

Мирошниченко Илья Борисович

**Энергетические и спектральные характеристики ударных
волн, создаваемых оптическим пульсирующим разрядом,
горящим на поверхности твердых тел**

Специальность 01.04.05 —
«Оптика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2016

Работа выполнена в «Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук» и «Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Новосибирском государственном техническом университете»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Тищенко Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: **Шулятьев Виктор Борисович,**

доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук,
старший научный сотрудник

Кабанов Андрей Михайлович,

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Защита состоится «__» _____ 20__ г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 003.024.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт лазерной физики СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, просп. академика Лаврентьева, 13/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (<http://www.laser.nsc.ru>) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 003.024.01, к.ф.-м.н.



Никулин Н.Г.

Общая характеристика работы

Состояние научной проблемы и актуальность темы исследования.

Лазерная искра и оптоакустические эффекты, создаваемые при облучении твердых тел и жидкостей одиночными лазерными импульсами или с низкой частотой повторения исследовались многими авторами, например, [1–8].

В 1992 году, благодаря появлению мощных импульсно-периодических (ИП) лазеров с высокой частотой повторения импульсов (~100 кГц) и пиковой мощностью (в ~10-100 раз большей средней) [9–12], создан оптический пульсирующий разряд (ОПР). ОПР открыл новые возможности применения лазеров: в аэрокосмических приложениях [9, 13], стабилизация горения топлив [14], в лазерно-плазменных технологиях [15], для создания низкочастотного звука и ультразвука с использованием механизма объединения волн (МОВ). МОВ доказан для точечного ОПР в газах и в плазме с магнитным полем [16–18]. Суть МОВ — фазы сжатия периодических ударных волн (УВ), создаваемых при расширении плазмы оптических пробоев, частично объединяясь, образуют протяженную квазистационарную волну (КВ). ОПР и МОВ позволяют создать точечный источник интенсивного звука с перестраиваемым спектром [19], который способен одновременно генерировать инфра- и ультразвук.

В диссертации впервые исследуется МОВ в условиях, когда ОПР создается на поверхности твердых тел, что актуально для создания интенсивного точечного источника инфра- ультразвука, локализованного на большом расстоянии от лазера. В традиционных методах акустики дальность ограничена поглощением ультразвука в воздухе и широкой диаграмма направленности низкочастотного звука. Экспериментально обоснованы условия эффективного создания звука на мишенях из различных материалов, облучаемых ИП излучением, в том числе, широкоапертурным, что соответствует большому расстоянию до мишени. Возможность транспортировки ИП излучения в атмосфере показана в [20].

Целью данной работы является исследование энергетических и спектральных характеристик ударных волн, создаваемых оптическим пульсирующим разрядом, горящим на поверхности твердых тел.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Найти условия проявления механизма объединения ударных волн, создаваемых при облучении мишени широкоапертурным излучением.

2. Исследовать эффективность генерации ударных волн, создаваемых оптическим пульсирующим разрядом, горящим на поверхности мишеней из различных материалов.
3. Изучить спектр звука оптического пульсирующего разряда при высокой частоте повторения лазерных импульсов.

Научная новизна заключается в том, что впервые найдены:

1. Критерии проявления механизма объединения ударных волн, создаваемых при облучении мишеней широкоапертурным импульсно-периодическим лазерным излучением.
2. Условия эффективного преобразования энергии лазерных импульсов в ударные волны, создаваемые при горении оптического разряда на поверхности твердых тел из различных материалов.
3. Параметры импульсно-периодического лазерного излучения (частота повторения и энергия импульсов), при которых спектр звука оптического пульсирующего разряда имеет качественно различную структуру, что связано с проявлением механизма объединения ударных волн.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Условия проявления механизма объединения ударных волн, полученные для точечного оптического пульсирующего разряда, горящего в газе применимы для оптического пульсирующего разряда, создаваемого на поверхности твердых тел, в том числе и широкоапертурными лазерными импульсами.
2. Оптический пульсирующий разряд, горящий на мишенях из различных материалов, поглощающих лазерное излучение в тонком слое, преобразует в звук ~20% от мощности подводимого импульсно-периодического излучения при оптимальной плотности энергии на мишени ~10 Дж/см² для импульсов СО₂-лазера длительностью ~1 мкс.
3. Спектр звука при облучении мишени периодическими цугами ИП излучения зависит от параметров лазера. На низких частотах f следования

импульсов в цугах, когда МОВ не действует, спектр звука содержит большое количество линий. Увеличение f и/или мощности излучения сопровождается уменьшением числа линий, возможна генерация одной линии. Действие МОВ в области высоких частот сопровождается качественным изменением структуры спектра по мере повышения f : линия на частоте f ; одновременно линии на частоте f и частоте цугов $F \ll f$.

Научная и практическая значимость. Впервые показано, что МОВ действует не только в газах, но и при облучении мишени ИП излучением, в том числе, широкоапертурным, что дополнительно подтверждает гипотезу об универсальности МОВ и его применимость для формирования звука на мишенях из различных материалов, находящихся на большом расстоянии от лазера. Метод позволяет управлять структурой спектра в инфра-ультразвуковом диапазоне частот, что трудно достижимо в традиционных методах акустики, а также при низкой частоте повторения лазерных импульсов. Управление осуществляется за счет изменения плотности энергии лучей на мишени и временной структуры ИП излучения — частоты повторения цугов лазерных импульсов и частоты импульсов в цугах. Результаты исследований актуальны также в лазерно-плазменных технологиях обработки материалов, где необходимо учитывать влияние звука и вибраций мишени на физические процессы и персонал.

Работа была поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания, код проекта 1316, РФФИ проект №09-08-00830-а.

Методы исследования: эксперименты проведены на двух лазерных стендах ИЛФ СО РАН: импульсно-периодический CO_2 -лазер со средней мощностью ~ 1 -2 кВт, частота повторения импульсов ~ 3 -180 кГц; CO_2 -лазеры с энергией в импульсе до ~ 200 Дж использовались для исследования критериев МОВ и эффективности генерации звука при облучении мишени широкоапертурными импульсами. Измерялись — давление в создаваемых ОПР ударных волнах, параметры лазерного излучения, подводимого к ОПР и прошедшего через него. Анализ сигналов проведен с использованием преобразования Фурье. Расчетные модели, используемые в диссертации, построены на основе численного решения уравнений гидродинамики.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается сравнением данных, полученных в опытах, с данными других авторов. Достоверность рас-

четов обеспечивается проверкой выполнимости законов сохранения импульса и энергии, а также проверкой алгоритмов на задачах с известным результатом.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: IV-ой всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине», «Сессии Научного совета РАН по акустике и XXIV сессии Российского акустического общества», VI-ой всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине».

Личный вклад. Все результаты данной работы получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в планировании, подготовке и проведении экспериментов, занимался обработкой и анализом экспериментальных данных, проведением расчетов, подготовкой публикаций.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 — в трудах конференций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет: количество страниц машинописного текста — 124, количество рисунков — 90, количество таблиц — 1, количество литературных источников — 111.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **Первой главе** приводится обзор литературы по теме диссертации.

В **разделе 1.1** рассматриваются механизмы, которые лежат в основе оптоакустического эффекта, обсуждаются их преимущества и недостатки. Эффективность фотоакустического преобразования растет при повышении энергии лазерных импульсов в режиме оптического пробоя. Основная часть исследований посвящена генерации звука в жидкости одиночными импульсами или с низкой частотой повторения импульсов. МОВ действует и формирует низкочастотный звук при частоте ИП излучения ~ 100 кГц.

Раздел 1.2 посвящен импульсно-периодическим лазерам с высокой частотой повторения импульсов (~ 100 кГц) и высоким превышением пиковой мощности над средней (~ 10 - 100 раз). Применениям таких лазеров в науке и технике. ОНР и МОВ перспективны в актуальных аэрокосмических приложениях, лазерно-плазменных технологиях, задаче дистанционного создания низкочастотного звука и ультразвука.

В **разделе 1.3** рассматривается МОВ для горящего в газе ОНР. Высокий порог оптического пробоя воздуха ~ 1 ГВт/см² ограничивает дальность создания ОНР. Дистанционное формирование ОНР и звука возможно при облучении ИП излучением твердых тел, где порог меньше на ~ 2 порядка [5].

В **разделе 1.4** лазерный способ генерации интенсивного инфра-ультразвука сравнивается с традиционными методами акустики, где дальность ограничена поглощением ультразвука на расстоянии 50-100 м и широкой диаграммой направленности низкочастотного звука. Методы амплитудной модуляции и генерации разностной частоты неэффективны. ИП излучение и МОВ позволяют создавать звук на большом расстоянии, которое ограничено мощностью лазера и атмосферными условиями. Причем, звук локализован вблизи облучаемой мишени.

В **разделе 1.5** рассматриваются существующие или доступные в ближайшей перспективе мощные лазерные установки, так как для дистанционного создания ОНР необходимы высокие средние мощности ИП лазерного излучения ~ 100 кВт. Наиболее мощными на данный момент (\sim МВт) являются химические лазеры. Их главные недостатки: большие габариты, токсичность, высокая стоимость создания и эксплуатации. Более перспективны твердотельные лазеры, которые активно развиваются. В настоящее время получены мощности, превышающие 100 кВт (Textron, Northrop Grumman и General Atomics) в непрерывном режиме при эффективности $\sim 20\%$. Ожидаемое отношение веса лазера к средней мощности ~ 4 - 5 кг/кВт [21]. Такие характеристики достижимы благодаря новейшим технологиям, таким как: лазерные диоды, эффективность которых 80–90%; лазерная керамика; новые формы лазерных сред (тонкие диски, вращающиеся диски). Из оценок следует, что твердотельные лазеры с непрерывной накачкой активной среды можно перевести в режим генерации ИП излучения с использованием методов [10–12].

Вторая глава посвящена поиску критериев проявления МОВ для оптических пробоев, создаваемых при облучении мишени широкоапертурным сфоку-

сированным ИП излучением. Размер лучей на мишени, находящейся на большом расстоянии, может существенно превышать толщину оптического пробоя на начальной стадии теплового расширения лазерной плазмы — «плоский» оптический пробой. В [22] критерии получены ранее для неподвижного и движущегося в газе ОПР и соответствуют точечному оптическому пробую.

В разделе 2.1 описаны методы лабораторного моделирования взаимодействия широкоапертурного ИП излучения с мишенями из разных материалов. Для исследования формирования и взаимодействия ударных волн, создаваемых в результате облучения мишени, использовалась схема, изображенная на рисунке 1.

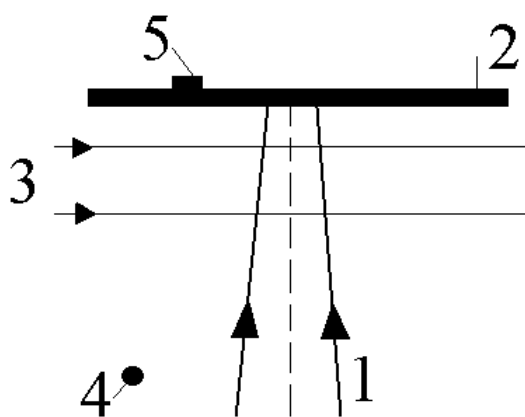


Рисунок 1. Схема измерения энергии и спектра ударных волн. 1 – подводимое лазерное излучение, 2 – мишень, 3 – лучи теневой диагностики, 4 – датчик давления УВ, 5 – датчик давления для измерения вибраций мишени

В качестве мишени рассматривался набор широко распространенных материалов: металлы (сталь, серебро, титан) и диэлектрики (стекло, оргстекло, капролон). Оргстекло и капролон — органические соединения. Серебро и титан имеют характеристики — полярные по отражению излучения и теплопроводности показатели, сталь — промежуточный случай. Стекло, в отличие от капролона, поглощает излучение в тонком слое, энергия на испарение много больше, чем для оргстекла или капролона. Исследования этих материалов, со столь разными характеристиками позволяет обобщить результаты на широкий класс мишеней.

Излучение двух CO_2 -лазеров (условно L_1 и L_2) с длиной волны 10,6 мкм, подводилось к мишени под прямым углом через линзу с фокусным расстоянием 120 см. Мишень располагалась на расстоянии 60–100 см от линзы. Центры лучей были совмещены на мишени. Длительность лазерных импульсов, составляла ~1 мкс.

Площадь облучения S варьировалась от 2 до 38 см² в зависимости от расстояния между мишенью и линзой. Мишень — диск толщиной 3-25 мм. Диаметр диска ~50 см был больше зоны облучения и расстояния до датчика давления. Избыточное давление в УВ измерялось датчиком, расположенным на расстоянии $r = 27$ см от центра облучения и 23 см от поверхности. На данном расстоянии форма УВ близка к полусферической. Значение r приблизительно равно динамическому радиусу плазмы оптического пробоя. Это позволяло определить энергию УВ с использованием одного датчика, измеряющего давление УВ в одной точке.

Для визуализации градиентов плотности использовался теневой метод [23]. Теневые снимки получены сотрудниками ИТПМ СО РАН (Павловым А.А., Павловым Ал.А., Голубевым М.П.) в рамках совместного проекта. Длина волны зондирующего лазерного излучения $\lambda = 0,63$ мкм, время экспозиции равнялось 2 мкс. Диаметр оптического пучка составлял 15 см, его ось смещена на ~6 см от поверхности мишени.

Энергия УВ вычислялась при помощи выражения:

$$E = \frac{2\pi r^2 k^2}{\rho c} \int_{\tau} U^2(t) dt \quad (1)$$

где r — расстояние от лазерной искры до датчика избыточного давления, k — калибровочный коэффициент датчика, ρ — плотность воздуха при нормальных условиях, c — скорость звука в воздухе при нормальных условиях, U — напряжение сигнала измеряемого датчиком, τ — длительность сигнала.

Раздел 2.2 посвящен калибровке датчика избыточного давления, используемого в экспериментах. Использовался метод калибровки датчиков с использованием ударной трубы. Достоверность измерений подтверждается сравнением с эмпирическими зависимостями [24] давления при точечных взрывах.

В **разделе 2.3** с использованием экспериментальных данных показано, что критерии проявления МОВ при облучении мишени широкоапертурным ИП лазерным излучением имеют тот же вид, что и для горящего в газе ОПР.

Критерии проявления МОВ для ОПР горящего в газе в случае неподвижного разряда имеют вид:

- при $\omega < \omega_s \approx 0,5 - 0,7$ УВ не взаимодействуют

- при $\omega > \omega_0 \approx 5$ фазы сжатия УВ взаимодействуют «сильно» и, частично объединяясь, создают низкочастотную волну
- при $\omega_s < \omega < \omega_0$ промежуточная область безразмерных частот, в которой волны взаимодействуют «слабо»
- область $\omega > 1,5 \cdot \omega_0$ энергетически неэффективна, так как фронт последующей УВ догоняет фронт предыдущей, вследствие чего давление растет, а длительность фазы сжатия результирующей волны меняется слабо

Здесь $\omega = fR_d/c$ – безразмерная частота повторения лазерных импульсов, f – частота повторения лазерных импульсов (Гц), $R_d = \sqrt[3]{b\delta Q/p_0}$ – динамический радиус лазерной искры, Q – энергия лазерных импульсов, $\delta \sim 0,3 - 0,5$ – доля энергии импульсов, поглощаемая в плазме, b – геометрический фактор (1 – пробой в газе, 2 – пробой на мишени), p_0 – давление воздуха.

Определены максимальные значения радиуса светового пятна $R_M = \pi q/(g^3 p_0)$ и энергии импульсов $Q_M = \pi^3 q^3/(g^6 p_0^2)$, при которых оптический разряд еще можно считать точечным. Здесь $g \sim 3$ – отношение динамического радиуса точечного взрыва с энергией, равной энергии «плоского» оптического пробоя, к радиусу R_M . Соответствующая частота ИП излучения равна $f_M = \omega \cdot c/R_d$. Полагая $\omega = 3$, $q = 10$ Дж/см², $p_0 = 10^5$ Па, находим: $R_M \approx 12$ см, $Q_M \approx 4,2$ кДж, $f_M \approx 3$ кГц и $W_M = Q \cdot f \approx 12$ МВт, что показывает применимость критериев для всего реально достижимого диапазона мощностей.

Безразмерная частота ω варьировалась при помощи изменения времени задержки между импульсами. Лабораторное моделирование показало, что критерии МОВ применимы в случае облучения мишени широкоапертурными лазерными импульсами с учетом ограничений на диаметр пятна.

На рисунке 2 показаны осциллограммы избыточного давления, выбранные из большого массива экспериментальных данных, которые наглядно демонстрируют полученные результаты. Осциллограммы слева получены при облучении оргстекла при плотностях облучения $S_1 = 38$ см², $S_2 = 22$ см². Видно, что при $\omega_s < \omega = 2 < \omega_0$ волны взаимодействуют «слабо» – фаза сжатия следующей УВ взаимодействует с фазой пониженного давления предыдущей. При $\omega = 6,7$ видно взаимодействие фаз сжатия ударных волн. При больших ω длительность результирующей волны не увеличивается относительно длительности одиноч-

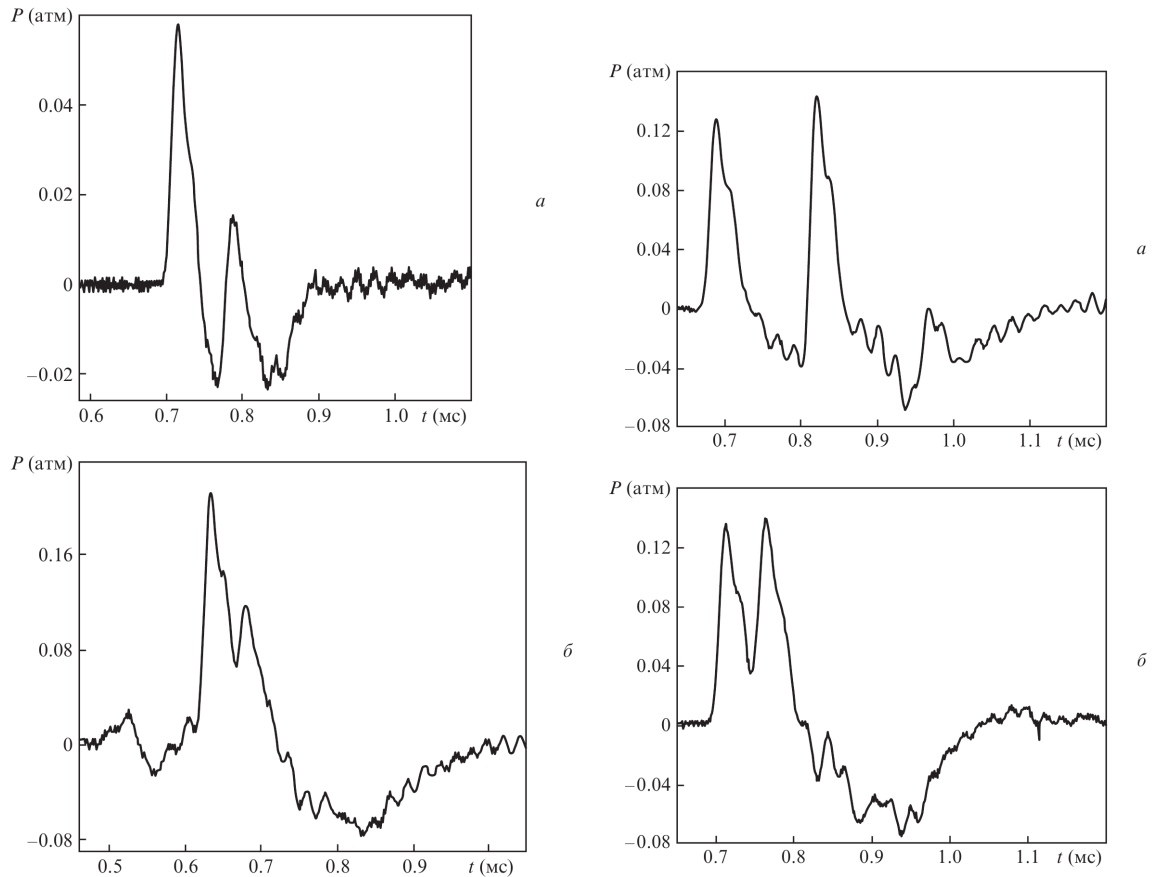


Рисунок 2. Временные зависимости давления $P = p - p_0$ в УВ, создаваемых при облучении оргстекла (панель слева) и стали (панель справа). Панель слева: площади пучков $S_1 = 38 \text{ см}^2$, $S_2 = 22 \text{ см}^2$. Варьируемые параметры: $Q_1 = 183 \text{ Дж}$, $Q_2 = 109 \text{ Дж}$, $t_d = 150 \text{ мкс}$, $\omega = 2$ (а), $Q_1 = 191 \text{ Дж}$, $Q_2 = 121 \text{ Дж}$, $t_d = 46 \text{ мкс}$, $\omega = 6,7$ (б). Панель справа: площади пучков $S_1 = 4,2 \text{ см}^2$, $S_2 = 2,44 \text{ см}^2$. Варьируемые параметры: $Q_1 = 28 \text{ Дж}$, $Q_2 = 21 \text{ Дж}$, $t_d = 54 \text{ мкс}$, $\omega = 2,9$ (а), $Q_1 = 173 \text{ Дж}$, $Q_2 = 117 \text{ Дж}$, $t_d = 54 \text{ мкс}$, $\omega = 5,5$ (б)

ной УВ. Аналогичная ситуация наблюдается при облучении мишени из стали, причем для гораздо меньшей площади облучения: $S_1 = 4,2 \text{ см}^2$ и $S_2 = 2,44 \text{ см}^2$ (рисунок 2 справа).

Таким образом, показано, что критерии объединения УВ [22], полученные для горящего в газе ОПР, применимы при облучении мишеней из различных материалов широкоапертурным импульсно-периодическим лазерным во всем реально достижимом диапазоне мощностей современных лазеров. Критерии позволяют определить параметры импульсно-периодического излучения, при которых возможно формирование звука со спектром, содержащим ультразвуковую и сильную низкочастотную компоненты. Область применения критериев ограничена материалами, поглощающими излучение CO_2 -лазеров в тонком слое мишени.

Третья глава посвящена исследованию влияния параметров лазерного излучения и материала мишени на эффективность формирования ударных волн оптическим пульсирующим разрядом, горящем на поверхности мишеней из различных материалов. Дистанционное создание звука предполагает, что материал мишени может быть неизвестен.

В **разделе 3.1** проводится анализ известных экспериментальных данных и моделей, описывающий оптический пробой на твердых телах с целью обоснования выбора материалов мишеней для экспериментов. Выбраны материалы с разными физическими свойствами для обобщения результатов на широкий класс мишеней. Серебро имеет высокую теплопроводность и максимальный коэффициент отражения лазерного излучения, титан обладает противоположными свойствами, сталь занимает промежуточное положение. Для оконного стекла (неорганика) характерна высокая температура плавления и поглощение излучения в тонком поверхностном слое. Капролон, оргстекло (органика) отличаются большей глубиной поглощения излучения и малыми затратами энергии на испарение.

В **разделе 3.2** приведены результаты экспериментов по исследованию влияния материала мишени и площади облучения на эффективность преобразования энергии лазерного излучения в звук.

На рисунке 3 и рисунке 4 показаны зависимости эффективности преобразования энергии лазерных импульсов в звук (далее КПД) от плотности энергии облучения мишеней из различных материалов. Также варьировалась форма импульсов. КПД практически линейно возрастает до уровня (~15-20%) по мере

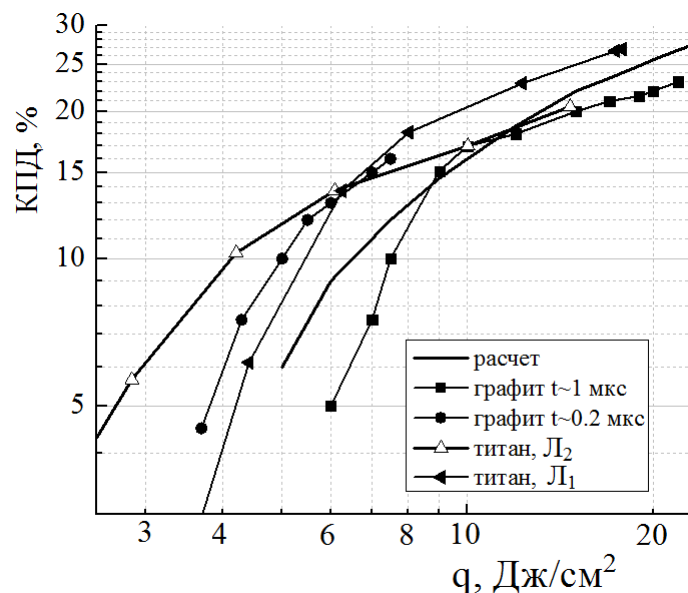


Рисунок 3. Зависимость эффективности преобразования энергии лазерных импульсов от плотности энергии в лучах на мишени. Расчет, графит [25] и титан при разной форме импульса

увеличения плотности облучения (до $q \sim 8 - 10 \text{ Дж/см}^2$), а затем зависимость от плотности облучения становится более слабой. Кроме того, заметно влияние формы лазерного импульса. Эффективность преобразования для диэлектриков ниже, чем для металлов.

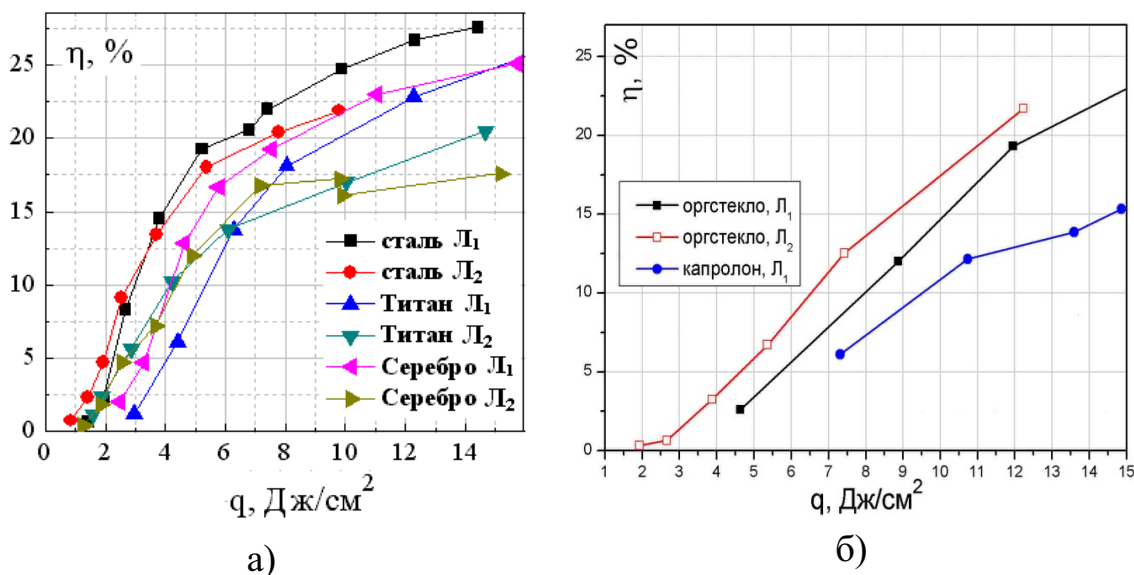


Рисунок 4. Зависимость КПД от плотности облучения мишеней из а) металлов и б) диэлектриков

Таким образом, лазерное излучение эффективно преобразуется в звук ($\eta \approx 15 - 20\%$) при плотности облучения $q \sim 10 \text{ Дж/см}^2$ мишеней из различных материалов СО₂-лазером с длительностью импульсов $\sim 1 \text{ мкс}$. Также возможно

увеличение эффективности, связанное с оптимизацией формы и длительности лазерного импульса. Дальнейшее увеличение q ограничено оптическими пробоями при прохождении излучения в атмосфере [6, 20].

В **разделе 3.3** приведена оценка параметров ИП излучения, удовлетворяющих проявлению МОВ при дистанционном широкоапертурном облучении мишени для разных длин волн.

Из оценок следует, что для создания ОПР и МОВ на расстоянии ~ 3 км (без учета атмосферных эффектов, связанных с транспортировкой) требуется ~ 100 кВт средней мощности лазерного излучения (для длины волны 1,06 мкм), что, как показано в разделе 1.5, принципиально достижимо уже в настоящее время при условии перевода существующих лазеров в ИП режим.

В **четвертой главе** с использованием экспериментальных данных исследуется влияние мощности и временной структуры ИП излучения (частоты повторения цугов и лазерных импульсов в цугах) на спектр ударных волн, создаваемых оптическим пульсирующим разрядом. Исследование актуально в задаче создания инфра- ультразвука с использованием мощного ИП излучения.

В **разделе 4.1** при помощи расчетов [26] получены выражения (2) для граничных частот ω_s и ω_+ . Частоты задают выделяют области безразмерных частот $\omega = f \cdot R_d/c$, в которых спектр УВ имеет качественно разную структура. При $\omega < \omega_s$ — волны не взаимодействуют; $\omega_s < \omega < \omega_+$ — волны взаимодействуют «слабо» (фаза сжатия следующей УВ взаимодействует с фазой пониженного давления предыдущей); при $\omega > \omega_+$ — взаимодействуют фазы сжатия УВ, проявляется МОВ, ω_0 — характерное значение безразмерной частоты, соответствующее сильному проявлению МОВ.

$$\begin{aligned}\omega_s &= 0,77 \cdot R^{-0,1}; \\ \omega_+ &= 3,85 \cdot R^{-0,32}; \\ \omega_0 &\approx 5\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь R — расстояние от мишени, нормированное на динамический радиус.

В **разделе 4.2** рассмотрен спектр невзаимодействующих периодически повторяющихся ударных волн ($\omega < \omega_s$). Акустический сигнал синтезировался из одиночных УВ программным образом. В качестве одиночной УВ был взят массив данных, полученных в эксперименте по облучению мишени мощным лазерным импульсом. Спектр был получен с использованием преобразования Фурье.

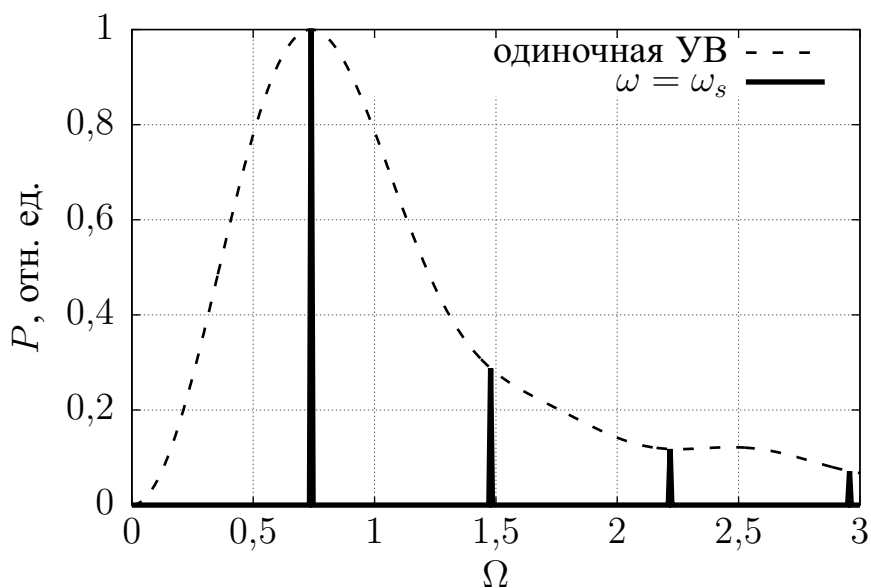


Рисунок 5. Спектр мощности УВ, повторяющихся с частотой $\omega = \omega_s$

Характерная структура спектра для данного случая показана на рисунке 5: спектр периодически повторяющихся УВ представлен большим количеством линий в широком диапазоне частот, заполняющих огибающую, которая является спектром одиночной УВ. Максимум огибающей находится на частоте ω_s . Количество линий в спектре определяется как отношение ширины спектра одиночной УВ к частоте ИП излучения. Расстояние между линиями равно частоте повторения лазерных импульсов, а значит и УВ. По мере распространения волн от источника спектр акустического сигнала сдвигается в низкочастотную область из-за «расплывания» одиночных УВ, а также из-за поглощения ультразвука в атмосфере.

В разделе 4.3 приведены результаты экспериментов по облучению мишени импульсно-периодическим лазерным излучением средней мощностью до ~ 1 кВт, которая меняется в зависимости от частоты повторения, длительность импульса ~ 1 мкс. Варьировалась частота повторения импульсов, а значит и ω .

На рисунках 6, 7 и 8 представлены сигналы и спектры мощности экспериментальных «пусков», наиболее полно отражающих полученные результаты. Количество импульсов — несколько тысяч.

На рисунке 6 показан случай $\omega \approx 0,06 < \omega_s$, который находится в хорошем соответствии со спектром, полученным в разделе 4.2.

Рисунок 7 соответствует $\omega_s < \omega < \omega_+$. Структура спектра представлена несколькими гармониками частоты ω , причем максимальную мощность имеет основная линия.

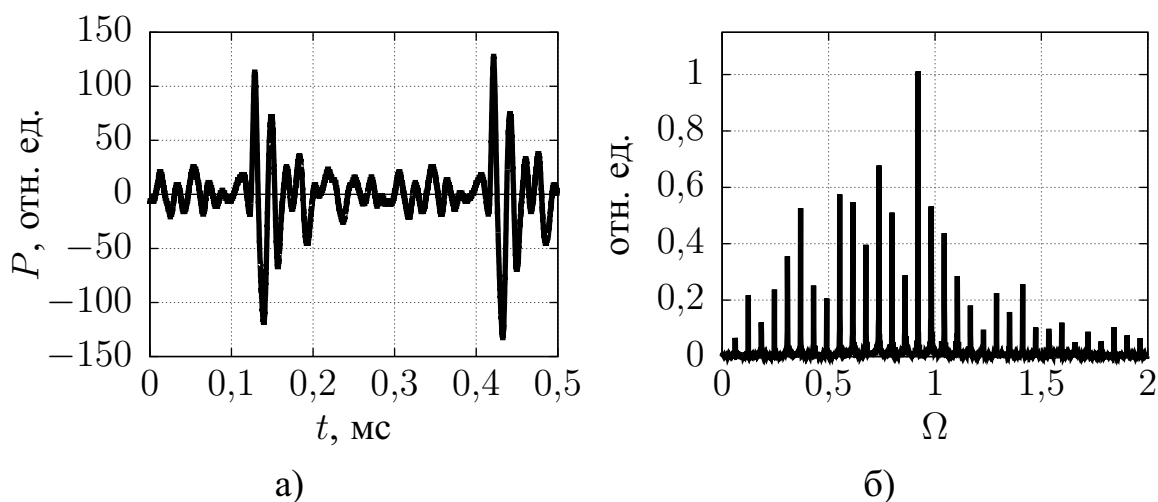


Рисунок 6. а) сигнал и б) спектр периодических УВ: $f = 3,4$ кГц, $r = 21$ см, $R = 34$, $\omega = 0,06$

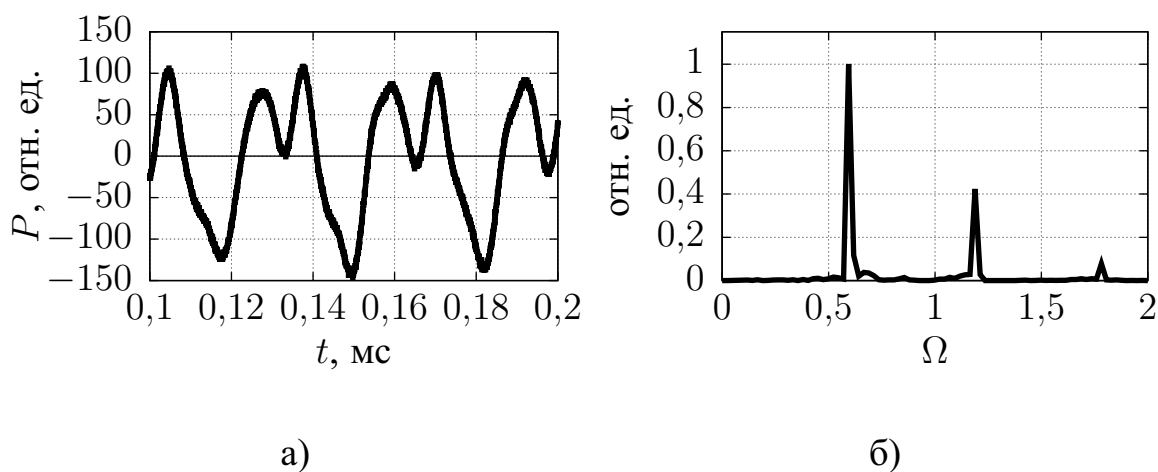


Рисунок 7. а) сигнал и б) спектр периодических УВ: $f = 30$ кГц, $W = 810$ Вт, $r = 55$ см, $R = 85$, $\omega = 0,57$

Рисунок 8 соответствует условию $\omega > \omega_+$. В данном случае спектр состоит из одной — основной линии на частоте ω .

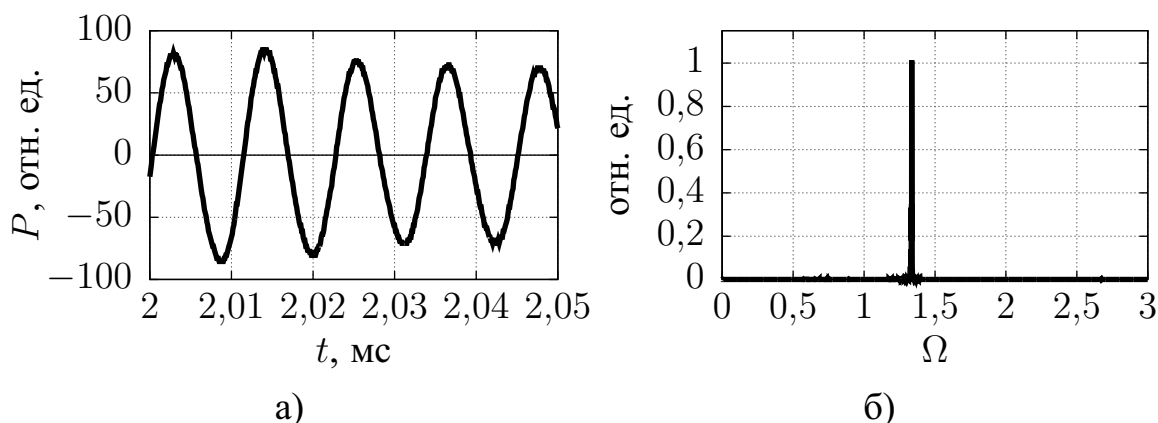


Рисунок 8. а) сигнал и б) спектр периодических УВ: $f = 89$ кГц,
 $W = 1160$ Вт, $r = 21$ см, $R = 42$, $\omega = 1,3$

Таким образом, полученные граничные частоты выделяют области с качественно различной структурой спектра звука ОПР. При $\omega < \omega_s$ — спектр представлен большим количеством линий в широком диапазоне частот; при $\omega_s < \omega < \omega_+$ — в спектре присутствует несколько гармоник, причем максимальной мощностью обладает основная; $\omega > \omega_+$ соответствует преимущественно одной линии в спектре.

В разделе 4.4 приводятся оценки структуры спектра оптического пульсирующего разряда в зависимости от параметров ИП лазерного излучения, что важно с практической точки зрения. На рисунке 9 приведена зависимость граничных размерных частот повторения импульсов от средней мощности лазерного излучения для получения той или иной качественной структуры спектра. В каждую область на рисунке вставлена соответствующая схематичная структура спектра.

Рисунок 9 позволяет оценить требуемую мощность лазерного излучения для достижения той или иной структуры спектра звука ОПР. Например, для лазера, средняя мощность которого 100 кВт, для получения единственной линии в спектре необходима частота повторения импульсов более ~ 10 кГц

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Определены условия проявления механизма объединения ударных волн, создаваемых при облучении мишеней, в том числе широкоапертурным, импульсно-периодическим излучением.

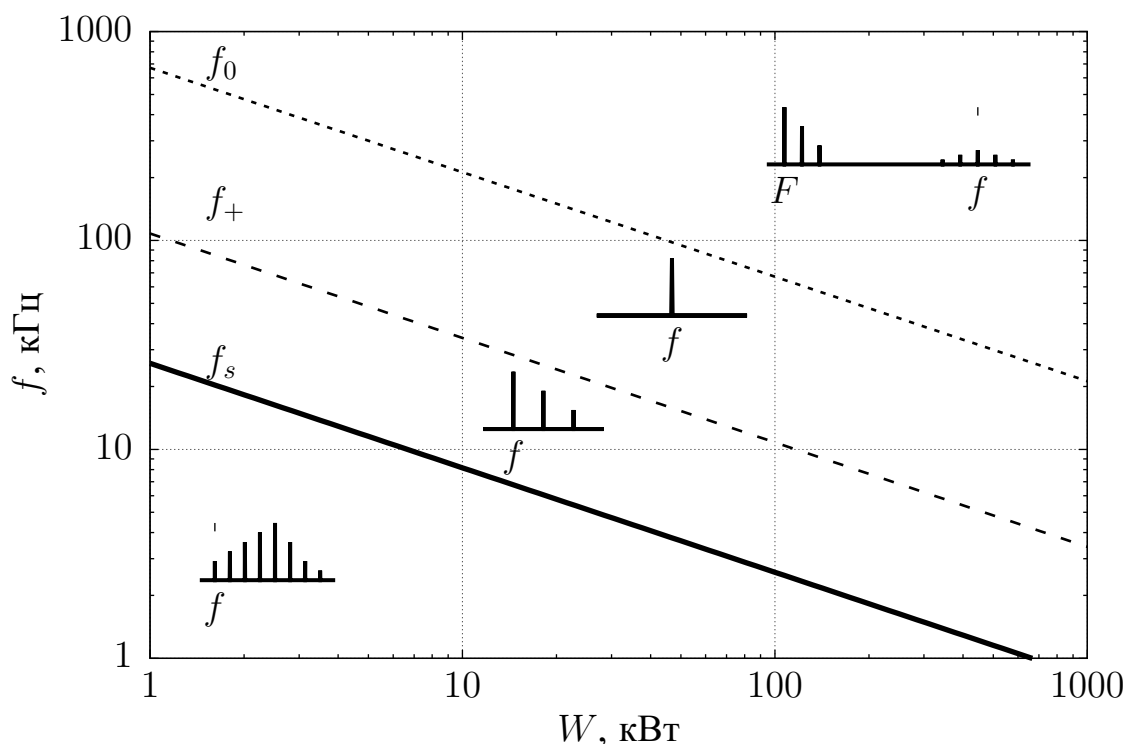


Рисунок 9. Зависимость граничных частот от средней мощности лазерного излучения для $R = 20$. На вставках схематично представлены структуры спектров, соответствующие каждой области. f — частота повторения импульсов в цугах, F — частота повторения цугов ИП излучения.

2. Определены условия эффективного преобразования энергии лазерных импульсов в ударные волны, создаваемые при горении оптического разряда на поверхности твердых тел из различных материалов.
3. Найдены области параметров импульсно-периодического лазерного излучения (частота повторения и средняя мощность), при которых спектр звука оптического пульсирующего разряда имеет качественно различную структуру, что связано с проявлением механизма объединения ударных волн.

Публикации автора по теме диссертации

1. Тищенко В.Н., Посух В.Г., Гулидов А.И., Запругаев В.И., Павлов А.А., Бояринцев Э.Л., Голубев М.П., Кавун И.Н., Мелехов А.В., Голобокова Л.С., Мирошниченко И.Б., Павлов Ал.А., Шмаков А.С. Критерии формирования низкочастотного звука при облучении твердых тел широкоапертурным импульсно-периодическим лазерным излучением // *Квантовая электроника*. — 2011. — Т. 41, № 10. — С. 895–900.

2. Тищенко В.Н., Посух В.Г., Бояринцев Э.Л., Мелехов А.В., Голобокова Л.С., Мирошниченко И.Б. Эффективность формирования ударных волн, создаваемых оптическими пробоями на поверхности твердых тел // *Оптика атмосферы и океана*. — 2012. — Т. 25, № 5. — С. 448–450.
3. Тищенко В.Н., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Павлов А.А., Бояринцев Э.Л., Голобокова Л.С., Голубев М.П., Кавун И.Н., Мелехов А.В., Мирошниченко И.Б., Павлов Ал.А., Шмаков А.С. Лабораторное моделирование лазерного источника звука: критерии и эффективность формирования // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: доклады IV всероссийской конференции*, Новосибирск, Россия, 22-25 марта 2011 г. — Новосибирск: Нонпарель, 2011.
4. Тищенко В.Н., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Павлов А.А., Бояринцев Э.Л., Голобокова Л.С., Голубев М.П., Кавун И.Н., Мелехов А.В., Мирошниченко И.Б., Павлов Ал.А., Шмаков А.С. Лазерный источник звука, создаваемый при облучении мишени широкоапертурным излучением // *Научная конференция: Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества (Саратов, 12-15 сент. 2011 г.)*. : Сборник трудов. — Т. 2. — М.: ГЕОС, 2011. — С. 67–71.
5. Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Мирошниченко И.Б., Смирнов А.Л., Стаценко П.А. Инфра- ультразвук, создаваемый при облучении стали импульсно-периодическим лазерным излучением // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI Всероссийской конференции*. Т. 2, Новосибирск, Россия, 24-27 марта 2015 г. — Новосибирск: Параллель, 2015. — С. 106–111.
6. Тищенко В.Н., Бояринцев Э.Л., Мирошниченко И.Б., Мелехов А.Г., Пономаренко А.Г., Посух В.Г. Ударные волны, создаваемые оптическими пробоями на поверхности твердых тел // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI Всероссийской конференции*. Т. 2, Новосибирск, Россия, 24-27 марта 2015 г. — Новосибирск: Параллель, 2015. — С. 98–101.

7. Грачев Г.Н., Дмитриев А.К., Мирошниченко И.Б., Смирнов А.Л., Тищенко В.Н. Спектр звука оптического пульсирующего разряда // *Квантовая электроника*. — 2016. — Т. 46, № 2. — С. 169–172.

Список используемой литературы

1. Бункин Ф.В., Комиссаров В.М. Оптическое возбуждение звуковых волн. (Обзор) // *Акустический журнал*. — 1973. — Т. 19, № 3. — С. 305–320.
2. Ляшнев Л.М. Оптико-акустические источники звука // *Успехи физических наук*. — 1981. — Т. 135, № 12. — С. 637–669.
3. Островская Г. В., Зайдель А. Н. Лазерная искра в газах // *Успехи физических наук*. — 1973. — Т. 111, № 12. — С. 579–615.
4. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. — М.: Наука, 1974. — 308 с.
5. Прохоров А.И., Конов В.И., Урсу И., Михэилеску И.Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. — М.: Наука, 1988. — 538 с.
6. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зувев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. — Изд-во СО РАН, 1999. — 259 с.
7. Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Багаев С.Н., Матвиенко Г.Г., и др. Фемтосекундная атмосферная оптика. — Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, 2010.
8. Бочкарев Н.Н., Кабанов А.М., В.А. Погодаев. Оптоакустика канала распространения мощного лазерного излучения в атмосфере // *Оптика атмосферы и океана*. — 2003. — Т. 16, № 9. — С. 816–821.
9. Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. Стабилизация оптического разряда в сверхзвуковом потоке аргона. // *ДАН*. — 1994. — Т. 336, № 4. — С. 466–467.
10. Grachev Gennady N., Ponomarenko Arnold G., Smirnov Alexander L., Shulyatyev Victor B. Multifunctional 3-kW CO₂ laser with controllable spectral and temporal characteristics for industrial and scientific applications // *Proc. SPIE*. — 2000. — Vol. 4165. — Pp. 185–196.

11. *Аполлонов В.В., Кийко В.В., Кислов В.И., Суздальцев А.Г., Егоров А.Б.* Высокочастотный импульсно-периодический режим излучения в мощных широкоапертурных лазерах // *Квантовая электроника*. — 2003. — Т. 33, № 9. — С. 753–757.
12. *Малов А.Н., Оришич А.М., Шулятьев В.Б.* Мощный импульсно-периодический СО₂-лазер с механической модуляцией добротности и его применение для исследований в аэродинамических установках // *Квантовая электроника*. — 2011. — Т. 41, № 11. — С. 1027–1032.
13. *Бобарыкина Т.А., Малов А.Н., Оришич А.М., Чиркашенко В.Ф., Яковлев В.И.* Оптический разряд с поглощением импульсно-периодического излучения СО₂-лазера в сверхзвуковом потоке воздуха: волновая структура и условие квазистационарности // *Квантовая электроника*. — 2014. — Т. 44, № 9. — С. 836–840.
14. *Третьяков П.К., Воронцов С.С., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л., Тупикин А.В.* Инициирование горения пропано-воздушных смесей импульсно-периодическим излучением СО₂-лазера // *Доклады Академии Наук. Физика*. — 2002. — Т. 385, № 5. — С. 618–620.
15. *Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Смирнов А.Л., Демин В.Н., Око-труб А.В., Бакланов А.М., Онищук А.А.* Лазерный плазмохимический синтез наноматериалов в скоростных потоках газов, первые результаты и перспективы развития метода // *Наука и нанотехнологии: материалы науч. сессии Президиума СО РАН, Новосибирск: Издательство СО РАН*. — 2007. — С. 123–135.
16. *Тищенко В.Н.* Генерация низкочастотной волны оптическим разрядом, движущимся в газе с дозвуковой скоростью // *Квантовая электроника*. — 2003. — Т. 33, № 9. — С. 823–830.
17. *Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Смирнов А.Л., Трашкеев С.И., Стаценко П.А., Зимин М.И., Мякушина А.А., Запрягаев В.И., Гулидов А.И., Бойко В.М., Павлов А.А., Соболев А.В.* Объединение ударных волн, создаваемых движущимся оптическим пульсирующим разрядом // *Квантовая электроника*. — 2006. — Т. 36, № 5. — С. 470–472.

18. Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф. Механизм объединения волн: формирование низкочастотных альфвеновских и магнитозвуковых волн в космической плазме // *Квантовая электроника*. — 2014. — Т. 44, № 2. — С. 98–101.
19. Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Запрягаев В.И., Смирнов А.Л., Соболев А.В. Спектр ударных волн, создаваемых оптическим пульсирующим разрядом при высокой частоте повторения импульсов лазерного излучения // *Квантовая электроника*. — 2002. — Т. 32, № 4. — С. 329–334.
20. Грачев Г.Н., Землянов А.А., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Гейнц Ю.Э., Кабанов А.М., Павлов А.А., Павлов Ал.А., Погодаев В.А., Пинаев П.А., Смирнов А.Л., Стаценко П.А. Тепловое самовоздействие мощного непрерывного и импульсно-периодического излучения СО₂-лазера в воздухе: II. Лабораторные эксперименты. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2013. — Т. 26, № 9. — С. 726–733.
21. Bohn W.L. Long range Laser Propagation: Power Scaling and Beam Quality Issues // Proc. SPIE 7751, XVIII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers. — 2010. — 7 pp.
22. Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. Взаимодействие оптического пульсирующего разряда с газом: условия стабильной генерации и объединения ударных волн // *Квантовая электроника*. — 2004. — Т. 34, № 10. — С. 941–947.
23. Павлов А.А., Павлов Ал.А., Голубев М.П. Применение самонаводящихся фильтров Цернике на основе эффекта насыщения для теневой диагностики газовых потоков // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. — 2014. — Т. 9, № 1. — С. 15–28.
24. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. — Л.: Судостроение, 1961. — 313 с.
25. Оришич А.М., Пономаренко А.Г., Посух В.Г. Влияние длительности импульса на эффективность взаимодействия излучения СО₂-лазера с мишенью в воздухе // *Прикладная механика и техническая физика*. — 1987. — № 2. — С. 27–30.

26. *Tischenko V.N., Grachev G.N., Gulidov A.I., Zapryagaev V.I., Posukh V.G.* Simulation of shock waves and sound of a moving laser source // Proceedings of the 3 Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics in Aerospace Applications. — 2001. — Pp. 188–191.