

# Метод проекционной мультиплексной записи компьютерно-синтезированных одномерных голограмм Фурье для систем голографической памяти: математическое и экспериментальное моделирование

А.Ю.Бетин, В.И.Бобринев, Н.М.Вереникина, С.С.Донченко, Н.Н.Евтихий, Е.Ю.Злоказов, С.Б.Одинок, С.Н.Стариков, Р.С.Стариков

*Предложен метод мультиплексной записи компьютерно-синтезированных одномерных голограмм Фурье для голографических запоминающих устройств. Такой метод потенциально позволяет увеличить плотность записи информации в предложенной ранее системе голографической памяти, основанной на компьютерном синтезе и проекционной записи голограмм страниц данных.*

**Ключевые слова:** голографические запоминающие устройства, компьютерно-синтезированная голограмма, одномерная голограмма Фурье, мультиплексная запись голограмм, пространственно-временной модулятор света.

## 1. Введение

Ранее в работах [1, 2] было предложено использовать метод компьютерного синтеза голограмм Фурье для отдельных страниц двоичной информации с выводом синтезированной голограммы на пространственно-временной модулятор света на основе жидких кристаллов (ПВМС ЖК) и ее последующим проецированием с требуемым изменением масштаба на голографический носитель. Применение такого метода позволяет значительно упростить оптическую схему записи голографического запоминающего устройства.

Для увеличения плотности записи информации на голографические носители часто применяется метод мультиплексной записи. Мультиплексная голограмма представляет собой результат наложения на один и тот же участок голографического носителя нескольких элементарных голограмм (далее субголограмм), записанных на разных пространственных несущих частотах. Чтобы такие субголограммы могли быть считаны отдельно, при создании каждой новой субголограммы необходимо вносить те или иные изменения в схему записи: например, менять угол между опорным и предметным пучками (мультиплексная голограмма с угловой селективностью) или изменять взаиморасположение плоскости опорного и предметного лучей и голографического носителя (мультиплексная голограмма с пространственной селективностью) [3], что значительно усложняет оптическую схему

устройства и приводит к увеличению его чувствительности к внешним воздействиям.

В случае мультиплексной записи двумерных компьютерно-синтезированных голограмм Фурье плотность записи информации ограничивается необходимостью использования достаточного углового разделения записываемых субголограмм для того, чтобы избежать наложения восстановленных изображений. В связи с этим представляет интерес рассмотреть свойства мультиплексных голограмм с использованием в качестве субголограмм одномерных голограмм Фурье, поскольку оптические системы с двоякой симметрией (анаморфотные оптические системы) обладают высокой чувствительностью к повороту, что позволяет надеяться на известные преимущества в селективности как при записи, так и при считывании данных [1–3].

Таким образом, исследуемый в настоящей работе метод записи страниц входных двоичных данных предполагает компьютерный синтез соответствующих одномерных голограмм Фурье и их мультиплексную проекционную регистрацию на голографическом носителе.

## 2. Синтез одномерных голограмм и моделирование восстановления данных

В рассматриваемом случае синтез одномерной голограммы Фурье подобен синтезу обычной голограммы Фурье, примененному в [1, 2], с тем отличием, что используется математическая аналогия не с обычным сферическим фурье-каскадом, а с известной анаморфотной системой одномерного преобразования Фурье [3]. Эквивалентная оптическая схема записи одномерных голограмм Фурье представлена на рис.1. Поскольку оптическая схема включает в себя как сферические, так и цилиндрические линзы, то на рис.1 представлен ход лучей в двух плоскостях (в горизонтальной и вертикальной). Каждая горизонтальная строка синтезируемой голограммы является одномерной голограммой Фурье, соответствующей одной строке из записываемой двумерной страницы входных данных.

А.Ю.Бетин, В.И.Бобринев, Н.М.Вереникина, С.С.Донченко, С.Б.Одинок. НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; e-mail: odinokov@bmstu.ru

Н.Н.Евтихий, Е.Ю.Злоказов, С.Н.Стариков, Р.С.Стариков. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: evtikhiev@mail.ru, rstarikov@mail.ru

Поступила в редакцию 27 мая 2014 г., после доработки – 6 ноября 2014 г.

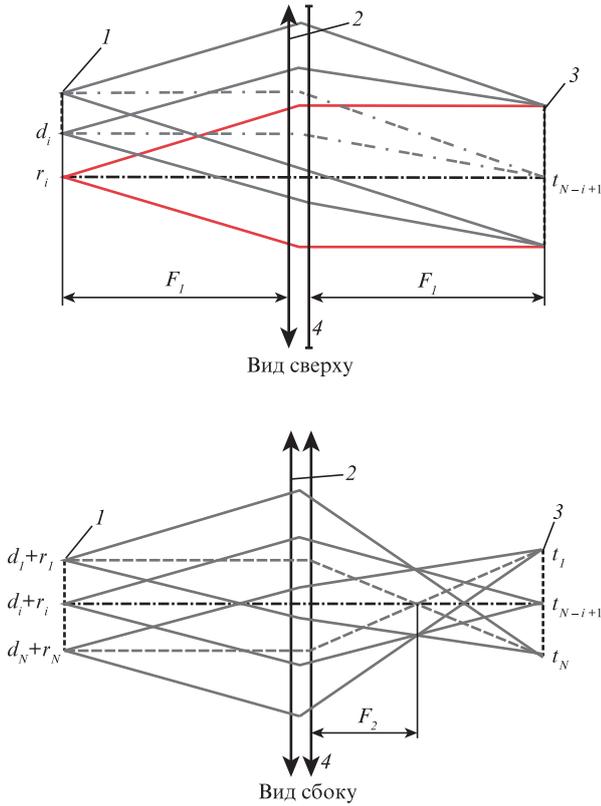


Рис.1. Эквивалентная оптическая схема синтеза одномерных фурье-голограмм: 1 – плоскость объекта (плоскость ПВМС ЖК); 2 – фурье-объектив; 3 – плоскость голограммы; 4 – цилиндрическая линза.

По аналогии с [2] рассмотрим случай синтеза одномерной фурье-голограммы для  $N$ -строчной страницы бинарных данных. Пусть  $r_i(x) = \sqrt{2\pi} C_i \delta(x)$  – функция  $i$ -го точечного опорного источника, расположенного в передней фокальной плоскости фурье-объектива 2 (плоскость 1) на оптической оси объектива (см. рис.1), где  $C_i$  – безразмерный неотрицательный коэффициент, а  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака;  $d_i(x - \Delta)$  – функция источника предметного пучка, соответствующего  $i$ -й строке страницы данных, где  $\Delta$  – расстояние между центром строки и опорным источником. Чтобы при восстановлении фурье-голограммы изображение строки страницы данных было пространственно разделено с изображением нулевого порядка, значение  $\Delta$  подбирается большим или равным половине размера записываемой строки. Как показано на рис.1, функция пропускания  $(N - i + 1)$ -й строки голограммы пропорциональна интенсивности суперпозиции опорного пучка, сформированного  $i$ -м точечным источником, и предметного пучка, сформированного  $i$ -й строкой входной страницы данных:

$$t_{N-i+1}(x_f) \propto I_i(x_f) = |R_i(x_f) + D_i(x_f)|^2 = D_i^*(x_f)D_i(x_f) + R_i^*(x_f)D_i(x_f) + R_i(x_f)D_i^*(x_f) + R_i^*(x_f)R_i(x_f), \quad (1)$$

где  $D_i(x_f)$  – функция  $i$ -го предметного пучка;  $R_i(x_f)$  – функция  $i$ -го опорного пучка;  $x_f$  – координата вдоль горизонтальной оси в плоскости голограммы 3.

Согласно известному свойству сфероцилиндрического дублета [3], амплитуды полей предметного и опорного пучков в плоскости 3 и в плоскости 1 связаны формулой

одномерного преобразования Фурье. С учетом этого (1) можно переписать в виде

$$t_{N-i+1}(x_f) \propto \tilde{F}(d_i^*(x) d_i(x)) + C_i \tilde{F}(d_i(x)) \exp(-i\Delta x_f) + C_i \tilde{F}(d_i^*(x)) \exp(-i\Delta x_f) + C_i^2, \quad (2)$$

где  $\tilde{F}(\dots)$  – фурье-образ функции. Для расчета амплитуды поля света в плоскости изображения, восстановленного одномерной голограммой Фурье, необходимо вычислить построчный одномерный фурье-образ от функции распределения коэффициента амплитудного пропускания голограммы. Каждому из 4 слагаемых в правой части уравнения (2) будет соответствовать своя область в восстановленном поле: первому – область автокорреляции, которая вдвое больше записанной строки данных, второму и третьему – два сопряженных изображения записанной строки, симметричных относительно оптической оси, четвертому – яркий тонкий нулевой порядок. Очевидно, что при синтезе голографической структуры автокорреляционной компонентой в (2) можно пренебречь, поскольку ее наличие может внести существенные искажения в восстановленное голограммой изображение. Таким образом, в правой части уравнения (2) остаются члены, дающие в сумме действительную величину. В конечном варианте уравнение синтеза амплитудной одномерной голограммы Фурье сводится к простому виду:

$$t_{N-i+1}(x_f) = C_i + \text{Re}[\tilde{F}(d_i(x - \Delta))]. \quad (3)$$

Константа  $C_i$  при синтезе выбирается такой, чтобы выполнялось условие  $t_f(x_f) \geq 0$ .

При проведении исследований использовалась организация страницы входных данных голографической памяти в соответствии с международным стандартом ЕСМА-377, как и в [1,2]. Результатом компьютерного расчета является амплитудная голограмма, представленная в виде полутонкового растрового изображения. На

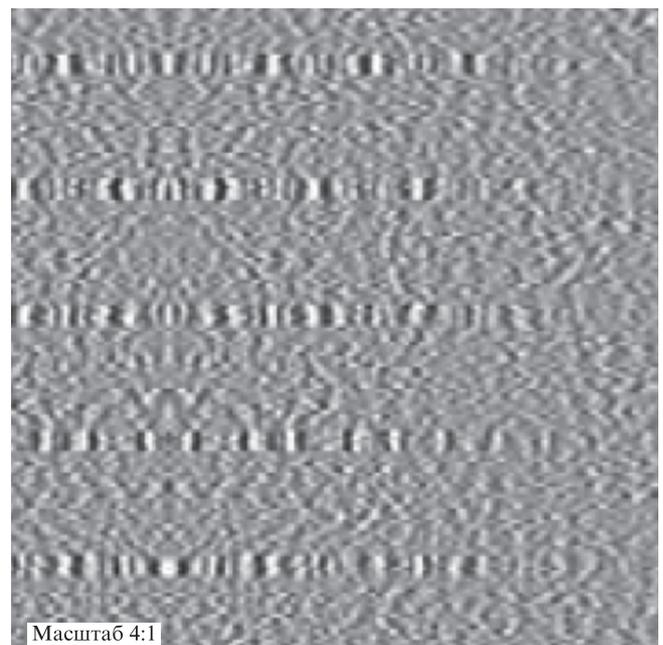


Рис.2. Увеличенный фрагмент синтезированной одномерной суб-голограммы Фурье.

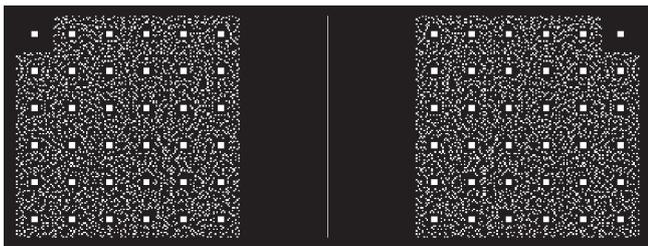


Рис.3. Изображение, восстановленное с одномерной субголограммы Фурье при численном моделировании процессов записи и считывания для идеальной амплитудной характеристики ПВМС ЖК и экспозиционной характеристики фотопластинки.

рис.2 показан пример увеличенного фрагмента рассчитанной субголограммы Фурье (в масштабе 4:1), а на рис.3 представлен результат численного восстановления изображения с субголограммы. Восстановленное поле состоит из трех пространственно разделенных областей, содержащих вертикальную линию единичной ширины в нулевом порядке и два сопряженных изображения записанной страницы данных. Проведенные математические модельные расчеты, аналогичные выполненным ранее для компьютерно-синтезированных двумерных голограмм Фурье [1, 2], показали пригодность компьютерно-синтезированных одномерных голограмм Фурье для записи страниц двоичных данных.

### 3. Экспериментальное моделирование записи и восстановления данных

При экспериментальных исследованиях использовался ПВМС ЖК (компания Holoeye, тип LCX-017), на который выводилась компьютерно-синтезированная голограмма. Апертура ПВМС содержит  $1024 \times 768$  пикселей (размер пикселя –  $32 \times 32$  мкм). Перепроецирование синтезированной субголограммы на голографические высокоразрешающие фотографические пластинки осуществлялось с помощью оптической системы согласно оптической схеме, представленной на рис.4. На ПВМС ЖК выводилась рассчитанная одномерная субголограмма Фурье, которая освещалась коллимированным пучком света от лазерного (или светодиодного) источника. При этом оптическая система формировала изображение субголограммы Фурье на чувствительном слое фотопластинки (типа ПФГ – 01) с 10-кратным уменьшением.

В результате было экспериментально получено восстановленное изображение страницы входных данных, уменьшенной в 10 раз субголограммой Фурье (рис.5).

Качество восстановленного изображения с одиночной одномерной фурье-голограммы тестового объекта оказалось неудовлетворительным из-за сильного искажения

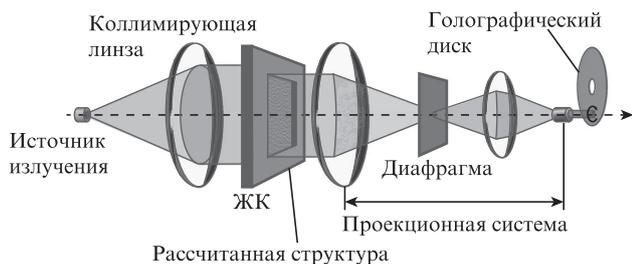


Рис.4. Проекционная оптическая схема записи компьютерно-синтезированных одномерных субголограмм Фурье.

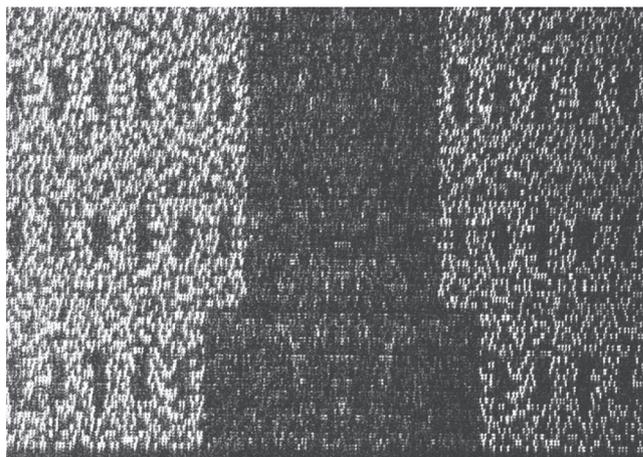


Рис.5. Изображение фрагмента страницы входных данных, экспериментально восстановленное с одномерной субголограммы Фурье, где показаны +1-й (страница данных слева) и +2-й (страница данных справа) дифракционные порядки.

шумами дискретного характера. Также в восстановленном изображении наблюдается локализация распределения интенсивности шума в информационных строках тестового объекта. Яркость отдельных элементов шумовой составляющей восстановленного изображения соизмерима с яркостью информационных точек страницы данных, что однозначно приводит к ошибкам при считывании.

При численном восстановлении изображения тестовой страницы входных данных с синтезированной одномерной субголограммы Фурье без квантования по градациям серого отношение сигнал/шум составило  $\sim 10^{15}$ , что является пределом точности использованных численных алгоритмов. После квантования расчетное отношение сигнал/шум упало до 50, а при экспериментальных исследованиях отношение сигнал/шум в восстановленном изображении составило  $\sim 1$ . Одной из причин возникновения шума в случае субголограммы Фурье, полученной методом перепроецирования на чувствительном слое фотопластинки, является искажение структуры синтезированной голограммы как при ее выводе на ПВМС ЖК, так и при записи, вызванное нелинейностью регистрирующей среды. Экспериментальные исследования показали, что наибольшие искажения возникают из-за некорректной передачи градаций серого рассчитанной голографической структуры в самом ПВМС ЖК вследствие нелинейности его амплитудной характеристики и в меньшей степени – из-за нелинейности экспозиционной характеристики фоточувствительного материала.

В процессе экспериментов время экспозиции подбиралось таким образом, чтобы субголограммы регистрировались на линейном участке экспозиционных характеристик фотопластинок ПФГ-01, что обеспечивалось известными данными о них. В ходе экспериментов была исследована амплитудная характеристика ПВМС ЖК. На ПВМС ЖК выводились последовательно градации серого от 0-го до 255-го уровней и измерялось пропускание с помощью измерителя мощности оптического излучения. Измеренная относительная амплитудная характеристика ЖК модулятора показана на рис.6, причем максимальная относительная интенсивность прошедшего через ЖК транспарант излучения принималась за 256, а минимальная – за ноль. Из приведенного графика следует, что линейный участок голограммы составляет всего  $\sim 110$  градаций серого.

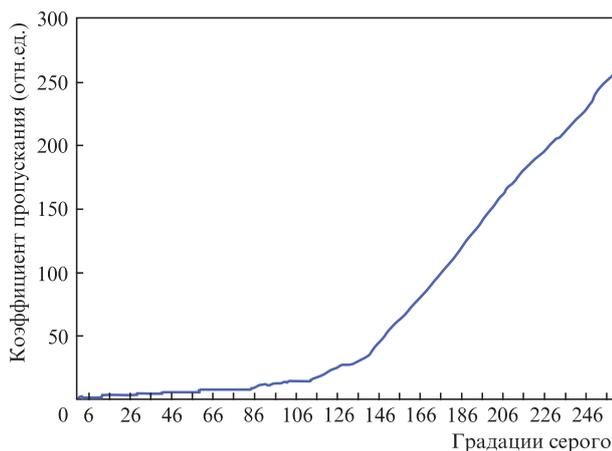


Рис.6. Относительная амплитудная характеристика коэффициента пропускания ПВМС ЖК (Sony LCX-017).



Рис.7. Изображение фрагмента страницы входных данных, восстановленное с синтезированной одномерной субголограммы Фурье с учетом внесения предсказаний, частично компенсирующих нелинейность амплитудной характеристики ПВМС ЖК.

С учетом полученной амплитудной характеристики ПВМС ЖК была синтезирована голограмма Фурье с линеаризованным квантованием по уровням. На рис.7 приведено изображение фрагмента страницы входных данных, восстановленное с полученной единичной субголограммы Фурье. Если сравнить фрагменты строк страницы данных, восстановленных с реально полученной субголограммы Фурье (рис.7) и восстановленных в результате численного математического моделирования (рис.3), то видно, что для реально полученных в экспериментах субголограмм Фурье нулевой порядок уширен из-за дифракционных ограничений восстанавливающей оптической системы, а шумы, локализованные около нулевого порядка, есть результат остаточных искажений голографической структуры из-за частичной предкомпенсации нелинейности амплитудной характеристики ПВМС ЖК, а также из-за незначительной нелинейности экспозиционной характеристики фоточувствительного материала фотопластинок при квантовании по 256 уровням яркости.

Далее были проведены эксперименты с мультиплексной записью одномерных субголограмм Фурье на один участок фоточувствительного материала. При мультиплексировании для записи каждой последующей субголограммы фотопластинка (голографический носитель) поворачивалась на определенный угол вокруг оси, совпадающей с осью проецирующего пучка. Имеющаяся на настоящий момент в распоряжении авторов техника обеспечивает возможность мультиплексной записи на один участок голографического носителя до 20 субголограмм, что обусловлено высокой разрешающей способностью фоточувствительного материала — фотопластинок ПФГ-01, используемых для такой записи.

Оптическая схема отдельного постраничного считывания мультиплексированных субголограмм Фурье представлена на рис.8. Она состоит из коллиматора (микрообъектив 2, диафрагма типа пин-холл 3, объектив 4, диафрагма 5), обеспечивающего засветку апертуры мультиплицированной субголограммы, а также анаморфотной проекционной оптической системы, расположенной после фотопластинки 6. Анаморфотная оптическая система состоит из сферического фурье-объектива 7 и цилиндрической линзы 8. Восстановленные с субголограмм Фурье изображения фрагментов страниц входных данных фиксировались с помощью матричного фотоприемника 9, расположенного в задней фокальной плоскости анаморфотной оптической системы. В случае рассогласования требуемого направления считывающих пучков света относительно плоскости цилиндрической линзы, она вносит существенные искажения в структуру восстановленного изображения.

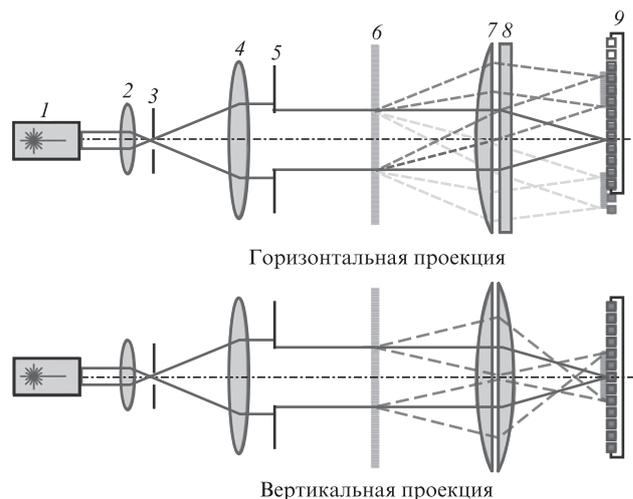


Рис.8. Оптическая схема для считывания одномерных компьютерно-синтезированных субголограмм Фурье постраничным методом: 1 — лазер; 2 — микрообъектив; 3 — диафрагма типа пин-холл; 4 — объектив; 5 — диафрагма; 6 — фоточувствительный носитель информации; 7 — фурье-объектив; 8 — цилиндрическая линза; 9 — матричный фотоприемник.

На рис.9 представлен результат восстановления изображения фрагментов страницы входных данных с трех субголограмм Фурье, которые мультиплексно записывались с шагом поворота носителя  $20^\circ$ . Если сравнить его с результатом восстановления одиночной голограммы, показанным на рис.10, то отчетливо видна размазанность восстановленных мультиплексированных голограмм по вертикальной координате. Поскольку плоскости изображения трех голограмм совпадают, то эти шумы представляют собой размытое изображение, восстановленное соседними субголограммами. При регистрации восстановленного изображения с помощью матричного фотоприемника в некоторых областях наблюдались ошибки распознавания из-за перекрытия первых порядков дифракции соседними голограммами. Вторые порядки дифракции были пространственно разнесены и в плоскости регистрации камеры не попадали, а следовательно, на качество восстановленного изображения они не влияли.

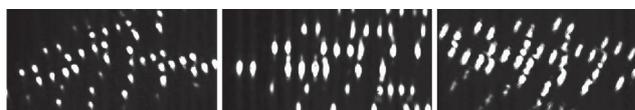


Рис.9. Изображение тест-объекта фрагмента страницы входных данных, восстановленное последовательно с трех мультиплексно записанных синтезированных одномерных субголограмм Фурье (для наглядности представлены идентичные фрагменты страницы данных).



Рис.10. Изображение тест-объекта в виде фрагмента страницы входных данных, восстановленное с одиночной одномерной субголограммы Фурье.

Следует также отметить, что эксперименты показали целесообразность использования построчного способа считывания страниц входных данных, записанных на субголограммы Фурье проекционным методом, поскольку при этом можно ожидать повышения скорости считывания и улучшения отношения сигнал/шум за счет увеличения яркости считанного изображения. Более подробно этот вопрос будет исследован в следующей работе, т.к. он требует отдельного изучения.

#### 4. Заключение

В настоящей работе рассмотрена возможность повышения плотности записи данных в системе голографической памяти, использующей компьютерный синтез и проекционную мультиплексную запись одномерных компьютерно-синтезированных субголограмм Фурье. Преимущества такой системы определяются тем, что одномерные голограммы обладают высокой селективностью к изменению направления лазерного считывающего пучка света по отношению к голограмме. Представленные результаты позволяют говорить о возможности повышения плотности записи информации в виде страниц входных данных пропорционально числу субголограмм Фурье, записываемых в одну мультиплексную голограмму.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания № 3.9.2014К, № 3.1426.2014К (соглашение № 14.574.21.0066(ID RFMEFI57414X066)).

1. Бетин А.Ю., Бобринев В.И., Евтихийев Н.Н., Жердев А.Ю., Злоказов Е.Ю., Лушников Д.С., Маркин В.В., Одинокое С.Б., Стариков С.Н., Стариков Р.С., *Квантовая электроника*, **43**, 87 (2013).
2. Betin A.Y., Bobrinev V.I., Odinkov S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Y. *Appl. Opt.*, **52**, 8142 (2013).
3. Duvernoy J., Vienot J.Ch. *C. R. Acad. Sc., Paris*, **269**, 890 (1969).