

ИССЛЕДОВАНИЕ 3D-СТРУКТУРЫ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ ОПАЛА В ОПТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

С помощью оптического исследования поверхности выявлена структура реального трехмерного фотонного кристалла на основе матрицы опала. Показано, что исследованные образцы были поликристаллами и имели сложное столбчатое строение. Сечения столбцов имели форму пяти- и шестиугольников с внутренней полосовой структурой. Определены все размеры найденных элементов структур исследованных фотонных кристаллов.

Парадоксально, что структура поверхности реального фотонного кристалла на основе матрицы опала была мало изучена для деталей поверхности, размеры которых сопоставимы с длиной волны света. Это, по-видимому, связано с работами по исследованию возможностей этих кристаллов и фактическим отсутствием их применения [1]. Рельеф поверхности, наблюдаемый с помощью атомно-силового или электронного микроскопа, позволяет выявить детали поверхности, имеющие размеры на несколько порядков меньше длины волны видимого света и постоянной решетки фотонного кристалла. Роль этих особенностей в оптических свойствах фотонного кристалла не является определяющей. Поэтому важное значение имеют исследования поверхности трехмерного фотонного кристалла оптическими методами. К ним относится метод селективного отражения, примененный в работе.

Изучались свободные образцы фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы. Поры в них не были заполнены другими веществами. Образцы опаловой матрицы были синтезированы в ЗАО "OPALON" (Россия).

Изученные образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда, размеры ребер которого были приблизительно равны 15 мм, 10 мм и 2 мм. Их можно подразделить на несколько групп по спектральному составу отраженного оптического излучения, который изменялся в зависимости от угла падения света. Наблюдались различные спектры отражения для разных образцов, и поэтому образцы были классифицированы в четыре спектральные группы: красная, зеленая, желтая и синяя. Деление на группы имеет условный характер, так как образцы из указанных групп имели спектральные области и в других диапазонах.

Исследованные образцы имели общую особенность, состоящую в том, что две большие по площади поверхности имели разный характер

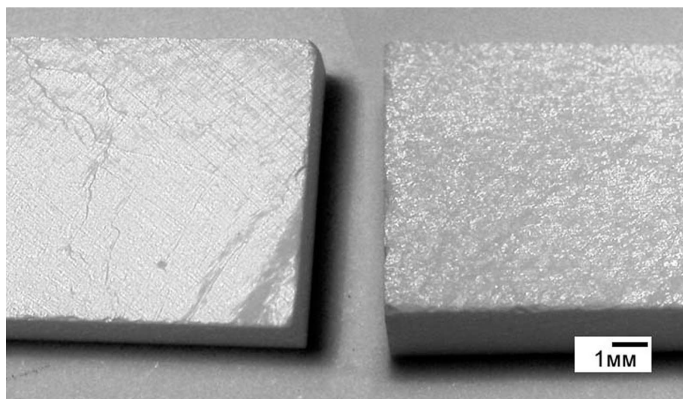


Рис. 1. Две большие поверхности одного кристалла

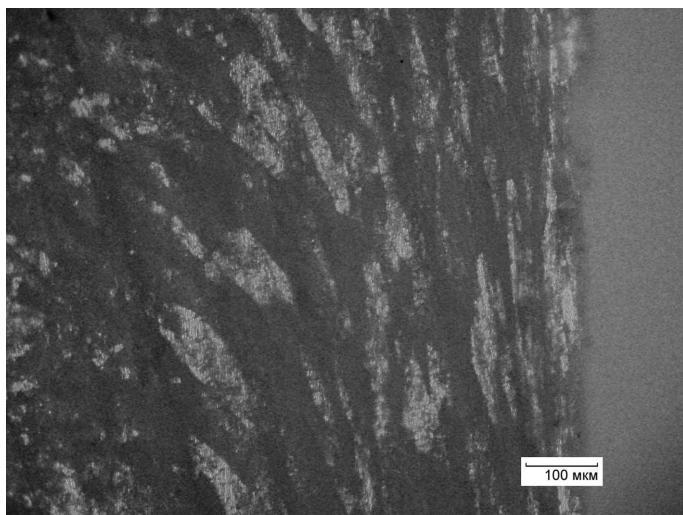


Рис. 2. Торец кристалла, дугообразные линии

отражения (рис. 1). Первая поверхность (на фото слева) при определенных углах падения света имела однородное отражение от всех участков поверхности. При тех же условиях вторая поверхность (на фото справа), параллельная первой, отражала лишь малыми участками, хаотично разбросанными по всей поверхности. Средний размер поперечника однородного участка поверхности был равен приблизительно 100 мкм.

Торцевые стороны кристалла отличались от обеих плоских поверхностей (рис. 2). Справа на рис. 2 большая первая поверхность перпендикулярна плоскости рисунка. На торцевых поверхностях наблюдались дугообразные линии, подходящие ко второй поверхности под углом, близким к 90° , и касающиеся первой поверхности.

При облучении белым светом под малым углом скольжения было обнаружено, что образцы имели микроскопическую однородность, т.е.

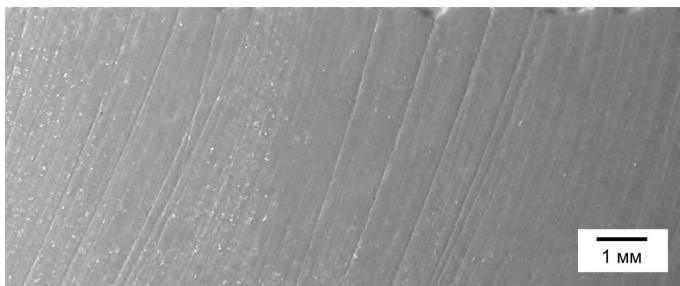


Рис. 3. Механические неровности на второй большой поверхности кристалла при нормальном падении света



Рис. 4. Отражение от первой поверхности

большая часть поверхности ($> 95\%$) имела одинаковую, почти монохроматическую окраску и относительное отклонение от одноцветности было около $2...5\%$. Этот экспериментальный результат является точным для всех шести поверхностей образца. В зависимости от постоянной решетки конкретного образца они имели цвет со средней длины волны в пределах $500...580$ нм. Поэтому в процессе исследования принималась неизменность постоянной решетки для данного образца.

На всех поверхностях, кроме первой, наблюдались неровности, связанные с механической обработкой (рис. 3). На первой поверхности наблюдались параллельные эквидистантные линии, выявляемые характером отражения излучения от данной поверхности при определенных углах падения излучения (рис. 4).

Было обнаружено, что вблизи больших поверхностей имеются общие закономерности роста образцов. Так, у первой поверхности, на которой не были заметны следы механической обработки, внутренняя структура кристалла представляла собой слоистое образование, подходящее к поверхности под малым углом (не более 10°). Структура кристалла у второй поверхности представляла собой набор столбцов,



Рис. 5. Выход столбцов на вторую поверхность образца

ориентированных к поверхности под одинаковыми углами, приближающимися к 90° . Поперечный размер столбцов был порядка 10 мкм, что находится в согласии с наблюдением малых совершенных 3D-фотонных кристаллов [2]. На поверхности наблюдались торцы данных столбцов (рис. 5), представляющие собой пяти- и шестиугольники неправильной формы, плотно прилегающие друг к другу. Таким образом, внешняя форма столбцов напоминала сечение шестигранной призмы. В свою очередь, многоугольники имели пластинчатое строение. Внутри каждой области слои были взаимно параллельны. Указанные слои имели толщину около 3 мкм. Изучение поверхности проводилось на оптическом микроскопе (увеличение Г-300) с цифровой регистрацией изображения.

В настоящей работе исследовались “поликристаллические” опалы по классификации, данной в работе [3].

Выводы. 1. Когда фотонные 3D-кристаллы на основе матрицы опала образуют поликристалл, возникает сложная иерархия структур.

2. Кристаллиты имеют нитевидное (столбчатое) строение и дугообразную форму.

3. Сечения кристаллитов образуют неправильные пяти- или шестиугольники.

4. Торцы кристаллитов имеют пластинчатое строение, содержащее дефекты (может быть, двойники), перпендикулярные торцу или составляющие с ним углы, близкие к 90° .

Авторы приносят А.В. Гурьянову искреннюю благодарность за предоставленные образцы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М. и др. Исследование опаловых матриц и нанокompозитов на их основе // Высокие технологии в промышленной России. – М.: ОАО ЦНИТИ “Техномаш”, 2004. – С. 259–363.

2. Голубев В. Г., Кособукин В. А., Курдюков Д. А. и др. Фотонные кристаллы с перестраиваемой запрещенной зоной на основе заполненных и инвертированных композитов опал-кремний // ФТП. – 2001. – Т. 35. – С. 710–713.
3. Богомолов В. Н., Прокофьев А. В., Шелых А. И. Оптико-структурный анализ фотонных кристаллов на основе опалов // ФТП. – 1998. – Т. 40, № 4. – С. 648–650.

Статья поступила в редакцию 26.11.2004

Андрей Юрьевич Шенкаренко родился в 1980 г., окончил в 2003 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Аспирант кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор 7 научных работ в области магнитооптики и оптики фотонных кристаллов.

A.Yu. Shenkarenko (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003. Post-graduate of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 7 publications in the field of magneto-optics and optics of photon crystals.



Николай Ильич Юрасов родился в 1943 г., окончил в 1966 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана и в 1974 г. МИФИ. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области физики конденсированного состояния: магнитных и кинетических явлений, интерференционных эффектов, квантовой гравитации и устойчивости тяжелых ядер.

N.I. Yurasov (b. 1943) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. Ph. D. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 publications in the field of physics of condensed state: magnetic and kinetic phenomena, interferometry effects, quantum gravitation and heavy nuclei stability.