

# Экспериментальное исследование углового и частотного спектров дифракции лазерного импульса на плоской периодической наноструктуре из золотых V-антенн

М.В.Балабас, Е.А.Ефремова, А.Ю.Иванов, А.И.Канцеров, И.Р.Крылов, Е.Б.Пелюхова, Ю.В.Петров, У.В.Прохорова, Р.В.Силаев, О.Ю.Третьяк, А.А.Шимко

*При облучении плоской структуры из периодически расположенных золотых V-антенн фемтосекундным импульсным лазером наблюдались несколько аномально отраженных и преломленных волн, интерпретированных как дифракционные максимумы. Обнаружено сжатие спектра импульса в рассеянном свете. Величина сжатия и поляризация волн определяются направлением рассеяния.*

**Ключевые слова:** метаматериал, наноантенны, фемтосекундный импульс, планарная оптика, дифракционная решетка, левые среды.

## 1. Введение

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию планарных наноструктур, которые приходят на смену таким классическим оптическим инструментам, как линзы, призмы, фазовые пластинки, аксиконы. Одними из перспективных разработок являются фазово-градиентные поверхности [1, 2]. Они представляют собой плоские структуры, состоящие из объектов (метаатомов) с размером, в несколько раз меньшим длины волны. Фазово-градиентные поверхности используются для создания метаматериалов с отрицательным показателем преломления [3, 4], для управления формой фазовой поверхности световой волны [5–7], для контроля формы волнового фронта [8] и для когерентного контроля направления отраженного и преломленного излучения [9]. Подобные структуры являются потенциальной элементной базой для создания наноразмерных оптических логических элементов. В этом плане представляет интерес детальное исследование особенностей взаимодействия коротких световых импульсов с планарными структурами. В настоящей работе исследуется рассеяние импульсного излучения периодической фазово-градиентной структуры из золотых V-образных наноантенн. Геометрия этой структуры и ее изображение в электронном микроскопе представлены на рис.1.

Естественный подход к описанию действия такой структуры на световую волну состоит в рассмотрении анизотропной профилированной дифракционной решетки [7, 10, 11]. В то же время, как было показано в работах [3, 4], основные особенности в виде аномальных направлений отраженной и преломленной волн могут быть опи-

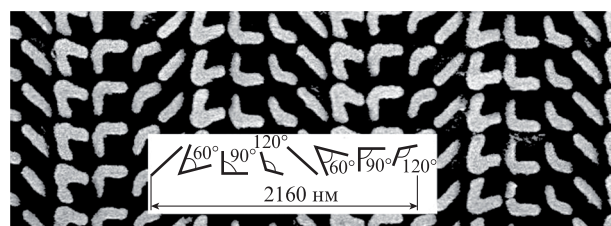


Рис.1. Геометрия образца (квадрат со стороной 500 мкм). Период структуры по горизонтали ( $\Gamma = 2160$  нм) содержит восемь столбцов антенн.

саны посредством обобщенного закона Снеллиуса. С этой целью авторы [3, 4] использовали модифицированный принцип Ферма, учитывающий изменение фазы на  $\pi/4$ , вносимое последовательными элементами субволнового масштаба. Такое действие планарной структуры эквивалентно действию оптического клина. Этот подход удобен для рассмотрения отклика массивов со сложной геометрией [3], однако он не учитывает появления дополнительных отраженных и преломленных лучей, которые адекватно описываются волновой оптикой.

## 2. Направления и поляризация дифракционных максимумов

Исследуемый в настоящей работе массив V-антенн имеет такую же геометрию и те же характерные размеры, что и в работе [4], и рассчитан на оптический отклик в ближнем ИК диапазоне (1100–1500 нм). В качестве источника излучения нами использовался фемтосекундный лазерный комплекс на основе лазера Mira Optima 900-D и оптического параметрического преобразователя Mira OPO (Coherent).

В эксперименте наблюдались два аномально преломленных и два аномально отраженных луча для структуры с периодом 2160 нм и по три луча для структуры с периодом 2520 нм. Направления и поляризации лучей для первого случая показаны на рис.2. Направления лучей соответствуют взаимодействию света с дифракционной ре-

М.В.Балабас, Е.А.Ефремова, А.Ю.Иванов, А.И.Канцеров, И.Р.Крылов, Е.Б.Пелюхова, Ю.В.Петров, У.В.Прохорова, Р.В.Силаев, О.Ю.Третьяк, А.А.Шимко. Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9; e-mail: igor-krylov@yandex.ru

Поступила в редакцию 20 февраля 2015 г., после доработки – 7 июня 2015 г.

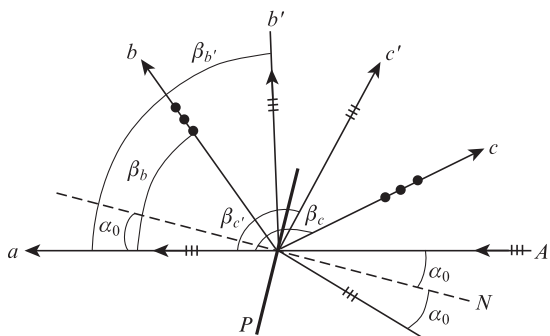


Рис.2. Направления и поляризация лучей ( $N$  – нормаль к исследуемому образцу  $P$ ;  $A$  – падающий луч;  $a$  – луч, прошедший образец насквозь без изменения направления;  $d$  – луч, зеркально отраженный от кремниевой подложки исследуемой наноструктуры;  $b$  и  $c$  – аномально преломленный и аномально отраженный лучи второго порядка дифракции;  $\alpha_0$  – угол падения света;  $\beta_b, \beta_{b'}$  и  $\beta_c, \beta_{c'}$  – углы отклонения прошедшего и отраженного света (первый и второй порядки дифракции).

шеткой. Поворот поляризации дифрагированных волн характерен для анизотропных дифракционных решеток [12, 13].

На рис.3 графически представлены рассчитанные по формулам дифракционной решетки

$$\begin{aligned} \beta_b &= \alpha_0 + \arcsin(\lambda/\Gamma - \sin \alpha_0), \\ \beta_{b'} &= \alpha_0 + \arcsin(2\lambda/\Gamma - \sin \alpha_0) \end{aligned} \quad (1)$$

положения угловых дифракционных максимумов решетки с периодом  $\Gamma = 2160$  нм для различных углов падения  $\alpha_0$  света с длиной волны  $\lambda = 1300$  нм.

Точками на рисунке отмечены экспериментально наблюдаемые направления распространения аномальных лучей. Вертикальная линия указывает заданный в этом эксперименте угол падения  $\alpha_0 = 14.5^\circ$ . Как видно из рис.3, направления, в которых наблюдаются аномально отраженные и преломленные лучи ( $\beta_b = 35.0^\circ, \beta_{b'} = 86.0^\circ, \beta_c = 122.2^\circ, \beta_{c'} = 173.7^\circ$ ), согласуются с расчетными значениями ( $35.1^\circ, 86.9^\circ, 122.1^\circ, 173.9^\circ$ ). Такое же совпадение между

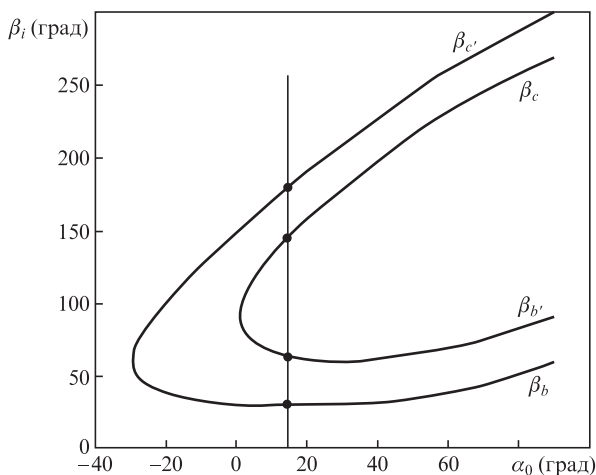


Рис.3. Теоретические (сплошные линии) и экспериментально измеренные (точки) углы отклонения лучей наноструктурой с периодом  $\Gamma = 2160$  нм в зависимости от угла падения света с длиной волны  $\lambda = 1300$  нм.

экспериментом и расчетом наблюдается в экспериментах с другими углами падения света и другими длинами волн излучения при различных периодах решетки.

Оптимальные условия для наблюдения аномально преломленного и отраженного лучей первого порядка дифракции в соответствии с работами [3, 4] реализуются при параллельной либо перпендикулярной столбцам наноструктуры поляризации падающего света (см. рис.1). В обоих случаях поляризация наблюдаемых нами аномально преломленного и отраженного лучей первого порядка дифракции ортогональна поляризации падающего на структуру луча, что также соответствует указанным работам. В нашем эксперименте мощность аномально преломленного и отраженного лучей составляла примерно 1% от мощности падающего света. Во втором порядке дифракции поляризация совпадала с поляризацией падающего луча. Наблюдаемая мощность излучения во втором порядке дифракции была еще примерно вдвое меньше.

В предложенной оптической схеме (рис.2) и при указанных выше параметрах эксперимента лучи других порядков дифракции, кроме приведенных на рисунке, в соответствии с формулами (1) не имеют разрешенных направлений. Исследуемая нами наноструктура, как профилированная решетка, подавляет отрицательные порядки дифракции. Чтобы экспериментально проверить их отсутствие, мы меняли направление падающего луча так, что угол падения изменил знак. При этом в формулах (1) отрицательные порядки соответствуют изменению знака всех величин. Лучи отрицательных порядков дифракции экспериментально не наблюдались. Учитывая чувствительность визуализатора, можно утверждать, что мощность этих лучей как минимум на порядок меньше, чем соответствующих лучей положительных порядков. Это экспериментально подтверждает то, что наноструктура представляет собой аналог именно профилированной дифракционной решетки.

В работах [3, 4] свет падал на наноструктуру со стороны подложки. При облучении со стороны наноструктуры мы получили ту же дифракционную картину в отраженном и преломленном свете.

### 3. Спектральное сжатие световых импульсов

Использование в качестве источника света излучения импульсного лазера позволило нам исследовать отклик структуры нанопериодов на импульс с широким спектром. Мы зарегистрировали сужение спектра в дифракционных максимумах. Его теоретическое значение определяется относительным спектральным разрешением дифракционной решетки  $\delta\lambda/\lambda = 1/(mN)$  ( $m$  – порядок дифракции,  $N$  – общее число штрихов решетки). Такое разрешение получается, если угол сбора света меньше угловой ширины дифракционного максимума решетки  $\delta\alpha = \lambda/(Nd\cos\alpha)$  ( $d$  – шаг решетки,  $\alpha$  – угол дифракции). С помощью оптоволокна диаметром 0.6 мм мы регистрировали отклоненный наноструктурой свет на расстоянии 300 мм от образца, соответственно угол сбора света составлял 1/500. Размер наноструктуры  $Nd = 500$  мкм. При длине волны  $\lambda = 1.1$  мкм угловая ширина дифракционного максимума  $\delta\alpha$  была в полтора-два раза больше угла сбора, т.е. можно считать, что свет собирался нами из малого угла. Экспериментальные кривые спектра импульсов, распространяющихся без изменения направления, а также в направлении аномального преломления первого и второго

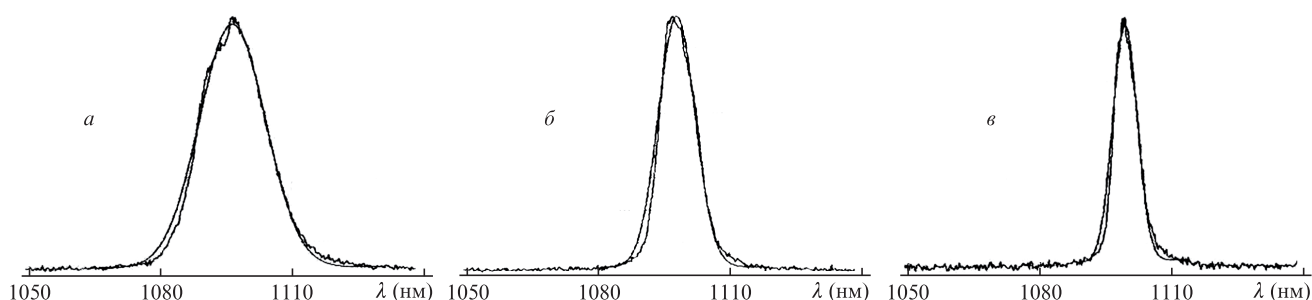


Рис.4. Спектры прошедшего через образец света в нулевом порядке дифракции (а), а также anomalно преломленного света в первом (б) и втором (в) порядках дифракции.

порядков дифракции, представлены на рис.4. Здесь же приведена аппроксимация спектров гауссовым контуром.

Как и следовало ожидать, эффект сжатия спектра фемтосекундного импульса усиливается при возрастании порядка дифракции. В отраженном свете спектральные кривые ведут себя аналогично.

Экспериментально полученные значения спектральных ширин разных лучей таковы: луч  $a$  – ширина спектра 17.8 нм, луч  $d$  – 17.5 нм, луч  $b$  – 9.8 нм, луч  $b'$  – 6.5 нм, луч  $c$  – 8.5 нм, луч  $c'$  – 6.6 нм.

Для сравнения мы провели эксперимент, в котором образец с наноструктурой был заменен диафрагмированной дифракционной решеткой с близким линейным размером. Для решетки спектральная ширина дифракционных максимумов оказалась примерно в 1.5 раза меньше, чем для наноструктуры. Можно предположить, что это различие связано с дефектами изготовления наноструктуры (флуктуациями размеров наноантенн).

#### 4. Выводы

Проведенные эксперименты продемонстрировали наличие anomalно отраженных и преломленных лучей при импульсном широкополосном облучении планарной периодической структуры на основе V-образных золотых наноантенн. Обнаружено, что поляризация лучей определяется порядком дифракции. Экспериментально наблюдался эффект сжатия спектра фемтосекундного импульса при взаимодействии электромагнитного поля со структурой наноантенн. Получена зависимость степени сжатия от порядка дифракции при малых углах сбора. Наблюдаемые эффекты находятся в соответствии с дифракционной моделью действия планарной фазово-градиентной периодической структуры. Полученные результаты представляют интерес при любом использовании фазовогра-

диентных планарных наноструктур в качестве оптических элементов.

В работе исследовались образцы наноструктур, изготовленные в Междисциплинарном ресурсном центре СПбГУ по направлению «Нанотехнологии». Образцы исследовались на оборудовании ресурсного центра «Оптические и лазерные методы исследования вещества» СПбГУ, часть расчетов производилась на оборудовании Вычислительного центра СПбГУ.

1. Meinzer N., Barnes W.L., Hooper I.R. *Nature Photon.*, **8**, 877 (2014).
2. Yu N., Capasso F. *Nature Mater.*, **13**, 139 (2014).
3. Yu N., Genevet P., Kats M.A., Aieta F., Tietienne J.-P., Capasso F., Gaburro Z. *Science*, **334**, 333 (2011).
4. Ni X., Emani N.K., Kildishev A.V., Boltasseva A., Shalaev V.M. *Science*, **335**, 427 (2012).
5. Aieta F., Genevet P., Kats M.A., Yu N., Blanchard R., Gaburro Z., Capasso F. *Nano Lett.*, **12**, 4932 (2012).
6. Blanchard R., Aoust G., Genevet P., Yu N., Kats M.A., Gaburro Z., Capasso F. *Phys. Rev. B*, **85**, 155457 (2012).
7. Roy T., Nikolaenko A.E., Rogers E.T.F. *J. Opt.*, **15**, 1 (2013).
8. Yu N., Genevet P., Aieta F., Kats M.A., Blanchard R., Aoust G., Tietienne J.-P., Gaburro Z., Capasso F. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19**, 3, (2013).
9. Shi J., Fang X., Rogers E.T.F., Plum E., MacDonald K.F., Zheludev N.I. *Opt. Express*, **22**, 21051 (2014).
10. Габитов И., Балабас М.В., Ефремова Е.А., Иванов А.Ю., Крылов И.Р., Пелюхова Е.Б., Петров Ю.В., Поволоцкая А.В., Поволоцкий А.В., Силаев Р.В. *Techn. Digest Petergof Workshop on Laser Phys.* (Petergof, Saint-Peterburg, Russia, 2014).
11. Балабас М.В., Ефремова Е.А., Иванов А.Ю., Крылов И.Р., Пелюхова Е.Б., Петров Ю.В., Третьяк О.Ю., Шимко А.А. *Тез. докл. конф. «Современные решения для исследования природных, синтетических и биологических материалов»* (С.-Петербург, Россия, 2014).
12. Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Шакирзянов М.М. *Письма в ЖЭТФ*, **88**, 54 (2008).
13. Романов С.Г., Badrosova M. *ФТТ*, **52**, 495 (2010).