

## Тонкие халькогенидные пленки — голографические среды для устройств дополненной реальности

*В. Н. Борисов<sup>1</sup>, Н. В. Муравьев<sup>1</sup>, М. В. Попов<sup>1</sup>, Р. А. Окунь<sup>1</sup>, А. Е. Ангервакс<sup>1</sup>,  
Г. Н. Востриков<sup>1</sup>, С. А. Козюхин<sup>2</sup>, С. А. Иванов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ООО «Исследовательский Центр Самсунг», Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Теоретически и экспериментально исследованы голографические характеристики халькогенидных пленочных материалов с типичной толщиной 0,5–1,5 мкм ряда составов Ge-As-S с целью их использования в волноводных устройствах дополненной реальности. Показана возможность управления спектральными и голографическими свойствами материалов путем варьирования их состава. Проведена запись как объемных, так и поверхностных голограммных элементов, работающих в режиме полного внутреннего отражения. Продемонстрирована работа голограмм на халькогенидных пленках в «перископном режиме» с достижением дифракционной эффективности более 10%. Запись высокоэффективных голограммных элементов на халькогенидных пленках требует существенных значений энергии экспозиции при записи в ближнем УФ-диапазоне (325 нм, 355 нм), что делает голографическую запись малоэффективной техникой создания таких элементов.

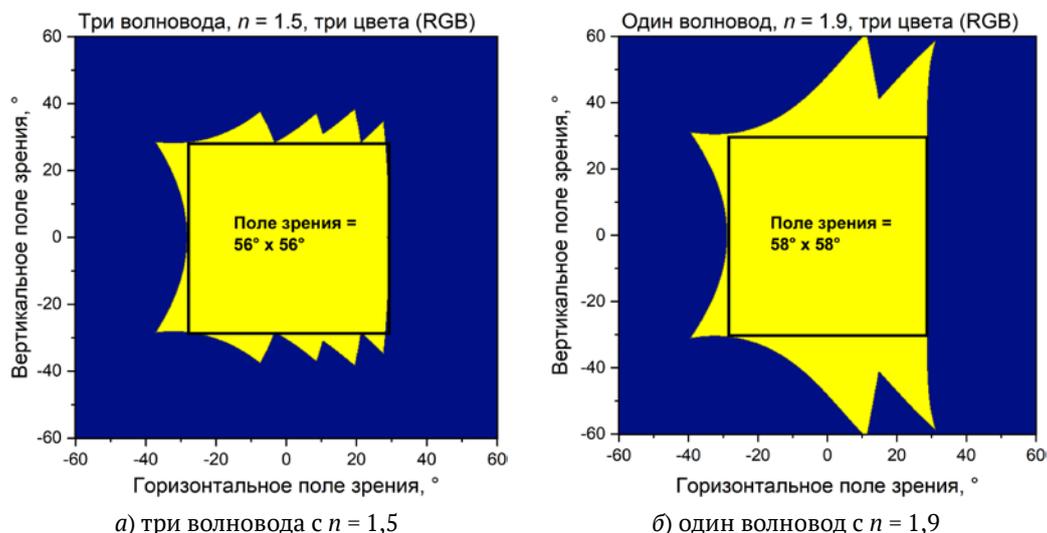
*Ключевые слова:* дополненная реальность, халькогениды, голограммы, голографические оптические элементы, дифракционные оптические элементы.

*Цитирование:* **Борисов, В. Н.** Тонкие халькогенидные пленки — голографические среды для устройств дополненной реальности / В. Н. Борисов, Н. В. Муравьев, М. В. Попов, Р. А. Окунь, А. Е. Ангервакс, Г. Н. Востриков, С. А. Козюхин, С. А. Иванов // HOLOEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 276–284.

### Введение

Дополненная реальность (augmented reality, AR) — многообещающая технология, вызывающая большой интерес в последнем десятилетии, так как ожидается, что она станет ключевой для следующего поколения мобильных устройств потребительской электроники [1]. AR-технология основана на наложении виртуального изображения на изображение реального мира и может применяться для развлечения, образования [2], медицины [3], оборонных технологий [4] и в других сферах жизнедеятельности [5]. Персональные носимые AR-устройства, среди которых AR-очки, являются наиболее востребованными, имеют наиболее жесткие технические требования [6]: для комфортного использования массовым потребителем AR-очки должны иметь компактные размеры, широкое поле зрения (field of view, FOV), малый вес и низкую стоимость, а также высокое разрешение и качество изображения [7].

К настоящему моменту наилучшая производительность в соответствии с вышеописанными требованиями достигается за счёт использования AR-дисплеев на планарных волноводах с интегрированными дифракционными оптическими элементами (ДОЭ) [8]. Принцип действия таких дисплеев заключается в следующем: свет из системы генерации изображения



**Рис. 1.** Моделирование RGB FOV для системы из трех волноводов с  $n = 1,5$  (а) и для системы из одного волновода с  $n = 1,9$  (б)

(к примеру, микропроектора) падает на вводной ДОЭ, дифрагирует на нем в объем планарного волновода, и дифрагированный свет распространяется внутри планарного волновода под условиями полного внутреннего отражения (ПВО); далее свет поочередно дифрагирует на как минимум двух других ДОЭ, за счёт чего размножается по двум измерениям и выводится из объема волновода в глаз пользователя. По такому принципу работают модели наиболее крупных компаний на рынке AR: Digilens [9], Microsoft [10], WaveOptics [11] и других. Главный недостаток таких систем связан с фундаментальным ограничением на максимально обеспечиваемый FOV: поскольку свет распространяется в объеме волновода под условиями ПВО, эти условия ограничивают угловой размер передаваемого изображения [12]. Это ограничение зависит от показателя преломления  $n$  оптической системы, типичное значения которого составляет 1,5.

Наиболее перспективным направлением для увеличения FOV AR-дисплеев является увеличение показателя преломления оптической системы. Моделирование обеспечиваемых FOV для систем с  $n = 1,5$  и  $n = 1,9$  показывает, что полноцветное (red, green, blue, RGB) FOV, получаемое для системы с  $n = 1,5$  при использовании трех волноводов, может быть достигнуто при помощи всего одного волновода для системы с  $n = 1,9$  (рис. 1) [13].

Использование материалов с высоким показателем преломления позволит уменьшить толщину и вес, а также увеличить прозрачность и разрешение AR-дисплеев. На данный момент существуют массово производимые оптические стекла с  $n = 1,9$  для производства планарных волноводов, однако не существует голографических материалов с таким высоким показателем преломления.

Потенциальными материалами для использования в качестве голографических сред являются тонкие пленки халькогенидных стекол (chalcogenides, ChG), напыляемые на стеклянные подложки. ChG — это полупроводниковые материалы со светочувствительными свойствами, обеспечивающие модуляцию показателя преломления  $\Delta n$  до 0,12, а также пригодные



а) хорошая цветопередача



б) высокое поглощение синего света

**Рис. 2.** RGB FOV, полученный системой с высокой прозрачностью и хорошей цветопередачей (а), и системой с высоким поглощением в синей части спектра, имеющей плохую цветопередачу (б)

для записи рельефных ДОЭ. Однако большинство составов ChG имеют сильное поглощение в синей части видимого спектра [14], что значительно снижает качество цветопередачи AR-изображения (рис. 2).

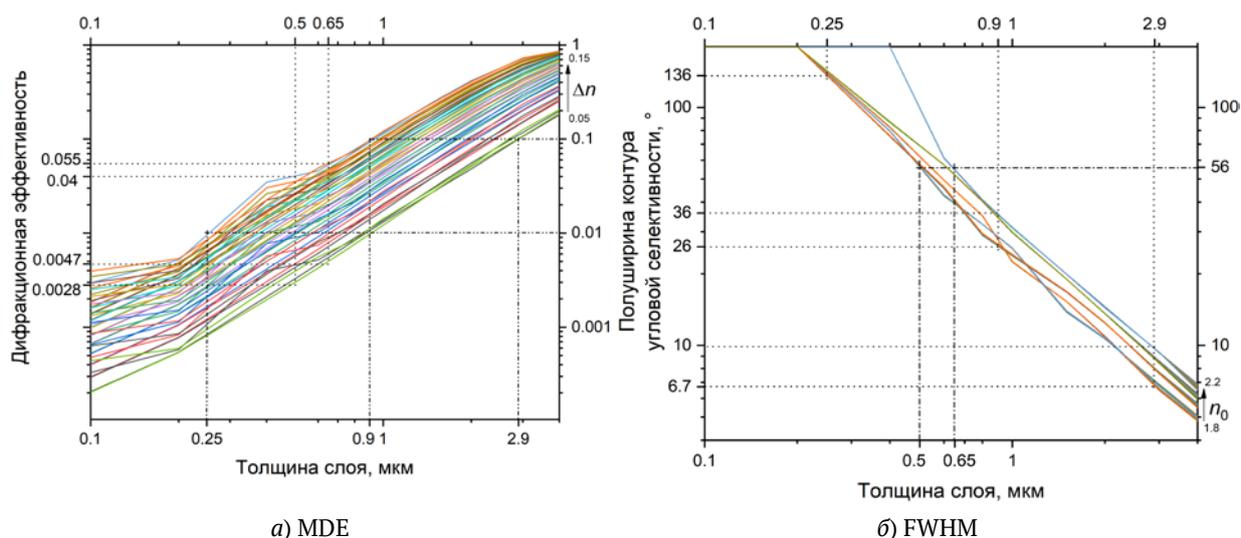
Для увеличения прозрачности в синей части видимого спектра можно оптимизировать композицию стекла. Альтернативный подход для уменьшения потерь — уменьшение толщины слоя ChG — имеет недостаток в виде потери эффективности. В настоящей работе проведено моделирование зависимости дифракционной эффективности голографических оптических элементов (ГОЭ) от толщины слоя ChG, а также нескольких различных композиций составов Ge-As-S были изучены экспериментально с целью их дальнейшего использования для записи ГОЭ для AR-дисплея.

### 1. Моделирование зависимости эффективности от толщины

Моделирование было проведено в программном пакете RSoft для нахождения области приемлемой толщины с условием достижения необходимой дифракционной эффективности ГОЭ, записанных в пленках ChG. Для анализа были выбраны два параметра: максимальная дифракционная эффективность (maximum diffraction efficiency, MDE), а также полуширина контура угловой селективности (full width at half maximum, FWHM). При моделировании изменялись следующие параметры: толщина  $d$ : от 0,1 до 4 мкм; средний показатель преломления  $n_0$ : от 1,8 до 2,2; модуляция показателя преломления  $\Delta n$ : от 0,05 до 0,15. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

По итогам моделирования были получены следующие результаты:

1. MDE сильно зависит от  $d$  и  $\Delta n$ , но менее — от  $n_0$ .
2. FWHM зависит практически только от  $d$ , слабее от  $n_0$  и вообще не зависит от  $\Delta n$ .
3. Для достижения минимального MDE, необходимого для выводного ГОЭ (1%), минимальная толщина  $d$  должна быть 0,25 мкм для  $\Delta n = 0,15$  и 0,9 мкм для  $\Delta n = 0,05$ . Для достижения минимального MDE, необходимого для вводной ГОЭ (10%), минимальная толщина  $d$  должна быть 0,9 мкм для  $\Delta n = 0,15$  и 2,9 мкм для  $\Delta n = 0,05$ .



**Рис. 3.** Зависимости MDE (а) и FWHM (б) от толщины слоя ChG для различных значений  $n_0$  и  $\Delta n$

4. Для того чтобы заполнить «окно ПВО» (которое в случае волновода с  $n_0 = 1,9$  равняется  $56^\circ$ ),  $d$  должна быть от 0,5 мкм (для  $n_0 = 1,8$ ) до 0,65 мкм (для  $n_0 = 2,2$ ).

На основании этих результатов можно сделать следующие выводы:

1. Необходимая толщина ГОЭ должна находиться в пределах от 0,5 до 1 мкм. Меньшая толщина не обеспечит селективные свойства, необходимые для устранения дифракционных бликов. Большая толщина приведёт к слишком большой селективности ГОЭ, следовательно, будет необходимо более двух экспозиций для полного заполнения «окна ПВО».

2. Для полного раскрытия всех преимуществ голографической среды с  $n_0 > 1,9$ , необходимы волноводы с  $n_0 > 1,9$  («окно ПВО» для волноводов с  $n_0 = 1,8 - 50^\circ$ ).

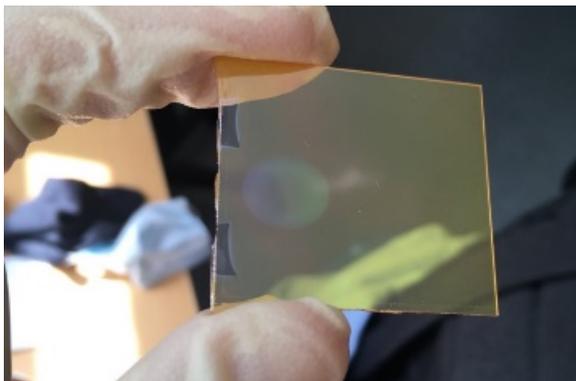
3.  $\Delta n = 0,05$  будет достаточно для выводной ГОЭ, однако для достижения необходимой эффективности вводной ГОЭ  $\Delta n > 0,1$ . Более того, параметр  $\Delta n$  является ключевым с точки зрения увеличения эффективности AR-дисплея.

4. Необходимо записывать как минимум по две экспозиции для каждого ГОЭ, так как угловая равномерность эффективности недостаточно хороша при записи одной экспозиции (для одной экспозиции падение эффективности на границе «окна ПВО» составляет примерно 50%, для двух экспозиций — около 10%).

Соответственно, ChG материал для записи ГОЭ должен обладать следующими параметрами: 1)  $n_0 > 1,8$  (1,9 предпочтительно,  $>1,9$  также приемлемо, но не необходимо); 2)  $\Delta n > 0,1$  ( $>0,15$  предпочтительно) — ключевой параметр; 3) толщина от 0,5 до 2 мкм; 4) возможность записи как минимум двух экспозиций для одного ГОЭ.

## 2. Тестовая запись на первичных образцах

Образцы пленок ChG были предоставлены Институтом общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН. Для тестирования были взяты образцы наиболее распространенного состава  $As_2S_3$ , которые обладают сильным поглощением в синей области видимого спектра, поэтому параметры тестовой записи были выбраны для проведения красного FOV. Образцы



**Рис. 4.** Образец ChG с записанной поверхностной решёткой



**Рис. 5.** Изображение красного цвета, проводимое через записанную перископную систему

имели следующие параметры: показатель преломления подложки — 1,7; показатель преломления плёнок ChG — 2,2; толщина плёнок ChG — 1 мкм.

Голографическая запись производилась в стандартной двухлучевой пропускающей схеме при помощи лазера с длиной волны 457 нм, а также красного лазерного диода для контроля дифракционной эффективности в ходе записи; плотность мощности записывающих пучков, поляризация, а также ориентация образцов ChG изменялись для разных актов голографической записи. Объёмные и поверхностные решётки были записаны с плотностью мощностью 20 (для объёмных) и 120 мВт/см<sup>2</sup> (для поверхностных). Итоговая дифракционная эффективность составила 1% для объёмных ненаклонных решёток при времени записи  $t_{\text{exp}} = 3$  мин, и 10% для поверхностных решёток при записи в течение  $t_{\text{exp}} = 12$  ч. Фотография поверхностной решётки представлена на рис. 4.

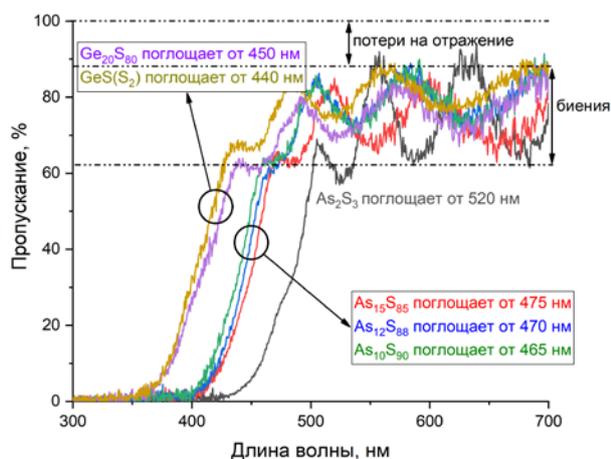
Для проверки работоспособности записанных ГОЭ в перископном режиме, была произведена запись вводного и выводного ГОЭ на одной подложке. Вводной ГОЭ был записан при помощи света с круговой поляризацией с общей плотностью мощности 120 мВт/см<sup>2</sup> и экспозицией 12 ч. Дифракционная эффективность вводного ГОЭ после записи составила 10%. Выводной ГОЭ с дифракционной эффективностью 1% был записан при помощи линейно-поляризованного света с такой же плотностью мощности в течение 30 с. Фотографии изображения, проводимого через записанную перископную систему, представлены на рис. 5.

Анализируя рис. 5, можно утверждать, что проводимое изображение имеет хорошее разрешение и яркость. Однако необходимо отметить, что только красное и часть зелёного FOV проводится через данную систему, в то время как синяя часть FOV полностью поглощается слоем ChG.

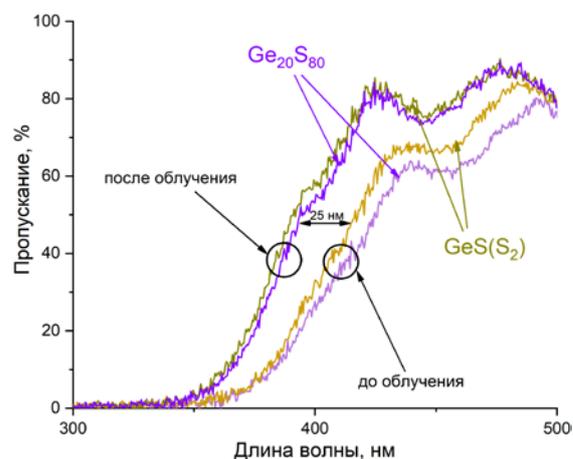
### 3. Оптимизированные составы ChG

#### 3.1. Первая стадия оптимизации состава ChG

Для увеличения пропускания в синей области видимого спектра, были созданы образцы ChG следующих составов:  $\text{As}_{15}\text{S}_{85}$ ,  $\text{As}_{12}\text{S}_{88}$ ,  $\text{As}_{10}\text{S}_{90}$ ;  $\text{Ge}_{20}\text{S}_{80}$ ,  $\text{GeS}(\text{S}_2)$ . Один образец  $\text{As}_2\text{S}_3$  был использо-



**Рис. 6.** Спектры пропускания образцов ChG первой стадии оптимизации



**Рис. 7.** Спектры пропускания образцов составов типа Ge-S до и после засветки



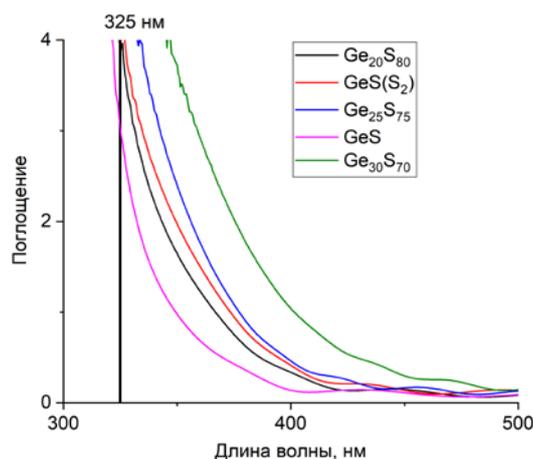
**Рис. 8.** Синие-зелёный FOV, проведенный через перископную систему, записанный на образце состава типа Ge-S

ван в качестве контрольного. Толщина слоев ChG для каждого образца составила 700 нм; толщина стеклянной подложки — 0,5 мм; показатель преломления подложки — 1,6. Спектры пропускания образцов представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, образцы новых составов обладают большим пропусканием в синей области видимого спектра. Составы типа Ge-S не поглощают свет с длиной волны более 440–450 нм; таким образом, эти составы должны проводить синий FOV без значимых потерь, а, значит, они могут быть пригодны для целей AR.

Для проверки фоточувствительности составов типа Ge-S образцы были равномерно засвечены лазером с длиной волны 457 нм. После этого были измерены спектры пропускания засвеченных частей образцов (рис. 7). Сравнение спектров пропускания до и после засветки свидетельствует о сдвиге края полосы поглощения составов типа Ge-S примерно на 25 нм в более коротковолновую область спектра, следовательно, засвеченные регионы становятся практически бесцветными для человеческого глаза.

На новых образцах с составами типа Ge-S была проведена голографическая запись объемных ГОЭ для формирования перископной системы со следующими параметрами: длина волны записи 457 нм, средняя плотность мощности 100 мВт/см<sup>2</sup>, время экспозиции 15–30 мин. Оба состава типа Ge-S показали схожую динамику записи с максимальной дифракционной эффективностью 1%.



**Рис. 9.** Спектры поглощения составов типа Ge-S второй стадии оптимизации

Рассматривая проводимое изображение (рис. 8), видно, что его синяя часть хорошо проводится через записанную систему, а FOV ограничен только из-за показателя преломления подложки.

Главная проблема записанной перископной системы — её малая эффективность. Существует несколько способов увеличения эффективности: использование более короткой длины волны записи, запись наклонных решёток, увеличение толщины слоя ChG, а также запись рельефных ГОЭ.

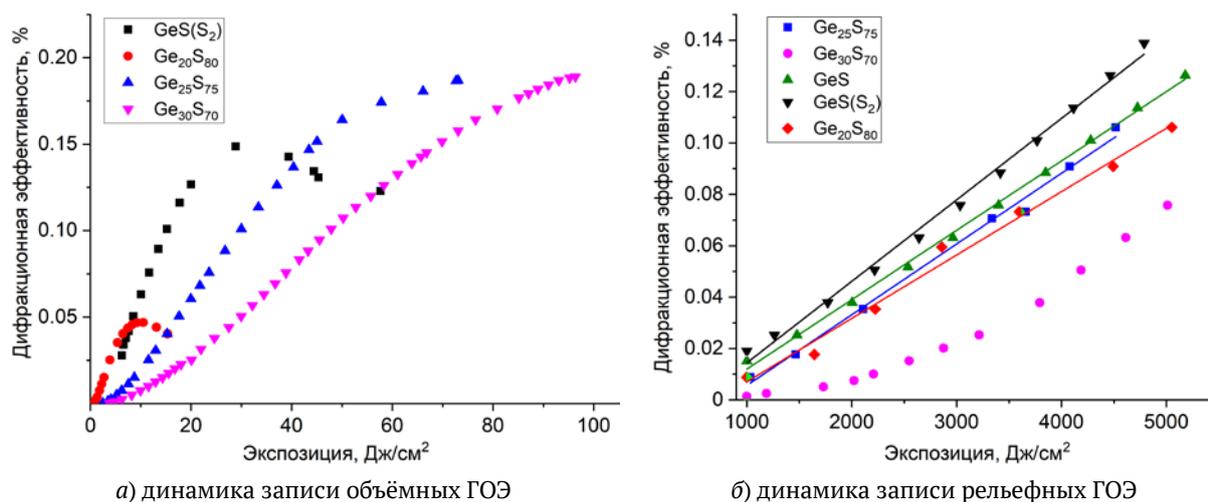
### 3.2. Вторая стадия оптимизации состава ChG

Для второй стадии были синтезированы пять новых составов типа Ge-S. Новые составы характеризуются сдвигом фундаментальной полосы поглощения в ультрафиолетовую часть спектра (рис. 9). Толщина слоев новых составов составила примерно 1 мкм.

Рис. 9 показывает возможность создания составов ChG, прозрачных во всем видимом спектре. Однако это усложняет процесс голографической записи, так как для эффективной записи необходимо использовать лазер с длиной волны, находящейся в области поглощения материала. В связи с этим, для записи на образцах составов второй стадии был использован He-Cd лазер с длиной волны 325 нм. Динамика голографической записи объемных ГОЭ для всех образцов (рис. 10а) была измерена при помощи зелёного лазерного диода во время записи в интерферометрической схеме Ллойда. Плотность мощности излучения была  $230 \text{ мкВт/см}^2$ , период регистрируемых ГОЭ — порядка 1 мкм.

Динамика записи для образцов составов  $S1(\text{Ge}_{25}\text{S}_{75})$  and  $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$  значительно медленнее, чем для двух других, однако образцы именно этих составов демонстрируют наиболее высокую дифракционную эффективность. В соответствии с наблюдаемым характером динамики, максимальная эффективность может быть достигнута при энергиях экспозиции порядка  $80\text{--}90 \text{ Дж/см}^2$ . Измеренная дифракционная эффективность в последний момент записи (энергия экспозиции порядка  $70 \text{ Дж/см}^2$ ) составила 0,18%.

Запись рельефных ГОЭ производилась в стандартной пропускающей двухлучевой схеме; для более эффективной записи поляризация регистрирующих пучков была изменена на



**Рис. 10.** Динамика голографической записи на образцах составов второй стадии оптимизации для объёмных (а) и рельефных (б) ГОЭ.

+45°/–45° [15]. Плотность мощности записывающего излучения составила 2,105 Вт/см<sup>2</sup>. Рельефные ГОЭ были успешно записаны на всех образцах. Динамика голографической записи была для них схожа (рис. 10б).

Для четырех составов динамика голографической записи является линейной, однако состав Ge<sub>30</sub>S<sub>70</sub> показывает нелинейную динамику записи. При плотности энергии экспозиции 5 кДж/см<sup>2</sup> практически на всех составах достигается такая же эффективность, как и при записи объёмных ГОЭ.

### Заключение

Исследование тонкослойных образцов ChG показало, что FOV, проводимое при помощи волноводов на их основе, может достигать значений более 50° при использовании подложки с высоким показателем преломления. Также возможно добиться высокой прозрачности в синей части видимого спектра посредством оптимизации состава ChG, а эффективность ГОЭ может быть увеличена посредством реализации рельефной записи. Однако голографическая запись на образцах ChG все ещё является малоэффективной. Рельефная запись подразумевает экстремально большие значения плотностей энергии экспозиции для достижения высокой эффективности. Более того, длина волны записи должна быть выбрана в соответствии с составом таким образом, чтобы находиться на краю фундаментальной полосы поглощения. Перечисленные трудности указывают на то, что для создания эффективных и качественных AR-дисплеев на основе волноводов с ChG необходимы дополнительные исследования.

### Список источников

- [1] **Extance, A.** Can holograms help replace smartphones? Andy Extance finds that although augmented reality products talk about holograms more than they use them, holographic technology still has huge potential / A. Extance // *Electro Optics*. — 2019. — № 298. — P. 12–16.

- [2] **Sivananthan, A.** [A Feasibility Trial of HoloLens 2™; Using Mixed Reality Headsets to Deliver Remote Bedside Teaching During COVID-19](#) / A. Sivananthan, A. Gueroult, G. Zijlstra, G. Martin, A. Baheerathan, P. Pratt, A. Darzi, N. Patel, J. Kinross // Research Square (Preprint). — Posted. 07.01.2021.
- [3] **Ilie, A.** [Combining head-mounted and projector-based displays for surgical training](#) / A. Ilie, K. L. Low, G. Welch, A. Lastra, H. Fuchs, B. Cairns // Presence: Teleoperators & Virtual Environments. — 2004. — Vol. 13. — № 2. — P. 128–145.
- [4] **Amitai, Y.** [Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays](#) / Y. Amitai, A. A. Friesem, V. Weiss // Applied Optics. — 1989. — Vol. 28. — № 16. — P. 3405–3416.
- [5] **Van Krevelen, D. W. F.** A survey of augmented reality technologies, applications and limitations / D. W. F. Van Krevelen, R. Poelman // International Journal of Virtual Reality. — 2010. — Vol. 9. — № 2. — P. 1–20.
- [6] **Chang, C.** [Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective](#) / C. Chang, K. Bang, G. Wetzstein, B. Lee, L. Gao // Optica. — 2020. — Vol. 7. — № 11. — P. 1563–1578.
- [7] **Zhan, T.** [Augmented reality and virtual reality displays: Perspectives and challenges](#) / T. Zhan, K. Yin, J. Xiong, Z. He, S. T. Wu // iScience. — 2020. — P. 101397. — 13 p.
- [8] **Kress, B. C.** [Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective](#) / B. C. Kress, I. Chatterjee // Nanophotonics. — 2021. — Vol. 10. — № 1. — P. 41–74.
- [9] **Waldern, J. D.** [Wide field of view multiplexed photopolymer consumer AR displays](#) / J. D. Waldern, A. J. Grant, M. M. Popovich // SPIE AR VR MR : Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) : Proceedings of SPIE. — 2020. — Vol. 11310. — P. 113100I. — 12 p.
- [10] **Kress, B. C.** [Optical architecture of HoloLens mixed reality headset](#) / B. C. Kress, W. J. Cummings // Digital Optical Technologies 2017 : Proceedings of SPIE. — 2017. — Vol. 10335. — P. 103350K. — 10 p.
- [11] **Greenhalgh, P. A.** [Diffractive and reflective waveguides: A game of trade-offs \(conference presentation\)](#) / P. A. Greenhalgh // SPIE AR VR MR : Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) : Proceedings of SPIE. — 2020. — Vol. 11310. — P. 113102F.
- [12] **Wheelwright, B.** [Field of view: not just a number](#) / B. Wheelwright, Y. Sulai, Y. Geng, S. Luanava, S. Choi, W. Gao, J. Gollier // SPIE Photonics Europe : Digital Optics for Immersive Displays : Proceedings of SPIE. — 2018. — Vol. 10676. — P. 1067604. — 7 p.
- [13] **Borisov, V. N.** [A DOE-based waveguide architecture of wide field of view display for augmented reality eyewear](#) / V. N. Borisov, N. V. Muravyev, R. A. Okun, A. E. Angervaks, G. N. Vostrikov, M. V. Popov // SPIE AR VR MR : Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) II : Proceedings of SPIE. — 2021. — Vol. 11765. — P. 117650B. — 9 p.
- [14] **Putilin, A. N.** [Holographic waveguide periscopes in augmented reality displays](#) / A. N. Putilin, A. V. Morozov, S. S. Kopenkin, S. E. Dubynin, Y. P. Borodin // Optics and Spectroscopy. — 2020. — Vol. 128. — № 11. — P. 1828–1836.
- [15] **Teteris, J.** [Photoinduced mass transfer in amorphous As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films](#) / J. Teteris, U. Gertners, M. Reinfelde // Physica Status Solidi C. — 2011. — Vol. 8. — № 9. — P. 2780–2784.