

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗАСВЕТКЕ ИНТЕГРАЛЬНЫМ И МОНОХРОМАТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Аркади КИРИЦА, Олег КОРШАК, Надежда НАСЕДКИНА,  
Владимир ПРИЛЕПОВ, Юрий ЖИДКОВ, Алексей ЧЁРНЫЙ

Молдавский государственный университет

### RIDICAREA SENSIBILITĂȚII PURTĂTORILOR FOTOTERMOPLASTICI PRIN ILUMINARE SUPLIMENTARĂ CU RADIĂȚII INTEGRALĂ ȘI MONOCROMATICĂ

Este cercetată posibilitatea înregistrării informației optice pe purtători fototermoplastici pe baza semiconductorilor halcogenici sticloși. A fost demonstrată posibilitatea înregistrării imaginilor de interferență și a hologramelor într-un proces simultan de înregistrare.

*Cuvinte-cheie:* înregistrarea informației optice, holografie, holografie microscopică.

### THE INCREASE OF PHOTOTHERMOPLASTIC CARRIERS' SENSITIVITY UNDER ADDITIONAL ILLUMINATION WITH INTEGRAL AND MONOCHROMATIC RADIATION

In this paper, the possibility of optical information recording on photothermoplastic media based on chalcogen semiconductor glasses is being analyzed. The possibility of recording of interference gratings and holograms in simultaneous recording process has been shown.

*Keywords:* registration of optical information, holography, holographic microscopy.

#### Введение

При регистрации голограмм в реальном масштабе времени основными параметрами оптического носителя являются разрешающая способность, фоточувствительность, дифракционная эффективность и время регистрации изображения. Известны фототермопластические носители (ФТП-носители) как на основе органических фоточувствительных полупроводников [1], так и неорганических [2-5]. ФТП-носители на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников обладают высокими значениями разрешающей способности, фоточувствительности и малым временем регистрации голографических изображений [3-5]. Показана возможность успешного применения ФТП-носителей в голографической микроскопии [3], для регистрации интерферограмм в реальном масштабе времени [4] и импульсной голографии в наносекундном диапазоне [5].

Целью данной работы являлось исследование возможности увеличения дифракционной эффективности голографических решеток и голограмм, регистрируемых на ФТП-носителях, в реальном масштабе времени.

#### Эксперимент

Для проведения исследований были изготовлены ФТП-носители (рис.1) в целях регистрации голограмм в лазерном излучении  $\lambda = 532 \text{ nm}$  с фоточувствительным слоем на основе молярного раствора аморфных стеклообразных полупроводников состава  $\text{As}_2\text{S}_3$ -78 mol. %,  $\text{As}_2\text{Se}_3$ -22 mol. % в интервале толщин 0,2–2,6  $\mu\text{m}$  (3).

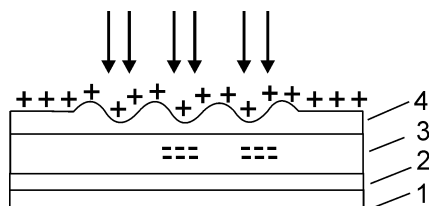


Рис.1. Фототермопластический носитель: 1) лавсановая лента, 2) проводящий металлический электрод, 3) полупроводник, 4) термопластик.

Состав рассчитывался из условия достижения максимума спектральной чувствительности вблизи  $\lambda=532$  nm. В качестве подложки использовалась гибкая лавсановая лента (1) с предварительно нанесенным светопропускающим проводящим электродом (2) на основе металлического хрома. На поверхность фоточувствительного полупроводника нанесен термопластический слой (4) толщиной 0,4-0,45  $\mu\text{m}$  на основе полиэпоксипропилкарбазола, достигающего пластического состояния при разогреве до температуры  $T=76-79^\circ\text{C}$ .

Исследуемый носитель помещается в ячейку записи, обеспечивающую равномерный разогрев ФТП-носителя до пластического состояния термопластического слоя. Одновременно с началом экспозиции включается высоковольтное зарядное устройство, и поверхность термопластика заряжается положительными зарядами ионизированного воздуха. В то же время в освещенных участках ХСП индуцируется заряд противоположного знака, и под действием электростатического взаимодействия формируется рельефно-фазовое изображение на поверхности термопластического слоя.

Для выявления эффекта увеличения чувствительности ФТП-носителя при дополнительном освещении предварительно были исследованы спектральные зависимости фототока, делённого на мощность падающего излучения, без освещения (рис.2 а,б, кривые 1), а также при засветке интегральным светом (рис.2 а, кривая 2) и лазерным излучением  $\lambda=633$  nm (рис.2 б, кривая 2), которые показывают максимум фоточувствительности вблизи  $\lambda=532$  nm.

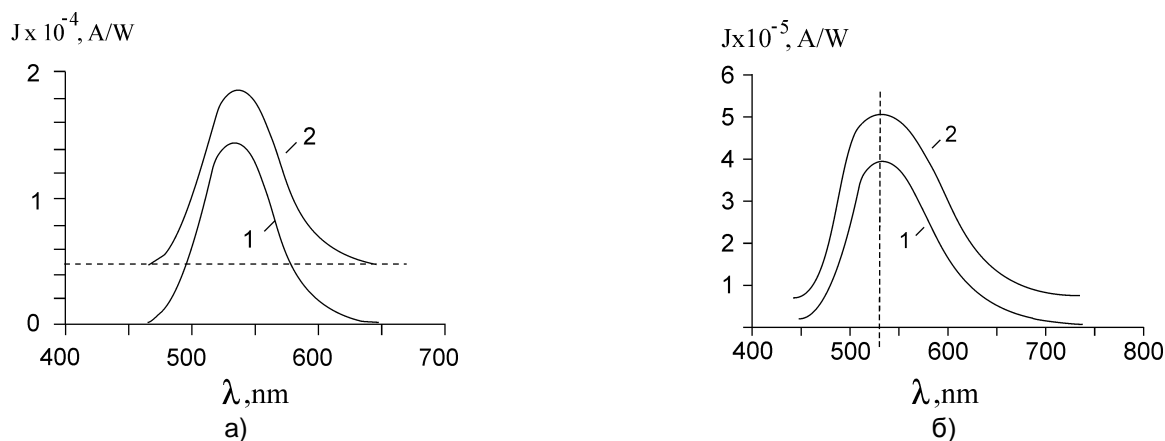


Рис.2. Спектральная зависимость фотопроводимости:

- а) 1 – без дополнительного освещения, 2 – при дополнительном освещении интегральным светом;
- б) 1 – без дополнительного освещения, 2 – при дополнительном освещении лазерным излучением  $\lambda=633$  nm.

В процессе измерения спектральной фотопроводимости при дополнительном освещении полупроводниковый слой в первом случае постоянно освещался интегральным светом с освещённостью 0,5 lx, во втором – лазерным излучением  $\lambda=633$  nm интенсивностью  $I=10^{-6}$  W/cm<sup>2</sup>. Из рисунков видно равное увеличение фототока во всём спектральном диапазоне измерения для каждого случая. Это свойство ХСП можно использовать для увеличения чувствительности ФТП-носителя при записи дифракционных решёток и голограмм.

Регистрация голографических дифракционных решеток на ФТП- носителе проводилась в лазерном излучении  $\lambda=532$  nm с возможностью дополнительной засветки интегральным светом (рис.3).

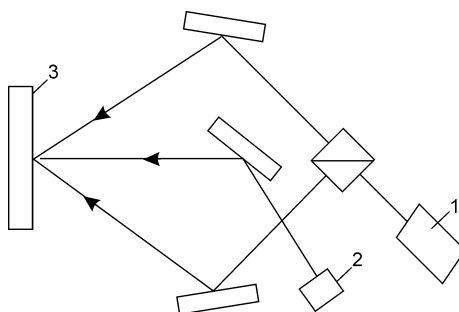
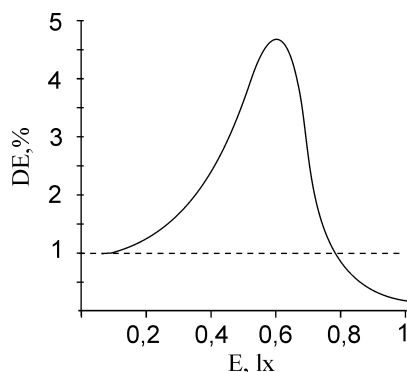


Рис.3. Оптическая схема: 1) лазер  $\lambda=532$  nm, 2) источник интегрального излучения, 3) ФТП-носитель.

При регистрации дифракционных решёток и голограмм ФТП-носитель предварительно разогревается до пластического состояния термопластического слоя ( $T=79-81^{\circ}\text{C}$ ). Одновременно с началом экспозиции включается высоковольтное зарядное устройство (8,5 – 9 kV), и поверхность термопластика в течение  $\sim 1,4$  s заряжается положительными зарядами ионизированного воздуха.

При исследовании голографической чувствительности ФТП-носитель освещался равными по интенсивности плоско-параллельными лазерными пучками ( $\lambda=532$  nm), формирующими в фоточувствительном полупроводниковом слое интерференционную решетку с пространственной частотой записи  $\nu = 1000$   $\text{mm}^{-1}$ . После разогрева ФТП-носителя до температуры  $T = 80^{\circ}\text{C}$  одновременно включались высоковольтное зарядное устройство (8,5 – 9 kV) и оптический затвор, обеспечивающий освещение образца в течение 1,4s. Были зарегистрированы дифракционные решетки при суммарной интенсивности лазерных пучков  $I=1,2\cdot 10^{-7}$   $\text{W}/\text{cm}^2$  и времени освещения  $t=1,4$ s, что соответствует экспозиции  $H=1,6\cdot 10^{-7}$   $\text{J}/\text{cm}^2$ . Дифракционная эффективность (DE) зарегистрированных решеток определялась как отношение интенсивности света в первом дифракционном максимуме к интенсивности света, прошедшего через неэкспонированный участок исследуемого образца. Такой метод определения DE позволяет исключить влияние поглощения света в структуре металлический электрод – полупроводник. Для ФТП-носителей зависимость DE от пространственной частоты носит резонансный характер, когда максимальное значение DE зависит от толщины термопластического слоя. Дифракционная эффективность зарегистрированных решеток составляла  $DE=1\%$ . Голографическая чувствительность определялась как величина, обратная экспозиции при дифракционной эффективности голограммы на уровне 1% [6]. Для полученных ФТП-носителей пороговая голографическая чувствительность составляет  $S=6\cdot 10^6$   $\text{cm}^2/\text{J}$  (для  $\lambda=532$  nm при  $DE=1\%$ ).

Однако при регистрации голографических изображений реальных объектов дифракционной эффективностью в 1% недостаточно для получения качественного изображения объекта. Как видно из сопоставления кривых 1 и 2 (рис.2а), увеличение дифракционной эффективности при малых экспозициях (вблизи пороговой чувствительности ФТП-носителя) может быть достигнуто при дополнительной засветке интегральным светом. Дифракционные решетки регистрировались при постоянной экспозиции лазерного излучения  $H=1,6\cdot 10^{-7}$   $\text{J}/\text{cm}^2$  с дополнительной засветкой интегральным светом в интервале освещённостей 0,1–1 lx. Зависимость DE от интенсивности дополнительного интегрального освещения представлена на рис.4.



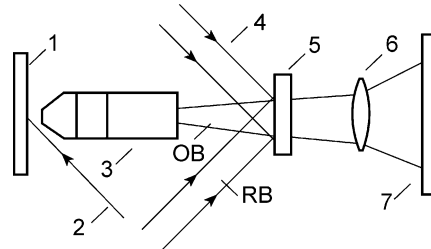
**Рис.4.** Зависимость DE от дополнительного интегрального освещения при постоянной экспозиции лазерного излучения.

Если в отсутствие дополнительной засветки значение DE находилось вблизи 1%, то при дополнительном интегральном освещении DE возрастает и достигает максимума в 4,5% при освещенности интегрального света вблизи 0,6 lx. Дальнейшее увеличение освещенности интегрального света приводит к резкому спаду DE до значений  $<1\%$  при освещенностях более 0,8 lx.

Увеличение DE при малых экспозициях вблизи пороговой чувствительности ФТП-носителя можно получить также при дополнительном постоянном освещении лазерным излучением  $\lambda=633$  nm в процессе записи голограмм. На рис. 5 представлена оптическая схема установки для регистрации голограмм микрообъектов в излучении лазера с длиной волны  $\lambda=532$  nm.

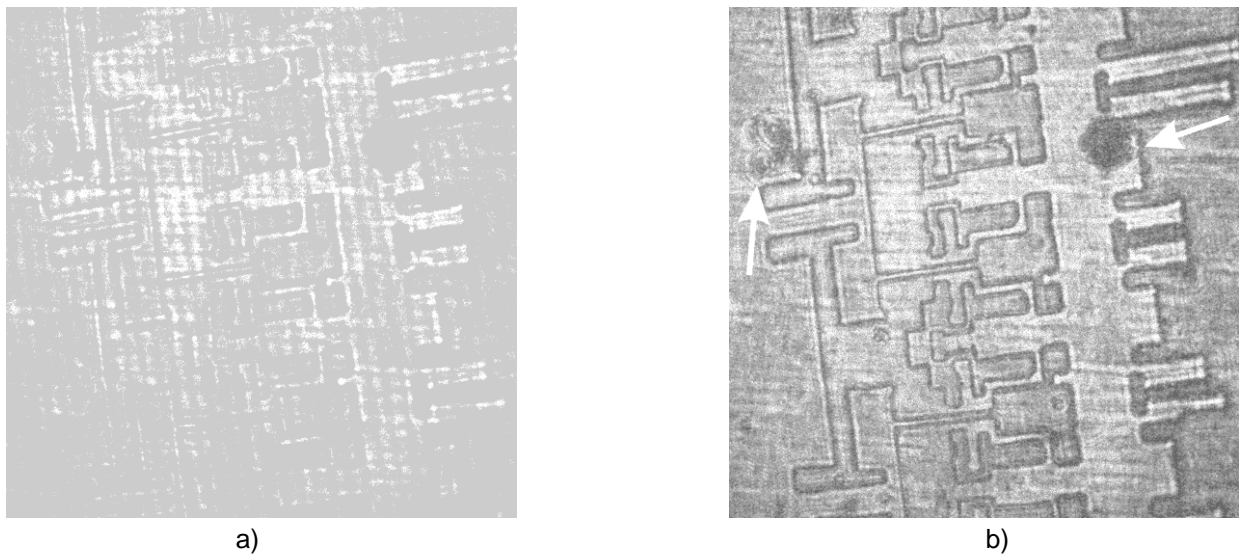
В качестве объекта (1) при записи голограмм была использована микросхема, которая освещалась лазерным пучком (2) с  $\lambda = 532$  nm. Увеличенное при помощи микроскопа изображение объекта

(предметный пучок OB) проектировалось на ФТП-носитель (5). При наложении опорного пучка (RB) от того же источника излучения ( $\lambda=532\text{ nm}$ ) регистрировалась голограмма исследуемого объекта. При восстановлении голограммы предметный пучок (OB) перекрывается, и на экране (7) наблюдается увеличенное линзой (6) зарегистрированное изображение микрочасти объекта.



**Рис.5.** Оптическая схема записи голограмм: 1) объект, 2) лазерный пучок  $\lambda=532\text{ nm}$ , 3) микроскоп, RB – опорный лазерный пучок  $\lambda=532\text{ nm}$ , 4) дополнительный лазерный пучок  $\lambda=633\text{ nm}$ , 5) ФТП-носитель, 6) линза, 7) экран.

Интенсивность опорного и предметного пучков подбиралась таким образом, чтобы экспозиция ФТП-носителя составляла  $H=1,68 \cdot 10^{-7}\text{ J/cm}^2$ . Если при записи дифракционных решеток в плоско-параллельных пучках при данной экспозиции достигалась  $DE=1\%$ , то для записи голограммы реального объекта этой экспозиции недостаточно, и на экране не наблюдается восстановленное изображение объекта. При сканировании голограммы лазерным пучком только локально на кадре наблюдаются участки с  $DE \sim 0,2\%$ . При записи решеток использовались плоско-параллельные пучки равной интенсивности, что формировало интерференционную картину фиксированной пространственной частоты с видностью полос, равной  $V=1$  [6]. При регистрации голограммы реального объекта предметный пучок OB имеет сферический волновой фронт, и при наложении плоско-параллельного опорного пучка RB вдоль кадра голограммы формируется переменный спектр пространственных частот. ФТП-носители обладают резонансным характером записи, при котором максимальные значения DE достигаются вблизи определенной пространственной частоты, которая зависит от толщины термопластического слоя. Для исследуемых носителей максимального значения DE можно достичь вблизи  $\nu=1000\text{ mm}^{-1}$ , но при отступлении от этого значения дифракционная эффективность убывает. Интенсивность предметного пучка неоднородна ввиду различной отражательной способности элементов микросхемы. При увеличении экспозиции до  $H=2,2 \cdot 10^{-7}\text{ J/cm}^2$  была зарегистрирована голограмма поверхности микросхемы, восстановленное изображение которой представлено на рис.6а.



**Рис. 6.** Восстановленные изображения голограмм: а) без дополнительного освещения, б) с дополнительным освещением.

На восстановленном изображении (рис. 6а) наблюдаются только отдельные участки микросхемы, обладающие наибольшей отражательной способностью. С дополнительным освещением лазерным пучком  $\lambda=633$  nm при экспозиции  $H_{\lambda=633 \text{ nm}}=7 \cdot 10^{-7}$  J/cm<sup>2</sup> и при прежнем значении экспозиции основного освещения с  $\lambda=532$  nm удалось получить полное изображение исходного объекта (рис. 6б). На изображении (рис.6б) можно наблюдать микродефекты фотолитографии (белые стрелки), которые не были четко видны на изображении рис.6а.

Увеличение DE при дополнительной засветке интегральным светом или лазерным излучением с  $\lambda=633$  nm можно объяснить особенностями фототермопластического процесса записи. Деформация термопластического слоя в процессе записи наступает под действием кулоновского взаимодействия между положительными зарядами на поверхности термопластика и индуцированными под действием света отрицательными зарядами в полупроводниковом слое. Сила кулоновского взаимодействия прямо пропорциональна произведению заряда на поверхности термопластика и заряда в фоточувствительном слое. В случае отсутствия дополнительной засветки, индуцированных зарядов под действием лазера с  $\lambda=532$  nm может быть недостаточно для глубокой деформации термопластического слоя, что приведет к низким значениям дифракционной эффективности. Освещение ФТП-носителя интегральным светом или лазерным излучением с  $\lambda=633$  nm индуцирует дополнительный отрицательный заряд во всем объеме фоточувствительного полупроводника. Таким образом, на равномерную дополнительную интегральную или лазерную засветку длиной волны  $\lambda=633$  nm накладывается интерференционная картина в виде темных и светлых полос, сформированная лазерным излучением с  $\lambda=532$  nm. В освещенных местах отрицательный заряд индуцируется как под воздействием светлых полос интерференционной картины, так и дополнительной засветки. В темных местах интерференционной картины заряд будет индуцироваться только под действием слабой дополнительной подсветки, и этого заряда недостаточно для деформации термопластика. Таким образом, будет получен скрытый электростатический контраст в освещенных и неосвещенных участках ФТП-носителя. Заряда в освещенных местах интерференционной картины будет достаточно для более глубокой деформации термопластика и достижения более высоких значений DE. При значении освещенности дополнительного интегрального излучения более 0,6 lx (рис. 4) уменьшение DE можно объяснить ухудшением скрытого электростатического контраста, когда дополнительной засветки интегральным светом достаточно для деформации термопластика как в темных, так и в светлых участках интерференционной картины. Такая методика увеличения чувствительности ФТП-носителя имеет значение в случае, когда при регистрации голограмм не хватает мощности лазерного излучения: например, при регистрации голограмм микрокапель воды в атмосфере, обладающих малой отражательной способностью, а также при исследовании микрообъектов в биологии, медицине, где недопустимо лазерное излучение большой мощности из-за возможности изменения и даже разрушения свойств микрообъектов. В таком случае слабый отраженный сигнал от объекта можно усилить дополнительной засветкой ФТП-носителя.

### Заключение

Дополнительное освещение интегральным светом или лазерным излучением с длиной волны, отличной от длины волны регистрации голограммы в процессе записи, позволяет увеличить дифракционную эффективность голограммы, регистрируемой при значениях экспозиции лазерного излучения вблизи пороговой чувствительности ФТП-носителя. Такой метод может быть успешно применен при регистрации голограмм объектов с малой отражательной способностью, а также при исследовании некоторых микрообъектов, например, в биологии, медицине, где недопустимо действие лазерного излучения большой мощности. В таком случае слабый отраженный лазерный сигнал от объекта можно усилить дополнительной засветкой ФТП-носителя интегральным излучением.

### Библиография:

1. MAILHOT-JENSEN, B., RIVATON, A., PILICHOWSKI, J., CHIRITA, A., CHILAT, E., DRAGALINA, G. Carbazole Containing Copolymers: Synthesis, Characterization, and Applications in Reversible Holographic Recording. In: *International Journal of Photoenergy*, 2010, p.1-11
2. PANASYUK, L.M., NASTAS, A.M. Image recording on photothermoplastic media with different thicknesses of the thermoplastic layer. In: *Optics and Spectroscopy Journal*, 2003, 94, no.6, p.959-961.

3. CHIRITA, A. Real-time scaling of micro-objects by multiplexed holographic recording on photo-thermo-plastic structure. In: *Journal of Modern Optics*, 2010, no.57, p.854-858.
4. CHIRITA, A., KUKHTAREV, N., KUKHTAREVA, T., KORSHAK, O., PRILEPOV, V., JIDCOV, I. Holographic imaging and interferometry with non-Bragg diffraction orders on volume and surface-relief gratings in lithium niobate and photo-thermoplastic media. In: *Journal of Modern Optics*, 2012, no.59, p.1428-1433.
5. CHIRITA, A., DIMOV, F., PRADHAN, S., BUMACOD, P., KORSHAK, O. Real-time nano-seconds pulse holograms recording on photo-thermoplastic media. In: *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2012, no.7, p.415-418.
6. COLLIER, R. J. *Optical Holography*. Academic Press, 1971.

Prezentat la 07.05.2013