

## НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВИНЦОВО- ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 515 НМ

Демин Б.С.<sup>1</sup>

Научный руководитель – доцент Асеев В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

[d\\_bogdan@itmo.ru](mailto:d_bogdan@itmo.ru)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

### Введение

Материалы с высокой нелинейной восприимчивостью третьего порядка востребованы для оптической коммутации, ограничения интенсивности и фазовой модуляции лазерного излучения. Помимо высокой нелинейности, для практического применения важны воспроизводимость синтеза, простота обработки, изотропность и получение оптически однородных объёмных образцов. Этим требованиям соответствуют оксидные стёкла, которые благодаря аморфной структуре не требуют ориентации и позволяют предсказуемо изменять свойства варьированием состава.

Перспективны тяжёлые оксидные системы с высокополяризуемыми катионами. Введение PbO увеличивает электронную поляризуемость и снижает эффективную ширину запрещённой зоны матрицы, усиливая нелинейный отклик третьего порядка. В качестве стеклообразующей основы выбран GeO<sub>2</sub> с широкой областью прозрачности и меньшей шириной запрещённой зоны по сравнению с SiO<sub>2</sub>.

Несмотря на данные о высокой нелинейности германатных стекол с тяжёлыми оксидами [1], систематические исследования бинарной системы PbO–GeO<sub>2</sub> без добавок при 515–532 нм отсутствуют. Этот диапазон интересен тем, что при двухфотонном возбуждении энергия  $2\hbar\omega$  сопоставима с шириной запрещённой зоны, что позволяет изучать как нелинейный показатель преломления, так и коэффициент двухфотонного поглощения.

В настоящей работе методом Z-scan [2] исследована серия стекол PbO–GeO<sub>2</sub> с различным мольным соотношением (40/60, 30/70, 20/80, 10/90), а также система PbO/GeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> (30/35/35). Целью исследования является установление зависимости нелинейного показателя преломления и коэффициента двухфотонного поглощения от составов стекол при фемтосекундном (224 фс) возбуждении на длине волны 515 нм. Использование фемтосекундного лазера с частотой повторения менее 1 кГц минимизирует вклад тепловых эффектов, а высокое качество гауссова пучка ( $M^2 = 1.05$ ) обеспечивает корректность применения метода Z-scan.

### Основная часть

Стекла системы  $x\text{PbO}-(100-x)\text{GeO}_2$  ( $x = 10, 20, 30, 40$  мол.%) получены методом высокотемпературного синтеза в электрической печи при температурах 1200–1300 °С. Плавка осуществлялась в корундовых тиглях с перемешиванием расплава платиновой мешалкой для обеспечения однородности состава.

Измерения выполнены методом Z-scan в режимах открытой и закрытой диафрагмы при фемтосекундном возбуждении (224 фс) на длине волны 515 нм.

Абсолютные значения нелинейного показателя преломления определялись методом сравнительной калибровки относительно плавленого кварца при идентичных условиях облучения. Такой подход позволил минимизировать влияние неопределённости пиковой интенсивности и параметров гауссова пучка. Для коэффициента двухфотонного поглощения на данный момент получены относительные значения; определение абсолютных величин требует дополнительной калибровки параметров пучка.

Усовершенствованный алгоритм измерений и обработки данных, по сравнению с классическим методом Z-scan, позволил снизить влияние клиновидности и неоднородности образцов путём нормировки измерений на высокой мощности на измерения, выполненные при малой мощности, когда нелинейные эффекты отсутствуют.

Для калибровки использовано литературное значение для кварца  $n_2 \approx 0.25 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup>/Вт. Для стекол PbO–GeO<sub>2</sub> получены значения  $n_2 (\times 10^{-15}$  см<sup>2</sup>/Вт): 6.8 (40 мол. % PbO), 6.3 (30%), 3.6 (20%) и 1.1 (10%). Таким образом, при увеличении содержания PbO от 10 до 40 мол. % величина  $n_2$  возрастает более чем в шесть раз. Относительные значения коэффициента двухфотонного поглощения  $\beta$  (усл. ед.) изменяются аналогично: 28, 10.7, 5.4 и 2.5 соответственно. Полученные данные свидетельствуют о монотонном увеличении как действительной, так и мнимой частей  $\chi^3$  с ростом содержания PbO. Наблюдаемая зависимость коррелирует с увеличением электронной поляризуемости иона Pb<sup>2+</sup> и снижением эффективной ширины запрещённой зоны стеклянной системы, что усиливает электронный вклад в нелинейный отклик при возбуждении в зелёной области спектра.

Дополнительно исследована система PbO/GeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> (30/35/35). Замещение части GeO<sub>2</sub> на SiO<sub>2</sub> приводит к снижению  $n_2$  до  $2.7 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup>/Вт и уменьшению относительного значения  $\beta$  до 6.4, что примерно в два раза меньше по сравнению с бинарной системой аналогичного содержания PbO.

### Выводы

В работе впервые получены систематические данные о нелинейно-оптических свойствах бинарных стекол PbO–GeO<sub>2</sub> при фемтосекундном возбуждении на 515 нм. Установлено монотонное увеличение нелинейного показателя преломления и коэффициента двухфотонного поглощения с ростом содержания PbO: при увеличении концентрации от 10 до 40 мол. % величина  $n_2$  возрастает более чем в шесть раз, а  $\beta$  более чем в 10 раз.

Показано, что частичное замещение GeO<sub>2</sub> на SiO<sub>2</sub> приводит к заметному снижению действительной и мнимой частей  $\chi^3$ , подтверждая ключевую роль стеклообразующей матрицы и эффективной ширины запрещённой зоны в формировании нелинейного отклика третьего порядка.

Разработанный метод измерений с эталонной калибровкой и нормировкой сигналов обеспечивает воспроизводимое определение  $n_2$  для многокомпонентных стеклянных систем. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации состава тяжёлых оксидных стекол для задач нелинейной фотоники.

### Список использованных источников

1. Besse V., Fortin A., Boudebs G., Valle P. S., Nalin M., de Araújo C. B. Picosecond nonlinearity of GeO<sub>2</sub>–Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–PbO–TiO<sub>2</sub> glasses at 532 and 1,064 nm // Applied Physics B: Lasers and Optics. — 2014. — Vol. 117. — P. 891–895.
2. Sheik-Bahae M., Said A. A., Wei T.-H., Hagan D. J., Van Stryland E. W. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1990. — Vol. 26, No. 4. — P. 760–769.