

Краткое изложение содержания работы.

Разработана принципиально новая технология сверхширокополосного просветления оптики в среднем инфракрасном диапазоне на основе микроструктурирования поверхности путем фемтосекундной лазерной абляции.

Основная научно-техническая идея.

В основе научно-технической идеи лежит теория эффективной среды, на основе которой авторами доказана возможность создания микроуглублений на оптических поверхностях материалов среднего инфракрасного диапазона путем фемтосекундной лазерной абляции, что приводит к снижению показателя преломления вещества в приповерхностном слое и, как следствие радикальному снижению френелевских потерь на отражение.

Описание результатов и их значение для практики.

– создана комплексная математическая модель с помощью метода конечных элементов и определено оптимальное сочетание параметров обработки (длительность импульсов, частота повторения, параметры фокусировки, средняя оптическая мощность, форма лазерного пучка), геометрии получаемой микроструктуры (форма углубления, период, геометрия расположения, его глубина) и параметров сверхкоротких импульсов лазерной абляции;

– изготовлены образцы волноводов Cr:ZnS для высокомощного волноводного Cr:ZnS-лазера, лазерных нелинейных кристаллов LiGaSe, GaSe, LiGaS, лазерных активных кристаллов Cr:ZnSe и Cr:CdSe с рекордными значениями просветления в сверхшироком спектральном диапазоне.

Ниже приводятся основные результаты и полученные технические характеристики.

LiGaSe₂ является хорошим материалом для нелинейных параметрических генераторов в среднем инфракрасном диапазоне. Его показатель преломления $n=2,25$ в диапазоне длин волн 2–12 мкм приводит к

значительным потерям из-за френелевского отражения. Однако традиционный метод увеличения пропускания с просветляющими покрытиями (ARC) значительно снижает порог повреждения материала. Альтернативным подходом является изготовление просветляющих микроструктур. Для увеличения прозрачности поверхности авторским коллективом были изготовлены микроструктуры на поверхности кристалла LiGaSe_2 с помощью метода одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции. В среднем пропускание составило 97,2% в спектральном диапазоне 2–8 мкм и был достигнут максимальный коэффициент пропускания 98,6% при длине волны 4,1 мкм.

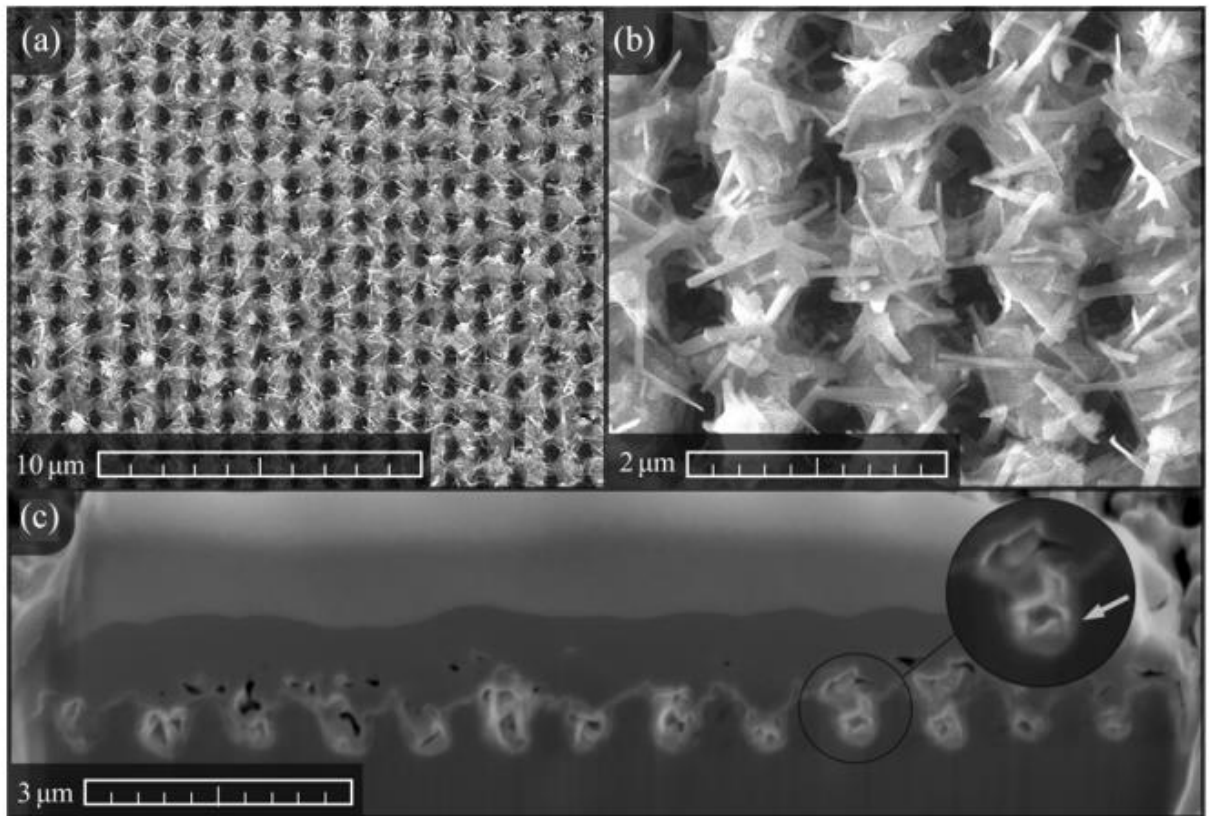


Рис. 1. СЭМ-изображение образца с микроструктурами (а) обзор сверху вниз; (б) увеличено; (в) профиль поперечного сечения

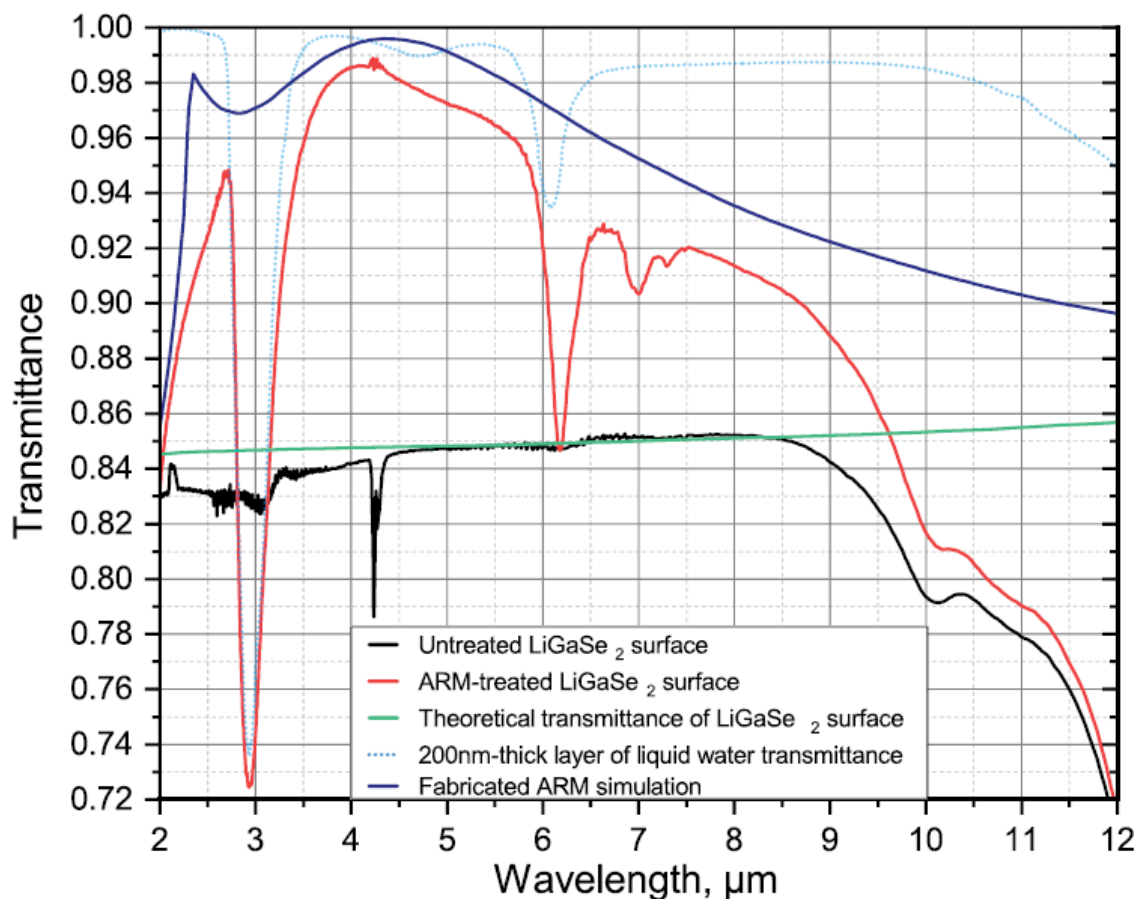


Рис. 2. Сравнение коэффициента пропускания одной поверхности: необработанный LiGaSe₂, LiGaSe с микроструктурами и моделирование

Авторский коллектив обосновал концепцию лазерной активной среды с оболочечным волноводом, изготовленным в объеме монокристаллического образца Cr:ZnS с просветляющими микроструктурами, изготовленными на его гранях исключительно методом фемтосекундной лазерной обработки. Это позволило добиться пропускания в широком диапазоне от 2 до 8 мкм, приближаясь к максимуму более 90 % вблизи 2,5 мкм, и генерации на длине волны 2275 нм при средней выходной мощности 20 мВт для поглощенной мощности накачки 500 мВт с дифференциальной эффективностью 5,5 %. Эта разработка открывает путь к промышленному производству компактных интегральных лазерных источников и датчиков на основе материалов II-VI группы.

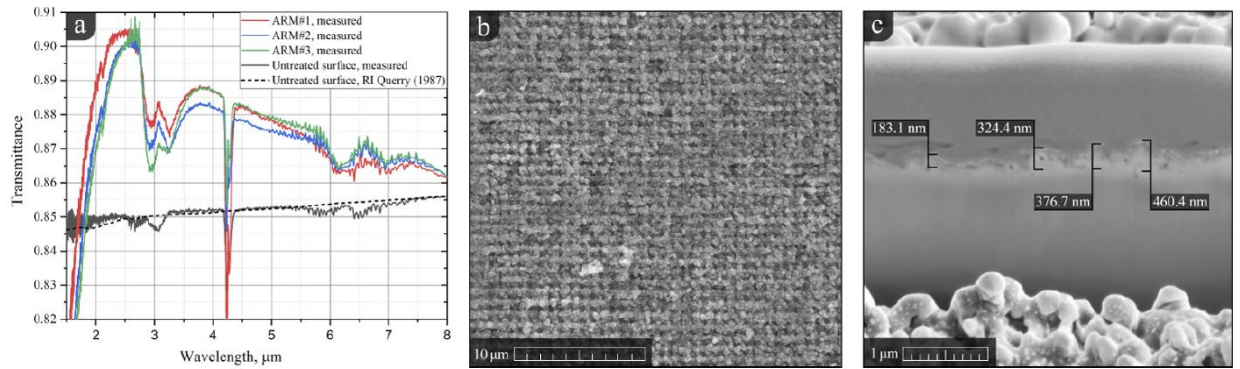


Рис. 3. Спектры пропускания образцов ARM (а) и СЭМ-изображения образца ARM#1: сверху вниз (б), профиль поперечного сечения (с)

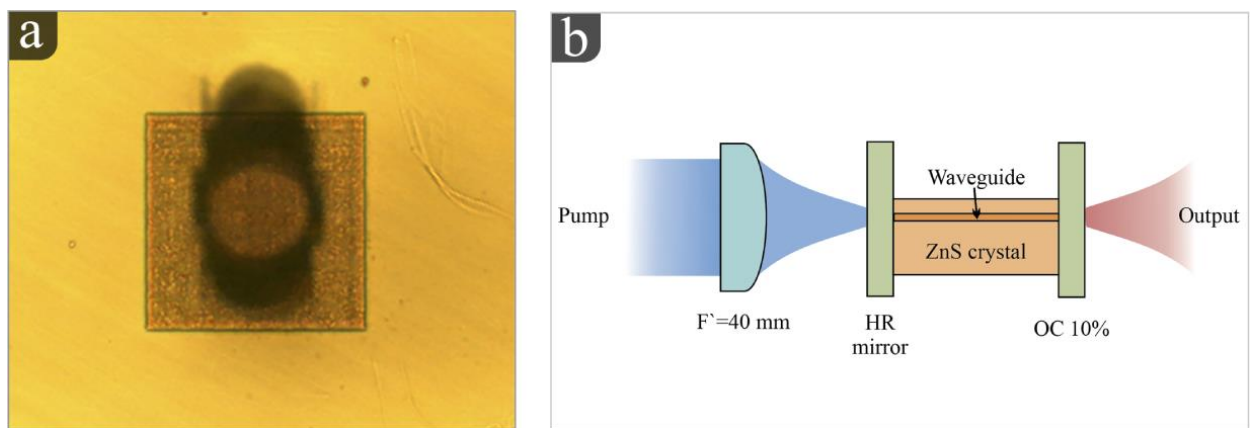


Рис. 4. Микроскопическое изображение поперечного сечения волновода с оболочкой в Cr:ZnS с нанесенными ARM, закрывающим его грань (а). Схема лазерного эксперимента (б)

Поликристаллические инфракрасные (PIR) волокна используются во многих приложениях, одним из которых является подача энергии для CO_2 -лазеров. Однако коэффициент пропускания поверхности торца волокна невозможно увеличить с помощью обычных просветляющих покрытий из-за неровностей поверхности. Просветляющие микроструктуры (ARM) предлагают альтернативный способ увеличения коэффициента пропускания. В данной работе авторами были изготовлены микроструктуры на поверхности торца волокна AgClBr методом одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции. Был достигнут коэффициент пропускания одной поверхности 92,8% на длине волны 10,6 мкм, рабочей длине волны CO_2 -лазера. Предложенный метод может помочь существенно повысить эффективность систем, где

требуется передача энергии для CO₂-лазеров или источников, работающих в широком диапазоне длин волн.

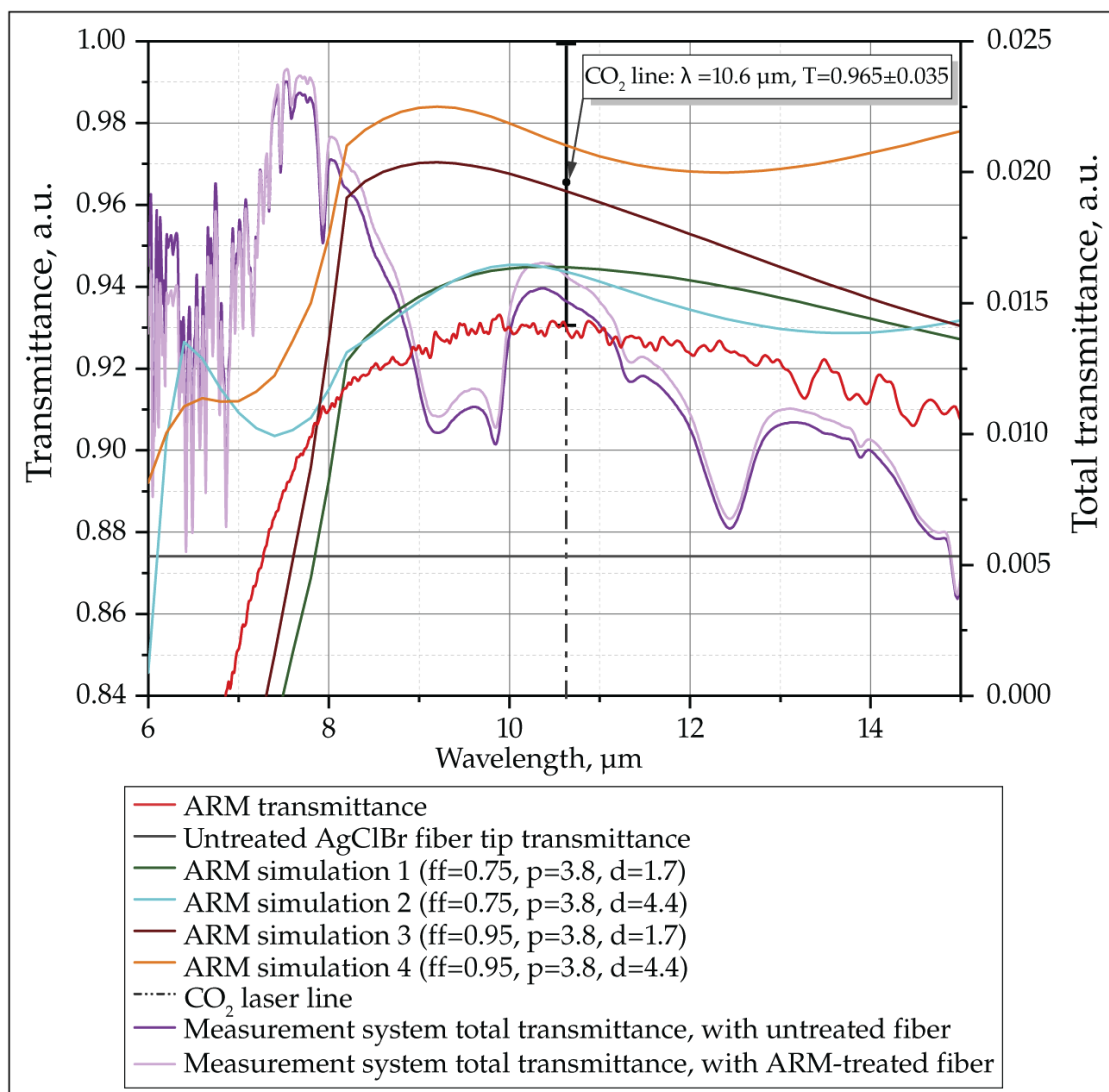


Рис. 5. Сравнение коэффициента пропускания на одной поверхности необработанного волокна AgClBr и волокна AgClBr с микроструктурами, а также нескольких моделей микроструктур

Основная область применения кристаллов GaSe — нелинейная оптика, но из-за слоистой структуры GaSe существуют проблемы с механической обработкой и просветлением покрытий. Авторами были изготовлены крупные кристаллы GaSe с преобладающей ϵ -модификацией, на которые с использованием различных гармоник фемтосекундного лазера методом лазерной абляции на поверхности пластины были изготовлены просветляющие микроструктуры (АРМ) и выбраны режимы, обеспечивающие увеличение пропускания до 90% в среднем ИК-диапазоне. С помощью РЭМ и

оптической микроскопии, а также EDX и оптической спектроскопии исследованы дефекты на поверхности GaSe и их влияние на спектральную область и степень увеличения пропускания.

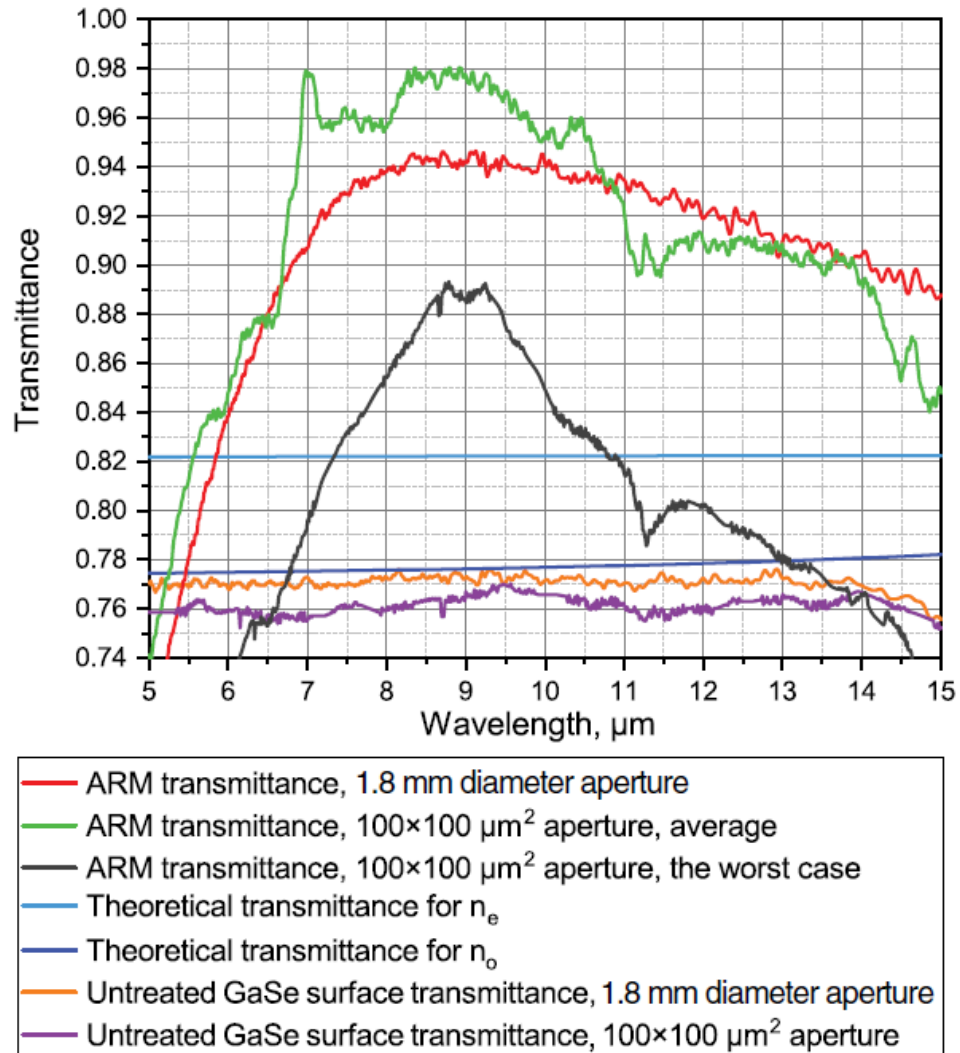


Рис. 6. Сравнение коэффициента пропускания одной поверхности необработанного GaSe и GaSe с микроструктурами

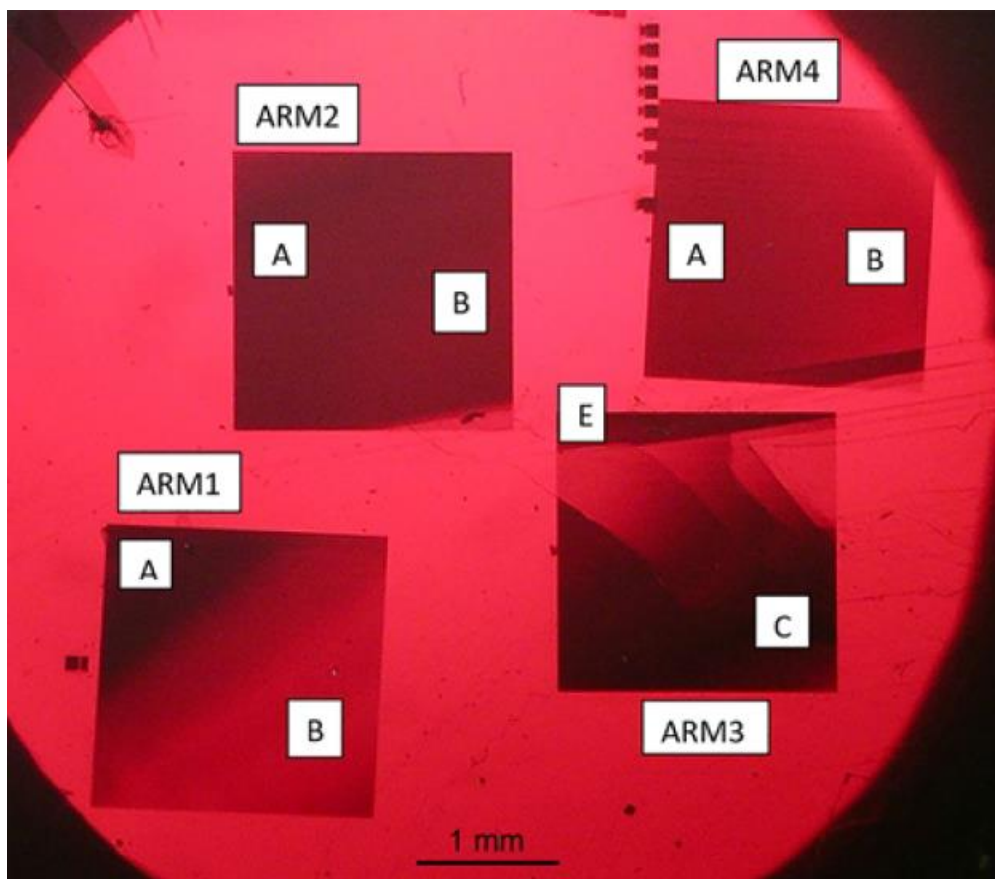


Рис. 7. Изображение GaSe с микроструктурами. Изображение получено в проходящем белом свете. Светлыми квадратами с буквами показаны характерные точки, в которых измерялись спектры пропускания в пятне размером $100 \times 100 \text{ мкм}^2$

Фемтосекундный Yb-лазер использовался для изготовления просветляющих микроструктур на монокристаллических образцах CdSSe. Авторы исследовали несколько методов изготовления микроструктур, включая прямую одноимпульсную абляцию с использованием импульсов 200 фс, абляцию с глубокой фокусировкой, абляцию при наличии дополнительной сферической аберрации и абляцию с блокированием периферических лучей. Проведен комплексный анализ реализованных методов изготовления просветляющих микроструктур. Характеристики просветляющих микроструктур были измерены с помощью инфракрасного анализатора спектра Фурье, и лучшие образцы продемонстрировали пропускание $>99\%$ в диапазоне 4,5–6 мкм и среднее пропускание около 97% в диапазоне от 2,7 до 8 мкм.

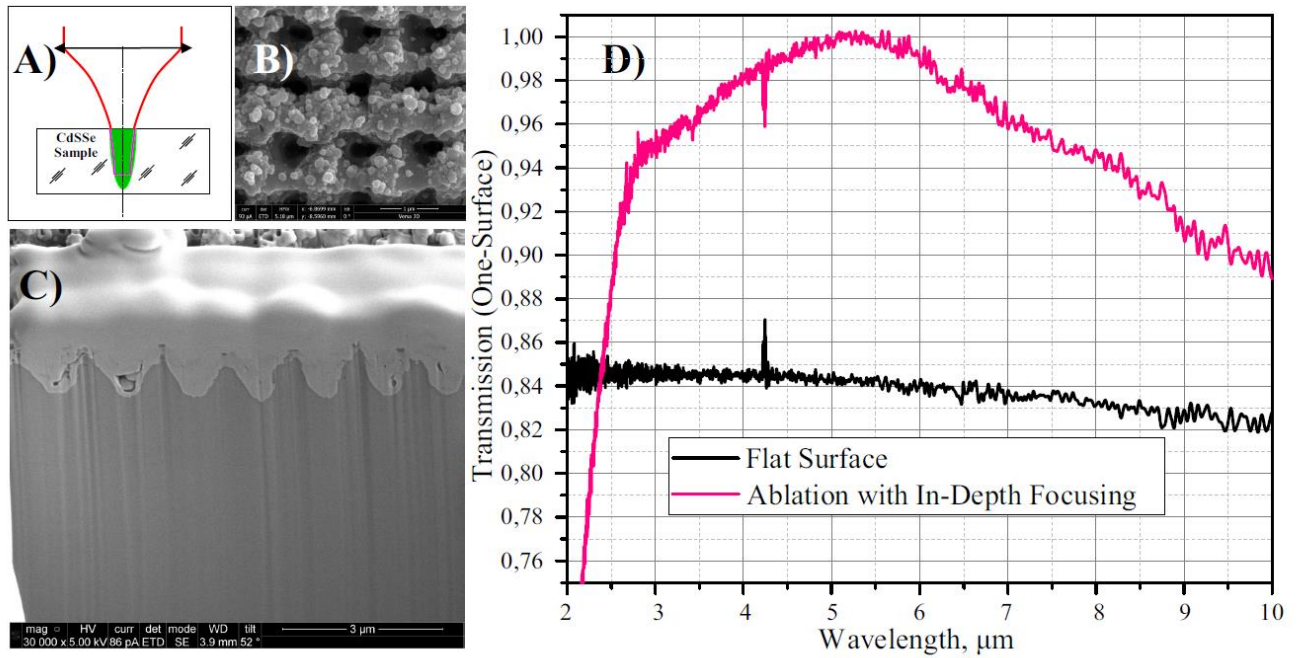


Рис. 8. Принцип метода прямой одноимпульсной абляции с прецизионной глубиной фокусировкой (а), вид сверху вниз на СЭМ (б) и поперечное сечение (в) образца с микроструктурами, и спектр пропускания образца (г) в сравнении с пропусканием необработанной поверхности CdSSe

Объемы внедрения.

На основе научно-технической идеи и разработанной авторами технологии проведено НИР на общую сумму 186,9 млн руб., в том числе по заказу промышленных предприятий в объеме 42 млн руб.

Достигнутый экономический и (или) социальный эффект от внедрения.

Результаты работы позволяют создавать высокоэффективные лазерные и оптико-электронные системы среднего инфракрасного диапазона, что открывает большой спектр гражданских применений, включая системы прецизионной хирургии и интраоперационной диагностики на базе инфракрасного излучения, а также средства доставки излучения. Также результаты работы нашли отражение в 3 учебно-методических пособиях, в научных работах двух аспирантов, 5 магистрантов, 8 бакалавров, а также в образовательных программах высшего образования.