

Results in Physics

http://www.journals.elsevier.com/results-in-physics



Энергоэффективность сильноточного диода

при эволюции режима с обострением в аноде

А. Адаменко^{1, *}, В. Новиков^{1, *}, В. Левченко¹, В. Прокопенко^{1, 2},

А. Шаповал^{1, 2}, А. Пащенко^{1, 2}, В. Петухов^{1, 2}, И. Шаповал^{1, 2}

¹Proton – 21, Kyiv, Ukraine ²NSC KIPT, Kharkiv, Ukraine *Corresponding author

A R TICLE INFO Article history: Received: MM DD, 2022; Accepted: MM DD, 2022; Published: MM DD, 2022 Keywords: Blow-up, High-current diode, target, energy flow, mechanical deformation, energy efficiency

ABSTRACT

Изложены результаты экспериментальных исследований потоков энергии, освобождаемой при взрыве мишени диода в режиме с обострением, инициированном сильноточным релятивистским электронным пучком. Оценивается энергия продуктов взрыва мишени, необходимая для реализации наблюдаемой деформации элементов конструкции диода. Измерения параметров продуктов взрыва мишени и конечно-элементное моделирование механической деформации элементов катодной системы показывают выход энергии при взрыве мишени, который намного превышает затраты энергии.

1. Введение

Реакции ядерного синтеза являются самыми распространенным источником энергии во Вселенной, подпитывая звезды и галактики, генерируя в этом процессе все новые элементы, кроме самых легких.

Воссоздание этого процесса на Земле пока использует очень ресурсоемкие методы и относится сейчас скорее к фундаментальным вопросам науки, чем к промышленной технологии. Наибольшего успеха достигли термоядерные проекты с токамаками, сверхмощными лазерами [1,2] и на основе инерциального удержания с использованием импульсных пучков (например, установки Z-пинч Sandia [3]). Другим подходом является инерционное электростатическое удержание [4] с виртуальными электродами [5,6] и, хотя он способен производить реакции синтеза, его энергетическая эффективность еще уступает уровню, достигнутому в лазерном синтезе.

В лаборатории «Протон-21» достигнут прогресс в решении проблемы инерциального ядерного синтеза за счет применения принципов самоорганизации и управления сложными системами с использованием сильноточных релятивистских диодов. В новейших установках «Протон-21» используется структура драйвера, аналогичная Z-пинчу Sandia, но со значительно меньшей начальной энергией (порядка 30 кДж) и особой конструкцией мишени и конструкции реактора [7,8]. для моделирования ядерных реакций синтеза, происходящих при коллапсе звезд и взрывах сверхновых [9,10]. Концепция управляемого самоорганизующегося синтеза была изложена в книге [7] под редакцией С. Адаменко, а также в работах [11]-[19].

К настоящему времени с 1999 г. в «Протон-21» накоплена мощная база результатов экспериментов, часть которых изложены в [7] и [22]-[25], а сами установки были защищены международным патентом С. Адаменко [8].

Первые установки, разработанные в лаборатории (далее-типа ИВР), были созданы на основе плазменных размыкателей и в них реализовывалась: длительность импульса электронного пучка в диоде до 40 нс, энергия электронов до 500 кэВ, а энергия пучка электронов за время импульса - до сотен джоулей при энергии в первичных емкостных накопителях до 5 кДж.

В результате ударного воздействия электронного пучка на поверхность анода-мишени в ее теле инициируется и эволюционирует нелинейная волна плотности, двигающаяся от поверхности к оптическому центру мишени в режиме с обострением. В центральной области мишени происходит взрыв мишени и продукты ее взрыва разлетаются во всех направлениях с высокими скоростями около 10⁶ см/сек и более.

Эксперименты всегда сопровождались измерениями, как в онлайн, так и в оффлайн режимах. В онлайн режиме измерялись импульсы напряжения и токов в диоде, излучение в оптическом диапазоне, излучение в рентгеновском и гамма-диапазонах. В оффлайн режиме проводились трековые [7,22-23] и массспектроскопические измерения [7].

В экспериментах на этих установках были получены первые результаты по самоорганизующемуся ядерному синтезу в мишенях - анодах из различных материалов и экспериментально изучены продукты синтеза как легких, так и тяжелых элементов [7,8,24]. Масса мишени, участвующая в процессах синтеза в этих экспериментах, была не больше нескольких миллиграмм.

Следующие две установки лаборатории «Протон-21» SING и ShAD с запасом энергии в первичных накопителях от 30 кДж до 55 кДж конструировались с целью последовательно повысить массу мишеней и объем энергии, освобождаемой в реакциях синтеза, инициируемых воздействием сильноточного импульсного электронного пучка на поверхность мишени.

Увеличение массы мишени, участвующей в синтезе, удалось достичь в результате как увеличения мощности установок и, соответственно, энергии импульсного электронного пучка от величин порядка кДж в установке SING до величин порядка 10 кДж в установке ShAD, так и увеличения радиуса мишени при сохранении критической плотности тока на мишени. При этом масса части мишени, участвующей в синтезе, приблизилась в установке ShAD к величинам порядка грамма. В каждом эксперименте на последнего поколения *v***становках** в результате импульсного воздействия электронного пучка с энергией до 10 кДж на поверхность цилиндрической мишени радиусом порядка миллиметров инициировались процессы освобождения энергии в режимах с обострением (о режимах с обострением см., например, в [7,16,21]) и в центральной области мишени происходил взрыв.

Продукты взрыва анода – мишени и потоки энергии разлетались из центральной области и наблюдались оптическими методами, включая: допплеровское уширение линий спектра, времяпролетную методику и скоростную съемку процесса взрыва и разлета продуктов.

Измерения фиксировали скорости разлета продуктов до величин порядка 10⁷ см/сек. Продукты взрыва мишени, достигая катодной системы, совершали работу по ее деформации. Эта механическая работа оценивалась в результате конечно-элементного моделирования для определения профиля и энергии импульсов давления продуктов взрыва на конструктив, способных вызвать наблюдаемые в эксперименте финальные состояния деформирования. Как результаты моделирования, так и оптические измерения приводят к оценкам энергии потока продуктов взрыва величинами порядка сотен кДж.

Работа посвящена изложению результатов этих исследований, показывающих высокую энергоэффективность установок Q (отношение энергии, освобождаемой в процессе взрыва мишени к энергии первичного накопителя) «Протон-21», которые больше 10.

2. К общей концепции управления ядерным синтезом в аноде сильноточного диода

Уже в первых установках Протон-21 удалось создать управляемый коллективный синтез в мишени из различных материалов и зарегистрировать трансмутацию ядер мишени в широкий спектр новообразованных элементов в макроколичествах (около миллиграмм преобразованных элементов на первых установках). Блок схема установок типа ShAD показана на Рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема установки ShAD. Обозначены области для измерения токов и напряжений в установке. Энергия емкостного накопителя генератора Маркса (около 30 кДж, разность потенциалов на конденсаторах U₀ меньше 100 кВ (обычно около 65 кВ). (1) Напряжение на выходе импульсного генератора U_s составляет около 950 кВ. (2) Ток пучка в диоде для разных экспериментов составляет в среднем от 250 кА до 400 кА (энергия пучка около 12 кДж). (3) Ток на выходе диода после взрыва мишени составляет величину около МА и выше (энергия тока до 100 кДж). (4) Поток энергии частиц и изпучения из области взрыва составляет около нескольких сотен кДж.

Как показано на блок-схеме, импульс высокого напряжения подается на вакуумный зазор плазменной системы катод-анод диода. Расстояние между самим катодом и анодом состоит из расширяющейся области, занимаемой плазмой, движущейся в промежутке и сокращающейся вакуумной области.

Активное сопротивление вакуумного промежутка диода в начале процесса велико (значение порядка тысячи Ом и со временем падает до нуля, когда зазор исчезает), а сопротивление плазменного проводника растет от нуля до максимального значения, т.е. равно сопротивлению этого плазменного проводника длиной равной начальному зазору между катодом и анодом.

Импульс тока определяется импульсом высокого напряжения, приложенного к диоду и импедансом диода как функцией времени. Очевидно, импеданс диода регулируется температурой фоновой плазмы разряда и временем появления плазмы в катод – анодном зазоре. Мнимая часть импеданса зависит от характерных времен процесса и управляется формой импульсов напряжения и тока. Ток в диоде определяется модулем его импеданса. Типичное сопротивление диода в зависимости от времени показано на рис. 2, а соответствующие импульсы напряжения и тока на рис. 3.



Фиг. 2. Типичная зависимость импеданса диода от времени. Активное сопротивление диода равно сумме сопротивления $\Omega_{acve} \approx \frac{1}{U^{1/2}} \frac{d^2_{accm}}{S_{top}}$ вакуумного катод-анодного

зазора d_{accm} и сопротивления плазменного проводника $\Omega_{vl} \sim l_{vl}(t)$.



Фиг. 3. Характерный вид импульса тока в диоде, изображенный совместно с импульсом высокого напряжения. Характерная форма импульса тока определяется: временным сдвигом максимума импульса тока от максимума напряжения, продолжительностью импульса тока, длительностью переднего фронта импульса тока, амплитудой импульса тока. Максимальное значение мощности пучка электронов около 10¹² Вт

Таким образом, после накопления энергии импульсного воздействия в теле мишени инициируется и развивается

нелинейная волна плотности, двигающаяся от поверхности к оптическому центру мишени ([7]) в режиме имплозии с обострением (см. рис. 4).

Между нелинейной волной в концепции самоорганизующегося синтеза и в схеме инерционного синтеза имеются качественные отличия (см. рис. 5). В концепции когерентного инерционного синтеза фронт волны находится в когерентно-коррелированном состоянии и естественным образом разделяет области «горючего», входящего в волну, и продуктов горения, остающихся за задним фронтом волны.

При достаточно быстром увеличении мощности воздействия драйвера на поверхность мишени динамика структур плазменного поля происходит в режиме взрыва [16, 20], при котором плотность структуры растет самосогласованным, взрывным образом в условиях электронного коллапса [27] и когерентнокоррелированном состоянии [14].

Необходимые условия синтеза достигаются в мишени результате ударного воздействия электронного пучка на поверхность анода-мишени. Когда импульсный электронный пучок фокусируется на поверхность анода – мишени, то электроны пучка проникают в материал на некоторую глубину $l_{\varepsilon}(U_{kV},\rho) \approx k_{coll} 0.667 U_{kV}^{5/3} \rho^{-1}$, которая зависит от плотности вещества р анода в граммах на кубический сантиметр, энергии электронов, соответствующей разности потенциалов U_{kV} киловольтах и $0.3 \le k_{coll} \le 1$ в зависимости от плотности тока ($k_{coll} \approx 1$ при малых плотностях тока и $k_{coll} \approx 0.3$ при больших плотностях тока).

Можно считать, что вблизи поверхности реализуется дрейфовое пространство между поверхностями с нулевым потенциалом. Электроны, влетающие в этот слой, образуют некоторое распределение потенциалов с минимумом в некоторой области (области виртуального электрода) и возникают электроны пучка, отраженные от этой области.

Динамика потока энергии электронного пучка и распределение потенциала в аноде под действием импульса высокого напряжения определяется параметром $q_a(U_{kV}, j_{MA}, \rho) \approx 6.210^{-5} j_{MA}(t) U_{kV}^{11/6}(t) \rho^{-2}$.

Если плотность тока $j_{MA}(t)$ в мега Ампер на квадратный сантиметр на мишени и энергия электронов в момент времени t_1 удовлетворяют условию $q > q_{crl}$, то вблизи поверхности анода возникает система виртуальных электродов, в которой энергия драйвера накапливается вплоть до определенного момента времени t_2 на интервале падения напряжения внешнего импульса.

Этот момент времени определяется условием *q*<*q*_{cr2} [5].



Рис.4. Характерный вид тока после выхода из области взрыва мишени анода (в области обратного тока). Наблюдается эффект сброса заряда в диоде с виртуальными электродами [5]. Амплитуда тока в несколько раз превышает амплитуду тока в диоде и в некоторых экспериментах превышала 2.5 МА. Энергия тока за все время после взрыва приближалась к 100 кДж и превышала энергию в первичном накопителе (около 30 кДж).

Таким образом, после накопления энергии импульсного воздействия в теле мишени инициируется и развивается нелинейная волна плотности, двигающаяся от поверхности к оптическому центру мишени ([7]) в режиме имплозии с обострением (см. рис. 4).

Между нелинейной волной в концепции самоорганизующегося синтеза и в схеме инерционного синтеза имеются качественные отличия.

В концепции когерентного инерционного синтеза фронт волны находится в когерентно-коррелированном состоянии и естественным образом разделяет области «горючего», входящего в волну, и продуктов горения, остающихся за задним фронтом волны (см. рис. 4).

При достаточно быстром увеличении мощности воздействия драйвера на поверхность мишени динамика структур плазменного поля происходит в режиме взрыва [16, 20], при котором плотность структуры растет самосогласованным образом. взрывным образом в условиях электронного коллапса [27] и в когерентнокоррелированном состоянии [14].

Эта квазипотенциальная структура напоминает реактор Бассарда-Фарнсворта инерционно-электростатического удержания [4], переведенный в сильно нестационарный режим плазменно-полевой структуры, движущейся с самовозрастающей энергией к центру мишени [7,13].

Большие ускорения на фронте волны в режиме имплозии с обострением приводят к тому, что взаимодействующие частицы в области фронта волны оказываются в когерентно-коррелированном состоянии (ККС). В когерентно-коррелированном состоянии ([14,27]) на фронте волны, уже на пути от поверхности к центру мишени, создаются условия для подавления кулоновского барьера и возникновения слияния во время динамического взаимодействие всех частиц друг с другом при экстремальных плотностях электронов и ускорениях в больших объемах волнового фронта в твердой мишени, аналогично реакциям синтеза в коллапсирующих звездах [9,10].



Фиг. 4. Нелинейная волна, распространяющаяся от поверхности к оптическому центру мишени в режиме имплозивного взрыва. Фронт волны имеет фрактальную структуру [7,13] в когерентно-коррелированном состоянии, через которое фильтруется вещество среды и образуются новые зародыши на заднем фронте волны. Оценки плотности нелинейной волны выполнены в гидродинамическом приближении с использованием метода Лагранжевых частиц.

Сложность технологии ядерного синтеза связана с тем, что при относительно низких энергиях взаимодействующих частиц вероятность процессов синтеза и прозрачность кулоновских барьеров \sim $exp(-2S_{\rm eff}/\hbar)$ оказываются ничтожно малыми величинами через малость постоянной Планка \hbar .

В неинерциальных системах с взрывным ростом ускорений инициируется взрывное возрастание коэффициента когерентности и корреляций \mathcal{K}_{nh} В фазовом пространстве системы становятся когерентно-И коррелированными быстро растущие ускорения сопровождаются взрывным образом растущей эффективной постоянной Планка. Для оценок можно принять тот факт, что свойства ККС можно понять, введя эффективную постоянную Планка $\hbar_{eff} = \hbar \frac{1}{\sqrt{1-\kappa_{ph}^2}}$ [14]

в соответствии с соотношением Шредингера-Робертсона. Учитывая, что в оценках вероятности процессов с участием кулоновского барьера эффективная постоянная Планка фигурирует в экспоненте, становится понятным, что вероятность синтеза в ККС может быть увеличена на десятки порядков.

В работах [7,18,19] было показано, что анализ динамической системы, образованной частицами вещества, вовлеченными в нелинейную волну, приводит к общему выводу о возможности инициирования процессов самоорганизации в этой системе, что является основой синтеза спектра элементов в результате «жизнедеятельности» эволюционирующей системы на пути от ее зарождения к ее коллапсу.

Распространенность элементов в продуктах синтеза зависит от степени неравновесности и корреляций в процессе синтеза. Особенности спектра продуктов синтеза отчетливо проявляются, если элементы синтеза расположить порядке уменьшения в их распространенности. Полученное распределение имеет степенной вид закона Ципфа-Мандельброта co спектральным индексом s, подобным спектральной распространенности элементов при столкновениях тяжелых ионов [28].

Распределения такого типа при мультифрагментации вытекают из неэкстенсивной статистики Цаллиса [17]. После усреднения энергии связи продуктов синтеза по функции распределения получена зависимость средней энергии связи на нуклон от индекса спектра продуктов (см. рис. 5).

На рис. 5 также показано распределение Ципфа-Мандельброта по распространенности продуктов синтеза, полученный по экспериментальным данным (данные соответствуют индексу s = 1.22). Для большинства экспериментов значения индекса лежат в интервале 1.2 < s < 1.5.

Количество нуклонов, участвующих в процессе синтеза, определяется массой мишени и параметрами драйвера, и их типичное количество в экспериментах на наших установках лежит в широком диапазоне от 10¹⁹ до 10²¹. Для типичных мишеней из бора, титана и свинца средний энергетический выход реакций составляет сотни кэВ на нуклон, поэтому суммарный энергетический выход в наших экспериментах расположен в диапазоне мегаджоулей. Результаты исследований оболочковой структуры ядер [29] и фрактальной структуры ядерной материи [30] при плотностях меньше плотности ядер при нормальных условиях могут быть использованы для объяснения существования сверхтяжелых стабильных элементов в теории и экспериментах [7,30,31].

В таком случае, чтобы произвести достаточную мощность, термоядерные топливные элементы не обязательно должны быть самыми легкими. Топливом может быть практически любой материал.

Одним из сопутствующих явлений когерентного синтеза является значительное снижение радиоактивности продуктов реакции с начальными радиоактивными мишенями. Это может стать средством дезактивации радиоактивных отходов и вообще превращения практически любого токсичного или непригодного для использования материала в устойчивые и безопасные элементы.



Рис. 5. Зависимость средней энергии связи на нуклон от индекса спектра продуктов синтеза s (вверху). Типичное распределение Ципфа-Мандельброта для плотности продуктов синтеза по результатам оптических измерений в экспериментах (внизу)

3. Установка SING и математическое моделирование деформации ее катодной системы

Прямым развитием установок типа ИВР стала установка SING, эскиз которой показан на Рис 6. В вакуумной камере располагаются катодная система (источник электронного пучка) и мишень-анод (см Рис. 7.).

Катодная система состоит из медного стержня, на который надевается отрезок пластиковой трубки (ПТ). Анод имеет вид металлического цилиндра диаметром 3 мм с закругленным торцом.

Емкостной накопитель SING имеет емкость 1.875 мкФ и заряжался обычно до разности потенциалов не более, чем 70 кВ, то есть начальная накопленная энергия составляет около 50 кДж. Наглядно энергия продуктов взрыва, разлетающихся из центра мишени, проявляется в механическом воздействии их короткого удара по конструктивным элементам и, в частности, по ПТ, которая этим ударом выворачивается наизнанку на катодном стержне.

Необходимая для этого энергия оценивается в результате математического моделирования этих процессов методом конечных элементов [26].

Основные оценки были получены для модели ПТ в приближении упругости процессов изменения её формы в рамках механики деформируемого твёрдого тела.

Для полимеров при высоких скоростях нагружения и при амплитудах силового воздействия, не ведущих к хрупкому или вязкому разрушению, характерны упругие виды деформаций [33].



Рис.6. Эскиз установки SING с плазменными размыкателями и диодом



Рис. 7. Схема размещения ПТ в диоде и фотография исходной ПТ

Механизмы пластичности полимеров проявляются при достаточно больших временах воздействия (порядка секунд и выше), а при силовой нагрузке порядка микросекунд и достаточно больших амплитудах жесткость материала возрастает и, соответственно, энергия, требуемая для формоизменения, при этом увеличится. Утверждается [33-35], что полимер даже в жидком состоянии при приложении к нему кратковременной нагрузки может проявлять свойства упругого твердого тела и демонстрировать высокую прочность.

Из длительности электромагнитных процессов в диоде и определения времени воздействия потоков вещества на ПТ следует, что продолжительность силового воздействия на трубку составляет не более 2 микросекунд, то есть нагрузка является кратковременной. Это свидетельствует в пользу упругости модели, в которой пластические процессы не успели бы реализоваться, а рассмотрение пластических процессов привело бы к необходимости еще больших значений энергии, воздействующей на ПТ при тех же её финальных состояниях.

Потоки вещества, воздействующего на трубку, моделировались посредством приложения нестационарных давлений к поверхностям модели трубки из конечных элементов, которые подвергались таким воздействиям в соответствии с местоположением ПТ в диоде (Рис.7).

Величины амплитуд давления при моделировании варьировались от десятков МПа до 10 ГПа, время силового воздействия исследовалось в промежутке от десятков наносекунд до десятков микросекунд.

Методом моделирования был изучен весь набор экспериментально наблюдённых конечных состояний ПТ. Решение обратной задачи определения характеристик воздействия на ПТ, которое получено нами в результате решения серии моделирования прямых задач, показало, что это решение весьма чувствительно к параметрам воздействия, содержится в узком диапазоне их значений и типичная импульсная нагрузка, полученная таким образом представлена на Рис.8.



Рис. 8. Характерная форма импульсного давления на ПТ

В расчетах использовались данные о составе и скоростях потоков частиц, полученные из оптических спектров.

Фронт импульса давления на ПТ формируется потоком из лёгких элементов и элементов со средними атомарными массами. Вслед за этими элементами к поверхности ПТ подходят и формируют максимальное давление тяжёлые элементы.

Потоки тяжёлых элементов распространяются у поверхности ПТ в среде из пришедших ранее потоков, при этом давление демпфируется и на завершающей стадии формируется спад кривой давления на поверхность трубки. Продолжительность этого процесса составляет менее 2 микросекунд, а фронт порядка 100 нс. В условиях диодной камеры и формируемых в ней электромагнитных полей потоки частиц с разной массой формируют два удара - в торец трубки и на внутреннюю поверхность трубки.

Более лёгкие элементы достигают поверхности трубки по искривлённым траекториям, а тяжёлые - по почти прямолинейным путям. За время около 1.5 микросекунд формируется импульс гидродинамического давления в 9 ГПа из компонентов тяжёлых элементов на торце трубки. В область же полости трубки попадают в зависимости от экспериментальных условий практически все рассмотренные компоненты.

При достижении изменения формы ПТ в модели, хорошо согласующегося с наблюдаемой в экспериментах деформацией, выполнялся процесс минимизации полученной ПТ энергии. С этой целью исходная конфигурация нагрузок подвергалась вариациям, при которых уменьшение приобретенной ПТ энергии сохраняло рассматриваемый вид деформации.

В упругом приближении не происходит диссипации энергии и при воздействии энергия трубки состоит из двух компонент – деформационной и кинетической. Кинетическую энергию трубки составляет энергия движения составляющих ее частей независимо от того, движется центр масс или покоится.

Сравнение форм ПТ после воздействия в эксперименте и полученные в моделировании приведены в Таблице 1. В правой колонке приведены минимальные значения энергии потока, необходимые для достижения соответствующей формы ПТ.

В процессе разлёта потоки тяжелых элементов имеют почти изотропный характер разлёта и, следовательно, в область трубки попадает доля этого потока, соответствующая телесному углу видения трубки из начальной сферы разлёта продуктов.

По данным измерений на тяжёлые элементы приходится ~2/3 оптически измеренной доли энергии потока продуктов взрыва и можно просто оценить, что доставленная к трубке энергия с учетом телесного угла торца трубки в 2.4 раза меньше энергии потока. Тем самым, чтобы в область трубки было доставлено, как было оценено ранее, 40-50 $\kappa Д ж$, необходимо, чтобы в области взрыва выделилось порядка 90-120 кДж.

Использование плазменных размыкателей позволило в установке SING получить преобразование только несколько процентов энергии накопителя в энергию электронного пучка и энергетическая эффективность по оценке деформации катодной системы приводит к значениям в интервале от 2 до 3, в то же время освобожденная энергия по отношению к энергии драйвера (электронного пучка) оказывается достаточно большой и может достигать величин порядка 10².

Таблица.1.	Сопоставление	экспериментальных	u		
модельных конечных состояний ПТ					

Состояния ПТ в эксперименте	Состояния ПТ по моделированию	кДж
		10.7
-		16.4
Carlos Carlos		18
		32
		54

4. Установка ShAD и энергия взрыва мишени

Для повышения стабильности работы установки и энергии взрыва была сконструирована установка ShAD с амплитудой импульса высокого напряжения больше MB и токами порядка от 200 до 300 кА на основе схемы ДФЛ. Эскиз установки ShAD показан на Рис. 10.

Высокие токи в установке, позволяют получить на поверхности мишени критические значения тока [5] при радиусах мишени в несколько миллиметров и, следовательно, захватить в нелинейную волну к центру достаточно большую массу вещества [7]. В центральной области мишени инициируется взрыв и продукты ее взрыва разлетаются во всех направлениях со скоростями около 10^7 см/сек.

Величины скоростей продуктов взрыва измерялись оптическими методами:

- с использованием допплеровского уширения спектральных линий
- по регистрации времени достижения оптического излучения трех точек, находящихся на разных расстояниях от центра взрыва.



Рис.9. Эскиз ДФЛ и диода установки ShAD. Внизу типичные осциллограммы тока (нижняя кривая) в электронном пучке и напряжения (верхняя кривая) на диоде (эксперимент номер 41317)

Кроме того, проводилась оптическая съемка процесса взрыва. При обработке измеренных оптических спектров использовались стандартные контуры линий спектра [7,37]. Пример оптического спектра из области взрыва показан на рисунке, приведенном в Таблице 2.

Вначале осуществлялась операция исключения из профилей спектральных линий вклада, вносимого аппаратурной функцией прибора, данные о которой получены в результате измерений спектра ртутной лампы. Затем производилось разложение измеренного спектра на составляющие, т.е. на отдельные спектральные линии. В процессе обработки варьировались ширина и форма линии до получения оптимального согласия между суммарным контуром спектральных линий и экспериментальными точками.

Результаты измерения состава разлетающихся потоков в эксперименте с мишенью из гафния представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Состав разлетающихся потоков из центра мишени из свинца и оптический спектр, по которому восстанавливались количества ионов и их скорости для эксперимента номер 41250

Element	10 ⁷ cm/s	%
Н		2.15
С	0.263	1.48
В	0.742	0.72
Na	0.524	1.38
Al	0.222	2.03
Ca	0.540	1.84
Ti	0.442	1.56
Cr	0.251	0.56
Mn	0.321	2.26
Fe	0.501	5.74
Cu	1.040	10.39
Zn	0.525	8.67
Hf	0.402	0.89
Pb	0.914	60.34



Средняя скорость частиц этого потока в этом эксперименте, полученная по допплеровскому уширению линий оптического спектра составляла около 6. 10⁶ см/сек. В экспериментах скорости потоков варьируются, но в основном лежат в диапазоне от 2.0 10⁶ до 1.9 10⁷ см/сек.

Скорости разлетающихся потоков оценивались также и с использованием времяпролетной методики, которая давала значения близкие к результатам, полученным по допплеровскому уширению.

Излучение от заданных точек регистрировалось монохроматором (см. Рис.10) и, зная расстояние между точками измерения по полученным интервалам времени появления оптического сигнала, получаем скорости распространения потоков продуктов взрыва мишени.

Малая часть потоков продуктов взрыва при разлете из центра мишени (пропорциональная телесному углу элементов катода) взаимодействовала с элементами катода и совершала механическую работу по его деформации.



Рис. 10. Интенсивность света, зарегистрированная монохроматором в разных точках и вычисление скорости продуктов взрыва мишени.

 $u_{1-2}=0,9cm/0,379\mu s=2,38*10^6 cm/s;$ $u_{1-3}=1,8cm/0,750\mu s=2,40*10^6 cm/s;$ $u_{2-3}=0,9cm/0,371\mu s=2,42*10^6 cm/s.$

На Рис. 11. показаны типичные состояния катод – анодной системы до и после взрыва в области центра мишени.



Рис. 11. Эскизы катод-анодной системы до взрыва (слева) и после взрыва (справа). Катод – анодная система в составе установки показана на эскизе см. Рис. 8

Масса разлетающихся продуктов в экспериментах изменялась от 0.1 грамм до 0.9 грамм (полученная по разности массы мишени до и после взрыва).

Отличие этой величины от массы зарегистрированных в оптических измерениях числа нуклонов связана с тем, что наблюдение оптическими методами осуществляется через плотную плазму и наблюдается лишь часть потока.

Ключевую роль в вопросах прозрачности среды для оптических наблюдений играет Росселандов пробег кванта света в среде [38]:

$$l_{p} = \frac{10^{22} T^{7/2}}{z n^{2}} \begin{cases} 480 z^{-2} \\ 1.3 (z^{2} + z)^{-1} \\ 4.4 (1 + z)^{-2} \end{cases}$$

где T- температура плазмы в градусах, z- степень иони-

зации излучающего квант света атома, *n* – плотность ионов в среде распространения кванта, одна из трёх возможностей после фигурной скобки– особенности реализаций поглощения света в среде (свободно- свободный обмен фотонов, однократно, многократно ионизированные атомы). Если размер среды превышает величину Росселандова пробега для излучаемого атомом кванта света квант поглощается средой и оптический прибор его, конечно, не регистрирует.

Плотность ионов для сферического разлёта приближённо уменьшается квадратично с радиусом. Оптические измерения в нашем эксперименте интегрируют весь процесс от начала взрыва до касания сферой разлёта стенок диодной камеры. По ходу этого процесса плотность ионов спадает до пределов, определяемых сферой разлёта максимально возможного радиуса. Для начального момента разлета получаем росселандов пробег, который пренебрежимо мал по сравнению с радиусом, на котором наблюдается процесс - такое излучение не может быть зафиксировано.

Отношение энергии E_0 , содержащейся в прозрачном слое, к энергии E_s взорвавшегося слоя с приближенно однородно распределенной по нему энергией, будет равно отношению объёмов этих слоёв. В рассматриваемом нами случае энергия взрыва больше энергии, наблюдённой оптически и E_s / E_0 находится в диапазоне от 300 до 3000.

Процессы взрыва в диоде регистрировались также с использованием скоростных ССD – камер. Из полученных снимков удалось оценить некоторые характерные времена процессов: время прохождения расширяющимся облаком, возникшим от взрыва мишени, промежутка в 1см было порядка 50 нс, а время отгибания элементов медного катода составляло величину меньше 500 нс.

Хотя основные усилия в установках были направлены на регистрацию энергии взрыва и тщательного анализа продуктов синтеза (как в случае маломощных установок типа ИВР), также в экспериментах регистрировались продуты синтеза в виде редких элементов (см. Рис.12), что свидетельствует о процессах в мишени на ядерном уровне.

С учетом того, что потеря массы при взрыве составляет в различных экспериментах величины от 0.1 грамм до 0.9 грамма, а скорости этой массы лежат в пределах (0.5-1.9) 10⁷ см/сек, то энергия продуктов взрыва мишени можно оценить величиной в среднем от 300 кДж до 1 МДж



Рис. 12. Макроскопические скопления элементов Au (вверху) и Yb и Y (внизу) на остатках мишени после взрыва мишени из гафния. Слева фотография с электронного микроскопа, справа соответствующие участки рентгеновского спектра

5. Заключение

Эксперименты по ядерному синтезу в мишенях сильноточных диодов в «Протон-21», которые были начаты на малых установках с энергией в электронном пучке около 0.1 кДж и массами мишеней порядка 10 миллиграмм [24] были продолжены на установках с энергией в пучке порядка 10 кДж и массой мишеней порядка грамм.

В экспериментах на таких установках с малой мощностью были зарегистрированы продукты синтеза в широком спектре масс ядер [7,24].

На мощных установках SING и ShAD удалось получить освобождение энергии при взрыве, который происходил в центре мишени после инициирования процессов электронным пучком на ее поверхности.

Энергия первичных накопителей на входе установок SING и ShAD была в пределах 30÷55 кДж, а энергия взрыва, освобождаемая в центре мишени, составляла по оценкам, приведенным в работе с использованием оптических измерений, величины в диапазоне от 300 кДж до 1 МДж. Таким образом, энергетическая эффективность Q установок «Протон-21» была доведена в среднем до величин, находящихся в диапазоне от 10 до 30.

Благодарности

Авторы благодарны инвесторам «Протон-21» за постоянную и разностороннюю многолетнюю поддержку научно-технических исследований лаборатории, без которой полученные результаты не могли бы быть достигнуты.

Ссылки

- Wesson, John; et al (2004). *Tokamaks*. Oxford University Press. ISBN 0-19-850922-7.
- [2] J. Duderstadt and G. Moses, Inertial Confinement Fusion (Wiley, New York, 1982).
- [3] Olson, C. L., "Z-Pinch Inertial Fusion Energy," in Landholt-Boernstein Handbook on Energy Technologies (Editor in chief; W. Martienssen), Volume VIII/3, Fusion Technologies (Edited by K. Heinloth), Springer-Verlag (Berlin-Heidelberg) in press (2004). [Includes an extensive list of references.]
- [4] R.W. Bussard, "Some Physics Considerations of Magnetic Inertial-Electrostatic Confinement: A New Concept for Spherical Converging-flow Fusion," Fusion Technology 19, 273 (1991).
- [5] A.V. Pashchenko, B.N. Rutkevich. Dynamics of transitions between the stationary states in diode // Radiotekhnika i Elektronika. 1979, v. 24, № 1, p. 152-157 (in Russian).
- [6] A. Pashchenko, V. Ostroushko. Electron flow dynamics in resistive gap // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Beam dynamics". 2017, № 6(112), p. 58-62.
- [7] S. Adamenko, Selleri, van der Merwe, "Breakthroughs Experiment and Theory," Springer, Berlin (2007)
- [8] Adamenko S.V. Method and device for compressing a substance by impact and plasma cathode, International Patent EP1464210 B1, 27, September 2006.
- [9] E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, and F. A. Hoyle, Rev. Mod. Phys. 29, 547 (1957).
- [10] S. L. Shapiro, S. A. Teukolsky, Black holes, white dwarfs and neutron stars (Wiley-Inters.cience, New York, 1983)
- [11] S. Adamenko et al, Mechanism of synthesis of superheavy nuclei via the process of controlled electron-nuclear collapse. *Foundations of Physics Letters*, Vol. 17 No. 3. June, p. 203-233 (2004)
- [12] S. Adamenko et al, Evolution of annular self-controlled electron-nucleus collapse in condensed targets. *Foundations of Physics* 34, No. 11. Nov, p. 1801-1831 (2004)
- [13] S. Adamenko et al, Neutronization and protonization of nuclei: two possible ways of the evolution of astrophysical objects and the laboratory electron-nucleus collapse. *Foundations of Physics Letters* 19, No.1, February, p. 21-36 (2006)
- [14] Vysotskii V., Adamenko S. Correlated states of interacting particles and problems of the Coulomb barrier transparency at low energies in nonstationary systems. Tech Phys. 2010; 55:613621
- [15] S. Adamenko, V. Vysotsky. Peculiarities of formation and application of correlated states in nonstationary systems at low energy of interacting particles. Journal of Experimental and Theoretical Physics — JETP, 2012, volume 141, no. 2., pp. 276-287.

- [16] S. Adamenko, V. Novikov, A. Pashchenko, I. Shapoval. Nonlinear self-consistent processes with sharpening, quasistationary fractal plasma-field structures and the concept of the relationship between macro- and microscopic processes in dense plasma. Advances in modern radio electronics 11, p. 55-
- [17] S. Adamenko, N. Bogolubov, V. Novikov, S. Kruchinin. Selforganization and nonequilibrium structures in the phase space, *International Journal of Modern Physics B*, Volume 22, Issue 3, pp. 2025-2045 (2008).

65 (2005).

- [18] S. Adamenko, V. Bolotov, V. Novikov, Control of multiscale systems with constraints Interdisciplinary Studies of Complex Systems, Vol. 1, No. 1 (2012) 33–54.
- [19] S. Adamenko, V. Bolotov, V. Novikov, Control of multiscale systems with constraints Interdisciplinary Studies of Complex Systems, Vol. 1, No. 1 (2012) 55–77.
- [20] Adamenko SV. Method and device for compressing a substance by impact and plasma cathode, International Patent EP1464210 B1, 27, September 2006.
- [21] Samarskii A., Galaktionov, V. Kurdyumov, S., Mikhailov A. «Blowup in Quasilinear Parabolic Equations». Berlin: Walter de Gruyter, 1995.
- [22] A. Adamenko, S. Adamenko, E. Bulyak. Experimental studies of excitation of a converging density wave in a cylindrical anode of a high-current diode. Letters Tech. Phys., vol. 31, issue 10, p. 24-29 (2005).
- [23] S.V. Adamenko, A.S. Adamenko, A.A. Gurin and Yu. M. Onishchuk. Track measurements of fast particle streams in pulsed discharge explosive plasma. *Radiation Measurements* 40, No.2-6, November, p. 486-489 Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Tracks in Solids (2005).
- [24] S. Adamenko, A. Adamenko, A. Gurin and M. Kuzmenko. Proton and alfa – radiation of the Micro-Pinch with Boron-Containing Target. Acta Polytechnica (2005).
- [25] S. Adamenko et al, Exploring new frontiers in the pulsed power laboratory: Recent progress. Results In Physics, 5, 2015, p 62-68.
- [26] S. Adamenko, V. Novikov., A. Pashchenko, V. Petukhov, I. Shapoval. Application of the finite element method to the modeling of large deformations of dielectric structural elements. Impulse processes in continuum mechanics. Proceedings of the International Scientific Conference, August 17-21, 2009, Nikolaev, p. 111-113 (2009).
- [27] V. Vysotsky, S. Adamenko, M. Vysotsky, Acceleration of low energy nuclear reactions by formation of correlated states of interacting particles in dynamical systems? Annalsof Nuclear Energy, Vol. 62, p618-625 (2013)
- [28] K.K. Gudima, A.S. Parvan, M. Ploszajczak, and V.D. Toneev Nuclear Multifragmentation in the Non-extensive Statistics - Canonical Formulation. Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 4691-4694; Preprint GANIL-P-00-16, 2000. 4pp; nucl-th/0003025
- [29] K.K. Gudima, A.S. Parvan, V.D. Toneev. Caloric curve and multifragmentation in collisions of heavy ions with intermediate energies. *Physics of Atomic Nuclei*, 1999, vol. 62, no 9 p. 1593-1604.
- [30] J. Dechargé, J.-F. Berger, M. Girod, K. Dietrich, Bubble and Semi bubbles as a new kind of superheavy nuclei, Nuclear

Physics A 716(2003), pp. 55-86

- [31] T. Maruyama, K. Niita, K. Oyamatsu et al., Quantum molecular dynamics approach to the nuclear matter below the saturation density, Phys. Rev. C, Vol 57, Number 2, p. 655
- [32] W. Greiner, Exotic nuclei: from super-heavies to hyper and antimatter, Nuclear Physics 64(6), 1191 (2001).
- [33] Kabanov V. Encyclopedia of polymers. T. 2, 1974, 516 p.
- [34] Azarov V. Chemistry of synthetic polymers, 1976, 288 p.
- [35] Bartenev G. Physics of polymers, 1990, 433 pp.
- [36] O. Manuilenko, I. Onishchenko, A. Pashchenko, I. Pashchenko, V. Yuferov. Current flow dynamics in plasma opening switch // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration". 2021, №4 (134), p. 6 – 10.
- [37] R. H. Huddlestone and S. L. Leonard (Eds.) *Plasma Diagnostic Techniques* (Academic Press, New York, 1977).
- [38] Alexandrov A., Rukhadze A. (1974). High-current electricdischarge light sources. Physics Uspekhi (Advances in Physical Sciences), 112 (issue 2): 193-230.