

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСЕКУНДНОГО ВЗРЫВА ТОНКИХ ФОЛЬГ С ИСКУССТВЕННО НАНЕСЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ СТРУКТУРОЙ

© 2022 г. Т. А. Шелковенко^а, И. Н. Тиликин^а, А. В. Огинов^а, К. С. Перваков^а,
А. Р. Мингалеев^а, В. М. Романова^{а,*}, С. А. Пикун^а

^а Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*e-mail: vmr@inbox.ru

Поступила в редакцию 25.05.2022 г.

После доработки 01.07.2022 г.

Принята к публикации 08.07.2022 г.

Представлены первые результаты исследования электрического взрыва тонких алюминиевых фольг разной толщины с искусственным рельефом, созданным методом лазерного гравирования. Эксперименты проводились на импульсном сильноточном генераторе БИН (270 кА, 300 кВ, 100 нс). Изображения взорванных фольг, помещаемых в цепь обратного тока (амплитуда 80 кА), получены методом проекционной рентгенографии в излучении гибридного X-пинча, основной нагрузки генератора. Исследовалось влияние искусственного рельефа на результирующую картину взрыва — как у фольг, обладающих выраженной собственной структурой, так и без нее. Показано, что искусственная структура в виде канавок, перпендикулярных собственной структуре фольги и параллельных току, может заметно замедлить развитие неустойчивостей во взорванной фольге.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, рентгенография, структура фольги, неустойчивости

DOI: 10.31857/S0367292122600510

1. ВВЕДЕНИЕ

Взрываемые плоские фольги различной толщины используются в качестве быстрых размыкателей в мощных генераторах высоковольтных импульсов [1–3], для генерации ударных волн [4, 5] и УФ-излучения [6], создания детонаторов [7, 8] и других устройств. При этом данные о процессах в самих фольгах при протекании больших импульсных токов явно недостаточны для оптимального решения задач их практического применения. Необходимы систематические исследования процессов преобразования энергии, фазовых переходов, характера и скоростей развития неустойчивостей (т.н. электрических взрывных структур, или ЭВ-структур), возникающих при взрыве. Это позволит продвинуться в традиционных и найти новые области применения взрывающихся фольг — например, производство наночастиц заданного размера.

Ранее наблюдалось, что многие тонкие фольги исходно периодически структурированы в одном или двух направлениях. Например, бытовая алюминиевая (85%) фольга толщиной 16 мкм имеет одномерную структуру с шагом 30 мкм [9], а фольга толщиной 4 мкм — двумерную с периодами 25 и 35 мкм в перпендикулярных направлениях [10]. Это обстоятельство может оказывать су-

щественное влияние на характер ЭВ-структур и на скорость распада фольги. Важным фактором, определяющим вложенную в фольгу энергию и характер возникающих неустойчивостей, является взаимная ориентация собственной структуры и направления разрядного тока [10, 11]. Само наличие у фольги собственной структуры (СС) связано, очевидно, с технологией ее изготовления, о чем, в частности, свидетельствуют рентгенографические изображения фольг из одного и того же материала, но произведенных разными изготовителями или существенно отличающихся по толщине.

Рентгенограммы, демонстрирующие собственную структуру в фольгах толщиной 16 и 4 мкм, которые использовались в наших экспериментах, показаны на рис. 1; там же приведены профили пропускания для отмеченных участков. Поскольку почернение на рентгенографическом изображении пропорционально как плотности исследуемого образца, так и длине пути излучения, регистрируемые структуры могут представлять собой периодическое изменение либо толщины фольги, либо ее плотности (в принципе может быть и то, и другое). Обозначения направлений X и Y на рисунке введены таким образом, чтобы одномерная собственная структура фольги

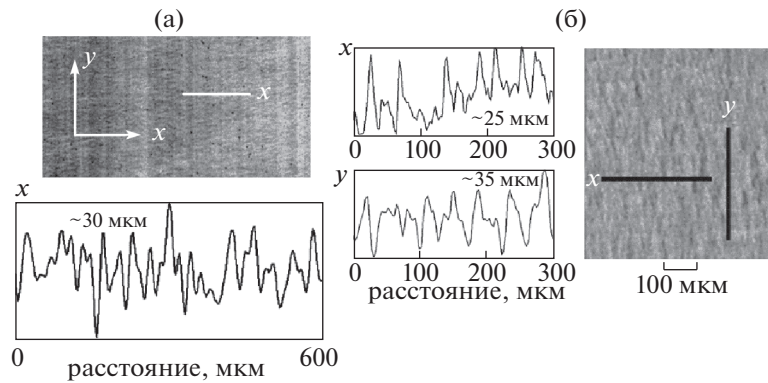


Рис. 1. Рентгенограммы ($2.5 < E < 4.8$ кэВ) алюминиевых фольг толщиной (а) 16 мкм и (б) 4 мкм. Профили пропускания, сделанные в местах, отмеченных белыми и черными отрезками, демонстрируют наличие у фольги собственной одномерной (а, X) и двумерной (б, X и Y) структур. На рисунках указано среднее значение расстояния между пиками (шаг периодической структуры).

была расположена вдоль Y – так, как это показано на рис. 1а; в случае двумерной СС вдоль Y ориентирована более длинная сторона отдельного элемента структуры (рис. 1б). Далее везде на рисунках собственная структура (единственная или ее наиболее выраженный элемент) также ориентирована по направлению Y .

В используемой нами фольге толщиной 12 мкм зафиксировать какую-либо структуру методом проекционной рентгенографии не удалось. Однако, как будет показано ниже, в процессе электро-взрыва в керне образуются неустойчивости, характерные для фольг с одномерной собственной структурой. Это позволило предположить, что подобная структура там все-таки присутствует, только с более сглаженным профилем, из-за чего теньевая рентгенография – диагностика, в которой важную роль играет эффект фазового контраста, – не может ее зарегистрировать.

В связи с ограниченностью набора доступных для использования тонких фольг из разных материалов различной толщины выбор вариантов собственных структур также достаточно небольшой. Его удастся расширить с помощью дополнительного нанесения на поверхность фольги искусственной периодической структуры (ИС) произвольного направления и шага. Изучив, как подобные структуры влияют на режим взрыва, можно подобрать оптимальный вариант фольговой нагрузки для той или иной прикладной задачи. При использовании металлических лайнеров для УТС, например, такой задачей является замедление развития неустойчивостей в процессе взрыва [12–14], а при создании мощных генераторов высоковольтных импульсов, генерации ударных волн и детонаторов наиболее важным фактором является скорость дезинтеграции взорванных фольг [1, 2, 7, 8, 15]. Подобных применений, для каждого из которых потребуются специ-

фические условия взрыва и соответствующая им структура фольги, может быть много.

В представленной работе приводятся данные первых экспериментов, полученные при взрыве на генераторе БИН плоских алюминиевых фольг различной толщины с нанесенной на них лазером гравировкой (канавками). Исследовалось совместное влияние на результирующий взрыв фольги собственной и искусственной структур при их различной ориентации по отношению друг к другу и к направлению протекания тока. Заметим, что до проведения экспериментов влияние искусственно нанесенной структуры на структуру керны взорванной фольги не было очевидным, поскольку гравировка не затрагивала всю толщину фольги. Искусственные структуры другого вида будут рассмотрены в последующих работах.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ДИАГНОСТИКА

В экспериментах использовался импульсный высоковольтный генератор БИН с максимальным током в режиме короткого замыкания 270 кА с временем нарастания 100 нс и максимальным напряжением 350 кВ. Исследовались алюминиевые фольги толщиной 4, 12 и 16 мкм, шириной 1.2–2 мм и длиной 6–10 мм. В данной экспериментальной схеме фольга помещалась в цепь обратного тока [9, 10]. Ток через фольгу, измеряемый поясом Роговского, равнялся примерно 80 кА и почти не менялся от выстрела к выстрелу по амплитуде и форме импульса. Его величина определяется общей индуктивностью контура и практически не зависит от толщины, длины и ширины фольги. На рис. 2 приведен ток генератора БИН и характерный ток через фольгу.

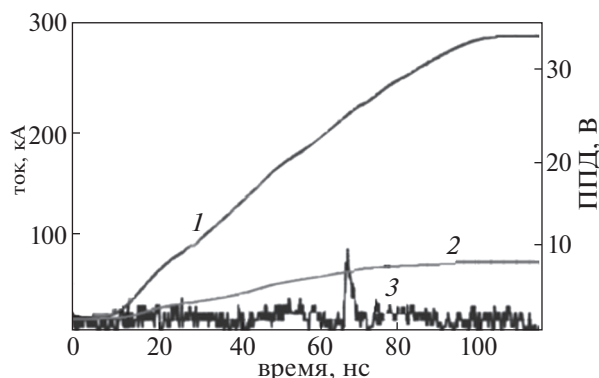


Рис. 2. Характерные сигналы тока генератора БИН (1), тока через алюминиевую фольгу толщиной 4 мкм (2) и сигнала алмазного детектора с фотопроводимостью (ППД) (3).

Нагрузкой основной цепи генератора служил гибридный X-пинч (ГХП) с молибденовой проволокой диаметром 25 мкм. Излучение горячей точки X-пинча использовалось для получения рентгенографических изображений взрываемой нагрузки. Проекционная рентгенография является основной диагностикой при взрыве фольг, поскольку только она обеспечивает высокое временное и пространственное разрешение при практически неограниченном поле зрения [16, 17]. Изображения регистрировались рентгеновскими запоминающими пластинами Fuji BAS TR с фильтром из титановой фольги толщиной 12.5 мкм. Для защиты от распыленного материала электродов и нагрузки они были дополнительно закрыты лавсаном толщиной 6 мкм. Изображения регистрировались в диапазоне энергий квантов от 2.5 до 4.8 кэВ, который определяется пропусканием фильтров. С учетом геометрии эксперимента (увеличение в 8 раз), разрешения изображающих пластин (12.5 мкм) и размера горячей точки X-пинча пространственное разрешение диагностики во всех выстрелах не превышало 5 мкм. Отметим, что фоновое излучение на рентгенограммах не всегда получалось однородным (со стороны анода изображение более темное), что несколько усложняло сравнение амплитуд неустойчивостей в разных частях фольги. Для анализа профилей пропускания по возможности выбирались выстрелы с наиболее однородной фоновой засветкой. Когда это было существенно, фоновая засветка вычиталась. Качество и количество источников излучения ГХП контролировалось при помощи алмазного полупроводникового детектора (ППД) [18]. Характерный сигнал ППД относительно тока через фольгу и тока генератора показан на рис. 2. Подробное описание диагностик и схемы эксперимента приведено в работе [19].

Искусственные структуры, наносимые на фольгу лазерным гравировальным аппаратом, представляют собой продольные канавки на ее поверхности. Обработка металлической фольги производилась в воздухе с использованием коммерчески доступного аппарата на базе высококонтрастного иттербиевого импульсного волоконного лазера с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм, который генерировал импульсы длительностью $\tau = 120$ нс с частотой повторения в диапазоне $f = 30\text{--}200$ кГц; диаметр фокусного пятна лазера $d = 40$ мкм. Металл облучали на 45% уровне от максимальной мощности лазера. Серия импульсов сканировала поверхность построчно, с настраиваемым шагом [20, 21]. В данных экспериментах использовалась частота лазера 50 кГц, что давало интервал между импульсами 20 мкс.

Гравировка производилась в двух взаимно перпендикулярных направлениях — параллельно и перпендикулярно собственной структуре фольги; режим облучения мог быть однократным или многократным (десять или сорок проходов лазера). Канавки одного направления гравировались по всей ширине фольги на участках образца длиной 1 мм. Результаты обработки контролировались с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL 7001F (SEM) с полевой эмиссионной пушкой. При однократном воздействии лазера толщина канавки равна фокусному пятну лазера — 40 мкм. При многократном воздействии ширина канавок увеличивалась до 50–55 мкм. На приведенных в работе рисунках расстояние между канавками составляет 50 мкм. В отдельных случаях это расстояние было увеличено до 100 мкм, что не привело к существенно отличающимся результатам.

Глубина гравировки оценивалась следующим образом. На практике при 45% мощности лазера после двух проходов аппарата фольга толщиной 4 мкм частично прожигалась насквозь. Исходя из этого, можно считать, что за один проход аппарата снимается около 1–2 мкм материала фольги, что является весьма существенным воздействием. При многократном воздействии такая оценка не годится, поскольку в этом случае глубина канавки не кратна количеству проходов аппарата. Прежде всего, луч мог смещаться в обе стороны от места первого прохода лазера, и канавка получается шире, чем при однократном воздействии. Кроме того, материал фольги, интенсивно нагреваясь, частично расплавляется и затекает обратно в канавку или же остается на ее краях над поверхностью фольги. Визуальная оценка поверхности фольги с помощью обычного микроскопа при 10-кратном увеличении дает значение глубины канавки, образованной в результате многократного воздействия, от 2 до 4 мкм.

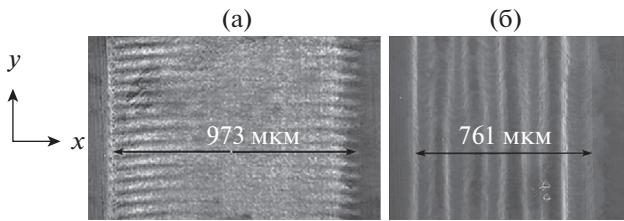


Рис. 3. Фотографии фольг с канавками, нанесенными на алюминиевую фольгу толщиной 16 мкм за сорок проходов лазера в направлении X (а) с шагом 50 мкм и Y (б) с шагом 100 мкм. Обозначенные на рисунке поперечные размеры фольги определялись после обработки гравировальным аппаратом. Фотографии сделаны сканирующим электронным микроскопом JEOL 7001F (SEM) с увеличением в 100 раз.

Кроме того, выяснилось, что при многократной обработке фольги лазером в направлении собственной структуры происходит объемная деформация материала: металл как бы “стягивается” в область воздействия. В то же время перпендикулярные по отношению к СС канавки гравировались без существенных дефектов. Однократное воздействие лазера на фольгу любой толщины не приводит к ее деформации — независимо от взаимной ориентации первоначальной структуры и направления гравировки.

Фотографии разнонаправленных искусственных структур (ИС), выгравированных в фольге толщиной 16 мкм с одномерной собственной структурой, приведены на рис. 3. Канавки, перпендикулярные СС (направление X), сделаны с шагом 50 мкм, а параллельные (направление Y) — с шагом 100 мкм. Видно, что в первом случае с правой стороны у ИС нет четкого края (эта особенность заметна и на некоторых рентгенограммах); вероятно, не во всех проходах лазер доходил до конца канавки. Нечеткая средняя часть объясняется особенностями фотографирования. Из рис. 3а следует, что длина обработанного участка фольги (почти 1 мм с учетом неточности измерения) практически не изменилась, что говорит о том, что при нанесении канавок, перпендикулярных СС, существенной деформации материала не произошло. При направлении гравировки, параллельном собственной структуре, миллиметровый участок с канавками сократился до 761 мкм (рис. 3б), то есть в процессе нанесения ИС произошла деформация фольги (стягивание).

На рис. 4 приведена рентгенограмма алюминиевой фольги толщиной 12 мкм (без выраженной собственной структуры), на двух участках которой за сорок проходов лазера были нанесены канавки вдоль направлений X и Y . Профиль пропускания для фрагмента участка 1 показывает, что в направлении X образовалась хорошо выраженная периодическая структура с шагом 50 мкм.

Средний уровень поглощения мягкого рентгеновского излучения на этом участке не отличается от поглощения в фольге между участками 1 и 2, где гравировки не было (сравнивались близко расположенные участки, чтобы не учитывать разницу в уровне фона). В направлении Y , совпадающем с направлением собственной структуры (участок 2), канавки не имеют четких границ, а фольга в этом месте сжалась до 770 мкм. Соответствующий провал на общем профиле пропускания говорит о том, что поглощение МРИ в области лазерного гравирования, производимого в направлении Y , было заметно сильнее, чем поглощение на других участках фольги. Различие результатов гравировки по двум перпендикулярным направлениям при одинаковом режиме лазерного воздействия подтверждает предположение о наличии у данной фольги собственной структуры в направлении Y . При отсутствии СС такое различие труднообъяснимо.

Чтобы обеспечить максимальную корректность оценки поглощения, потребовалось ответить на вопрос о возможном окислении фольги в процессе многократного воздействия лазера. Присутствие большого количества кислорода в принципе могло привести к изменению в поглощении фольги (безотносительно к возникающим структурам). Чтобы выяснить это, с помощью метода энергодисперсионной спектроскопии (EDS, EDX) было проведено спектральное исследование обработанного образца; при этом использовалось приложение INCA X-act к сканирующему электронному микроскопу JEOL 7001F. Данные из нескольких точек усреднялись для повышения точности. Измерения показали, что окисления материала фольги в местах лазерной обработки не происходит. Во всех зарегистрированных спектрах содержание кислорода составляло около 1%, что не влияет на поглощение рентгеновского излучения в фольге.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Искусственная структура фольги должна оказывать примерно такое же влияние на возникающие в процессе взрыва неустойчивости, как и ее собственная структура. Тогда логично предположить, что направление протекания тока относительно ИС может являться столь же существенным параметром, как и в случае наличия у фольги собственной структуры (что было подробно рассмотрено в работах [9–11]). Для учета этого фактора взрываеемые образцы (нагрузка) вырезались так, чтобы разрядный ток протекал либо вдоль направления X (поперек СС), либо вдоль Y (параллельно СС). Способ, позволяющий обнаружить влияние искусственной структуры на результат взрыва фольги, состоял в сравнении частоты (шага), а также амплитуд развивающихся

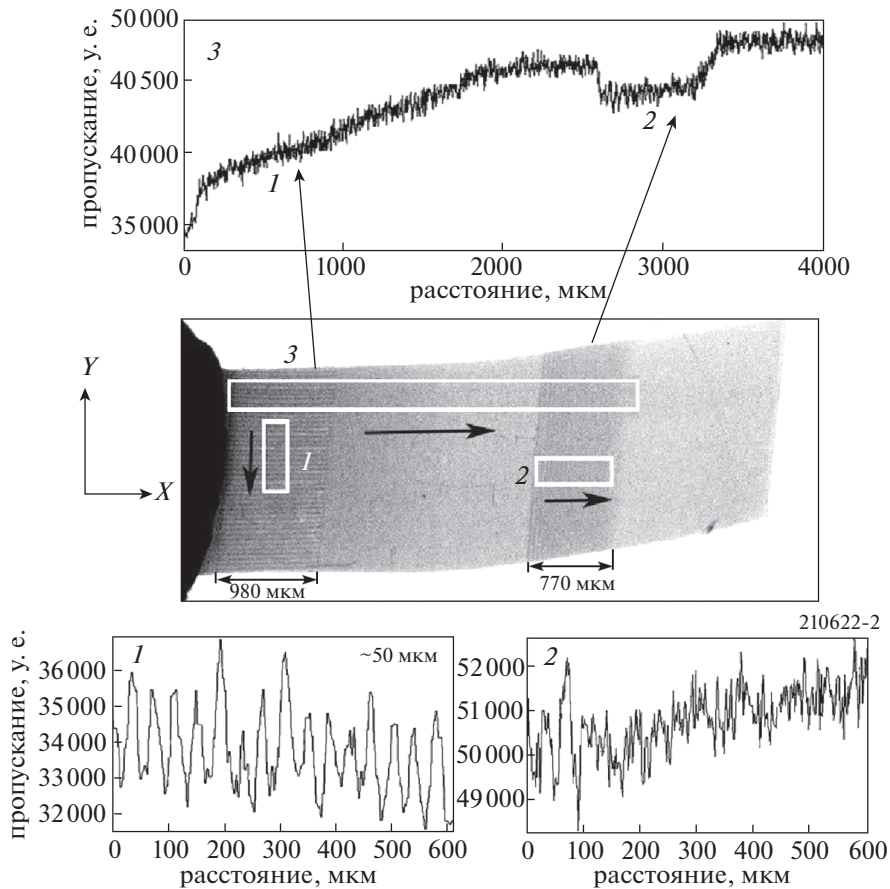


Рис. 4. Рентгенограмма ($2.5 < E < 4.8$ кэВ) алюминиевой фольги толщиной 12 мкм с участками ИС, нанесенной в направлениях X (1) и Y (2) за сорок проходов лазера с шагом 50 мкм; длинный участок (3) включает обе области с лазерной гравировкой, а также фольгу без обработки. Белыми прямоугольниками отмечены фрагменты, для которых приведены профили пропускания; стрелками показано направление прописи. На фрагменте (1) указан шаг образованных канавок.

неустойчивостей на разных участках образующегося зерна – предварительно обработанных лазером и без обработки. В экспериментах применялось как однократное, так и многократное облуживание образцов.

Взрыв фольг с гравировкой, созданной при однократном воздействии лазера

В данной серии экспериментов канавки на поверхности фольг гравировались за один проход лазера на участках длиной 1 мм с шагом 50 мкм в двух перпендикулярных направлениях X и Y (вдоль и поперек собственной структуры). Фольговая нагрузка вырезалась таким образом, чтобы ток в разряде также протекал вдоль одного из этих направлений.

Алюминиевые фольги толщиной 12 мкм. Рентгенограмма, приведенная на рис. 5, получена при взрыве горячей точки ГХП в момент $t = 46$ нс после начала тока. Собственная структура фольги в

данном случае была ориентирована вдоль тока. Кривая профиля пропускания, построенная для фрагмента а, демонстрирует, что в фольге без гравировки (участок 1) среднее поглощение больше, чем на обоих участках с нанесенной структурой – как параллельной току 2, так и перпендикулярной ему 3. Возможно, это объясняется частичным распылением материала при лазерном воздействии – фольга в таких местах становится тоньше. Характер выявляемой с помощью рентгенограмм ЭВ-структуры зерна на участках с ИС также отличается от структуры на необработанном участке 1. Это хорошо видно на рис. 6, на котором все три области представлены в увеличенном масштабе. Там же приводятся кривые пропускания, построенные для отмеченных фрагментов. Шаг неустойчивостей на обработанных лазером участках 2 и 3 меньше, чем на участке фольги без гравировки 1, и примерно совпадает с шагом ИС – для обоих направлений канавок. Отметим, что кривые пропускания строились для центральной части фольги, примерно на трети ее ширины. Со-

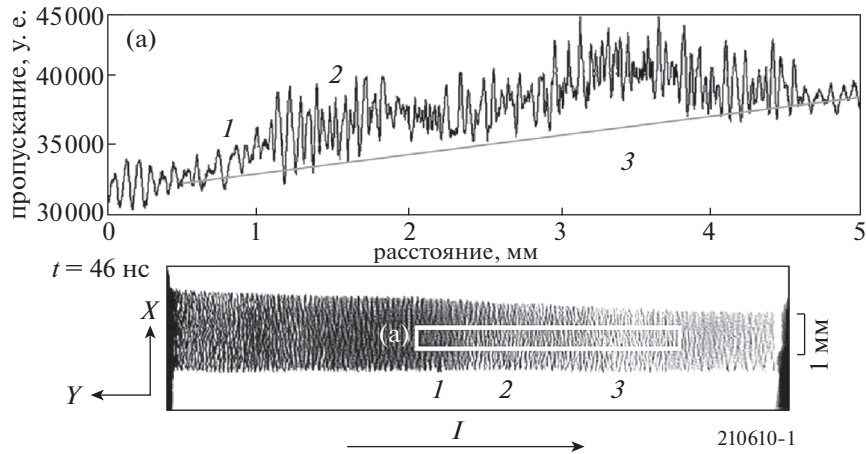


Рис. 5. Рентгенограмма ($2.5 < E < 4.8$ кэВ) взрывающейся Al фольги толщиной 12 мкм ($t = 46$ нс) и кривая пропускания, построенная для фрагмента **a**, отмеченного белым прямоугольником. (1) – участок без гравировки, (2) – участок с ИС, параллельной направлению тока, (3) – участок с ИС, перпендикулярной направлению тока (показано стрелкой). Канавки шириной 40 мкм нанесены за один проход лазера с шагом 50 мкм. Ток через фольгу в момент получения изображения ~ 58 кА.

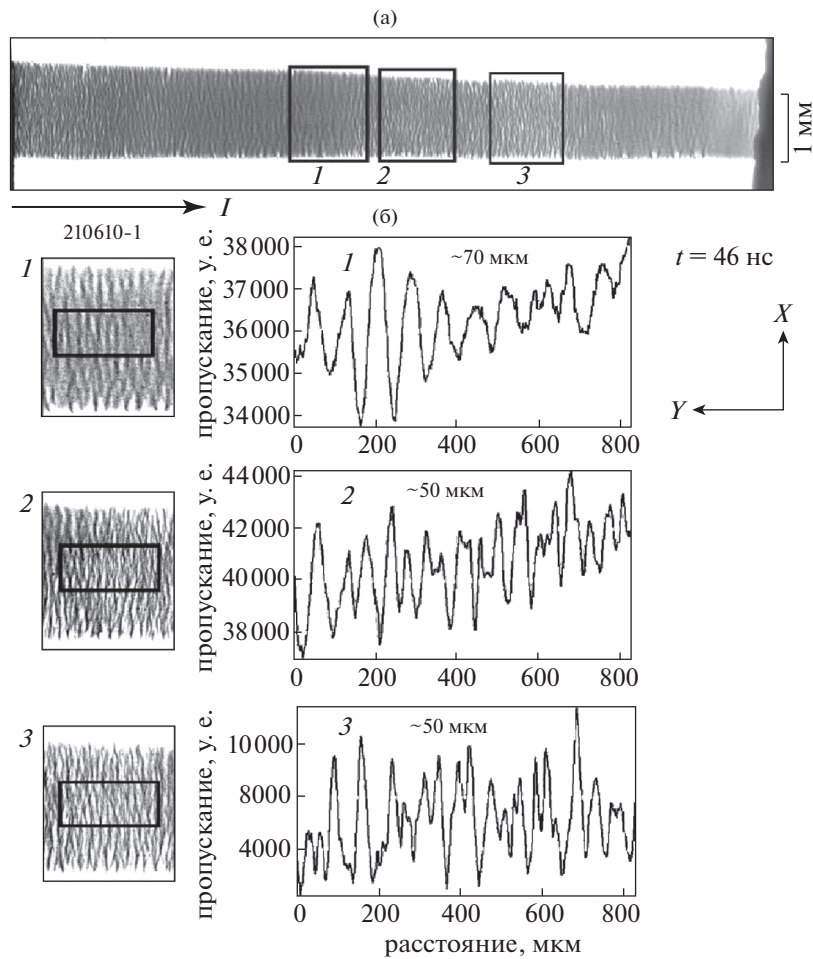


Рис. 6. а) – рентгенограмма взрывающейся Al фольги толщиной 12 мкм (та же, что на рис. 5). Черными прямоугольниками выделены области: 1 без ИС, 2 с ИС, параллельной направлению тока (показано стрелкой), 3 с ИС, перпендикулярной направлению тока; б) – увеличенные участки рентгенограммы и соответствующие кривые пропускания для выделенных фрагментов с указанием шага неустойчивости в данном месте.

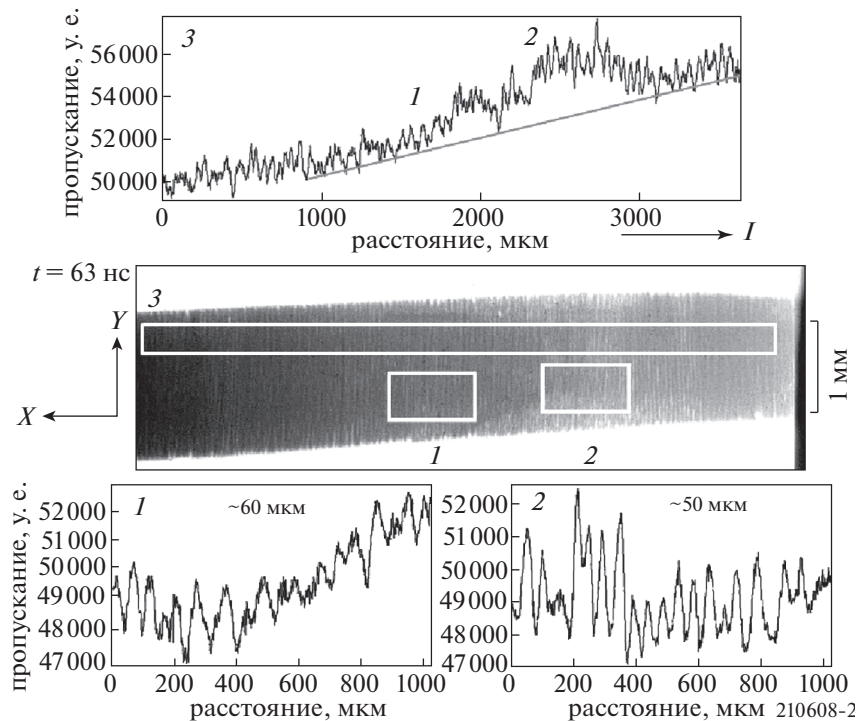


Рис. 7. Рентгенограмма ($2.5 < E < 4.8$ кэВ) взрывающейся Al фольги толщиной 12 мкм ($t = 63$ нс) и кривые пропускания, построенные для выделенных фрагментов (показаны белыми прямоугольниками). 1 – участок фольги без ИС, 2 – участок с ИС, перпендикулярной направлению тока (показано стрелкой), 3 – большой фрагмент рентгенограммы, включающий участки с нанесенной ИС и без нее. Канавки шириной 40 мкм нанесены за один проход лазера с шагом 50 мкм. Ток через фольгу в момент получения изображения ~ 73 кА.

стояние краев взорванной фольги в данной работе не рассматривается.

На рис. 7 представлена рентгенограмма взорванной ($t = 63$ нс) фольги, вырезанной в перпендикулярном, по сравнению с предыдущим случаем, направлении: предполагаемая собственная структура Y теперь направлена перпендикулярно току. Сопоставление профилей пропускания для областей без гравировки 1 на рис. 6 и рис. 7 показывает, что возникающие в керне ЭВ-структуры для разных направлений тока сильно различаются. Как уже отмечалось выше, это характерно для фольг с выраженной одномерной собственной структурой. У таких фольг перпендикулярная току ориентация СС приводит к формированию в том же направлении одномерной ЭВ-структуры, тогда как при параллельной ориентации тока и СС – двух взаимно перпендикулярных ЭВ-структур, которые накладываются друг на друга [9]. Именно такая ситуация наблюдалась во всех экспериментах серии по взрыву алюминиевой фольги толщиной 12 мкм. Отсюда можно сделать вывод, что у данной фольги, действительно, есть одномерная собственная структура – несмотря на то, что она не видна на рентгенограммах, сделанных до взрыва.

Тем не менее, из-за недостаточной выраженности у 12 мкм фольги собственной структуры гораздо более сильное влияние на результат взрыва оказывает искусственный профиль материала. Кривая пропускания, сделанная на всей длине фольги (фрагмент 3 на рис. 7), позволяет сравнить поглощение в области, где была искусственная структура, с соседними, необработанными участками. Видно, что наличие канавок, так же, как и в случае альтернативного направления СС (рис. 5), приводит к уменьшению среднего поглощения. Кроме того, в местах нанесения ИС (при любой ее ориентации по отношению к собственной структуре) амплитуда развивающихся неустойчивостей становится больше, а шаг уменьшается по сравнению с ЭВ-структурой фольги без гравировки (рис. 6, 7). Это происходит, как если бы фольга в местах с нанесенной структурой находилась на более поздней стадии взрыва, чем соседние, необработанные участки. Действительно, плотность тока в более тонких (частично испаренных во время лазерного сканирования) участках фольги выше, поэтому процесс развития неустойчивостей в таких местах должен протекать быстрее [15]. В результате их структура становится более ярко выраженной, имеет меньший шаг и большую амплитуду колебаний по сравне-

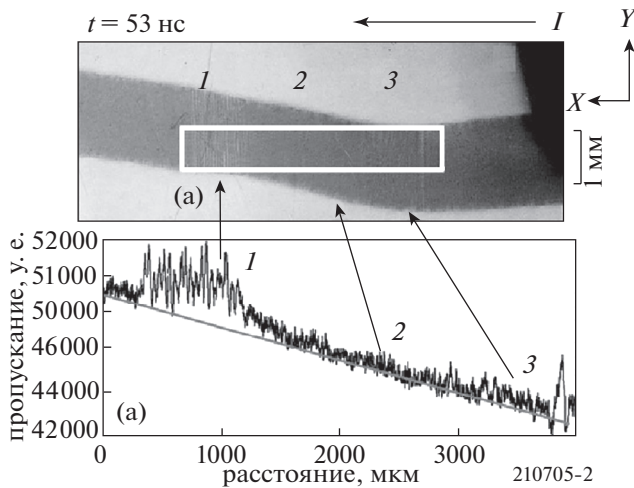


Рис. 8. Рентгенограмма ($2.5 < E < 4.8$ кэВ) взрывающейся Al фольги толщиной 4 мкм ($t = 53$ нс) и кривая пропускания для области (а), отмеченной белым прямоугольником. 1 – участок с ИС, перпендикулярной току; 2 – участок фольги без гравировки; 3 – участок с ИС, параллельной току (направление тока показано стрелкой). Канавки шириной 40 мкм нанесены за один проход лазера с шагом 50 мкм. Ток через фольгу в момент получения изображения ~ 65 кА.

нию с еще не полностью сформированной ЭВ-структурой фольги без ИС. Но если возрастание амплитуды неустойчивостей можно объяснить уменьшенной толщиной фольги в месте лазерной обработки, то изменение шага может быть связано только с внешним периодическим воздействием (в нашем случае это нанесение регулярных канавок).

Алюминиевые фольги толщиной 4 мкм. Собственная структура фольги (более длинная сторона двумерной структуры) в этих экспериментах была ориентирована перпендикулярно току; как показывают рентгенограммы, при взрыве она также не вызвала заметного развития неустойчивостей в керне (рис. 8, 9) – в отличие от ИС. Как и предполагалось, при нанесении на фольгу односторонних искусственных структур (канавок) в направлениях X и Y основным фактором, влияющим на образующиеся ЭВ-структуры, является направление ИС по отношению к току – наиболее эффективное воздействие оказывает гравировка, перпендикулярная току.

Действительно, кривая пропускания на рис. 8 показывает, что параллельная току ИС 3 практически не изменяет поглощение рентгеновского излучения по сравнению с фольгой без гравировки 2: в обоих случаях неустойчивости с регулярной структурой не образуются. В то же время структура, нанесенная перпендикулярно току, уменьшает среднее поглощение и приводит к образованию регулярных неустойчивостей с шагом

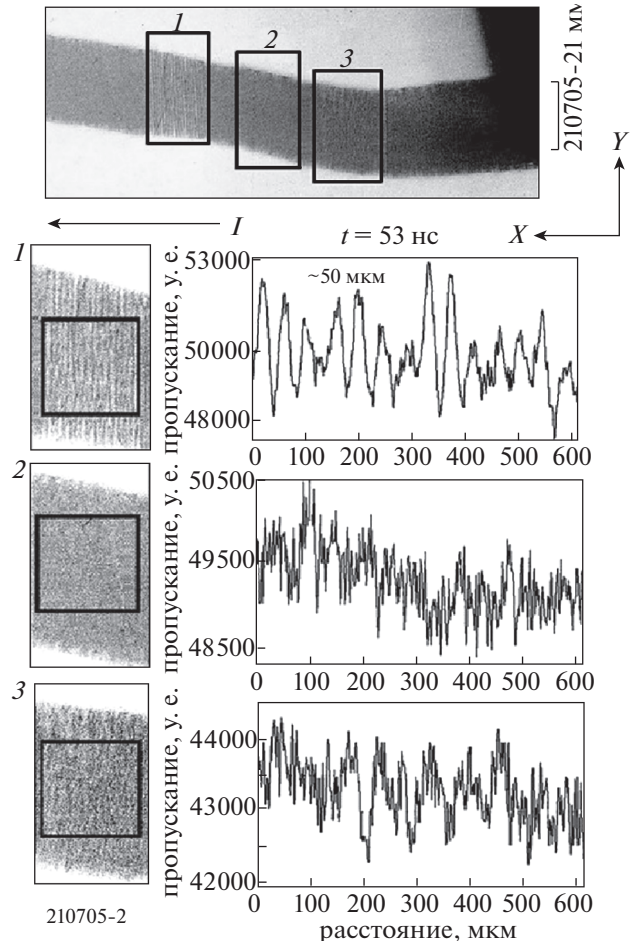


Рис. 9. Рентгенограмма ($2.5 < E < 4.8$ кэВ) взрывающейся Al фольги толщиной 4 мкм (та же, что на рис. 8), а также увеличенные участки рентгенограммы и соответствующие кривые пропускания для выделенных фрагментов: 1 – область с ИС, перпендикулярной току с указанием шага неустойчивости в данном месте; 2 – область без ИС; 3 – область с ИС, параллельной току.

около 50 мкм (участок 1 на рис. 8 и рис. 9). Можно сделать вывод, что периодическое воздействие на поверхность фольги (предварительное нанесение канавок) становится в процессе взрыва катализатором образования и развития неустойчивостей с шагом, который определяется шагом искусственной структуры.

В целом результаты экспериментов по взрыву фольг с маловыраженной собственной структурой показывают, что нанесение на поверхность нагрузки односторонних искусственных структур, не приводящее к видимой деформации фольги, вызывает развитие ЭВ-структур с шагом, совпадающим (или близким) к шагу ИС.

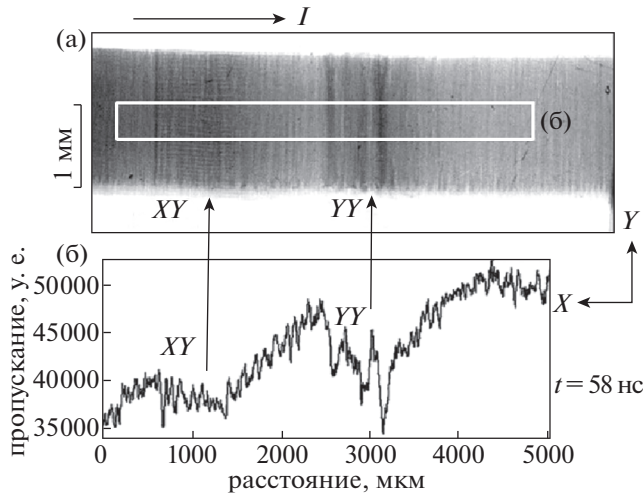


Рис. 10. а – Рентгенограмма ($2.5 < E < 4.8$ кэВ) взрываеваемой Al фольги толщиной 16 мкм ($t = 58$ нс); б – кривые пропускания для фрагмента, отмеченного белым прямоугольником. XY – участок с ИС, параллельной току; YY – участок с ИС, перпендикулярной току. Канавки шириной 55 мкм нанесены за 40 проходов лазера с шагом 50 мкм, длина каждой из областей обработки 1 мм. Ток через фольгу в момент получения изображения ~ 70 кА.

Взрыв фольг с гравировкой, созданной при многократном воздействии лазера

Алюминиевая фольга толщиной 16 мкм относится к фольгам с хорошо выраженной одномерной собственной структурой (рис. 1а). Поэтому она была использована для изучения взаимного влияния искусственной и собственной структур в процессе взрыва. Создание более ярко выраженного искусственного профиля у такой фольги потребовало сильного (многократного) воздействия лазера. Канавки искусственной структуры нанесли на двух участках образца за сорок проходов аппарата в двух перпендикулярных направлениях – вдоль оси Y, то есть параллельно собственной структуре (геометрия YY) и перпендикулярно ей, вдоль оси X (геометрия XY). Во всех экспериментах нагрузка располагалась таким образом, чтобы разрядный ток протекал перпендикулярно СС, вдоль направления X.

Рентгенограмма взрываеваемой фольги толщиной 16 мкм ($t = 58$ нс) приведена на рис. 10 и рис. 11. Кривая пропускания, представленная на рис. 10б, демонстрирует (при учете неравномерности фоновой засветки), что поглощение на участке YY в среднем значительно больше, чем фольге без гравировки. Это отличает многопроходные структуры от рассмотренных в предыдущем разделе однопроходных ИС, где ситуация обратная. Можно предположить, что причиной является уже упомянутое выше частичное стягивание материала фольги в месте обработки. В

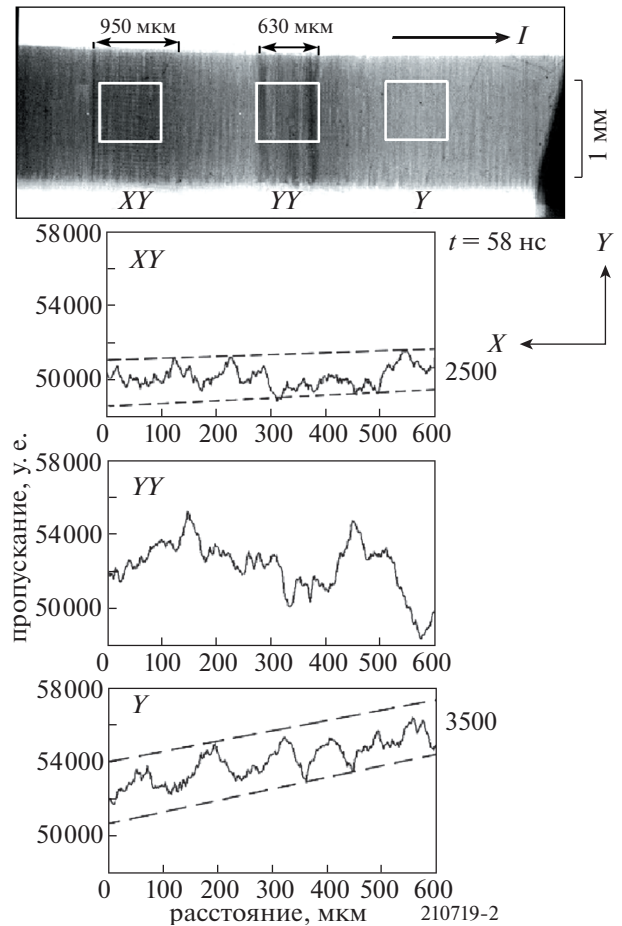


Рис. 11. Рентгенограмма взрываеваемой Al фольги толщиной 16 мкм (та же, что на рис. 10) и кривые пропускания для областей, выделенных белыми прямоугольниками. XY – область с ИС, параллельной току и перпендикулярной СС фольги, YY – область с ИС, перпендикулярной току и параллельной СС фольги, Y – область без ИС.

данном случае произошло уменьшение длины участка YY с 1000 до 630 мкм (рис. 11). На рис. 12 приведена другая рентгенограмма такой же фольги, зарегистрированная в более позднее время (62 нс), которая демонстрирует столь же сильную деформацию материала. С точки зрения возможных применений взрывающихся фольг искусственные структуры, получаемые при многократной гравировке фольги в направлении, параллельном ее собственной структуре, по всей видимости, не представляют интереса.

Искусственная структура, перпендикулярная току и собственной структуре фольги (XY), практически не влияет на поглощение МРИ и при этом вызывает частичное сглаживание неустойчивостей (рис. 11, 12). Пунктирные линии на рисунках, проведенные через максимальные значения пиков, позволяют оценить амплитуду

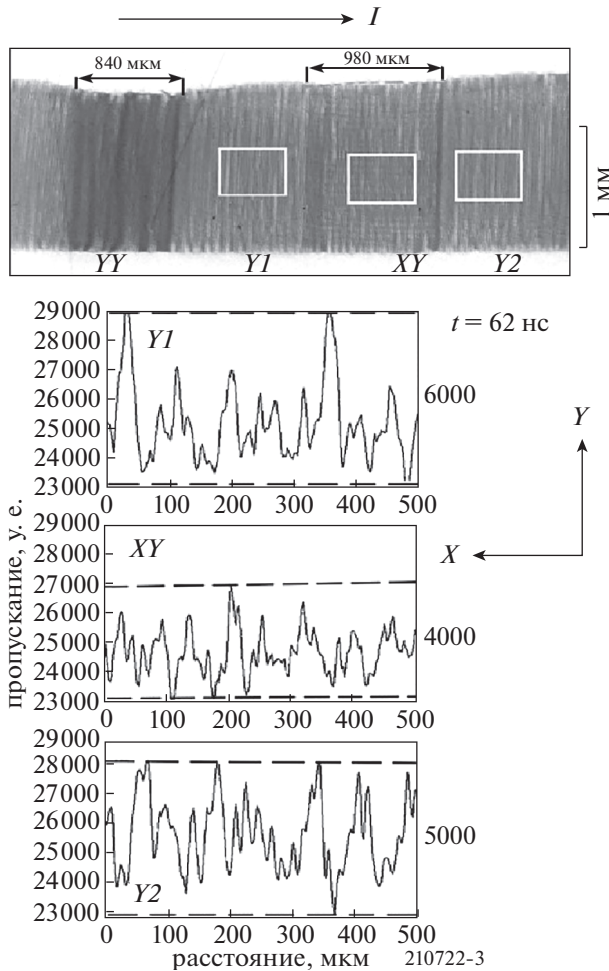


Рис. 12. Рентгенограмма ($2.5 < E < 4.8$ кэВ) взрываемой Al фольги толщиной 16 мкм ($t = 62$ нс) и кривые пропускания для областей, выделенных белыми прямоугольниками. Y1 и Y2 – области без гравировки; XY – область с ИС, параллельной току и перпендикулярной СС фольги. Канавки шириной 55 мкм нанесены за 40 проходов лазера с шагом 50 мкм, длина каждой из областей обработки 1 мм. Ток через фольгу в момент получения изображения ~ 74 кА.

ЭВ-структуры в момент регистрации рентгенограммы. Кривые профиля пропускания фольги на участках Y1 и Y2 (рис. 12) сделаны с обеих сторон от участка с канавками, чтобы исключить случайные флуктуации. Сравнивая пропускание на участках фольги с канавками и без них, можно заметить, что амплитуда неустойчивостей, развивающихся на участке керны фольги с ИС, перпендикулярной собственной структуре фольги (параллельной току), на 15–35% меньше, чем в фольге без гравировки.

Эффект сглаживания неустойчивостей в той или иной степени наблюдался во всех экспериментах с фольгами толщиной 16 мкм со “скрещенной” XY структурой, нанесенной за 10 или

40 проходов лазера. Можно предположить, что в этом случае происходит разрушение исходной структурированности материала. Тем самым, нанесение на фольгу поперечных искусственных структур должно приводить к замедлению роста неустойчивостей в лайнерах любой конфигурации.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты представленных здесь первых экспериментов по изучению влияния искусственных структур на неустойчивости в керне взрывааемых фольг позволяют сделать следующие выводы:

1. У фольг без ярко выраженной одномерной собственной структуры, используемых в качестве нагрузки при электрическом взрыве, предварительное искусственное профилирование поверхности может явиться катализатором развития регулярных неустойчивостей в направлении, перпендикулярном току. Шаг неустойчивостей в этом случае будет определяться шагом нанесенных канавок.

2. При наличии у фольги собственной одномерной структуры нанесение искусственного профиля в виде канавок, перпендикулярных ей и параллельных направлению тока, приводит к замедлению развития неустойчивостей на 15–35%.

Работа выполнена при сотрудничестве с Центром коллективного пользования ФИАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Sedoi V.S., Mesyats G.A., Oreshkin V.I., Valevich V.V., Chemezova L.I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. P. 845.
3. Бабыкин М.В., Байгарин К.А., Бартов А.В., Горбулин Ю.М., Махов В.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. P. 415.
4. Takayuki M., Matsuo N., Otsuka M., Itoh S. // Proc. SPIE. 2010. V. 75. P. 75222. <https://doi.org/10.1117/12.851562>
5. Александров В.В., Баско М.М., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В., Фролов И.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 613. <https://doi.org/10.31857/S0367292121070039>
6. Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Bolkhovitinov E.A., Kologrivov A.A., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Rupasov A.A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30. P. 115012. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac3211>
7. Smilowitz L., Remelius D., Suvorova N., Bowlan P., Oswald D., Henson B.F. // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114. P. 104102. <https://doi.org/10.1063/1.5088606>

8. *Rae P.J., Feagin T.A., Heatwole E.M.* // *J. Appl. Phys.* 2020. V. 128. P. 033301.
<https://doi.org/10.1063/5.0006804>
9. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Tilikin I.N., Romanova V.M., Mishin S.N., Atoyán L., Hammer D.A.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2018. V. 46. P. 3741.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2852063>
10. *Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Pikuz S.A.* // *Phys. Plasmas.* 2020. V. 27. P. 043508.
<https://doi.org/10.1063/1.5133126>
11. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Hammer D.A.* // *J. Appl. Phys.* 2020. V. 128. P. 205902.
<https://doi.org/10.1063/5.0019330>
12. *Peterson K.J., Sinars D.B., Yu E.P., Herrmann M.C., Cuneo M.E., Slutz S.A., Ian C., Smith I.C., Briggs W., Ather-ton B.W., Marcus D., Knudson M.D., Nakhleh C.* // *Phys. Plasmas.* 2012. V. 19. P. 092701.
<https://doi.org/10.1063/1.4751868>
13. *Awe T.J., Peterson K.J., Yu E.P., McBride R.D., Sinars D.B., Gomez M.R., Jennings C.A., Martin M.R., Rosenthal S.E., Schroen D.G., Sefkow A.B., Slutz S.A., Tomlinson K., Vesey R.A.* // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 065001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.065001>
14. *Pecover J.D., Chittenden J.P.* // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. P. 102701.
<https://doi.org/10.1063/1.4932328>
15. *Тиликин И.Н., Шелковенко Т.А., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Пикуз С.А.* // *ЖЭТФ.* 2019. Т. 155. С. 1115.
<https://doi.org/10.1134/S0044451019060166>
16. *Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Иваненков Г.В., Степниевски В., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Агафонов А.В., Кахилл А.Д., Хойт К.Л., Гордан П.А., Хаммер Д.А., Пикуз С.А.* // *Физика плазмы.* 2015. Т. 41. С. 54.
<https://doi.org/10.7868/S0367292115010035>
17. *Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Хаммер Д.А.* // *Физика плазмы.* 2016. Т. 42. С. 234.
<https://doi.org/10.7868/S0367292116030070>
18. *Spielman R.B., Ruggles L.E., Pepping R.E., Breeze S.P., McGurn J.S., Struve K.W.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. V. 68. P. 782.
19. *Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Тиликин И.Н., Мингалеев А.Р., Атоян Л., Хаммер Д.А.* // *Физика плазмы.* 2018. Т. 44. С. 193.
<https://doi.org/10.7868/S0367292118020117>
20. *Zhu C., Wan H., Min J., Mei Y., Lin J., Carlson B.E., Maddel S.* // *Optics and Lasers in Engineering.* 2019. V. 119. P. 65.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.03.017>
21. *Veiko V., Karlagina Y., Moskvín M., Mikhailovskii V., Odintsova G., Olshinb P., Pankin D., Romanov V., Yatsuk R.* // *Optics and Lasers in Engineering.* 2017. V. 96. P. 63.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.04.014>