

Возможности повышения порога оптического пробоя кристаллов KDP

В.И.Бредихин, В.П.Ершов, В.Н.Буренина, А.Н.Мальшаков, А.К.Потемкин

Экспериментально исследовано влияние различных технологических факторов, таких как направление выращивания кристалла ((100) или (101)), кислотность маточного раствора, скорость выращивания, степень фильтрации маточного раствора, чистота исходного сырья, специально введенная примесь (Pb), а также послеростовой термический отжиг, на порог оптического пробоя кристаллов KDP, выращенных по технологии скоростного выращивания профилированных кристаллов. Показано, что использование исходных солей высокой чистоты и тонкой фильтрации растворов в комбинации с послеростовым отжигом кристаллов позволяет повысить порог лазерного пробоя кристаллов KDP, выращиваемых по скоростной технологии с профилированием, до значений, соответствующих требованиям современных лазерных проектов.

Ключевые слова: мощные лазерные системы, нелинейно-оптические кристаллы, кристаллы KDP, порог оптического пробоя.

1. Введение

Кристалл KDP и его дейтерированный аналог DKDP остаются основными нелинейно-оптическими материалами в мощных лазерных системах. Они широко применяются для преобразования частоты излучения и управления длительностью импульсов в лазерных установках для исследования управляемого лазерного термоядерного синтеза (УЛТС) [1, 2]. Со времени первого применения KDP в нелинейной оптике [3–5] его оптическая стойкость широко исследовалась разными научными группами [6–22]*. В ряде работ показано, что порог лазерного пробоя зависит как от качества кристалла, так и от параметров лазерного излучения. Последнее обстоятельство накладывает жесткие требования на качество лазерного излучения при количественных измерениях оптической стойкости и обуславливает необходимость использования работающих в одномодовом и одночастотном режиме лазеров с мощностью, достаточной для пробоя в пучке диаметром не менее 0.1 мм. При этом нужно принимать меры для исключения самофокусировки лазерного пучка в исследуемом образце.

Качество кристалла и совершенство технологии его выращивания оказывают решающее влияние на порог лазерного пробоя. Так, в [6] установлено, что оптическая стойкость KDP на длинах волн первой и второй гармоник неодимового лазера определяется дефектной структурой кристалла, в частности размерами и типом микро-

включений. В работах [17–19, 21] показано, что оптическая стойкость кристаллов может быть существенно улучшена за счет послеростовой обработки: облучения лазерными импульсами предпробойной интенсивности или термического отжига.

Проблемы исследования лазерной прочности кристаллов KDP и DKDP, а также повышения порога лазерного пробоя в широком частотном диапазоне продолжают оставаться актуальными до сих пор. Это связано как с возрастающими по мере развития лазерной техники мощностью и энергией лазерного излучения, так и с прогрессом в технологии выращивания кристаллов. В настоящее время световая апертура оптических элементов, применяемых в системах УЛТС, составляет до 40×40 см, а плотность энергии излучения, пропускаемого этими элементами, достигает 10 Дж/см^2 (при длительности импульса ~ 1 нс) в диапазоне длин волн 0.3–1.3 мкм [1, 2, 18, 19, 21, 23, 24].

Несмотря на относительную простоту выращивания кристаллов типа KDP из растворов (что собственно и является основным их преимуществом перед другими нелинейно-оптическими кристаллами), их стоимость оказывается очень высокой. Поэтому чрезвычайно важно развивать новые эффективные технологии выращивания и искать возможности повышения надежности технологий, в частности технологические режимы и приемы, позволяющие достигнуть необходимой оптической стойкости кристаллов. В настоящее время все большее применение находят скоростные технологии выращивания [1, 2, 22, 25, 26], в которых время выращивания уменьшается в десятки раз и появляется возможность резко увеличить размеры выращиваемых кристаллов без существенной потери их качества. Примеры использования кристаллов KDP и DKDP, полученных с применением скоростной технологии выращивания профилированных (приближенных к геометрии будущего оптического элемента) кристаллов, для управления лазерным излучением с энергией на уровне килоджоулей приведены в

* Приведенные ссылки не исчерпывают всех работ, поскольку авторы не ставили своей целью представить полный обзор исследований по лазерной стойкости кристаллов.

[23, 24, 27]. Так, в частности, в [27] рассмотрен пример использования «скоростных» профилированных кристаллов DKDP для параметрической генерации фемтосекундных импульсов тераваттной мощности.

Оптическая стойкость кристаллов, выращенных по скоростной технологии выращивания полногранных кристаллов [1], исследовалась в ряде работ (см., напр., [1, 18, 19, 21]), в которых показано, что при оптимальных параметрах скоростного выращивания оптическая стойкость «скоростных» кристаллов не отличается от стойкости лучших кристаллов, выращенных по традиционной технологии.

В настоящей работе приводятся результаты исследований оптической стойкости кристаллов KDP, выращенных по технологии скоростного выращивания профилированных кристаллов [2, 22, 25, 26]. Исследовано влияние некоторых технологических режимов и приемов на порог оптического пробоя на длинах волн неодимового лазера ($\lambda = 1.054$ мкм) и его третьей гармоники. Внимание уделялось тем параметрам и технологическим приемам, важность которых была известна из литературных источников [1, 2, 6–21] или из априорных соображений. Исследовано влияние следующих факторов: направления выращивания кристалла (рост одной гранью бипирамиды (101) или одной гранью призмы (100)), кислотности маточного раствора, скорости выращивания R , степени фильтрации маточного раствора, чистоты исходного сырья, специально введенной примеси (Pb), а также послеростового термического отжига кристаллов. При исследовании роли отдельного фактора остальные факторы не менялись.

2. Экспериментальные методы

2.1. Выращивание кристаллов

Кристаллы KDP выращивались скоростным методом профилированного выращивания в установке объемом 10 л, описанной ранее в [2]. Поперечный размер кристаллов составлял 43×43 мм, длина достигала 50 мм. Скорость их роста варьировалась в диапазоне 0.08–2.3 мм/ч. Кристаллы выращивались гранью (100) или (101). Гидродинамические режимы выращивания во всех экспериментах поддерживались одинаковыми. Растворы готовились по единой методике; температура насыщения, определяемая лазерно-интерферометрическим методом, была равна ~ 40 °С. Кислотность растворов регулировалась добавлением кислоты H_3PO_4 (марки ОСЧ). Примесь Pb вводилась в рабочий раствор в виде кислого раствора $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$. Фильтрация осуществлялась при заливке перенасыщенного раствора в ростовую установку через различные фильтры: объемный фторопластовый фильтр с пористостью $d = 10$ мкм, мембранные фильтры «Сарториус» (PTFE) с $d = 0.2$ мкм и «Владипор» (МФФК) с $d = 0.3 - 0.7$ мкм, а также трековые мембраны с $d = 0.3 - 0.67$ мкм. Использовались две различные партии исходной соли KN_2PO_4 производства ВНИИ монокристаллов (Украина) и ProChem (США). Последняя партия была специально разработана для выращивания высококачественных кристаллов скоростным способом. Скорость роста варьировалась как в одном эксперименте без остановки роста, так и в разных экспериментах.

2.2. Послеростовой отжиг кристаллов

Отжиг кристаллов проводился в программно-управляемой печи, режим повышения и понижения темпера-

туры был ступенчатым с выдержкой при максимальной температуре 150 °С. Общее время отжига составляло пять дней.

2.3. Измерение порога лазерного пробоя

В настоящей работе порог лазерного пробоя измерялся на основной (ω) и третьей (3ω) гармониках излучения неодимового лазера на фосфатном стекле ($\lambda = 1.054$ мкм). Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Она состояла из задающего генератора (ЗГ) *I*, схемы формирования временных и пространственных характеристик излучения *II*, усилителя *III*, преобразователя частоты излучения *IV* и пылезащитной камеры с тестируемым образцом *V*.

При построении лазера особое внимание уделялось получению излучения с контролируемыми параметрами, т. к. в плоскости тестируемого образца необходимо контролировать пространственно-временную зависимость интенсивности излучения. Наиболее надежно это осуществить, используя излучение лазера с гауссовым поперечным профилем интенсивности и гладкой временной зависимостью интенсивности. Поскольку трудно провести измерения временных зависимостей параметров одиночных импульсов с разрешением лучше, чем 0.1–0.2 нс, в настоящей работе мы кроме временных параметров контролировали также спектральные характеристики излучения.

Задающий генератор *I* (рис.1) работал в режиме пассивной самосинхронизации мод в одиночных вспышках с периодичностью одна вспышка за 5 мин. Активный элемент (АЭ) лазера 3 диаметром 10 мм и длиной 160 мм изготавливался из фосфатного неодимового стекла ГЛС 22П. Для предотвращения отражения от торцов АЭ они скашивались под углом Брюстера. Накачка проводилась импульсными лампами, помещенными в зеркальный эллиптический отражатель. Модуляция добротности в лазере осуществлялась просветляющимся краси-

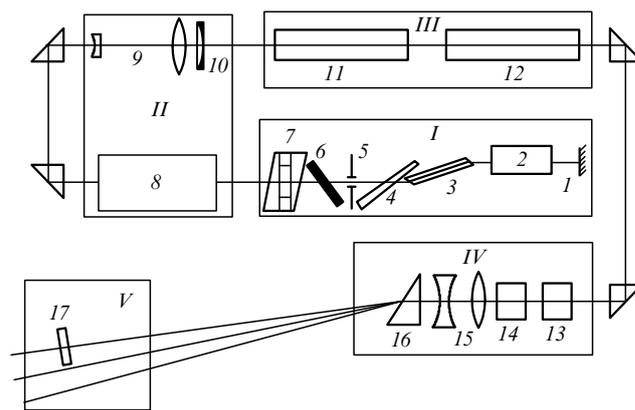


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки; *I* – задающий генератор: 1 – глухое зеркало; 2 – интерференционно-поляризационный фильтр (фильтр Вуда); 3 – активный элемент из стекла ГЛС 22П; 4 – кальцитовый клин; 5 – диафрагма диаметром 1.8 мм; 6 – пассивный затвор на просветляющемся красителе; 7 – стопа; *II* – схема формирования временных и пространственных характеристик излучения: 8 – селектор одиночных импульсов; 9 – телескоп $5\times$; 10 – аподизирующая диафрагма; *III* – усилитель с активными элементами 11, 12 из фосфатного стекла; *IV* – система формирования тестирующего излучения: 13 и 14 – соответственно генераторы второй и третьей гармоник из кристаллов DKDP с синхронизмом первого типа (ооо); 15 – телескопический объектив; 16 – дисперсионная призма; *V* – пылезащитная камера с тестируемым образцом 17.

телем 7294У, растворенным в изопропиловом спирте. Раствор заливался в кювету 6 толщиной 1 мм, наклоненную к оси под углом Брюстера.

Резонатор 3Г длиной 1.8 м состоял из плоского зеркала 1 и стопы 7, образованной двумя плоскостями, разделенными воздушным промежутком длиной 2 см. Конструкция стопы обеспечивала постоянную длину воздушного промежутка при изменении температуры в широком диапазоне. Термостабилизированный интерференционно-поляризационный фильтр Вуда [28] 2, элементы которого выполняли функции эталона Фабри–Перо, в совокупности с резонатором обеспечивал одночастотный режим работы лазера. Спектр излучения в 100 % случаях состоял из одной, не смещающейся от вспышки к вспышке линии шириной $\sim 0.02 \text{ см}^{-1}$. Ширина линии и отсутствие боковых сателлитов говорят о гладкости огибающей импульса во времени. Стабилизация частоты была особенно важна для стабильной генерации третьей гармоники. Селекция одной (нулевой) поперечной моды осуществлялась диафрагмой 5 диаметром 1.8 мм. Оптический клин 4, изготовленный из кальцита, обеспечивал высокую степень поляризации излучения 3Г.

На выходе 3Г генерировался пуг из 10–15 импульсов. Схема формирования временных и пространственных характеристик излучения II включала в себя селектор одиночных импульсов 8, телескопический расширитель пучка 9 и аподизирующую диафрагму 10. Селектор импульсов состоял из ячейки Поккельса, управляемой искровым разрядником, который поджигался излучением лазера. Время срабатывания такого затвора составляет $\sim 1 \text{ нс}$, что достаточно для выделения одиночного импульса из пуга импульсов.

Поскольку в плоскости тестируемого образца желательно иметь гауссово поперечное распределение интенсивности, в настоящей работе мы применили мягкую диафрагму 10 (рис.1) с гауссовым профилем пропускания. Для согласования диаметров пучков 3Г и усилителей 11, 12 использовался расширяющий телескоп Галилея 9. Усилители с активными элементами из фосфатного стекла диаметром 20 мм и длиной 250 мм с ламповой накачкой позволяли получать энергию в одиночном импульсе до 1 Дж, что давало возможность измерять лучевую стойкость при диаметре характерной освещаемой области до 2 мм в образцах с лучевой стойкостью до 30 Дж/см^2 . Поперечное распределение интенсивности на выходе установки с высокой степенью точности соответствовало гауссову распределению $I(r) = I_0 \exp[-(r/r_0)^2]$ с $r_0 = 0.54 \text{ см}$. Подробнее аналогичная установка была описана в [29].

Генераторы второй и третьей гармоник состояли из двух кристаллов DKDP длиной 4 см, вырезанных под углом синхронизма первого типа. Относительная ориентация этих кристаллов соответствовала схеме, аналогичной рассмотренной в [30].

Для фокусировки излучения в тестируемый образец использовался двухкомпонентный телескопический объектив 15 с переменным фокусным расстоянием ($\sim 4 \text{ м}$), позволяющий формировать в плоскости тестируемого образца освещаемую область необходимого размера. Дисперсионная призма 16, изготовленная из плавленого кварца, разводила в пространстве пучки с частотами ω , 2ω и 3ω . Фокусное расстояние объектива 15 в экспериментах по измерению лучевой стойкости кристаллов вы-

биралось равным 350 см. Длина перетяжки при этом составляла 96, 49 и 31 см для основной, второй и третьей гармоник соответственно. Распределение интенсивности было близко к гауссову с диаметром пучка по уровню e^{-2} , равным 0.8, 0.4 и 0.26 мм. Относительно большой диаметр пучка в фокусе позволяет ожидать репрезентативных результатов для крупногабаритных кристаллов и мощных лазерных пучков большого диаметра.

Для измерения лучевой стойкости прозрачных диэлектриков изготавливался образец-свидетель. Типичные размеры образца были следующими: апертура $40 \times 40 \text{ мм}$, толщина $L = 10 \text{ мм}$. Толщина образца-свидетеля выбиралась такой, чтобы влияние самофокусировки на геометрию излучения при распространении его в образце было незначительным. Критерий малости можно оценить по величине B -интеграла на длине образца. Для пучка с гауссовым профилем интенсивности и мощностью P , прошедшего нелинейный слой толщиной L , имеем

$$B = \frac{P}{P_{\text{cr}}} \frac{2}{n} \frac{L}{z_d},$$

где n – показатель преломления материала образца; z_d – длина дифракционного расплывания пучка в плоскости образца; P_{cr} – критическая мощность самофокусировки в материале образца. Типичное значение P_{cr} для большинства прозрачных диэлектриков лежит в интервале 1–4 МВт [31]. Для нашей геометрии излучения в плоскости образца толщиной $L = 1 \text{ см}$ при максимальной интенсивности $I = 20 \text{ ГВт/см}^2$ значения B -интеграла составляют 0.1–0.35, что много меньше величины, при которой нелинейность материала образца может влиять на геометрию распространения пучка ($B = 1 - 3$) [31].

Проделав подобные выкладки для второй и третьей гармоник, можно также сделать вывод о пренебрежимо малом влиянии самофокусировки на условия измерения.

Измерения проводились в режиме однократного воздействия на исследуемую зону вне зависимости от наличия разрушения. Пробой фиксировался по появлению дополнительных дефектов в освещенном объеме при наблюдении рассеянного света под микроскопом $40\times$. После каждой вспышки, вне зависимости от того, произошло разрушение образца или нет, образец передвигался на 2 мм, и область облучения рассматривалась в сильном рассеянном свете при помощи бинокулярного микроскопа МБС-1. Любое различие в картинах, наблюдаемых в микроскоп до и после облучения, считалось разрушением. Для определения среднего порога пробоя W_{th} одного образца требовалось 30–50 выстрелов.

Длительность импульса излучения применяемого в настоящей работе лазера изменялась в пределах 0.7–1.5 нс. Все приводимые результаты измерения лучевой стойкости масштабировались по эмпирической корневой зависимости пороговой интенсивности разрушения от времени $I_{\text{th}}(r) = I_{\text{th}}(\tau = 1 \text{ нс}) \tau^{-1/2}$ (где $I_{\text{th}}(\tau = 1 \text{ нс})$ – пороговая интенсивность разрушения при длительности импульса $\tau = 1 \text{ нс}$ [32]). В данном интервале длительностей импульсов корневая зависимость мало отличается от теоретической зависимости [33, 34] для порога пробоя на поглощающих микровключениях. Если интенсивность облучения в каждой вспышке не масштабировать по корневой зависимости, то однозначно определить порог пробоя не удается. Далее везде в тексте под порогом пробоя подразумевается пороговая плотность энергии пробоя $W_{\text{th}} = W_{\text{th}}(\tau = 1 \text{ нс})$.

Систематическая погрешность определения порога пробоя зависит в основном от погрешности используемого калориметра ($\pm 20\%$). Случайная погрешность, оцененная по разбросу экспериментальных точек, составляла $\pm 10\%$. Для сравнения результатов и обеспечения возможности повторения измерений в каждой серии регистрировался порог оптического пробоя плавленого кварца КУ 1.

3. Экспериментальные результаты

Результаты измерений, соответствующие влиянию различных технологических факторов и режимов на порог лазерного пробоя, представлены в виде диаграмм на рис.2–9, где также приведены пороги оптического пробоя плавленого кварца КУ 1.

Для кристаллов, выращенных гранью (100), измерения проводились только на первой гармонике, поскольку такие кристаллы обладают существенным поглощением на третьей гармонике [25] и их в этой области применять нецелесообразно.

Основные результаты можно сформулировать следующим образом.

1. Порог лазерного пробоя не зависит от кислотности раствора (рис.2). Это, в принципе, естественно, т. к. кислота в кристалл не входит.

2. Порог лазерного пробоя не зависит от скорости выращивания кристаллов R в широком диапазоне $R = 0.08 - 2.3$ мм/ч (рис.3), что говорит о том, что увеличение скорости роста при оптимальных гидродинамических

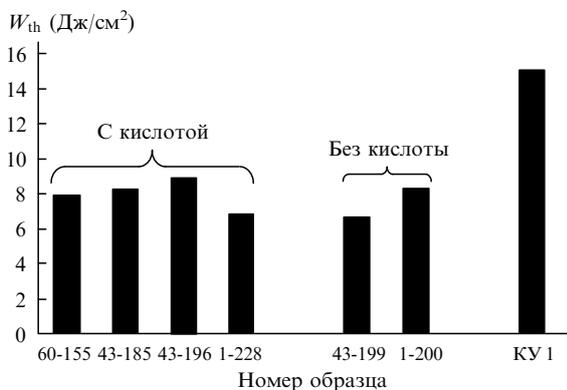


Рис.2. Пороги лазерного пробоя W_{th} на первой гармонике для кристаллов, выращенных в стехиометрических растворах и с добавлением кислоты.

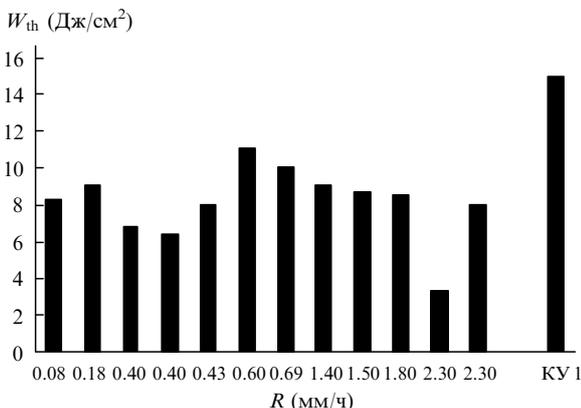


Рис.3. Влияние скорости роста R на порог W_{th} лазерного пробоя на первой гармонике.

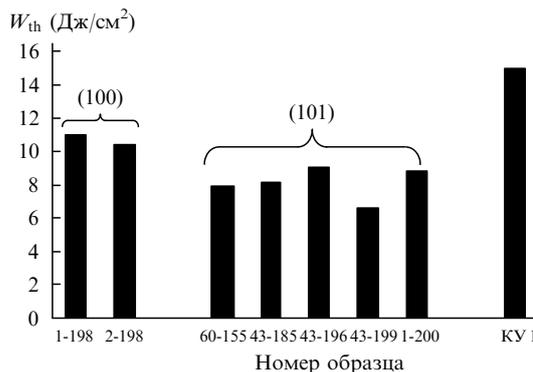


Рис.4. Пороги лазерного пробоя W_{th} на первой гармонике для кристаллов с ориентацией (100) и (101).

режимах не приводит к возникновению дополнительных дефектов. Заметим, что $R = 0.08$ мм/ч близко к скорости роста в «традиционной» технологии. Это свидетельствует о том, что структуры кристаллов, выращиваемых по традиционной и скоростной технологиям, не различаются.

3. Пороги лазерного пробоя на $\lambda = 1.054$ мкм кристаллов с ориентацией (100) и (101) различаются незначительно (рис.4), т. е. примеси, определяющие поглощение в УФ диапазоне в кристаллах с ориентацией (100), на порог пробоя на этой длине волны не влияют.

4. Кристаллы, выращенные из соли ProChem, имеют стабильно более высокий порог оптического пробоя по сравнению с солью ОСЧ-16 (рис.5). Это связано с более высокой чистотой соли ProChem. По паспортным данным содержание, например, Fe в соли ProChem в три раза меньше, чем в соли ОСЧ-16. Так называемая мертвая зона Δt_d [35] в растворах соли ProChem также существенно меньше ($\Delta t_d \approx 0.3$ °С для ProChem и ~ 1 °С для ОСЧ-16).

5. Более тонкая фильтрация способствует повышению (в среднем) порога пробоя (рис.6). Однако резкого стабильного роста порога не наблюдается. Возможно, это связано с наличием бытовых загрязнений, которые за счет предварительной фильтрации раствора не устраняются.

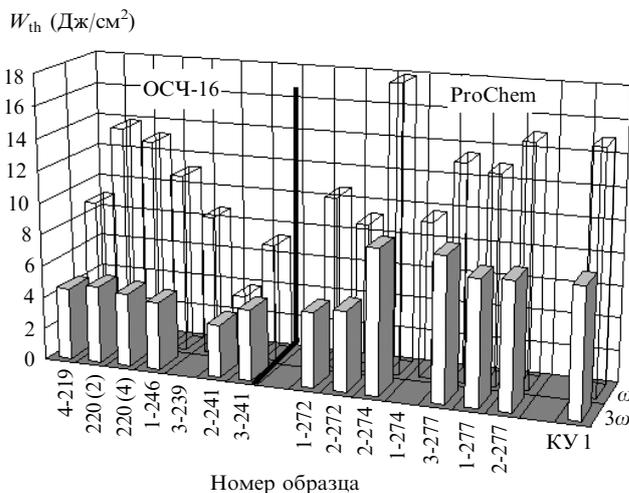


Рис.5. Влияние исходной соли (ОСЧ-16 и LLNL grade (ProChem)) на порог оптического пробоя W_{th} на первой (ω) и третьей (3ω) гармониках (жирная линия разделяет опыты с реактивами ОСЧ-16 и LLNL grade).

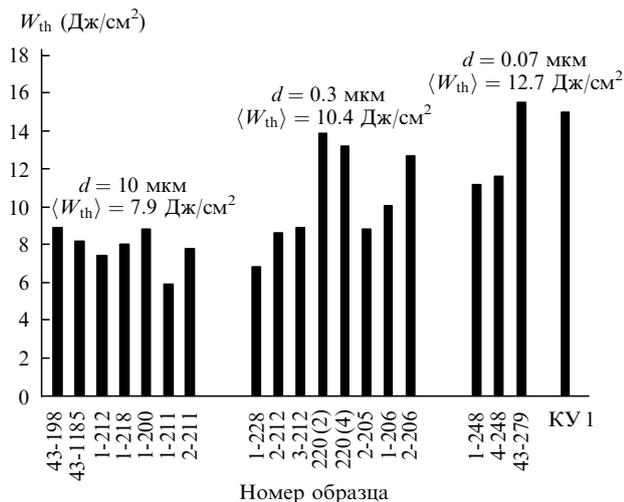


Рис.6. Зависимость порога W_{th} лазерного пробоя на первой гармонике от степени фильтрации раствора (фторопластовый с пористостью $d = 10$ мкм и «Владипор» с $d = 0.3$ и 0.07 мкм фильтры). Угловые скобки при W_{th} означают усреднение по серии опытов с данным фильтром.

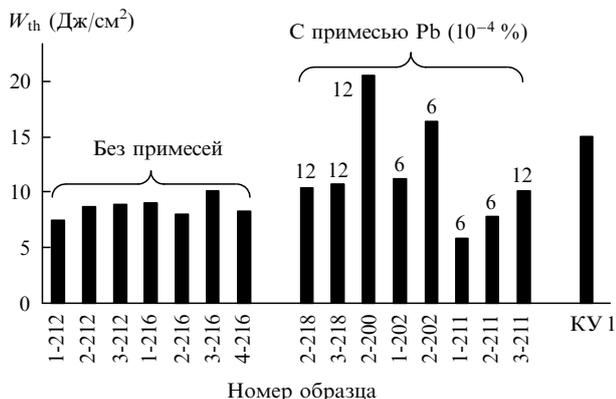


Рис.7. Пороги W_{th} оптического пробоя на первой гармонике для кристаллов, выращенных без примесей и с примесью Pb (над столбцами указана массовая концентрация примеси Pb в растворе в 10^{-4} %).

6. Введение примеси свинца с оптимальной массовой концентрацией $\sim 10^{-3}$ % может способствовать повышению порога пробоя (рис.7).

7. Термический отжиг кристаллов приводит к существенно (в 2.5 – 3 раза) повышению порога пробоя (рис.8, 9). Исключением являются кристаллы, содержащие Pb, при отжиге которых порог пробоя не повышается.

4. Заключение

Таким образом, использование исходных солей высокой чистоты, тонкой фильтрации растворов (в том числе фильтрации в процессе роста) в комбинации с послеростовым отжигом кристаллов позволяет повысить порог лазерного пробоя кристаллов KDP, выращиваемых по скоростной технологии с профилированием, до значений, соответствующих требованиям современных лазерных проектов.

- Zaitseva N., Atherton J., Rozsa R., Smolsky I., Carman L., Runkel M., Ryon R., James L. *J. Cryst. Growth*, **197**, 911 (1999).
- Bespalov V.I., Bredikhin V.I., Ershov V.P., Zilberberg V.V., Katsman

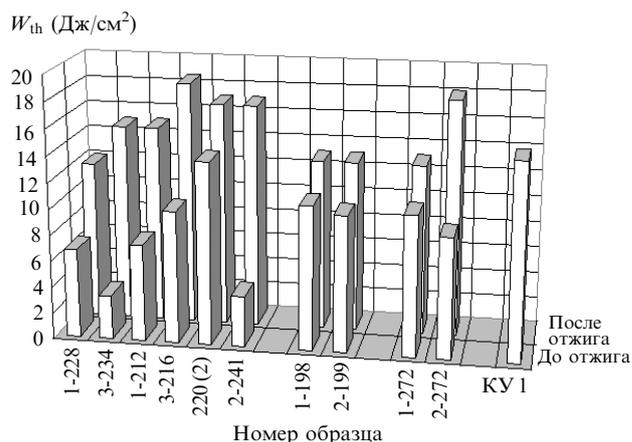


Рис.8. Влияние отжига на порог W_{th} лазерного пробоя на первой гармонике.

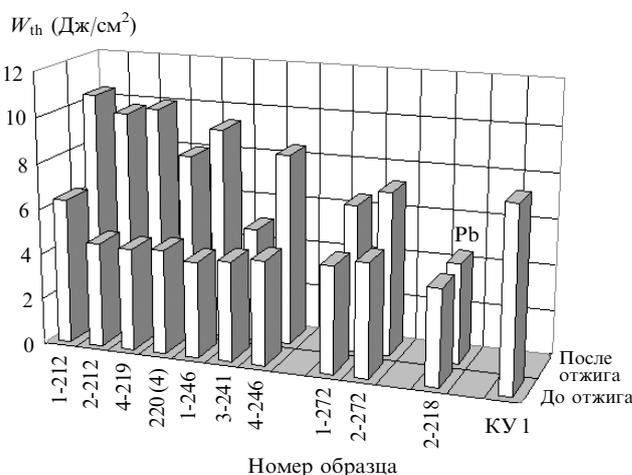


Рис.9. Влияние отжига кристаллов на порог W_{th} лазерного пробоя на третьей гармонике (кристалл 2-218 выращен с примесью Pb).

- V.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4424**, 124 (2001).
- Giordmaine J.A. *Phys. Rev. Lett.*, **8**, 19 (1962).
- Maker P.D., Terhune R.W., Nisenoff M., Savage C.M. *Phys. Rev. Lett.*, **8**, 21 (1962).
- Terhune R.W., Maker P.D., Savage C.M. *Appl. Phys. Lett.*, **2**, 54 (1963).
- Батырева И.А., Беспалов В.И., Киселев А.М., Миллер А.М. *Квантовая электроника*, **5**, 1838 (1978).
- Ананьин О.Б., Быковский Ю.А., Петровский А.Н., Рез И.С. *ЖТФ*, **42**, 837 (1972).
- Зверев Г.М., Левчук Е.А., Малдугис Э.К. *ЖЭТФ*, **57**, 730 (1969).
- Эндерт Х., Хаттенбах А., Меле В. *Квантовая электроника*, **4**, 2653 (1977).
- Cristmas T.M., Ley N.M. *Electron. Lett.*, **7**, 544 (1971).
- Melle W., Galler R. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **58**, 167 (1980).
- Wax S.I., Chodorow M., Puthov H.E. *Appl. Phys. Lett.*, **16**, 157 (1970).
- Newkirc H., Swain J., Stokowski S., Milam D., Klapper H. *J. Cryst. Growth*, **65**, 651 (1983).
- Генкин В.Н., Миллер А.М., Соустов Л.В. *ЖЭТФ*, **79**, 1880 (1980).
- Беляева Н.Н., Бредихин В.И. *Квантовая электроника*, **11**, 633 (1984).
- Миллер А.М., Соустов Л.В. *Квантовая электроника*, **16**, 61 (1989).
- Swain J., Stokowski S., Milam D., Rainer F. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 350 (1982).
- Cooper J.F., Singleton M.F. *Report LLNL, UCRL-95904* (1987) (<http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/204713.pdf>).
- Woods B., Runker M., Yan M., Staggs M., Zaitseva N., Kozlowski M., De Yoreo J. *Report LLNL, UCRL-JC-125368* (1996) (<http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/230901.pdf>).

20. Salo V.I., Kolybayeva M.I., Puzikov V.M., Pritula I.M., Vasil'chuk V.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3359**, 549 (1998).
21. Atherton L.J., Rainer F., De Yoreo J.J., Thomas I.M., Zaitseva N., De Marco F. *Report LLNL*, UCRL-JC-115121 (1994) (<http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/224368.pdf>).
22. Беспалов В.И., Бредихин В.И., Ершов В.П., Кацман В.И., Киселева Н.В., Кузнецов С.П. *Квантовая электроника*, **9**, 2343 (1982).
23. Андреев Н.Ф., Беспалов В.И., Бредихин В.И., Гаранин С.Г., Давыдов В.С., Долгополов Ю.В., Катин Е.В., Кузнецов С.П., Куликов С.М., Матвеев А.З., Рубаха В.И., Сухарев С.А. *Квантовая электроника*, **34**, 381 (2004).
24. Анненков В.И., Беспалов В.И., Бредихин В.И., Виноградский Л.М., Гайдаш В.А., Галахов И.В., Гаранин С.Г., Ершов В.П., Жидков Н.В., Зильберберг В.В., Зубков А.В., Калипанов С.В. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 993 (2005).
25. Беспалов В.И., Бредихин В.И., Ершов В.П., Кацман В.И., Лавров Л.А. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **51**, 1354 (1987).
26. Bespalov V.I., Bredikhin V.I., Ershov V.P., Katsman V.I., Lavrov L.A. *J. Cryst. Growth*, **82**, 776 (1987).
27. Андреев Н.Ф., Беспалов В.И., Бредихин В.И., Гаранин С.Г., Гинзбург В.Н., Дворкин К.Л., Катин Е.В., Корытин А.И., Ложкарев В.В., Палашов О.В., Рукавишников Н.Н., Сергеев А.М., Сухарев С.А., Фрейдман Г.И., Хазанов Е.А., Яковлев И.В. *Письма в ЖЭТФ*, **79**, 178 (2004).
28. Новиков М.А., Тертышник А.Д. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **19**, 364 (1976).
29. Бондаренко Н.Г., Еремينا И.В., Макаров А.И. *Квантовая электроника*, **5**, 841 (1978).
30. Craхton R.S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 1771 (1981).
31. Auston D.H. *Ultrashort Light Pulses*. Ed. by S.L.Shapiro (Berlin – Heidelberg – New-York: Springer-Verlag, 1977, p. 121 – 201).
32. Lowdermilk W.H., Milam D. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 1888 (1981).
33. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **59**, 72 (1995).
34. Маненков А.А. *Квантовая электроника*, **33**, 639 (2003).
35. Бредихин В.И., Ершов В.П., Королихин В.В., Лизякина В.Н. *Кристаллография*, **32**, 214 (1987).