

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров Ф. Ф., Мильчанин О. В., Миронов А. М. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2006. № 3. С. 56–62.
2. Челядинский А. Р., Комаров Ф. Ф. // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 8. С. 813–846.
3. Бураков А. В., Якубеня С. Н., Янченко А. М. // ПТЭ. 1986. № 4. С. 226.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ

А. И. Урбанович

Белорусский государственный университет, urbanovich@bsu.by

Как показывает практика, новые перспективные направления зачастую возникают на стыке разных, казалось бы, не связанных друг с другом областей исследований или в результате применения теоретических методов, развитых в одной области знаний – к другой.

Исследования по взаимодействию мощных лазерных и ионных пучков с конденсированными средами занимает ведущее место в современной науке. Долгое время эти два направления были разделены, потому что, возникнув, каждое из них решало свои определенные задачи. Про общность этих направлений стало возможным говорить лишь с появлением лазеров и мощных ионных пучков, когда отличительной особенностью их взаимодействия с веществом стала нелинейность процесса. Воздействие мощных лазерных и ионных пучков на конденсированные среды вызывает возмущение равновесного состояния вещества. При этом могут происходить изменения как в свойствах самого вещества, так и само излучение может изменять свою пространственно-временную структуру. Нелинейность взаимодействия в оптике связана с тем, что под действием мощного лазерного излучения изменяется комплексная диэлектрическая проницаемость среды. При воздействии на нелинейную среду нескольких световых пучков в среде индуцируются фазовые и амплитудные дифракционные решетки (решетки показателя преломления и (или) коэффициента поглощения), в результате чего происходит усиление более слабых пучков и возникновение новых, отсутствовавших в падающем на среду потоке, т. е. среда влияет на проходящее через нее излучение. С одной стороны, это позволяет управлять характеристиками лазерного излучения, с другой – получать информацию о процессах, происходящих в среде, и о ее параметрах. Нелинейность взаимодействия ионных пучков с конденсированными средами состоит в том, что среда также оказывает сильное влияние на падающий пучок (например, изменяется зарядовое состояние ионов при их входе в твердое тело), при этом свойства среды изменяются необратимым образом, а именно: создаются различные дефекты. И в первом, и во втором случаях явления носят пороговый характер.

Использование оптических квантовых генераторов стимулировало бурное развитие нелинейной оптики, лазерной спектроскопии, динамической голографии [1–2]. Изменяя лазерным излучением определенным образом свойства среды, оказалось возможным преобразовывать само излучение, т. е. изменять его частотно – угловую

и временную структуру. Сюда относятся усиление слабого излучения при вынужденном рассеянии света, параметрические процессы [3], управление длительностью световых импульсов с целью получения импульсов очень малой длительности (компрессия импульсов) [4], создание распределенной обратной связи в лазерах [5]. Очень важным эффектом явилось открытие в начале 1970-х годов явления обращения волнового фронта световых волн при четырехволновом взаимодействии [2] и вынужденном рассеянии Мандельштама – Бриллюэна [6]. На основе этого явления была разработана методика компенсации фазовых искажений при распространении излучения в оптически неоднородных средах. Работы в данных направлениях внесли существенный вклад в развитие исследований по параметрическому взаимодействию световых импульсов в нелинейных средах и способствовали решению задач преобразования пространственно-временной структуры излучения. Все названные явления можно трактовать как процесс рассеяния (дифракции) света на светоиндуцированных изменениях спектрально-оптических параметров среды, т. е. как процесс светоиндуцированной дифракции излучения.

Большой интерес к исследованию взаимодействия ионных пучков с конденсированными средами был стимулирован экспериментальными работами по модификации свойств материалов с помощью ионной имплантации. Метод ионной имплантации основан на внедрении в твердое тело ускоренных ионов, энергия которых может изменяться от нескольких килоэлектронвольт до гигаэлектронвольт, с последующей высокотемпературной обработкой вещества при производстве сверхбольших интегральных схем [7]. Ионная имплантация заняла одно из ведущих мест в современной микро-, опто- и наноэлектронике [8]. Высокоэнергетичная ионная имплантация возникла как операция по созданию заглубленных легированных слоев в полупроводниковых структурах. С начала 1980-х годов проводятся исследования по физике взаимодействия высокоинтенсивных ионных пучков с полупроводниковыми кристаллами с целью как существенного сокращения времени имплантации, так и перспективами разработки новых технологических процессов, например реализации самоотжиговых режимов. Проблема взаимодействия высокоинтенсивных ионных пучков с кристаллами и практического их использования тесно связана с разогревом мишени в ходе облучения и, как следствие, ограничениями на их параметры. В ней можно выделить два аспекта: изучение динамики температурных полей и термонапряжений, обусловленных макроскопическим разогревом мишени, а также исследование процессов, возникающих вдоль траектории внедряемой частицы. Наиболее важным и интересным результатом прохождения высокоэнергетических ионов в твердых телах является формирование специфических пространственно протяженных макродефектов – треков [9]. Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при их облучении ионами сверхвысоких энергий является одним из актуальных направлений современной физики. Создание треков является эффективным способом микро- и наноструктурирования вещества. Например, заполнение полых или почти пустых трековых областей в диэлектриках позволяет создавать структуры наноразмерных объектов – квантовые проволоки, это имеет перспективные приложения в оптической электронике и наноэлектронике. Конечно, природа трека, его развитие зависят от типа вещества, его структурного состояния, плотности выделенной энергии в электронную подсистему и других причин, но релаксация сильных электронных возбуждений имеет доминирующее значение. Появляющиеся нарушения кристалличе-

ской структуры при этом часто связывают с возникновением области резкого повышения температуры, и развитие энергетического трека описывают в рамках двухтемпературной модели с помощью температуры электронов T_e и решетки T_l , на очень коротких временах. При этом зачастую происходит генерация звуковых полей. Следует отметить, что из всех возможных механизмов генерации звука при умеренных плотностях энергии лазерных и ионных пучков тепловой механизм является наиболее эффективным, хотя в различных веществах и при определенных условиях могут играть заметную роль и другие механизмы генерации звука. Прямое измерение T_e и T_l в таких экспериментах невозможно. Задачу по нахождению величин T_e и T_l и эффективных частот электрон-электронных столкновений можно решить лишь при использовании сверхкоротких лазерных импульсов с длительностью $10^{-13} - 10^{-15}$ с. Не случайно в последние годы большой интерес проявляется к исследованиям сверхбыстрой кинетики релаксации «ударного» электронного возбуждения в металлах, которое реализуется с использованием сверхкоротких лазерных импульсов [10]. В подобных исследованиях используется явление светоиндуцированной дифракции и, в частности, метод пикосекундной вырожденной четырехфотонной спектроскопии, основанный на зондировании записываемого в изучаемом образце пространственно-модулированного распределения диэлектрической проницаемости среды. Экспериментально и теоретически это явление изучается при облучении нелинейной среды двумя или тремя пучками близких направлений и (или) частот, причем, по крайней мере, один из этих пучков является мощным. В настоящее время весьма актуальной является разработка различных методов исследования наноструктур. Использование здесь нелинейно-оптических явлений открывает большие возможности для получения высокочувствительных методов диагностики состава и структуры наноматериалов. Генерация все более коротких импульсов света является одной из важнейших задач, потому что их воздействие на наноструктурированные системы позволяет получать важную информацию о свойствах вещества, а также в реальном времени исследовать фазовые переходы, динамику кристаллической решетки, а также различные быстропротекающие процессы. Компрессия ультракоротких импульсов света позволяет получать импульсы фемтосекундного диапазона, а происходящая при этом временная концентрация световой энергии приводит к появлению сверхмощных импульсов. Наноструктурированные материалы в настоящее время представляют собой новый объект нелинейной оптики. Процессы генерации оптических гармоник и четырехволнового взаимодействия открывают новые возможности в области нелинейной микроскопии. Представляется весьма удачным название этого нового направления – фемтосекундная нанофотоника [11]. Когда новое направление возникает на стыке двух наук, каждая из них должна развиваться до определенного уровня, чтобы с какого-то момента появилась возможность соединения их достижений. Теоретические и экспериментальные работы, описывающие трекообразование в конденсированных средах, при облучении ионными пучками как раз и заложили основу для получения микро- и наноструктур. Поэтому можно говорить, что на стыке двух областей по исследованию взаимодействия лазерных и ионных пучков с конденсированными средами появилось новое направление, сочетающее в себе, с одной стороны, теоретические и экспериментальные подходы светоиндуцированной дифракции и ионной имплантации, с другой – использующее в качестве объекта исследования новейшие структуры современной микро- и нанoeлектроники, а в качестве инстру-

мента исследования сверхкороткие импульсы света. В физике взаимодействия лазерных и ионных пучков с веществом много общего. Мощные лазерные и ионные пучки приводят к нагреванию облучаемого вещества. Они используются при термообработке металлов и в технологии при изготовлении изделий микро- и нанoeлектроники. Разогрев среды приводит к изменению параметров среды, в частности к возникновению сложной зависимости от температуры электронной и фононной теплоемкости и их коэффициентов температуропроводности. В результате чего характер распространения тепловой энергии в среде из-за возникшей нелинейности сильно отличается от случая, когда эти параметры постоянны. Математические модели, описывающие реакцию среды на воздействие лазерных и ионных пучков, тоже имеют много общего. Это система дифференциальных уравнений в частных производных, получаемая из уравнений гидродинамики, адаптированная для решения конкретных задач. Похожие модели также используются и при описании релаксации электронных возбуждений при коротких временах в треках, создаваемых высокоэнергетическими ионами в кристаллах [12], при вынужденном температурном рассеянии на волнах «второго» звука [13], а также при исследовании нестационарного энергообмена в керровских средах с учетом влияния молекулярных либрации [14]. Таким образом, хотя взаимодействие мощных лазерных пучков с нелинейными средами относится к оптике, а взаимодействие высокоэнергетических заряженных ионов с кристаллами к физике конденсированного состояния, тем не менее здесь четко просматривается взаимосвязь целей при решении поставленных задач, общность математических моделей, переплетение используемых экспериментальных и теоретических методов. Вышесказанное позволяет сделать вывод об актуальности и важности изучения взаимодействия мощных лазерных и ионных пучков с конденсированными средами и разработке на их основе новых методов исследования свойств вещества и преобразования световых полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С. А. Проблемы нелинейной оптики. М.: Мир. 1964. 295 с.
2. Степанов Б. И., Ивакин Е. В., Рубанов А. С. // ДАН СССР. 1971. Т. 196. № 3. С. 567–571.
3. Апанасевич П. А. Основы теории взаимодействия света с веществом. Минск: Наука и техника. 1977. 496 с.
4. Ахманов С. А., Выслоух В. А., Чиркин А. С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука. 1988. 312 с.
5. Shank C. V., Bjorkholm J. E., Kahelnik H. // Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18. № 9. P. 395–397.
6. Зельдович Б. Я. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. № 11. С. 617–621.
7. Пилипенко В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск: Изд. центр. БГУ. 2004. 531 с.
8. Комаров Ф. Ф., Комаров А. Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела. Минск: УП «Технопринт». 2001. 393 с.
9. Комаров Ф. Ф. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 1287–318.
10. Бобырев Ю. В. и др. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 9. С. 789–792.
11. Иванов А. А., Алфимов М. В., Желтиков А. М. // УФН. 2004. Т. 174. № 7. С. 743–63.
12. Комаров Ф. Ф., Урбанович А. И. // Доклады НАН Беларуси. 2006. Т. 50. № 3. С. 37–42.
13. Enns R. N., Batra I. P. // Phys. Rev. 1969. Vol. 180. № 1. P. 227–232.
14. Афанасьев А. А., Урбанович А. И. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. 2005. № 1. С. 10–15.