

ПРОИЗВОДСТВО КРУПНОГАБАРИТНОЙ ОПТИКИ ИЗ ВОДОРАСТВОРИМЫХ КРИСТАЛЛОВ

Водорастворимые кристаллы (ВРК) типа KDP , $\alpha-LiIO_3$, $Ba(NO_3)_2$ и др. используются в оптике и лазерной физике давно. Для управления излучением, например, широко применялись кристаллы группы KDP (в преобразователях частоты и электрооптических затворах). В данной работе представлены новые технологические решения, разработанные в ИПФ РАН, для скоростного выращивания крупногабаритных кристаллических блоков типа KDP .

ВВЕДЕНИЕ

Производство (выращивание, оптическая обработка) небольших (размерами ~10 мм) оптических элементов для лазерных систем сегодня не вызывает затруднений. Они производятся многими компаниями. Наиболее распространены традиционные методы выращивания полногранных монокристаллов со скоростью роста ~1 мм/день [1,2]. Такая низкая скорость приемлема для выращивания небольших элементов, так как за 6–7 месяцев позволяет вырастить кристалл размером 100×100×150 мм, из которого можно изготовить (в зависимости от размера и ориентации) до нескольких сотен элементов. Поэтому небольшой производственный участок на 10 аппаратов способен закрыть потребности определенного сегмента рынка.

Сложность производства и, соответственно, стоимость элементов резко возрастают при увеличении их размеров. Так, при традиционном производстве оптических элементов с апертурой ~200×200 мм требуется около года для выращивания одного "кристалла-були", а выход заготовок из такой були обычно не превышает 30%.

Следует иметь в виду, что при выращивании крупногабаритных кристаллов растет объем требуемой аппаратуры и химикатов. Особенно ощутим рост стоимости при выращива-

нии кристаллов из дорогих тяжеловодных растворов – например, кристаллов $DKDP$, выращиваемых из растворов на основе тяжелой воды D_2O . Поэтому традиционные способы выращивания кристаллов для лазерных систем со световой апертурой пучка, превышающей 150–200 мм, практически неприменимы.

Аналогично обстоит дело и с оптической обработкой. Если небольшие элементы удается достаточно легко обработать методами традиционной полировки, то элементы с апертурой >100 мм и толщиной 10–20 мм обрабатывать с требуемым качеством не удается. Между тем современная техника требует оптических элементов с апертурой до ~400×400 мм и толщиной ~10 мм. Ясно, что для производства таких элементов необходим принципиально иной подход, особенно на стадиях выращивания кристаллов-заготовок и их финишной обработки.

Следует подчеркнуть, что рынок крупногабаритной кристаллооптики очень ограничен, и только несколько стран (США, Франция, Япония, Китай, Россия) могут позволить себе строить лазерные комплексы, где применяются такие элементы. Затраты на подобные проекты очень высоки. В России, однако, даже в трудные для развития науки годы, продолжалось развитие и модернизация мощных лазерных комплексов ("Искра-5,6" [3–5], "Луч" [4,5]). Это допустимо лишь при условии, что стоимость основных узлов установок (напри-

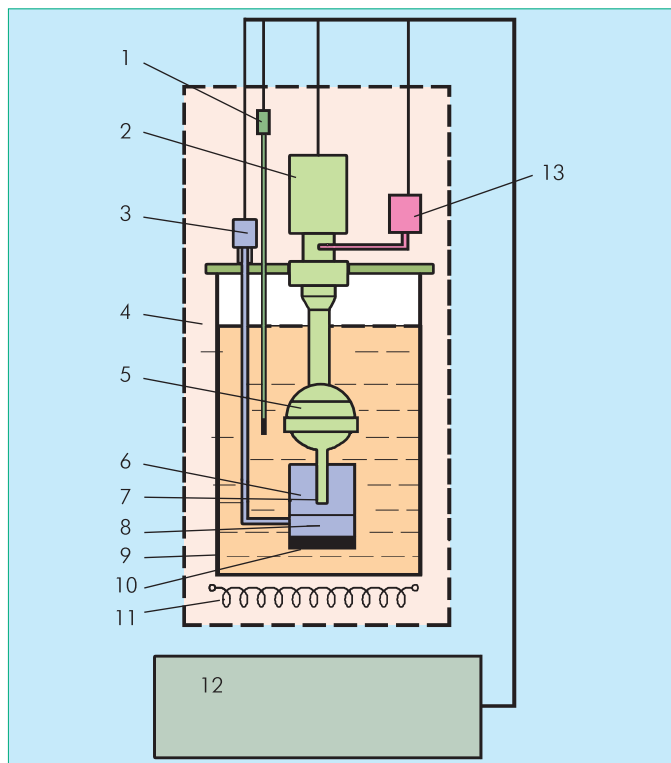


Рис. 1 Схема кристаллизатора для скоростного выращивания профилированных кристаллов: 1 – контактный термометр, 2 – электропривод погружной помпы, 3 – устройство опускания кристаллизационной камеры, 4 – термостатированный воздушный объем, 5 – погружная помпа, 6 – кристаллизационная камера, 7 – питатель, 8 – растущий кристалл, 9 – емкость с пересыщенным раствором, 10 – затравочная кристаллическая пластина, 11 – нагреватель, 12 – блок управления приводами, 13 – устройство качания погружной помпы

мер, кристаллических элементов) существенно ниже мировых, и возможно только при использовании высокотехнологичных решений для выращивания кристаллов и их обработки.

СКОРОСТНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Приведем несколько примеров реализации крупногабаритной оптики на основе кристаллов KDP, выращенных скоростным способом. Они, конечно, не исчерпывают список возможных применений этих технологий для выращивания других ВПК, $\text{Na}(\text{NO}_3)_2$, BaNO_3 , LiIO_3 и др.

Преобразователи частоты излучения

В начале 80-х годов прошлого столетия ИПФ АН СССР предложил технологию скоростного (со скоростью, в двадцать раз превышающую обычную – до 0,5 мм/ч) выращивания кристаллов KDP [6,7]. При этом выращивался не полногранный кристалл, а заготовка, максимально близкая по геометрии и ориентации к будущему элементу. Она выращивалась преимущественно одной гранью (101) или (100) в зависимости от ориентации и назначения будущего элемента. Для реализации такого способа выращивания был создан принципиаль-

но новый кристаллизатор [8], где кристалл рос в спецкамере, а раствор на растущую поверхность непрерывно подавался помпой с питателем (рис.1). Для обеспечения однородности питания узел помпа-питатель периодически качался, омывая растущую грань кристалла свежим раствором. Подобная схема выращивания в разных модификациях успешно используется до сих пор.

Одновременно с этим началось освоение нового способа оптической обработки кристаллов: алмазного микрофрезерования на отечественных станках типа ПЛ-600.

В результате в конце 80-х годов появилась возможность перевести в режим генерации второй и третьей гармоник одну из крупнейших установок "Искра-4" (йодный лазер с $\lambda=1,315$ мкм) [9,10]. Луч лазера большого сечения перекрывался мозаичным (2×2 элемента) умножителем частоты типа II (взаимодействие типа ooe) из кристалла DKDP. Кристалл-заготовка будущего элемента выращивался гранью (101) в виде прямоугольного блока сначала сечением 150×150 , а затем 210×210 мм, и высотой 30–70 мм. Оптическая ось кристалла была сориентирована к оси кристалла под углом 43° , что на 9° отличалось от направления синхронизма для генерации второй гармоники. Для получения фазового синхронизма каждый элемент устанавливался под соответствующим углом ($\sim 15^\circ$) к направлению луча (так называемые "скошенные" элементы). Как показано в [11], свойства генерации излучения у таких элементов не отличаются от обычных. При таком подходе удалось значительно сократить время выращивания кристаллического блока и практически исключить отходы.

Практика показывает, что себестоимость производства "скошенного" умножителя частоты из кристалла DKDP, выращенного скоростным способом, на порядок меньше, чем того же элемента, изготовленного традиционными методами при тех же параметрах (КПД преобразователя, оптическая стойкость, искажение волнового фронта). Высокая эффективность новой технологии обусловила успех программы генерации гармоник. В начале 21 века так же успешно была пере-

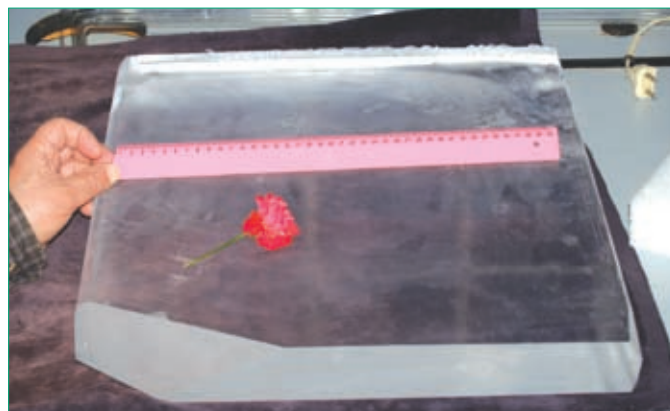


Рис.2 Затравочная кристаллическая пластина размером 450×450 мм

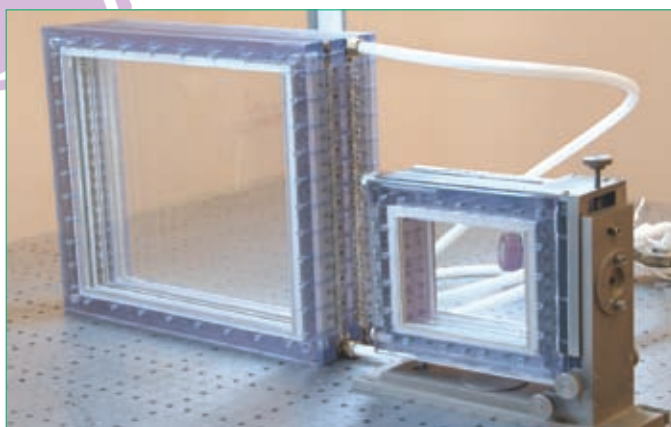


Рис.3 Ячейки Поккельса с плазменными электродами и апертурой 100×100 и 300×300 мм

ности. Перспективным является применение в этих системах параметрических усилителей (ПУ) на основе кристаллов DKDP. Для этого требуется создать элементы с апертурой до 400×400 мм и длиной до 100 мм. Сегодня в ИПФ РАН изготовлены элементы с апертурой 100×100 мм, которые позволили получить очень мощные фемтосекундные импульсы с $\lambda=911$ нм [12] (ведутся работы над элементами с апертурой 200×200 мм). Изготовлены элементы из кристаллов DKDP для фемтосекундных ПУ с апертурой 300×300 мм, на которых планируется получить выходную мощность петаваттного (10^{15} Вт) уровня.

ведена в режим генерации гармоник установка "Искра-5" ($\lambda=1,315$ мкм) [3]. Здесь каждый луч перекрывался одним скошенным элементом из кристалла DKDP со световым диаметром 350 мм.

К настоящему времени принципиально новые конструкции основных узлов кристаллизаторов (помпы с питателями, ростовые ячейки) и новые технические приемы позволили увеличить время устойчивого роста до нескольких месяцев. Это позволило перейти от выращивания не очень удобных "скошенных" элементов к выращиванию элементов, где направление нормали к рабочей поверхности близко к направлению синхронизма для основной гармоники лазерного излучения. Эта технология позволяет выращивать кристаллы-заготовки практически любой ориентации и типа синхронизма (умножители типа I и II, ячейки Поккельса, фазовые пластины) и использовалась при оснащении кристаллооптикой установок с размерами пучков 200×200 мм. Сегодня она позволяет выращивать кристаллы с размерами до 400×400 мм (рис.2).

Электрооптические модуляторы излучения

Метод выращивания кристаллов DKDP для электрооптических элементов, ориентированных по оси Z, является одним из вариантов описанных выше технологий – выращивания гранью (100). Для небольших апертур лазерных пучков ($\varnothing < 100$ мм) наиболее распространены ячейки Поккельса с поясковыми электродами [13]. При этом апертура кристаллического элемента определяется сечением пучка, а длина составляет 1,5–2 его диаметра. Для пучков $\varnothing 100$ мм использование поясковых электродов для ячеек Поккельса неприменимо из-за большой неоднородности электрического поля в кристалле. В ячейке с плазменными электродами [14] управляющее напряжение (до 7 кВ) подводится к торцам элемента через разреженную газовую плазму, созданную ионизирующим электрическим импульсом. Плазма, прозрачная для лазерного излучения, играет роль проводящих электродов плоского конденсатора, внутри которого находится электрооптический кристалл. При этом достигается максимально однородное электрическое поле в кристалле. Диаметр кристаллического элемента определяется диаметром луча (до 400×400 мм), а его длина составляет ~10 мм. В ИПФ РАН на основе кристаллов DKDP, выращенных по скоростной технологии, изготовлены ячейки Поккельса с апертурой 100×100 мм и 300×300 мм (рис.3).

Элементы параметрических усилителей фемтосекундных петаваттных систем

Сейчас интенсивно развивается техника генерации фемтосекундных лазерных импульсов тераваттного уровня мощ-

Фазовые пластины

Фазовые пластины обычно изготавливают из кристаллического кварца и исландского шпата. Однако получить из них элементы большой апертуры ($\geq 50 \times 50$ мм) проблематично. Наилучший вариант – использование для этого кристаллов KDP. Они обладают приемлемой величиной оптической анизотропии, изготавливаются практически любого размера, а по оптической однородности и лазерной прочности не уступают традиционным материалам. Их недостаток – необходимость защищать оптические поверхности от воздействия атмосферы, но современные технологии нанесения тонкопленочных покрытий позволяют успешно решать эту проблему. В ИПФ РАН изготовлены фазовые пластины с апертурой до 350×350 мм, которые успешно эксплуатируются.

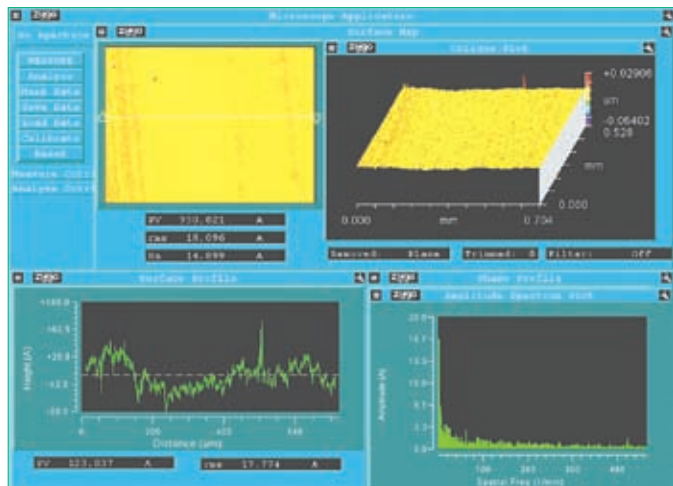


Рис.4 Микрошероховатость (СКВ) удвоителя частоты с апертурой 210×210 мм

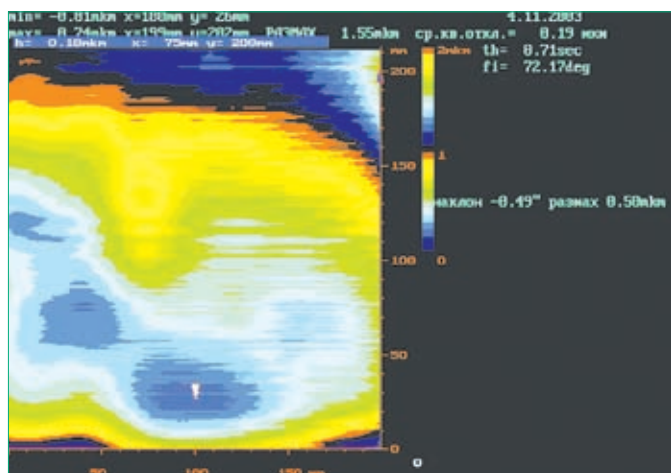


Рис.5 Неплоскость удвоителя частоты с апертурой 210×210 мм

Обработка кристаллооптики из ВРК

Изделия из ВРК требуют специфических приемов обработки [15]. Изготовление габаритной оптики – пластин с большим отношением L/D – также создает существенные сложности при обработке обычными методами полирования. Поэтому в ИПФ РАН параллельно с разработкой новых методов выращивания кристаллов разрабатывались технология и оборудование для разрезания и точной механической обработки кристаллов алмазным инструментом. Изготовлены оригинальные станки для разрезания габаритных (до 500 мм) кристаллов штрипсовой алмазной пилой. Разрезание на станках отличается высокой надежностью и практически полной безотходностью. Финишная оптическая обработка осуществляется методом микрофрезерования алмазным резцом с использованием станков ПЛ-600. Его основные узлы, обеспечивающие точность и чистоту обработки, прошли доводку, была определена оптимальная геометрия алмазного резца, разработаны способы крепления деталей, отработаны режимы резания. Это позволило проводить обработку алмазным микрофрезерованием с оптической точностью: микрошероховатость до 2 нм и неплоскость до 0,2 мкм (рис.4 и 5) – для деталей из кристаллов KDP и DKDP с поперечным сечением от 40×40 до 400×400 мм и высотой от 10 до 100 мм (при допустимой толщине пластин ~0,5 мм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние 10 лет в ИПФ РАН создана высокоэффективная и экономичная технология производства оптических деталей из кристаллов KDP и DKDP (а при необходимости и из других кристаллов) любой ориентации и геометрии поперечного сечения до 400×400 мм. Качество деталей удовлетворяет всем требованиям современных мощных лазерных систем оптического диапазона. Отметим, что развитие технологии производства деталей из кристаллов KDP позволяет предложить их не только для нелинейно-оптических изделий (умножители частоты, электрооптические затворы), но и для изделий линейной оптики (фазовые пластины большой апертуры,

кристаллические элементы ячеек Поккельса). Такие элементы могут быть изготовлены практически любых размеров, а имеющиеся технологии нанесения тонкопленочных защитных покрытий позволяют эксплуатировать их в обычных условиях в течение длительного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернов А.А. и др. Современная кристаллография. Т.3. – М.: Наука, 1980.
2. Batoryeva I.A. et al. Growth and investigation of optical single crystals for high-power laser systems. – J. of Crystal Growth, 52, 1981, p.832–836.
3. Анненков А.В. и др. Перевод йодного лазера "Искра-5" в режим работы на второй гармонике. – Квантовая Электроника, 2005, т.35, 20А, с.993.
4. Парафонова В. Ядерный синтез в лазерной искре. – Наука и жизнь, 2003, №2.
5. Воронич И.Н. и др. Исследования по оптимизации работы лазерной установки "Луч". – Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2005, вып. 8, с.170–179.
6. Ершов В.П., Кацман В.И. Способ выращивания монокристаллов дигидрофосфата калия. А.с. СССР № 955741.
7. Беспалов В.И. и др. Скоростное выращивание водорастворимых кристаллов и проблемы создания большеапертурных преобразователей частоты света. – Изв. АН СССР. Сер. физич., 1987, т.51, №8, с.1354–1360.
8. Бредихин В.И. и др. Устройство для выращивания профилированных кристаллов из раствора. – А.с. СССР №1342056, 1985.
9. Воронич И.Н. и др. Генерация 2-й гармоники излучения лазера "Искра-4" на широкоапертурных мозаичных элементах. – Изв. АН СССР, сер. физич., 1990, т.54, №10, с.2024–2026.
10. Воронич И.Н. и др. Генерация 3-й гармоники излучения йодного лазера. – В кн.: 6-я Всесоюз. конф. "Оптика лазеров". Тез. докладов. – Ленинград, 1990, с.299.
11. Бредихин В.И. и др. Применение "скошенных" элементов для преобразования частоты лазерного излучения. – Квантовая электроника, 1982, вып.3(9), с.1263–1265.
12. Freidman G.I. et al. Parametric amplification of chirped laser pulses at 911-nm and 1250-nm wavelengths. – Conf. Proc. Paper, 13 March 2002, vol.4630.
13. Андреев Н.Ф. и др. Широкоапертурная ячейка Поккельса с тремя цилиндрическими электродами, – Квантовая электроника, 2004, т.34, №4, с.381–385.
14. Plasma electrode Pockels cell for ICF lasers Rhodes, MA UCRL-JC-121180. <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/227927.pdf>
15. Viktor I. et al. Gained experience in production of wide-aperture optical elements using KDP, DKDP crystal rapid growth technology. – SPIE Proc., vol.4424, 2001, p.124–128.