

УДК 621.375.826

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ND :YAG ЛАЗЕРА ДЛЯ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКОСТИ.

Сидоровнина Татьяна Юрьевна⁽¹⁾, Тимошенко Валерия Анатольевна⁽²⁾, Савкин Александр Николаевич⁽³⁾

*Студент 4 курса⁽¹⁾, студент 4 курса⁽²⁾, аспирант 2 года⁽³⁾,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: Ю.В. Голубенко,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в
машиностроении».*

Развитие науки о наноструктурах и, прежде всего, о квантовых наноструктурах (нанофизики) и нанотехнологий даст возможность получения наноматериалов с качественно новыми свойствами. Развитие нанoeлектроники и наномеханики послужит основой качественно нового этапа в разработке новейших информационных технологий, средств связи, в решении проблем качественно нового уровня жизни и пр. Успех в развитии этих направлений определится, по сути, решением двух основных проблем: разработка надежных способов создания наноматериалов и нанобъектов с требуемыми свойствами, включая использование методов поэтапной сборки и эффектов самоорганизации; разработка новых и развитие существующих методов нанодиагностики с атомным разрешением. Современный прогресс в области нанотехнологий позволяет надеяться, что уже в недалеком будущем многие проблемы будут решены. [1].

Лазерная абляция является одним из перспективных способов, который предоставляет новые возможности управления характеристиками синтезируемых наночастиц металлов и полупроводников. [2]

Одним из наиболее распространённых способов получения наночастиц с помощью лазерного излучения является импульсная лазерная абляция (ИЛА) твердых мишеней в жидкости, газе или вакууме. Наночастицы получают в форме порошка, тонких пленок, а также коллоидных растворов.

Данным методом можно получать широкий спектр тонких пленок на подложках, выбирая в качестве мишени различные материалы и используя разные газы. Плотность, толщину и однородность пленок также можно изменять, варьируя различные параметры лазерной абляции, такие как длина волны лазерного излучения, плотность энергии и длительность лазерного импульса, расстояния до объектов и температуру подложки [6].

Среди функциональных наноматериалов и покрытий, полученных данным методом можно выделить металлические проводники, полупроводниковые структуры, диэлектрические слои на основе оксидной или другой керамики, а также высокотемпературные сверхпроводники и алмазные пленки. Разнообразие материалов и покрытий, получаемых методом лазерной абляции, обуславливает большое

применение их в различных приложениях, таких как, полупроводниковые приборы, электроды, износостойкие и теплоизоляционные покрытия, катализаторы, сенсорные устройства и др. [6]

Выше перечисленные примеры показывают, что лазерная абляция является перспективным методом получения функциональных наноматериалов. По сравнению с другими физическими (парофазное осаждение, ионно-плазменное или дуговое напыление и др.) и химическими методами (химическое осаждение, в том числе гидротермальные методы, с применением поверхностно-активных веществ и слабого осаждения), метод лазерной абляции имеет несколько преимуществ. Среди них:

- простой и химически чистый синтез конечных продуктов, без включения побочных примесей, что позволяет не проводить дополнительную очистку;
- низкая себестоимость экспериментальных установок и простота контроля процесса абляции;
- возможность формирования метастабильных фаз, за счет быстрого нагрева и охлаждения аблированного вещества (до 1000 К/с) в условиях высокого давления плазменного факела в области воздействия лазерного излучения;
- высокая скорость осаждения аблированного вещества ($> 1050 \frac{\text{атом}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$) и непосредственная связь энергетических параметров излучения с кинетикой роста слоя;
- возможность конгруэнтного испарения многокомпонентных мишеней; строгая дозировка подачи материала, в том числе многокомпонентного с высокой температурой испарения;
- агрегация в кластеры или наночастицы различного размера, аблирующих с кинетической энергией 10 - 500 эВ.
- Электрическая поляризация аблированных частиц, позволяющая селективировать и упорядочивать их с помощью электрического поля для получения определённой структуры осаждаемой плёнки [6].

Таким образом, преимуществом метода лазерной абляции в воде является то, что материальный состав мишени полностью отражается в составе получаемых наночастиц, что позволяет получить чистый коллоидный раствор без примесей, который может использоваться в дальнейшем. Лазерная абляция в воде не требует большого количества времени на протекание химических реакций, высоких температур нагрева или давления.

Свойства получаемых наночастиц (форма, размер, состав и структура) зависят от параметров лазерного излучения (длина волны, частота следования импульсов, энергия в импульсе), используемого для абляции.

Выделяют три режима взаимодействия лазерного излучения с мишенью, определяющие соотношения временных параметров процесса абляции (длительность импульса, время электронной релаксации, время нагрева решетки мишени): фемто-, пико- и наносекундный режимы. Таким образом, для осуществления фемто-, пико- и

наносекундного режима используются фемтосекундные, пикосекундные и наносекундные импульсы лазерного излучения соответственно.

Обычным методом получения пико- и фемтосекундных лазерных импульсов является синхронизация мод. Для получения фемтосекундных импульсов используется пассивная синхронизация мод. В этом случае используется некоторый нелинейный элемент, при прохождении которого импульс становится уже. В роли нелинейных элементов могут выступать так называемые насыщаемые поглотители, нелинейные зеркала типа волоконной петли и др. Идея использования насыщаемого поглотителя состоит в том, что при распространении импульса через такой прибор его края поглощаются существенно сильнее, чем центр (амплитуда которого намного больше). Это эквивалентно уменьшению длительности импульса. Существуют образцы лазеров, использующих насыщаемые поглотители для генерации импульсов длительностью 320 фс. В случае абляции фемтосекундными импульсами выброс материала мишени и формирование плазменного облака происходят значительно позже окончания импульса [5].

В пикосекундном режиме возможно наблюдение логарифмической зависимости глубины абляции от плотности энергии лазерного импульса. ИЛА в этом случае сопровождается электронной теплопроводностью и образованием расплавленной зоны внутри мишени. Несмотря на то, что внутри мишени процесс испарения можно рассматривать как непосредственный переход твердое тело-пар (или твердое тело – плазма), присутствие жидкой фазы внутри мишени ухудшает точность лазерной обработки металлических материалов в пикосекундном режиме по сравнению с фемтосекундным [5].

В наносекундном режиме поглощённая лазерная энергия сначала нагревает поверхность мишени до температуры плавления, а затем до температуры парообразования. При этом выброс материала из мишени происходит преимущественно за счет тепловых процессов, поскольку имеется достаточно времени, чтобы тепловая волна распространилась в глубь мишени и образовался толстый слой расплавленного материала. В этом случае испарение происходит от жидкого металла [5].

В таблице 1 сведены типичные параметры лазеров, используемых для абляции. [2]

Таблица 1.

Лазер	Длина волны, мкм	Длительность импульса, нс	Энергия в импульсе, мДж	Частота повторения импульсов, Гц	Материал мишени
CO ₂	10,6; 9,6	80	200	-	Графит, биоткань
Эксимерный	0,308	15	30	5	Графит, биоткань
Гольмиевый	2,91	130	(2,7...4,0) · 10 ³	1	Сапфир, ультрадисперсный алмаз, биоткань
Эрбиевый	2,94	150	500	-	Сапфир, ультрадисперсный алмаз, биоткань

На алюмо-иттреевом гранате	0,532 0,270 1,064	0,3 9	2...5	10	Алмаз, металлы, керамика, биоткань
На свободных электронах	2...10	5000	22	30	Полимеры, биоткань
На кристалле Ti:Sa	0,775	0,170 5	300	10	Cu, Zn, Ag, Au
На парах меди	0,510 0,578	20	0,06...50	(2...50) $\cdot 10^3$	Биоткань, металлы, стекло

Газоразрядные CO_2 – лазеры являются наиболее ярким представителем семейства так называемых молекулярных лазеров, инверсная заселенность в которых создается между колебательными уровнями молекул. CO_2 – лазеры имеют наибольший КПД преобразования электрической энергии в энергию излучения. Это их свойство совместно с простотой в эксплуатации при высоких мощностях как в импульсном, так и в непрерывном режимах обусловило широкое применение CO_2 – лазеров для обработки материалов [8]. CO_2 – лазеры широко применяются в медицине. Спектр поглощения для биоткани определяется типом доминирующих поглощающих центров и содержанием воды. Так, в диапазоне 400 - 900 нм спектр поглощения кожи в основном обусловлен присутствием в ней меланина и клеток крови, а для излучения с длиной волны более 1200 нм практически полностью совпадает со спектром поглощения воды [7]. В работе [9] методом эмиссионной спектроскопии с временным разрешением исследовано свечение факела углеродной плазмы, возникающей при абляции графита в вакууме излучением импульсного CO_2 – лазера. Параметры используемого лазера: λ (длина волны) = 9,6 мкм; W (энергия в импульсе) = 200 мДж. Абляция осуществлялась в вакууме, что обусловлено достаточно низким коэффициентом поглощения лазерного излучения водой на длине волны 9,6 мкм.

В работе [10] для лазерной абляции применяют Krf – лазер (экимерный) с длиной волны излучения 248 нм, длительностью импульса 5 пс и частотой следования импульсов 10 Гц. Впервые экспериментально исследован процесс образования наноструктур на поверхностях титана, никеля, молибдена и вольфрама при их абляции в жидкости пико- и фемтосекундными лазерными импульсами. Средний поперечный размер структур составляет 50 – 200 нм в зависимости от материала подложки. Морфология и плотность структур зависят от числа и длительности лазерных импульсов, а также от плотности энергии излучения на мишени. Установлено, что в случае облучения титана в жидкостях цвет модифицированной области обусловлен плазменными колебаниями электронов в наноструктурах. Высокая плотность структур позволяет использовать такие подложки в качестве среды для магнитной записи информации и в качестве полевых эмиттеров электронов [10]. В исследовании [13] при облучении золотой мишени в дистиллированной воде излучением эксимерного лазера с длинной волны 248 нм, частотой следования импульса 1 Гц, энергией в импульсе 1.5 Дж/см², и размерами пятна на поверхности мишени 5x3 мм, наблюдается следующая картина. Формирование глубоких каналов не происходит. Структуры представляют собой возвышения над поверхностью образца. Подобные структуры покрывают большую часть площади области облучения. В данном эксперименте не осуществлялось перемещение образца под лазерным излучением. Часть структур

заканчиваются сферообразными вершинами, что указывает на то, что именно с вершин структур, возможно, происходит постепенный вынос расплавленного вещества в окружающую жидкость.

Одной из актуальных в последние годы проблем является очистка ультрадисперсных алмазов. В исследовании [11] изучалось воздействие импульсного излучения гольмиевого лазера на водную суспензию ультрадисперсного алмаза. В работе [12] экспериментально исследована абляция сапфира при облучении его границы раздела с водой и водными растворами KOH, KCl и Na_2CO_3 импульсами излучения гольмиевого лазера[2].

Эрбиевый лазер относится к семейству волоконных лазеров. Благодаря широкому выбору параметров волоконные лазеры нашли применение во многих сферах деятельности. В основном, они используются для гравировки и резки металлов в промышленности и для лазерной маркировки товаров, где необходимы большая пиковая мощность коротких импульсов, следующих с заданной частотой. Так, для пластика и металла используются импульсы 5—10 кВт длительностью от 10 до 100 нс при частоте следования от 20 до 200 кГц. Это позволяет изменять лишь оптические свойства поверхности без повреждения внутренней структуры изделия. Лазеры до 60 Вт используются при сварке нержавеющей стали в компонентах электроники и медицинских инструментов толщиной в десятые доли миллиметра. Для получения мощных наносекундных импульсов с частотой следования в единицы и десятки килогерц часто применяется модуляция добротности. Используя её волоконные лазеры способны генерировать излучение с энергией порядка 1 мДж в импульсе с пиковой мощностью более 100 кВт. Обычным методом получения пико- и фемтосекундных лазерных импульсов является синхронизация мод.

В [14] приведены результаты экспериментов по формированию наноструктурированных покрытий на различные подложки из коллоидных систем при лазерном импульсно-периодическом воздействии. Экспериментально показано, что формирование наноструктурированных покрытий происходит в два этапа в соответствии с траекторией перемещения лазерного пучка по поверхности подложки. Для реализации процесса абляции в [14] использовалось излучение YAG :Nd – лазера с длиной волны 1,06 мкм с модуляцией добротности. Длительность импульса составляла 100 нс, средняя мощность излучения 2,5 Вт, частота следования импульсов 20 кГц, диаметр лазерного пучка на поверхности подложки, на которой происходило формирование наноструктур, составлял 50 мкм. В качестве мишени для абляции использовались медные, кремниевые и стеклянные подложки. Процесс абляции в этом случае протекал в жидкой среде – глицерине. В ходе экспериментов на поверхности мишени формировался компактный слой, плотно сгруппированный вдоль траектории движения лазерного пучка.

В работе [10] использовались четыре источника лазерного излучения, среди которых:

1. Nd:YAG-лазер с длиной волны излучения 1,06 мкм, длительностью импульса 350 пс и частотой повторения импульсов 300 Гц.
2. Третья гармоника излучения Nd:YAG-лазера с длиной волны 355 нм, длительность импульса 150 пс и частотой повторения 10 Гц.

В качестве мишеней для абляции использовались полированные пластинки молибдена, вольфрама и титана толщиной 100 мкм. Мишень помещалась на дно стеклянной кюветы, которая заполнялась жидкостью. В первом случае кювета располагалась на управляемом компьютерном столе для ее перемещения с заданной скоростью перпендикулярно оси лазерного пучка. Во втором случае облучение проводилось в стационарном режиме. Излучение лазера фокусировалось на мишень сквозь слой жидкости толщиной несколько миллиметров. Площадь сечения пучка в плоскости мишени определялась по размерам модифицированной области. Излучения всех лазерных источников были линейно поляризованными.

В [13] представлены экспериментальные результаты по образованию наночастиц меди и ее сплава латуни при лазерной абляции в различных жидкостях. Для этих целей используются два типа лазерных источников: лазер на парах меди и Nd:YAG-лазер. Взаимодействие наночастиц с лазерным излучением может оказывать влияние на свойства наночастиц, поскольку вероятность повторного попадания наночастицы в лазерный пучок велика в случае многоимпульсного режима получения. В одной из глав работы [13] приводятся экспериментальные результаты о селективном удалении цинка из наночастиц латуни при лазерном облучении их суспензии в этаноле. Исследование спектров поглощения наночастиц показывает, что по мере облучения наночастицы латуни трансформируются в наночастицы меди.

Для лазерной абляции мишени из бронзы в [15] использовался импульсный твердотельный лазер Nd:YAG ($\lambda = 1064$ нм, 8 нс, $E = 200$ мДж, 1 Гц). Лазерное излучение фокусировали при помощи линзы ($f = 150$ мм) по нормали к поверхности образца. Расстояние между линзой и поверхностью образца составляло 149 мм, а перетяжка располагалась на глубине 1 мм за поверхностью образца. Диаметр пятна фокусировки определялся по размеру кратера на поверхности образца от одного импульса, что обеспечивало среднюю плотность энергии 300 Дж/см². Система управления лазером обеспечивала возможность генерации двух импульсов с задержкой 45 мкс за одну вспышку лампы. Изображение лазерной плазмы в масштабе 1:1 проектировалось с помощью кварцевой линзы ($f = 85$ мм) на входную щель спектрографа. Спектрограф (Jobin Yvon TRIAX 5500) был оборудован детектором на основе ПЗС-матрицы с усилителем яркости (Andor iStar). Спектральное разрешение всей системы составляло 0,1 нм, временное 10 нс. Для проверки выполнения предположения о локальном термодинамическом равновесии проводилось наблюдение небольшой локальной области плазмы. Для этого регистрировался спектр небольшого центрального участка плазмы (0.1×1 мм). Время регистрации составляло 2 мкс, задержка относительного лазерного импульса 1,5 мкс.

В работе [2] приводится ряд исследований, в которых в качестве источника излучения использовался лазер на свободных электронах, генерирующий микроимпульсы длительностью 4 мкс, которые в свою очередь состояли из серии микроимпульсов длительностью 1...2 пс. Частота повторения импульсов данного лазера составляла 30 Гц, энергия в импульсе 22,5 мДж, плотность энергии на поверхности образца – 72 Дж/см² (диаметр пятна в фокусе 200 мкм). Недостатком такого лазера является сложность его конструкции, высокая стоимость и большие габариты, что не позволяет использовать его повсеместно для технологических применений и в медицинских целях.

Для лазерной абляции металлов в жидкости и последующей генерации наноструктур в работе [10] использовалось излучение титан-сапфирового лазера с длиной волны излучения 800 нм, длительностью импульса 180 фс и частотой повторения 1 кГц.

В [14] приводятся результаты экспериментов по получению наночастиц различных металлов при воздействии лазерного излучения на массивные образцы материалов, помещенных в жидкость. Рассмотрены два сценария лазерной абляции металла в жидкости с образованием коллоидных систем с наночастицами. Мишенями являлись образцы никеля, меди, титана. Одним из источников лазерного излучения, используемых в данных экспериментах является титан - сапфировый фемтосекундный лазер с длиной волны 0,8 мкм. Средняя мощность составила 0,87 Вт, длительность импульса 50 фс, частота повторения импульсов 100 Гц/1 кГц. В качестве жидкой среды для абляции использовались этанол и глицерин.

Для изучения спектров наночастиц золота и серебра, полученных абляцией металлических мишеней в этаноле в работе [4] в качестве источника излучения используется титан-сапфировый лазер с длительностью импульса 120 фс. Плотность энергии лазерного пучка на мишени около 5 Дж/см². Для наночастиц серебра вторая гармоника излучения титан-сапфирового лазера попадает практически в максимум плазмонного резонанса, тогда как для частиц золота она заметно отстроена.

В вышеупомянутой статье [2] показано, что при облучении лазерным излучением, генерируемым лазером на парах меди аблированные области приобретают способность восстанавливать металлы (Cu или Ni) из соответствующих растворов автокаталитического осаждения. Длина волны 510 нм, длительность импульса 10 нс, частота следования 8 кГц. Проведены эксперименты по травлению поверхности сапфира лазерным излучением. После процесса травления поверхность сапфира приобретала способность восстанавливать Cu из раствора для химического меднения, образуя медное покрытие, имеющее хорошую адгезию к поверхности сапфира.

На данный момент в области лазерной абляции металлов в жидкостях существует огромное количество работ и статей, проведены разнообразные эксперименты по получению и осаждению металлических наночастиц, формированию протяженных массивов наноструктур, выявлены новые технологии получения функциональных наноматериалов. Проведя анализ широкого диапазона источников, можно сделать вывод, что для абляции металлических мишеней в жидкостях можно использовать все источники лазерного излучения, представленные в таблице 1. Однако для качественного результата процесса абляции и получения «чистого» коллоидного раствора следует использовать излучение Nd:YAG-лазера. В качестве жидкой среды для абляции следует использовать дистиллированную воду.

В данной работе для осуществления процесса абляции была собрана установка, состоящая из YAG:Nd лазера, фокусирующей системы (фокусирующая линза ($f = 95$ мм), отклоняющее зеркало), программируемого двух координатного столика с системой управления, кюветы с металлическим образцом и жидкостью, системы крепежей (рисунок 1). Таким образом, была успешно осуществлена ранее разработанная схема процесса абляции (схема 1).



Рисунок 1. Установка для абляции металлической мишени в жидкости.

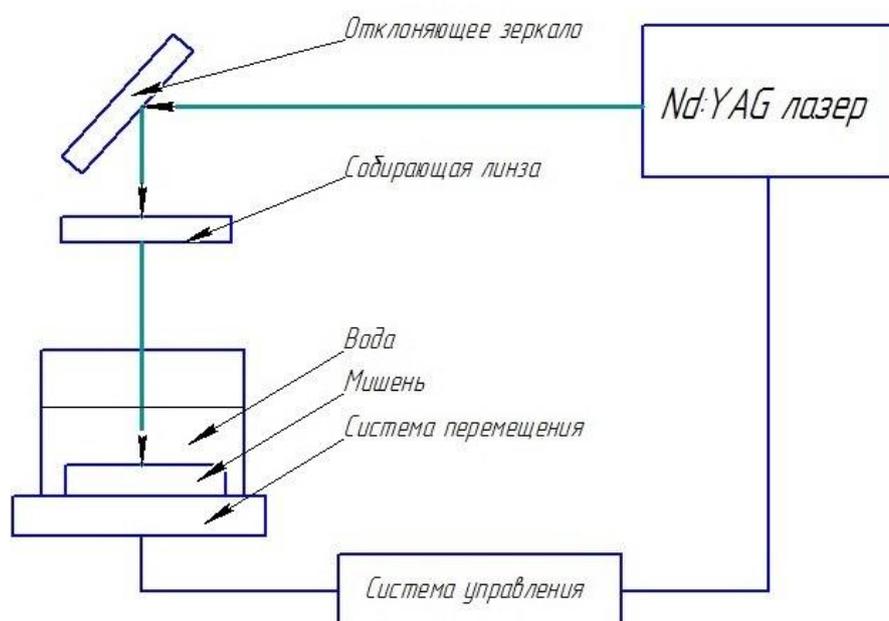


Схема 1. Схема процесса лазерной абляции металлической мишени в жидкости.

Некоторые параметры излучения Nd: YAG- лазера (рисунок 2):

Длины волн, нм1064, 532

Диаметр пучка, мм.....при 1064 нм $8 \pm 0,5$

.....при 532 нм $9 \pm 0,5$

Длительность импульса, нс..... для 1064 нм, нс 7- 9

Частота следования импульсов, Гц..... 1 -10

Угол расходимости, мрад..... на 1064 нм $1,5 \pm 0,2$

Поляризация:

При 1064 нм – вертикальная;

При 532 нм - горизонтальная.

Энергия импульса, мДж

При 1064 нм1000

При 532 нм550

Энергия импульса, получаемая при работе лазера несколько отличается от приведенных выше параметров излучения Nd: YAG- лазера и составляет 500 мДж для длины волны 532 нм.



Рисунок 2. Nd:YAG-лазер, используемый для эксперимента по абляции.

Для генерации излучения с длиной волны $\lambda=532$ нм используется генератор второй гармоники. Эффект генерации второй гармоники основан на явлении квадратичной нелинейной поляризуемости среды, в которой при прохождении света высокой интенсивности с частотой ω возникает волна с частотой 2ω . В генераторе второй гармоники используется нелинейный кристалл КТР с угловым синхронизмом. Излучение второй гармоники (532 нм) сепарируется от непреобразованного излучения основной гармоники (1064 нм) при помощи дихроичных зеркал.

В качестве образца использована латунная пластинка 20 x 30 x 1 мм. Образец помещался в объем жидкости равный 100 мл. На данный образец было произведено воздействие различным количеством импульсов лазерного излучения (от 1 до 3500). Результатом процесса абляции является коллоидный раствор латуни, представляющий из себя смесь частиц латуни с широким диапазоном размеров и формы.

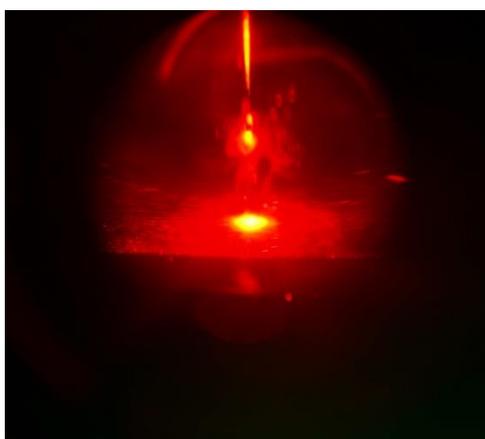


Рисунок 3. Воздействие импульсного лазерного излучения на латунный образец.

Литература:

1. Ж.И.Алферов, акад. РАН, П.С.Копьев, д-р физ.-мат. наук, проф., Р.А.Сулис, чл. корр. РАН, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург); А.Л.Асеев, чл.-корр. РАН, Институт физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск); С.В.Гапонов, чл.-корр. РАН, Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород); В.И.Панов, д-р физ.-мат. наук, проф., МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Э.А.Полторацкий, д-р физ.-мат. наук, проф., ГНИИ физических проблем им. Ф.В.Лукина (г. Москва), Н.Н.Сибельдин, д-р физ.-мат. наук, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (г. Москва). «Наноматериалы и нанотехнологии».
2. А.Н. Солдатов, А.В. Васильева. Томский «Эффект лазерной резонансной абляции в микро- и нанотехнологиях». государственный университет. 2007.
3. А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, Е.П. Павлова, В.Г. Прокошев. «Формирование протяжённых массивов наноструктур при лазерном воздействии на коллоидные системы». Владимирский государственный университет, г. Владимир.

4. А.В. Симакин, В.В. Воронов, Г.А. Шафеев. «Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях». РАН, Труды института общей физики им. А.М. Прохорова Т 60- 2004.
5. Г.Н. Макаров. «Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии». //Успехи физических наук, Т 183- №7- 2013.
6. С.А. Пячин, М.А. Пугачевский. «Новые технологии получения функциональных наноматериалов». г. Хабаровск, 2013.
7. А.В. Беликов, А.Е. Пушкарёва, А.В. Скрипник. «Теоретические и экспериментальные основы лазерной абляции биоматериалов». Учебное пособие. Министерство образования и науки РФ. Санкт-Петербургский Государственный Университет Информационных технологий, механики и оптики. 2011.
8. А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. «Технологические процессы лазерной обработки». Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008.
9. А.В. Демьяненко, В.С. Летохов, А.А. Пурецкий, Е.А. Рябов. «Эмиссионная спектроскопия углеродной плазмы при лазерной абляции. Абляция графита CO_2 – лазером, а также (совместно) XeCl - и CO_2 – лазерами». //Квантовая электроника, Т 25- №1-1998.
10. Е.В. Бармина, Э.С. Стратакис, К.Фотакис, Г.А. Шафеев. «Генерация наноструктур при лазерной абляции металлов в жидкостях: новые результаты». //Квантовая электроника. Т 40- №11- 2010.
11. Долгаев С.И., Кириченко Н.А., Кулевский Л.А. и др. «Лазерная очистка ультрадисперсного алмаза в водном растворе». // Квантовая электроника. Т 34 - №9 - 2004.
12. Долгаев С.И., Лялин А.А., Симакин А.В., Шафеев Г.А. «Растворение сапфира в сверхкритической жидкости как механизм лазерной абляции». //Квантовая электроника. Т 31 - №7 - 2001.
13. П.В. Казакевич. «Образование наночастиц при лазерной абляции металлов в жидкостях». 2008.
14. А.А. Антипов. «Лазерные методы получения и осаждения коллоидных систем на поверхность твердых тел». 2013.
15. С.М. Першин, В.Н. Леднев, А.Ф. Бункин. «Лазерная абляция сплавов: физика селективного испарения компонентов». 2011.