

УДК 533.9;537.21

О ядерном DD-синтезе на начальной стадии импульсного вакуумного разряда с дейтерированным Pd-анодом

Ю. К. Куриленков, С. Ю. Гуськов, В. Т. Карпухин, А. В. Огинов, И. С. Самойлов

Ранее была продемонстрирована генерация DD-нейтронов в межэлектродной среде наносекундного вакуумного разряда малой энергии (~ 1 Дж) с полым катодом и дейтерированным Pd-анодом. Была выявлена принципиальная роль образования виртуального катода и соответствующей ему потенциальной ямы в процессах столкновительного DD-синтеза в межэлектродном пространстве. В данной работе получен в эксперименте и обсуждается выход нейтронов на самой начальной стадии разряда, когда пучок автоэлектронов лишь начинает облучать неидеальную поверхность дейтерированного Pd-анода.

PACS 52.58.Ei, 52.58.Qv

Ключевые слова: виртуальный катод, потенциальная яма, столкновительный синтез, выход нейтронов, морфология поверхности.

Введение

В работах [1—4] исследовались процессы ядерного синтеза в компактной схеме инерционного электростатического удержания (ИЭУ), реализованной на основе наносекундного вакуумного разряда (НВР) малой энергии. Выход DD-нейтронов из межэлектродного пространства НВР с дейтерированным Pd-анодом был представлен и обсуждался ранее [1, 2].

Полное PIC-моделирование условий эксперимента с НВР было проведено с помощью электродинамического кода КАРАТ [3, 4]. В частности, была выявлена принципиальная роль образования виртуального катода (ВК) и соответствующей ему глубокой квазистационарной потенциальной ямы (ПЯ) [2]. PIC-моделирование подтвердило, что эксперимент с НВР реализует известную схему ИЭУ [5, 6] с обратной полярностью [7]. Дейтроны ускоряются в ПЯ до энергий в десятки кэВ, что и обеспечивает DD-ядерный синтез при встречных столкновениях дейтронов в моменты их коллапса на «дне» ПЯ. В частности, дейтроны могут совершать и высокочастотные (~80 МГц) гармониче-

ские колебания в потенциальной яме, что сопровождается в эксперименте пульсирующим выходом DD-нейтронов [1, 2].

В то же время PIC-моделирование динамики всех частиц показало, что в первые наносекунды после приложения высокого напряжения пучок автоэлектронов с катода (с энергией около 50 кэВ) достигает поверхности дейтерированного анода и начинает с ней взаимодействовать. Начальная стадия разряда ранее была мало изучена и не была достаточно представлена в имеющихся публикациях.

Целью данной работы является описание и анализ опытных данных по НВР, относящихся к появлению DD-нейтронов на самой начальной стадии разряда.

Эксперимент по ИЭУ на базе НВР. DD-нейтроны на начальной стадии разряда

Напомним, что в эксперименте мы использовали модифицированную схему ИЭУ на базе миниатюрного НВР малой энергии с дейтерированным палладиевым анодом [1, 2]. От стандартных схем ИЭУ с электродами—сетками [6] мы перешли к ИЭУ, включающему особенности физики НВР, в частности, был использован полый Al-катод с конической частью и Pd-анод, который периодически заполнялся дейтерием в процессе электролиза в тяжелой воде (см. схему эксперимента и выбранную геометрию базовых электродов в [8]; длительность импульса 50 нс, приложенное напряжение 70 кВ, максимальный ток 1 кА). Такая схема ИЭУ с обратной полярностью [7] даёт возможность работать в вакууме, где при включении напряжения будут формироваться пучки автоэлектронов с катода. Последние, взаимодействуя с

Куриленков Юрий Константинович, ст. научный сотрудник.
Гуськов Сергей Юрьевич, главный научный сотрудник.
Карпухин Вячеслав Тимофеевич, главный научный сотрудник.
Огинов Александр Васильевич, старший научный сотрудник.
Самойлов Игорь Сергеевич, ведущий научный сотрудник.
Объединённый институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2.
E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2015 г.

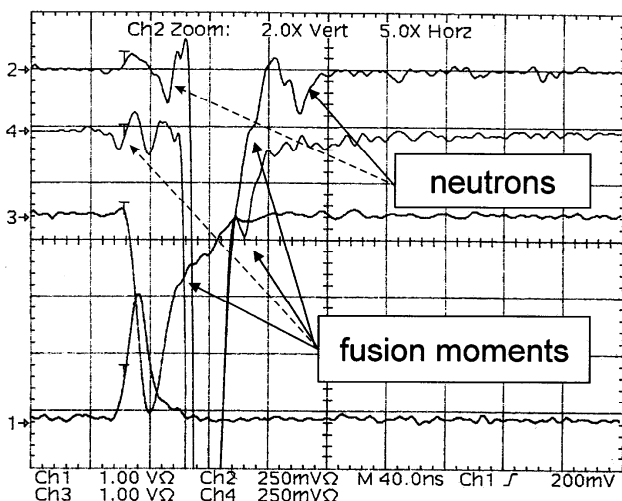
© Куриленков Ю. К., Гуськов С. Ю., Карпухин В. Т., Огинов А. В., Самойлов И. С., 2015

дейтерированным Pd-анодом, во-первых, создадут вблизи анода эрозионную плазму, содержащую дейтроны и дейтерий-содержащие кластеры. Во-вторых, пучки электронов, пролетая внутри анодного пространства (через «сетку» из тонких Pd-стержней) и тормозясь в её центре, образуют ВК и соответствующую ему ПЯ. Глубокая потенциальная яма (десятки кВ) будет играть роль *микрорускорителя*, ускоряя дейтроны с краёв ямы до энергий в десятки кэВ и сталкивая их встречные потоки между собой на оси разряда т. е. на «дне» ПЯ (это относится и к ядерному «горению» ионов сложных элементов с зарядом $Z > 1$ [9]).

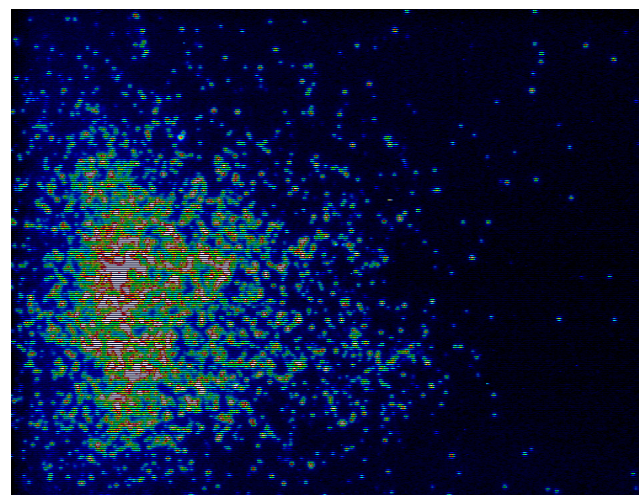
Времяпролётные (time-of-flight) измерения обычно проводились с помощью фотоумножителей PM4 и PM2, расположенных на одной оси с электродами (схема эксперимента приведена в [1, 2, 4]), в данном случае — на расстояниях в 45 и 80 см соответственно. Сигналы с фотоумножителей (от рентгеновского излучения и потоков нейтронов) регистрируются многоканальным осциллографом и представлены на рис. 1, а, а именно, каналы 4 и 2 на осциллограммах. Фотоумножитель PM4 специально регистрирует сам момент реакции (небольшой пик экстрарентгена из-за разлёта быстрых продуктов DD-реакции, канал 4) как реперную точку момента синтеза во времени (в реальном времени она совпадает с изломом сигнала PIN-диода, регистрирующего после момента синтеза экстрарентген, канал 3). Помимо жёсткого, в основном — тормозного, рентгеновского излучения (первые сильные пики интенсивности на каналах 2 и 4), фотоумножитель PM2 может регистри-

ровать и хорошо воспроизводимый сигнал (второй слабый пик, канал 2) с задержкой около 46,6 нс/м относительно момента DD-синтеза (канал 4, рис. 1, а). Эта задержка является характерным признаком нейтронов с энергией около 2,45 МэВ из реакции синтеза $D(D,n)He^3$ (их приход на скintиллятор регистрируется фотоумножителем PM2, канал 2). Изменение расстояния между источником плазмы и PM2 (ближе-дальше) сопровождается соответствующим смещением момента появления нейтронного пика на канале 2 во времени (раньше-позже) [4, 8]. Отметим, что схема ИЭУ, реализуемая на основе НВР [1—4], сильно упрощает ряд имеющихся в Национальной лаборатории LANL (Лос Аламос, США) современных схем ИЭУ [10—12], где для образования ПЯ используется отдельная и достаточно сложная инжекция пучков электронов из специальных источников, делая её просто ненужной. Напомним также, что возможная роль *нестационарной* ПЯ для ускорения ионов перед фронтом катодного факела в режимах неустойчивого токопрохождения детально рассматривалась в [13], что и объяснило, в частности, появление быстрых ионов в ряде ранних экспериментов [14]. В нашем случае конфигурация НВР позволяет создавать в межэлектродном пространстве *квазистационарные* ПЯ [14], что и обеспечивает достаточно контролируемый *столкновительный ядерный синтез*.

Если правая часть осциллограмм, приведенных на рис. 1, а (после 120-й нс, каналы 2, 4) ранее уже была представлена и анализировалась [1—3], то начальные всплески интенсивности рентгена



а



б

Рис. 1. Динамика выхода рентгеновского излучения в режиме 1 (3 Pd-трубки): а) пик экстрарентгена на канале 4 (а также изломы на каналах 3, 2) — проявление момента начала DD-реакции (чувствительность канала 2 составляет 250 мВ/клетка; горизонтальная шкала времени — 40 нс/клетка). Задержка нейтронного пика на канале 2 во времени соответствует $\approx 46,6$ нс/м (т. е. DD-нейтронам). Пунктирные линии соответствуют самой начальной стадии разряда (см. обсуждение ниже); б) CCD-изображение в рентгене межэлектродного ансамбля, где имеет место DD-синтез.

(левая часть, до 120-й нс) при этом не обсуждались. Действительно, на самой ранней стадии разряда мы иногда наблюдали коррелированные во времяпролётном режиме пики интенсивности (левая часть на рис. 1, *a*, пунктир). Эти пики довольно схожи с сигналами на фотоумножителях от нейтронов с энергией 2,45 МэВ, наблюдавшимися при исследовании столкновительного DD-синтеза в потенциальной яме ВК, сформированной на второй половине приложенного импульса напряжения (правая часть рис. 1, *a*). В частности, анализ интенсивностей рентгена и последовательности пиков на каналах 4 и 2 на самой начальной стадии разряда (рис. 1, *a*, пунктирные стрелки), показывает, что после момента синтеза, зарегистрированного на РМ4, DD-нейтроны вначале приходят на фотоумножитель РМ4 и частично им регистрируются, а позже регистрируются и на РМ2 (рис. 1, *a*, канал 2, пунктирная стрелка). Появляющиеся примерно на 80 нс позже DD-нейтроны столкновительного синтеза в ПЯ показаны сплошной стрелкой (канал 2). Отметим, что помещение куска парафина между фотоумножителями РМ4 и РМ2 одновременно ослабляет интенсивности обоих малых пиков, регистрируемых на канале 2 фотоумножителем РМ2. Это также говорит в пользу общей (нейтронной) природы данных пиков. Не исключено, что нейтронный пик от самой начальной стадии разряда зафиксирован и в режиме микрореактора (рис. 11 в работе [8]).

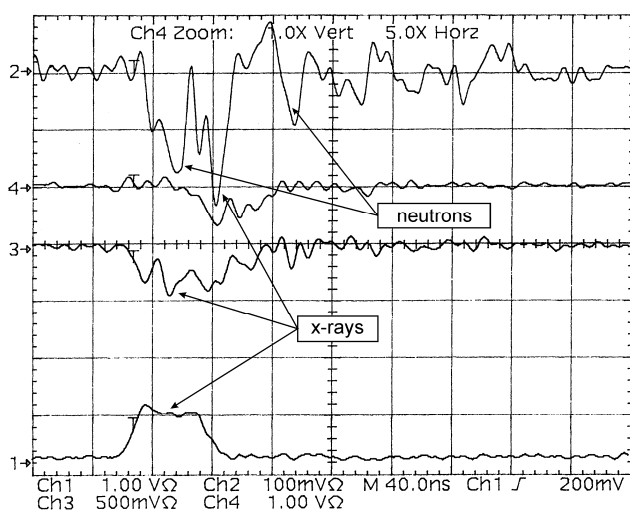
Обсуждаемый выше выстрел был сделан с анодом, в котором было лишь три палладиевых трубки. Модифицированный анод с двенадцатью Рd-трубками, припаянными к торцу медного ци-

линдрического основания по его периметру, был также использован в экспериментах (осциллограммы интенсивности рентгена и нейтронов приведены на рис. 2, *a*). Первый пик нейтронов на рис. 2, *a* шире и интенсивнее, чем аналогичный начальный пик на рис. 1, *a*, будучи примерно пропорциональным увеличению площади поверхности Рd (при переходе от трёх к двенадцати трубкам). Помимо рентгеновской «пыли» вокруг анода, по-видимому, ССD-снимок в рентгене содержит и перекрывающиеся между собой области взаимодействия электронного пучка с поверхностью палладиевых трубок (рис. 2, *b*).

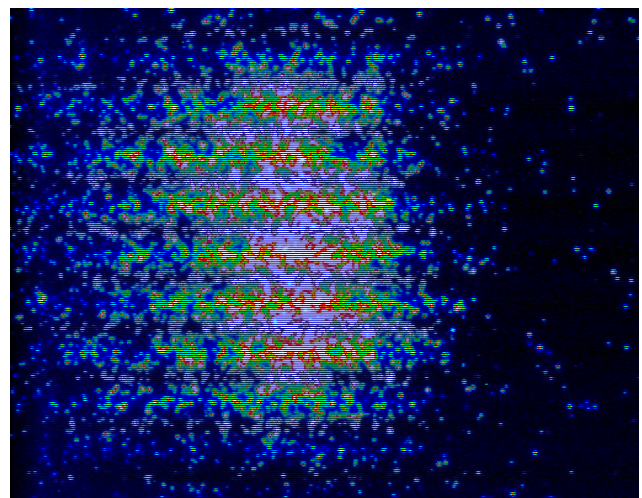
Отметим ещё не приведенные здесь режимы, когда второй фотоумножитель РМ2 закрывался пластиной свинца толщиной 0,3 см. В этом случае основной максимум рентгена подавлялся, и на канале 2 фиксировались лишь моменты DD-синтеза и нейтронные пики на начальной и последующей стадии разряда.

В целом, из анализа имеющегося массива данных можно заключить, что самая начальная стадия разряда может также сопровождаться нейтронным выходом, который меняется от выстрела к выстрелу более случайным образом по сравнению с синтезом на втором этапе, когда в межэлектродном пространстве формируются ВК и соответствующая ПЯ. Кроме того, большая площадь поверхности дейтерированного Рd-анода (при переходе от трёх Рd-трубок к двенадцати) обнаруживает больший выход нейтронов на начальной стадии.

Напомним, что насыщенный водородом или дейтерием палладий (частный случай наших анодов



а



б

Рис. 2. Динамика выхода рентгена в режиме 2 (12 Рd-трубок): а) осциллограммы выхода рентгена (каналы 1, 3 и 4) и нейтронов (канал 2) для анода с 12 Рd-трубками. б) ССD-изображение кластерного ансамбля вместе с яркими перекрывающимися областями взаимодействия е-пучка со сплошной поверхностью из 12 анодных Рd-трубок

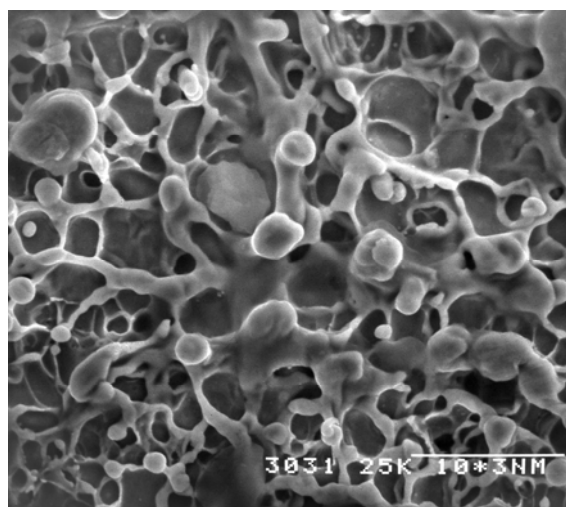
в НВР) есть потенциальный аккумулятор энергии, интерес к которому (и сопутствующим эффектам) возрос в последнее десятилетие (см., например, [15—23]). Так, измерения нейтронного рассеяния на малые углы обнаружило, что дислокации в решётке Pd могут поглощать большое количество водорода (дейтерия), а сами микрообласти поглощения имеют цилиндрическую геометрию [16]. Аномалии в электронном транспорте и магнитных свойствах деформированных наводороженных Pd-фольг были объяснены в терминах локальной (филаментарной) сверхпроводимости [17], связанной с конденсацией захваченного водорода (дейтерия) в металлическую фазу ($\sim 10^{24} \text{ см}^{-3}$) [18] в ядрах дислокаций. Более того, недавние эксперименты [19] указывают и на возможность существования сверхплотного дейтерия ($\sim 8 \times 10^{28} \text{ см}^{-3}$). Возможность DD-синтеза при слабом лазерном воздействии на сверхплотный дейтерий, образованный в порах с Fe_2O_3 , исследовалась в [20], причем времяпролётные измерения обнаружили характерные продукты DD-синтеза. Таким образом, перечисленные выше наблюдения дают основания предполагать, что и воздействие на неидеальную поверхность дейтерированного Pd-анода внутренних электронных пучков в самом начале НВР также может не пройти бесследно [21].

Обсуждение результатов

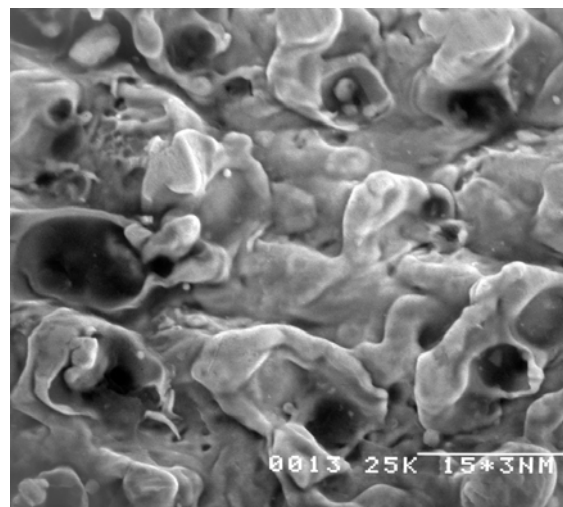
Применительно к начальной стадии НВР мы можем опираться пока лишь на времяпролётные измерения. Механизм возможного DD-синтеза в системе «электронный пучок—дейтерированный Pd» далеко не очевиден, и здесь мы ограничимся каче-

ственным обсуждением возможных сценариев синтеза. Во-первых, можно предположить, что микропоры, микротрещины, дислокации (наполненные дейтерием) и т. п. на поверхности анода представляют собой естественный набор микроканалов (представленных на рис. 3) для возможного микросинтеза вблизи поверхности анода под действием облучения электронным пучком на начальной стадии НВР. Экстраполяция плотности мощности синтеза $P \sim 1/r_{VC}^4$ на случай очень малых радиусов ВК r_{VC} показывает, что при $r_{VC} \rightarrow 0$ эффективность синтеза формально заметно возрастает [8]. Не исключено также, что попадание автоэлектронного пучка в момент его прихода на анод внутрь самих анодных Pd-трубок также может образовать короткоживущий ВК малых размеров. Однако оценки показывают, что необходимые для образования ПЯ и ускорения дейтронов величины токов должны быть не менее 300—400 А в трубке.

Во-вторых, не исключено, что электронный пучок может играть в некоторых отдельных случаях роль триггера для локальных ядерных микровзрывов. Действительно, дефекты в кристаллической решётке палладия с высоким локальным давлением ($\sim 180 \text{ ГПа}$ [22]) представляют собой уникальный инструмент получения водорода (дейтерия) в металлической фазе (дислокация есть своего рода потенциальная ловушка, вынуждающая дейтерий конденсироваться). Облучение кластеров сверхплотного дейтерия, если такой будет образовываться в процессе электролиза, может сопровождаться отдельными точками ядерного микросинтеза вблизи анодной поверхности и взрывным выбросом вещества анода.



а



б

Рис. 3. (а) Морфология дейтерированной Pd анодной поверхности (фрагмент 1 анода с тремя Pd трубками, масштаб 30 мкм); (б) Поверхность дейтерированного Pd анода с двенадцатью Pd трубками (фрагмент 2, он примерно соответствует центральной части яркой области на CCD изображении 2, б), масштаб 15 мкм)

Предварительное исследование морфологии поверхности Pd-анода обнаруживает большое число разного рода микропор и микрократеров различных размеров (два типичных фрагмента поверхности Pd-анода показаны на рис. 3). Анализируя Pd-поверхность, можно видеть, что помимо довольно обычных пор и кратеров (рис. 3, а), возникающих при взаимодействии электронного пучка с поверхностью анода, также появляются и относительно большие отдельные кратеры (~ 10 микрон, см. левую часть рис. 3, б). Их образование на анодной поверхности указывает на возможную ядерную природу некоторых анодных эктонов (взрывных центров [23]). Это косвенно поддерживается недавним независимым экспериментом по «стимулированию» ядерных реакций при облучении дейтерированных палладиевых фольг внешним электронным пучком [24, 25]. В этом эксперименте был зарегистрирован выход некоторых продуктов DD-реакции (протоны с энергией ~ 3 МэВ) под воздействием микроамперного пучка электронов с энергией 30 кэВ на поверхность дейтерированного палладиевой фольги. Образование большего количества пор и микрократеров (размером 10—12 микрон) было отмечено лишь в случае наполнения фольг дейтерием, т.е. наполнение водородом не давало этих эффектов [24]. Большие микрократеры в этих экспериментах [24, 25] по форме и размеру весьма похожи на кратер, зафиксированный на поверхности Pd-анода в НВР (левая часть рис. 3, б).

Заключение

Суммируя результаты работы, отметим, что в эксперименте с НВР во времяпролётном режиме наблюдалось появление нейтронов с энергией 2,45 МэВ из DD-синтеза, который, возможно, реализуется различным образом на начальной и квазистационарных стадиях НВР.

Физика столкновительного DD-синтеза в потенциальной яме ВК в миниатюрном НВР малой энергии была существенно прояснена PIC-моделированием. Анализ времяпролётных сигналов в экспериментах с НВР позволяет заключить, что и на начальной стадии возможен определённый выход DD-нейтронов. Этот выход от выстрела к выстрелу меняется более случайным образом по сравнению со столкновительным DD-синтезом в сформированной позже ПЯ [8]. Фактически, автоэлектронный пучок играет роль триггера для процессов микросинтеза на поверхности или в объёме дейтерированного Pd-анода.

Качественно похожий результат (статистически заметный выход продуктов DD-реакции и большие кратеры) был получен при облучении слаботочным электронным пучком мишеней из Pd/PdO:Dx [24, 25]. Перекрытие обсуждавшихся

выше механизмов синтеза на начальной стадии НВР также не исключено и должно быть предметом дальнейшего изучения.

Отметим, что требуют дальнейшего анализа и более экзотические объяснения возможности генерации DD-нейтронов на начальной стадии НВР: такие как раскачка колебаний во всём объёме Pd-анода, стимулированная облучением пучка автоэлектронов [26, 27], а также и возможный DD-синтез, обусловленный влиянием самой Pd-решётки, наполненной дейтерием, на слияние ядер дейтерия [28] при внешнем облучении.

Представляет большой интерес и дальнейшее моделирование новых эффектов [29], в т. ч. обусловленных взаимодействием пучков автоэлектронов с дейтерированными палладиевыми анодными трубками.

*Работа поддержана грантом No 14-50-00124
Российского Научного Фонда.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Kurilenkov Yu. K., Skowronek M. and Dufty J. // J. Phys. A: Math & General (IOP) 2006. V. 39. P. 4375.
2. Куриленков Ю. К., Скоронек М. // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 235.
3. Куриленков Ю. К., Тараканов В. П., Гуськов С. Ю. // Прикладная физика. 2009. № 4. С. 102.
4. Kurilenkov Yu. K., Tarakahov V. P., Gus'kov S. Yu., et al. // J. Phys. A: Math & Theor. 2009. V. 42. P. 214041.
5. Лаврентьев О. А. К истории термоядерного синтеза в СССР. Свидетельства очевидца. Второе издание. Харьков: ХФТИ, 2012.
6. Miley G. and Murali S. K. 2014 Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion —New York: Springer, 2014).
7. Elmore W. C., Tuck J. L. and Watson K. M. // Phys. Fluids. 1959. V. 2. P. 239.
8. Kurilenkov Yu. K., Tarakahov V. P., Gus'kov S. Yu., et al. // Contrib. Plasma Phys. 2011. V. 51. P. 427.
9. Kurilenkov Y. K., Tarakahov V. P., Karpukhin V. T., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V. 653. P. 012025.
10. Nebel R. A. and Barnes D. C. // Fusion Technology. 1998. V. 38. P. 28.
11. Park J., Nebel R. A., Stange S., et al. // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 056315–6.
12. Park J., Nebel R. A., Aragonz R., et al. Innovative Confinement Concepts Workshop. —USA, Texas, Austin, February 13–16, 2006.
13. Barenol'ts S. A., Mesyats G. A., Perel'shtein E. A. // JETP. 2000. V. 91. P. 1176.
14. Plyutto A. A. // JETP. 1960. V. 12. P. 1106; ЖТФ. 1970. V. 40. P. 2534.
15. Pundt A. and Kirchheim R. // Annual Review of Materials Research. 2006. V. 36. P. 555.
16. Heuser B.J. and King S.J. // Met. & Material Transaction. 1998. V. A29. P. 1998.
17. Lipson A., Heuser B. J., Castano C., et al. // Phys. Rev. B 2005. V. 72. P. 212507.
18. Ashcroft N. W. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 187002.
19. Badei S., Andersson P. U., Holmlid L. // Int. J. Hydrogen Energy. 2009. V. 34. P. 487.

20. Badei S., Andersson P. U., Holmlid L. // *Laser&Particle Beams*. 2010. V. 28. P. 313.
21. Kurilenkov Yu. K., Skowronek M. and Karpukhin V. T. / 16th Symp. High Current Electronics (SHCE), Russia, Tomsk, Sept 2010 Proceedings. P. 249.
22. Miley G., Yang X., et al. // *Journal of Physics: Conference Series* 2010. V. 244. P. 032036.
23. Mesyats G. A. *Cathode Phenomena in Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark and the Arc.* — Moscow: Nauka Publishers, 2000.
24. Lipson A. G., Rusetskii A. S., et al. / 15th Int. Conf. Condense Matter Nuclear Science, Rome, 2009.
25. Чернов И. П., Русецкий А. С. и др. // *ЖЭТФ*. 2011. Т. 139. Вып. 6. С. 1088.
26. Chernov I. P., Koroteev Yu. M. et al. *Doklady Akademii Nauk*, 420, 758 (2008); A. Lipson et al., *Proceedings of the 8th International Workshop on Anomalies in Hydrogen/Deuterium Loaded Metals, Sicily, Italy (ISCMNS, 2008)*. P. 182.
27. Silikin V., Chernov I., et al. // *Phys. Rev.* 2007. V. B 76. P. 245105.
28. Tsyganov E. N., Bavizhev M. D., et al. // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* 2015. V. B 355. P. 333.
29. Kurilenkov Y. K., Tarakahov V. P. et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. V. 653. P. 012026.

Nuclear DD fusion in the initial stage of a pulse vacuum discharge with the deuterated Pd anode

Yu. K. Kurilenkov, S. Yu. Gis'kov, V. T. Karpukhin, A. V. Oginov, and I. S. Samoilov

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Izhorskaya 13, bld. 2, Moscow, 125412, Russia
E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

Received November 23, 2015

Consideration is given to the nuclear DD fusion in the initial stage of a pulse vacuum discharge with the deuterated Pd anode. It is shown a role of an autoelectronic beam at irradiation of the anode surface.

PACS 52.58.Ei, 52.58.Qv

Keywords: virtual cathode, potential well, fusion, neutron yield, surface morphology.

REFERENCES

1. Yu. K. Kurilenkov, M. Skowronek and J. Dufty, *J. Phys. A: Math & General (IOP)* **39**, 4375 (2006).
2. Yu. K. Kurilenkov and M. Skowronek, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 235 (2009).
3. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, and S. Yu. Gus'kov, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 102 (2009).
4. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, et al., *J. Phys. A: Math & Theor.* **42**, 214041 (2009).
5. O. A. Lavrent'ev, *About History of Nuclear Fusion in the USSR* (Kharkov, KhFTI, 2012) [in Russian].
6. G. Miley and S. K. Murali, in *Proc. 2014 Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion* (New York: Springer, 2014).
7. W. C. Elmore, J. L. Tuck and K. M. Watson, *Phys. Fluids*, **2**, 239 (1959).
8. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, et al., *Contrib. Plasma Phys.* **51**, 427 (2011).
9. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, V. T. Karpukhin, et al., *Journal of Physics: Conference Series* **653**, 012025 (2015).
10. R. A. Nebel and D. C. Barnes, *Fusion Technology* **38**, 28 (1998).
11. J. Park, R. A. Nebel, S. Stange, et al., *Phys. Plasmas* **12**, 056315–6 (2005).
12. J. Park, R. A. Nebel, R. Aragonéz, et al., *Innovative Confinement Concepts Workshop*. (USA, Texas, Austin, February 13–16, 2006).
13. S. A. Barenkol'ts., G. A. Mesyats, and E. A. Perel'shtein, *JETP* **91**, 1176 (2000).
14. A. A. Plyutto, *JETP* **12**, 1106 (1960).
15. A. Pundt and R. Kirchheim, *Annual Review of Materials Research*. 36, 555 (2006).
16. B. J. Heuser and S. J. King, *Met. & Material Transaction*. **A29**, 1998 (1998).
17. A. Lipson, B. J. Heuser, C. Castano, et al., *Phys. Rev. B*. **72**, 212507 (2005).
18. N. W. Ashcroft, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 187002 (2004).
19. S. Badei, P. U. Andersson, and L. Holmlid, *Int. J. Hydrogen Energy* **34**, 487 (2009).
20. S. Badei, P. U. Andersson, and L. Holmlid, *Laser&Particle Beams* **28**, 313 (2010).
21. Yu. K. Kurilenkov, M. Skowronek, and V. T. Karpukhin, in *Proc. 16th Symp. High Current Electronics (SHCE)*, (Russia, Tomsk, Sept 2010 Proceedings). P. 249.
22. G. Miley, X. Yang, et al., *Journal of Physics: Conference Series* **244**, 032036 (2010).
23. G. A. Mesyats, *Cathode Phenomena in Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark and the Arc*, (Moscow: Nauka Publishers, 2000) [in Russian].
24. A. G. Lipson, A. S. Rusetskii, et al., in *Proc. 15th Int. Conf. Condense Matter Nuclear Science* (Rome, 2009).
25. I. P. Chernov, A. S. Resetskii, et al., *JETP* **139**, 1088 (2011).
26. I. P. Chernov, Yu. M. Koroteev, et al., *Doklady Akademii Nauk* **420**, 758 (2008).
27. V. Silikin, I. Chernov, et al., *Phys. Rev.* **B 76**, 245105 (2007).
28. E. N. Tsyganov, M. D. Bavizhev, et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* **B 355**, 333 (2015).
29. Y. K. Kurilenkov, V. P. Tarakahov, et al., *Journal of Physics: Conference Series* **653**, 012026 (2015).