

## 8. Ахроматический механизм восстановления волнового фронта

А. М. Смолович

Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Анализируется механизм восстановления волнового фронта, основанный на геометрооптическом отражении восстанавливающей волны от поверхностей постоянной разности фаз между объектной и опорной волнами, использованными для регистрации интерференционной картины. В этом случае форма восстановленного волнового фронта не будет зависеть от длины волны восстанавливающего излучения. Рассказывается о реализации ахроматического восстановления волнового фронта при использовании ультракоротких лазерных импульсов для регистрации в объемной среде и в планарном волноводе. Рассматриваются варианты ахроматических оптических элементов. Показывается возможность восстановления временной структуры световых импульсов.

*Ключевые слова:* Волновой фронт, Геометрическая оптика, Голография, Ультракороткие лазерные импульсы, Планарный волновод, Оптические элементы, Киноформ, Пространственно-временная голография.

*Цитирование:* Смолович, А. М. Ахроматический механизм восстановления волнового фронта / А. М. Смолович // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 29–36.

### Введение

Механизм восстановления волнового фронта (ВВФ) голограммой основан на дифракции восстанавливающего излучения записанной в голограмме квазипериодической интерференционной структурой. Именно в локальном периоде этой структуры заключена информация о волновом фронте (ВФ) объектной волны. Этот механизм работает как в тонких голограммах, так и в объемных, зарегистрированных как в сходящихся, так и во встречных пучках. В классической работе Ю. Н. Денисюка [1] был предложен другой механизм ВВФ, основанный на геометрооптическом отражении восстанавливающей волны от поверхностей постоянной разности фаз (ППРФ) между объектной и опорной волнами, использованными для регистрации интерференционной картины в объемной среде. Хотя данный механизм был предложен для голографии, фактически он существенно отличается от голографического и представляет самостоятельный интерес [2, 3]. Будем называть его ахроматическим механизмом ВВФ, поскольку форма восстановленного таким образом ВФ не будет зависеть от длины волны восстанавливающего излучения. В этом случае для ВВФ достаточно одной ППРФ, которая будет действовать, как зеркало сложной формы, в локальной кривизне которого заключена информация о ВФ объектной волны.

В докладе механизм ахроматического ВВФ сравнивается с голографическим, объясняется, почему этот механизм не работает в обычных голограммах, в том числе, в голограммах Денисюка. Рассказывается о реализации ахроматического ВВФ при использовании ультракоротких импульсов (УКИ) лазерного излучения для регистрации. Описывается реализация двумерного аналога ахроматического ВВФ в планарных волноводах. Обсуждаются варианты создания ахроматических оптических элементов (ОЭ). Показывается возможность восстановления временной структуры УКИ.

### 1. Базовые принципы

Для сравнения двух механизмов ВВФ рассмотрим интерференцию объектной и опорной монохроматических волн в некоторой области пространства, где они удовлетворяют скалярным уравнениям геометрической оптики (ГО) [4, параграф 1]. Тогда запишем объектную и опорную волны как  $A_O(\mathbf{r})\exp[ikL_O(\mathbf{r})]$  и  $A_R(\mathbf{r})\exp[ikL_R(\mathbf{r})]$ , соответственно. Здесь  $L_O(\mathbf{r})$  и  $L_R(\mathbf{r})$  — эйконалы волн,  $A_O(\mathbf{r})$  и  $A_R(\mathbf{r})$  — их амплитудные функции,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число и  $\lambda$  — длина волны излучения. Интенсивность интерференционного поля определяется выражением

$$A_O^2(\mathbf{r}) + A_R^2(\mathbf{r}) + 2A_O(\mathbf{r})A_R(\mathbf{r})\cos(k[L_R(\mathbf{r}) - L_O(\mathbf{r})]). \quad (1)$$

Тогда поверхности постоянной интенсивности (1) определяются условием постоянства аргумента косинуса в (1).

$$L_R(\mathbf{r}) - L_O(\mathbf{r}) = p, \quad (2)$$

где  $p$  является константой для каждой ППРФ [1]. Предположим, что восстанавливающая волна  $A_R(\mathbf{r})\exp[ik'L_R(\mathbf{r})]$  (где амплитудная функция  $A_R(\mathbf{r})$  и эйконал  $L_R(\mathbf{r})$  совпадают с опорными, а волновое число  $k' = 2\pi/\lambda'$  может отличаться от  $k$ ) испытывает ГО отражение от ППРФ. Тогда фаза  $k'L_{\text{refl}}(\mathbf{r})$  отраженной волны на поверхности (2) совпадает с фазой восстанавливающей волны [4]

$$k'L_{\text{refl}}(\mathbf{r}) = k'L_R(\mathbf{r}). \quad (3)$$

Из (2) и (3) получаем

$$L_{\text{refl}}(\mathbf{r}) = L_O(\mathbf{r}) + p, \quad (4)$$

т. е. с точностью до аддитивной константы эйконал объектной волны восстанавливается при любом значении  $k'$ . Отсюда следует, что волновой фронт объектной волны (поверхность  $L_O(\mathbf{r}) = \text{const}$ ) восстанавливается ахроматически, т. е. независимо от длины волны восстанавливающего излучения. Будем называть этот механизм ВВФ ахроматическим. Он был предложен в работе Ю. Н. Денисюка [1] для голографии. Покажем,

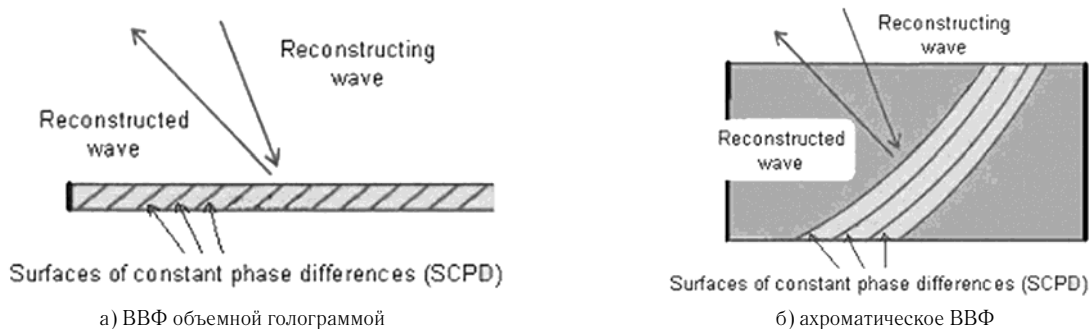


Рис. 1. Два механизма ВВФ

что в реальности этот механизм отличается от голографического.

В тех же условиях при взаимодействии восстанавливающей волны с обычной двумерной голограммой результирующее поле может быть представлено в виде суммы, где слагаемые, связанные с восстановлением изображения можно записать, как [5]

$$A_0(\mathbf{r})A_R^2(\mathbf{r})\exp(i[(k' - k)L_R(\mathbf{r}) + kL_O(\mathbf{r})]) + A_0(\mathbf{r})A_R^2(\mathbf{r})\exp(i[(k' + k)L_R(\mathbf{r}) - kL_O(\mathbf{r})]), \quad (5)$$

где первое и второе слагаемые соответствуют основному и сопряженному изображениям. Волна, соответствующая первому слагаемому, имеет эйконал  $L_{\text{diff}}(\mathbf{r})$ .

$$L_{\text{diff}}(\mathbf{r}) = \frac{\lambda'}{\lambda}L_O(\mathbf{r}) + \left(1 - \frac{\lambda'}{\lambda}\right)L_R(\mathbf{r}). \quad (6)$$

Отсюда следует, что эйконал объектной волны будет восстанавливаться только при  $\lambda' = \lambda$ . При произвольном  $\lambda'$  выражение (6) описывает зависимость формы восстановленного ВФ от длины волны (дисперсию), и для случая плоских волн приводит к формуле решетки [6, секция 8.6.1, выражение (8)], а для сферических волн к формулам, полученным в [7]. Таким образом, волна, восстановленная с помощью ахроматического механизма (4), при  $\lambda' \neq \lambda$  не совпадает с волной, восстановленной с помощью голографического механизма (6). Мы сравнивали ахроматическое ВВФ с ВВФ двумерной голограммой, но в известной работе [8] показано, что двумерное сечение объемной голограммы плоскостью, параллельной ее поверхности, полностью определяет геометрию изображения, а третье измерение через брэгговские эффекты влияет только на интенсивность изображения.

Следующие примеры демонстрируют разницу между ахроматическим и голографическим механизмами восстановления волнового фронта. В простейшем случае плоских объектной и опорной волн, голографический механизм соответствует дифракции плоской волны решеткой с постоянным периодом, а ахроматический механизм соответствует отражению восстанавливающей волны плоским зеркалом. Если объектная волна сферическая, а опорная остается плоской, голографическому механизму соответствуют дифракция плоской волны зонной пластинкой Френеля,

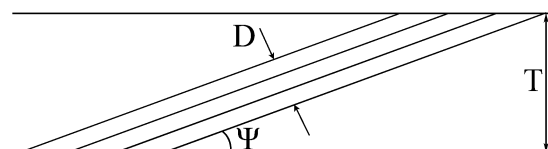


Рис. 2. Параметры интерференционной структуры, зарегистрированной УКИ

а ахроматическому механизму соответствует отражение плоской волны от параболического зеркала. В общем случае ППРФ соответствует зеркальной поверхности сложной формы.

Обычная объемная голограмма содержит огромное количество фрагментов ППРФ, соответствующих максимумам интерференционной картины, которые формируют периодическую структуру. Как правило, объемная голограмма регистрируется в плоскопараллельном слое толщиной от нескольких мкм до нескольких десятков мкм, имеющем поперечные размеры от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. На рис. 1а показано двумерное сечение обычной объемной голограммы. Протяженность периодической структуры вдоль поверхности голограммы обычно на несколько порядков превышает размеры каждого фрагмента ППРФ внутри слоя. Вследствие этого, голографический механизм ВВФ доминирует над ахроматическим механизмом [9]. Это подтверждается описанным в следующей главе экспериментальным фактом наличия зависимости направления восстановленного объемной отражательной голограммой пучка от длины волны восстанавливающего излучения, которую можно наблюдать в пределах спектральной селективности голограммы.

## 2. Реализация ахроматического ВВФ с регистрацией интерференции УКИ

Для того, чтобы начал работать механизм ахроматического восстановления волнового фронта, количество ППРФ, соответствующих максимумам интерференционной картины, должно быть уменьшено, а толщина регистрирующей среды увеличена (рис. 1б). Мы использовали для этого регистрацию интерференции УКИ лазерного излучения [10, 11]. Чтобы ахроматический механизм ВВФ стал доминирующим, необходимо выполнение неравенства [9]

$$T \cos \psi \gg D, \quad (7)$$

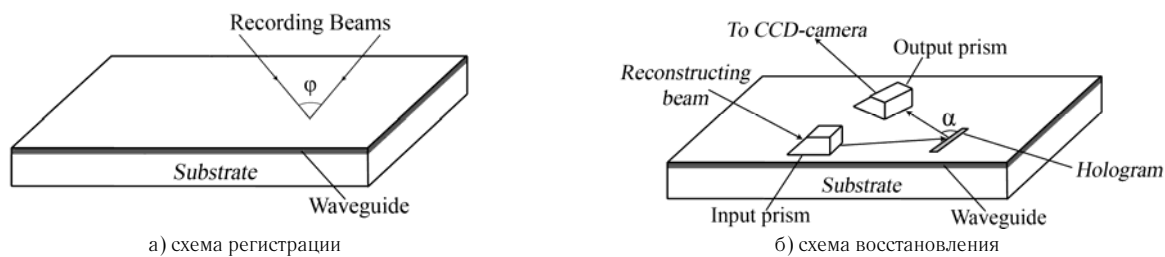


Рис. 3. Эксперимент по ахроматическому ВВФ в планарном волноводе

где  $T$  — толщина регистрирующей среды,  $D$  — ширина зарегистрированной интерференционной структуры в направлении, нормальном к ППРФ,  $\psi$  — угол между вектором решетки и нормалью к поверхности слоя (рис. 2). В случае, когда импульсы имеют одинаковую длительность  $\tau$  и распространяются прямо навстречу друг другу,  $D \approx \tau c$ , где  $c$  — скорость света.

Для регистрации использовался лазер на титанате сапфира с накачкой аргоновым ионным лазером. Длина волны лазера варьировалась в диапазоне 780–830 нм. Длительность импульсов была порядка 40 фс с частотой повторения 80 МГц и средней мощностью 200 мвт. Лазерный пучок делился с помощью полупрозрачного интерференционного зеркала на два пучка, которые направлялись навстречу друг другу. Регистрирующая пластинка устанавливалась так, чтобы ее фотослой находился в области перекрытия встречных импульсов. Для точного уравнивания длин оптических путей использовалась методика, описанная в [12]. Нормаль к пластинке составляла угол порядка  $20^\circ$  с оптической осью. Использовались специально изготовленные фотопластинки с увеличенной толщиной фотослоя, которая варьировалась от 110 до 300 мкм. Фотоэмульсия типа «ИАЭ-встречная», созданная в РИЦ «Курчатовский институт» сенсibilizировалась к длине волны 800 нм. Для контроля некоторые поля на фотопластинке экспонировались непрерывным излучением в той же геометрии, что и импульсным. При обработке фотопластинок происходила значительная усадка фотослоя, в результате которой полоса восстановления смещалась в область длин волн порядка 600 нм.

Для восстановления использовался лазер на красителе (раствор родамина 6Ж в этиленгликоле) с накачкой аргоновым лазером. Использовался непрерывный режим генерации с перестройкой длины волны излучения от 580 до 630 нм. Восстановленный пучок света наблюдался в отражательной геометрии на диффузном экране, установленном на расстоянии порядка 4 м от фотопластинки. Спектральная селективность структуры, зарегистрированной импульсным излучением, позволяла наблюдать восстановленный пучок при плавном изменении длины волны лазера от 585 до 607 нм. При этом изменении пятно, образованное на экране восстановленным пучком, не смещалось, то есть направление распространения восстановленного пучка не менялось. В то же время, для структуры, зарегистрированной непрерывным излучением, в тех же

условиях пятно на экране смещалось на 6 см. Это доказывает, что для структуры, зарегистрированной фемтосекундными импульсами, работает не голографический, а ахроматический механизм ВВФ.

### 3. Ахроматическое ВВФ в планарном волноводе

Необходимость использования для регистрации фотослоев большой толщины вызывает большие технологические трудности, связанные как с изготовлением таких слоев, так и их фотографической обработкой [10]. Кроме того, в таких слоях поглощение света во время регистрации [13] приводит к существенному снижению дифракционной эффективности [14]. Этих проблем не возникает, если использовать двумерный аналог ахроматического ВВФ. Предположим, что интерференционная структура регистрируется в планарном волноводе ультракороткими лазерными импульсами, которые проникают в волновод через его верхнюю границу (рис. 3а), а восстановление происходит в волноводном режиме (рис. 3б). В этом случае процесс восстановления является двумерным. Заметим, что вид сверху на интерференционную структуру, на которую падает восстанавливающий волноводный пучок света, будет подобен поперечному сечению процесса восстановления в трехмерном случае (рис. 2). Поэтому, мы можем использовать критерий (7) доминирования механизма ахроматического ВВФ, заменяя в нем толщину слоя  $T$  на ширину восстанавливающего пучка в плоскости волновода. Здесь ширина структуры  $D \approx \tau c / \sin(\varphi/2)$ , где  $\varphi$  — угол между записывающими пучками. Отсюда можно понять, что в этом случае условия ахроматического ВВФ не зависят от толщины планарного волновода, что является главным преимуществом двумерного аналога ахроматического ВВФ над трехмерным случаем.

Базовый эксперимент включал регистрацию интерференционной структуры в планарном волноводе с помощью фемтосекундных лазерных импульсов и ахроматического ВВФ в волноводном режиме [14]. В качестве модели планарного волновода использовался слой бихромированной желатины ( $n_2 = 1,54$ ) толщиной 20 мкм на подложке из полированного кварца ( $n_1 = 1,456$ ). Для регистрации использовалась вторая гармоника ( $\lambda = 400$  нм) лазера на титанате сапфира с длительностью импульсов порядка 30 фс и частотой их повторения 80 МГц. Во время регистрации волноводный режим не применялся, и образец использовался как обычная регистрирующая пластинка (рис. 3а).

Экспозиция варьировалась в пределах  $0,01–0,1 \text{ Дж/см}^2$ . Угол  $\varphi$  между записывающими пучками был около  $60^\circ$ . Обработка бихромированной желатины после экспозиции включала промывку в холодной воде и сушку растворах изопропилового спирта возрастающей концентрации.

Восстановление производилось в волноводном режиме (рис. 3б). Для ввода/вывода излучения в планарный волновод использовались призмы из алюмоитриевого граната с углом  $60^\circ$  у основания. Для восстановления использовался лазер на красителе (раствор родамина 6Ж в этиленгликоле) с накачкой второй гармоникой ( $\lambda = 532 \text{ нм}$ ) Nd:YAG лазера. Длина волны восстанавливающего излучения варьировалась от 580 до 630 нм. Восстановленный пучок после вывода из волновода наблюдался в пределах спектральной селективности интерференционной структуры в диапазоне 580–615 нм. Направление восстановленного пучка определялось с точностью  $6 \cdot 10^{-4}$  рад. Угол  $\alpha$  наклона восстановленного пучка к интерференционной структуре при голографическом восстановлении должен был бы зависеть от длины волны. В этом случае изменение расчетного значения угла  $\alpha$  в пределах спектральной селективности структуры составляло бы порядка 0,03 рад. Измеренное в эксперименте значение угла  $\alpha$  практически не менялось с изменением длины волны восстановления. Это доказывает, что в данном случае работает ахроматический механизм ВВФ.

Ахроматическое ВВФ в волноводном режиме может использоваться для создания ахроматических волноводных ОЭ. Такие ОЭ были бы востребованы как для оперирования ультракороткими лазерными импульсами, которые имеют широкий спектр, так и для параллельной обработки сигналов на различных частотах. Оба направления нужны для повышения скорости обработки информации. Волноводные ОЭ могут быть получены не только путем прямой регистрации интерференционной структуры. Можно сначала рассчитать форму волноводного ОЭ, содержащего лишь несколько периодов, а затем изготовить его с помощью фокусированного ионного пучка (FIB). Подобная технология была продемонстрирована нами в [15], где с помощью FIB были получены прямоугольные решетки с большим аспектным соотношением.

#### 4. Ахроматические ОЭ и оптические системы

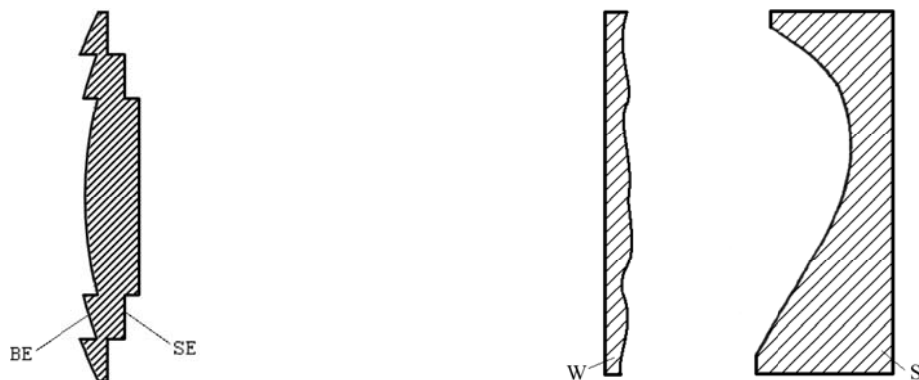
Как и в двумерном случае, 3D ахроматические ОЭ могут быть получены не прямой регистрацией, а с использованием компьютерных технологий, когда сначала рассчитывается форма ОЭ, а затем он синтезируется тем или иным способом. В [16] Стетсон обсуждал принципиальную возможность ахроматического ВВФ гипотетической изолированной ППРФ, если ее сделать бесконечно тонкой и зеркально отражающей. Такая зеркальная поверхность была бы отчасти похожа на поверхность так называемых «магических зеркал» — бронзовых зеркал, которые были изготовлены две тысячи лет назад в древнем Китае [17, 18]. Когда на такое

зеркало падал солнечный луч, на противоположной стене возникало изображение Будды. Долгое время это казалось загадкой, но потом было установлено, что поверхность этих зеркал не была плоской, а на отдельных участках имела небольшую кривизну. Принципы Magic Mirror или Макуо (Ma-kuo по-японски означает «магическое зеркало») нашли применение в современных оптических технологиях [19, 20].

Возвращаясь к [16], заметим, что эта работа имела большое значение, поскольку ее следствиями явились [21] (зарегистрированные во встречных пучках голограммы с пилообразным (blazed) поверхностным рельефом) и [22] (киноформ). Поверхность отражательного киноформа фактически составлена из участков (зон) ППРФ, в пределах которых фаза отраженной волны плавно меняется от 0 до  $2\pi$ . На границе перехода к соседней зоне фаза скачком меняется на  $2\pi$ . Однако, в отличие от [14], в киноформе свойство ахроматичности пропадает. Позднее появились т. н. «глубокие» киноформы, называемые также дифракционно-преломляющими или multioorder линзами, в которых скачок фазы на границе зон равнялся  $2\pi M$  (где  $M$  целое число  $> 1$ ), ссылки на эти работы можно найти в [3]. Они обладали существенно меньшими хроматическими аберрациями, по сравнению с обычными киноформами, но не были полностью ахроматическими.

В [3] мы обсуждаем возможность создания ОЭ, у которых скачок фазы полностью исключен. Для восстановления некоторого ВФ такой ОЭ должен быть оптически эквивалентен одной из ППРФ при интерференции этого ВФ с какой-то опорной волной (например, с плоской волной). Форма этой поверхности для одних задач может быть рассчитана численно, для других измерена экспериментально [3, 23]. Синтезированный ОЭ может быть как отражательным, так и пропускающим. Форма поверхности отражательного ОЭ в простейшем случае просто совпадает с формой ППРФ. При переходе от отражательного ОЭ к его пропускающему эквиваленту координата каждой точки поверхности ОЭ вдоль его оптической оси должна быть умножена на  $2/(n-1)$ , где  $n$  — показатель преломления материала, из которого изготовлен пропускающий ОЭ. Технологии получения ОЭ с поверхностью необходимой формы зависят от этой формы, размеров ОЭ и необходимой точности. В частности, могут использоваться литографические методы [24], фокусированные ионные пучки (FIB) [25] и алмазное точение [26].

В случае, если возможности технологии не позволяют получить требуемый диапазон изменения высоты поверхности ОЭ, мы предложили в [3, 27] заменить ОЭ оптической системой из двух ОЭ: ступенчатый ОЭ ( $SE$ ) и ОЭ с пилообразным рельефом ( $BE$ ). Эти ОЭ расположены близко друг к другу и могут быть выполнены на противоположных сторонах единой подложки, как показано на рис. 4а. Подобно киноформе [22] поверхность  $BE$  разделена на зоны. Высота рельефа меняется плавно в пределах каждой зоны и испытывает скачок



а) оптическая система из ОЭ с пилообразным рельефом (*BE*) и ОЭ со ступенчатым рельефом (*SE*), выполненных на противоположных сторонах единой подложки

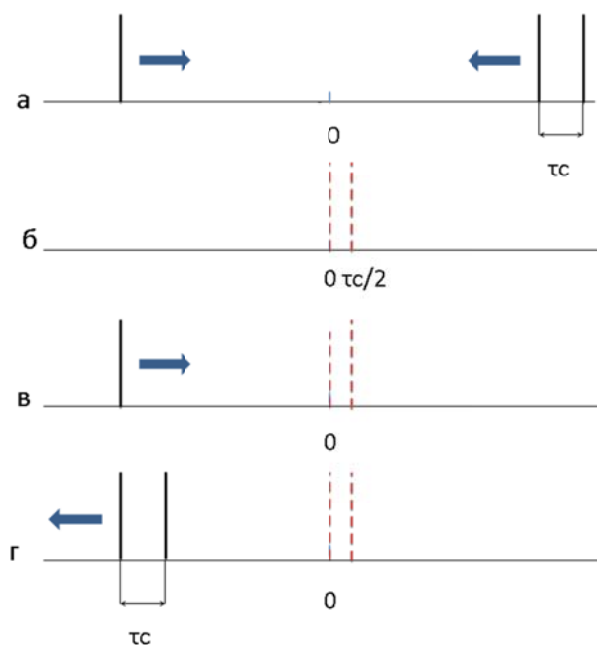
б) оптическая системы из двух ОЭ, не разделенных на зоны: ОЭ с большой оптической силой (*S*) и ОЭ со слабой оптической силой (*W*)

Рис. 4. Варианты ахроматических оптических систем

на границе между соседними зонами. Однако, в отличие от киноформа, здесь величина скачка не связана с длиной волны излучения. Рабочая поверхность каждой ступени *SE* представляет собой участок плоской поверхности, нормальной к оптической оси. Каждая ступень *SE* имеет соответствующую ей зону *BE*, расположенную напротив ее и имеющую одинаковую с ней проекцию на плоскость, нормальную оптической оси. Разница в оптической длине пути между соседними ступенями *SE* равна по абсолютной величине и противоположна по знаку скачку на границе соответствующих зон *BE*. Это позволяет компенсировать скачки фазы на границах зон. ОЭ, показанный на рис. 4а, можно представить, как результат разрезания обычной оптической линзы на зоны и их сдвига вдоль оптической оси. В отличие от обычных киноформных линз, здесь сдвигаются не только участки сферической поверхности, но и участки задней плоской поверхности линзы. Полученный в результате ОЭ будет иметь такую же хроматическую зависимость длины фокуса, как и исходная линзы, что значительно ниже, чем у дифракционных ОЭ [28].

Другой вариант оптической системы, где оба ОЭ не имеют скачков фазовой функции [3], показан на рис. 4б. Здесь ОЭ *S* имеет большую оптическую силу. Предполагается, что в силу сложности изготовления такого ОЭ, его реальная поверхность имеет отклонения от заданной формы. Эти отклонения компенсируются ОЭ *W*, который имеет слабую оптическую силу. Элемент *W* изготавливают по результатам дополнительных измерений ВФ, сформированного элементом *S*. Изготовление слабого ОЭ значительно проще, чем сильного. Как и в предыдущем случае, каждый из ОЭ системы, в принципе, может быть как отражательным, так и пропускающим. Однако, случай, когда элемент *S* является отражательным, а элемент *W* — пропускающим, предпочтителен, поскольку здесь хроматические aberrации, связанные с дисперсией материала пропускающего элемента, будут минимальны.

В [29] был предложен фокусирующий оптико-акустический преобразователь (ФОАП), работающий



а — регистрация, б — зарегистрированная структура, в — восстановление, г — восстановленный сигнал

Рис. 5. Восстановление временной структуры оптического импульса

следующим образом. На поверхность ФОАП направляется лазерный импульс. В результате его взаимодействия с поверхностью ФОАП генерируется акустическая волна. Это предложение базируется на экспериментальных результатах Г. А. Аскарьяна с сотрудниками [30, 31], в которых использовалась сферическая форма фокусирующей поверхности и мощные лазерные импульсы или последовательности импульсов, а также взрывающиеся под действием электрического разряда металлизированные пленки. Вблизи фокуса акустической волны достигнуты давления более  $10^3$  атм. В [29] предлагается вместо сферической поверхности использовать ФОАП, форма поверхности которого рассчитывается путем решения обратной задачи для фокусировки акустической волны в область нужной конфигурации. Требования к точности изготовления ФОАП значительно ниже, чем в оптике из-за

разницы в длинах волн. Такой элемент может быть изготовлен, например, на станке с ЧПУ. Здесь использование ахроматического элемента является принципиальным, поскольку генерируемый акустический импульс может иметь лишь один период колебаний [31], т. е. его спектр будет очень широким. Поэтому, дифракционные элементы здесь не подойдут. В [29] предлагается использовать эту технологию для торможения роста трещин в металлических изделиях за счет создания зоны пластической деформации на пути развития трещины. Однако подобные методы могут быть использованы и в других областях, например, в хирургии [32].

### 5. Временное восстановление УКИ

Известны голографические методы восстановления временной структуры коротких оптических импульсов [33, 34]. Оказывается, это можно сделать с помощью ахроматического ВВФ [35]. Продемонстрируем это на следующем примере. Предположим, что длительности опорного и восстанавливающего импульсов значительно меньше, чем длительность объектного импульса, что позволяет рассматривать их, как  $\delta$ -импульсы. Пусть объектный сигнал представляет собой два  $\delta$ -импульса, разделенных временным промежутком  $\tau$ . Пусть объектный и опорный пучки представляют собой плоские волны, которые распространяются навстречу друг другу (рис. 5). Тогда область пересечения объектного и опорного сигналов представляет собой две плоскости, перпендикулярные направлению распространения волн, отстоящие друг от друга на расстояние  $\tau c/2$ , где  $c$  — скорость света. В качестве восстанавливающей волны также используется  $\delta$ -импульс, который падает на зарегистрированную структуру с той же стороны, что и опорный импульс при регистрации. Он частично отражается сначала от первой плоскости, а через время  $\tau/2$  от второй. Полученный в результате этого сигнал будет представлять собой два

$\delta$ -импульса, разделенных временным промежутком  $\tau$ , что совпадает с объектным сигналом.

При использовании восстанавливающей волны, сопряженной с опорной, можно получить объектный сигнал, обращенный во времени. Чтобы продемонстрировать это, в нашем примере достаточно для наглядности допустить, что первый импульс, входящий в объектный сигнал, имеет меньшую амплитуду, чем второй. Восстанавливающий импульс,

сопряженный с опорным, будет падать на структуру с противоположной стороны (в рассмотренном примере справа налево). Тогда у восстановленного сигнала, меньшую амплитуду будет иметь второй импульс, т. е. он будет обращен во времени по отношению к объектному импульсу. Если начать увеличивать длительность опорного и восстанавливающего импульсов, то во временной структуре восстановленного сигнала появятся искажения, по сравнению с объектным [35].

### Заключение

Таким образом, мы проанализировали механизм ахроматического ВВФ, предложенный Ю. Н. Денисюком, и показали его отличие от голографического. Рассказали о реализации ахроматического ВВФ при использовании фемтосекундных лазерных импульсов на стадии регистрации в регистрирующих средах повышенной толщины и в планарных волноводах. Предложили несколько вариантов ахроматических ОЭ и оптических систем. Продемонстрировали возможность восстановления временной структуры оптических импульсов.

### Благодарность

Доклад подготовлен в рамках программы сотрудничества Института радиотехники и электроники (ИРЭ) им. В. А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия и Университета Соноры, г. Эрмосийо, Сонора, Мексика.

### Список источников

- [1] Денисюк, Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Оптика и спектроскопия. — 1963. — Том 15. — № 4. — С. 522–532.
- [2] Сисакян, И. Н. Ахроматическое восстановление волнового фронта / И. Н. Сисакян, А. М. Смолович // Письма в ЖТФ. — Том 17 — № 1. — С. 41–44.
- [3] Smolovich, A. M. Achromatic optical elements // Applied optics. — 2006. — Vol. 45. — № 30. — P. 7871–7877.
- [4] Кравцов, Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов — М.: Наука, 1980. — 304 с.
- [5] Gabor, D. Microscopy by reconstructed wave-fronts // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1949. — Vol. 197. — № 1051. — P. 454–487.
- [6] Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф — М.: Наука, 1970. — 856 с.
- [7] Meier, R. W. Magnification and third-order aberrations in holography // JOSA. — 1965. — Vol. 55. — № 8. — P. 987–992.
- [8] The theory of deep holograms / D. Gabor and G. W. Stroke // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1968. — Vol. 304. — № 1478. — P. 275–289.
- [9] Сисакян, И. Н. О двух механизмах формирования изображения / И. Н. Сисакян, А. М. Смолович // Компьютерная оптика. — 1990. — № 7. — С. 56–60.
- [10] Дементьев, Д. А. Ахроматическое восстановление волнового фронта фемтосекундных лазерных импульсов / Д. А. Дементьев, А. Л. Иванов, О. Б. Серов, А. М. Смолович, А. Г. Степанов, С. В. Чекалин // Письма в ЖЭТФ. — 1997. — Том 65. — № 5. — С. 388–390.

- [11] **Dement'ev, D. A.** Geometric-optical reconstruction of a wavefront experimental realization with femtosecond laser pulses / S. V. Chekalin, D. A. Dement'ev, A. L. Ivanov, Yu. A. Matveets, O. B. Serov, A. M. Smolovich, A. G. Stepanov // Optics communications. — 1998. — Vol. 150. — № 1-6. — P. 38–42.
- [12] **Дементьев, Д. А.** Регистрация интерференции встречных фемтосекундных лазерных импульсов / Д. А. Дементьев, Ю. А. Матвеев, О. Б. Серов, А. М. Смолович, С. В. Чекалин // Квантовая электроника. — 1996. — Том 23. — № 4. — С. 293–294.
- [13] **Любавская, И. К.** Влияние поглощения записывающих пучков на дифракционную эффективность толстослойных голограмм / И. К. Любавская, О. Б. Серов, А. М. Смолович // Письма в ЖТФ. — 1980. — Том 6. — № 1. — С. 38–43.
- [14] **Smolovich, A. M.** Achromatic reconstruction of femtosecond holograms in the planar optical waveguide / A. M. Smolovich, E. Alvarez, S. A. Aseyev, M. A. Cervantes, S. V. Chekalin, O. B. Serov, V. S. Terpugov // Optics letters. — 2008. — Vol. 33. — № 20. — P. 2401–2403.
- [15] **Smolovich, A. M.** Geometric-optical reconstruction of femtosecond hologram in planar optical waveguide / A. M. Smolovich, E. Alvarez, S. A. Aseyev, M. A. Cervantes, S. V. Chekalin, A. V. Irzhak, O. B. Serov, V. S. Terpugov // SPIE. — 2007. — Vol. 6732. — P. 6732–12.
- [16] **Stetson, K. A.** What is a hologram // Laser Focus. — 1967. — Vol. 3. — № 5. — P. 25–29.
- [17] **Zhang, Z. M.** Optics in China: ancient and modern accomplishments // International Trends in Optics. — 1991. — Vol. 1. — P. 185–194.
- [18] **Gamo, H.** Magic mirrors: optics, technology, and history (A) // Journal of the Optical Society of America — 1983. — Vol. 73. — P. 1933.
- [19] **Hahn, S.** Characterization of mirror-like wafer surfaces using the magic mirror method / S. Hahn, K. Kugimiya, M. Yamashita, P. R. Blaustein, K. Takahashi // Journal of crystal growth. — 1990. — Vol. 103. — № 1-4. — P. 423–432.
- [20] **Riesz, F.** Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2000. — Vol. 33. — № 23. — P. 3033.
- [21] **Sheridon, N. K.** Production of blazed holograms // Applied Physics Letters. — 1968. — Vol. 12. — № 9. — P. 316–318.
- [22] **Lesem, L. B.** The kinoform: a new wavefront reconstruction device / L. B. Lesem, P. M. Hirsch, J. A. Jordan // IBM Journal of Research and Development. — 1969. — Vol. 13. — № 2. — P. 150–155.
- [23] Research Gate. Discussion / URL: [https://www.researchgate.net/post/Can\\_anybody\\_suggest\\_a\\_new\\_method\\_of\\_realization\\_of\\_the\\_non-holographic\\_mechanism\\_of\\_achromatic\\_wavefront\\_reconstruction?\\_ec=topicPostOverviewAuthorQuestions](https://www.researchgate.net/post/Can_anybody_suggest_a_new_method_of_realization_of_the_non-holographic_mechanism_of_achromatic_wavefront_reconstruction?_ec=topicPostOverviewAuthorQuestions).
- [24] **Sweeney, D. W.** Harmonic diffractive lenses / D. W. Sweeney, G. E. Sommargen // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — № 14. — P. 2469–2475.
- [25] **Fu, Y.** Investigation of diffractive-refractive microlens array fabricated by focused ion beam technology / Y. Fu, N. K. A. Bryan // Opt. Eng. — 2001. — Vol. 40. — № 4. — P. 511–517.
- [26] **Blough, C. G.** Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements / C. G. Blough, M. Rossi, S. K. Mack, R. L. Michaels // Applied optics. — 1997. — Vol. 36. — № 20. — P. 4648–4654.
- [27] **Патент № 1620973 РФ.** Устройство для фокусировки излучения / И. Н. Сисакян, А. М. Смолович, В. А. Соيفер. — Оpubл. 15.01.1991.
- [28] **Kovatchev, M.** Inphase optical processors. I. Inphase structures in optical computing / M. Kovatchev, R. Ilieva // Invited paper I2A1, in Proceedings of Optical Computing. — 1990. — Vol. 90. — P. 389–396.
- [29] **Патент № 1749250 РФ.** Способ торможения роста трещин в изделиях и фокусирующий оптико-акустический преобразователь для его осуществления / Г. А. Аскарьян, Р. В. Гольдштейн, А. В. Капцов, И. Н. Сисакян, А. М. Смолович, А. В. Юркин. — Оpubл. 23.07.1992.
- [30] **Аскарьян, Г. А.** Фокусировка и кумуляция светотермозвуковых ударных импульсов от вогнутой поверхности, нагреваемой вспышкой света лазера / Г. А. Аскарьян, Л. Д. Клебанов // Квантовая электроника. — 1988. — Том 15. — № 11. — С. 2167–2168.
- [31] **Аскарьян, Г. А.** Генерация мощных ультразвуковых импульсов плоской или фокусирующей вогнутой поверхностью, взрывааемой электрическим или световым воздействием / Г. А. Аскарьян, М. Г. Королев, А. В. Юркин // Письма в ЖЭТФ. — 1990. — Том 51. — № 11. — С. 586–590.
- [32] Research Gate. Discussion / URL: [https://www.researchgate.net/post/Is\\_it\\_possible\\_to\\_use\\_the\\_optoacoustic\\_focusing\\_element\\_for\\_surgical\\_operation\\_upon\\_internals\\_without\\_cutting\\_the\\_upper\\_body\\_tissues?\\_ec=topicPostOverviewAuthorQuestions](https://www.researchgate.net/post/Is_it_possible_to_use_the_optoacoustic_focusing_element_for_surgical_operation_upon_internals_without_cutting_the_upper_body_tissues?_ec=topicPostOverviewAuthorQuestions).
- [33] **Саари, П. М.** Голография пространственно-временных событий / П. М. Саари, Р. К. Каарли, А. К. Ребане // Квантовая электроника. — 1985. — Том 12. — № 4. — С. 672–682.
- [34] **Mazurenko, Y. T.** Holography of wave packets // Applied Physics B. — 1990. — Vol. 50. — № 2. — С. 101–114.
- [35] **Cervantes, M. A.** Ultrashort light pulse scattering by 3D interference fringe structure / M. A. Cervantes, A. M. Smolovich // SPIE. — 2002. — Vol. 4752. — P. 66–74.

## The achromatic mechanism of wavefront reconstruction

*A. M. Smolovich*

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The principles of wavefront reconstruction by means of a geometric-optical reflection of reconstructing radiation from surfaces with constant phase differences between the object and reference waves used to record the interference fringe structure in the medium bulk are discussed. In this case the reconstructed wavefront shape does not depend on the reconstructing wavelength. The ultrashort laser pulses registration in a thick recording medium was used for realization of the achromatic wavefront reconstruction. In other option 2D analog of the effect was obtained in a planar optical waveguide. Several types of achromatic optical elements are proposed. The possibility of the ultrashort pulse temporal reconstruction is demonstrated.

*Keywords:* Wavefront, Geometrical optics, Holography, Ultrashort laser pulses, Planar waveguide, Optical elements, Kinoform, Time-and-space-domain holography.