

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
Имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Студент Дзус Мария Александровна

Институт прикладной математики, физики и информатики

Направление 12.03.05 – лазерная техника и лазерные технологии

Тема выпускной квалификационной работы:

ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ МАССИВНОГО ОБРАЗЦА НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Руководитель ВКР: _____ Шаманская Е.Л.

Студент: _____ Дзус М.А.

**Допустить выпускную квалификационную работу к защите
в государственной экзаменационной комиссии**

Заведующий кафедрой: _____ Аракелян С.М.
«6 » июня 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Целью выпускной квалификационной работы являлось исследование процесса лазерной модификации массивного образца нитрида галлия. В процессе данной работы изучить установку на основе фемтосекундного лазера, работающего в ИК-области и изучить ее основные принципы работы. Также экспериментально проверить эффективность обрабатываемого материала нитрида галлия.

Пояснительная записка содержит 36 с., 17 рис., 2 табл., 5 источников.

SUMMARY

The goal of the final qualifying work was to study the process of laser modification of a massive sample of gallium nitride. In the process of this work, study on the basis of a femtosecond laser working in the IR region and study its basic principles of operation. It is also experimental to check the efficiency of the processed material of gallium nitride.

The explanatory note contains 36 pages, 17 figures, 2 tables, 5 sources.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	6
1.1 Методы получения нитрида галлия	6
2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	15
2.1 Фемтосекундная лазерная установка ТЕТА-10	17
2.2 Ход работы первого эксперимента:	20
2.3 Эксперимент №2	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	30

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	Лазерная модификация массивного образца нитрида галлия Пояснительная записка	<i>Литера</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>	
Разраб.		Дзус М.А.		06.06.18		У		3	30
Пров.		Шаманская Е.Л.		06.06.18		ЛТ-114			
Н. контр.		Хмельницкая Е.В.		06.06.18					
Утв.		Аракелян С.М.		06.06.18					

ВВЕДЕНИЕ

Перед нами стоит задача: изучить свойства нитрида галлия и исследовать его модифицированную поверхность с помощью фемтосекундной лазерной установки.

Нитрид Галлия – это бинарное соединение Галлия и Азота (GaN). Тема модификации поверхности массивного образца данного соединения очень актуальна, так как оно используется для создания полупроводниковых лазеров, светодиодов, транзисторов и солнечных батареях. Также нитрид галлия находит применение в оптоэлектронике в связи с тем, что материалы на его основе активны в коротковолновой области видимого спектра и в УФ-диапазоне.

Основные преимущества GaN является высокая радиационная, термическая и химическая стойкость, а также высокая теплопроводность. Элементы силовой и сверхвысокочастотной электроники GaN превосходят аналогичные структуры на основе (Si) по техническим параметрам.

Сложно реализовать совершенную структуру на основе GaN область его применения ограничивается, в основном, в качестве материала светодиодов в широком диапазоне длин волн. На основе GaN разработаны инжекционные лазеры синего и фиолетового диапазона длин волн.

Сегодня известны примеры реализации силовой и СВЧ электроники, например, один из них, диоды Шоттки, на основе GaN . Диод Шоттки – разновидность полупроводникового диода, его отличительная способность это малое падение напряжения при прямом включении, обладает малой емкостью. Но недостаток таких диодов заключается в том, что в случае краткосрочного превышения допустимого уровня обратного напряжения диод Шоттки выходит из строя.

Исследования экспериментальных приборов на основе нитрида галлия показали, что характеристики устройств существенно превышают их аналоги на

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		4

арсениде галлия (GaAs) и карбиде кремния (SiC) по надежности и быстродействию.

Кроме того, нитрид галлия в отличие от кремния является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 3,39 эВ при 300 К. В чистом виде он способен противостоять растрескиванию и может храниться как тонкая пленка на сапфире или карбиде кремния, несмотря на несоответствие в их постоянных решетках.

Сапфир является распространенным материалом подложки в виду его низкой стоимости, но использовать данный материал проблемно. Al_2O_3 – изолятор, поэтому все приборные структуры, выращенные на сапфире, имеют планарную компоновку. В результате чего, реализуемая приборная структура имеет сложную конструкцию, а занимаемая прибором площадь значительна. При такой компоновке все контакты к приборной структуре выполняются на рабочей стороне прибора. При этом из-за планарной компоновки приборной структуры в активную область прибора работает малая часть активной области структуры. Также малое значение теплопроводности сапфировой подложки по сравнению с GaN ограничивает ее характеристики приборов из-за перегрева и деградации структуры на границе GaN/подложка. В результате чего, приборные структуры на основе GaN, выращенные на сапфировых подложках, имеют рабочие характеристики ниже теоретически возможных для гомоэпитаксиальных структур GaN-on-GaN.

Если выращивать пленки и GaN структуры непосредственно на подложках из GaN, то можно решить некоторые ограничения. При реализации такой процедуры отпадает необходимость в использовании буферных слоев и появляется возможность отойти от планарной компоновки приборной структуры с переходом к производству вертикальных приборных GaN структур. Привлекательность вертикальной компоновки приборной структуры объясняется возможностью пропускания тока через всю активную область структуры, а разводка контактов на обеих сторонах позволяет уменьшить площадь, занимаемую структурой

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		5

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В теоретической части рассмотрены методы получения нитрида галлия и выводы по ним.

На сегодняшний день известны примеры производства объемных кристаллов нитрида галлия с малым числом структурных дефектов, однако в таких кристаллах пока еще велика концентрация кислорода. Кроме того, их стоимость из-за сложностей производства и малой распространенности технологии высока.

1.1 Методы получения нитрида галлия

В промышленном производстве полупроводниковых гетероструктур в первую очередь на основе GaN в качестве подложек нашли широкое применение соединения Al_2O_3 (базовая (рассогласование $\sim 13.9\%$) и другие плоскости роста), SiC, Si (рассогласование $\sim 4.5\%$), AlN (рассогласование $\sim 2.5\%$), LiGaO₂ (рассогласование $\sim 1\%$) и множество других материалов.

Наилучшим методом для получения высококачественных тонких пленок GaN является метод гомоэпитаксии¹ на подложках тех же монокристаллов GaN. Другим типом подложки является структура, состоящая из тонкого слоя GaN, выращенная на так называемой квазиподложке, в качестве которой могут служить, например, Si, GaAs и другие материалы, что может значительно упростить и удешевить эпитаксиальный процесс. Такая ситуация в принципе может решить проблему буферного слоя.

¹ Гомоэпитаксия – это процесс нарастания вещества, схожим по химическому составу с веществом подложки.

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		6

Рассмотрим работу, посвященную практическому выращиванию тонких пленок GaN на подложках GaAs путем обработки последних в активных радикалах азота и исследованию их структурных характеристик.

Исходным материалом в данной работе для выращивания пленок GaN служили монокристаллические подложки GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности (001), которые шлифовали, а затем полировали тонкими алмазными пастами. После обезжиривания и удаления дефектного поверхностного слоя путем травления GaAs в течение 2 min в стандартном травителе $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O = 3:1:1$ и промывки в дистиллированной воде образцы помещали в камеру высокочастотного разряда. Слои GaN получали путем отжига монокристаллов GaAs в активных, т.е. способных встраиваться в растущую полупроводниковую пленку, радикалах азота, полученных в мощном высокочастотном плазменном разряде.

Сложность использования азота при эпитаксиальном выращивании полупроводниковых соединений связана с большей энергией связи N_2 (энергия связи в молекуле азота 9.76 eV при температурах 300-750 °C), не позволяющей активировать молекулярный азот. В качестве источника активации в настоящее время используются различные виды плазменных источников с высокочастотным возбуждением. В данном случае это разряд высокочастотного генератора с рабочей частотой 40 МГц и мощностью до 2 кВт. Образование нитридов галлия в условиях высокочастотного плазменного разряда связано с принципиальными отличиями от других методов эпитаксии. Это обусловлено, прежде всего, наличием ионной компоненты в потоке осаждающихся на поверхность частиц. Кроме того, сами нейтральные частицы обладают повышенной энергией, а также находятся в возбужденном состоянии. Это три фактора определяют возможность получения пленок GaN практически при комнатной температуре.

Для предотвращения повреждения поверхности ионами азота полученная за счет высокочастотного разряда плазма проходила через сильное постоянное магнитное поле для удаления ее ионной компоненты. Таким образом, последующий отжиг GaAs проводится преимущественно в атмосфере

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		7

нейтральных, но возбужденных атомов (активных радикалов) азота. Для измерения концентрации активных радикалов азота в реакционную камеру помещали манометрическую лампу ЛТ-2 и спаивали ее таким образом, что каталитическая нить располагалась вблизи поверхности обрабатываемой подложки. Концентрация активных радикалов азота в рассматриваемом методе на 4-5 порядков превышает их концентрацию в не активированной атмосфере при тех же условиях. Выход активных радикалов азота в условиях рассматриваемом эксперименте достигает 15% от общего количества молекул N_2 ; в случае аммиака эта величина была еще больше. Максимальная концентрация этих радикалов имела место при вариации давления в реакционной камере от 10^{-1} до 10^{-3} Торр.

Анализ элементарного состава поверхностной области эпитаксиальных пленок, полученных рассматриваемым методом, проводился с применением элементарной оже-спектроскопии². На рисунке 1.4 представлены спектры вторичных оже-электронов:

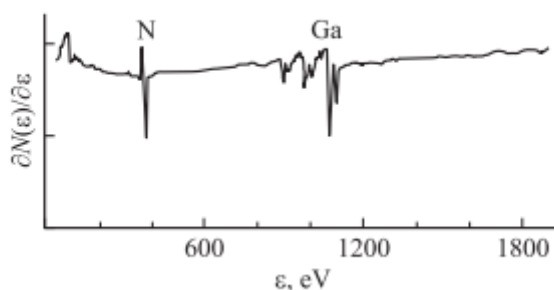


Рисунок 1.4 – Спектры оже-электронов поверхности эпитаксиальной пленки GaN [2]

Измеренные путем облучения поверхности образца потоком первичных электронов с энергией 3 кэВ, которые содержат информацию об элементном составе лишь тонкого поверхностного слоя, толщиной ~0.3-0.5 нм (максимум до 3 нм). Сопоставление энергий спектральных линий вторичных оже-электронов, рассеянных атомами исследуемого вещества, и известных характеристических

² Оже-спектроскопия – это метод электронной спектроскопии, основанный на анализе распределения по энергии электронов.

пиков атомных спектров позволили идентифицировать химическую природу атомов. Энергическое положение, характер и форма спектральных линий свидетельствуют о том, что основными элементами, входящими в состав тонкого поверхностного слоя выращенных пленок, являются атомы галлия (энергия основного пика расположена вблизи 1070 эВ) и атомы азота (энергия пика находится вблизи 380 эВ), т.е. на поверхности мы имеем тонкую пленку GaN. Одним из факторов, способствующих этому процессу, является более высокая энергия связи в системе Ga-N (7 эВ) по сравнению с системой Ga-As (4эВ).

Для исследования химического состава гетероструктур GaN/GaAs по толщине использовалось ионное послойное распыление поверхностного слоя, которое позволило получить профили распределения атомов основных химических элементов, входящих в состав соединений эпитаксиальной пленки GaN и монокристаллической подложки GaAs. На рисунке 1.5 представлены зависимости интенсивности пиков эмиссии оже-электронов для элементов в системе Ga-N-As от времени распыления (травления) поверхности или профили распределения элементов по глубине структуры эпитаксиальная пленка-подложка:

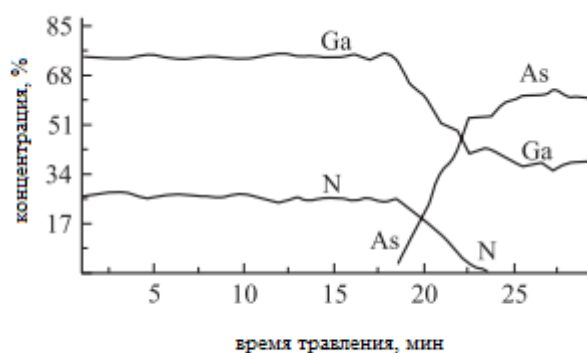


Рисунок 1.5 – Зависимость распределения химических элементов в гетероструктуре GaN/GaAs от времени травления [2]

Из рассматриваемого эксперимента распределение атомов химических элементов по глубине структуры эпитаксиальная пленка-подложка (концентрированного профиля) видно, что в выращенной пленке основными

компонентами являются галлий и азот, причем спад последнего в подложку не очень резкий. В глубине подложки, как и должно, быть, присутствует только галлий и мышьяк. Следовательно, обработка GaAs в радикалах азота способствует тому, что на его поверхности образуется стабильный тонкий слой нитрида галлия. Такая ситуация может быть обусловлена как вытягиванием атомов галлия из объема на поверхность GaAs, с последующим вступлением его в реакцию с активными радикалами азота из газовой среды и образованием соединения GaN, так и активным испарением мышьяка из приповерхностного слоя GaAs и растущего слоя GaN в газовую среду. Резкий спад концентрированного профиля Ask поверхности дает основание предполагать, что переходный слой GaAsNобеднен атомами мышьяка, а его ширина незначительна. Кроме того, из профилограмм видно, что атомы галлия вытягиваются к поверхности сильнее, чем атомы мышьяка. Следовательно, атомы галлия играют лимитирующую роль в формировании пленок GaN.

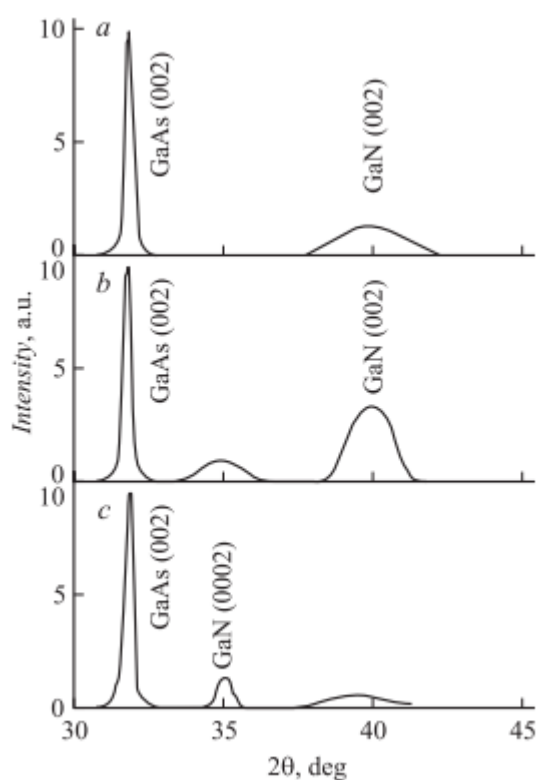
Другим фактором, способствующим росту эпитаксиальных пленок GaN, являются проникновение и последующая диффузия активных радикалов азота вглубь подложки GaAs, что для тонких пленок является важным процессом, и последующий захват их возникшими вакансиями мышьяка с образованием того же соединения GaN. Также, атомы азота могут встраиваться не только в подрешетку мышьяка, но и в междоузлия, чему способствует малый радиус азота. В первом случае происходит уменьшение постоянной решетки, во втором – ее практическая неизменность.

Необходимо обратить внимание на существенную нестехиометрию состава пленки GaN на поверхности – избыток азота (~9%), что в первую очередь обусловлено присутствием в камере атомарного азота в большом количестве, препятствующего испарению азота из пленки. Это свидетельствует о превалировании первого из вышеназванных факторов (квазиэпитаксиального механизма) выращивания тонких пленок GaN.

Содержание азота и структурное совершенство эпитаксиальных слоев были обнаружены путем исследования высокоразрешающей рентгеновской дифракто-

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		10

графии. Параметры кристаллической решетки (межплоскостные расстояния) выращенных пленок GaN и подложек GaAs определялись путем анализа углового положения и интенсивности рентгеновских лучей (дифрагированных исследуемым материалом), полученных из рентгеновских дифрактограмм (кривых качания). На рисунке 1.6 представлены рентгеновские дифрактограммы трех образцов GaN, выращенных на (001) GaAs при разных температурах. Помимо пиков кривых качания, локализованных вблизи $2\theta \sim 32^\circ$, которые соответствуют симметричным рефлексам отражения кубического монокристаллического GaAs от (002) плоскости, наблюдались также более



широкие ассиметричные линии вблизи $2\theta \sim 35^\circ$ и $\sim 40^\circ$, приписываемые гексагональной и кубической структурам GaN, т.е. происходящие от (0002) и (002) плоскостей гексагональной и кубической модификаций GaN соответственно. Так, для кубической структуры постоянная решетки, полученная из-за анализов позиций пиков, была близка к величине $4.515 \pm 0.008 \text{ \AA}$.

Рисунок 1.6 – Рентгеновские дифрактограммы гетероструктур GaN/GaAs, полученные при температурах эпитаксии, °C: *a* – 600, *b* – 700, *c* – 750 [2]

Полуширина пиков, не превышающая 1° , свидетельствует хотя и о не очень высоком, но удовлетворительном кристаллическом качестве слоев GaN, например, по сравнению с близкими к идеальным слоям GaN, полученным молекулярно-лучевой эпитаксией, для которых полуширина не превышала $25''$. На рисунке 1.6 видно, что наблюдается только пики GaN и GaAs, а не пики предполагаемого твердого раствора GaAsN. Идентификация межплоскостных расстояний, соответствующих дифракционным максимумам, показала, что тонкие эпитаксиальные пленки GaN в зависимости от технологических режимов обработки (выращивания) могут иметь кубическую, так и гексагональную структуру.

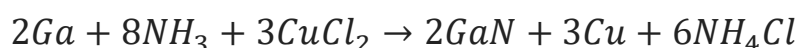
С увеличением температуры наблюдается трансформация дифракционных пиков в сторону меньших углов. Из всех параметров технологического режима (температура подложки, давление паров, ток разряда, скорость роста и др.) наиболее критичным является температура подложки. Причем низкотемпературные процессы (температуры отжига меньше 700°C) способствуют формированию кубической структуры тонких пленок GaN на (001) поверхности кубического GaAs. Это обусловлено более низким давлением паров мышьяка при низких температурах по сравнению с более высокотемпературными процессами. При дальнейшем повышении температуры в реакционной камере начинает проявляться и постепенно доминировать рефлекс отражения, ответственный за формирование слоев GaN гексагональной сингонии, причем процесс проходит через равноколичественное смешивание кубической и гексагональной фаз. Такая ситуация позволяет легко управлять кристаллической структурой полученных пленок [2].

Таким образом, в рассмотренной работе показано, что отжиг монокристаллов GaAs в активных радикалах азота приводит к наращиванию тонких монокристаллических слоев GaN. Получены профили распределения атомов основных химических элементов, входящих в состав соединений эпитаксиальной пленки GaN и монокристаллической подложки GaAs.

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		12

Известен также метод получения нитрида галлия путем обработки металлического галлия или окиси галлия аммиаком или разложением некоторых соединений галлия чрезвычайно трудоемки, осуществляется при высоких температурах (1000-1100 °С), плохо воспроизводится в промышленных условиях. Кроме того, при осуществлении этих способов требуется либо предварительных синтез соединений галлия, либо многократное измельчение промежуточных продуктов. Расход аммиака в сотни раз превышает теоретически необходимое количество. Выход продукта недостаточный.

Для повышения выхода продукта, а также улучшения его количества предполагается исходный галлий смешивать с хлоридом аммония и процесс вести под давлением аммиака в присутствии хлорида металла, способного к восстановлению водородом в условиях синтеза, например, хлорида серебра или меди по уравнению:



Ga – Галлий, CuCl – хлорид меди, NH₃ – аммиак, GaN – Нитрид Галлия, NH₄Cl – хлорид аммиака, Cu – медь.

Исходные вещества (смесь галлия с хлоридом аммония и хлорид меди) загружают в разные сосуды или в один сосуд с перегородкой и помещают в реакционный аппарат.

Аппарат продувают аммиаком и давление аммиака поднимают до 6 атм., одновременно повышая температуру до 700 °С. При этих условиях (давление аммиака поддерживают на 6 атм.) синтез заканчивается в течении 2-3 часов.

Продукты реакции – нитрид галлия, медь и хлорид аммония – оказываются полностью разделенными один от другого (NH₄Cl улавливается в холодильнике). Выход нитрида галлия 99%. Продукт не содержит примесей, кроме имеющихся в исходном галлии.

Способ получения нитрида галлия путем взаимодействия металлического галлия с аммиаком при нагревании, отличающийся тем, что с целью повышения выхода и качества продукта, исходный галлий смешивают с хлоридом аммония и процесс ведут в присутствии хлорида металла, способного к восстановлению

водородом в условиях синтеза, например, меди или серебра, под давлением аммиака предпочтительно 6 атм и температуре 700 °С.

Таким образом, теоретически получить нитрид галлия без примесей очень тяжело, так как на это влияет ряд существенных факторов, например, процесс должен происходить под воздействием высоких температур, что в промышленных условиях это сделать сложно. Также при окиси галлия аммиаком требуется синтез соединений галлия или многократное измельчение промежуточных продуктов, даже в этом случае выход продукта будет недостаточным [4].

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		14

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Порядок выполнения работы:

- 1) Изучить лазерную установку, особое внимание обратить на технику безопасности.
- 2) Изучить основные принципы работы фемтосекундного лазера и его ключевые элементы.
- 3) Выполнить начальную процедуру включения установки.
- 4) Провести два эксперимента по взаимодействию лазерной установки с массивным образцом GaN: точки и линии.
- 5) Оценить результаты эксперимента и описать детально выполнение работы.
- 6) Сделать выводы по результатам проделанной работе.

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		15

Прежде чем выполнять экспериментальную часть, ознакомимся с общими положениями техники безопасности согласно ГОСТ 12.1.040-17 ССБТ. Лазерная безопасность:

1) Для лазеров (лазерных установок) в каждом конкретном случае должны быть установлены опасные и вредные производственные факторы, возникающие при их эксплуатации.

2) Стандарты, устанавливающие требования лазерной безопасности, должны разрабатываться в соответствии с требованиями ГОСТ 12.0.001-17 и настоящим стандартом.

3) В каждом конкретном случае предприятием-изготовителем должен быть определен класс лазера (лазерной установки) по степени опасности генерируемого излучения.

4) Средства защиты должны обеспечивать предотвращение воздействия или снижение уровня опасных и вредных производственных факторов до допустимых значений.

5) Средства защиты не должны ограничивать технологических возможностей лазеров (лазерных установок) и снижать работоспособность человека.

6) Стандарты на требования лазерной безопасности должны учитывать:

- правила лазерной безопасности в связи со спецификой использования лазеров (лазерных установок);
- качественные и количественные показатели эффективности технических средств предотвращения воздействия лазерного излучения;
- технические требования к конструктивному исполнению технических средств предотвращения воздействия лазерного излучения;
- требования безопасности при аварийных ситуациях [4].

2.1 Фемтосекундная лазерная установка ТЕТА-10.

Экспериментальная установка представляет собой ряд модулей, основным из которых является фемтосекундный лазер, работающий в ИК-области. Схема установки приведена на рисунке 2.1:

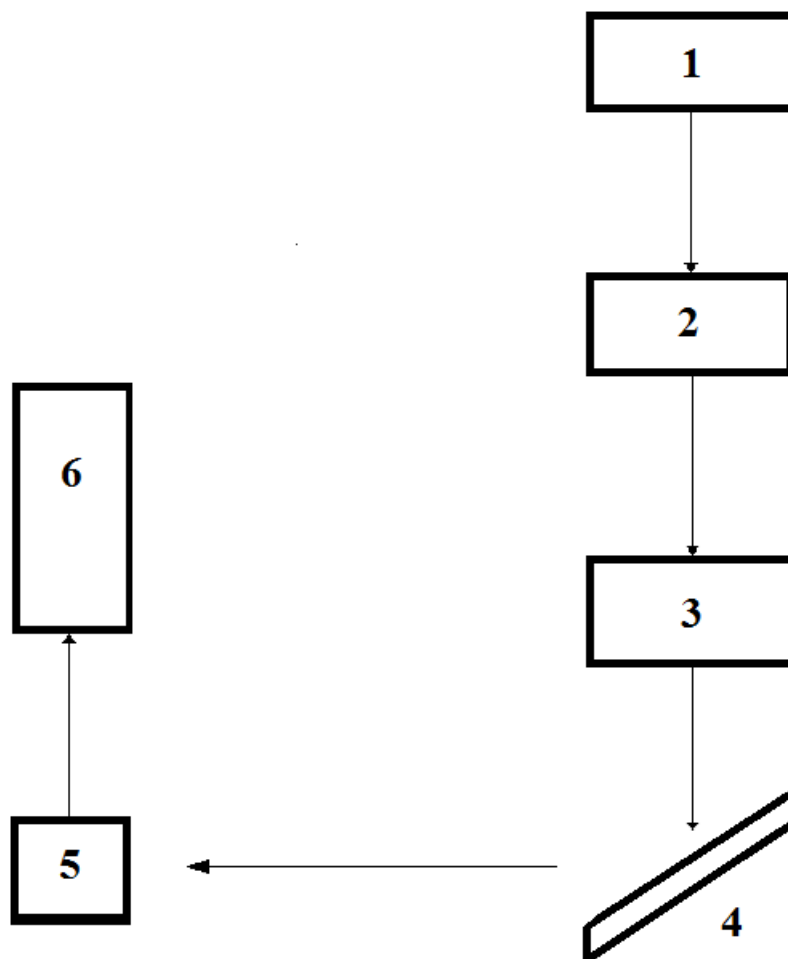


Рисунок. 2.1 - Фемтосекундная лазерная установка ТЕТА-10

Ключевые элементы установки следующие:

1 – Координатное управление платформой (КУП), 2 – генератор (Г), 3 – поляризационный ослабитель (ПО), 4 – зеркало (З), 5 – диафрагма (Д), 6 – портално-перископическая система транспортировки лазерного излучения (ППС).

Технологические параметры лазера приведены ниже в таблице 1:

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		17

Таблица 1 - Технологические параметры фемтосекундной лазерной установки ТЕТА-10

Параметр	Значение
Основная частота	
Частота следования импульсов	10 кГц
Центральная длина волны излучения	1030 нм
Энергия импульса основной частоты	163 мкДж
Длительность импульса	280 фс
Диаметр пучка (по уровню $1/e^2$)	4,5мм
Стабильность энергии (rms)	0,5 %
Поляризация излучения	Линейная, вертикальная
Вторая гармоника	
Энергия импульса второй гармоники	90 мкДж
Центральная длина волны второй гармоники	515 нм
Длительность импульса второй гармоники (FWHM)	280 фс
Поляризация излучения	Линейная, горизонтальная
Четвертая гармоника	
Энергия импульса четвертой гармоники	31 мкДж
Центральная длина волны четвертой гармоники (FWHM)	257 нм
Длительность импульса второй гармоники (FWHM)	-
Поляризация излучения	Линейная, вертикальная
Настройки	
Температура чиллера	200°C
Серийный номер лазерного диода накачки	189345
Температура диода	33,5°C
Ток накачки	80 А
Калибровки фотоприемников	$A_1 = 4,16; B_1 = 0,2276;$ $A_0 = 2,48; B_0 = 0,3016$
Параметры ЭОЗ регенеративного усилителя	Start: 0,15 ms + 12,5 ns Duration: 0,9 + 26,1 ns HV = 205 V
Параметры дополнительного ЭОЗ	Delay: 10 ms + 19,5 ns HV = 257 V

В основе функционирования лазерной установки лежит принцип, основанный на синхронизации мод. Интерференция между этими модами, представляет собой последовательность импульсов лазерного излучения, в нашем случае, импульсы будут фемтосекундными.

С помощью элемента КУП осуществляем перемещение исследуемого образца, при этом важна высокая точность перемещения в заданную координату. Генерируемый лазерный пучок поступает на поляризационный ослабитель. С элемента ПО, который осуществляет регулировку коэффициента пропускания, отражается от зеркала и поступает на элемент Д. Диафрагма, ограничивает поперечное сечение световых пучков, тем самым они попадают на портално-перископическую систему транспортировки лазерного излучения. Элемент ППС состоит из дихроичного зеркала, для данного эксперимента использовался микрообъектив MPlan Apo NIR 50x (рисунок 2.2) и исследуемый образец. Таким образом, осуществляется взаимодействие лазерной установки с данным образцом.

Параметры микрообъектив - MPlan Apo NIR:

Увеличение – 50x

Диапазон длин волн – от 480 до 1800 нм

Фокусное расстояние – 4 мм

Разрешающая способность – 0,7 мкм

Коррекция длины волны от видимого до ближнего-инфракрасного диапазон.



Рисунок 2.2 – MPlan Apo NIR 50x

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		19

2.2 Ход работы первого эксперимента:

1) Следуя правилам и нормам техники безопасности, включаем установку и проводим подготовительные работы.

2) Включаем платформу. Осуществляем поиск фокуса и находим поверхность образца с помощью микрообъектива (для первого эксперимента).

3) Используя программу, задаем мощность, подаваемую в импульс. Принимаем минимальное значение $P_{min} = 3.3$ мВт.

4) Сделав ряд выстрелов в одну строку, воздействуем на массивный образец. При этом варьируем мощность.

5) При изменении мощности от 3.3 мВт до 8.8 мВт, количество импульсов изменялось в строке от 2 до 7, то есть в одну точку лазер стрелял два раза, в следующую точку – 3, и т.д. по возрастающей.

6) Разделим полученные результаты на три участка, выделив при этом три интервала мощности закладываемой в импульс.

Составим таблицу результата эксперимента.

Таблица 2 - Результаты первого эксперимента

Интервал мощности	Количество импульсов	Комментарии
3.3 – 4.8 (мВт)	2 - 7	Образование каверны (округлой формы). Точки воздействия одинаковые по диаметру, без видимых изменений.
5.3 – 7.3 (мВт)	2 - 7	Каверны одинаковые по диаметру, виднеются трещины, но они малозаметны, по сравнению с первым участком.
7.8-8.8 (мВт)	2 - 7	Начинает происходить изменение поверхности рассматриваемого образца. Трещины заметны, по сравнению с первым и вторым участком. Предполагается выброс материала.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Рассмотрим первый участок массивного образца нитрида галлия, приблизительная площадь которого составляет 50 мкм (0,00055 м). Изменение мощности здесь от 3.3 до 4.8 мВт. После генерации импульса лазерного излучения в линию, образуются лунки, диаметр каждой составляет 50 мкм (рисунок 2.3).

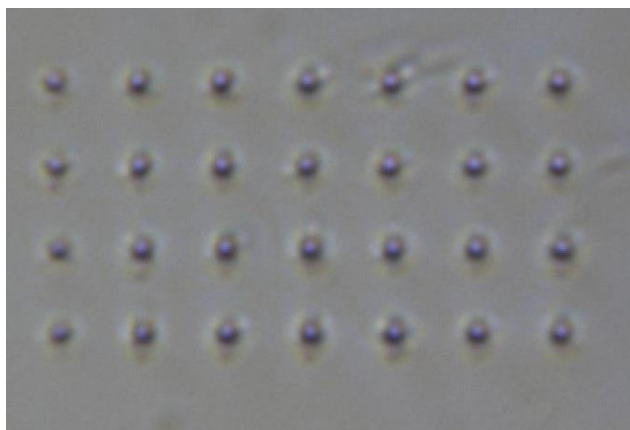


Рисунок 2.3 – Результат эксперимента при мощности от 3.3 до 4.8 мВт

Также рассмотрим второй участок площадь которого, приблизительно равен 600 мкм (0,0006 м). Мощность, подаваемая в импульс, меняется от 5.3 до 7.3 мВт. После воздействия каверны также имеют одинаковый диаметр, равный 50 мкм. Но можно заметить не значительные трещины на поверхности массивного образца (рисунок 2.4).

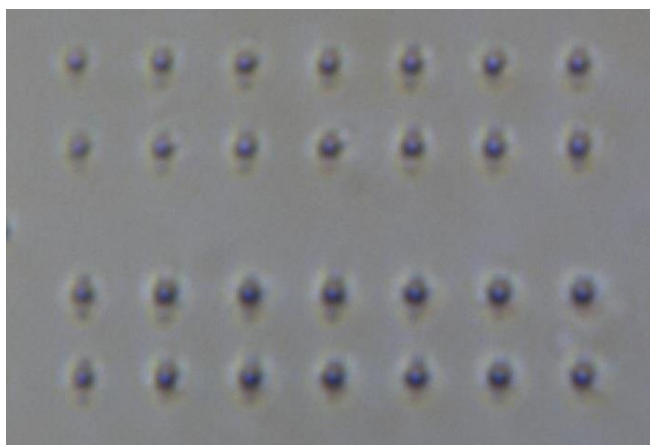


Рисунок 2.4 – Результат эксперимента при мощности от 5.3 до 7.3 мВт

Рассмотрим третий участок эксперимента, площадь которого составляет 160.000 мкм (0,16 м). На заключительном интервале мощность изменяется с 7.8 до

8.8 мВт (максимальная). Диаметр кеверн составляет 50 мкм, при этом идет изменение поверхности массивного образца. Трещины, по сравнению с предыдущим участком, становятся заметнее. Предположительно, происходит выброс материала нитрида галлия (рисунок 2.5).

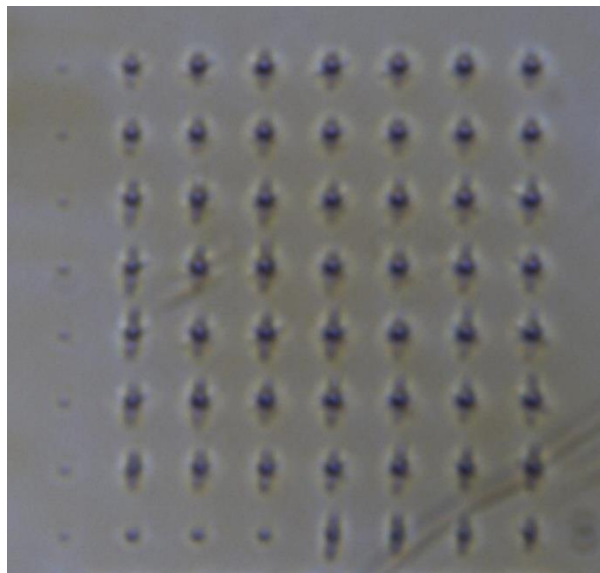


Рисунок 2.5 – Результат эксперимента при мощности от 7.8 до 8.8 мВт

7) Анализируя полученные результаты, можно предположить, что подаваемый мощный приток энергии от внешнего источника привел к получению наночастиц нитрида галлия в метастабильном состоянии. Но также есть вероятность того, что часть материала будет испаряться. Если подаваемая мощность уменьшится, то нанофрагменты начинают срастаться и укрупняться, пока не будет создан исходный монокристалл.

8) Воздействуем на образец, с помощью лазерного излучения. Делаем ряд выстрелов в одну строку, при этом задаем длину линии 1 мм. (Как показано на рисунке 2.6).



Рисунок 2.6 – Схема положения лазерного луча к исследуемой поверхности

Опираясь на исходные данные: количество импульсов (N) – 10.000, подаваемое в 1 мм (l) и диаметр пятна (D) равен 50 мкм. Вычислим, какое количество импульсов (n) уместится в одну точку:

$$n = \frac{l}{D} = \frac{10^{-3}\text{м}}{50 \cdot 10^{-6}\text{м}} = 20 \text{ импульсов.}$$

На рисунке 2.7 изображены зоны пятна:



Рисунок 2.7 – Зоны пятна

Найдем диаметр не перекрытой зоны (d):

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$d = \frac{s}{N} = \frac{10^{-3}}{10.000} = 10^{-7} \text{ м} = 0,1 \text{ мкм.}$$

Чтобы найти перекрытие пятна (Q) нужно найти область перекрытия и соотнести к той части, которая будет перекрыта, то есть:

$$Q = \frac{D-d}{D} = \frac{50-0,1}{50} = 0,998.$$

$$Q(\%) = \frac{0,998}{100\%} = 99,8\%.$$

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		24

2.3 Эксперимент №2

Во втором эксперименте, при нахождении поверхности образца, использовалась линза с фокусным расстоянием равным 50 мм.

Воздействуем на массивный образец, с помощью импульсов выжигаем линии, варьируя с каждой строкой мощность от минимального до максимального значения (от 100 мВт до 400 мВт), при постоянной скорости равной 1 мм/с.

Опишем результаты эксперимента, полученных линий, сила тока в данном эксперименте менялась.

Первая линия, сделанная с помощью импульсов, с процентом заполнения равной 99,8%, при значении мощности 400 мВт и силе тока 6 А. При анализе линии, можно заметить, что ее ширина меняется от 46.29 до 46.64 мкм. Также видны разрушения и трещины массивного образца, представленные на рисунке 2.8.

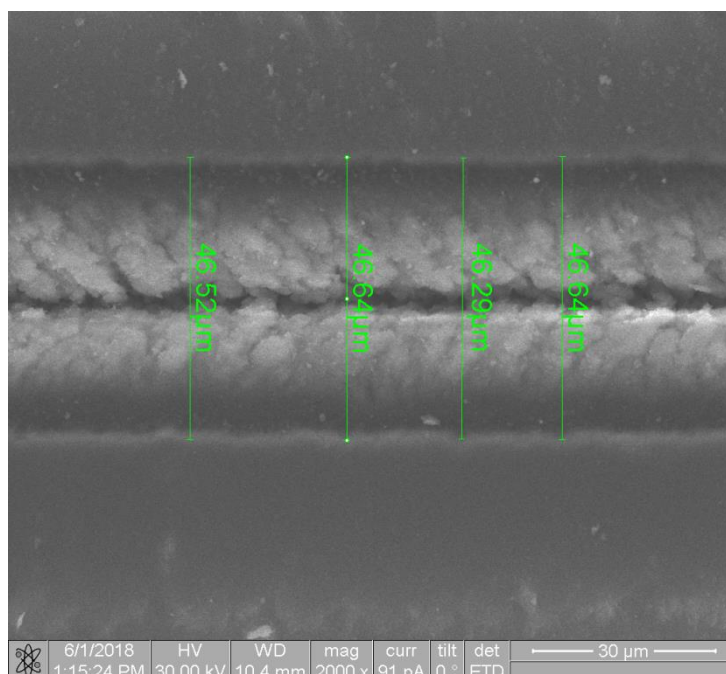


Рисунок 2.8 - Линия при мощности 400 мВт

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		25

Вторая линия сделала при значении мощности равном 300 мВт и силе тока 5 А. Ширина линии изменилась в диапазоне от 45.23 до 45.70 мкм. Разрушения и трещины образца, в отличие от предыдущей линии уменьшились, что заметно на рисунке 2.9.

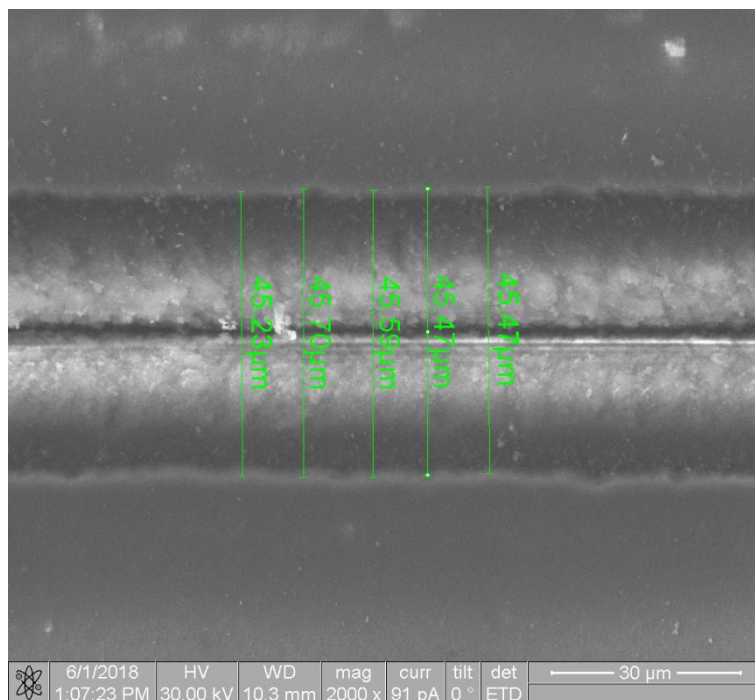


Рисунок 2.9 - Линия при мощности 300 мВт

Следующая линия сделана при значении мощности 200 мВт и силе тока 5 А. Ширина изменяется от 41.95 до 42.77 мкм. Сравнивая, с предыдущими результатами, линия в данном условии более ровная, трещины и разрушения образца не значительны и малозаметны (см. рисунок 2.10).

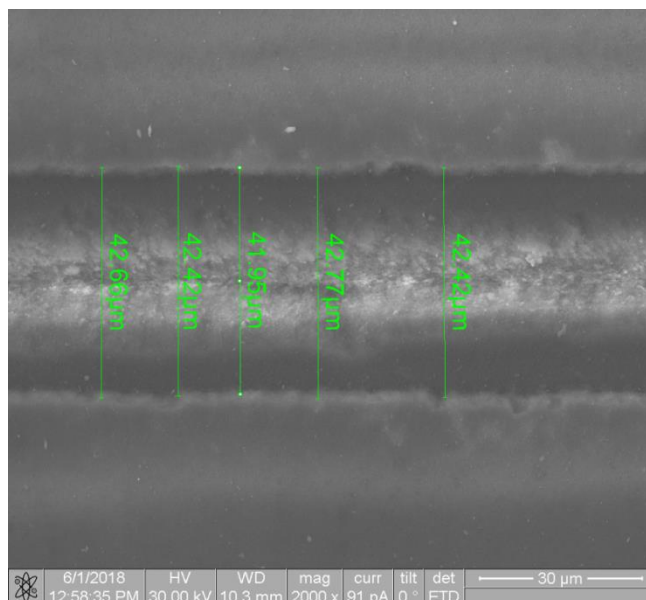


Рисунок 2.10 - Линия при мощности 200 мВт

Последняя линия сделала при минимальном значении мощности 100 мкВт. Ширина в данном случае варьируется от 36.94 до 37.31 мкм. Анализируем полученный результат, вдоль линии дефектов не наблюдается. (Рисунок 2.11).

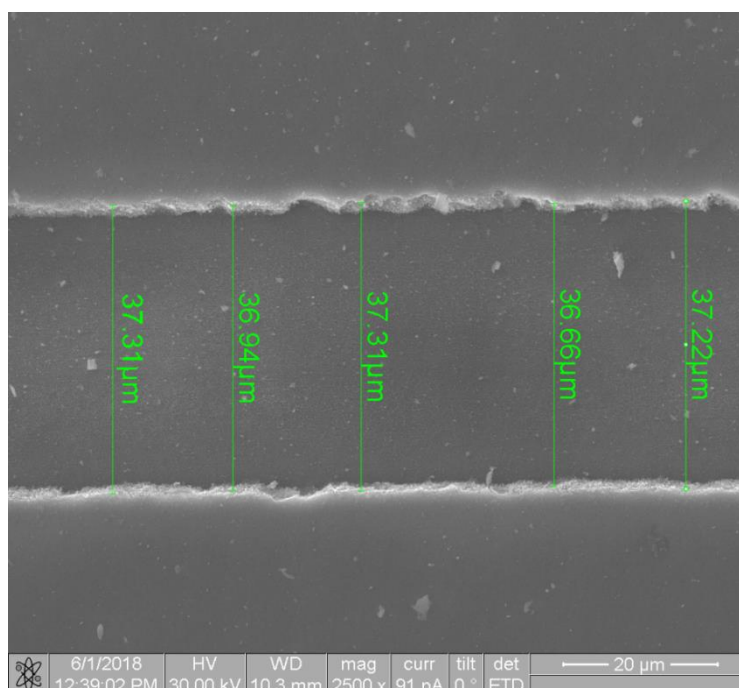


Рисунок 2.11 - Линия при мощности 100 мкВт

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что при всех значениях мощности происходит абляция, то есть при минимальных значениях

мощности лазера вещество испаряется или сублимируется в виде свободных молекул, атомов и ионов, то есть над облучаемой поверхностью образуется слабая плазма. При плотности мощности, превышающей порог режима абляции, в данном случае, порог равен 300 мВт, происходит микровзрыв с образованием значительных трещин на поверхности образца.

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		28

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перед нами стояла задача исследования процесса, с помощью которого производилась лазерная модификация массивного образца нитрида галлия.

Мы взяли именно это соединения в виду своей уникальности. Приборы на основе GaN существенно превышают характеристики устройств по надежности и быстродействию в отличие от их аналогов, например, на арсениде галлия и карбиде кремния.

Данное соединение обладает высокой радиационной, термической и химической стойкостью, а также высокой теплопроводностью.

Мы решили экспериментально модифицировать данный материал с помощью лазерной фемтосекундной установки ТЕТА-10. Модифицировать, то есть добиться изменения поверхности массивного образца и получить наночастицы нитрида галлия.

В виду полученных результатов эксперимента можно сделать следующий вывод: модифицировать образец, можно только при взаимодействии его с фемтосекундным лазером. Это объясняется тем, что механизм поглощения энергии отличается от других лазеров тем, что параметры фемтосекундной установки такие как мощность лазера (регулировалась, согласно эксперименту), диаметр сфокусированного пятна, длительность импульса (280 фс) меняется.

Подводя итог, можно утверждать, что за счет меньшего диаметра сфокусированного пятна и времени воздействия на структуру, будет оказываться меньшее повреждение поверхности массивного образца, то есть материал будет обрабатываться лучше при взаимодействии с лазером, у которого длительность импульса меньше.

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		29

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Галашев А.Е. Комбинационное рассеяние наночастиц //Химическая физика. –2012. –том 31, №5. –С.65-72.
- 2) Сукач Г.А., Кидалов В.В., Котляревский М.Б., Потапенко Е.П. Структура и состав пленок нитрида галлия, полученных путем обработки монокристаллов арсенида галлия в атомарном азоте // Журнал технической физики. – 2003. – том 73, вып.4. – С.59-62.
- 3) Абдуллаев Г.В., Джафаров Т.Д. Атомная диффузия в полупроводниковых структурах. М.: Атомиздат, 1980. 280 с.
- 4) Сукач Г.А., Кидалов В.В., Власенко А.И., Котляревский М.Б., Потапенко Е.П. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 2002. Вып. 37. С. 65–76.
- 5) ГОСТ 12.1.040-17 ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения;

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-114.04.3.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		30