

35. Голографическая запись в фоторефрактивных стеклах и кристаллах: сравнительный анализ

Н. В. Никоноров, В. М. Петров

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлены оригинальные результаты исследования оптических и голографических характеристик большого набора фоточувствительных материалов, используемых в современной оптической голографии: кристаллов (силленитов, ниобата лития и титаната бария, с различными допантами, аддитивно-окрашенного флюорита) и стекол (фото-термо-рефрактивных, пористых, халькогенидных). Обсуждены механизмы голографической записи, представлен сравнительный анализ основных голографических характеристик, показаны преимущества и недостатки фоточувствительных стекол и кристаллов, а также обсуждены области практических применений.

Ключевые слова: Силенины, Ниобат лития, Титанат бария, Пористое стекло с фоточувствительными добавками, Фото-термо-рефрактивное стекло, Халькогенидное стекло, Объемные брэгговские решетки, Голографические оптические элементы.

Цитирование: **Никоноров, Н. В.** Голографическая запись в фоторефрактивных стеклах и кристаллах: сравнительный анализ / Н. В. Никоноров, В. М. Петров // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 210–219.

Введение

В настоящее время особое место среди большого разнообразия органических и неорганических фоточувствительных материалов для голографической записи информации занимают неорганические фоторефрактивные кристаллы и стекла. В отличие от тонких голограмм толщиной ≈ 10 мкм, которые характеризуются параметром Клейна $Q \approx 10$, эти среды позволяют записывать сверхглубокие голограммы толщиной в десятки мм ($Q > 1000$). Кроме того, по сравнению с фоточувствительными полимерами, галоидосеребряными эмульсиями и бихроммированной желатиной, кристаллы и стекла имеют высокие эксплуатационные характеристики (высокая механическая, термическая и оптическая прочность, твердость, абразивоустойчивость, химическая устойчивость и т. д.). Эти характеристики делают кристаллы и стекла крайне востребованными для создания голографических оптических элементов и устройств нового поколения. В свою очередь, у фоторефрактивных кристаллов и стекол есть свои достоинства и недостатки, которые разграничивают и определяют их области применения. Так, например, к достоинствам кристаллов можно отнести их высокие и разнообразные активные характеристики (нелинейно-оптические, электрооптические, фоторефрактивные) по сравнению со стеклами. В тоже время стекла допускают применение к ним технологий, которые невозможны для кристаллов, но которые крайне востребованы для голографических задач. К ним прежде всего, можно отнести вытяжку оптического волокна, напыление, ионный

обмен, прессование и т. д. В настоящем докладе представлены оригинальные результаты исследования оптических и голографических характеристик фоточувствительных материалов, используемых в современной оптической голографии: кристаллов (силлениты, ниобат лития и титанат бария, с различными допантами), а также стекол (фото-термо-рефрактивные, пористые и халькогенидные).

Пожалуй, одной из самых успешных областей применения фоторефрактивных материалов является их использование в качестве эффективной среды для записи толстых (объемных) голограмм, отвечающих условиям дифракции Брэгга. Следует выделить два наиболее характерных примера широкого практического использования таких голограмм (или решёток): это оптические фильтры и динамические (адаптивные) светоделители.

В качестве оптических фильтров используются т. н. «статические», или постоянные отражательные решётки Брэгга, записанные в материале, который способен хранить голограмму практически неограниченное время. Голографические фильтры находят самое широкое применение в волоконно-оптических линиях связи для выделения требуемого частотного канала, а также в полупроводниковых лазерах для управления параметрами излучения. Высокодобротные голографические фильтры оказались чрезвычайно востребованными в системах квантовых коммуникаций.

Отдельно следует выделить отражательные решётки, возникающие в активном веществе (например, в неодимовом стекле) мощных импульсных лазеров при интерференции волн, распространяющихся внутри резонатора. В этом случае время формирования и релаксации решётки определяется характерными временами квантовых переходов вещества. Такие решётки оказывают заметное влияние на спектральные характеристики генерируемого излучения.

В качестве динамических (адаптивных) светоделителей для адаптивной интерферометрии используются решётки, записанные в материалах, в которых времена записи и стирания голограммы находятся в диапазоне от десятков микросекунд до сотен миллисекунд. Это позволяет создавать интерферометры, которые проявляют способность «адаптации» к внешним помехам, что существенно для различных практических применений.

1. Фото-термо-рефрактивные стекла

Новые фторидные, хлоридные и бромидные ФТР стекла разработаны в Университете ИТМО (Санкт-Петербург) [1–3]. В этих стеклах в результате УФ облучения и последующей термообработки вырастают наночастицы серебра и нанокристаллы фторида натрия NaF, хлорида AgCl и бромида AgBr серебра в виде оболочки на серебряной наночастице. Таким образом, ФТР стекло представляет собой гетерофазную структуру, состоящую из основной стеклообразной фазы и распределённой в ней кристаллической фазы. Формирование кристаллической фазы в облученной области приводит к изменению показателя преломления, достигающему значения $\Delta n \approx 0,001$. Для фторидных ФТР стекол Δn — отрицательное, для хлоридных и бромидных ФТР стекол Δn — положительное. Наведенные потери в ФТР стеклах обусловлены прежде

всего полосой поглощения наночастиц серебра в спектральной области 420–450 нм. Для фторидных ФТР стекол наведенные потери малы и не превышают $0,1 \text{ см}^{-1}$, для хлоридных и бромидных стекол наведенные потери могут превышать 10 см^{-1} . Эти потери могут быть уменьшены до $0,1 \text{ см}^{-1}$ за счет технологии обесцвечивания с использованием импульсного лазерного излучения ($\lambda \approx 1 \text{ мкм}$) фемтосекундной длительности. Различие в показателях преломления облученной и необлученной области позволяет записывать фазовые (для случая фторидных ФТР стекол) или амплитудно-фазовые (для хлоридных и бромидных ФТР стекол) голограммы.

Можно отметить следующие достоинства ФТР стекол и голограмм на их основе. Голограммы (в том числе, брэгговские решетки) могут быть записаны на большой глубине (0,1–10 мм). Записанные элементы имеют высокую дифракционную эффективность (до 99,9%), а также угловую (0,1 мрад) и спектральную (0,01 нм) селективность. ФТР стекла допускают запись брэгговских решеток с высоким пространственным разрешением (период $\approx 100 \text{ нм}$). Голограммы, записанные в ФТР стекле, обладают высокой химической устойчивостью, механической и термической прочностью, которые близки коммерческому оптическому стеклу К8 (зарубежный аналог ВК7). Кроме того, они выдерживают воздействие мощного непрерывного и импульсного лазерного излучения. Пороги оптического пробоя ФТР стекла близки к порогам пробоя коммерческого оптического стекла ВК7. Голограммы могут выдерживать многократный нагрев до высоких температур ($500 \text{ }^\circ\text{C}$) без потери своих свойств. Достоинством ФТР стекол, как материала для записи голограмм, также является его однородность (флуктуации показателя преломления в объеме порядка 10^{-5}) и воспроизводимость характеристик как при синтезе исходного стекла, подобно оптическому стеклу К8 (ВК7), так и при фото-термо-индуцированной кристаллизации. ФТР стекла допускают применение традиционных методов механической обработки — шлифование и полирование, а также разнообразные технологии формования (например, прессование, литье в форму и создание асферических поверхностей). Также возможна вытяжка оптического волокна из ФТР стекла.

Отмеченные особенности ФТР стекол позволили в университете ИТМО разработать и продемонстрировать широкий спектр голографических оптических элементов и устройств для лазерной техники и метрологии:

- сверхузкополосные спектральные фильтры для лазерных диодов и твердотельных лазеров,
- фильтры для температурной стабилизации длины волны излучения,
- сумматоры и мультиплексоры лазерных каналов,
- чирпированные решетки для компрессии световых импульсов,
- голографические призмы для высокоточных угловых измерений,
- голографические метки для коллиматорных прицелов.

2. Пористые стекла, активированные галогенидами серебра

В последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к нанопористым силикатным стеклам оптического качества и значительное расширение спектра их использования для голографических задач. Активированные нанопористые силикатные стекла (занимают особое место среди голографических материалов, так как обладают свойствами, широко востребованными в современных голографических оптических элементах. Это, прежде всего, высокая механическая и лучевая прочность в сочетании с высокой абсорбционной способностью; высокая прозрачность в видимой и ближней ИК областях спектра; возможность реализации широкого диапазона размеров пор и свободного объема пор; возможность регулировать оптические свойства образцов введением в свободный объем пор вещества с заданным показателем преломления; возможность получения композитных материалов с рабочим веществом в виде отдельных наночастиц, распределенных в макрообъеме.

В университете ИТМО разработана технология получения нанопористых стекол с введенными в поры галогенидов серебра [5]. Объемная голографическая среда обладает комплексом свойств традиционных галогенидосеребряных фотоматериалов на подложке: как собственной чувствительностью галогенидов серебра, так и возможностью оптической сенсбилизации в видимом и ближнем ИК диапазоне спектра, а также возможностью использования процессов химико-фотографической обработки. Толщина голографической среды достигает 4–5 мм. Фоточувствительность голографической среды $\approx 10\text{--}100$ Дж/см², изменение показателя преломления $\Delta n \approx 0,1$, срок хранения информации десятки лет. Отличительной особенностью созданной среды, является ограниченный максимальный размер синтезируемых частиц галогенидов серебра и проявленных частиц металлического серебра, который не может превышать максимального размера пор силикатной матрицы (7 нм), что определяет высокое разрешение среды, достигающее более 3000 мм⁻¹. Одним из ключевых недостатков такой среды является то, что активированные пористые стекла, как и всякая губка, впитывает из воздуха влагу, органические вещества и поглощающие включения. Это накладывает дополнительные технологические усилия по защите поверхности пористых стекол. Тем не менее разработанное нанопористое стекло с галогенидом серебра может быть использовано в качестве носителей информации в системах оптико-голографической архивной памяти.

3. Халькогенидные стекла

Одной из перспективных гомогенных регистрирующих стеклообразных сред являются халькогенидные стекла. Отличительной особенностью данных стекол является высокий уровень пропускания в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазонах (1–8 мкм), а также высокий показатель преломления (2,6–2,8) [6]. Важной особенностью халькогенидных стекол является то, что они могут изменять пропускание и показатель преломления под воздействием оптического излучения. Эффекты фотоиндуцированного изменения поглощения и показателя преломления данных стекол вблизи края фундаментального поглощения вызван мгновенными фотоструктурными изменениями, которые приводят к увеличению количества структурных

неоднородностей, приводящих к фотоиндуцированному уменьшению ширины запрещенной зоны. Важно отметить, что изменения носят обратимый характер, и стекло просветляется в процессе отжига вблизи температуры стеклования. Облучение излучением вблизи фундаментального края поглощения халькогенидных стекол приводит к увеличению показателя преломления до $\Delta n \approx 0,05$ для стекол системы As–S–Ge. На основе халькогенидных стекол возможно создание брэгговских отражателей и различных интегрально-оптических устройств, работающих в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазоне. Кроме того, возможна вытяжка оптического ИК волокна и запись в нем брэгговских решеток. Несмотря на большую привлекательность халькогенидных стекол в ИК диапазоне, данные стекла имеют ряд недостатков. Одним из ключевых недостатков халькогенидных стекол и пленок является их токсичность при синтезе, так как в процессе высокотемпературного синтеза образуются летучие токсичные соединения мышьяка, теллура, серы и селена, которые требуют использования специального защитного оборудования, что приводит к значительному удорожанию и усложнению производственного процесса. Кроме того, голограммы на основе халькогенидных стекол не обладают достаточной стойкостью к внешним воздействиям, таких как синее и УФ излучение, а также нагрев выше 200 °С.

4. Аддитивно-окрашенный флюорит

В университете ИТМО разработан новый голографический материал на основе фторидных кристаллов со структурой флюорита, содержащих фотохромные центры окраски [7]. Характерной особенностью этой структуры является жесткость катионной и высокая лабильность анионной подрешетки, которой благоприятствует огромное количество пустот катионной подрешетки — междоузлий. Кристаллы со структурой флюорита — это широкозонные диэлектрики, прозрачные в широкой спектральной области, включающей видимую и значительную часть УФ и ИК областей спектра. Фторид кальция является одним из основных оптических материалов, который широко используется в оптической технике, в частности, для фотолитографических объективов совместно с эксимерными лазерами в производстве полупроводниковых чипов. Сам по себе, кристалл флюорита нефотохромен, оптическое излучение в области прозрачности этого кристалла не изменяет его оптические свойства. Для придания им этого свойства в нем должны быть созданы фотохромные центры. Создание центров окраски во фториде кальция требует дополнительной — после выращивания кристаллов — процедуры, отжига в восстановительной атмосфере паров металла-катиона. В ходе этой процедуры, именуемой аддитивным окрашиванием, восстановитель реагирует с решёточным фтором у поверхности кристалла. В ходе этой реакции возникают анионные вакансии и электроны, которые диффундируют вглубь кристалла. Диффундирующие в кристалл анионная вакансия и электрон могут рекомбинировать с образованием простейших F-центров окраски, которые в процессе окрашивания могут преобразовываться в более сложные центры, включающие несколько (или много) вакансий и электронов.

В основе фотохромии фторида кальция лежит индуцированное светом преобразование центров окраски из одного типа в другой. Фотохромия легированных кристаллов фторида кальция связана, прежде всего, с ионным движением. Под действием света и тепла происходит перемещение по кристаллу анионных вакансий, отщепившихся от ионизованных центров окраски. Этот процесс приводит, в конечном счете, к формированию центров окраски с другим составом и структурой, нежели до освещения кристалла, и сопутствующему изменению его оптических свойств. Изменение показателя преломления в обесцвеченном флюорите небольшое и составляет $\Delta n \approx 0,0001$. Оно обусловлено только изменением поглощения. Аддитивно-окрашенный фторид кальция является высокостабильной голографической средой. Толщина голограмм может достигать нескольких сантиметров. Характерной особенностью таких решеток является их исключительная стабильность — она сохраняется при нагреве кристалла вплоть до 200 °С. При нормальных условиях эксплуатации голограмма, записанная во фториде кальция, сохраняется практически неограниченное время. Это обстоятельство, а также высокая устойчивость флюорита, как матрицы, по отношению к ряду внешних воздействий, позволяет использовать записанные в нем голограммы в элементах метрологического назначения. Одним из таких элементов является голографическая призма — многозначная мера плоского угла.

5. Фоторефрактивные кристаллы

В качестве наиболее характерных фоторефрактивных кристаллов можно выделить ниобат лития LiNbO_3 , титанат бария BaTiO_3 , и кристаллы группы силленитов: $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ — силикат висмута, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ — германат висмута $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ — титанат висмута [8].

Все эти материалы являются широкозонными полупроводниками, поэтому механизмы голографической записи определяются способностью фотовозбуждённых фотоэлектронов перемещаться в зоне проводимости. Движение фотоэлектронов происходит за счёт или диффузионного или дрейфового механизмов. Темновая проводимость фоторефрактивных кристаллов s_d составляет 10^{-12} – 10^{-16} см/Ом.

Основные параметры фоторефрактивных кристаллов, влияющие на голографическую запись приведены в таблице 1.

Как следует из данных, приведённых в таблице 1, спектральная чувствительность большинства фоторефрактивных кристаллов, определяемая шириной запрещённой зоны, располагается в сине-зелёной области спектра. Следует отметить, что наличие мелких ловушечных уровней в кристаллах группы силленитов, допускает использование для записи динамических голограмм света из красной области спектра.

Одной из важнейших характеристик, дающей представление о возможности использовать тот или иной материал для голографической записи является голографическая чувствительность, или чувствительность к записываемому свету.

Как правило, в качестве такой универсальной характеристики используют величину энергии, необходимую для записи одной элементарной голограммы площадью 1 см². Однако,

Табл. 1

	Точечная группа	Ширина запрещённой зоны	Эл.-опт. коэфф r_{ij}	Показатель преломления n	Время записи/ хранения	Примечания
LiNbO₃, допированный Fe²⁺, ³⁺	3 m	3–4 эВ	$r_{33} = 32,2$ пм/В	$n_e \approx 2,14$ $n_o \approx 2,21$ $l = 1550$ нм	минуты–сутки (без фиксации)	записанная голограмма требует фиксации
BaTiO₃, допированный Со	4 mm	3,0 ± 0,5 эВ	$r_{51} = 820$ пм/В	$n_e \approx 2,4$ $n_o \approx 2,46$ $l = 550$ нм	0,1–10 с	
Силлениты	23	3,2 ± 0,5 эВ мелкие ловушки: 1,0–1,5 эВ	$r_{41} = 4,74$ пм/В	$n = 2,25–2,54$	0,01–5 с	оптическая активность 8–30°/мм

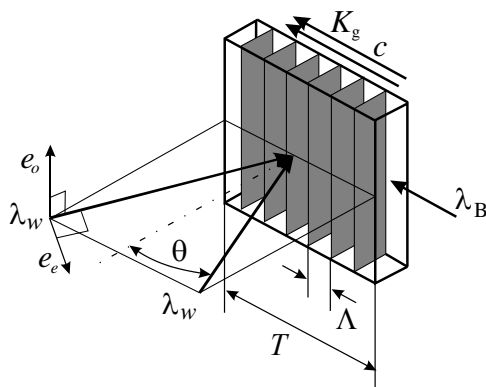
эта характеристика существенным образом зависит, по крайней мере, от двух факторов. Во-первых, она зависит от критерия, по которому определяется уровень записи голограммы. Так, например, может использоваться критерий, когда дифракционная эффективность записанной решётки составляет 1 %, а может использоваться критерий, когда дифракционная эффективность составляет 100 %. Во-вторых, зависит от типа самой записываемой голограммы: «отражательная» или «пропускающая». Более того, довольно часто, при использовании голограммы в качестве элемента некоего устройства, например, в адаптивных интерферометрах, важно не столько абсолютное значение дифракционной эффективности, а величина отношения сигнал-шум, регистрируемого фотоприёмником на выходе голограммы. Поэтому ниже мы приведём некоторые, наиболее часто используемые схемы записи голограмм с указанием конкретных параметров записи.

На рисунке 1 приведена схема записи отражательных голограмм в ниобате лития. Запись производится лучами на длине волны λ_w в пропускающей геометрии (из сине-зелёной области спектра), а считывание — в отражающей геометрии из красной или инфракрасной области спектра.

В этой схеме, для записи голограммы, имеющей 100% дифракционной эффективности в отражательной геометрии при толщине отражательной голограммы $T = 1$ см, необходимо обеспечить экспозицию записывающим светом на длине волны 0,53 мкм мощностью примерно 10 мВт/см² в течение 3–5 минут.

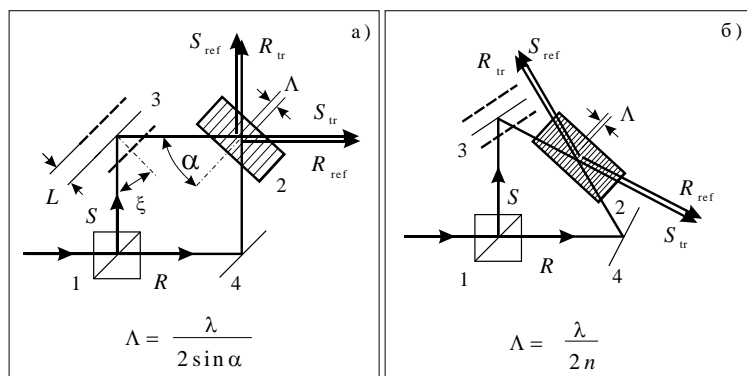
На рисунке 2 показана схема записи и использования динамических голограмм в кристаллах титаната бария и в кристаллах силленитов.

Как видно из данных, представленных на рисунке 3, максимальные значения дифракционной эффективности и максимальная чувствительность интерферометра с использованием титаната бария достигают своего максимального значения при разных толщинах кристалла.



θ — угол записи на длине волны λ_w , λ_B — длина волны, используемая для считывания и отвечающая условиям Брэгга в отражательной геометрии, T — толщина голограммы в отражательной геометрии, Λ — пространственный период голограммы, K_g — волновой вектор голограммы, c — оптическая ось кристалла

Рис. 1. Схема записи голограммы в пропускающей геометрии для получения отражательных решёток



а) Пропускающая геометрия

б) Отражательная геометрия

S и R — сигнальный и опорный пучки, 1 — светоделитель, 2 — динамическая голографическая решётка, выполняющая роль адаптивного светоделителя, 3 и 4 — зеркала. Зеркало 3 периодически перемещается относительно своего среднего положения на расстояние L .

Рис. 2. Использование динамической отражательной решётки в качестве адаптивного светоделителя в интерферометре Маха — Цендера

Абсолютное значение дифракционной эффективности достигает своего максимального значения примерно в 30% при величине экспозиции записывающим светом на длине волны 0,53 мкм мощностью примерно 5 мВт/см² в течение десятых долей секунд.

Аналогичная схема используется с динамическими отражательными решётками в силленитах. На рисунке 4 показаны зависимости чувствительности интерферометра и дифракционной эффективности на примере динамической голограммы, записанной в кристалле $Vi_{12}SiO_{20}$.

В этих экспериментах максимальное значение дифракционной эффективности 3% достигается при величине экспозиции записывающим светом на длине волны 0,53 мкм мощностью примерно 5 мВт/см² в течение сотых долей секунд.

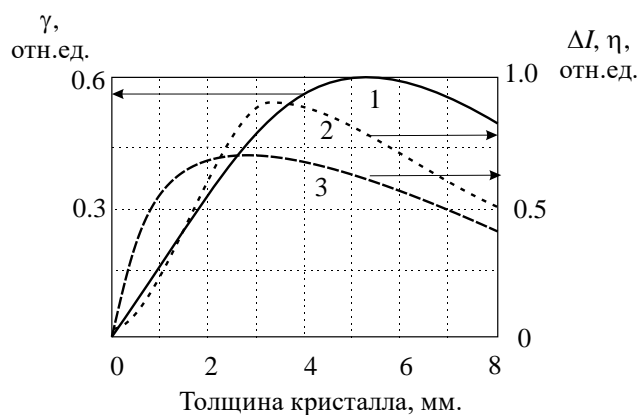
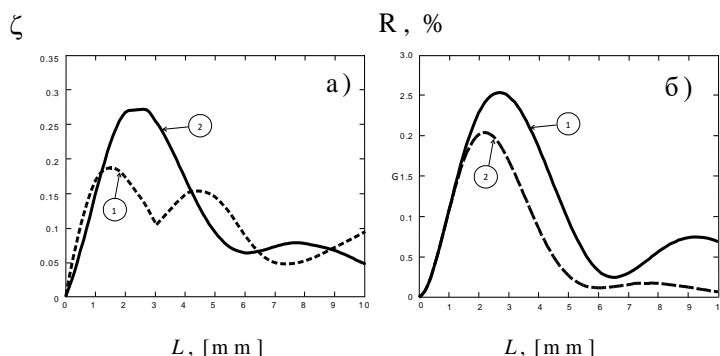


Рис. 3. Зависимости относительной чувствительности γ интерферометра (1), амплитуды модуляции ΔI (2) и дифракционной эффективности решётки η (3) в зависимости от толщины кристалла титаната бария



1 — линейная поляризация S-луча вдоль [100], 2 — S-луч поляризован вдоль [110]

Рис. 4. Относительная чувствительность интерферометра (а) и дифракционная эффективность динамической отражательной голограммы (б) в зависимости от толщины $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ кристалла с плотностью ловушек $N_A = 2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и направлением распространения света вдоль [001]

Заключение

Рассмотренные в данной статье фоторефрактивные стёкла и кристаллы представляют заметную часть неорганических голографических материалов, используемых в современных применениях.

Голографическая запись в фоторефрактивных материалах происходит за счёт изменения показателя преломления под действием записывающего света. В материале возникает фазовая голограмма, т. е. периодическая решётка изменения показателя преломления. Амплитуда такой решётки может достигать величин 10^{-2} – 10^{-5} . Вклад решётки поглощения, которая возникает как следствие соотношения Крамерса-Кронига вместе с фазовой решёткой, в случае фоторефрактивных материалов оказывается пренебрежимо малым. Это обеспечивает высокое качество записанных фазовых голограмм и сохранение высокой прозрачности материала во всех фоторефрактивных материалах.

Заметное различие между фоторефрактивными стёклами и кристаллами наблюдается в величине фоточувствительности к записываемому свету, которая на 2–3 порядка лучше у фоторефрактивных кристаллов. Однако, следует учитывать, что это приводит к гораздо более низкой стойкости и к считываемому свету.

Фоторефрактивные стёкла отличаются высокой стабильностью своих параметров по отношению к изменениям температуры, наличию внешних электрических полей, механическим воздействиям, что является следствием их принадлежности к классу аморфных, оптически изотропных материалов. Фоторефрактивные кристаллы в силу принадлежности к анизотропным материалам являются двулучепреломляющими и обладают целым набором эффектов: электрооптическим, фотогальваническим, пьезоэлектрическим, акустооптическим, эластооптическим и т. д. С одной стороны, это влечёт за собой определённые проблемы при практическом использовании устройств на их основе. Так, например, наличие двулучепреломления у ниобата лития приводит к заметной зависимости дифракции от ориентации поляризации падающего света. С другой стороны — наличие электрооптических свойств у фоторефрактивных кристаллов позволяет осуществлять эффективное электрическое управление условиями дифракции, что востребовано в различных практических применениях.

Благодарность

Работа поддержана Российским научным фондом (грант 20-19-00559).

Список источников

- [1] **Nikonorov, N.** New photo-thermo-refractive glasses for holographic optical elements: properties and applications / N. Nikonorov, S. Ivanov, V. Dubrovin, A. Ignatiev // *Holographic materials and optical systems*; edited by I. Nayadenova, D. Nazarova and T. Babeva. — InTech, 2017. — P. 435–461.
- [2] **Nikonorov, N.** Photonic, plasmonic, fluidic, and luminescent devices based on new polyfunctional photo-thermo-refractive glass // N. Nikonorov, V. Aseev, V. Dubrovin, A. Ignatiev, S. Ivanov, Y. Sgibnev, A. Sidorov // *Springer Series in Optical Sciences*, Springer Verlag. — 2018. — P. 83–113.
- [3] **Dubrovin, V.** Bromide photo-thermo-refractive glass for volume Bragg gratings and waveguide structure recording / V. Dubrovin, N. Nikonorov, A. Ignatiev // *Optical Materials Express*. — 2017. — Vol. 7. — №7. — P. 2280–2292.
- [4] **Klyukin, D.** Volume Bragg gratings in chloride photo-thermo-refractive glass after femtosecond laser bleaching / D. Klyukin, V. Krykova, S. Ivanov, P. Obraztsov, M. Silvennoinen, N. Nikonorov // *Optical Materials Express*. — 2017. — Vol 7. — №11. — P. 4131–4137.
- [5] **Андреева, О. В.** Объемные голограммы в нанопористых силикатных матрицах с галогенидами серебра : Дис. ... доктора наук / О. В. Андреева. — С.-Петербург, 2020. — С. 211.
- [6] **Savage, J. A.** Infrared optical materials and their antireflection coatings / J. A. Savage. — Bristol : Adam Hilger LTD, 1985. — P. 270.
- [7] **Щеулин, А. С.** Аддитивное окрашивание кристаллов фторидов кальция и кадмия / А. С. Щеулин, Т. С. Семенова, Л. Ф. Корякина, М. А. Петрова, А. К. Купчиков, А. И. Рыскин // *Оптика и спектроскопия*. — 2007. — Том 103. — №4. — С. 673–678.
- [8] **Петров, В. М.** Интерференция и дифракция для информационной фотоники / В. М. Петров, А. В. Шамрай. — С.-Петербург : Лань, 2019. — 460 с.