

На правах рукописи

Вирко

ВИРКО Максим Викторович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИССОЦИАЦИИ НИТРИДА
ГАЛЛИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность 01.04.10 — «Физика полупроводников»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: **Шретер Юрий Георгиевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник отделения твердотельной
электроники, Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Физико-технический институт им.
А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Официальные оппоненты: **Кузнецов Владимир Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры «Физическая химия», ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Бондаренко Антон Сергеевич
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник кафедры «Электроника твердого
тела», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»

Ведущая организация: **Физический факультет. Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»**

Защита состоится «22» марта 2018 года в 14:00 на заседании диссертационного
совета Д 212.229.01 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус 4, аудитория 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте
<http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 201__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.01,
доктор технических наук, профессор



Коротков
Александр Станиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Перспективы применения нитрида галлия (GaN) для развития современной полупроводниковой промышленности трудно переоценить. Элементы силовой и СВЧ электроники на основе GaN уже сейчас превосходят аналогичные структуры на основе кремния (Si), арсениде галлия (GaAs) и карбиде кремния (SiC) по техническим и эксплуатационным параметрам [1, 2].

Выращивание структур на основе GaN, в основном, производят методом гетероэпитаксии на дешевых сапфировых (Al_2O_3) подложках. Однако, из-за большой плотности дислокаций в кристаллах GaN ($> 10^6 \text{ см}^{-2}$), планарной компоновки и плохого теплоотвода такие приборные структуры имеют рабочие характеристики ниже теоретически возможных для гомоэпитаксиальных структур GaN-on-GaN [3, 4]. Данные проблемы можно частично решить с помощью технологии Flip-Chip [5] с последующим удалением сапфировой подложки по методу лазерного отделения Laser Lift-Off [6]. В результате чего, удастся добиться улучшения рабочих характеристик приборной структуры за счет обеспечения лучшего теплоотвода через теплопроводящую подложку.

Вышеперечисленные ограничения можно решить, если выращивать пленки и GaN структуры непосредственно на подложках из GaN. При реализации такой процедуры плотность дислокаций в структурах снижается и появляется возможность производить вертикальные приборные GaN структуры. В результате, чего удастся достичь более высоких рабочих характеристик приборной структуры и уменьшить ее площадь [7].

На сегодняшний день известны примеры производства объемных кристаллов GaN с малым числом структурных дефектов [8]. Однако, из-за сложностей производства и малой распространенности технологии их стоимость высока. Одним из путей решения данных проблем является многократное использование дорогого объемного кристалла GaN в качестве исходной материнской подложки в методе клонирования GaN подложек [9]. Суть метода состоит в выращивании любой полупроводниковой структуры на материнской GaN подложке с последующим срезанием структуры методом скрытого лазерного слайсинга – Laser

Stealth Slicing (LSS) [10]. Затем отделенная структура переносится на дешевую, хорошо проводящую тепло подложку, а слегка утонченная подложка полируется и на ней наращивается новая структура. Циклическое «наращивание–отделение–наращивание» на объемном кристалле GaN эпитаксиальной приборной структуры и составляет суть метода клонирования. Такой подход значительно удешевит производство полупроводниковых приборов на основе GaN.

Ключевым моментом технологии клонирования является лазерное отделение полупроводниковых структур от ростовой подложки. Поэтому перед нами стояла задача экспериментального исследования нескольких методов лазерного отделения приборных слоев, которые были предложены в работах [9, 10, A1–A3].

Цель работы

Исследование физических процессов, происходящих при отделении тонких слоев GaN от ростовой подложки применительно к задаче разработки технологии клонирования подложек GaN.

Задачи

1. Разработать лазерную установку на основе инфракрасного лазера для отделения пленок и структур на основе GaN от ростовой подложки и отработать методику контроля и поддержания параметров лазерного облучения.

2. Экспериментально проверить идею использования различия коэффициентов поглощения инфракрасного излучения в слоях GaN с разной концентрацией свободных носителей заряда для отделения пленок и структур на основе GaN от подложки GaN.

3. Исследовать возможность нагрева сапфировой подложки для отделения от нее пленок и структур на основе GaN, используя факт сильного поглощения инфракрасного излучения по сравнению с GaN с малой концентрацией свободных носителей заряда.

4. Экспериментально проверить возможность отделения тонкого слоя GaN от ростовой подложки с помощью фемтосекундного лазера и сделать выводы о дальнейшем развитии работы.

5. Продемонстрировать отделение работоспособной вертикальной структуры диода Шоттки и светодиодной структуры от ростовой подложки.

Научная и практическая новизна

1. Сконструирована лазерная установка на основе инфракрасного CO₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс для отделения структур на основе GaN от ростовой подложки.

2. Экспериментально проверена модель поглощения лазерного излучения инфракрасного диапазона свободными носителями заряда в эпитаксиальных пленках GaN и фононами в сапфировых подложках.

3. Проведено одномерное численное моделирование динамики нагрева структур n -GaN/Al₂O₃ и n -GaN/ n^+ -GaN/Al₂O₃ лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс при облучении сквозь слабо поглощающую пленку n -GaN.

4. Определены условия, необходимые для успешного отделения пленки GaN от ростовой подложки GaN и сапфировой подложки, при фокусировке лазерного излучения сквозь пленку GaN.

5. На сконструированной лазерной установке выполнено облучение пленок GaN и структур на его основе и выполнено их последующее отделение от ростовой подложки GaN и от сапфировой подложки.

6. Предложен и экспериментально проверен метод отделения, основанный на эффекте нелинейного многофотонного поглощения лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1.03$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 350$ фс в эпитаксиальных пленках GaN.

7. На установке на основе инфракрасного титан-сапфирового лазера с длиной волны $\lambda = 1.03$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 350$ фс выполнено облучение участка светодиодной пленки на основе GaN лазерным излучением, сфокусированным сквозь светодиодную пленку на заданной глубине. Выполнено отделение облученного участка пленки от объемного кристалла GaN.

8. Для демонстрации работоспособности методик отделения полученные свободные пленки и структуры на основе GaN были использованы для создания работоспособных образцов вертикальных полупроводниковых приборов.

Объекты и методы исследования

1. При исследовании взаимодействия лазерного излучения с GaN полупроводниковые структуры были представлены MOCVD структурами n -GaN/Al₂O₃ с толщиной пленки n -GaN от 5 до 10 мкм и HVPE структурами n -GaN/ n^+ -GaN/Al₂O₃ с толщиной пленок n -GaN и n^+ -GaN от 15 до 30 мкм. Толщина подложки сапфира была равна 300 мкм. Диаметр образцов — 2 дюйма (50.8 мм).

2. При отработке методики контроля и поддержания параметров лазерного облучения учитывались длина волны и энергия лазерного излучения, диаметр лазерного пятна и шаг облучения, структурные особенности пленок нитрида галлия.

3. Свободные пленки n -GaN размером от 0.5 x 0.5 мм² до 2 x 2 мм², отделенные импульсным инфракрасным CO₂-лазером с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм.

4. Реализация тестового образца вертикальной структуры диода Шоттки, получена на основе свободных пленок n -GaN размером 1 x 1 мм², отделенных импульсным инфракрасным CO₂-лазером с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс.

5. Реализация вертикальных светодиодных структур, получена на основе пленок n -GaN размером 0.5 x 0.5 мм², отделенных импульсным инфракрасным титан-сапфировым лазером с длиной волны $\lambda = 1.03$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 350$ фс.

6. Информация о характеристиках полупроводниковых структур и приборов получена как в результате численных расчетов, так и экспериментов. Экспериментальные исследования были выполнены с помощью оптического микроскопа, установки для рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, катодolumинесценции и рамановской спектроскопии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Отделение тонких пленок нитрида галлия от объемных кристаллов нитрида галлия возможно за счет эффекта поглощения ИК излучения на свободных носителях заряда в слоях нитрида галлия при различии концентрации свободных электронов в подложке и отделяемой пленке.

2. Отделение слабо легированных слоев нитрида галлия и структур на его основе возможно за счет поглощения ИК излучения фононами в сапфировой подложке.

3. Пороговая плотность мощности излучения импульсного CO₂-лазера, необходимая для отделения пленок и структур на основе GaN от подложек GaN, примерно в 2 раза меньше, чем плотность мощности, необходимая для отделения пленок и структур на основе GaN от сапфировых подложек.

4. Экспериментально показано, что эффект нелинейного многофотонного поглощения может быть использован для отделения слоев GaN заданной толщины, путем фокусировки излучение фемтосекундного лазера в заданной точке объема прозрачного кристалла GaN.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов определяется использованием современных экспериментальных методик и методов расчета, воспроизводимостью результатов, согласием полученных результатов с существующими литературными данными в случаях, когда такое сопоставление возможно.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях и семинарах:

- 1st International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Россия, Санкт-Петербург, 2014);
- XII Российская Конференция по Физике Полупроводников (Россия, Звенигород, 2015);
- Международный форум «Микроэлектроника 2016» (Россия, Респ. Крым, Алушта, 2016);

- Результаты обсуждались на семинаре в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (Россия, Санкт-Петербург, 2017).

Публикации автора

По материалам диссертации опубликовано 5 работ, из них 2 тезиса доклада и 3 статьи, входящие в "Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук". Список опубликованных статей приводится в конце автореферата.

Личный вклад автора

Основные результаты, полученные в работе, получены непосредственно автором. Автор участвовал в создании, настройке и испытаниях лазерной установки по отделению тонких пленок и полупроводниковых GaN структур. Выбор общего направления исследования, постановка рассматриваемых задач, обсуждение и обработка полученных результатов осуществлялись автором совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 197 страниц, включая 70 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 225 библиотечных названий и 3 публикации автора. Нумерация литературы сквозная. Нумерация рисунков многоуровневая (включает номер главы). Нумерация формул многоуровневая (включает номер пункта).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к диссертационной работе сформулированы актуальность выбранной темы, поставлена цель диссертационной работы, оговорены задачи, решаемые в работе, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов, перечислены объекты исследований, приведены положения, выносимые на защиту, отмечен вклад автора, а также кратко изложено содержание работы.

В **первой главе** проанализированы имеющиеся данные об основных подложках для эпитаксиального выращивания пленок нитрида галлия (GaN) и полупроводниковых структур на его основе, таких как сапфир (Al_2O_3), карбид кремния (SiC), кремний (Si), арсенид галлия (GaAs) и нитрида галлия (GaN). Рассмотрены и проанализированы достоинства и недостатки гетеро- и гомоэпитаксии GaN. Кратко сформулированы основные этапы получения кристаллов нитрида галлия с использованием технологии их отделения от ростовой подложки. Сформулирована задача, заключающаяся в возможности производить контролируемое отделение кристаллов GaN от любой ростовой подложки [9, 10, A1].

Во **второй главе** проведен анализ основных методов отделения пленок и полупроводниковых GaN структур от ростовых подложек, в основе которых лежит использование ионной имплантации, лазерного излучения, химического воздействия и промежуточных слоев пленок. Приведены их основные достоинства и недостатки, а также трудности, возникающие при их использовании.

В **третьей главе** изучены вопросы, связанные с взаимодействием инфракрасного лазерного излучения с пленками нитрида галлия и подложками сапфира. Так, рассмотрено влияние концентрации свободных носителей заряда на коэффициент поглощения энергии лазерного излучения при облучении пленок и полупроводниковых структур на основе GaN (рис. 1). Показано, что наибольший градиент коэффициента поглощения наблюдается для пленок GaN *n*-типа с $n = 10^{14} - 10^{17}$, 10^{18} и 10^{19} см^{-3} в диапазоне длин волн от 5 до 12 мкм. Также показано, что коэффициент поглощения света на фононах в сапфировых подложках (700 см^{-1}) превосходит коэффициент поглощения для GaN *n*-типа с $n = 10^{14} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

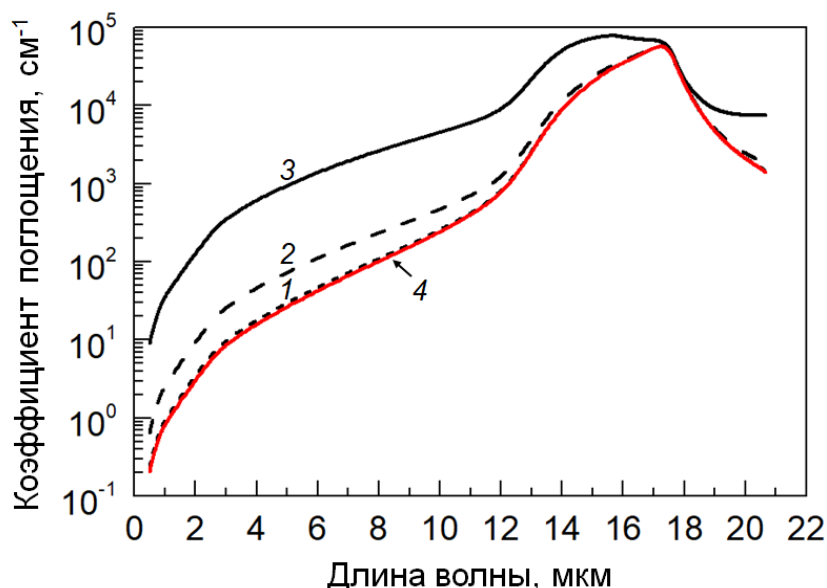


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента поглощения для n -GaN с концентрацией электронов, см^{-3} : 1 – 10^{14} – 10^{17} ; 2 – 10^{18} ; 3 – 10^{19} – и коэффициент поглощения для n -GaN на фонах (4).

На основе полученных результатов проведено одномерное численное моделирование динамики нагрева однослойной структуры n -GaN/ Al_2O_3 и двухслойной структуры n -GaN/ n^+ -GaN/ Al_2O_3 излучением с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс при облучении сквозь слабо поглощающую пленку n -GaN. Показано, что распределение температуры вдоль лазерного луча в поглощающем слое имеет асимметричный максимум (рис. 2 и рис. 3). Положение данного максимума определяется характеристическими длинами – глубиной проникновения излучения и длиной термодиффузии. Температура в слабо поглощающем слое n -GaN, нагреваемом за счет теплопроводности, снижается по мере удаления от границы с поглощающим слоем. Характеристической длиной распределения температуры в слое n -GaN является длина термодиффузии в GaN, которая увеличивается пропорционально корню квадратному от длительности лазерного импульса.

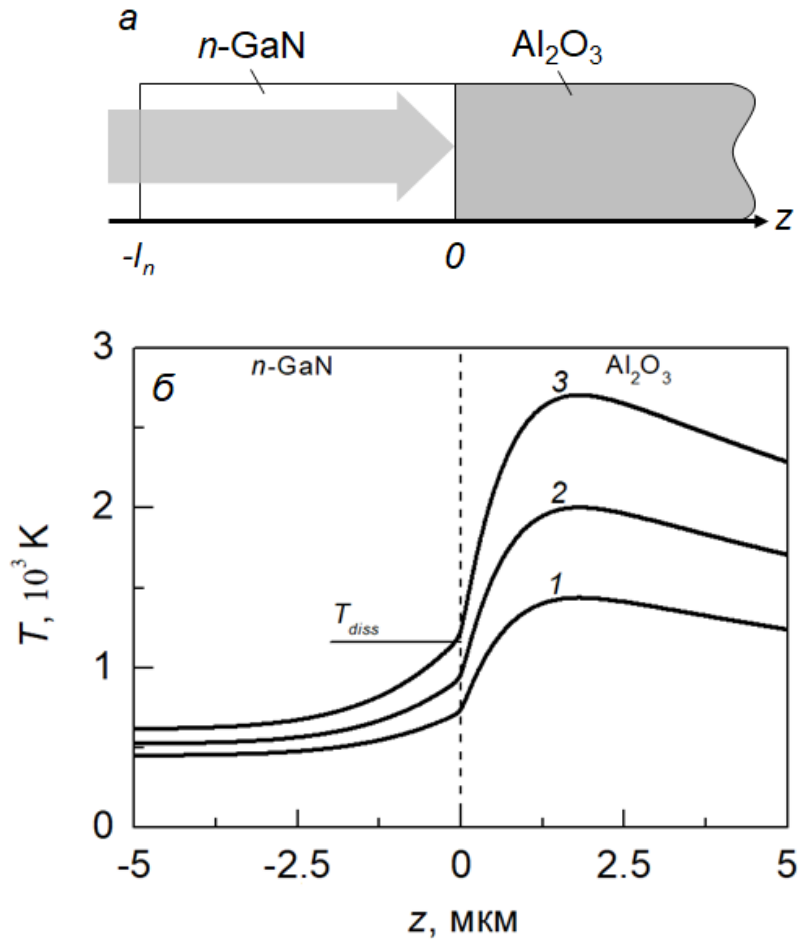


Рис. 2. Схема нагрева (а) и температурные профили (б), полученные при численном моделировании распределения температуры, для однослойной структуры $n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ при различной плотности мощности лазерного излучения в единичном импульсе W , $\text{МВт}/\text{см}^2$: 1 – 100; 2 – 150; 3 – 212. а – горизонтальной стрелкой показано направление распространения лазерного излучения. б – длительность лазерного импульса $t_p = 60$ нс, диаметр лазерного пятна $d = 20$ мкм, окружающая температура $T(z, 0) = 300$ К, толщина $n\text{-GaN}$ $l_n = 5$ мкм; горизонтальной линией показана толщина пленки $n\text{-GaN}$, прогреваемой до $T \geq T_{diss}$; граница $n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ показана вертикальной штриховой линией.

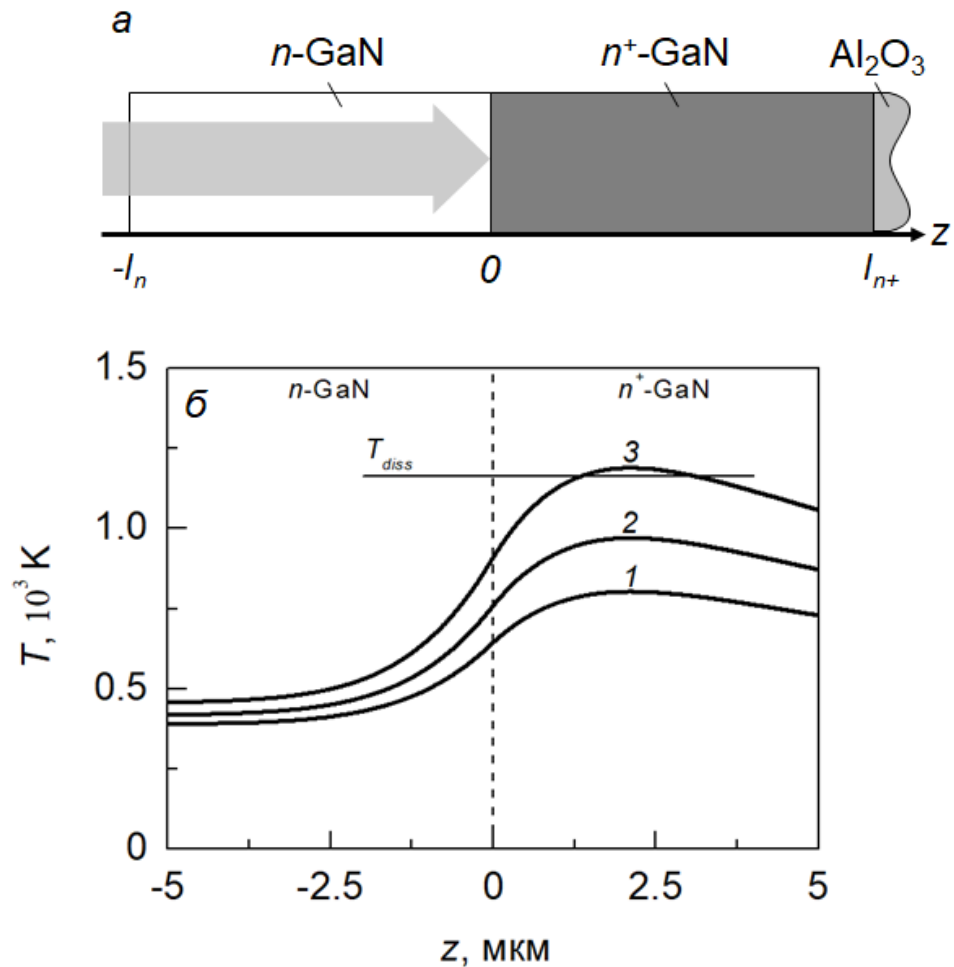


Рис. 3. Схема нагрева (а) и температурные профили (б), полученные при численном моделировании распределения температуры, для двухслойной структуры $n\text{-GaN}/n^+\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ при различной плотности мощности лазерного излучения в единичном импульсе W , $\text{МВт}/\text{см}^2$: 1 – 60; 2 – 80; 3 – 106. а – горизонтальной стрелкой показано направление распространения лазерного излучения. б – длительность лазерного импульса $t_p = 60$ нс, диаметр лазерного пятна $d = 20$ мкм, окружающая температура $T(z, 0) = 300$ К, толщина $n\text{-GaN}$ и $n^+\text{-GaN}$ $l_n = l_{n^+} = 15$ мкм; горизонтальной линией показана толщина пленки $n\text{-GaN}$, прогреваемой до $T \geq T_{diss}$; граница $n\text{-GaN}/n^+\text{-GaN}$ показана вертикальной штриховой линией.

Получены значения пороговой плотности мощности лазерного излучения, необходимые для нагрева $n\text{-GaN}$ излучением с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс до температуры диссоциации $T_{diss} = 1162.5$ К [11]. Так, в случае однослойной структуры $n\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ пороговая плотность мощности равна $212 \text{ МВт}/\text{см}^2$, а в случае двухслойной структуры $n\text{-GaN}/n^+\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ – $106 \text{ МВт}/\text{см}^2$.

Помимо этого, проанализировано влияние на процесс локальной термической диссоциации GaN в структурах $n\text{-GaN/Al}_2\text{O}_3$ и $n\text{-GaN}/n^+\text{-GaN/Al}_2\text{O}_3$ длительности лазерного ИК излучения и диаметра лазерного пятна с целью минимизировать температурный перегрев и образование точечных и структурных дефектов при лазерном отделении пленок GaN. Показано, что при укорачивании лазерного импульса до сотен фемтосекунд в пленках GaN микронной толщины можно уменьшить глубину диссоциировавшего слоя GaN при отсутствии температурного перегрева в толще пленки и ее приповерхностном слое. Также показано, что уменьшение диаметра лазерного пятна приведет к уменьшению плотности мощности лазерного излучения, что снизит вероятность повреждения отделяемой пленки $n\text{-GaN}$ при лазерном облучении. Установлены зависимости положения температурного максимума, температуры на интерфейсе пленка/подложка и толщины слоя GaN нагретого до температуры диссоциации, от толщины пленки GaN.

В **четвертой главе** приведено описание основных этапов, связанных с конструированием лазерной установки на основе CO_2 -лазера с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс для отделения тонких пленок и полупроводниковых GaN структур. Так, на основе исследований, проделанных в **третьей главе**, сформулированы основные требования к лазерной установке: длина волны лазерного излучения, оптическая система, система крепления и перемещения облучаемого образца. Произведен подбор и представлено описание основных компонентов лазерной установки на основе наносекундного инфракрасного лазера. Произведена подготовка и отладка программного обеспечения, управляющего всеми узлами установки (рис. 4).

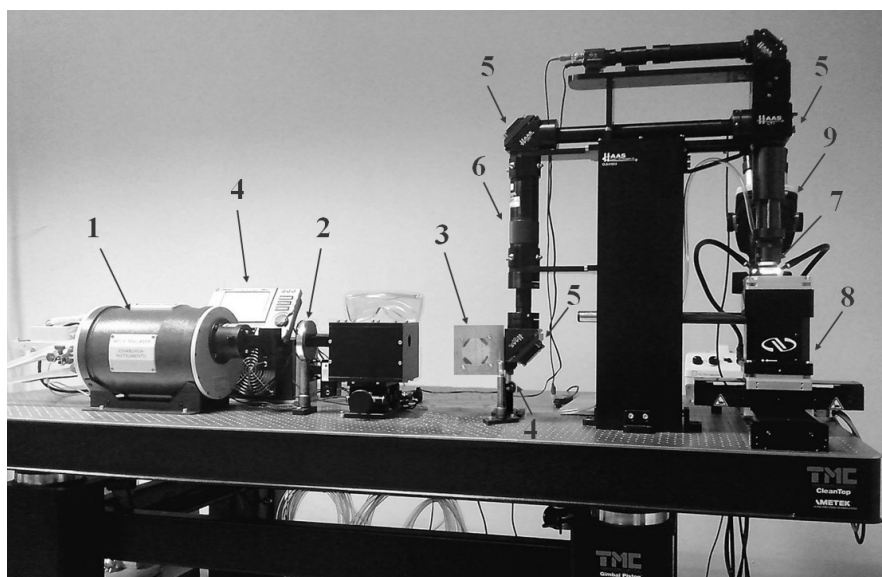


Рис. 4. Лазерная установка по отделению пленок и полупроводниковых GaN структур: 1 – наносекундный импульсный CO₂-лазер, 2 – моторизированный аттенюатор, 3 – делитель лазерного излучения, 4 – анализатор энергии лазерного излучения, 5 – ZnSe зеркала, для перенаправления лазерного излучения под углом 90°, 6 – расширитель лазерного пучка, 7 – фокусирующая линза, 8 – трехкоординатный столик с вакуумным креплением образца, 9 – микроскоп Номарского, совмещенный с цифровым окуляром (позади трехкоординатного столика).

В пятой главе на сконструированной лазерной установке экспериментально определяются диапазоны вариации параметров лазерного излучения и полупроводниковых GaN структур при помощи которых осуществляется их отделение при облучении сквозь пленку или полупроводниковую структуру. Влияние плотности мощности инфракрасного лазерного излучения и структурных особенностей пленок нитрида галлия на процесс их лазерного облучения выполнены экспериментально.

Показано, что для уменьшения вероятности разрушения отделяемой пленки GaN необходимо перед процессом лазерного сканирования производить предварительное разрезание пленки на отдельные области. Каналы, созданные в процессе разрезания пленки, применяются для стравливания газообразного N₂, находящегося в полости под поверхностью пленки, который может привести к ее разрушению. Также показано влияние различных структурных дефектов образца на процесс лазерного облучения.

На основе полученных экспериментальных результатов на лазерной установке на основе инфракрасного CO₂-лазера производится подповерхностное облучение GaN пленок и полупроводниковых GaN структур размером от 0.5 x 0.5 мм² до 2 x 2 мм² (рис. 5).

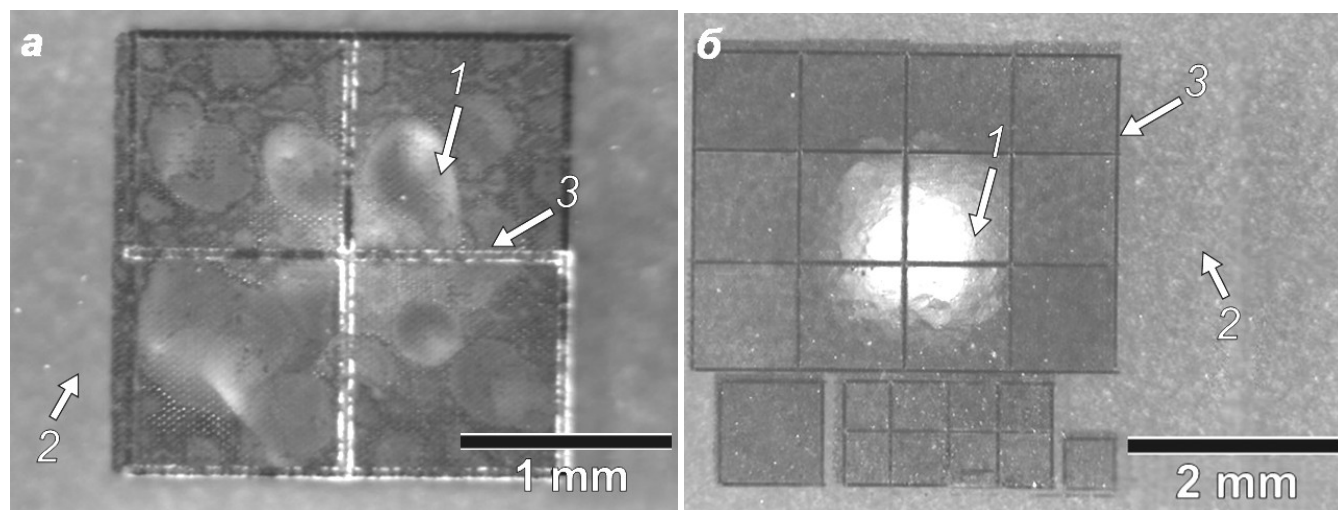


Рис. 5. Оптическая микрофотография на просвет областей MOCVD образца n -GaN/Al₂O₃ (а) и HVPE образца n -GaN/ n^+ -GaN/Al₂O₃ (б), облученных со стороны GaN наносекундным импульсным CO₂-лазером: 1 – облученная область; 2 – не облученная область; 3 – канал для выхода N₂. (а) – толщина пленки n -GaN равна 6 мкм, плотность мощности в импульсе: при сканировании $W = 294$ МВт/см²; при создании каналов $W_c = 640$ МВт/см². (б) – толщина пленки n -GaN и n^+ -GaN равна 15 и 15 мкм, плотность мощности в импульсе: при сканировании $W = 205$ МВт/см²; при создании каналов $W_c = 700$ МВт/см².

Проводится исследование участков GaN пленок и полупроводниковых GaN структур до и после облучения. Показано, что облучение наносекундным CO₂-лазером с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс не приводит к увеличению плотности дислокаций и существенному уширению ширины на половине высоты кривой качания, снятой по углу образца для плоскости (0002). Так, исследование пленок n -GaN в случае MOCVD структуры n -GaN/Al₂O₃ и в случае HVPE структуры n -GaN/ n^+ -GaN/Al₂O₃ с помощью катодolumинесценции и высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии показало, что среднее значение плотности дислокаций до и после

облучения не меняется, а значение ширины на половине высоты кривой качания увеличивается на $\sim 9\%$ с $280''$ до $307''$ и с $245''$ до $271''$ соответственно.

В **шестой главе** анализируются результаты отделения от ростовой подложки облученных инфракрасным лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм участков пленок и полупроводниковых GaN структур (рис. 6). Выполнены исследования отделенных участков пленок нитрида галлия и подложек после этапа отделения. Показано, что при облучении инфракрасным наносекундным CO₂-лазером ($\lambda = 10.6$ мкм) MOCVD структур n -GaN/Al₂O₃ и HVPE структур n -GaN/ n^+ -GaN/Al₂O₃ отделение происходит по границе областей с разным коэффициентом поглощения лазерного излучения. Так, отделение происходило по границе n -GaN/Al₂O₃ и n -GaN/ n^+ -GaN соответственно. В результате чего, были отделены участки пленок размером от 0.5×0.5 мм² до 2×2 мм² со значением шероховатости по границе отделения равным $0.45 - 0.21$ мкм и ~ 2 мкм для MOCVD структур n -GaN/Al₂O₃ и HVPE структур n -GaN/ n^+ -GaN/Al₂O₃ соответственно [A2, A3].

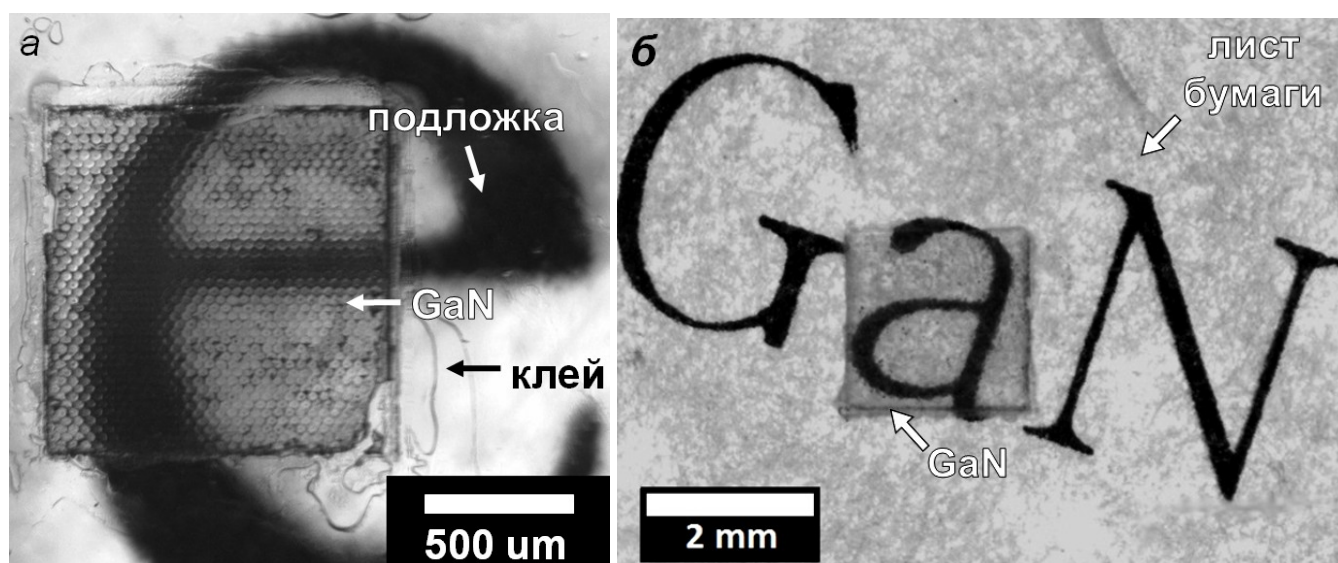


Рис. 6. (а) - оптическая микрофотография Ga-полярной стороны пленки n -GaN толщиной 6 мкм отделенной от сапфировой подложки на технологической подложке из стекла на фоне части распечатанного текста. (б) – оптическая микрофотография Ga-полярной стороны свободной пленки n -GaN толщиной 15 мкм отделенной от подложки n^+ -GaN на фоне части распечатанного текста.

На основе отделенных наносекундным инфракрасным CO₂-лазером пленок нитрида галлия изготовлен тестовый образец вертикального диода Шоттки с площадью контакта $S = 9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. Измерение прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик вертикального диода Шоттки показало, что обратное напряжение равно 150 В, обратный ток – 0.8 мкА; прямое напряжение – 2 В, плотность прямого тока – 100 А/см².

В **седьмой** главе рассмотрены вопросы, связанные с взаимодействием инфракрасного лазерного излучения большой плотности мощности с пленками нитрида галлия (рис. 1) в их области прозрачности. Показано, что пленки GaN с $n = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ очень слабо поглощают лазерное излучение малой мощности с длиной волны $\lambda = 1.03 \text{ мкм}$. Однако, экспериментально показано, что использование лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1.03 \text{ мкм}$ и длительностью лазерного импульса $t_p = 350 \text{ фс}$ приводит к диссоциации GaN за счет эффекта нелинейного многофотонного поглощения.

Приведено описание фемтосекундной лазерной установки наших коллег из Японии на основе инфракрасного титан-сапфирового лазера с длиной волны $\lambda = 1.03 \text{ мкм}$ и длительностью лазерного импульса $t_p = 350 \text{ фс}$, на которой по нашей просьбе были выполнены эксперименты по лазерному облучению полупроводниковых GaN структур. Приводятся результаты взаимодействия лазерного луча фемтосекундного титан-сапфирового лазера и светодиодной GaN структуры.

Показано, что облучение светодиодной структуры $p\text{-GaN}/\text{InGaN}/n\text{-GaN}/n^+\text{-GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ фемтосекундным импульсным титан-сапфировым лазером со стороны $p\text{-GaN}$ не приводит к увеличению плотности дислокаций и существенному уширению ширины на половине высоты. Так, исследование с помощью катодolumинесценции и высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии показало, что среднее значение плотности дислокаций до и после облучения не меняется, а значение ширины на половине высоты кривой качания, снятой по углу образца для плоскости (0002), увеличивается на 6 % с 290'' до 310'' соответственно.

Фемтосекундным титан-сапфировым лазером с длиной волны $\lambda = 1.03$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 350$ фс выполнено облучение вертикальной светодиодной структуры на основе GaN с ее последующим отделением от ростовой подложки GaN и переносом на медную подложку. Продемонстрирована работоспособность тестового образца вертикального светодиода размером 0.5×0.5 мм² (рис. 7).

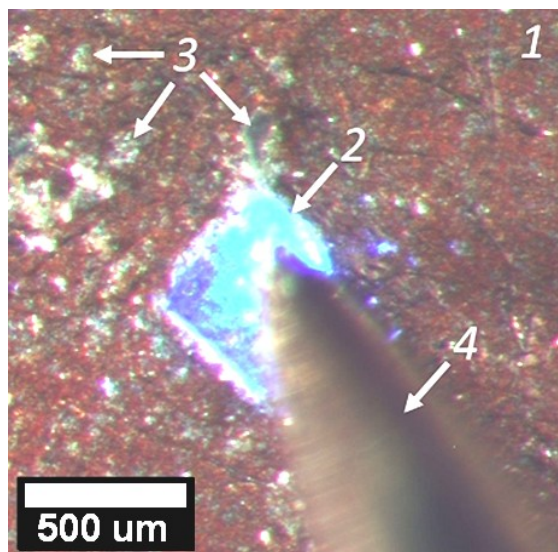


Рис. 7. Оптическая микрофотография светящегося вертикального светодиодного чипа, отделенного с помощью фемтосекундного лазера: 1 – медная подложка, 2 – светодиодный чип, 3 – токопроводящий клей, 4 – зонд, касающийся *p*-GaN. Зонд, приложенный к медной подложке, на рисунке не виден. Напряжение ~ 5 В, тока ~ 30 мА, $\lambda_{max} = 463$ нм.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Сконструирована лазерная установка на основе импульсного CO₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс.
2. Определены параметры лазерной обработки, необходимые для успешного отделения пленки GaN от ростовых подложек, при помощи импульсного CO₂-лазера.
3. Предложен и экспериментально проверен метод отделения, основанный на эффекте поглощения излучения импульсного CO₂-лазера свободными носителями заряда в эпитаксиальных пленках GaN и поглощения на фононах в сапфировых подложках.

4. Предложен и экспериментально проверен метод отделения, основанный на эффекте нелинейного многофотонного поглощения излучения импульсного титан-сапфирового лазера с большой плотностью мощности в эпитаксиальных пленках GaN.

5. На лазерной установке на основе импульсного CO₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 60$ нс выполнено облучение пленок на основе GaN и их последующее отделение от ростовой подложки GaN и сапфировой подложки.

6. На лазерной установке на основе импульсного титан-сапфирового лазера с длиной волны $\lambda = 1.03$ мкм и длительностью лазерного импульса $t_p = 350$ фс выполнено облучение светодиодных пленок на основе GaN и их последующее отделение от объемного кристалла GaN.

7. Продемонстрирована возможность создания вертикальных полупроводниковых приборов на основе отделенных пленок и структур на основе GaN.

Методика отделения тонких пленок GaN, основанная на поглощении подложкой ИК излучения, предложена впервые [9, 10, А1–А3]. Данная методика может быть использована для отделения пленок *n*-GaN, приборных структур светодиодов, лазерных диодов, СВЧ-транзисторов, диодов Шоттки и других слабо и умеренно легированных структур *n*-GaN ($n \leq 10^{17} - 10^{18}$ см⁻³), выращиваемых на сильно легированных подложках *n*⁺-GaN ($n \sim 10^{19}$ см⁻³) и других подложках, непрозрачных для излучения ближнего ИК диапазона. Идеология методики является перспективной и может быть использована в качестве основы технологии клонирования подложек и бесподложечной технологии получения полупроводниковых структур. При этом очевидно, что необходимо использовать лазерное излучение с фемтосекундной длительностью импульсов, прозрачное для облучаемого материала. Данный факт позволит производить отделение от объемных кристаллов GaN структур на основе GaN, а также создавать новые подложки GaN любой толщины. В результате чего, ростовая подложка будет

использоваться многократно, а получаемые полупроводниковые структуры будут иметь неоспоримое преимущество перед структурами, полученными методом гетероэпитаксии.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mishra, U. K. AlGaIn/GaN HEMTs: An overview of device operation and applications / U. K. Mishra, P. Parikh, Y. Wu // Proceedings of the IEEE. — 2002. — Vol. 90. — P. 1022–1031.
2. Cao, Y. High-voltage vertical GaN Schottky diode enabled by low-carbon metal-organic chemical vapor deposition growth / Y. Cao, R. Chu, R. Li, M. Chen, R. Chang, B. Hughes // Applied Physics Letters. — 2016. — Vol. 108. — P. 062103.
3. Kukushkin, S.A. Substrates for epitaxy of gallium nitride: new materials and techniques / S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, V.N. Bessolov, B.K. Medvedev, V.K. Nevolin, K.A. Tcarik // Reviews on advanced materials science. — 2008. — Vol. 17. — 1–32.
4. Zhang, A.P. Correlation of device performance and defects in AlGaIn/GaN high-electron mobility transistors / A.P. Zhang, L.B. Rowland, E.B. Kaminsky et al. // Journal of Electronic Materials. — 2002. — Vol. 32, no. 5. — P. 388–394.
5. Sun, J. Thermal Management of AlGaIn-GaN HFETs on Sapphire Using Flip-Chip Bonding with Epoxy Underfill / J. Sun, H. Fatima, A. Koudymov, A. Chitnis, X. Hu, H.-M Wang, J. Zhang, G. Simin, J. Yang, A. Khan. IEEE Electron Device Letters. — 2003. — Vol. 24, no. 6. — P. 375-377.
6. Lin, H.-T. White thin-film flip-chip LEDs with uniform color temperature using laser lift-off and conformal phosphor coating technologies / H.-T. Lin, C.-H. Tien, C.-P. Hsu, R.-H. Horng // Optics Express. — 2014. — Vol. 22, no. 6. — P. 31646–31653.
7. Perez-Tomas, A. Analysis of the AlGaIn/GaN vertical bulk current on Si, sapphire, and free-standing GaN substrates / A. Perez-Tomas, A. Fontseré, J. Llobet, M.

- Placidi, S. Rennesson, N. Baron, S. Chenot, J. C. Moreno, Y. Cordier // Journal of Applied Physics. — 2013. — Vol. 113. — P. 174501.
8. Fujikura, H. Recent progress of high-quality GaN substrates by HVPE method / H. Fujikura, T. Yoshida, M. Shibata, Y. Otoki // Proceedings of SPIE, San Francisco, California, United States. — 2017. — Vol. 10104. — P. 1010403.
9. Способ изготовления полупроводниковых приборных структур, основанный на клонировании исходных подложек (варианты) / Ю.Г. Шретер, Ю.Т. Ребане, А.В. Миронов // Патент РФ. — 2015. — №2546858
10. Способ лазерного отделения эпитаксиальной пленки или слоя эпитаксиальной пленки от ростовой подложки эпитаксиальной полупроводниковой структуры / Ю.Г. Шретер, Ю.Т. Ребане, А.В. Миронов // Патент РФ. — 2012. — № 2469433
11. Tavernier, P.R. Mechanics of laser-assisted debonding of films / P.R. Tavernier, D.R. Clarke // Journal of Applied Physics. — 2001. — Vol. 89, no. 3. — P. 1527–1536.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Вороненков, В.В. Подложки нитрида галлия: современное состояние, проблемы и перспективы / В.В. Вороненков, Н.И. Бочкарева, **М.В. Вирко**, И.М. Гамов, Р.И. Горбунов, А.С. Зубрилов, В.С. Коготков, Ф.Е. Латышев, Ю.С. Леликов, А.А. Леонидов, Ю.Г. Шретер // Наноиндустрия. — 2017. — т. S4, вып. 74. — с. 478–483.
- A2. Вороненков, В.В. Отделение слабо легированных пленок *n*-GaN микронной толщины от подложек, основанное на эффекте поглощения ИК излучения в сапфире / В.В. Вороненков, **М.В. Вирко**, В.С. Коготков, А.А. Леонидов, А.С. Зубрилов, Р.И. Горбунов, Ф.Е. Латышев, Н.И. Бочкарева, Ю.С. Леликов, Д.В. Тархин, А.Н. Смирнов, В.Ю. Давыдов, И.А. Шеремет, Ю.Г. Шретер // ФТП. — 2017. — т. 51, вып. 1. — с. 116–123.

А3. Вирко, М.В. Лазерное отделение пленок n-GaN от подложек, основанное на эффекте сильного поглощения ИК излучения свободными носителями заряда в n^+ -GaN подложках / М.В. Вирко, В.С. Коготков, А.А. Леонидов, В.В. Вороненков, Ю.Т. Ребане, А.С. Зубрилов, Р.И. Горбунов, Ф.Е. Латышев, Н.И. Бочкарева, Ю.С. Леликов, Д.В. Тархин, А.Н. Смирнов, В.Ю. Давыдов, Ю.Г. Шретер // ФТП. — 2016. — т. 50, вып. 5. — с. 711–716.