

Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в трехмерной геометрии

Анисимов С.И., Фаенов А.Я., Мигдал К.П., Петров Ю.В., Хохлов В.А., Ильницкий Д.К., Жаховский В.В., Шепелев В.В., Сергеев О.В., Паршиков А.Н., Иногамов Н.А., Пикуз Т.А.

Физика воздействия ультракоротких импульсов является важной в прикладном и фундаментальном отношениях. В виду значимости проблемы над ней трудятся много сильных научных коллективов. Проблемы, которые будут решены с помощью данного проекта РНФ, существенны, перспективны и сложны.

Очень трудны вопросы трехмерной (3D) геометрии.

Первый 3D-вопрос связан с неоднородностью распределения интенсивности греющего излучения по поверхности мишени и чрезвычайно резкой зависимостью термомеханической реакции среды на локальную величину интенсивности в окрестности порога абляции по этой интенсивности. Такое обострение реакции на величину интенсивности понятно, поскольку от вариации в несколько процентов зависит, оторвется данный кусочек конденсированной среды от мишени или удержится на мишени (порог абляции, порог отрыва). На рис. 1 показан профиль кратера после лазерного воздействия. На мишень из алюминия был сфокусирован пучок лазерного излучения от лазера на хром-форстерите. См. Ашитков и др., "Образование нанополостей в поверхностном слое алюминиевой мишени при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов", Письма в ЖЭТФ 95(4), 192-197 (2012). Для нагрева использована первая гармоника с длиной волны 1240 нм, для диагностики – вторая.

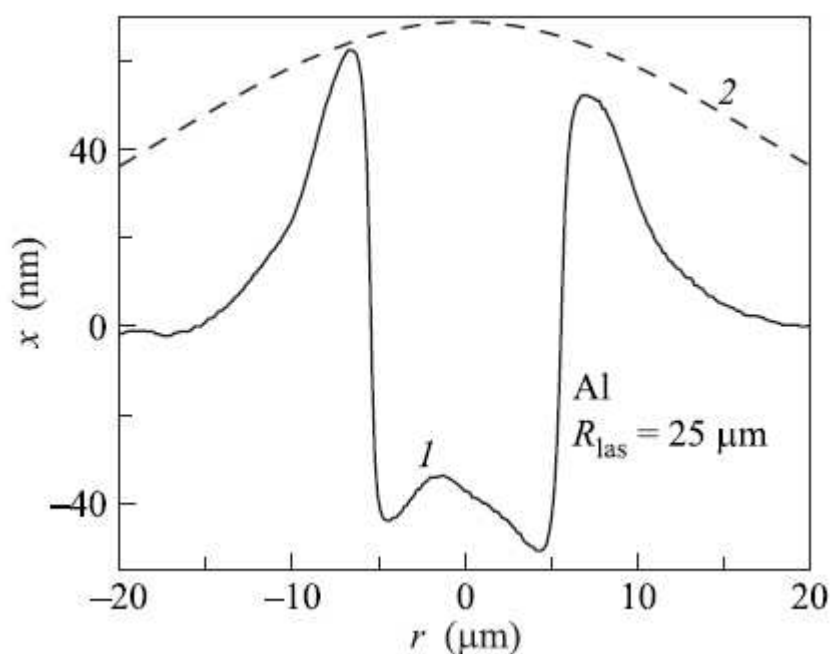


Рис. 1. Профиль кратера, формирующегося после воздействия ультракороткого лазерного импульса. Видим, что на краю кратера образуются валик высотой 50-60 нм.

В недавних экспериментах, проведенных в Kansai Photon Science Institute (KPSI), Kyoto, Japan, видят чрезвычайно длинные (более микрона) нитевидные структуры, формирующиеся после импульса в краевой зоне лазерного кратера. Примеры таких структур, полученные в предварительных экспериментах, показаны на рис. 2.

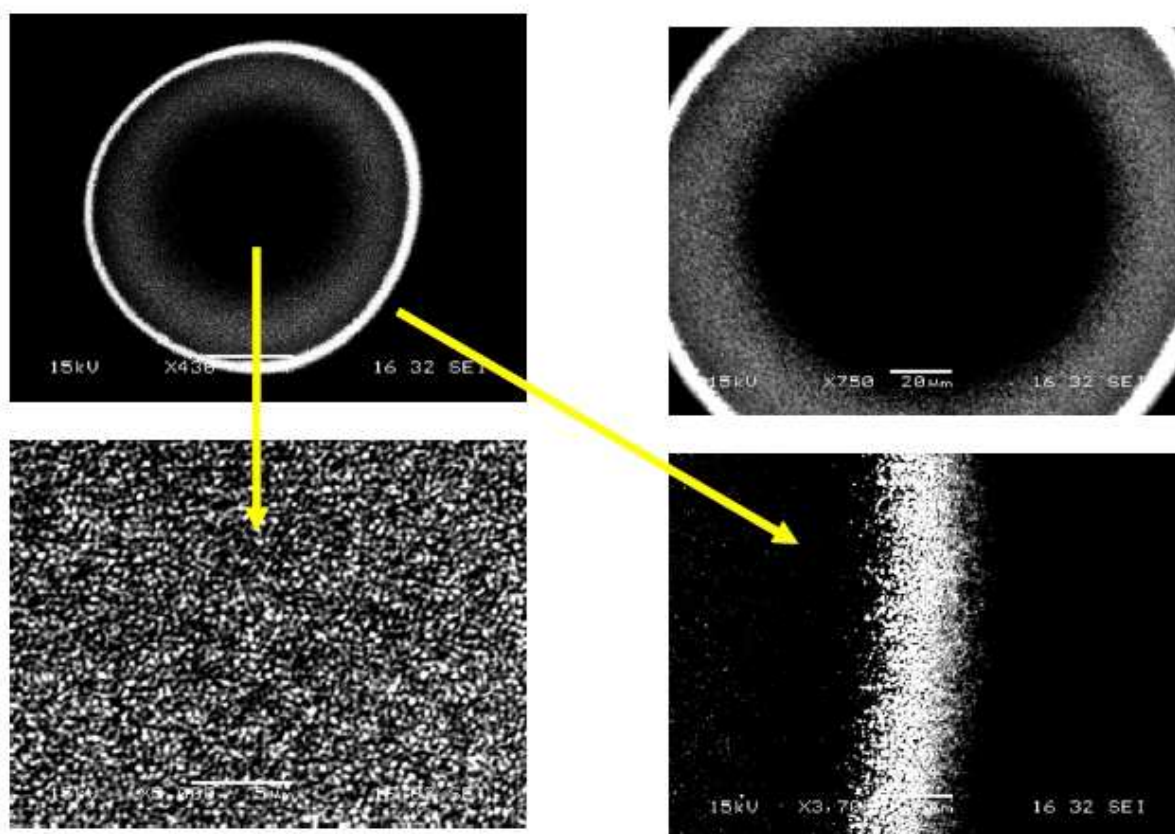


Рис. 2. Пример лазерного кратера, полученного с помощью ультракороткого импульса лазера на титан-сапфире. Платина. Верхняя пара фотографий: показан общий вид и увеличенное изображение общего вида. Изображения получены на SEM. Нижний ряд: структура кратера внутри (фото слева) и на краю (фото внизу справа). На краю видно яркое кольцо, образованное плотным скоплением тончайших нитей. В рамках проекта в трехмерных расчетах будет выяснена детальная структура кольцевой зоны. Расчеты будут вестись в кооперации с экспериментом.

Соответствующая группа KPSI работает под руководством Фаенова А.Я. В данном проекте исследования выполняются в сотрудничестве с группой Фаенова. Требуется выполнить расчеты, провести сопоставление с экспериментом и понять это явление. Трудности связаны с тем, что двухтемпературные

гидродинамические коды работают в одномерном приближении. Двумерные коды имеются, но в них нет учета двухтемпературной физики. В молекулярной динамике учет неоднородности требует огромного, недостижимого на сегодня увеличения масштаба молекулярно-динамической системы. С помощью комбинации гидродинамических и молекулярно-динамических подходов и масштабирования данная проблема будет решена. Результат будет опубликован в научном журнале с высоким рейтингом.

Во-вторых, будет решена проблема малых по размерам кратеров, которые получаются при фокусировке на дифракционном пределе. Задача будет решена в двух качественно различных случаях: (a) глубина прогрева меньше толщины мишени и (b) глубина прогрева больше, чем толщина пленки металла на стеклянной пластинке. Задача (b) представляет огромный интерес для технологий LIFT (laser induced forward transfer) и LIBT (laser induced backward transfer); см. статьи в wikipedia, где описаны приложения технологии LIFT.

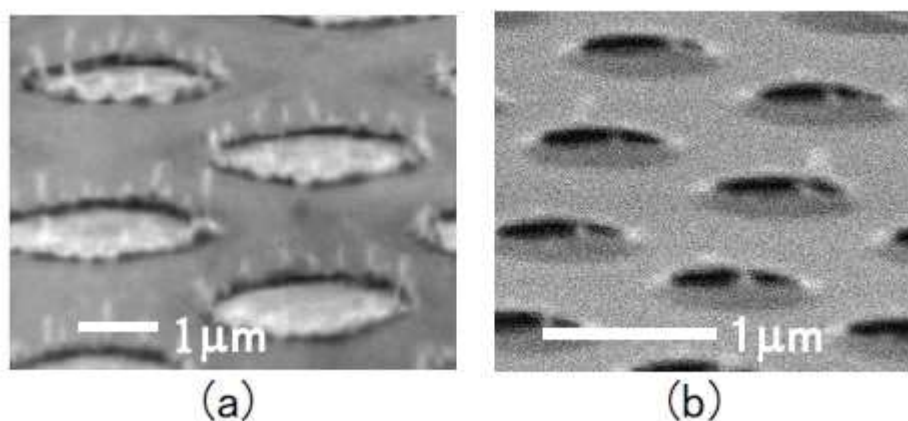


Рис. 3. Массивы структур, сформированные ультракоротким воздействием. Пленка золота на стеклянной подложке.

Соответствующие технологии применяются для приготовления масок, см. пример на рис. 3 и 4. Рисунки взяты из работы Nakata et al., "Nano-Sized and Periodic Structures Generated by Interfering Femtosecond Laser", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 3, No. 2, 2008. Выполнение проекта позволит понять природу таких структур и связать их с параметрами лазерного импульса и мишени. Важно то, что здесь мишень неоднородна – это тонкая пленка, которая покрывает диэлектрическую подложку.

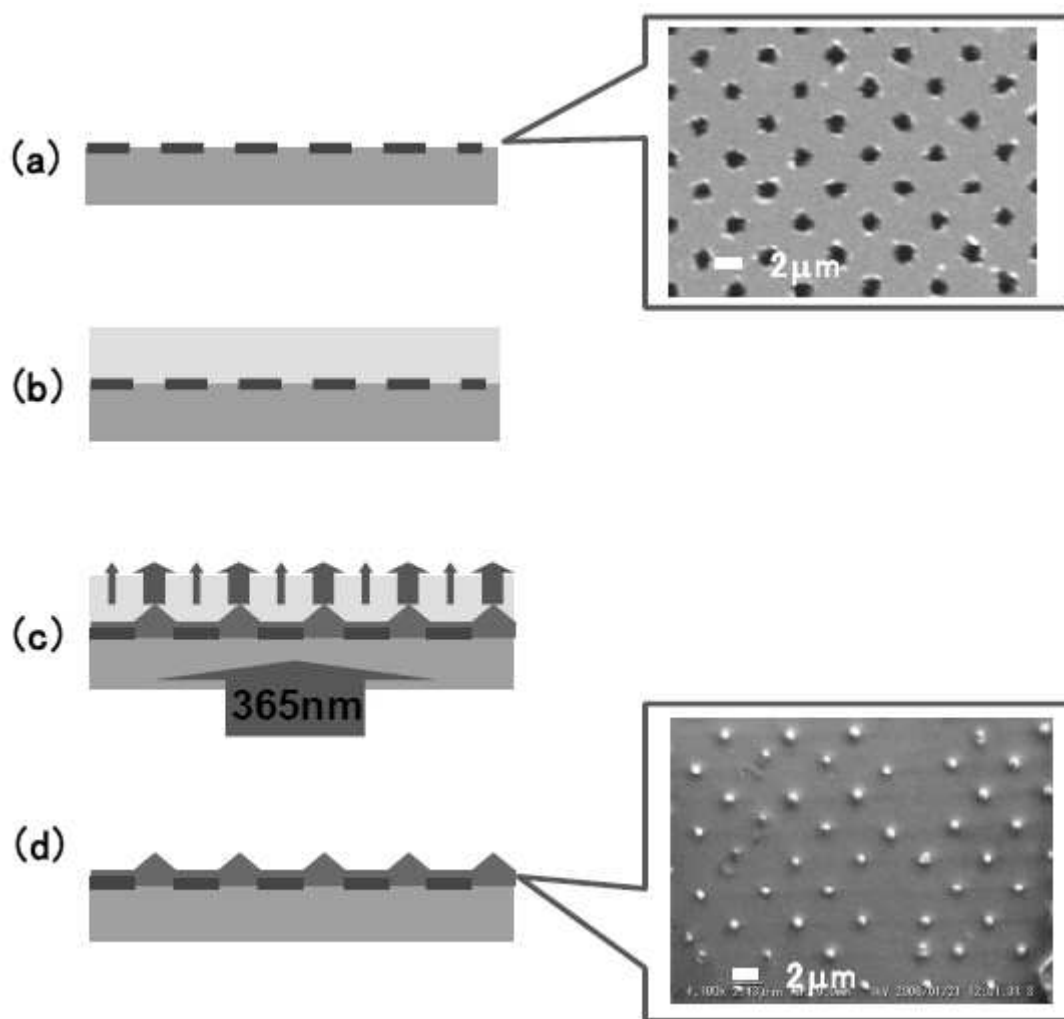


Рис. 4. Периодические микроструктуры.

В LIFT греющий пучок освещает пленку, находящуюся на прозрачной пластинке, через пластинку. При этом отделение и полет пленки идет в направлении лазерного пучка (поэтому перенос вещества происходит вперед, forward transfer). Наоборот, в LIBT лазер освещает пленку со стороны пленки. При этом кусочек пленки отрывается и летит в сторону, откуда пришел лазерный пучок. Хотя приложений лазерного "печатания" (из перенесенных кусочков формируется заданная "мозаика" на ресивере, поэтому говорится о "печати" на поверхности ресивера) много, до сих пор нет теоретического объяснения явления. Эта задача будет решена. В результате появится возможность влиять на параметры LIFT/LIBT, не прибегая к сериям дорогостоящих опытов. Результат будет опубликован в научном журнале с высоким рейтингом.

В-третьих, важнейшей для приложений и теории является проблема понимания и описания "многовыстрельного" (multi-shot) режима. См. пример на рис. 5. Длительность импульса оптического лазера составляла 100 фс. Материал – золото. Взято из работы Inogamov, Zhakhovsky, Khokhlov, Ashitkov, Emirov et al., "Ultrafast lasers and solids in highly excited states:

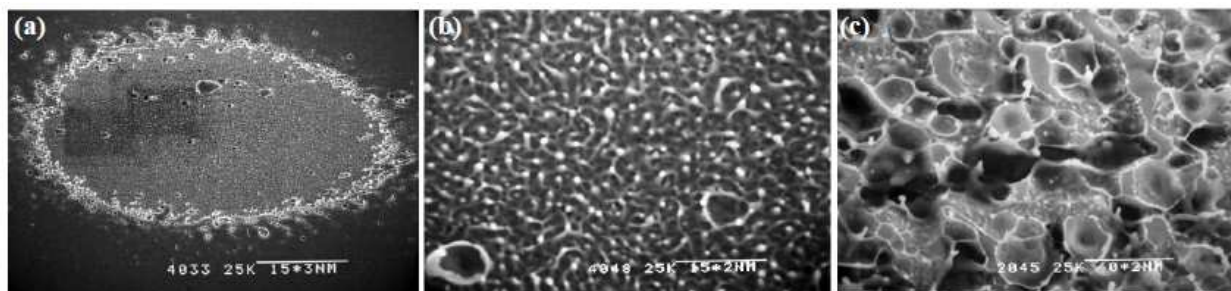


Рис. 5. Изменение структур с ростом числа выстрелов. SEM изображения. (a) Общий вид кратера после единичного воздействия. (b) Увеличенный участок дна кратера, показанного на рис «а» слева. (c) Укрупнение и усложнение структур на дне кратера с числом выстрелов. Ситуация после трех выстрелов в одно место.

Требуется исследовать процесс формирования и эволюции поверхностных структур под действием последовательности ультракоротких лазерных воздействий. Хотя в очень многих опытах в разных лазерных лабораториях в течение уже десятков лет существование таких процессов зафиксировано, объяснений ему до сих пор не найдено. Обычно говорят о резонансном взаимодействии падающей электромагнитной волны с поверхностными плазмонами. Но как быть с нижеследующими обстоятельствами (1-3)? (1) Нами было показано, что выше порога абляции структуры на облученной поверхности образуются даже на идеальной (бездефектной) грани кристалла. Между тем, для возникновения поверхностной электромагнитной волны необходимы первичные неоднородности поверхности. (2) В опытах наблюдаются структуры масштабами на порядок меньше, чем длина волны падающего излучения. Тогда как, согласно теории с взаимодействующими падающей и поверхностной электромагнитными волнами, неоднородности должны представлять собой желобки, перпендикулярные вектору поляризации. Расстояние между соседними желобками должно быть примерно равно длине электромагнитной волны. Это масштаб порядка микрона. (3) Как объяснить формирование структур с морфологией далекой от периодических желобков?

В связи с последним обстоятельством ряд исследователей развивают синергетические теории, они говорят о самоорганизации, сходстве желобковых структур с застывшими волнами на поверхности песчаных дюн и т.п. Но при этом они уходят от внятной физики в сторону изучения причудливых решений феноменологических нелинейных уравнений. Наверно, такое описание имеет право на существование. Альтернативная картина была предложена нашей группой, см. Жаховский, Иногамов, Nishihara, "Новый механизм формирования нанорельефа поверхности, облученной фемтосекундным лазерным импульсом", Письма ЖЭТФ, т. 87(8), 491-496 (2008); Ашитков, Иногамов, Жаховский и др.,

"Образование нанополостей в поверхностном слое алюминиевой мишени при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов", Письма ЖЭТФ, т. 95(4), 192-197 (2012). Такое описание снимает проблемы с формированием поверхностных структур после единичного воздействия на абсолютно гладкую поверхность - бездефектную грань кристалла.

Но как быть, если воздействия повторяются? В этой ситуации выше порога абляции поверхность перед вторым и последующими выстрелами сильнейшим образом возмущена. Пространственный масштаб возмущений порядка глубины прогрева d_T . Глубина прогрева примерно на порядок меньше длины волны света. Надо решать неоднородную (пространственную) задачу о поглощении энергии и о двухтемпературной, теплопроводностной и гидродинамической стадиях. Эта труднейшая задача будет решена в рамках проекта РФФИ. Решение состоит из трех этапов. (а) Рассчитывается суммарное поле падающей волны и плазмонов, зацепленных за неоднородности. Определяется неоднородная диссипация в скин-слое неровной поверхности. (б) Решается пространственная задача о двухтемпературной теплопроводности и двухтемпературной релаксации с неоднородным по поверхности источником тепла, сосредоточенным в тонком скин-слое. Нас интересует случай, когда мощность источника достаточна для плавления. (с) Наконец, решается задача о гидродинамическом движении, порожденном нагревом. На поздних стадиях теплоотвод из расплава приводит к рекристаллизации жидкой фазы. Затвердевание фиксирует гидродинамические неоднородности, созданные гидродинамическим движением. Все три задачи решаются согласовано. Это трудная 3D проблема с неоднородным поглощением и двухтемпературной гидродинамикой. Результаты ее решения будут опубликованы в научном журнале с высоким рейтингом.

Выше упоминались приложения, для которых важны поверхностные структуры. Таких приложений много. Одна из самых современных это SERS (Surface-enhanced Raman spectroscopy, см. wikipedia). Поверхностные наноструктуры на много порядков усиливают Рамановский сигнал. Это позволяет поднять чувствительность до предела, когда становится возможным улавливать сигнал от отдельных молекул.

Другие проблемы, которые будут решены, включают

- (I) адаптацию модели Прандтля-Райса и дислокационной модели на случай быстрого нагрева с двухтемпературной стадией. На этой основе будет изучено взаимодействие акустической волны с фронтом плавления и эволюция волны сжатия при ее дальнейшем распространении. Это позволит расшифровать сигналы, которые получают в лазерных опытах. Результат будет опубликован в научном журнале с высоким рейтингом. Речь идет о распространении методик молекулярно-динамических исследований ударных волн на случай лазерного облучения. Пример расчета ударной волны в алюминии показан на рис. 6; Zhakhovsky, Budzevich, Inogamov et al., "Two-zone elastic-plastic single shock waves in solids", Phys. Rev. Lett., v. 107, 135502 (2011). Именно эта методика будет

усовершенствована на случай лазерного воздействия. Такой подход позволит получить параметры дислокационной модели, которые потом будут сопоставлены с экспериментом.

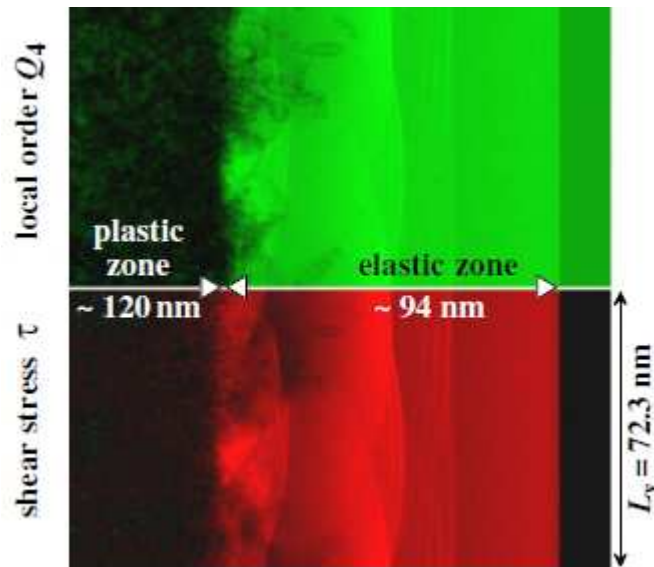


Рис. 6. Пример расчета методами молекулярной динамики ударной волны, которая распространяется по алюминию. Именно эта методика будет обобщена на случай лазерного воздействия.

- (II) Будет рассмотрено торможение продуктов абляции металлов конденсированными средами. Речь идет об абляции в прозрачные твердые или жидкие среды. Греющий пучок проникает через эти среды и сильно нагревает металл, поглощающий лазерную энергию. Под действием этого нагрева начинается абляция - разлет нагретого вещества. Окружающая среда останавливает разлет. Фрагменты нагретого вещества (наночастицы), образовавшиеся при разрушении металла или в результате конденсации паров, застревают в тормозящей среде. Как говорилось, описание процесса образования наночастиц и их сохранении в окружающей среде важно для приложений. Результат будет опубликован в научном журнале с высоким рейтингом.
- (III) Будет решена важная проблема о последствиях облучения ультракоротким импульсом наночастиц, окруженных газом или прозрачной конденсированной средой. Будет создан соответствующий двухтемпературный гидрокод с учетом всего спектра неравновесных явлений в наночастице и окружающей ее среде.

Группа имеет большой опыт моделирования трехмерных задач. Ранее наш интерес к этой тематике был связан с задачами лазерного инерциального термоядерного синтеза. Как известно, ключевой проблемой лазерного термояда являются гидродинамические

неустойчивости. Пример расчета такого рода приведен на рис. 7. Конечно, для адаптации разработанных схем к нашим условиям - облучение наночастицы ультракоротким лазерным импульсом - предстоит выполнить очень большую работу.

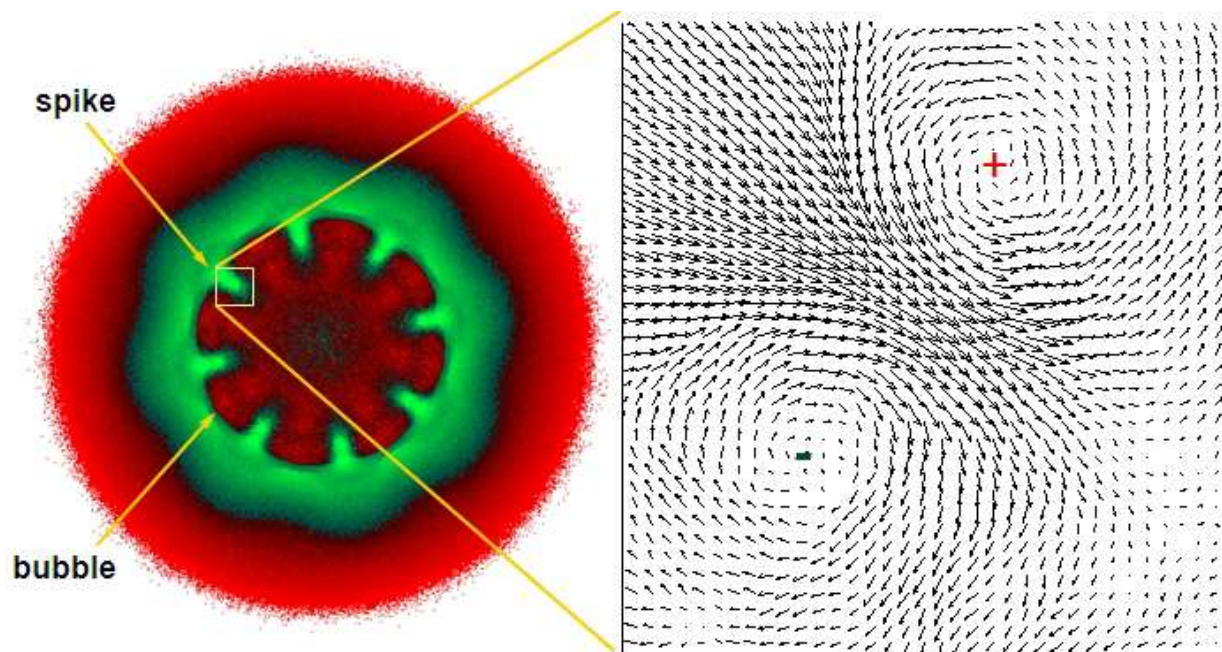


Рис. 7. Результат развития неустойчивости Рихтмайера-Мешкова при обжати сферической мишени. Показано формирование сложных структур (цветной рис. слева) и связанных с ними вихревых течений (справа).

Справка по публикациям

Всего по результатам работы за 2014 год будут опубликованы четыре работы в научных журналах с высоким рейтингом.