

Ионный диод

© Э.Г. Фурман, А.В. Степанов, Н.Ж. Фурман

Научно-исследовательский институт высоких напряжений при Томском политехническом университете,
634050 Томск, Россия
e-mail: furman@hvd.tpu.ru

(Поступило в Редакцию 6 июня 2006 г.)

Рассмотрены основные физические процессы в ионном диоде с внешним магнитным полем (ИДМ). Сформулированы требования к магнитному полю, ответственному за формирование электронного облака, заменяющего катодную поверхность в ИДМ. Исследованы возможные механизмы эмиссии ионов с поверхности анода, проанализированы известные и вновь полученные экспериментальные данные об ИДМ. Сформулированы требования к ускорителю, системе питания катушек, вакуумной системе. Приведены основные соотношения, необходимые для инженерного расчета ИДМ.

PASC: 29.25.Ni, 79.20.Kz

Введение

В современной науке и технике широко используются мощные ионные пучки для модификации поверхности, получения тонких пленок из абляционной плазмы, но особое внимание к ним уделяется в связи с практической реализацией термоядерного синтеза. Для этого требуются генераторы мощных пучков, способные работать в частотном режиме.

В [1,2] рассмотрены ионные диоды с внешним магнитным полем (ИДМ), в которых отсутствуют системы предварительной наработки плазмы в ускоряющем промежутке диода (ИДМ с пассивным анодом) и этим они выгодно отличаются от других схем генерации ионных пучков. В [3–6] были рассмотрены схемы генерации ионного пучка, в ускоряющий промежуток которых инжектируют газовую струю, создают поверхностный разряд на поверхности анода, используют двухимпульсный режим работы ускорителя и т. д. Все эти схемы (ИДМ с активным анодом) с предварительной наработкой плазмы у анода имеют низкую стабильность параметров ионного пучка от импульса к импульсу и оканчиваются пробоем ускоряющего промежутка. Режим работы, близкий к холостому ходу в ИДМ, впервые был реализован в [1], получен КПД преобразования электрической энергии формирующих линий ускорителя в кинетическую энергию пучка $\sim 70\%$. Однако физика происходящих в нем процессов не исследована, отсутствует даже примерная инженерная методика расчета.

1. Конструкция ИДМ

На рис. 1 схематично представлена конструкция ИДМ в плоском варианте, обладающая радиальной симметрией вокруг оси X . Анод A выполняется из хорошо проводящего немагнитного материала (алюминий, медь). Эмиссионная поверхность покрывается материалом, содержащим требуемый сорт атомов — будущих ионов пучка. В случае протонного пучка его эмиссионная

поверхность покрывается водородсодержащим диэлектриком, залитым в кольцевые канавки. Кольцевые катоды $1, 2$ выполняются тонкостенными, из немагнитного материала с низкой проводимостью (титан, нержавеющая сталь) с целью исключения демпфирования переменного магнитного потока катушек $3, 4$, установленных в одной плоскости относительно оси симметрии X . Катоды $1, 2$ и каркасы катушек крепятся на диске 6 с высокой проводимостью, демпфирующем магнитное поле катушек в области дрейфа. В область, где $B \rightarrow 0$, с учетом выпучивания силовых линий магнитного поля катушек $1, 2$, катоды продолжены электродами 7 и установлена нейтрализующая сетка 8 . В области сетки происходит окончательная нейтрализация ионного пучка V_i , уходящего в область дрейфа. Плотность тока в диоде подчиняется закону $3/2$

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2eK_i}{m}} \frac{U^{3/2}}{d^2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m; e, K_i — заряд электрона и кратность ионизации для ионов, m — масса ускоряемой частицы; U — потенциал анода для ионов или потенциал катода для электронов, d — расстояние между поверхностной плотностью зарядов, создающих электрическое поле в ускоряющем зазоре. С поверхности кольцевого анода (катода) с эмиссионной поверхностью, ограниченной радиусами R_1 и R_2 , можно обеспечить ток пучка в интегральном выражении

$$I = B_{e,i} \frac{\pi(R_1^2 - R_2^2)}{d^2} U^{3/2} [\text{kA}], \quad (2)$$

где коэффициент $B_{e,i}$ зависит от сорта заряженной частицы: для электронов $B_e = 2.33$; для протонов $B_p = 5.3 \cdot 10^{-2}$, для ионов углерода $B_{C^+} = 1.5 \cdot 10^{-2}$, для $B_{C^{++}} = 2.1 \cdot 10^{-2}$ и т. п.; U — потенциал в MV.

Получение высокой плотности пучков заключается в уменьшении ускоряющего зазора d при заданном потенциале U и исключении вакуумного пробоя промежутка.

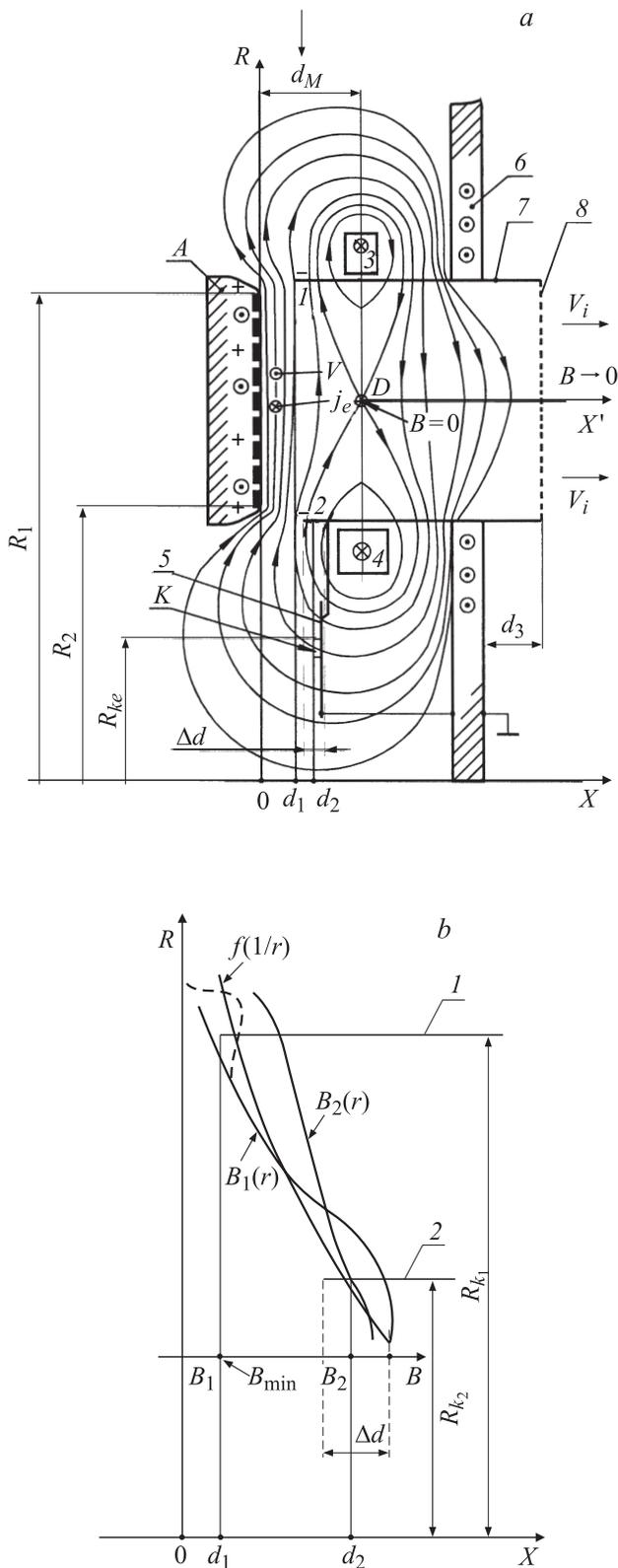


Рис. 1. Конструкция ионного диода (*a*), зависимость индукции магнитного поля от радиуса у эмиссионных кромок катодов (*b*). *A* — анод; *1, 2* — внешний и внутренний катоды; *3, 4* — катушки магнитного поля; *5* — коллектор электронного пучка; *6* — диск; *7, 8* — нейтрализующие электроды и сетка.

Катодной поверхностью в ИДМ является слой дрейфующих электронов в скрещенном электрическом E и магнитном B ($E \perp B$) полях, имитирующих поверхностную плотность заряда проводящего катода. Траектории электронов представляют циклоиду (катящийся обод ларморовой окружности строго перпендикулярен поверхности силовых линий магнитного поля) высотой

$$X = \frac{2m}{eB} \left(\frac{E}{B} \pm V_0 \right), \quad (3)$$

где V_0 — начальная скорость электрона, стартующего с катода или получившего дополнительный импульс в процессе движения по циклоиде. Средняя скорость перемещения циклоид разных высот равна дрейфовой

$$V = E/B. \quad (4)$$

При $V_0 = 0$ $X = 2r_e$, где r_e — ларморовый радиус. В зависимости от соотношения $\pm V_0/V$ высота циклоиды может изменяться от $4r_e$ до прямой линии. Максимальная скорость электрона определяется потенциалом анода и не превышает (на вершине циклоид)

$$V_e \leq \sqrt{\frac{2eU}{\gamma m}}, \quad (5)$$

где γ — релятивистский фактор $\gamma = 1 + eU/E_0$, E_0 — энергия покоя электрона. Относительная скорость $\beta = V_e/c = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$, где c — скорость света. Траектории электронов на вершине циклоид всегда параллельны плоскости анода при максимальном значении V_e , что очень важно для генерации ионов с анода в ИДМ.

2. Магнитное поле ИДМ

Требования к конфигурации силовых линий магнитного поля относительно кромок катода и поверхности анода следующие (рис. 1, *b*): эмиссионная кромка наружного катода *1* должна находиться на поверхности силовых линий, обеспечивающих в среднем на участке с ΔX , равным двум ларморовым радиусам (3), возрастающее значение индукции с уменьшением радиуса быстрее, чем функция $1/r$. Кромка катода *1* ответственна за накопление заряда в электронном облаке (ЭО), дрейфующем у поверхности анода со скоростью (4). Если $B_1(r)$ возрастает быстрее, чем $1/r$, то обеспечивается радиальный дрейф электронов по радиусу к оси X вдоль поверхности анода, и траектории электронов в радиальном направлении представляют медленно сворачивающиеся спирали, а в плоскостях, параллельных оси X , имеют вид циклоид. Заметим, что в коаксиальном магнетроне замкнутый дрейф электронов у поверхности цилиндрического катода при $B = \text{const}$ обеспечивается градиентом сходящегося электрического поля, т. е. электрон движется между поверхностями равного потенциала. В ИДМ замкнутый дрейф электронов у анода обеспечивается радиально сходящимися линиями магнитной индукции ампервитков

двух обмоток и электромагнитным экраном — проводящим анодом, демпфирующим импульсное магнитное поле, т.е. электрон движется между поверхностями равного магнитного потенциала, таким образом, чтобы

$$B(r) > \frac{B_1 R_{k1}}{r \ln(R_{k1}/R_{k2})} \text{ при } R_{k1} > r > R_{k2}, \quad (6)$$

где B_1 — минимальное значение индукции в ЭО у катода I .

Магнитное поле двух согласно включенных, коаксиально расположенных катушек, обладает очень важным для ИДМ свойством: линией ветвления (окружность) магнитного поля, расположенной между катушками и лежащей в плоскости, проходящей через центр ампервитков катушек, точка D (рис. 1, a), в которой магнитное поле тождественно равно 0, $B \equiv 0$. Именно на этой линии оканчиваются векторы Пойнтинга, ответственные за передачу энергии из емкостного накопителя в энергию магнитного поля катушек.

Эмиссионные кромки катода 2 располагаются в интервале Δd на среднем расстоянии d_2 от анода. Магнитное поле $B_2(r)$ вблизи катода 2 с возрастанием радиуса должно изменяться медленнее, чем функция $1/r$, с тем чтобы радиальный дрейф электронов был направлен от оси X наружу. Это обеспечивается, если $(d_2 - \Delta d/2) > d_1$ на величину $\sim r_e$ и больше. В интервале Δd эмиссионные кромки должны захватывать поверхность линий магнитной индукции, проходящих линией ветвления. Это требуется для того, чтобы электроны, попадая в область $B \equiv 0$, расталкиваясь собственным полем, переходили в область справа от линии ветвления и заполняли все межэлектродное пространство, где $B \neq 0$, и в дальнейшем обеспечивали компенсацию заряда ионного пучка. Скорость радиального дрейфа значительно меньше дрейфовой V и пропорциональна

$$V_r \approx \frac{V r_e \Delta B}{BR}, \quad (7)$$

где ΔB — разность индукций, определяемая из (6) при R и $R - r_e$. Дополнительно радиальный дрейф с кромок катодов к оси X усиливается за счет радиальной составляющей электрического поля, это позволяет преодолеть нарушение условия (6) у катода I , где магнитное поле искажено и показано пунктиром на рис. 1, b .

Должно быть выполнено условие: линия ветвления магнитного поля точка D должна находиться на оси пучка X' . Это выполняется, когда векторный магнитный потенциал центра ампервитков катушек 3, 4 относительно оси X' одинаков, а количество витков и радиусы ампервитков соотносятся как

$$R_1 W_1 = R_2 W_2. \quad (8)$$

Для заданного потенциала анода эффективный зазор d_1 можно считать равным $(2.5-3)r_e$, который определяется значением B в (3). Для обеспечения устойчивого дрейфового движения по циклоиде плотность энергии

магнитного поля должна быть более чем в три раза выше плотности энергии электрического поля, так как площадь, ограниченная циклоидой, в три раза больше ларморовой окружности, а закон электромагнитной индукции для движущегося электрона в магнитном поле следующий: заметаемый во времени магнитный поток по траектории движения, деленный на период обращения на ларморовой частоте ($\omega_L = \omega_c/2 = eB/2\gamma m$), равен кинетической энергии заряженной частицы в eV . Используя эти положения, получаем

$$B_{\min} = B_1 \geq \sqrt{3} E_m / c, \quad (9)$$

где E_m — требуемая максимальная напряженность электрического поля в зазоре ИДМ, например, при $B = 1$ Т, $E_m \leq 1.73 \cdot 10^8$ В/м, что недостижимо при металлических катодах в диодах из-за взрывной эмиссии на катоде, но легко реализуется в ИДМ, в которых катод — электронное облако с требуемой плотностью заряда, дрейфующее в магнитном поле на малом расстоянии от анода.

3. Образование электронного облака — катода ИДМ

При импульсном питании катушек на максимуме тока в них подается импульс напряжения на анод $U(t)$ (рис. 2), формируемый источником напряжения с внутренним волновым импедансом Z . Пунктиром показано напряжение холостого хода U_{xx} . В момент времени t_1 происходит взрывная эмиссия с кромок катодов. В основном эмиссия идет с кромки катода I , имеющего наименьшее расстояние d_1 . Эмиссионная способность

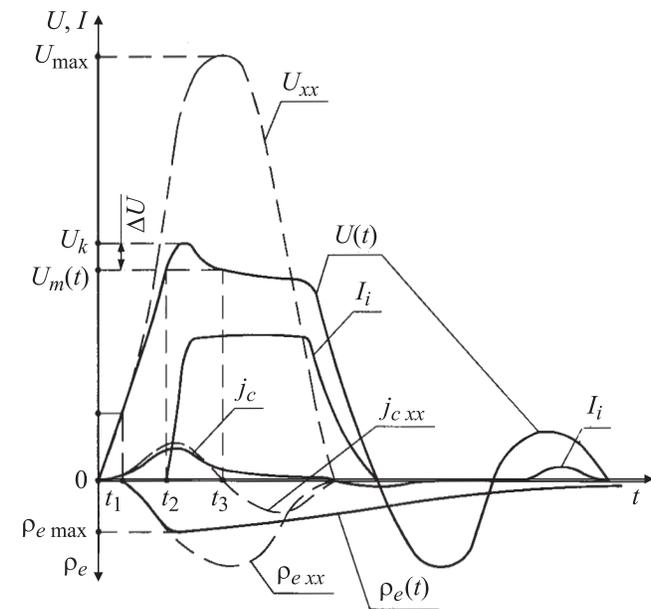


Рис. 2. Эпюры ускоряющего напряжения $U(t)$ на ИДМ, емкостного тока — j_c , плотности заряда ЭО — $\rho_e(t)$, тока ионов в ускоряющем зазоре I_i .

катодов „задавлена“ поперечным магнитным полем и скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы катодных факелов $\leq 10^{-4}$ m/s, поэтому эффективную площадь электронного катода можно считать $S \sim 2\pi R_k \cdot \Delta$, где Δ — толщина материала катода. По мере роста напряжения увеличивается электронный ток с катодов (2) и формируется электронное облако. Электроны с катода 1 по спирали дрейфуют к коллектору 5, имеющему тот же потенциал, что и катоды. Происходит заряд межэлектродной емкости: поверхность анода — центр тяжести заряда в ЭО. Этот процесс происходит в интервале времени t_1-t_2 . Ток заряда j_c носит чисто емкостной характер, и в ЭО накапливается заряд, обеспечивающий поверхностную плотность заряда, приближающуюся к поверхностной плотности заряда на поверхности анода

$$G_e = \frac{\varepsilon_0 U}{d} = \varepsilon_0 E \geq \pi(R_{k1}^2 - R_{ke}^2) \int_{t_1}^{t_2} j_c(t) dt, \quad (10)$$

при общем заряде в электронном облаке

$$Q_{ec} = \varepsilon_0 E \pi(R_{k1}^2 - R_{ke}^2), \quad (11)$$

где R_{ke} — радиус сброса электронов на коллектор 5.

Для получения требуемой плотности заряда в ЭО

$$\rho_e = G/2r_e(r, t) \quad (12)$$

эмиссионная способность взрывного катода в интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$ должна обеспечить среднее значение тока

$$\langle I_c \rangle = GS_e/\Delta t, \quad (13)$$

где $S_e \approx \pi(R_{k1}^2 - R_{ke}^2)$ — площадь ЭО. В области поверхности анода напряженность электрического поля E примерно постоянна, а у поверхности заземленного коллектора 5 — минимальна и примерно совпадает с ходом силовых линий магнитного поля $B_1(r)$, и создает, для вылетающих из ЭО электронов тормозящую ЭДС, запирая их в ЭО.

Если эмиссия ионов с поверхности анода отсутствует, достаточно высокий вакуум, напряженность E меньше критической, то напряжение на аноде будет близко к режиму холостого хода, и систему можно рассматривать как разряд емкостного накопителя с импедансом Z на емкость промежутка анод–ЭО. На рис. 2 эпюры $U(t)$, $j_c(t)$, $\rho_e(t)$ для этого режима ХХ показаны пунктиром. Работа, совершаемая электронным пучком, и достигающим поверхности коллектора равна нулю. Имеются потери, связанные с ионизацией остаточного газа (в основном ускорение полученных ионов), взрывной эмиссии с кромок катода и т. д.

При образовании ЭО электрическое поле анода локализуется у поверхности анода и происходит экранировка внутреннего катода 2, но до момента окончания образования ЭО, когда $G_e < G_a$, электронная эмиссия с кромок катода 2 должна обеспечить отрицательный заряд в области дрейфа ионного пучка между катодами в магнитном поле. Зазор $d_2 > d_1$ и электроны

по раскручивающейся спирали заполняют пространство за ЭО. Электроны, дрейфующие по силовым линиям проходящей окрестности области линии ветвления D , где $B \rightarrow 0$ расталкиваются собственным кулоновским полем, переходят на поверхности силовых линий справа от линии ветвления. К моменту времени t_2 в области между катодами, где существует магнитное поле (магнитный дрейф ионов), должен накопиться заряд электронов для компенсации заряда ионного пучка

$$Q_{eM} = j_i \pi (R_{k1}^2 - R_{k2}^2) L / V_{i \max}, \quad (14)$$

где j_i — плотность тока ионного пучка, $V_{i \max}$ — скорость ионов, L — длина промежутка от ЭО до плоскости, где индукция магнитного поля меньше критической и установлена нейтрализующая сетка. К моменту времени t_2 эмиссия с внутреннего катода практически прекращается, но среднее значение тока с катода 2 должно быть не менее $Q_{eM}/\Delta t$. Этим током создается „электронный остов“ в магнитном поле из дрейфующих в радиальном и азимутальном направлениях электронов, компенсирующих заряд ионного пучка, создается своеобразный ионный проводник, в котором роль ионов в решетке металла выполняют замагниченные электроны. Если электронный остов не будет создан, то потребуются значительные потери легких ионов пучка на фронте импульса для создания электронного остова из абляционной плазмы со стенок катодов, так как замагниченные электроны не сопровождают в дрейфе ионы пучка. Отношение величин зарядов для ускорения Q_e (10) и обеспечения дрейфа пучка ионов с плотностью тока j_e должно быть не более

$$\frac{Q_e}{Q_{eM}} < \frac{\varepsilon_0 V_{i \max} Z_i}{L d}, \quad (15)$$

где Z_i — импеданс ИДМ.

При недокомпенсации объемного заряда пучка тяжелые ионы, имеющие больший импульс $m_i \cdot V_i$, чем легкие (при равных энергиях eU), собственным полем будут выталкивать легкие, обеспечивающие основную плотность ионного пучка. Этот процесс будет продолжаться, пока со стенок катодов из абляционной плазмы не поступят электроны до полной компенсации объемного заряда ионов пучка.

4. Генерация ионного пучка

На рис. 3 представлен вид анод-катодного промежутка до нейтрализующей сетки 8 согласно стрелке на рис. 1, а. Вид представляет развертку части цилиндрической поверхности, проходящей линию ветвления магнитного поля, центральный радиус анодной поверхности принят вдоль оси X' . Нулевая точка отсчета по оси X принята на эмитирующей поверхности анода. Согласно ходу силовых линий магнитного поля расположены линии: анода L_a ; центра тяжести заряда ЭО L_e ; центра

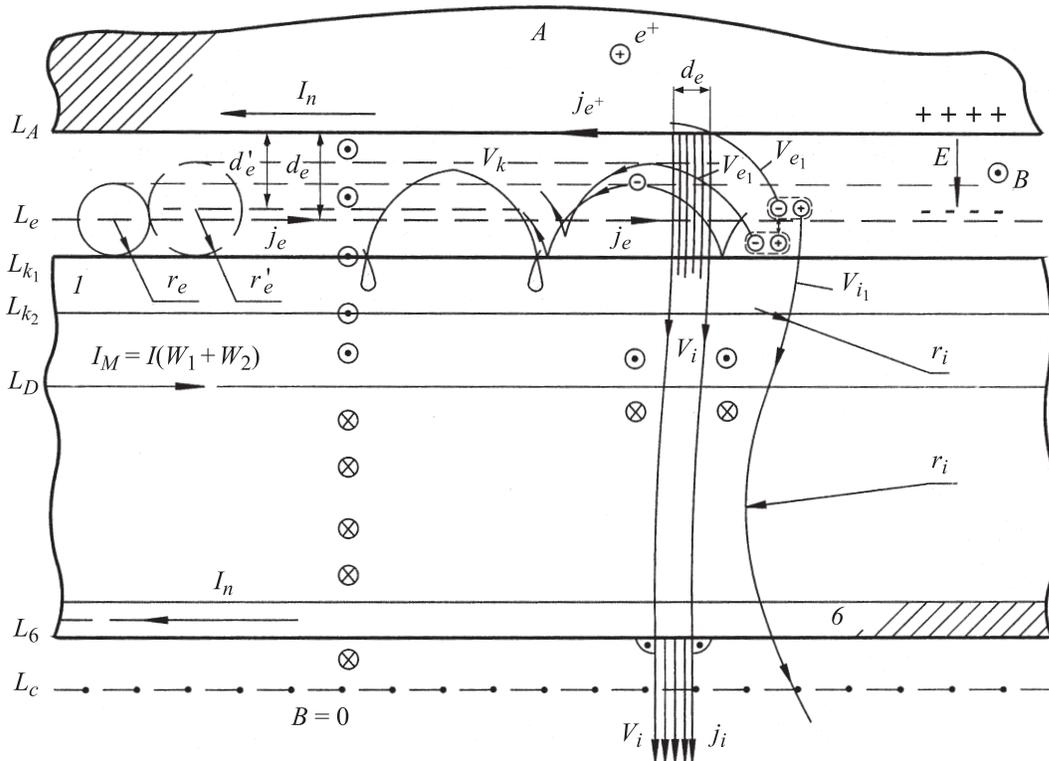


Рис. 3. Линейная развертка ускоряющего зазора анод–ЭО и характерные виды траекторий электронов в ЭО (а), траектории освобождающихся ионов V_{i1} и электронов V_{e1} при актах ионизации молекул остаточного газа и траектории ионов V_i , стартующих с поверхности анода.

ампервитков катушек 3, 4, проходящих по линии ветвления L_D ; поверхности диска b и линии нейтрализующей сетки L_c ; расположенной в области, где $B \rightarrow 0$.

К моменту времени t_2 (рис. 2) имеем: по цепи емкостного накопителя C (рис. 3, а) протекает ток заряда j_c емкости межэлектродного промежутка анода–ЭО и заканчивающийся ток с внутреннего электрода, так заряд ЭО экранирует поле анода. Величина заряда в ЭО $Q_e(t) = C_k U(t)$, где $C_k \approx \varepsilon_0 \pi (R_{k1}^2 - R_{k2}^2) / d_e$. Расстояние d_e анод–центр тяжести ЭО уменьшается, так как растет ларморовый радиус согласно (3), а $d_e = d_1 - r_e$. В ЭО могут присутствовать траектории, слабо отличающиеся от прямой линии L_e (при высоких плотностях заряда циклоиды вырождаются в волнистую линию из-за экранировки электрического поля положительного заряда анода зарядом в ЭО) до V_k — имеющей максимальную высоту. Относительно линии катодной поверхности катода I траектория V_k пересекает L_{k1} — „обратным витком“ (заштрихованная часть), а в глубь зазора d_1 может проникнуть на глубину до $3r_e$.

Объемная плотность заряда в ЭО, дрейфующего в $E \perp B$ полях, создает плотность тока, и общий ток ЭО

$$j_e = \rho V, \quad I_e = G_e V. \quad (16)$$

Электроны ЭО относительно поверхности анода создают заряд отображения положительного знака, который в

проводящей поверхности материала анода создает поверхностный ток j_{e+} , равный (16), но противоположного направления. Токи j_e и j_{e+} создают магнитное поле $B_e = \mu_0 j_e d$, которое суммируется с основным B , созданным ампервитками катушек I_M и наведенным в теле анода I_N , полученным при формировании импульса тока катушек. Ток j_e распределен в приповерхностном слое проводящего материала анода согласно скин-слою для $\omega \sim V_e / 2\pi r_e$. Суммарное магнитное поле $B_\Sigma = B_0 + B_e$ образует „магнитную подушку“, на которой расположен заряд ЭО, притягиваемый силой Кулона $F = EQ$ к аноду. Пондемоторные силы в различных конструкциях достигают значений $\sim 10^4 - 10^5$ Н.

Поверхности анода могут достичь только электроны, образованные из молекул остаточного газа, причем акт ионизации должен пройти в области, ограниченной поверхностями линии L_e и анода. В этом случае электрон по касательной траектории V_{e1} достигнет анода, а ион ускорится и пойдет по траектории V_i , имея вначале небольшой участок циклоиды, а в дальнейшем — по ларморовым радиусам $\pm r_i$ согласно величине B и ее направлению. До линии L_D r_i направлен в одну сторону, после L_D — в другую и, пересекая линию нейтрализующей сетки δ , движется по прямой, так как $B = 0$, но под некоторым углом к поверхности диска b . Ионы и электроны, полученные в актах ионизации за линией L_e от анода, не покинут область магнитного поля. Электро-

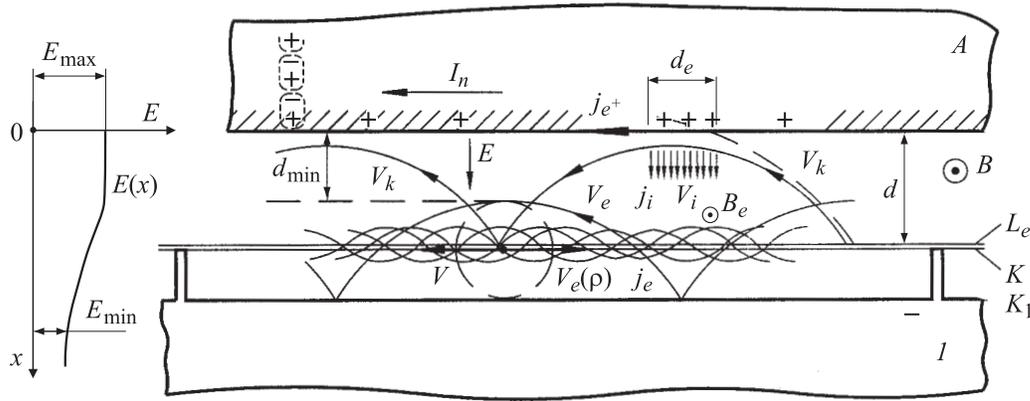


Рис. 4. Изменение напряженности электрического поля $E(x)$ в ускоряющем зазоре, V_k — траектории электронов, освобождающие ионы на длине пробега d_e в материале эмиссионной поверхности.

ны будут дрейфовать в области ЭО, а ионы будут колебаться вокруг линии L_e — плоскости тяжести объемного заряда, — компенсируя его величину. Вероятность таких событий мала и снижается с уменьшением остаточного давления газа. Электрон, рожденный в акте ионизации на расстоянии $d < d_1 - r_e$, может достичь поверхности анода и на длине радиационного пробега d_e произвести ионизацию приповерхностного слоя материала анода или его диэлектрического покрытия, освободив большое число ионов от валентных связей с массивом материала анода. Полученные ионы создадут импульс ионного тока. Энергия ионов будет равна потенциалу анода в момент их образования. Они проходят на своем пути равные векторные магнитные потенциалы $+B \cdot r_i(B)$ до линии L_D и $-B \cdot r_i(B)$ после линии ветвления L_D , траектории их будут перпендикулярны поверхности анода и диска δ в плоском варианте, но азимутально смещены вокруг оси X относительно точки рождения в ту или другую сторону, это зависит от направления тока в катушках 3 и 4.

К моменту времени t_2 достигнут максимальный потенциал анода U_m , достаточный для начала эмиссии ионов с анода, поверхностная плотность заряда в ЭО близка к поверхностной плотности заряда на аноде, образованной поляризацией поверхности материала максимально допустимой напряженностью поля $E_{\max} = U/d_e$. Начинают разрываться химические и прочие связи ионов с поверхностью анода. В первую очередь будут ускоряться ионы одновалентных атомов. К этому времени потенциал емкостного накопителя совершил работу по перемещению отрицательного заряда с поверхности анода и накоплению заряда в ЭО и в области дрейфа в магнитном поле. Величина энергии этой работы, носящей реактивный характер

$$W \approx Q_{\Sigma e} m \langle V \rangle^2 / 2e, \quad (17)$$

где $\langle V \rangle$ — средняя скорость электронов, которую можно считать равной трем вторым от дрейфовой.

На рис. 4 показано распределение напряженности электрического поля $E(x)$ в ускоряющем зазоре ИДМ.

Максимальное значение E_m примерно постоянно в промежутке $d_{\min} = d_e - r_e$ и монотонно падает, считая $\rho_e = \text{const}$ в ЭО до величины

$$E_{\min} = (G_a - G_e) / \epsilon_0, \quad (18)$$

Эта напряженность поля, которую можно считать постоянной, определяет распределение поля в области внутри катодов с учетом заряда электронов, поступившего с эмиссионной поверхности катода 2 и дрейфующего в магнитном поле между катодами 1, 2, созданного на фронте импульса. При высокой плотности заряда в ЭО траектории электронов вырождаются из классических циклоид в волнистые линии вокруг дрейфовой скорости V , так как распределение $E(x)$ в скрещенных полях $E \perp B$ неравномерно. Но положение плоскости центра тяжести заряда ЭО, результирующее значение циркулирующего тока не изменяются относительно линии катода 1 (эмиссионных центров) рождения свободных зарядов. Поэтому требуется достаточно точная юстировка поверхностей анода и катода, проходящих через линии L_a и L_k . При $d_1 \pm \Delta d$ на величину Δd будет размыта толщина ЭО согласно разбросу Δd по азимуту. Этим можно воспользоваться для обеспечения небольшого числа электронов, стартующих с азимутально выступающих неоднородностей кромок внешнего катода, траектории V_k (рис. 4). С увеличением E_{\max} они первыми достигнут поверхности анода и начнут ионизовывать поверхностный слой материала анода, имея максимальную скорость. На длине пробега d_e в материале они освободят большое число ионов, которые будут захвачены в ускорение. Коэффициент размножения K_i огромен: даже если 0.1% энергии eU электрона пойдет на разрыв химических связей, имеющих энергию в единицы eV, то $K_i > 10^3 - 10^4$, и в принципе, требуется очень малая доля потерь заряда ЭО. Таким образом, можно генерировать ионные пучки любого сорта, в том числе и однокомпонентные, например тяжелых металлов, соблюдая условия закона 3/2 (1).

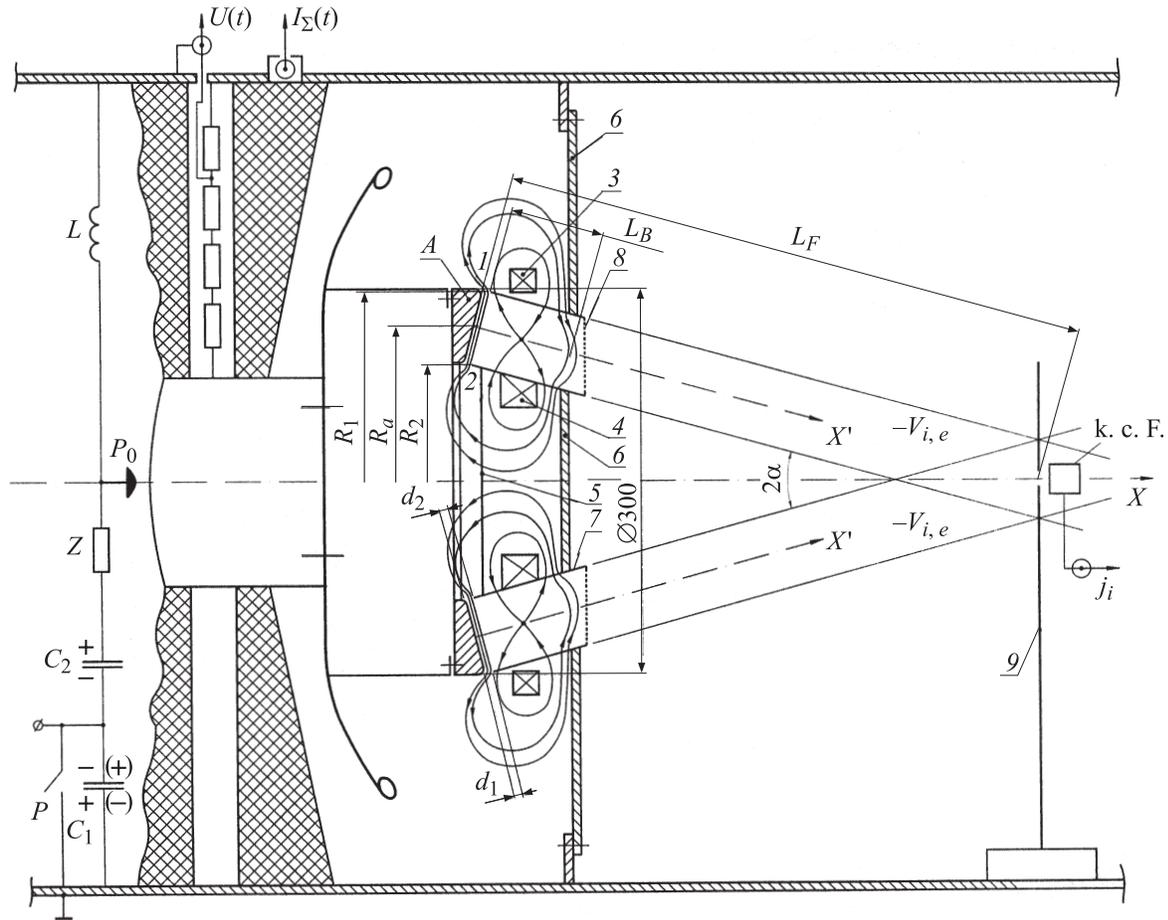


Рис. 5. Конусный ионный диод. 1–8 те же, что на рис. 1; 9 — экран для снятия автографа пучка; к.с.Ф. — коллимированный цилиндр Фарадея с магнитной отсечкой, L_F — фокусное расстояние; C_1 , C_2 — емкости плеч двойной формирующей линии; P , P_0 — основной и обостряющий разрядники; L — индуктивность в контуре заряда C_2 ; $U(t)$, $I_\Sigma(t)$ — делитель напряжения и пояс Роговского, измеряющий полный ток в схеме.

Появление ионного тока I_i создает падение напряжения на импедансе Z емкостного накопителя C , напряжение $U(t)$ перестает расти (рис. 2), и в соответствии с длительностью импульса напряжения генерируется импульс ионного тока. Если по каким-либо причинам ток с анода возрастает, то падение напряжения на импедансе Z уменьшает напряжение $U(t)$, и напряженность электрического поля в анод-катодном зазоре снижается. Увеличивается расстояние d_e за счет уменьшения ларморового радиуса r_e , так как $B = \text{const}$ и эмиссия с анода уменьшается и, наоборот, при уменьшении эмиссии напряжение $U(t)$ начнет возрастать. Появляется жесткая обратная связь через внутренний импеданс Z , что является главным условием устойчивости генерации ионного пучка и стабильной работы устройства в целом. Если компенсирующего заряда в области магнитного поля от линии L_k до L_D недостаточно, то на фронте ионного тока пучок будет расширяться, обеспечивая абляционную плазму с поверхности катодов, электроны которой, распространяясь по поверхностям линий B , будут компенсировать заряд ионов пучка. Проходя область

диска 6, ионы вновь попадают в область, где $B \rightarrow 0$, и требуется дополнительная компенсация объемного заряда плазмой с электрода 7 и сетки 8, так как ионы не увлекают замагниченные электроны за собой.

При появлении падения напряжения на импедансе Z максимальное напряжение на емкости анод-центр тяжести заряда в ЭО уменьшается, заряд ЭО и расстояние d_e не изменяются, но не выполняется условие „плоского конденсатора“ $UC = Q_e$ со стороны заряда в электронном облаке: при $Q_e = \text{const}$ уменьшение напряжения U должно вызывать уменьшение d_e , так как $C = \epsilon_0 S/d$. Уменьшение d_e невозможно из-за фундаментального закона сохранения потокоцепления (магнитного потока при $W = 1$)

$$LI = \psi, \quad (19)$$

где L — индуктивность витка с током I . В нашем случае I — ток заряда ЭО, движущегося со скоростью V , L — индуктивность кольца ЭО с учетом распределения плотности тока в ЭО, ψ — магнитный поток, образованный индукцией B_e и заключенный в „магнитной подушке“ между анодом и ЭО.

Систему анод–ЭО можно представить как „электронный резонатор“ (ЭР) [8] с емкостью C_e и индуктивностью L_e

$$C_e = \varepsilon_0 \pi (R_{k1}^2 - R_{k2}^2) / d_e, \quad L_e = \mu_0 d_e \ln \frac{R_1}{R_2}, \quad (20)$$

обладающий резонансной частотой и способный генерировать электромагнитное излучение с длиной волны

$$\omega_e = \frac{1}{\sqrt{L_e C_e}}, \quad \lambda = 2\pi c / \omega_e. \quad (21)$$

Примерно такая же частота $f_e = \omega_e / 2\pi$ наблюдается в экспериментах из-за наводок в цепи измерения напряжения $U(t)$ (рис. 5), где делитель напряжения U , обладающий объемными сопротивлениями $R_0 C_0 \approx RC$ не имеет частоту пропускания сигналов в гигагерцовом диапазоне длин волн, и модулирует сигнал $U(t)$ на частоте СВЧ-колебаний ЭР, что видно из приведенных ниже осциллограмм.

5. Экспериментальное исследование работы ИДМ

На рис. 5 представлен ИДМ в конусном исполнении с углом схождения $\alpha = 20^\circ$, имеющий размеры (в мм) $2R_1 = 282$, $2R_2 = 200$, $R_{k1} \sim 145$, $R_{k2} \sim 90$, зазоры (d_1, d_2) от 5 до 7, $L_B \sim 80$, геометрический фокус ионного пучка $L_F \sim 380$. В этой конструкции принято отношение ширины рабочей поверхности анода к среднему радиусу $(R_1 - R_2) / R_a = 41 / 241 \approx 0.17$. Анод имеет близкую к предельно допустимой площадь эмиссионной поверхности $S_a = 300 \text{ см}^2$ для заданного R_a , и трудно организовать электронный остов в области магнитного дрейфа. Выбор такой конструкции диода позволяет исследовать проблемы: искажения магнитного поля у поверхности анода из-за ослабленного скин-эффекта; компенсации ионного пучка в области магнитного дрейфа L_B из-за большого объема между электродами 1, 2. Такая конструкция ИДМ принята в связи с попыткой согласовать ускоритель „Темп“ [7] с выходным импедансом $Z \sim 10 \Omega$ при $U = 300 \text{ кВ}$ и ионный диод. Ускорители „Темп“ работают в двухимпульсном режиме, ионный диод с самоизоляцией. Для работы с ИДМ он был переведен в „классический вариант“: источник питания–генератор Маркса–двойная формирующая линия с электрической длиной $\sim 60 \text{ пс}$ –разделительный разрядник–ИДМ. Для создания магнитного поля использовался емкостной накопитель $C_B = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ с регулировкой напряжения на нем от 2 до 7 кВ. Коммутатор — ионитронный разрядник. Энергия накопителя при 7 кВ было достаточно для создания магнитного поля $\sim 0.8 \text{ Т}$ у поверхности анода на R_1 и до 1.2–1.4 Т на R_2 в зависимости от взаимного расположения катушек и анода. На рис. 5 взаимное расположение основных семи узлов ИДМ приведено в масштабе.

При принятом отношении $(R_1 - R_2) / R_a$ и аноде, изготовленном из дюралюминия с $\gamma \sim$ в 5 раз хуже, чем у чистого алюминия (большое содержание примесей

Zn, Mg), нарушалось условие (6) для хода силовых линий $B_1(r)$. Для устранения этого дефекта в теле анода на радиусе $\geq R_1$ в 3 мм от эмиссионной поверхности был выполнен кольцевой паз и размещено короткозамкнутое медное кольцо сечением 5 мм^2 , что позволило усилить демпфирование импульсного магнитного потока катушек 3, 4 и выполнить условие (6) хода поверхности силовых линий $B_1(r)$, $B_2(r)$ (рис. 1, b).

На рис. 6, a приведены осциллограммы напряжения $U(t)$ и плотности тока ионного пучка в фокусе. При напряжении на аноде 300 кВ скорость протонов $V_P = \sqrt{2eU/m_i} = 7.74 \cdot 10^6$, скорости ионов: углерода $V_{C^+} = 2.23 \cdot 10^6$, азота $V_N = 2.1 \cdot 10^6 \text{ м/с}$, кислорода $V_{O^+} = 1.9 \cdot 10^6$, алюминия $V_{Al} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ м/с}$.

Согласно закону 3/2, наибольшую плотность тока в ионном пучке должны обеспечить протоны, но их оказалось значительно меньше, чем ожидалось. Время пролета t_p протонами базы $L_F \sim 0.35 \text{ м}$ обеспечивало задержку сигнала с к.с.Ф. для протонов $\sim 45 \cdot 10^{-9}$ (что мы видим из осциллограмм), для углерода $\sim 156 \cdot 10^{-9}$, для Al $\sim 230 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. Привязка старта ионов с поверхности анода, относительно $U(t)$ указана стрелкой. Стрелкой указана привязка ионов различного сорта во времени к импульсу сигнала плотности тока с к.с.Ф. В этом режиме зазоры $d_1 = 6.3$, $d_2 = 7 \text{ мм}$, магнитное поле максимальное. Ускоритель работает в несогласованном режиме, ближе к режиму холостого хода. Эмиссионная поверхность анода выполнена на основе оксидного состава, включающего водород, углерод, азот и кислород. Примерно 15% площади занимали ребра алюминия между канавками с оксидным компаундом. Как в работе [1], так и здесь обнаружился пик двукратно ионизированных ионов углерода C^{++} , которые появляются при потенциале свыше 400 кВ на аноде. В зоне I, отмеченной кружком, когда из-за несогласованного режима вновь появился пик анодного напряжения, снова произошла генерация ионного пучка и время пролета протонов $\sim 180 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ соответствует энергии протонов $\sim 50\text{--}55 \text{ кВ}$.

На осциллограмме (рис. 6, a) развертка $40 \cdot 10^{-9}$, более чувствительная развертка ($4 \cdot 10^{-9} \text{ с/см}$) вершины импульса позволила оценить период и частоту СВЧ-колебаний, она оказалась примерно равной подсчитанной по (21). Фокусное пятно (след на экране 9) с равномерной плотностью ионного тока примерно соответствовало геометрическому фокусу $\varnothing 55 \text{ мм}$, окружено ореолом с достаточно быстрым спаданием плотности тока с $j_{i \text{ max}}$ до нуля $\sim 1/r^2$, где $r_0 > 28 \text{ мм}$ до $r_{\text{max}} \sim 75 \text{ мм}$. Оно характерно для всех ниже приведенных осциллограмм. Суммарный ионный ток был значительно меньше общего $I_\Sigma(t)$ с пояса Роговского. По нашим оценкам $\sim 30\%$ энергии шло в излучение СВЧ, которое выводилось из камеры через изолятор (рис. 5) и поглощалось в диэлектрике емкостного накопителя С. Но часть СВЧ-излучения контролировалась неоновыми детекторами — стеклянными баллонами с неоном низкого давления, стоящими у изолятора ввода питания катушек (на рис. 5 он не показан).

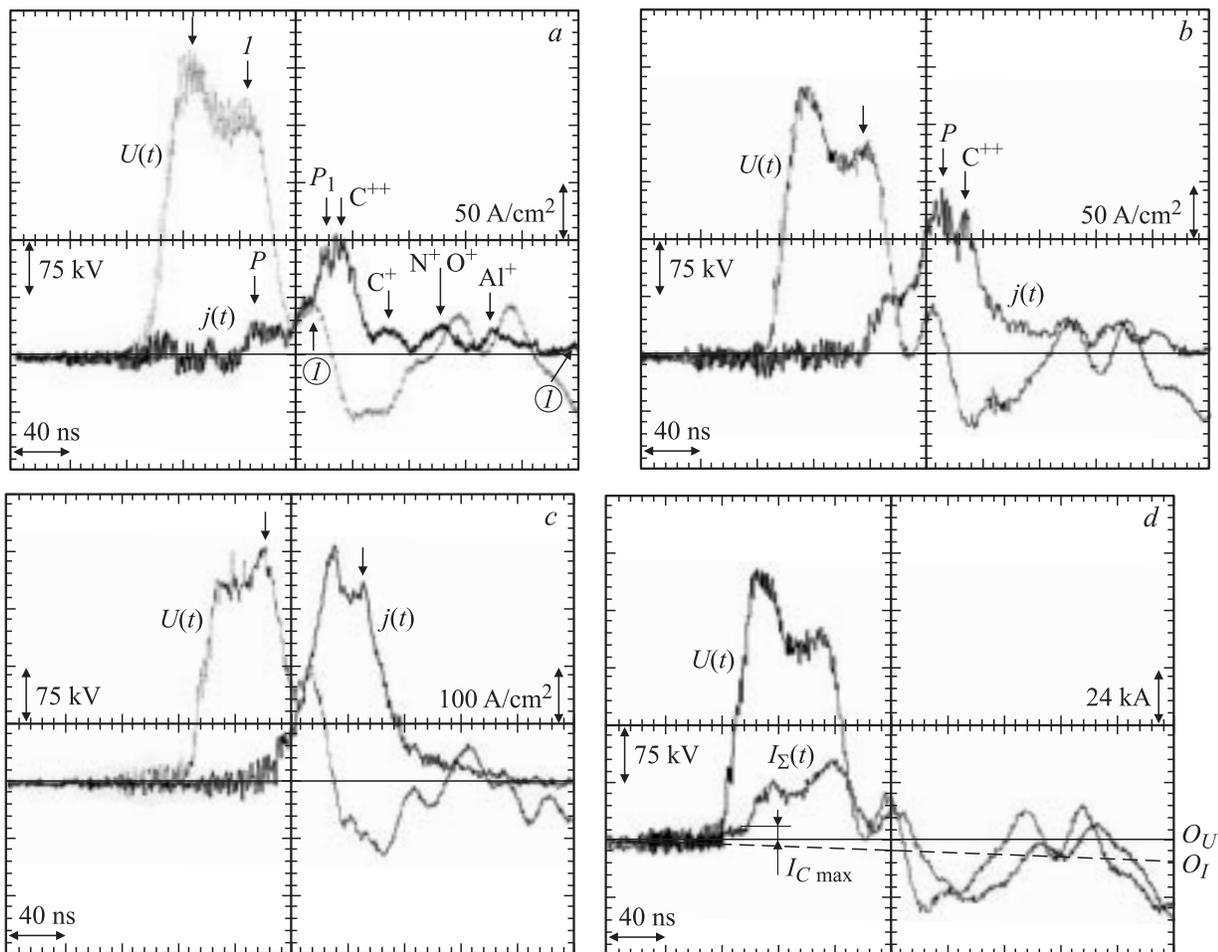


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на диоде $U(t)$, плотности ионного тока с к.с.Ф. и полного тока в различных режимах.

Такая форма импульса ионного тока (рис. 6, *a*) говорит о больших потерях протонов на фронте импульса из-за недостаточной компенсации пучка в области магнитного дрейфа L_B (рис. 5). Это означает, что неправильно шло создание электронного остова в области магнитного дрейфа, тяжелые ионы выталкивали протоны из пучка, и они оставляли полированные следы на поверхностях катодов 1, 2 (рис. 3, 4), пока не заполнилась область L_B электронами из абляционной плазмы. Ситуация значительно улучшилась, когда кромка катода 2 была выполнена в виде волнистой линии с перекрытием хода силовых линий в окрестности линии ветвления поля (рис. 6, *b*). На рис. 6, *c* приведена осциллограмма, на которой ионный ток пучка в фокусе составил $> 90\%$ от полного тока ускорителя, а эмиссионная поверхность катода 2 уже представляла собой „многолепестковый цветок“.

На рис. 6, *d* приведена осциллограмма напряжения и полного тока $I_\Sigma(t)$ ускорителя. Из-за малой постоянной времени пояса Роговского ось нуля тока смещена (пунктир), видна четкая работа ионного диода на последующих импульсах $U(t)$ положительной полярности, что позволяет судить о времени существования электронного облака.

Отрицательную полярность импульса полного тока можно объяснить тем, что из-за низкого вакуума $\sim 10^{-4}$ Торр, а в первую очередь, из абляционной плазмы с катодов, полученной в течение импульса происходила достаточно сильная компенсация объемного заряда электронного облака ионами, которые затем ускорялись в промежутке катод (с диэлектрического покрытия анода)–ЭО (анод). Отметим, что в согласованном режиме СВЧ-излучение практически исчезало. В режиме на рис. 6, *c* интеграл ионного тока с фокусного пятна приближался к полному току ускорителя $I_\Sigma(t)$, а в некоторых точках (в начале импульса $\Delta t \sim 20$ ns) был практически равен ему. Учитывая, что мы имеем дело с эмиссионной поверхностью, на которой имеется много дислокаций, центров усиления поля на неоднородностях, можно говорить об отрыве иона водорода за счет силы Кулона от основного массива материала анода, разрушении его, освобождении тяжелых ионов. Экспериментально замечено, что эмиссия с анода начинается, когда E в катод-анодном промежутке достигает $\sim 75 \cdot 10^6$ В/м $\pm 5\%$, независимо от абсолютных значений $U(t)$, B , d_1 , лишь бы их комбинация обеспечила указанную напряженность электрического поля. До этого момента времени напряжение $U(t)$ изменяется по за-

кону холостого хода. В природе нет водородсодержащих диэлектриков, электрическая прочность которых превышает $75 \cdot 10^6$ V/m в однородном плоскопараллельном поле, имеющих в своей основе углеродно-водородные связи. Применяемые диэлектрические покрытия водородсодержащих диэлектриков (полиэтилен, эпоксидные смолы) имеют примерно указанную выше электрическую прочность. Более высокую электрическую прочность имеют фторсодержащие диэлектрики типа тефлон, кремнеорганические смолы $\leq 120 \cdot 10^6$ V/m, слюда $\leq 300 \cdot 10^6$ V/m. В слюде содержится водород, но он связан в молекуле воды (кислород), а не с углеродом. При тефлонсодержащих покрытиях на аноде требуются напряженности электрического поля значительно выше, протоны в пучке отсутствуют, а эмиссия происходит за счет потерь электронов из ЭО на поверхности анода.

Тот факт, что увеличение зазора d_1 и магнитного поля всего на 20% от оптимальных значений выводит ускоритель в режим холостого хода с интенсивным СВЧ-излучением, дает основание говорить о „чисто“ ионном механизме инжекции протонов из водородсодержащих диэлектриков. Отметим, что составляющая электрического поля СВЧ-волны ортогональна колебаниям плотности заряда в ЭО и не может вызвать поверхностный пробой на поверхности диэлектрика, а только ослабляет или усиливает основное электрическое поле $E_0 = G_a/\epsilon_0$, т.е. модулирует его. Электронный резонатор возбуждается на основной СВЧ-волне типа ТМ, структура которой по E_{\sim} и B_{\sim} компланарна с электрическим и магнитным полями ЭР.

Если на расстоянии d_1 при наличии магнитного поля B обеспечить условие, что $E < 75 \cdot 10^6$ V/m, то ионный ток отсутствует, а ускоритель выходит на режим ХХ со всеми вытекающими из этого последствиями (перекрытие изолятора), что впервые было продемонстрировано в [1].

Заключение

Рассмотренные выше основные физические процессы в ионном диоде с внешним магнитным полем дают основания полагать, что при соблюдении вышеперечисленных условий обеспечения токовой нейтрализации ионного пучка медленными электронами сопровождения можно получить высокое преобразование энергии емкостного накопителя в кинетическую энергию ионного пучка не хуже, чем у электронных диодов, доставить и использовать кинетическую энергию ионного пучка для требуемых целей, в том числе и для инициирования реакций термоядерного синтеза. Сорт, элементный состав ионного пучка определяются только параметрами используемых материалов в эмиссионной поверхности анода. Достижимые значения напряженности электрического поля в ускоряющем зазоре позволяют говорить о механизме „чисто“ ионной эмиссии, по крайней мере, для водородсодержащих покрытий анода, а за счет „потери“ незначительной части электронов из

ЭО обеспечивать генерацию ионов любого сорта и их монохроматичность согласно закону $3/2$, естественно, при соответствующих потенциалах на аноде и величинах магнитного поля в ускоряющем зазоре. При этом, чем лучше вакуумные условия в ИДМ, тем чище элементный состав генерируемого пучка.

Авторы благодарны В.И. Гусельникову, В.А. Макееву, В.В. Пряжину за помощь в работе и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] *Лопатин В.С., Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г.* и др. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 70–75.
- [2] *Bitteker L.J., Wood B.P., Davis H.A.* et al. // Rev. Sci. Instr. 2000. Vol. 71 (10). P. 3677–3689.
- [3] *Johnson D.J., Quintenz J.P., and Sweeney M.A.* // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57 (3). P. 794–799.
- [4] *Nakagawa Y., Arioshi T.* // Rev. Sci. Instr. 1990. Vol. 61 (1). P. 529–531.
- [5] *Mekay P.E., Bieg K.W., Olson R.E.* et al. // Rev. Sci. Instr. 1990. Vol. 61 (1). P. 559–568.
- [6] *Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И.* и др. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 130–134.
- [7] *Ремнев Г.Е., Исаков И.Ф., Опекунов М.С., Матвиенко В.М.* // Изв. вузов. Физика. 1998. № 4. С. 92–116.
- [8] *Фурман Э.Г.* СВЧ-приборы с виртуальным катодом. Томск: Изд. ТПУ, 1999. 52 с.