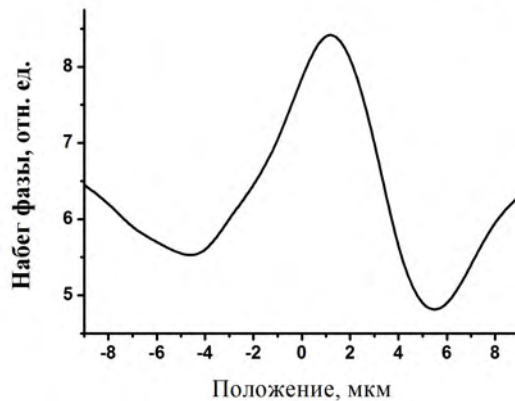


Рис. 3. А) изображения полученные на фазовом микроскопе: 1 – отстройка от фокуса +4 мкм, 2 – изображение в фокусе, 3 – отстройка от фокуса – 4 мкм. Б) полученный из решения уравнения (1) относительный набег фазы

После определения относительного набега фазы использовалось обратное распределение Абея для получения профиля показателя преломления в волноводе (рис. 4).

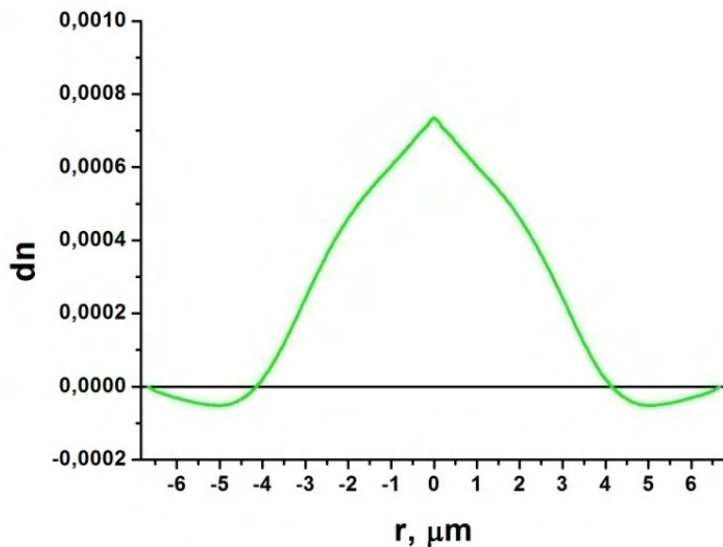


Рис. 4. Распределение показателя преломления волновода

Методами количественной фазовой микроскопии и методом измерения выходной апертуры были получены профили показателя преломления уединенных волноводов, записанных фемтосекундными лазерными импульсами в фосфатном стекле. Показатель преломления записанных волноводов варьировался в пределах  $10^{-4}$ – $10^{-3}$ .

#### Список литературы

1. Rafael R. Gattass, Eric Mazur. Femtosecond laser micromachining in transparent materials: article // Nature photonics, 2008. Т. 2. С. 219–225.
2. Miyamoto I. и др. Fusion welding of glass using femtosecond laser pulses with high-repetition rates: article // J. Laser Micro/Nanoeng. 2007. Т. 2. N 1. С. 57–63.
3. Bellair C. J. и др. Quantitative phase amplitude microscopy IV: imaging thick specimens: article // J. Microsc. Wiley Online Library, 2004. Т. 214. N 1. С. 62–69.