

УДК 535.361

ИЗУЧЕНИЕ ДОМЕНОВ В ГЛОБУЛЯРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ МЕТОДОМ БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

В. С. Горелик, А. Ю. Шенкаренко, Н. И. Юрасов

Исследовано пространственное распределение интенсивности света, отраженного от поверхности глобулярного фотонного кристалла, созданного на основе искусственного опала. При использовании ПЗС-матрицы в качестве селективного приемника излучения и специальной компьютерной программы получены спектры отражения областей фотонного кристалла, имеющих различную окраску, которые названы цветными доменами. Представленный анализ полученных спектров позволяет оценивать однородность облучаемой поверхности фотонного кристалла, относительные площади цветных доменов, различия в кристаллической структуре отдельных цветных доменов и дефекты кристаллической структуры.

В последние годы большое внимание уделяется глобулярным фотонным кристаллам (ГФК), которые имеют периодическую структуру в трех измерениях с периодом, сопоставимым с длиной волны λ излучения видимого диапазона [1, 2]. Примером такого кристалла является ГФК на основе опаловой матрицы, состоящий из плотно упакованных шаров (глобул) размером 200–600 нм, который является наиболее совершенным из ГФК [3, 4]. Реальные ГФК состоят из доменов – блоков, оси симметрии которых развернуты на малые углы. У такого кристалла спектр отраженного света изменяется в силу нарушения однородности его поверхности. Поэтому необходимо иметь оптический способ исследования всей поверхности, на которую падает излучение под фиксированным углом α к поверхности. Так как ГФК при отражении света окрашен, его отдельные

участки могут различаться цветом. При этом наиболее подходящим методом исследования спектра рассеянного света является метод измерения числа засвеченных пикселей с фиксированной длиной волны – цветовых точек. Современные средства регистрации цветного изображения, например, использованная нами ПЗС-матрица, основаны на системе из трех приемников излучения, каждый из которых чувствителен в определенной области спектра. Обычно система состоит из ячеек с тремя приемниками, имеющими максимум чувствительности на длинах волн 700.0 (красный – R), 546.1 (зеленый – G) и 435.8 (синий – B). С каждым приемником соединен конденсатор, который заряжается пропорционально интенсивности излучения.

Анализируя спектр отраженного излучения, можно получить информацию о структуре ГФК, его локальных дефектах. Решение задачи получения и анализа такого спектра на основе измерения числа цветовых точек являлось целью данной работы.

К теории селективного отражения света от поверхности ГФК. При падении света на ГФК и выполнении условия брэгговского отражения, которое для спектра первого порядка определяется формулой

$$2d(n_{\text{eff}}^2 - \cos^2 \alpha)^{1/2} = \lambda, \quad (1)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления, d – межплоскостное расстояние, α – угол между падающим лучом и поверхностью кристалла, наблюдается однородное цветное изображение поверхности. Основой математического описания цвета в колориметрии является экспериментально установленный факт, что любой цвет можно представить в виде суммы определенных количеств трех линейно независимых цветов, т.е. таких цветов, каждый из которых не может быть представлен в виде суммы каких-либо количеств двух других цветов. Систем линейно независимых цветов существует бесконечно много. В колориметрии используются лишь некоторые из них. Тройка выбранных цветов образует цветовую координатную систему. Тогда три числа, определяющие в этой системе данный цвет, являются количествами основных цветов в смеси и они есть цветовые координаты данного цвета. Точки, представляющие все реальные цвета, заполняют некоторую область цветового пространства. Обычно используют проекцию этой области пространства на плоскость и далее применяют колориметрическую кривую [5]. Она представлена на рис. 1. По колориметрической кривой строятся лучи с началом в точке 0 на рис. 2 (белый свет) с использованием данных из [5]. Рис. 2 иллюстрирует вид этих лучей, соответствующих различным опорным длинам волн. По линии спектральных цветностей (рис. 1) можно получить длину волны излучения, зная

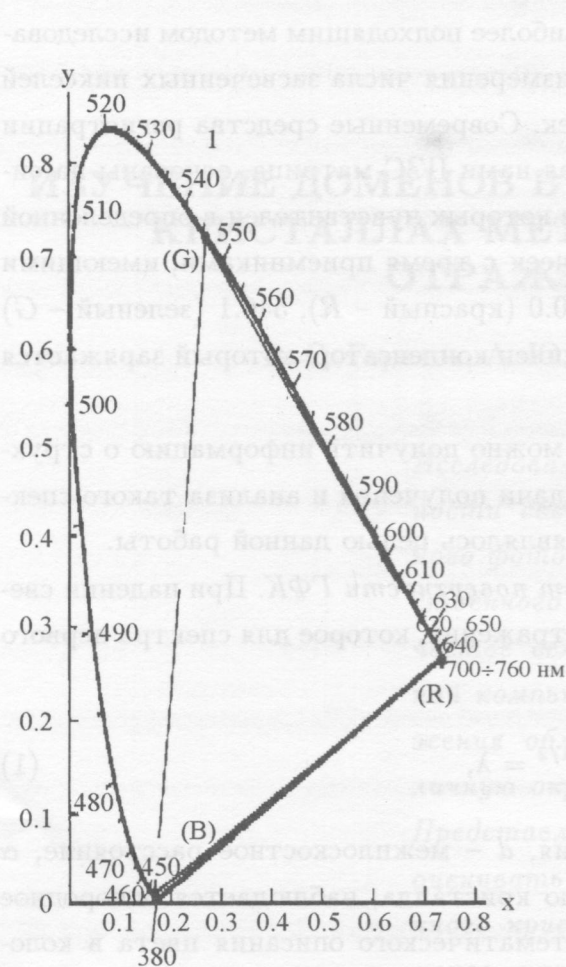


Рис. 1. Колориметрическая кривая, построенная в соответствии с работой [5]. X, Y – безразмерные цветовые координаты; 1 – контур графика, на котором нанесена шкала длин волн в нм.

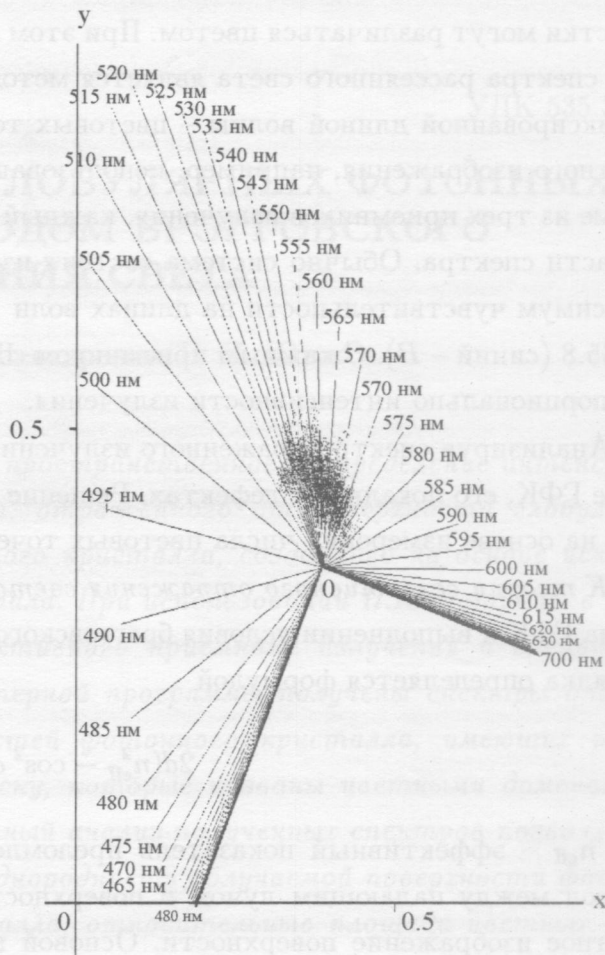


Рис. 2. Распределения цветовых лучей плоскости цветовых координат (X, Y). Здесь же приведено распределение цветовых точек от исследованного образца опаловой матрицы.

составляющие R, G и B от каждого из приемников системы. Числа R, G и B , полученные с приемников, характеризуют интенсивность излучения в трех условных спектральных диапазонах. Для отображения точки с координатами (R, G, B) на область цветового пространства в безразмерных цветовых координатах (X, Y, Z) , где $Z = 1 - X - Y$,

существует матрица пересчета M [5, 6], удовлетворяющая соотношению

$$W = M \times A, \quad (2)$$

где $W = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ и $A = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$. В результате проведения эксперимента получают сигналы с R, G, B элементов ПЗС-матрицы. На основании преобразования (2) рассчитываются координаты (X, Y) , которые в соответствующем масштабе переносятся в сектора на рис. 2. На этом рисунке приведен типичный вид распределения полученных цветных точек. На основании этого распределения может быть построена гистограмма распределения цветных точек по спектральным интервалам. Эта гистограмма характеризует распределение интенсивности по длинам волн на исследуемой поверхности образца. Такой способ расчета был реализован в компьютерной программе для обработки сигналов с элементов ПЗС-матрицы. Обозначая высоты отдельных прямоугольников с помощью символов I_j , где j – номер соответствующего малого спектрального интервала $\Delta\lambda$, можно построить соответствующую гистограмму. При этом основание каждого прямоугольника гистограммы равно удвоенному спектральному разрешению. Отношение высот отдельных прямоугольников равно:

$$\frac{I(\lambda_i)}{I(\lambda_j)} = \frac{S(\lambda_i)}{S(\lambda_j)}, \quad (3)$$

где $S(\lambda_j)$ – суммарная площадь доменов на освещенной поверхности ГФК, от которых наблюдается брэгговское отражение на длине волны λ_j . Равенство (3) является следствием того, что освещенная площадь на ПЗС-матрице на данной длине волны прямо пропорциональна площади поверхности кристалла, на которой происходит брэгговское отражение света. В геометрической оптике это утверждение соответствует идеальной оптической системе, когда площадь изображения прямо пропорциональна площади предмета.

Методика эксперимента. В качестве объекта исследования был выбран глобулярный фотонный кристалл, электронная фотография которого приведена на рис. 3. Для решения поставленной задачи была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 4. На рис. 5 показано изображение малого участка поверхности этого кристалла размером 0.5×0.7 мм². Изображение поверхности кристалла, освещенной параллельным пучком света, формируется на ПЗС-матрице, расположенной параллельно плоскости поверхности кристалла, таким образом исключается наклон изображения

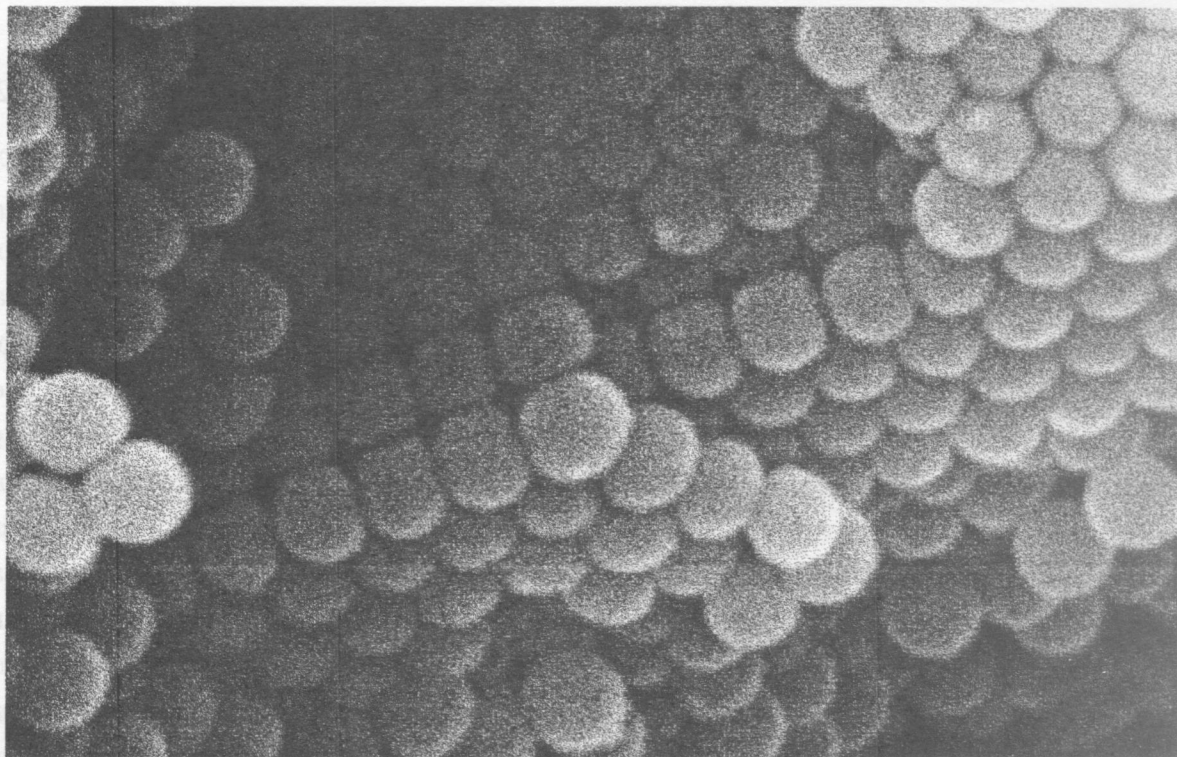


Рис. 3. Электронная фотография поверхности исследованного глобулярного фотонного кристалла. Масштаб – 1:43000.

к оптической оси, нарушающий условие прямой пропорциональности площади изучаемого участка поверхности и ее изображения на ПЗС-матрице, т.е. условие (3). При компьютерной обработке сигнала, снятого с ПЗС-матрицы, размер шага вдоль осей прямоугольной системы координат обуславливался размером ячейки ПЗС-матрицы и максимально допустимым увеличением объектива, формирующего изображение. Данная установка позволяла исследовать поверхность с шагом 10 мкм. Учитывая, что ГФК работает в видимом диапазоне (размер ячейки соизмерим с λ видимого света), получаем, что в ячейке $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ размещается порядка 10^3 элементарных ячеек.

После перехода от координат (R, G, B) к координатам (X, Y) получается спектр излучения, отраженного от исследованного участка поверхности. При этом может быть построена гистограмма, задающая распределение интенсивности по спектру. Измеряя длину волны излучения, отраженного от отдельного цветного домена на поверхности ГФК при разных углах падения излучения широкополосного источника, можно опреде-

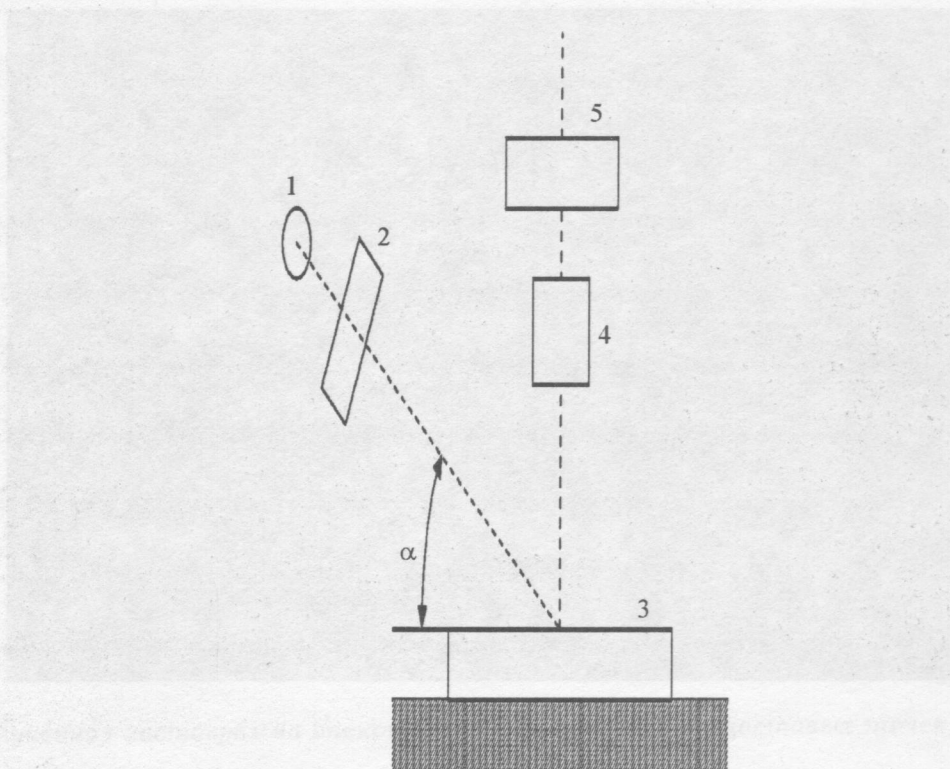


Рис. 4. Схема экспериментальной установки; 1 – источник света с диафрагмой, 2 – коллиматор, 3 – образец, 4 – объектив, 5 – ПЗС-матрица.

лить межплоскостное расстояние и эффективный показатель преломления (используя формулу (1)).

Результаты эксперимента и их обсуждение. На рис. 5 представлено полученное цветовое распределение брэгговского отражения излучения от поверхности при геометрии, соответствующей рис. 4. Как видно из этого рисунка, наблюдаемое распределение состоит из большого числа участков с фиксированным цветом (зеленым) размером ~ 10 мкм. Светящиеся участки соответствуют доменам с определенной ориентацией поверхности. На основе рис. 5 были рассчитаны и нанесены цветовые точки с соответствующими координатами в цветовой сектор на рис. 2. В соответствии с изложенной ранее методикой, была построена цветовая гистограмма, представленная на рис. 6. Большая спектральная ширина гистограммы свидетельствует о неоднородности приповерхностного слоя реального ГФК. На основе формулы (1) можно сделать вывод, что каждой группе прямоугольников гистограммы на рис. 6 соответствует своя величина межплоскостного расстояния при фиксированном угле падения светового луча. Большое

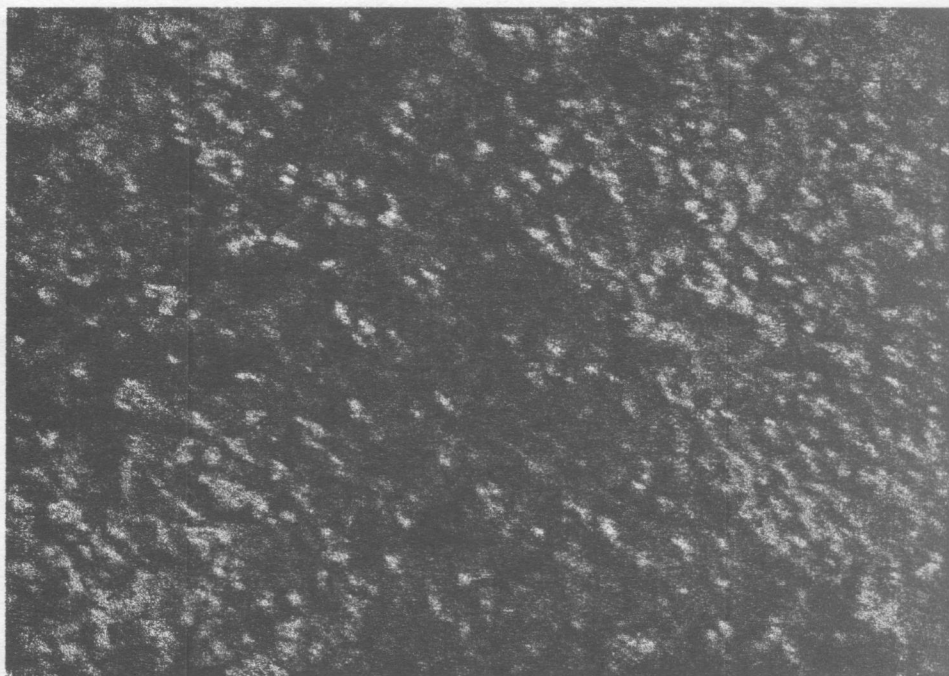


Рис. 5. Фотография участка поверхности фотонного кристалла, с которого была получена гистограмма цветowych точек. Масштаб – 1:100. В цветном варианте светлым участкам соответствует зеленое свечение.

число прямоугольников в каждой группе на гистограмме можно объяснить следующим образом.

Обозначим угол расходимости падающего излучения $2\Delta\alpha$. При этом отклонение длины волны от теоретического значения можно получить на основе формулы (1). При этом будем полагать, что эффективный показатель преломления остается неизменным. В результате дифференцирования приходим от (1) к следующему соотношению, задающему неопределенность длины волны $\Delta\lambda$, обусловленной конечной расходимостью падающего излучения и вариациями величины межплоскостного расстояния Δd :

$$\Delta\lambda = \frac{2(n_{\text{eff}}^2 - \cos^2 \alpha)\Delta d + (\sin 2\alpha)\Delta\alpha}{(n_{\text{eff}}^2 - \cos^2 \alpha)^{1/2}}. \quad (4)$$

Рассмотрим три случая:

1) $\Delta\alpha, \Delta d > 0$; при этом $\Delta\lambda > 0$, т.е. происходит смещение длины волны отраженного излучения в красную область спектра;

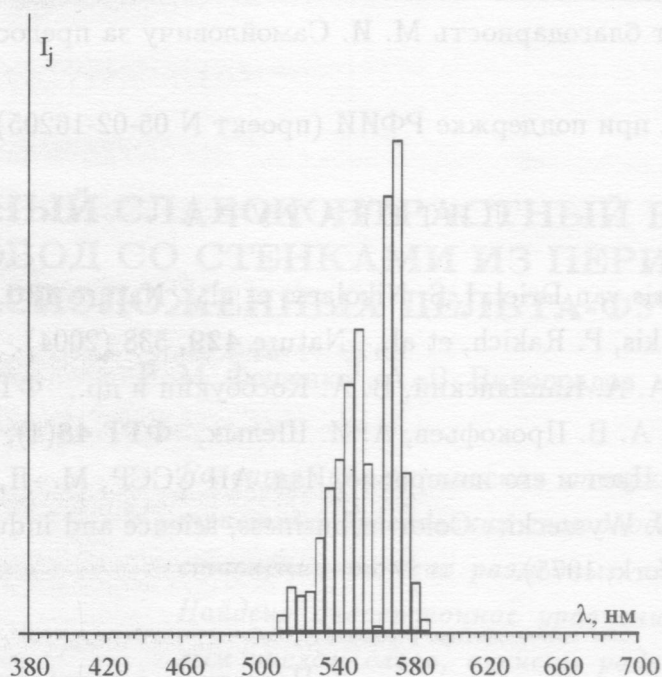


Рис. 6. Полученная гистограмма спектрального распределения цветowych точек на исследованном образце.

2) $\Delta\alpha, \Delta d < 0$, при этом $\Delta\lambda < 0$, т.е. происходит смещение длины волны в фиолетовую область спектра;

3) $\Delta\alpha$ и Δd имеют разные знаки; при этом направление смещения длины волны зависит от знака суммы в круглых скобках; возможна ситуация, когда смещение вообще отсутствует.

Использование данной методики позволяет анализировать участки поверхности кристалла площадью до 10×10 мкм². При этом возникает возможность изучения поверхности фотонного кристалла с высоким пространственным разрешением на основе измерений распределения цветowych точек на гистограмме.

Выполненные эксперименты показали, что реальные опаловые матрицы характеризуются размером доменов с заданной ориентацией ~ 10 мкм. Таким образом, разработанный метод позволяет осуществлять контроль степени совершенства кристаллической структуры опаловых матриц и открывает возможность совершенствования технологии получения глобулярных фотонных кристаллов с упорядоченной структурой.

Авторы выражают благодарность М. И. Самойловичу за предоставленные образцы для исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект N 05-02-16205).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. Lodahl, A. Floris van Driel, I. S. Nikolaev, et al., *Nature* **430**, 654 (2004).
- [2] M. Qi, E. Lidoririkis, P. Rakich, et al., *Nature* **429**, 538 (2004).
- [3] А. В. Барышев, А. А. Каплянский, В. А. Кособукин и др., *ФТТ* **45**(3), 434 (2003).
- [4] В. Н. Богомолов, А. В. Прокофьев, А. И. Шелых, *ФТТ* **48**(4), 648 (1998).
- [5] М. М. Гуревич, *Цвет и его измерение*, Изд. АН СССР, М. -Л, 1950.
- [6] D. B. Judd and G. Wyszecki, *Color in business, science and industry*. (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975).

Поступила в редакцию 22 января 2007 г.