О скейлинге мощности DD-синтеза в наносекундном вакуумном разряде*Ю. К. Куриленков, В. П. Тараканов, А. В. Огинов*

Ранее в наносекундном вакуумном разряде (НВР) с дейтерированным Pd-анодом наблюдалось появление DD-нейтронов не только на хорошо изученной квазистационарной стадии, где в межэлектродном пространстве возникает виртуальный катод (ВК), но и на самой начальной стадии разряда. Анализ эксперимента показывает, что автоэлектронный пучок может играть роль своего рода триггера для запуска процессов DD-синтеза на поверхности или в объеме Pd-анода, но его механизм на начальной стадии разряда оставался неясным. В данной работе проведено PIC-моделирование возможного частичного проникновения пучка автоэлектронов внутрь полых анодных Pd-трубок. Это приводит к образованию короткоживущих ВК очень малых размеров внутри отдельных Pd-трубок, где, начиная с величины тока в 100 А, оказывается возможен DD-микросинтез. Показано, что в устройствах с осциллирующими ионами скейлинг мощности DD-синтеза, которая увеличивается с уменьшением радиуса ВК, может сохраняться вплоть до $r_{ВК} \approx 0,02$ см.

Ключевые слова: вакуумный разряд, виртуальный катод, потенциальная яма, DD-нейтроны.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-16-24

1. Введение

Схема инерционного электростатического удержания (ИЭУ) плазмы [1, 2] является одной из немногих, где, в принципе, энергия ионов в десятки кэВ может быть довольно легко достигнута. Ускорение и удержание ионов в схеме ИЭУ имеет место в глубокой электростатической потенциальной яме (ПЯ) [2, 3]. Чтобы повысить эффективность синтеза и избежать крайне неэффективной схемы «пучок–пучок» при обычном ИЭУ [2], было предложено инжектировать электроны в анодное пространство, чтобы создать ПЯ (типа параболы) и перейти в режим периодически ос-

циллирующих плазменных сфер (ПОПС) [4, 5]. В этой продвинутой схеме ионы должны совершать радиальные гармонические колебания с любой амплитудой в образовавшейся ПЯ, и в моменты максимального сжатия будет достигаться высокая мощность синтеза. Однако несмотря на успешную демонстрацию схемы ПОПС для H_2^+ , He^+ и Ne^+ в эксперименте [6], и её потенциально высокую эффективность в теории [5, 7], в дальнейшем не удалось реализовать оригинальную концепцию ПОПС в экспериментах по ядерному синтезу [8]. Важным преимуществом устройств на основе ПОПС является крайне благоприятный скейлинг мощности термоядерного синтеза, которая увеличивается с уменьшением радиуса виртуального катода (ВК) [5, 7]. Как отмечалось в [7], эта особенность ведёт к уменьшению и удешевлению каждой следующей установки данного типа. Со временем выяснилось, что значительные надежды, связанные с потенциальными преимуществами ПОПС, могут реализовываться в схеме ИЭУ с обратной полярностью [3] на основе миниатюрного наносекундного вакуумного разряда (НВР) [9–12].

Куриленков Юрий Константинович^{1,2}, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

Тараканов Владимир Павлович¹, с.н.с., д.ф.-м.н.

Огинов Александр Владимирович², с.н.с., к.ф.-м.н.

¹ Объединённый институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2.

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53.

Статья поступила в редакцию 23 июля 2021 г.

© Куриленков Ю. К., Тараканов В. П., Огинов А. В., 2021

Физика столкновительного DD-синтеза в потенциальной яме НВР была существенно прояснена с помощью PIC-моделирования в электромагнитном коде КАРАТ [10–13]. Кроме того, анализ времяпролетных сигналов позволяет сделать вывод, что и на самой начальной стадии разряда также возможен определённый выход DD-нейтронов [14, 15]. PIC-моделирование динамики всех частиц в НВР показало, в частности, что в течение первых наносекунд после приложения высокого напряжения пучок автоэлектронов из катода, набирающий энергию около 50 кэВ, достигает поверхности загруженного дейтерием Pd-анода и начинает с ним взаимодействовать. Фактически, эксперимент показывает, что автоэлектронный пучок может играть роль своего рода триггера для запуска процессов DD-микросинтеза на поверхности или в объеме дейтерированного Pd-анода [15].

Суммируя, отметим, что в эксперименте с НВР во времяпролетном режиме наблюдалось появление DD-нейтронов с энергией 2,45 МэВ, но ядерный синтез, возможно, реализуется различным образом на самой начальной и квазистационарной стадиях НВР [12, 15].

Отметим, что механизм возможного синтеза DD в системе «электронный пучок – дейтерированный палладий» далеко не очевиден, хотя к нему имеется большой интерес. В литературе обсуждаются различные сценарии [16–21], включая довольно экзотические (см. их качественное обсуждение в разделе 3 работы [15]). С другой стороны, в [14, 15] отмечалось, что возможно частичное проникновение автоэлектронного пучка (в момент его прихода на анод) и внутрь самих анодных Pd-трубок, где не исключено образование короткоживущих ВК очень малых размеров. Однако количественного анализа и моделирования возможных процессов внутри дейтерированных Pd анодных трубок при инжекции в них пучков энергичных электронов ранее проведено не было. Настоящая работа устраняет данный пробел в изучении механизмов DD-синтеза на самой начальной стадии НВР. В свою очередь, это позволяет расширить и представления о скейлинге мощности DD-синтеза с уменьшением радиуса виртуального катода в устройствах с осциллирующими ионами [4, 6, 11, 22].

2. Генерация DD-нейтронов в наносекундном вакуумном разряде

Напомним, что в эксперименте мы использовали модифицированную схему ИЭУ на базе миниатюрного НВР малой энергии с дейтерированным Pd-анодом [9, 10]. От стандартных схем ИЭУ с электродами–сетками [2] мы перешли к ИЭУ, включающему особенности физики НВР, в частности, был использован полый Al-катод с конической частью и Pd-анод с медным основанием, к торцу которого припаяны Pd-трубки. Палладиевая часть анода периодически заполнялась дейтерием в процессе электролиза в тяжёлой воде (см. схему эксперимента и выбранную геометрию базовых электродов в [10, 15]; длительность импульса 50 нс, приложенное напряжение 70 кВ, максимальный ток 1 кА). Такая схема ИЭУ с обратной полярностью [3] даёт возможность работать в вакууме, где при включении напряжения будут формироваться пучки автоэлектронов с катода. Последние, взаимодействуя с дейтерированным Pd-анодом, во-первых, создадут вблизи анода эрозионную плазму, содержащую дейтроны и дейтерий-содержащие кластеры [23]. Во-вторых, пучки электронов, пролетая внутрь 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 микроускорителя, 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.

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены характерные осциллограммы выхода рентгеновского излучения (РИ) в НВР для двух соседних выстрелов. На рис. 1, б показано CCD-изображение (в рентгене) ансамбля наночастиц (кластеров), возникающего в межэлектродном пространстве. Времяпролётные (time-of-flight) измерения обычно проводились с помощью фотоумножителей PM4 и PM2, расположенных на одной оси с электродами (см. рис. 1 в [15]), в данном случае – на расстояниях от источника плазмы в 45 см и 80 см соответственно (каналы 4 и 2 на осциллограммах рис. 1). Фотоумножитель PM4 (канал 4) регистрирует момент DD-реакции и нейтроны на самой начальной стадии разряда (показаны

пунктиром), очень сильный пик жёсткого тормозного РИ, а также момент DD-синтеза на последующей стадии (экстра-рентген из-за разлёта быстрых продуктов DD-реакции) как реперную точку момента DD-синтеза во времени. В реальном времени она совпадает с появлением экстра-рентгена на мгновенных PIN-диодах, каналы 1, 3 (напомним, что из-за пролёта электронов в фотоумножителях, сигналы на PM4 и PM2, каналы 4 и 2, задерживаются на ≈ 35 нс относительно сигналов с PIN-диодов).

Фотоумножитель PM2 (канал 2), перед которым в данных выстрелах (рис. 1) поставлена Pb-пластина толщиной 0,1 см, регистрирует момент DD-синтеза и выход нейтронов на самой начальной стадии (пунктир), выход нейтронов на более поздней стадии, в виде двойных пиков (канал 2, сплошная стрелка), а также момент DD-синтеза на более поздней

стадии (пик очень жёсткого рентгена от разлёта продуктов DD-реакции, расположенный между нейтронными пиками, в реальном времени он совпадает с моментом появления экстра-рентгена на PIN-диодах). Отметим также, что из-за наличия поглотителя перед PM2 (поглощает фотоны с энергией ≈ 100 кэВ и меньше), выбранная чувствительность канала 2 составляет 200 мВ, то есть в пять раз больше, чем для PM4, канал 4. Напомним, что все хорошо воспроизводимые в экспериментах нейтронные пики регистрируются фотоумножителями PM2 и PM4 с задержкой на время их прилёта ($\approx 46,6$ нс/м) относительно самих моментов DD-синтеза. Поэтому «начальные» нейтроны появляются на PM4, канал 4, раньше, чем на PM2, канал 2 (рис. 1, пунктирные стрелки). Эта задержка является характерным признаком нейтронов с энергией около 2,45 МэВ из реакции синтеза $D(D,n)He^3$.

Рис. 1. а, б. Динамика выхода рентгеновского излучения из НВР в режиме, когда Pb-пластина толщиной 0,1 см помещена перед фотоумножителем PM2 (канал 2). Благодаря Pb-поглотителю, канал 2 содержит лишь пики DD-нейтронов (на начальной, пунктир, и последующей стадиях разряда), а также очень жёсткий рентген (в момент синтеза) из-за торможения высокоэнергетичных продуктов DD-реакции (см. текст); вставка на рис. 1, а – CCD-изображение в рентгене плотного межэлектродного ансамбля кластеров.

3. PIC-моделирование образования ВК и ускорения дейтронов внутри анодной Pd-трубки

Как и ранее [10–12], для моделирования возможности DD-синтеза внутри Pd-трубки мы используем полностью электродинамический код КАРАТ [13]. На рис. 2, а показана расчётная осесимметричная 2D-область, соответствующая верхней половине анодной трубки диаметром 0,1 см. Особенности виртуаль-

ного катода, который может возникнуть внутри Pd-анодной трубки, будут зависеть от объёмного заряда электронов, который окажется внутри трубки, т. е. от величины протекающего тока. Поэтому здесь выбраны и будут представлены ниже результаты моделирования для токов $I = 50$ А и 100 А. На рис. 2, а, справа, показано, как инжектируется электронный пучок с энергией 30–50 кэВ, с разбросом по углу 0 – 10° , с передним фронтом 0,01 нс и током 50 А. От верхней и правой внутренней грани-

цы трубки электроны отражаются с вероятностью 0,9. С этих границ эмитируются дейтроны самосогласованно с максимальным током 10 А, энергией 50 эВ, и их распространение к оси трубки на момент счёта $t = 0,75$ нс представлено на рис. 2, б. (На рис. 2, б, вставка, приведено фото под электронным микроскопом одной из многократно использовавшихся в эксперименте Pd-анодной трубки, её диаметр 0,1 см, толщина стенки 0,01 см). На рис. 3, а показана потенциальная яма, соответствующая виртуальному катоду в момент $t = 0,5$ нс. На рис. 3, б приведена энергия сгустка дейтронов в момент $t = 0,75$ нс (рис. 2, б),

ускоряющихся в потенциальной яме и летящих к оси разряда. Видно, что глубина ПЯ и, соответственно, энергия дейтронов не достигает 10 кэВ. Дейтроны достигнут оси, где «столкнутся» со встречным потоком при $t \approx 0,85$ нс. Далее, к моменту $t = 1,5$ нс ионы распространятся более равномерно вдоль оси и по объёму трубки, заряд дейтронов компенсирует ВК на оси разряда и потенциальная яма исчезнет. В целом, из рис. 3 видно, что глубина ПЯ и, соответственно, энергия дейтронов оказывается меньше 10 кэВ, которые необходимы для DD-реакции с заметным выходом нейтронов.

Рис. 2, а) – моделирование инжекции электронного пучка с энергией 30–50 кэВ, и током 50 А внутрь Pd-анодной трубки радиусом 0,05 см к моменту времени $t = 0,5$ нс; б) – распространение дейтронов, эмитированных с внутренней поверхности Pd-трубки к её оси на момент счёта $t = 0,75$ нс, $I = 50$ А. На вставке приведен вид торца реальной Pd-анодной трубки после многократного использования в разрядах (диаметр 0,1 см).

Рис. 3. PIC-моделирование процессов внутри полой анодной Pd-трубки при инжекции автоэлектронного пучка, $I = 50$ А, а) – потенциальная яма виртуального катода в момент $t = 0,5$ нс; б) – энергия дейтронов, ускоряемых в ПЯ к оси трубки в момент $t = 0,75$ нс.

Увеличиваем ток пучка электронов, влетающих в анодную трубку, до $I = 100$ А. На рис. 4 показаны ПЯ и энергии дейтронов, летящих к оси разряда для двух времён счёта, $t = 0,5$ нс и $t = 0,75$ нс. Видно, что глубина образующейся ПЯ при $t = 0,5$ нс (рис. 4, а) немного превышает 10 кВ. Это означает, что ускоряемые дейтроны (рис. 4, б) к моменту прихода к оси Pd-трубки могут иметь энергию, близкую 10 кэВ. Сечение DD-реакции для данных энергий дейтронов возрастает на два порядка по сравнению с предыдущим случаем $I = 50$ А (рис. 3), достигая величин [24], которые могут обеспечить наблюдаемый выход DD-нейтронов.

На рис. 4, в и рис. 4, г приведен потенциал и энергии дейтронов соответственно для $t = 0,75$ нс, когда встречные столкновения дей-

тронов на оси уже имели место. Отметим особенности потенциала и полученной энергии дейтронов. Действительно, сгусток дейтронов, ускоряемый в ПЯ и летящий в сторону оси (рис. 4, з), встречается с таким же сгустком, летящим навстречу, в интервале $\Delta t = 0,5\text{--}0,75$ нс. Это приводит, как минимум, к двум наблюдаемым в моделировании эффектам.

Во-первых, прилёт достаточного числа дейтронов на ось разряда в области около $z = 2$ мм нейтрализует (компенсирует) в этой области заряд ВК, что проявляется практически в локальном исчезновении ПЯ (потенциал в окрестности $z = 2$ мм оказывается близким к нулю или чуть выше, рис. 4, в). В области на оси, куда дейтроны не попали (окрестность $z = 1$ мм) широкая потенциальная яма глубиной около 10 кВ сохраняется (рис. 4, в).

Рис. 4. PIC-моделирование процессов внутри полой анодной Pd-трубки при инжекции автоэлектронного пучка, $I = 100$ А а), в) – потенциальные ямы катода в моменты $t = 0,5$ нс и $t = 0,75$ нс соответственно; б), д) – энергия дейтронов, ускоряемых полем ВК к оси трубки в моменты $t = 0,5$ нс и $t = 0,75$ нс соответственно (см. текст). При столкновении встречных потоков дейтронов, ускоряемых до энергии 10 кэВ, на оси Pd-трубки может иметь место DD-синтез.

Во-вторых, если в момент столкновения дейтронов их энергия на «дне» ПЯ должна быть около 10 кэВ, то чуть позже, к моменту $t = 0,75$ нс, мы видим, что встречные столкновения дейтронов привели к началу их торможения (величина неровного «плато» в окрестности $z = 2$ мм при $r = 0$ составляет около 4–6 кэВ, рис. 4, *з*). В дальнейшем, к моменту $t = 1,5$ нс на всей оси разряда ПЯ исчезает и потенциал при $r = 0$ оказывается несколько положительным, а энергия ионов не превышает 2–3 кэВ во всей счётной области, за исключением окрестности $z = 0,5$ мм, где она может составлять около 5 кэВ (здесь не показано).

4. Обсуждение и заключительные замечания

Суммируя, из PIC-моделирования мы видим, что, начиная примерно с тока $I = 100$ А, в анодной Pd-трубке в результате естественной инжекции электронов возникает короткоживущий (не более 1,5–2 нс) ВК крайне малых размеров. Поскольку в эксперименте с НВР ток достигает в максимуме величины 1 кА, то с большой вероятностью в аноде из трёх Pd-трубок условие возникновения ВК внутри одной или нескольких трубок ($I > 100$ А) может быть выполнено. Это означает, что в условиях НВР эксперимента, когда прикладывается высокое напряжение, возможна генерация DD-нейтронов менее чем за 2 нс, т. е., практически, в самый момент попадания фронта электронного пучка внутрь Pd-трубок.

Начиная с первых опубликованных осциллограмм с выходом DD-нейтронов [9, 10], во всём массиве данных для Pd-анода с тремя трубками наблюдались нейтронные пики на самой начальной стадии, предшествующей появлению на 30–40 нс позже широкого пика жёсткого рентгеновского излучения (см., например, рис. 2, *а, б* в [15]). Данный пик рентгена на рис. 1 виден лишь на канале 4, а на канале 2 он отсутствует из-за наличия поглотителя из свинца перед фотоумножителем PM2 (канал 2). Отметим, что на формирование облака кластеров из анодного материала в межэлектродном пространстве (вставка на рис. 1, *а*) требуется некоторое время (облучение анода электронным пучком, нагрев и испарение материала анода, выброс паров мате-

риала в вакуум, образование кластеров и т. п. [12, 15, 23]). Поэтому мы почти всегда наблюдали сначала нейтроны [15], и лишь на 40 нс позже – пик рентгена (рис. 1, канал 4), поскольку последний есть результат торможения энергичных электронов на облаке кластеров.

Эксперимент показывает, что выход нейтронов на начальной стадии и на последующей стадии DD-синтеза в анодном пространстве НВР, в целом, оказывается примерно близок по величине (рис. 2–4 в [15]). Действительно, если полученная ранее мощность синтеза в сферической геометрии $P \sim \phi_{\text{ПЯ}}^2 / r_{\text{ВК}}$ [4, 6], то в случае НВР мы ближе к цилиндрической геометрии, и тогда $P \sim \phi_{\text{ПЯ}}^2 L / r_{\text{ВК}}^2$ ($\phi_{\text{ПЯ}}$ – глубина ПЯ; $r_{\text{ВК}}$ – радиус ВК; L – длина области синтеза на оси разряда) [10]. Из PIC-моделирования известно, что глубина ПЯ в межэлектродном пространстве НВР $\phi_{\text{ПЯ}} \approx 50$ кВ [10–12], а внутри Pd-трубки $\phi'_{\text{ПЯ}} \approx 10$ кВ (рис. 4, *а, в*). Сопоставим близкие по величине выходы нейтронов в НВР в самом начале из одной Pd-трубки, и в конце разряда из всего межэлектродного пространства. Предположим, что уменьшение глубины ПЯ почти в пять раз внутри трубки по сравнению с ПЯ в анодном пространстве, компенсируется значительным уменьшением радиуса ВК $r'_{\text{ВК}}$ в трубке по отношению к $r_{\text{ВК}} \approx 0,1$ см в анодном пространстве. Тогда можно оценить величину $r'_{\text{ВК}}$. Полагая, что мощности DD-синтеза в начале и в конце разряда близки, $P' \approx P$, и считая для данной оценки $L' \approx L$, получим $r'_{\text{ВК}} \approx 0,02$ см. Если все три Pd-трубки симметрично участвуют в генерации нейтронов, то в каждой из них имеем $r'_{\text{ВК}} \approx 0,035$ см.

В результате, предположение о DD-синтезе внутри Pd-трубок, подтверждаемое приведенным выше моделированием, в целом, объясняет массив опытных данных о выходе нейтронов в НВР на самой начальной стадии. (Для выстрелов с анодом из 13 трубок эффект появления нейтронов на начальной стадии также наблюдается [12, 14, 15], но выражен хуже или более случайным образом, хотя иногда их пики могут быть довольно широкими, см., например, рис. 2 в [14]). В то же время, не исключено, что другие, пока ещё менее изу-

ченные механизмы из схемы «дейтерированный палладий – электронный пучок» [16–21], могут внести некоторые поправки в общую картину. Отметим, что поверхность Pd-трубки представляет сложный рельеф с большим количеством пор и кратеров, и ранее обсуждалась возможность появления нейтронов при облучении такой поверхности [12, 14, 15]. Однако из-за рассеяния тока пучка по поверхности дейтерированного Pd-анода, величина тока в отдельной поре будет крайне мала, и необходимый для DD-синтеза микро-ВК вряд ли там образуется. Добавим, что возможная корреляция появления нейтронов и характерных кратеров (диаметром до 10 мкм) на поверхности Pd-трубок [12, 14] или фольг [16] при их облучении электронным пучком требует дальнейшего анализа.

Таким образом, при формальном уменьшении $r_{\text{БК}}^t \rightarrow 0$ мощность синтеза не обращается в бесконечность [12, 14]. В то же время, как показало PIC-моделирование, при уменьшении объема DD-синтеза в межэлектродном пространстве до объема внутри Pd-трубки с диаметром 0,1 см и $r_{\text{БК}}^t \approx 0,02$ см, благоприятный скейлинг мощности синтеза $P \sim \Phi_{\text{ПЯ}}^2 L / r_{\text{БК}}^2$ (в цилиндрической геометрии), по-видимому, всё же сохраняется. Кроме того, в эксперименте с Pb-поглотителем, где подавление тормозного рентгена позволяет лучше выделять нейтроны, выход нейтронов на начальной стадии (из-за синтеза в трубках) оказывается систематически чуть выше, чем их выход позже из-за синтеза во всем анодном пространстве (рис. 1, каналы 2). Другими словами, непосредственно эксперимент в НВР также подтверждает обсуждаемый скейлинг мощности DD-синтеза: при уменьшении радиуса ВК в пять раз (от $r_{\text{БК}}^t = 0,1$ см в анодном пространстве до $r_{\text{БК}}^t \approx 0,02$ см внутри анодной Pd-трубки), примерно во столько же раз уменьшается глубина ПЯ в трубке по отношению к глубине ПЯ в анодном пространстве, и в результате выход нейтронов в начале и конце разряда оказывается близким.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lavrent'ev O. A. // Ann. NY Acad. Sci. 1975. Vol. 251. P. 152.
2. Miley G. H., Murali S. K. Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion Fundamentals and Applications. – NY: Springer, 2014.
3. Elmore W. C., Tuck J. L., Watson K. M. // Phys. Fluids. 1959. Vol. 2. P. 239.
4. Nebel R. A., Barnes D. C. // Fusion Technol. 1998. Vol. 34. P. 28.
5. Barnes D., Nebel R. // Phys. Plasmas. 1998. Vol. 5. P. 2498.
6. Park J., Nebel R. A., Stange S., Murali S. K. // Phys. Plasmas. 2005. Vol. 12. P. 056315.
7. Chacon L., Miley G., Barnes D., Knoll D. // Phys. Plasmas. 2000. Vol. 7. P. 4547.
8. Evstatiev E., Nebel R., Chacon L., Park J., Lapenta G. // Phys. Plasmas. 2007. Vol. 14. P. 042701.
9. Kurilenkov Yu. K., Skowronek M., Duffy J. // J. Phys. A: Math. Gen. 2006. Vol. 39. P. 4375.
10. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V. P., Skowronek M., Guskov S. Yu., Duffy J. // J. Phys. A: Math. Theor. 2009. Vol. 42. P. 214041.
11. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V., Gus'kov S. Yu. // Plasma Phys. Rep. 2010. Vol. 36. P. 1227.
12. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V., Gus'kov S. Yu., et al. // Contrib. Plasma Phys. 2011. Vol. 51. P. 427.
13. Tarakanov V. P. // EPJ Web Conf. 2017. Vol. 149. P. 04024.
14. Куриленков Ю. К., Гуськов С. Ю., Карпунхин В. Т., Огинов А. В., Самойлов И. С. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 10.
15. Kurilenkov Yu. K., Gus'kov S. Yu., Karpukhin V. T., Oginov A. V., Samoylov I. S. // J. Phys.: Conf. Series. 2018. Vol. 946. P. 012025.
16. Miley G., Yang X., Heinrich H., Flippo K., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. Vol. 244. P. 032036.
17. Lipson A. G., Chernov I. P., Roussetski A. et al. / 2009 Proc. ICCF-15 Int. Conf. Condensed Matter Nuclear Science (Rome), pp. 187–96.
18. Chernov I. P., Rusetskii A. S., Krasnov D. N., et al. // J. Exp. Theor. Phys. 2011. Vol. 112. P. 952.
19. Chernov I. P., Koroteev Yu. M., Silkin V. V., Tyurin Yu. I. // Dokl. Akad. Nauk. 2008. Vol. 420. P. 758.
20. Silkin V. M., Chernov I. P., Echenique P. M., et al. // Phys. Rev. B 2007. Vol. 76. P. 245105.
21. Tsyganov E. N., Bavizhev M. D., Buryakov M. G., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 2015. Vol. 355. P. 333.
22. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V., Gus'kov S. Yu., et al. // Contrib. Plasma Phys. 2018. Vol. 58. P. 952.
23. Varaksin A. Yu. // Doklady Physics. 2021. Vol. 66. P. 72.
24. Atzeni S., Meyer-ter-Vehn J. The physics of inertial fusion. – Oxford: Univ. Press, 2004.

Scaling of DD fusion power in a nanosecond vacuum discharge

Yu. K. Kurilenkov^{1,2}, V. P. Tarakanov¹ and A. V. Oginov¹

¹ Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

² Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences
53 Leninskii Prospect, Moscow 119991, Russia

Received July 23, 2021

Earlier, in a nanosecond vacuum discharge (NVD) with a deuterated Pd anode, the appearance of DD neutrons was observed not only at the well-studied quasi-stationary stage, where a virtual cathode (VC) appears in the interelectrode space, but also at the very initial stage of the discharge. An analysis of the experiment shows that the autoelectron beam can play the role of a kind of trigger for starting DD syntheses processes on the surface or in the bulk of the Pd anode, but its mechanism at the initial stage of the discharge remained unclear. In this work, we performed PiC modeling of the possible partial penetration of a beam of autoelectrons into hollow anode Pd tubes. This leads to the formation of very small short-lived VCs inside individual Pd tubes, where, starting from a current of 100 A, DD microsynthesis is possible. It is shown that in devices with oscillating ions the favorable scaling of the DD fusion power, which increases with decreasing VC radius, can be retained up to $r_{VC} \approx 0.02$ cm.

Keywords: vacuum discharge, virtual cathode, potential well, DD neutrons.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-16-24

REFERENCES

1. O. A. Lavrent'ev, Ann. NY Acad. Sci. **251**, 152 (1975).
2. G. H. Miley and S. K. Murali, *InertialElectrostatic Confinement (IEC) Fusion Fundamentals and Applications* (Springer, NY, 2014).
3. W. C. Elmore, J. L. Tuck, and K. M. Watson, Phys. Fluids **2**, 239 (1959).
4. R. A. Nebel and D. C. Barnes, Fusion Technol. **34**, 28 (1998).
5. D. Barnes and R. Nebel, Phys. Plasmas **5**, 2498 (1998).
6. J. Park, R. A. Nebel, S. Stange, and S. K. Murali, Phys. Plasmas **12**, 056315 (2005).
7. L. Chacon, G. Miley, D. Barnes, and D. Knoll, Phys. Plasmas **7**, 4547 (2000).
8. E. Evstatiev, R. Nebel, L. Chacon, J. Park, and G. Lapenta, Phys. Plasmas **14**, 042701 (2007).
9. Yu. K. Kurilenkov, M. Skowronek, and J. Dufty, J. Phys. A: Math. Gen. **39**, 4375 (2006).
10. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, M. Skowronek, S. Yu. Guskov, and J. Dufty, J. Phys. A: Math. Theor. **42**, 214041 (2009).
11. Yu. K. Kurilenkov, V. Tarakanov, and S. Yu. Gus'kov, Plasma Phys. Rep. **36**, 1227 (2010).
12. Yu. K. Kurilenkov, V. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, et al., Contrib. Plasma Phys. **51**, 427 (2011).
13. V. P. Tarakanov, EPJ Web Conf. **149**, 04024 (2017).
14. Yu. K. Kurilenkov, S. Yu. Gis'kov, V. T. Karpukhin, A. V. Oginov, and I. S. Samoilov, Applied Physics, No. 6, 10 (2015) [in Russian].

15. Yu. K. Kurilenkov, S. Yu. Gus'kov, V. T. Karpukhin, A. V. Oginov, and I. S. Samoylov, J. Phys: Conf. Series **946**, 012025 (2018).
16. G. Miley, X. Yang, H. Heinrich, K. Flippo, et al., J. Phys.: Conf. Ser. **244**, 032036 (2010).
17. A. G. Lipson, I. P. Chernov, A. Roussetski, et al., 2009 Proc. ICCF-15 Int. Conf. Condensed Matter Nuclear Science (Rome) pp. 187–96.
18. I. P. Chernov, A. S. Rusetskii, D. N. Krasnov, et al., J. Exp. Theor. Phys. **112**, 952 (2011).
19. I. P. Chernov, Yu. M. Koroteev, V. V. Silkin, and Yu. I. Tyurin, Dokl. Akad. Nauk, **420**, 758 (2008).
20. V. M. Silkin, I. P. Chernov, P. M. Echenique, et al., Phys. Rev. B **76**, 245105 (2007).
21. E. N. Tsyganov, M. D. Bavizhev, M. G. Buryakov, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **355**, 333 (2015).
22. Yu. K. Kurilenkov, V. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, et al., Contrib. Plasma Phys. **58**, 952 (2018).
23. A. Yu. Varaksin, Doklady Physics **66**, 72 (2021).
24. S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, *The physics of inertial fusion*. (Oxford: Univ. Press, 2004).