

СБОРКА УПОРЯДОЧЕННЫХ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ВОЛОКОННЫХ И КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

© 2007 г. В. А. Кутасов, канд. техн. наук; Э. Ю. Бессонова, канд. хим. наук

ООО “Волоконно-оптическая техника”, Санкт-Петербург

На примере простейшей формы усеченного шестиугольника, отличающегося от правильного отсутствием одного ряда элементов на одной стороне, рассмотрены ошибки сборки и порождающие их причины. Предложен универсальный способ ориентированной сборки упорядоченной гексагональной структуры, допускающий применение как в одностадийном, так и в двухстадийном процессе. Суть его заключается во введении в исходную форму дополнительного рельефа, обеспечивающего надежную идентификацию положения сборочного элемента и исключающего влияние азимутального и зеркального поворотов. На способ получен патент, а эффективность подтверждена при изготовлении в двухстадийном процессе волоконных структур с разрешением 90 штр/мм.

Коды OCIS: 060.2290, 160.2290.

Поступила в редакцию 04.12.2006.

Введение

Настоящее сообщение является результатом дальнейшего развития исследований, посвященных решению проблемы построения упорядоченной гексагональной структуры (УГС) и опубликованных в цикле работ 2002–2005 гг. [1–4]. В них с исчерпывающей полнотой приведено решение первой задачи сборки УГС, суть которого заключалась в том, что было найдено множество форм сборочных элементов, образованных усечением по определенным правилам одного или нескольких рядов на одной или нескольких сторонах пакета единичных стержней (ЕС) правильной шестиугольной формы сечения. Порядная укладка многожильных стержней (МЖС), осуществляемая по типу линейной трансляции фигуры выбранной формы вдоль горизонтальной плоскости, обеспечивает сопряжение всех границ МЖС по типу “пик–впадина”. Впоследствии было показано, что, используя один из основных принципов фрактальной геометрии – самоподобие, найденные формы можно применять в процессе сборки УГС с теоретически неограниченным числом стадий, т. е. с применением сверхмногожильных стержней (СМЖС) с порядком один и более. При этом отмечалось, что необходимым условием получения УГС из новых форм МЖС и СМЖС является их ориентированная укладка. Последнее означает, что все элементы одной сборки (блоков МЖС и СМЖС или пакетов из них) должны занимать строго определенное положение относительно базовой плоскости и одинаковое относительно друг друга. Выполнение этого условия, не представлявшего никакого труда при графических построениях, на практике является достаточно сложной задачей. Детальное исследование процесса ориенти-

рованной укладки МЖС и СМЖС неправильных форм составляет содержание данной работы. Поставленная задача и способы ее решения рассмотрены на примере сборки простейшей формы усеченного шестиугольника как в одностадийном, так и в двухстадийном процессах.

Ориентированная сборка в одностадийном процессе

Простейшая форма нового сборочного элемента представляет прямоугольную призму с поперечным сечением в виде шестиугольника, отличающегося от правильного отсутствием одного наружного ряда составляющих стержней на одной из граней. При этом в зависимости от стадии процесса составляющими стержнями могут являться как элементарные ЕС, так и МЖС. Для краткости изложения в дальнейшем обозначим эту форму как (–1).

Рассмотрим сборку МЖС формы (–1), образованной из правильного шестиугольника с числом ЕС на стороне $n = 3$ (рис. 1а). Легко заметить, что число элементов на сторонах шестиугольника при обходе его контура против часовой стрелки, начиная с угла, контактирующего с базовой плоскостью, описывается последовательностью: $n, n, n, n - 1, n + 1, n - 1$. Самая плотная сборка, обеспечивающая упорядоченную структуру, достигается в том случае, когда этот угол, названный нами опорным, образован сторонами шестиугольника, количество ЕС на которых отличается на единицу [2]. Форма (–1) имеет два опорных угла, лежащих на одной большей диагонали шестиугольника.

Рис. 1а демонстрирует еще одно, не столь очевидное свойство предложенных форм сборочных элементов с пониженной симметрией. Видно, что

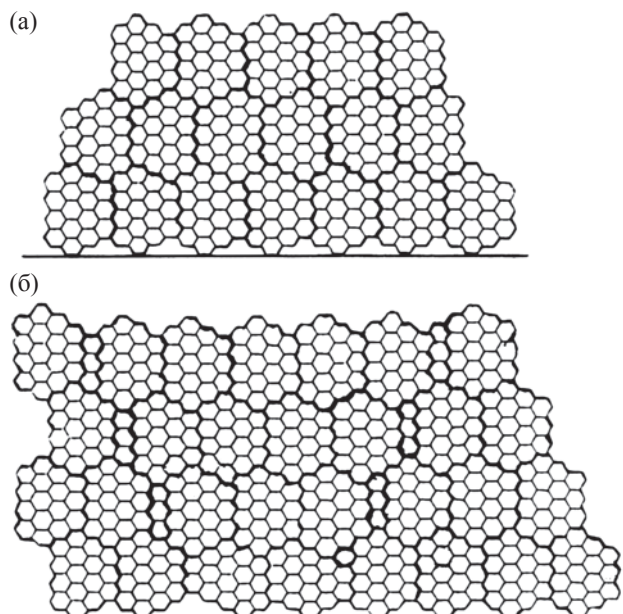


Рис. 1. Одностадийная сборка УГС с правильной (а) и нарушенной (б) ориентацией МЖС.

второй ряд образован МЖС, сечение которых представляет зеркальное отражение сечения МЖС первого ряда в плоскости, перпендикулярной базовой. Для определенных форм и их комбинаций в сборочных элементах различных порядков это свойство может оказаться весьма полезным.

Необходимость ориентированной укладки МЖС и возможные последствия даже локальных ее нарушений иллюстрирует приведенный на рис. 1б пример. Очевидно, что, рассматривая процесс укладки как случайный, т. е. допустив, что все шесть углов каждого МЖС являются опорными с равной вероятностью, можно даже для малого числа участвующих в сборке МЖС получить большое число различных реализаций. Мы же ограничимся самым простейшим примером, исключившим необходимость рассмотрения границ типа пик-пик и тем самым, позволившим выполнить построение на сплошной сетке. В первом ряду приведенной на рис. 1б сборки третий и четвертый слева МЖС уложены в двух неправильных положениях: в первом из них стороны угла, опирающегося на плоскость, содержат число элементов с разницей более единицы (2 и 4), а в другом – равное количество (по 3). Ориентация всех остальных МЖС такая же, как в первом и третьем рядах сборки, изображенной на рис. 1а. Видно, что в каждом последующем ряду, начиная со второго, образуются два зазора, конфигурация и размеры которых соответствуют усеченному ряду. При спекании эти области заполняются материалом примыкающих к зазорам МЖС. Это сопровождается значительными изменениями формы

и поперечных размеров жил крайних рядов. По-видимому, следует полагать, что, когда нарушения ориентации носят единичный характер, вся сборка распадается на отдельные области с упорядоченной структурой, однако упорядоченность в целом отсутствует.

Таким образом, для выполнения ориентированной сборки необходимо точно идентифицировать опорный угол и выбрать положение усеченной грани: слева или справа относительно опорного угла. Определяющим признаком служит различие в числе элементов на сторонах шестиугольника, которое для формы (–1) не превышает 2. При небольших значениях n и относительно больших размерах единичных жил, образующих МЖС, идентификация положения достаточно проста и может выполняться визуально невооруженным глазом или с помощью наблюдательной системы с малым увеличением. Такая ситуация характерна при сборке пакета МЖС в двухстадийном процессе либо при изготовлении в одностадийном процессе структур с малым разрешением. Можно ожидать, что до $n = 12–15$ ориентированная сборка не представляет особого труда. Напротив, при больших n и малых размерах единичных жил идентификация положения представляет трудноразрешимую задачу. Для сведения напомним, что в отечественной технологии микроканальные пластины (МКП) с диаметром канала 10 мкм в одностадийном процессе используют пакеты с $n \approx 40$.

Ориентированная сборка в двухстадийном процессе

На рис. 2а приведена сборка СМЖС, в которой и образующие их МЖС, и сами СМЖС собраны по схеме (–1). Поскольку приведенные на рис. 1а и 2а МЖС и СМЖС полностью самоподобны, естественно предположить, что и все закономерности укладки МЖС могут быть перенесены на укладку СМЖС. Это предположение действительно оправдывается, если в СМЖС в качестве элементов рассматривать составляющие их МЖС, т. е. учитывать только макроструктуру СМЖС. Из рис. 2а видно, что в отношении опорных углов, возможности порядного обращения и симметрии макроструктуры сборка СМЖС не отличается от сборки МЖС на рис. 1а. Однако естественное желание проводить сборку СМЖС, ориентируясь только на их макроструктуру, с неизбежностью приводит к образованию локальных нарушений упорядоченности структуры. Примеры таких нарушений и причины их образования иллюстрирует рис. 2б.

Предварим анализ рис. 2б следующими замечаниями. Во-первых, как уже отмечалось ранее, МЖС

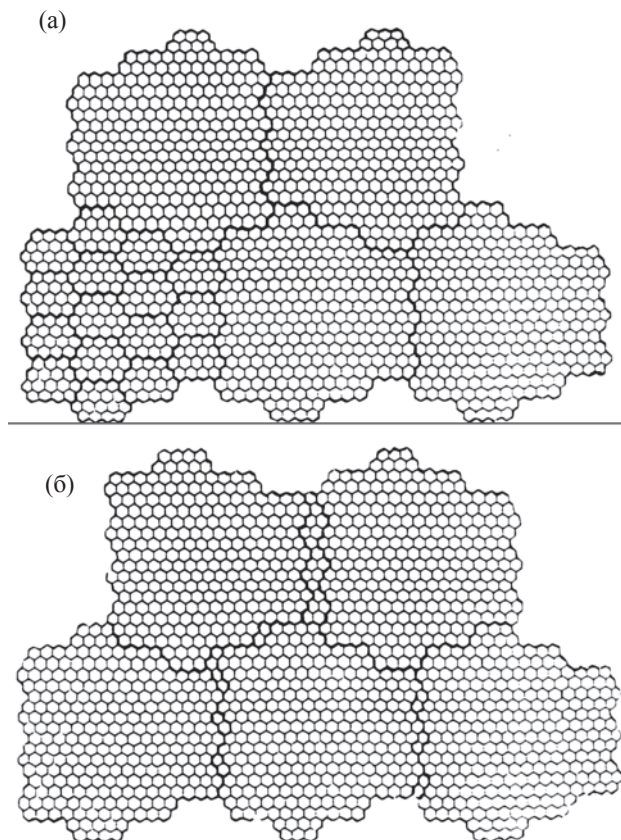


Рис. 2. Двухстадийная сборка УГС с правильной (а) и нарушенной (б) ориентацией СМЖС.

и СМЖС представляют собой объекты, имеющие форму прямоугольной призмы, калибр (отношение длины к характеристическому линейному размеру поперечного сечения) которых лежит в интервале от 50 до 1000. Во-вторых, очевидно, что вид поперечного сечения с одного торца сборочного элемента является зеркальным отражением вида поперечного сечения с противоположного торца. Во время различных манипуляций с МЖС и СМЖС на операциях технологического процесса от их вытяжки до сборки они могут быть многократно и неконтролируемо перевернуты. Поэтому в поступающих на сборку группах элементов представлены оба вида: прямой и зеркальный. Последнее обстоятельство не оказывает никакого влияния на сборку МЖС: как видно из рис. 1а, зеркальное отражение компенсируется поворотом в плоскости рисунка на угол π . Но для СМЖС эти операции не тождественны, что наглядно подтверждает рис. 2б.

На рис. 2б показана двухрядная сборка пяти МЖС, из которых три–два крайних в первом ряду и правый во втором занимают такое же положение, как и СМЖС первого ряда на рис. 2а (условно прием это положение за “прямое”). Остальные два СМЖС имеют зеркально-симметричное относительно первых трех положение, т. е. такое же, как

СМЖС второго ряда на рис. 2а. Для обеспечения одинаковой ориентации по макрорельефу с тремя СМЖС прямого положения эти два “зеркальных” СМЖС на рис. 2б повернуты на угол π . Как видно из рис. 2б, сборка прямых и перевернутых СМЖС приводит к образованию зазоров на границах, т. е. не обеспечивает получение УГС. Это объясняется тем, что в отличие от МЖС формы (–1) СМЖС этой же формы в отношении своей микроструктуры не обладают симметрией. Наглядным подтверждением этого является различие в микроструктуре границ МЖС, образующих опорные углы и другие периферийные элементы макроструктуры СМЖС. Как и в одностадийном процессе, эти различия могут служить для организации ориентированной сборки и в двухстадийном процессе. Однако сложность и трудоемкость ориентированной сборки с идентификацией положения СМЖС по микроструктуре их границ также очень велики, даже несмотря на то, что количество элементов на определяющих положение участках границ СМЖС существенно меньше, чем на грани МЖС одностадийного процесса. Основная причина заключается в том, что в волоконно-оптических пластинах (ВОП) с разрешением более 100 штр /мм размер единичного световода не превосходит 6 мкм.

Прежде чем приступить к изложению существа предложенных усовершенствований процесса сборки УГС из усеченных правильных шестиугольников, сделаем небольшое отступление, в котором кратко рассмотрим другие известные способы получения УГС, изложенные в неоднократно цитированном нами комплексе работ фирмы GEOS [3, 4]. Эти работы включают в себя три статьи и один патент. В статьях излагается фрактальный подход к процессу многостадийной сборки, на первой стадии которого используется правильный шестиугольный МЖС [5–7]. В патенте защищаются формы, полученные путем удаления из наружного слоя пакета шести групп ЕС, каждая из которых примыкает к одному из шести углов исходного правильного шестиугольника и содержит угловой ЕС [8]. Сборка МЖС, вытянутых из этих пакетов, также обеспечивает получение УГС.

Существует по крайней мере один частный случай формы сборочного элемента, которая может быть получена обоими способами. На рис. 3а эта форма показана как простейшая фрактальная сборка второго порядка, содержащая семь семижилых МЖС. На рис. 3б эта же форма получена в результате применения описанной в патенте процедуры усечения части единичных стержней на сторонах пакета правильной шестиугольной формы сечения (штриховкой обозначены удаляемые стержни). На рис. 3в показано сечение МЖС, вытянутого из па-

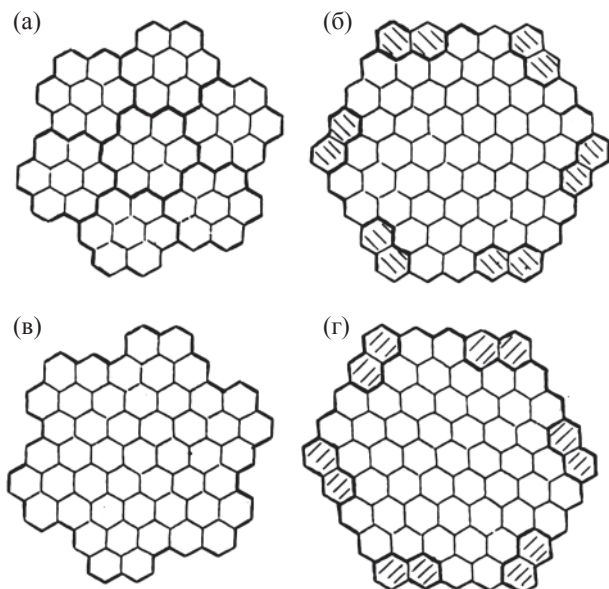


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая необходимость ориентированной сборки УГС из элементов фирмы GEOC [5–8] (пояснения в тексте).

кета, изображенного на рис. 3б. Сравнение фигур представленных на рис. 3а и 3в, показывает, что они полностью идентичны.

На рис. 3г представлен вид пакета, изображенного на рис. 3б, с противоположного торца. Сравнение рис. 3г и 3б показывает, что, как и в случае сборки СМЖС, приведенной на рис. 2б, неконтролируемое смещение МЖС, находящихся в прямом и перевернутом положении, не обеспечивает получение УГС. Очевидно, что это утверждение полностью относится к СМЖС, изображенному на рис. 3а, т. е. для рассмотренной на рис. 3 формы вне зависимости от того, каким образом она получена, проблема ориентированной сборки также актуальна.

На основании сравнительного анализа построения УГС из предложенных авторами и фирмой GEOC сборочных элементов можно заключить:

1. Ориентированная сборка есть та цена, которую приходится платить за упорядоченность структуры, а необходимость такой сборки не зависит от того, является ли первичным элементом, как в случае фрактальной архитектуры, правильный шестиугольник или с самого начала архитектура УГС строится на основании усеченных каким-либо из двух рассмотренных приемов правильных шестиугольников.

2. Надежная идентификация прямого и перевернутого положений сборочных элементов и недопустимость неконтролируемого смещения их являются обязательными не только для построения УГС из предложенных авторами элементов, они являются

универсальными, т. е. необходимыми и для других способов условиями достижения упорядоченности структуры.

Усовершенствованная сборка УГС

С целью существенного упрощения идентификации положения сборочных элементов, в первую очередь МЖС в одностадийном процессе, нами предложен и запатентован усовершенствованный способ сборки УГС [9]. Суть его состоит в том, что у шестиугольников, имеющих форму в соответствии с [1, 2], на любых двух противоположных сторонах создают дополнительный рельеф, образованный на одной стороне впадиной, а на противоположной стороне равновеликим выступом. Сборка проводится таким образом, что выступ одного МЖС сопрягается с впадиной другого МЖС, образуя беззазорное соединение наружных рядов соседних стрижней по типу “пик–впадина”. Наимпростейший вариант реализации предложенного способа имеет самое непосредственное отношение к рассматриваемой в данном сообщении форме (–1). На рис. 4а изображено поперечное сечение МЖС, форма которого аналогична представленной на рис. 1. На рис. 4б показана та же форма с дополнительным рельефом, который образован впадиной на левой стороне и выступом на правой, а на рис. 4в – фрагмент сборки МЖС с рельефом. Поскольку конфигурации обеих сторон шестиугольника очень похожи, то для надежной идентификации положения и ориентированной сборки всех МЖС на одном и том же опорном угле целесообразно выбирать протяженность впадины существенно отличной от половины длины наружного ряда L , например, менее $0,3L$ или более $0,7L$. Если число ЕС на стороне МЖС формы (–1) n – четное, то при выборе длины впадины, равной $0,5L$, форма сечения МЖС приобретает вращательную симметрию второго порядка и сборка может производиться на любом из двух опорных углов.

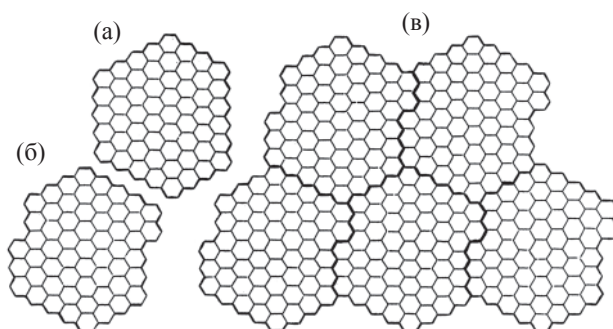


Рис. 4. Сборка УГС из МЖС с рельефом [9] (пояснения в тексте).

В заключение отметим как факт, не требующий особого доказательства: создание на СМЖС рельефа, подобного рассмотренному выше, позволяет надежно и просто идентифицировать положение СМЖС при сборке по макрорельефу.

Эксперимент и обсуждение результатов

В первоначальный план провести испытания предложенного способа и в одностадийном, и в двухстадийном процессе были внесены коррективы, вызванные тем, что в настоящее время в Санкт-Петербурге отсутствует возможность выполнить полный процесс изготовления МКП. Поэтому от первой части эксперимента пришлось отказаться и ограничиться только изготовлением образцов ВОП в двухстадийном процессе.

В эксперименте использована комбинация стекол, включавшая в себя серийные стекла ТБФ10 и ВО50 для жилы и светоотражающей оболочки соответственно, а также экспериментальное стекло ВТО651 для светопоглощающей оболочки. Размеры комплекта исходных заготовок – штабика и обеих трубок – соответствовали разработанному в ГОИ технологическому процессу изготовления поворотника изображения. Изготовление образцов проводилось в классической последовательности двухстадийного процесса [5]. Блок СМЖС спекали по схеме зонного изостатического прессования при атмосферном давлении в трубке из стекла ВТО73М.

Изготовленные образцы имели следующие характеристики: структура – $(-1)^2$, $n_1 = n_2 = 9$, рельеф СМЖС – 4/5, порядок блока – [2, 3], период структуры примерно 6,4 мкм, геометрический предел разрешения примерно 90 штр/мм. Ориентированная укладка МЖС в пакет выполнялась с учетом естественных количественных различий формы (-1) , а СМЖС в блок – с учетом рельефа 4/5. Контроль упорядоченности структуры проводился по методике, описанной в [4]. Нарушений структуры, вызванных ошибками сборки, как внутри СМЖС, так и на границах их спеканий не обнаружено. Микрофотография участка границы спекания СМЖС, свидетельствующая о достижении высокой степени упорядоченности структуры ВОП, приведена на рис. 5а (увеличение 400 $\times$). Искажения формы жил на границах вызваны тем, что из-за малого давления при прессовании блока СМЖС процесс спекания происходил в температурном интервале, в котором соотношение вязкостей стекол жилы и оболочек далеко от оптимального. Пониженное светопропускание отдельных жил обусловлено объемной неоднородностью стекол, в первую очередь, по-видимому, стекла поглощающей оболочки.

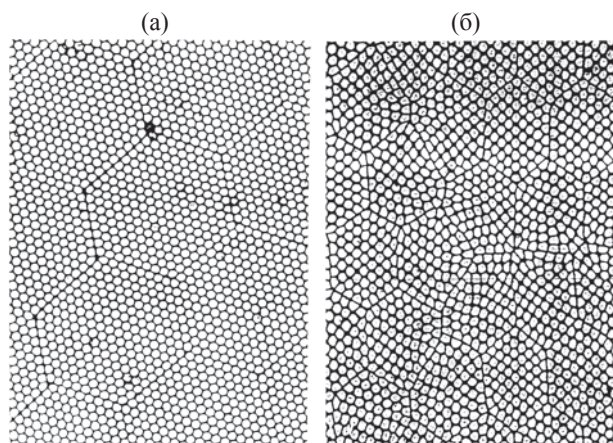


Рис. 5. Микрофотографии фрагментов структуры ВОП, изготовленных из СМЖС с рельефом (400 $\times$) (а) и из стандартных СМЖС (500 $\times$) [6] (б).

Для сравнения на рис. 5б приведена микрофотография ВОП, изготовленной по классической двухстадийной технологии, в которой и пакет ЕС, и пакет МЖС имеют в сечении форму правильного шестиугольника, а все сборки проведены на горизонтальной плоскости. Поскольку в технологии отечественной волоконной оптики двухстадийный процесс до настоящего времени не применяется, фотография заимствована из [6]. Видно, что даже с учетом отмеченных выше дефектов изготовленного нами образца по упорядоченности структуры он существенно превосходит сравниваемый образец. Справедливости ради следует заметить, что неоднородность структуры образца фирмы GEOC усугубляется тем, что соотношение вязкостей стекол жилы и оболочки при перетяжке пакета МЖС и спекании блока СМЖС отличается от использованных в эксперименте. Огранка жил происходит в том случае, когда вязкость стекла жилы меньше вязкости стекла оболочки. В комбинации стекол, использованных в эксперименте, вязкость жилы превосходит вязкость оболочки, поэтому на границе спекания форма жил приобретает лишь небольшую эллиптичность.

Заключение

На примере самой элементарной формы усеченного шестиугольника выполнен анализ условий проведения ориентированной сборки. Предложен универсальный прием, допускающий применение как в одностадийном, так и в двухстадийном процессе, суть которого заключается во введении в исходную форму дополнительного рельефа, обеспечивающего надежную идентификацию положения собираемого элемента и исключающего влияние азимутального и зеркального поворотов. Предложенный способ запатентован авторами, а эффектив-

ность его подтверждена при изготовлении в двухстадийном процессе волоконных структур с расчетным разрешением 90 штр/мм. Главным итогом настоящей работы является то, что сняты все объективные препятствия, стоявшие на пути создания практической двухстадийной технологии высоко разрешающих ВОП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Способ формирования регулярной гексагональной волоконной структуры // Патент РФ № 2199140. 2002.
2. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Способ формирования регулярной гексагональной волоконной структуры (варианты) // Патент РФ № 2210795. 2003.
3. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Формирование упорядоченных гексагональных волоконных структур // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 8. С. 107–113.
4. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Фрактальный анализ процесса многостадийной сборки высокоупорядоченных волоконных и капиллярных структур // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 7. С. 64–70.
5. Cook L., Mancini D., Patterson S. New fiber faceplate architectures // Proc. SPIE. 1990. V. 1243. P. 196–204.
6. Cook L., Burger R. Fabrication and optical performance of fractal fiber opticsTM // Proc. SPIE. 1991. V. 1449. P. 186–192.
7. Cook L., Feller W.B., Chappell J.H. Fractal multifiber microchannel plates // Proc. SPIE. 1992. V. 1655. P. 190–201.
8. Cook L., Mancini D., Patterson S. Fiber assembly // Patent USA № 5049176. 1991.
9. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Способ сборки регулярных гексагональных волоконных и капиллярных структур // Патент РФ № 2252198. 2005.