

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Кудряшова Сергея Ивановича

«Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов в режиме абляции с металлами и полупроводниками, обладающими сильным межзонным поглощением»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Фемтосекундная лазерная абляция является комплексным физическим явлением, последовательно протекающим на разных пространственных и временных масштабах и широко использующимся как для фундаментальных исследований (неравновесная плазма, электронные и фононные подсистемы, фазово-структурные превращения при экстремальных условиях, сверхмощные настольные ударные волны), так и в технологических применениях (nano- и микро-масштабная обработка поверхности широкого круга материалов). Несмотря на более чем тридцатилетнюю историю экспериментальных и теоретических исследований в области фемтосекундной лазерной абляции, многократно ускорившихся в последние десятилетия в связи с широким распространением коммерческих лазеров ультракоротких импульсов, феноменологическая картина этого сложного многомасштабного явления в экспериментальном плане исследована недостаточно, чтобы установить правильные количественные вклады различных входящих процессов. Поэтому соответствующие экспериментальные исследования, позволяющие получить основную феноменологическую картину фемтосекундной лазерной абляции для ее количественного моделирования и базового понимания в практических задачах, являются до сих пор **весьма актуальными**.

Эти вопросы решаются и уточняются в диссертационной работе Сергея Ивановича Кудряшова с помощью комплекса взаимодополняющих информативных методов, для ряда из которых автором разработаны оригинальные методики. Исследования охватывают все основные стадии фемтосекундной лазерной абляции и позволяют **впервые обоснованно выстроить**

достаточно полную феноменологическую картину явления с описанием количественных параметров его основных стадий.

Диссертационная работа со списком литературы из 336 наименований включает в себя введение, семь глав и заключение, изложенные на 271 странице.

Во введении представлены актуальность темы диссертации, цели работы и решаемые задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, выносимые на защиту положения, сведения о апробации работы и личном вкладе автора.

В первой главе дан обзор литературы, в первую очередь – обзор фундаментальных стадии фемтосекундной лазерной абляции (ФЛА) как явления, имеющего большое фундаментальное и практическое значение. Отмечается особый случай материалов с сильным межзонным поглощением, учитывающий межзонные и внутризонные электронные переходы под действием фемтосекундных лазерных импульсов, то есть изменение плотности свободных носителей заряда.

В главе 2 описаны оборудование, экспериментальные схемы, материалы и методики проведения измерений.

В главе 3 представлены результаты время-разрешенных оптических исследований сверхбыстрой электронной динамики поверхности алюминия и титана для таких условий возбуждения фемтосекундными лазерными импульсами, когда межзонное поглощение оказывается сильным. Данные исследования удачно дополнены зондовой методикой сбора эмиттированных заряженных частиц – электронов и ионов. Обнаружено, что в области низких плотностей энергии фемтосекундных лазерных импульсов доминирует межзонное поглощение с минимальным нагревом электронной подсистемы и слабой термоэлектронной эмиссией, тогда как насыщение межзонного поглощения из-за опустошения/населения зон приводит к резкому ускорению роста электронной температуры и нелинейной эмиссии плазмы заряженных частиц.

В главе 4 представлены во многом аналогичные результаты для полуметаллов и полупроводников с той особенностью, что переходным моментом для этих материалов является не насыщение межзонного поглощения. Установлено, что в этом случае с ростом плотности энергии фемтосекундных

лазерных импульсов происходит стабилизация плотности электрон-дырочной плазмы и связанной с ней сверхбыстрой (мгновенной в масштабе лазерного импульса) линейной по плотности плазмы и изотропной по пространству электронной перенормировки ширины запрещенной зоны, причиной которой является стимулированная такой перенормировкой Оже-рекомбинация плазмы. В результате, в условиях слабоменяющейся плотности плазмы растет ее температура и выход заряженных частиц.

В главе 5 рассматривается стадия релаксации сильновозбужденной электронной подсистемы металлов и полупроводников путем переноса энергии в решетку. Автором разработана и обоснована оригинальная методика, позволяющая измерить характерные времена электрон-фононной термализации по положению минимума/начала выполнения пороговой плотности энергии для одноимпульсной абляции материалов – алюминия, серебра, меди, кремния - в зависимости от длительности возбуждающих лазерных импульсов в фемтосекундном диапазоне. С помощью данной методики дополнительно впервые установлена величина коэффициента амбиполярной диффузии $\sim 10^3 \text{ см}^2/\text{с}$ для электрон-дырочной плазмы кремния при плотности $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ (в абляционном режиме), которая обеспечивает многократно более быстрый пикосекундный перенос вложенной энергии по сравнению с решеточной температуропроводностью в кристаллическом кремнии.

В главе 6 представлены результаты идентификации плавления и измерений глубины плавления поверхностного слоя материалов с учетом эффекта абляции с помощью разработанной автором диссертации уникальной методики динамической регистрации с временным разрешением акустической модуляции коэффициента отражения пробного фемтосекундного лазерного импульса. В работе измерялись периоды динамических осцилляций отражения, вызванных реверберациями акустической волны сжатия и разрежения в приповерхностном слое расплава. Для кремния и арсенида галлия, обладающих существенным соотношением акустических импедансов твердого материала и его расплава, а также графита впервые экспериментально установлен факт движения фронта плавления с облученной поверхности, измерены максимальные скорости его движения и глубины проплавления в зависимости от плотности энергии

В последней главе 7 приведены результаты идентификации фундаментальных механизмов и измерения базовых параметров (характерные глубины и топографии кратеров, температуры, давления и скорости разлета вещества) фемтосекундной лазерной абляции. Показано, что отрыв пленки расплава при откольной абляции имеет место в результате формирования подповерхностной паровой или пенной полости при слиянии множественных нанопузырей и развивается под действием высокого парового давления, ранее стабилизированного эти нанопузыри против сил поверхностного натяжения. С другой стороны, при высоких плотностях энергии отмечался гидродинамический разлет непрозрачного и сильно рассеивающего закритического флюида, который регистрировался как стандартным методом время-разрешенной микроскопии отражения пробных фемтосекундных лазерных импульсов, так и с помощью разработанной автором методики бесконтактной широкополосной ультразвуковой диагностики. Интерпретация результатов ультразвуковых измерений в рамках модели точечного взрыва позволила установить начальные давления и скорости расширения абляционного факела в воздухе на аблируемой поверхности в зависимости от плотности энергии лазерного излучения и связать их с параметрами волн давления на тыльной стороне мишени. В итоге, были впервые экспериментально продемонстрированы сверхэластический режим распространения ударной волны в мишени титана при давлениях выше 10 ГПа и другой, диссипативный режим ее распространения при давлениях ниже 10 ГПа, сопровождающийся структурной трансформацией поверхностного слоя титана.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Новизна выполненной работы заключается в том, что впервые было выполнено детальное исследование процессов возбуждения и релаксации носителей заряда на всех этапах взаимодействия лазерного импульса с металлами и полупроводниками, для чего автором был развит оригинальный комплекс оптических и электронных методов, обеспечивающих субпикосекундное временное разрешение.

Научные положения, выдвинутые на защиту, представляются **обоснованными**. Основные результаты проведенных в рамках диссертационной работы исследований представляются **достоверными**, представлены на многих

международных и российских конференциях, опубликованы в 54 печатных работах (из них – две главы в монографиях и 52 работы в научных реферируемых журналах, индексируемых в научометрической базе данных Web of Science).

По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Первый блок замечаний связан с исследованиями эмиссии заряженных частиц при лазерном облучении и представлением результатов этих исследований в тексте диссертации. В разделах 3.1 и 3.2 диссертации детально обсуждается этот процесс для случаев облучения алюминия и титана. Однако рисунок 3.8 содержит данные об эмиссии заряженных частиц при лазерном облучении и других материалов (меди, графита, кремния), которые не обсуждаются в данной главе. Тем не менее, в заключении к главе (раздел 3.3) вновь упоминаются ранее не обсуждавшиеся результаты для графита, меди и кремния. Автором убедительно показано, что зависимость эмиссионных сигналов от плотности энергии лазерного импульса описывается степенной функцией, однако не обсуждаются причины различия показателей степени для разных материалов. При анализе полученных результатов используется механизм комбинированной фототермоэлектронной эмиссии Фаулера – дю Бриджа, который следовало бы подробнее изложить в тексте работы.

2. Глава 4 посвящена исследованию электронной динамики и изменению оптических свойств фотовозбужденных полупроводников на примере теллура, арсенида галлия и кремния. На мой взгляд, диссертационная работа была бы более полной, если бы были рассмотрены также процессы в полупроводниках, фотовозбуждение которых не сопровождается появлением высокой концентрации носителей заряда, например в теллуриде кадмия.

Данные замечания не являются принципиальными и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Автореферат достоверно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа «Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов в режиме абляции с металлами и полупроводниками, обладающими сильным межзонным поглощением» полностью удовлетворяет всем требованиям

«Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор – Кудряшов Сергей Иванович – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Профессор физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доктор физико-математических наук



Головань Леонид Анатольевич

«25» сентября 2019 г.

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

Телефон: +7(495) 939-46-57

Email: golovan@physics.msu.ru

Подпись профессора физического факультета МГУ, доктора физико-математических наук Голованя Леонида Анатольевича удостоверяю

Декан физического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова
профессор

Н.Н. Сысоев



Список основных публикаций Л.А. Голованя по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. **Golovan, L.A.**, Zabotnov, S.V., Tkachenko, N.B., ... , Petrov, G.I., Yakovlev, V.V. (2017) Effects of photon enhanced lifetime and form anisotropy in silicon nanowire arrays on efficiency of nonlinear-optical processes, AIP Conference Proceedings 1874,030013.
2. Заботнов, С. В., Кашаев, Ф. В., Шулейко, Д. В., Гонгальский, М. Б., **Головань, Л. А.**, Кашкаров, П. К., ... Кириллин, М. Ю. (2017). Кремниевые наночастицы как контрастирующие агенты в методах оптической биомедицинской диагностики. *Квантовая электроника*, 47(7), 638-646.
3. Kashaev, F.V., Kaminskaya, T.P., Zabotnov, S.V., **Golovan, L.A.** (2016) Structural properties of silicon nanoparticles obtained via femtosecond laser ablation in gases at different pressures, Optical and Quantum Electronics, 48(7),348.
4. Efimova, A., Eliseev, A., Georgobiani, V., ... **Golovan, L.**, Kashkarov, P. (2016) Enhanced photon lifetime in silicon nanowire arrays and increased efficiency of optical processes in them, Optical and Quantum Electronics, 48(4), 232.
5. Zabotnov, S.V., Kholodov, M.M., Georgobiani, V.A., **Golovan, L.A.**, Kashkarov, P.K. (2016) Photon lifetime correlated increase of Raman scattering and third-harmonic generation in silicon nanowire arrays, Laser Physics Letters 13(3),035902.
6. **Головань, Л. А.**, Соколов, А. А., Тимошенко, В. Ю., Семенов, А. В., Пастушенко, А., Ничипорук, Т., & Лысенко, В. (2015). Рост времени жизни фотона и увеличение эффективности процессов комбинационного рассеяния света и генерации второй гармоники в пористом карбиде кремния. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 101(12), 891-896.
7. Tselikov, G.I., Timoshenko, V.Y., **Golovan, L.A.**, ..., Rühl, E., Talroze, R.V. (2015) Role of the polymer matrix on the photoluminescence of embedded CdSe quantum dots, ChemPhysChem 16(5), c. 1071-1078.