

ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В МИКРОЧАСТИЦАХ, ИНИЦИИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ*

Дж. Ионас

(Альбукерк, США)

В последнее время релятивистские электронные пучки нашли широкое применение в исследованиях по ядерному синтезу. Они используются для нагрева плазмы, удерживаемой магнитным полем, для накачки газовых лазеров высокого давления, а также как мощные источники энергии для сжатия и нагрева термоядерного горючего. Некоторыми из этих направлений занимались в течение последних лет Лаборатории Сандиа. В этой статье обсуждаются недавние экспериментальные и теоретические работы по обжатию микрочастиц с помощью электронных пучков.

Применение электронных пучков для обжатия микрочастиц рассматривается (частично) из чисто практических соображений. Известно, что технология пучков относительно дешева и проста по сравнению с технологией лазеров, дающих сопоставимую энергию. Правда, на сегодняшний день длительности пучков намного превышают длительности лазерных импульсов, но в этой области имеется заметный прогресс. Если и дальше будет увеличиваться мощность импульса и улучшаться работа диода, то можно надеяться, что пучки дадут метод изучения физики сжатия и поджига D—T-смеси. Это само по себе оправдало бы поддержку такой работы, даже если электронные пучки и не будут в конечном счете применяться в источниках энергии. С другой стороны, если удастся удалить область энерговыделения от стенок и в ядерном реакторе использовать радиационно-стойкие материалы, то очень высокий КПД электронных ускорителей существенно уменьшит трудность производства энергии на экономически приемлемой основе. Кроме того, если иметь в виду применение делящегося blankets вместо литиевого (для увеличения энергетического выхода или для производства плутония), то не кажутся безнадежными идеи реактора с очень малой надкритичностью [1]. Хотя микрочастицы, предназначенные специально для облучения электронами, только сейчас начали привлекать внимание, уже имеются расчеты, которые показывают, что для существенного сжатия мишеней и высвобождения значительного количества термоядерной энергии надо стремиться сфокусировать пучок с энергией около 1 МДж в течение 10 нс на мишень диаметром в несколько миллиметров [2]. Это — трудная задача, но она будет решена, если удастся экстраполировать уже достигнутые впечатляющие успехи в области физики и технологии электронных пучков.

Фокусировка пучка. Задача получения синтеза с помощью электронных пучков не обсуждалась бы, если бы экспериментальные результаты последних лет не показали, что пучки действительно можно фокусировать до миллиметровых размеров. В первом из таких экспериментов Беннет применил диэлектрический катод в высокоимпедансном ускорителе [3]. Его результаты стимулировали деятельность многих групп, и в Сандиа начали более детально изучать этот эффект. Было обнаружено [4] сжатие пучков до миллиметрового радиуса, что подтверждает результаты Беннета и других авторов [5]. Затем мы попытались установить, какие процессы обеспечивают фокусировку. Микс и Келли [6] с помощью голографической съемки диода выяснили, что в момент сжатия пучка плазма, скорость которой возрастала от катода до 10 см/мкс, и плазма, двигавшаяся от анода со скоростью около 2 см/мкс, соприкасались, заполняя разрядный промежуток и создавая фон, нейтрализующий объемный заряд.

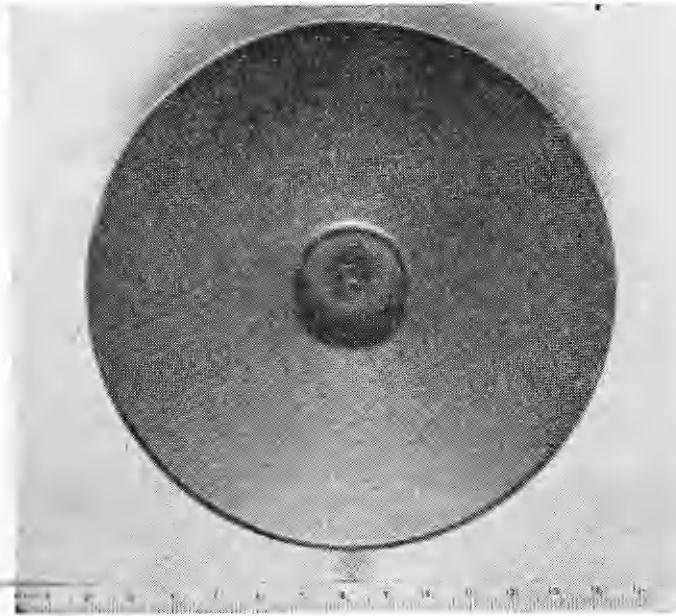
Эффект нейтрализации объемного заряда в вакуумных диодах был исследован Поки и Топфером [7], которые провели двумерные численные

* Доклад на 4-й Всесоюзной школе по физике плазмы (Новосибирск, 1974 г.).
Перевод Б. Н. Брейзмана.

расчеты методом частиц в ячейке, а также рассмотрели модель релятивистской жидкости с конечной температурой. Поскольку импеданс диодов в момент формирования пучка был довольно большим (порядка 10 Ом и выше), а голография показала, что диод в это время заполнен плазмой, авторы сделали допущение, что эта плазма из-за каких-либо турбулентных процессов обладает достаточно большим сопротивлением, так что электрическое поле диода свободно проникает в нее. В своих расчетах, выполненных в предположении о нейтрализации объемного заряда, Поки и Топфер рассмотрели роль магнитного поля пучка, проходящего через плазму, и электрического поля диода. Они обнаружили, что на расстоянии между катодом и анодом огибающая пучка сжимается на порядок величины или более, а кинетическая энергия, приобретаемая пучком при ускорении в разрядном промежутке, связана преимущественно с поперечным движением частиц (возникает горячий пучок). Впервые влияние продольного электрического поля на нейтрализованный пучок исследовалось Лоусоном [8]. Он получил похожие результаты, но при очень жестких ограничениях. В модели жидкости фокусировка пучка объясняется проще: чтобы поддерживалось равновесие между горячим пучком и его собственным магнитным полем, радиус пучка должен значительно уменьшиться. Вычисления по методу частиц и расчет огибающей в модели жидкости дают хорошо согласующиеся результаты для конечного радиуса пучка. Из всего сказанного следует, что за счет естественного образования плазмы на электродах или за счет предварительной инжекции плазмы в диоды (при предварительном создании плазмы наблюдалась сходная картина [9]) действительно можно сформировать плотно сжатый пучок.

В наших экспериментах было также обнаружено, что если диаметр катода сравним с межэлектродным расстоянием, то импеданс диода оказывается порядка 10 Ом даже для диодов, заполненных плазмой. При таком большом импедансе невозможно получить в мегавольтном диапазоне напряжений мощность, существенно превышающую 10^{13} Вт. Кроме того, если даже исключить все другие источники индуктивности, то очень большая индуктивность, связанная с зазором между катодом малого диаметра и изолятором, все равно будет препятствовать получению малого времени нарастания импульса. Необходимо найти такую конфигурацию диода, которая не только позволит получить хорошо сфокусированный пучок, но даст также малую индуктивность и низкий импеданс.

На фиг. 1 показан катод, который обычно используется для достижения этих целей в нашем ускорителе «Гидра» [10]. Импеданс диода с таким катодом составляет 2—3 Ома. При этом катод позволяет надежно получать плотно сжатый пучок. Катод, диаметр которого 13 см, сделан из латуни, покрытой аквадагом, и имеет полость в центре. Полный эмиттер с резкими краями слегка выдается над поверхностью катода ($\sim 1/4$ мм), в некоторых случаях мы использовали отдельные иглы, торчащие из поверхности катода. Зазор между анодом и катодом обычно выбирался равным ~ 1 см. Как уже было показано, плазма от выступа с резкими краями может ускоряться. На начальной стадии импульса в зазор напротив выступа может также попадать анодная плазма. Отметим, что в установке «Гидра» для предотвращения образования предплазмы в диоде используется разрядник, исключающий предварительный импульс. Таким (пассивным) способом обеспечивается инжекция плазмы в диод в область центрального пинча в течение основного импульса. Описанный диод использовался для получения плотности тока $5\text{--}10$ МА/см² при импедансе около 2 Ом. На фиг. 2 (I — радиус коллиматора) сопоставлены профили тока пучка на аноде, определенные по рентгеновским снимкам с помощью

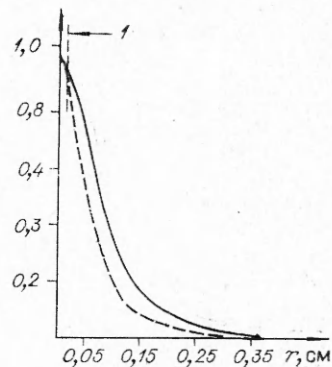


Фиг. 1

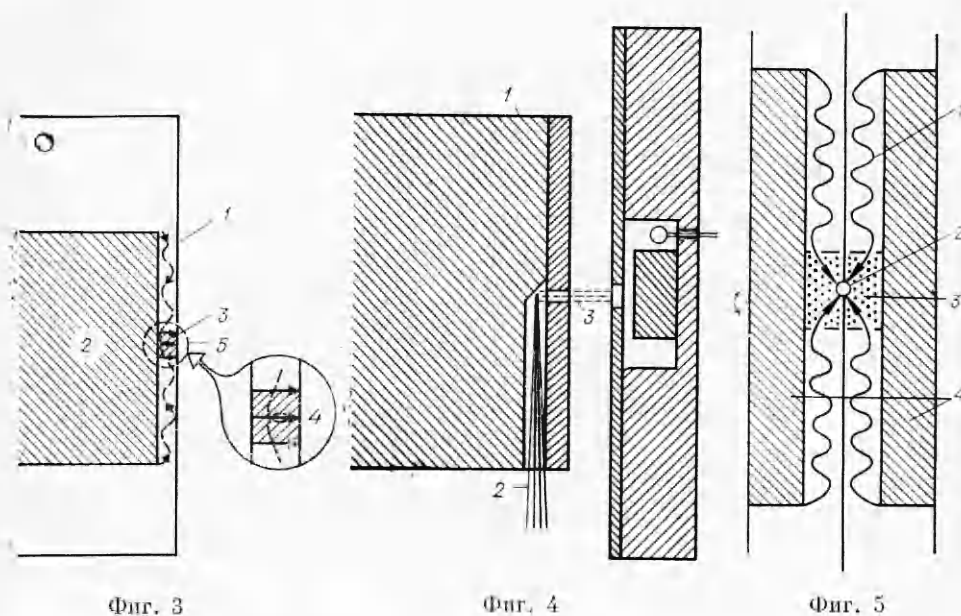
камеры обскуры для двух случаев: при автоэмиссионном способе создания плазмы (сплошная кривая; энергия пучка 10 кДж, напряжение 700 кВ, $J_{\max} = 5 \div 7 \cdot 10^6$ А/см²) и при создании плазмы из взрывающейся проволоочки (штриховая кривая; энергия пучка 1 кДж, напряжение 250 кВ, $J_{\max} = 5 \cdot 10^6$ А/см²) [11].

Идея фокусировки пучка показана схематически на фиг. 3. Чтобы получить низкий импеданс и низкую индуктивность, используется диод с большим аспектным отношением; плазма *3* с низкой проводимостью вблизи оси усиливает пинчевание без существенного уменьшения импеданса диода. Если ток пучка *4* превосходит критическое значение, при котором ларморовский радиус электронов на краю пучка становится меньше, чем зазор между анодом *1* и катодом *2*, то пучок дрейфует в радиальном направлении к центру. Создавая в окрестности фокуса плазму, нейтрализующую объемный заряд, можно еще на порядок уменьшить диаметр пинча по сравнению со случаем отсутствия плазмы на оси диода. Таким способом удалось уменьшить диаметр пучка *5* от сантиметра (без плазмы) до нескольких миллиметров (с плазмой).

На фиг. 4 показан один из наиболее хорошо контролируемых способов создания этой плазмы. В этом эксперименте Миллер и Чанг создавали плазму у катода *1*, используя пучок *2* с энергией ~ 1 Дж и длительностью 50 нс от рубинового лазера. Коллимированная плазменная струйка *3* диаметром около 3 мм попала в разрядный промежуток непосредственно перед началом импульса пучка. Таким способом удалось получить воспроизводимый пучок, сфокусированный до диаметра в несколько миллиметров.



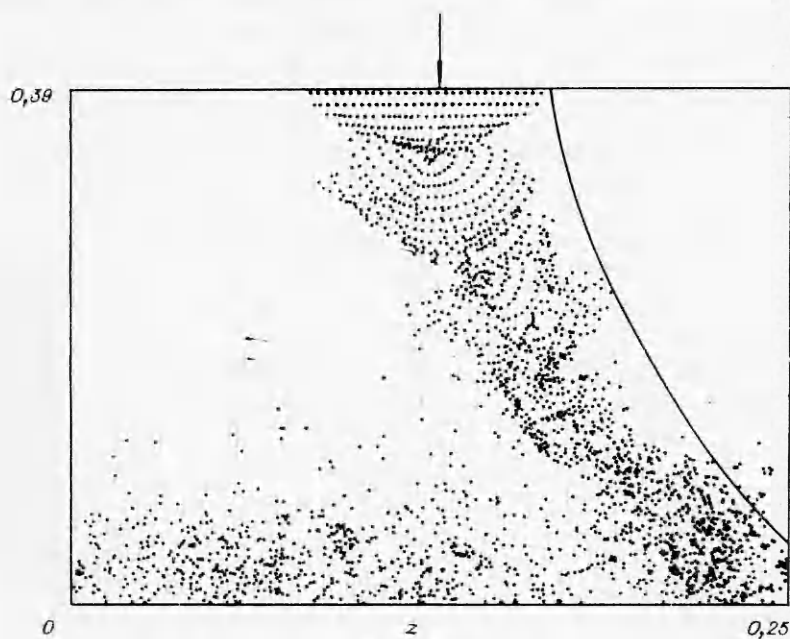
Фиг. 2



Мы предложили следующую идею применения сильноточных диодов для исследования ядерного синтеза в микрочастицах (фиг. 5). Используются два катода 4 (один против другого) и сферическая мишень 2, окруженная плазмой 3. Сама мишень вставлена в общую анодную фольгу или прикреплена к ней. Электроны сначала дрейфуют по радиусу к мишени (I — траектории электронов), а затем поток пинчуется в области, занятой плазмой. Если сфокусированные пучки будут иметь большую поперечную энергию (горячий пучок), то облучение должно быть довольно однородным. Эта идея горячего электронного газа в начале данной работы была лишь предположением. Она до сих пор остается критическим звеном, хотя последние эксперименты, похоже, подтверждают ее.

Имея в виду изложенные экспериментальные результаты, вернемся теперь к вопросу о продольном электрическом поле и его роли при сжатии пучка с нейтрализованным объемным зарядом [7].

Рассмотрим случай, соответствующий эксперименту, который мы надеемся провести в будущем. На фиг. 6 показаны численные результаты и огибающая пучка, полученная в модели жидкости (сплошная линия); для случая, когда пучок с током 300 кА инжектируется в область радиусом 0,4 см, занятую плазмой. Приложенное напряжение — 2,5 МВ ($v/\gamma \sim 3$); максимальная плотность тока на аноде при этом составляет примерно 100 MA/cm^2 . В этом случае численные расчеты находятся в хорошем согласии с моделью жидкости, если учесть, что решение в модели жидкости очень сильно зависит от предположения о начальной температуре пучка. Эта зависимость от начальной температуры яснее выражена на фиг. 7, которая соответствует пучку с энергией 3 МэВ и током 3 МА ($v/\gamma \sim 30$). Начальный радиус пучка 10 см; к межэлектродному зазору (2 см) приложено электрическое поле 1,5 МВ/см. Мы рассмотрим форму огибающей при двух различных значениях начальной температуры пучка (500 кэВ и 100 кэВ); штриховая линия на фиг. 7 показывает зависимость температуры пучка от продольной координаты. В случае 100 кэВ пучок сжимается до ничтожно малого радиуса раньше, чем достигает анода. Видно, что он останавливается, продольное движение исчезает, и условия применимости модели

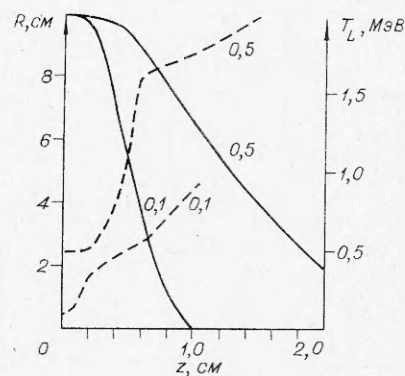


Фиг. 6

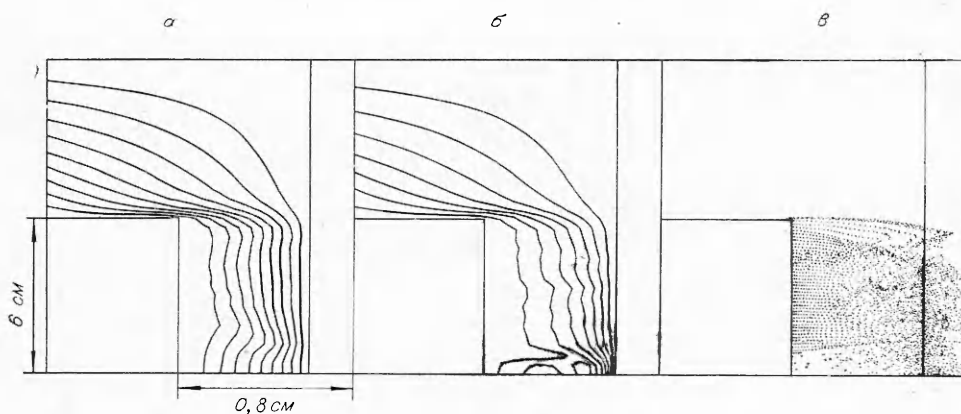
жидкости нарушаются. С другой стороны, если начальная температура равна 500 кэВ, то конечный радиус пучка ограничен несколькими сантиметрами. Итак, модель жидкости показывает, что начальная температура пучка сильно влияет на его конечный диаметр и, по-видимому, является одним из наиболее важных параметров, подлежащих контролю.

Вернемся к вычислениям, описывающим нынешние эксперименты. Рассмотрим диоды, которые используются в установке «Гидра», и обсудим вопрос о фокусировке пучка вне плазменной области на оси диода. Диод установки «Гидра» обычно работает в диапазоне 700 кВ при токах около 300 кА. В вычислениях, о которых пойдет речь, рассмотрен уже обсуждавшийся дрейф электронов к центральному фокусу. На фиг. 8 показаны: *a* — эквипотенциали в вакууме, *b* — конечное распределение потенциала, *c* — распределение заряда после установления квазистационарного состояния. Предполагается, что анодная плазма закорачивает электрическое поле диода, но не влияет на собственное магнитное поле пучка. Это предположение разумно при стандартных параметрах анодной плазмы.

Отметим, во-первых, что из-за накопления заряда на оси вблизи анода возникает электрическое поле, примерно на порядок превышающее поле в вакууме перед инъекцией заряда, и, во-вторых, электроны эмитируются преимущественно с внешнего края катода перпендикулярно аноду, совершают сложное дрейфовое движение вниз по радиусу. Заметно внешнее сходство с «парапотенциальной» моделью [12—13].



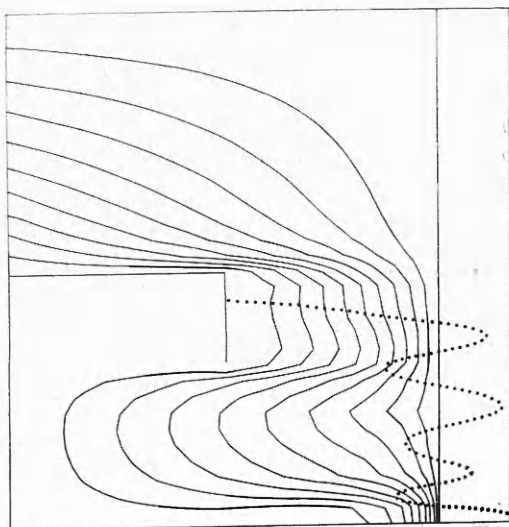
Фиг. 7



Фиг. 8

Когда электроны достигают приосевой области, электрическое поле начинает преобладать над магнитным и электроны ускоряются в направлении анода. Если вблизи оси создать область слабо проводящей плазмы, нейтрализующей объемный заряд, то пучок будет продолжать сжиматься от размера, сравнимого с межэлектродным расстоянием, до нескольких миллиметров или менее. Как уже упоминалось, механизм, ответственный за anomalно-большое сопротивление плазмы на оси, неясен, но возможно, что это результат неустойчивости, вызванной пучком.

Одна из наиболее интересных особенностей, обнаруженных в результате этих вычислений (особенность эта может оказаться критической при рассмотрении проекта реактора), состоит в том, что поведение диода будет почти таким же в случае, если катод полый (фиг. 9). Импедансы диодов с полым и сплошным катодом одинаковы; пинч при полном катоде также формируется, но фокус оказывается не таким плотным, как в случае инъекции плазмы. Из-за концентрации заряда в приосевой области электрическое поле очень похоже на поле в случае сплошного катода. Видно, что электроны дрейфуют в диоде поперек разрядного промежутка,

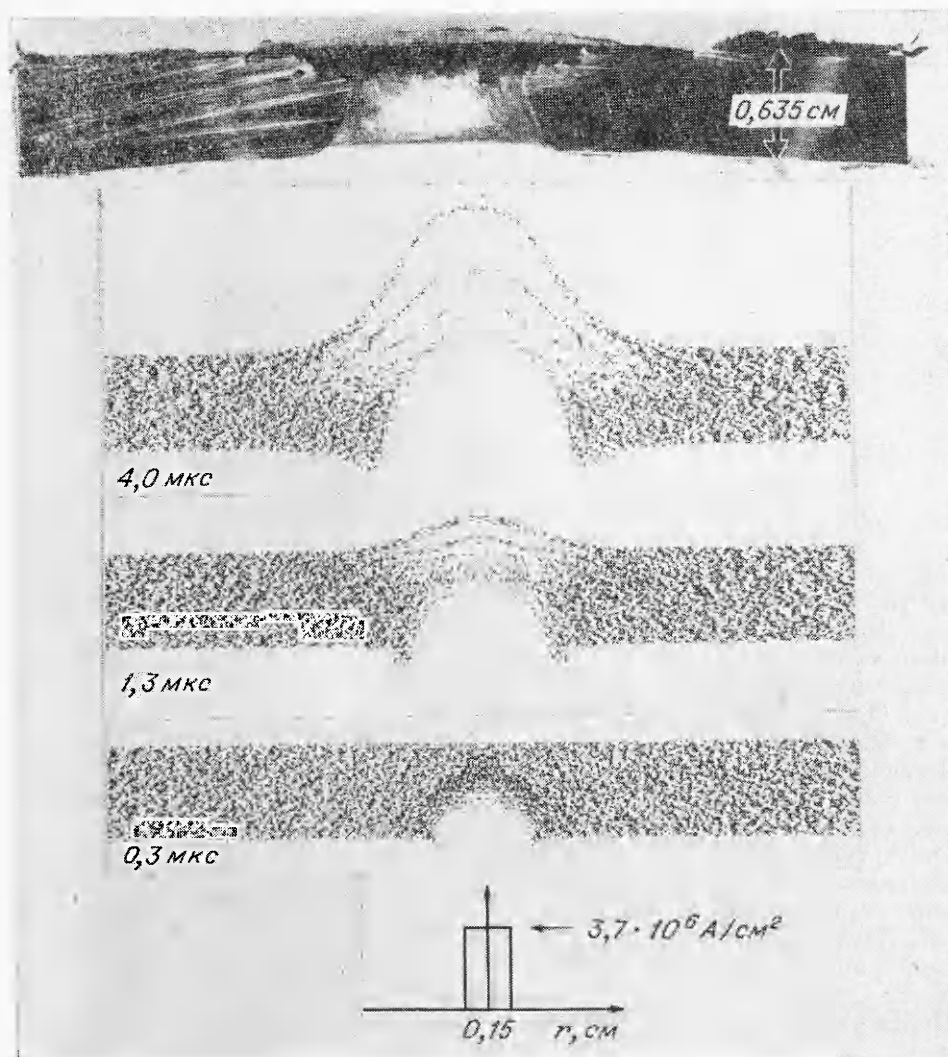


Фиг. 9

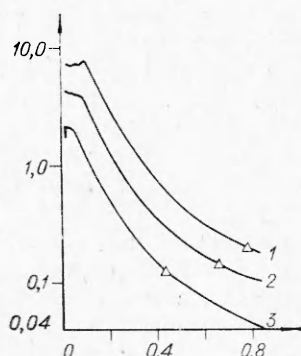
а затем фокусируются вблизи оси. Следует обратить внимание на типичную траекторию и поведение электронов при их радиальном дрейфе к оси. Собственное магнитное поле поворачивает электроны от анода в вакуумную область, а электрическое поле диода возвращает их в анодную плазму. Радиальный дрейф продолжается до тех пор, пока электроны не достигают приосевой области. В этих расчетах использовалось слишком упрощенное описание анодной плазмы. В настоящее время отдельно исследуется модель плазмы в диоде с тем, чтобы обеспечить согласие результатов с соотношениями подобия для импеданса и с поведением пучка во времени.

Эксперименты по вкладу энергии. Основная часть недавних экспериментов была выполнена на ускорителе «Гидра» [10], который представляет собой две коаксиальные формирующие линии с водяной изоляцией, питающиеся от общего генератора Маркса (напряжение 3 МВ). Две четырехомные секции, формирующие импульс, и трансформирующие линии, вдвое уменьшающие импеданс, могут либо использоваться независимо, либо запускаться синхронно с помощью управляемых газовых разрядников.

Для того, чтобы определить эффективность фокусировки и результат взаимодействия пучков с толстым анодом, Виднер воспользовался программой двумерных вычислений в рамках гидродинамики с многофазным уравнением состояния и рассчитал процесс формирования кратера. На фиг. 10 показана временная эволюция кратера для пучка с энергией 10 кДж, длительностью около 50 нс, имеющего радиус 0,15 см. Ударная волна, распространяясь по мишени, сжимает и нагревает вещество до



Фиг. 10



Фиг. 11

точки плавления. Расплавленное вещество выбрасывается, создавая кратер, глубина которого определяется затуханием начальной ударной волны. Сравнивая получившийся кратер с рассеянным образцом, как показано на фиг. 10, можно оценить энергию пучка. На фиг. 11 показаны огибающие распространяющейся волны сжатия (как функция расстояния в глубь вещества) при трех значениях энерговклада (по оси абсцисс отложено расстояние от поверхности в сантиметрах, по оси ординат — максимальное давление на оси в мегабарах). Глубина кратера (она показана треугольничками для случаев 10, 4 и 1 кДж, кривые 1—3 соответственно) сильно зависит от вложенной энергии, размер кратера тоже можно связать

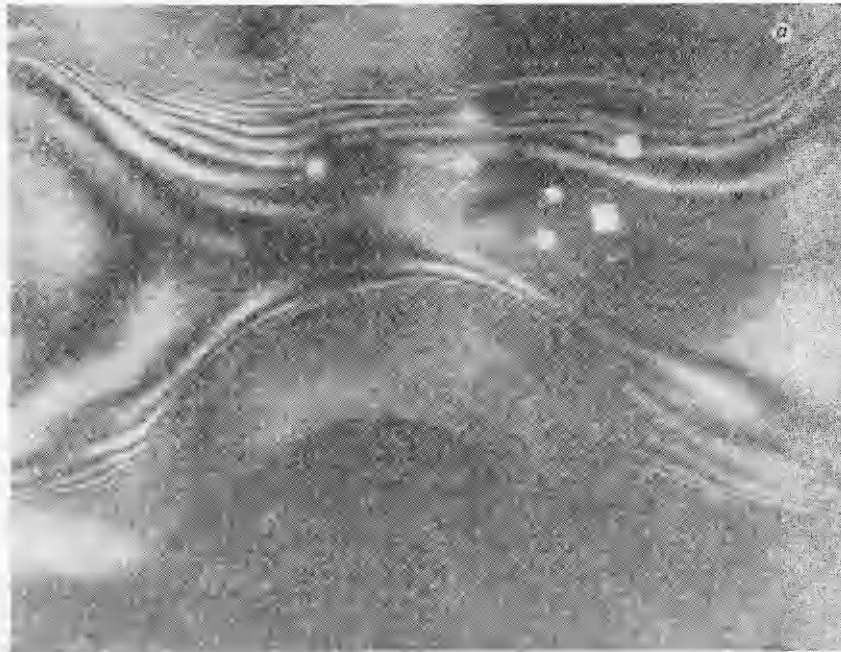
с энергией, поглощенной в мишени (если только диаметр пучка в фокусе меньше, чем конечный размер кратера).

Это грубое измерение структуры кратера послужило началом количественного исследования вклада энергии по процессу образования ударной волны. В первом из таких более детальных экспериментов Перри с помощью интерферометрического лазерного измерителя скорости зафиксировал движение разреженной поверхности мишени. Данные о времени прихода ударной волны подтвердили существование давлений порядка мегабара вблизи поверхности фронта и не дали никаких указаний на аномально-короткие характеристики энерговклада. Исследования такого рода продолжаются.

Несмотря на то, что мы только начинаем изучать плоские мишени и поглощение пучка в них, Топфер и Микс недавно начали исследовать поведение полусферических золотых оболочек. Они использовали катод, показанный на фиг. 1; полусферическая оболочка прикреплялась к аноду. Были сняты голографические интерферограммы (фиг. 12, а) области мишени, на которых видна плазма от катодного выступа, а также плазма, выброшенная из полусферической оболочки. Хотя в этом случае установка мишени была несовершенной, относительная симметрия выброса удивительно хорошо сохраняется. Нет также никаких свидетельств в пользу того, что пучок в плазме выброса разбивается на множество нитей.

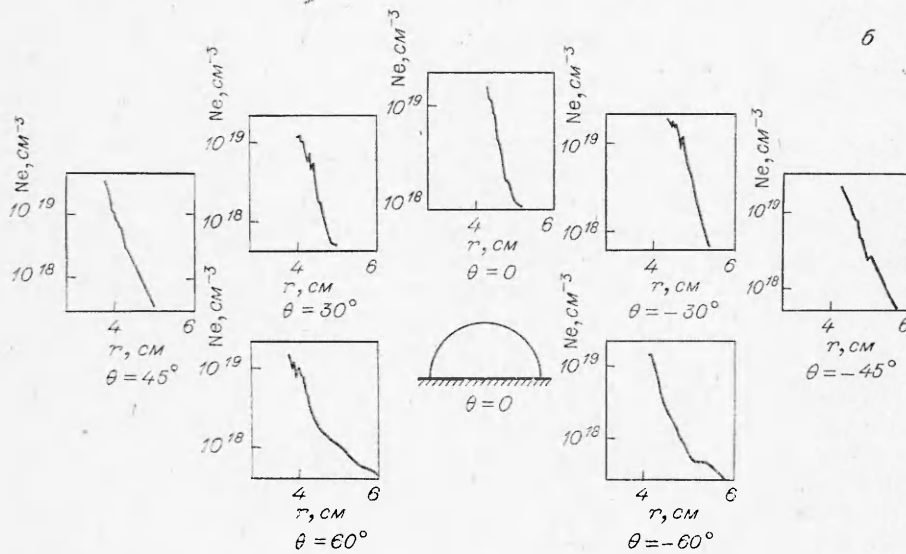
Для того, чтобы получить из этих данных количественную информацию, можно с помощью преобразования Абея восстановить по интерферограмме радиальное распределение плотности при различных значениях угла (фиг. 12, б). При $\theta = 60^\circ$ видна анодная плазма, окружающая мишень, а в области вне анодной плазмы ясно виден радиальный выброс, который относительно однороден. Здесь нет указаний ни на взаимодействие выброса с собственным магнитным полем пучка, ни на другие аномальные эффекты, связанные с пучком, — мишень свободно расширяется в вакуум. Отсутствие возмущений в выбросе наводит на мысль, что собственное магнитное поле пучка проникло в плазму и может влиять на поглощенные энергии. Этот эффект назван был «магнитным торможением» [14].

Изучение влияния собственного магнитного поля пучка на поглощение энергии в области выброса было начато Холблейбом и Ван-Девендером, которые использовали для расчета движения электронов метод Монте — Карло. Они смоделировали выброс по интерферометрическим измерениям выброса золота из полусферической оболочки и рассмотрели случай, когда плотность вещества при расширении экспоненциально спадает при удалении от фронта. Пучок попадает на плоскую мишень

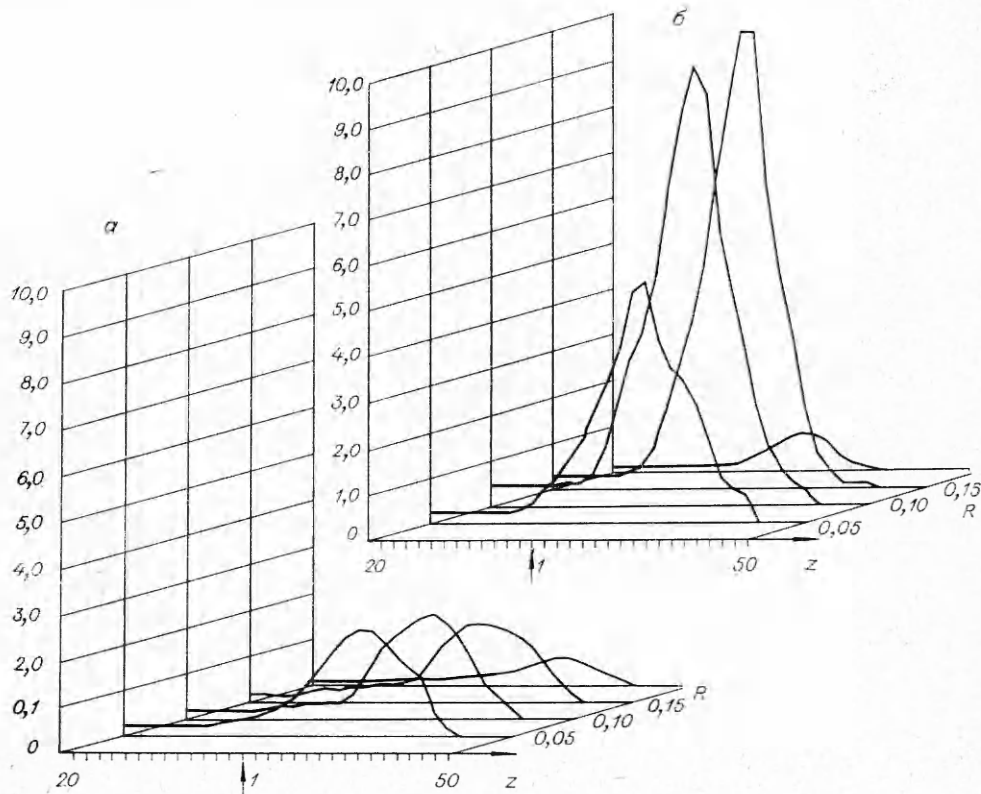


Фиг. 12, а

из точки *I*, показанной на фиг. 13. Влияние возможной нейтрализации тока самосогласованно не учитывается, но авторы попытались оценить относительное влияние ожидаемых полей, сравнивая случаи полной и нулевой нейтрализации тока. Если имеется полная нейтрализация тока (нет магнитного поля), то получается, что выделение энергии однородно по радиусу (фиг. 13, а). Доза совпадает с классической величиной энергоуклада. Поглощается 73% энергии падающего пучка. С другой сторо-



Фиг. 12, б



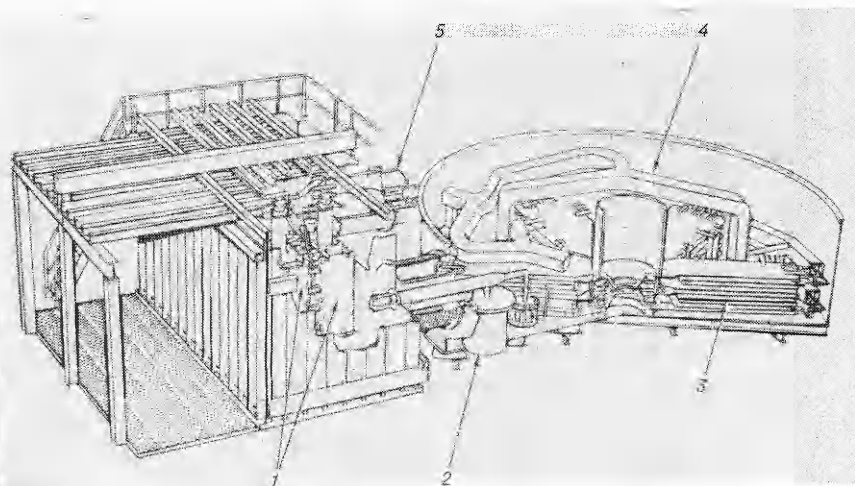
Фиг. 13

ны, если предположить, что собственное магнитное поле пучка проникает в область выброса, то доза на оси увеличивается вдвое по сравнению со случаем, когда поле отсутствует, а на краю пучка доза возрастает почти в 5 раз (фиг. 13, б; ток пучка 350 кА, радиус 0,15 см). Энергия выделяется в менее плотном веществе, чем в случае нулевого поля, но поглощение возрастает до 95%. Хотя в этих расчетах имеется много упрощающих предположений, они дают возможность отметить следующие четыре обстоятельства: собственное магнитное поле пучка может быть существенным в области выброса, увеличивать поглощение энергии, эффективно уменьшать пространственный масштаб, но способно привести к нарушению симметрии. Эти результаты показывают также, что для регистрации поведения плотной части выброса и для определения симметрии сжимающихся мишеней (как в течение импульса пучка, так и после его окончания) нужна рентгеновская диагностика с временным разрешением. Оптически ми методами такие наблюдения провести невозможно.

Развитие ускорительной техники для получения релятивистских электронных пучков. Чтобы выполнить эксперименты по сферическому обжатию мишени, две линии установки «Гидра» будут синхронизированы с помощью управляемых газовых разрядников, пучки будут сведены с помощью вакуумных коаксиальных цилиндров (с магнитной изоляцией), мишень вставлена в сплошной анод. Для изучения симметрии сжатия будет производиться рентгеновская съемка вспышки. Для соответствующих мишеней будет использоваться нейтронная диагностика.

Мы ожидаем, что эксперимент такого рода при полной энергии пучка ≤ 20 кДж удастся выполнить в течение этого года.

В дальнейшем потребуется строить ускоритель, для которого ядерный синтез в микрочастицах будет основным применением. В таком ускорителе предлагается использовать две дисковые формирующие линии, питающие общий анод. Прототип такого устройства на $2 \cdot 10^{12}$ Вт, 3 МВ сейчас строится (фиг. 14). Ускоритель состоит из шести пар линий типа Блумлейна 3, питающихся от одного генератора Маркса 1. Для того



Фиг. 14

чтобы разместить электроды более компактно и, таким образом, уменьшить диаметр ускорителя, энергия из генератора Маркса подается в промежуточные накопительные емкости 2 с водяной изоляцией. В линиях используются управляемые масляные разрядники [15], которые состоят из двух гладких протяженных электродов и триггерного электрода 4 с резким краем, расположенного на эквипотенциали, соответствующей трети напряжения, приложенного перед подачей триггерного импульса. Быстрое триггерное напряжение противоположной полярности, но сравнимое по величине с напряжением на разряднике, вызывает многочисленные стримеры. После того, как число каналов искры на промежутке 1 м превысило 8—10, оставшееся время нарастания уже не зависит от числа каналов (резистивная фаза) и относительный разброс не превышает 2 нс.

Мы рассматриваем различные возможности дальнейшего увеличения мощности до 10^{13} Вт. В одном из проектов используется пара линий типа Блумлейна на 20 нс с масляной изоляцией (линии кольцевой формы с внешним диаметром 27 м) [16]. Этот ускоритель был бы, по существу, продвижением на порядок по сравнению с прототипом. В нем могли бы использоваться промежуточные водяные накопители и управляемые масляные разрядники. Проекты формирующих линий, разрядников и т. д. могут быть конкретизированы, но наиболее критические вопросы все еще связаны с диодом, и для окончательной формулировки нашего подхода к ускорителю на 10^{13} Вт потребуются еще эксперименты на прототипе.

В заключение отметим, что на пути к успешному осуществлению ядерного синтеза с помощью электронных пучков имеется большое число проблем, требующих рассмотрения. Для достижения цели необходима ясность в трех принципиально важных физических вопросах: а) фоку-

