

C-794

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



28/к-74
=

4246/2-74

P9 - 8038

А.Д.Степанов, Г.А.Иванов, И.И.Голубев

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ
КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

1974

ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

Р9 - 8038

А.Д.Степанов, Г.А.Иванов, И.И.Голубев

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ
КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

Направлено в ЖТФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

ВВЕДЕНИЕ

Известны работы /1-2/, в которых предложен метод получения вращающегося электронного пучка кольцевого сечения путем применения в области дрейфа трубчатого электронного пучка резко спадающего, меняющего направление магнитного поля. К сожалению, временная длина получаемых таким способом электронных сгустков приблизительно равна длительности питающего импульса, что приводит к большим продольным размерам сгустка.

Целью настоящей работы является получение электронных сгустков длиной $l \leq 5$ см для исследования процессов взаимодействия одиночного электронного сгустка с ускоряющим зазором коаксиального резонатора модели коллективного ускорителя /3/. Поскольку сгусток должен быть одиночным, отпадают методы модулирования пучка по плотности с помощью высокочастотных систем.

В качестве источника электронного пучка была выбрана электронная пушка магнетронного типа, так как здесь можно получить большую плотность электронов в пучке. Как показал Пиз /4/, пучки этого класса обеспечивают ток заданной силы в заданном внешнем поле при минимальной толщине, возможной при стабильной и однородной конфигурации, т.е. в области катода получается максимальная плотность азимутального тока.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки приведена на рис. 1. В пучке применялись цилиндрические и конусные катоды 4 из танта-

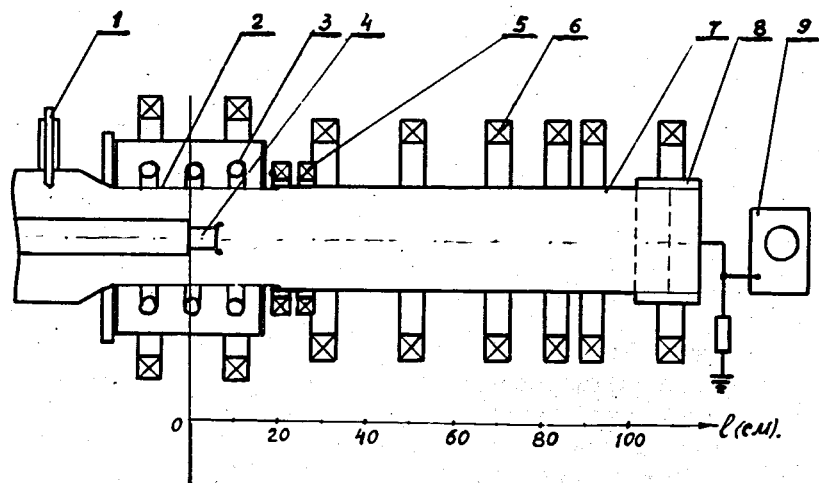


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - зонд для регистрации ВЧ-колебаний; 2 - анод из танталовой фольги толщиной $\approx 0,15$ мм; 3 - витки переменного магнитного поля; 4 - катод; 5 - катушки для создания резкого перепада магнитного поля; 6 - катушки ведущего магнитного поля; 7 - пространство дрейфа; 8 - электростатический анализатор; 9 - измеритель временных интервалов И2-7.

ловой фольги толщиной $\delta = 0,1$ мм. Диаметры D катодов были 25, 40, 44, 65 мм. Длина катодов $h = 70$ мм. Аналогичных размеров были и оксидные катоды. В качестве анода 2 служил медный цилиндр $D = 100$ мм при работе с постоянным магнитным полем в области катода, или цилиндр из танталовой фольги $\delta = 0,1$ мм при переменном магнитном поле.

Ведущее магнитное поле создавалось катушками 6 со средним радиусом $\bar{r} = 16$ см. Скачок магнитного поля создавался катушками 5 с $\bar{r} = 7$ см. Переменное магнитное поле создавалось спиральной катушкой 3 с $\bar{r} = 6$ см.

Емкость катод - анод пушки имела величину $C = 150$ пФ, поэтому для получения импульса высокого напряжения $U_a \div 25$ кВ с крутым фронтом нарастания

$/\tau = 17$ нсек/ брали кабельную линию с низким волновым сопротивлением $Z = 10$ Ом. Длительность импульса $\tau = 200$ нсек. Для получения импульса $\tau = 2,5$ мсек $\tau = 0,4$ мсек использовалась искусственная линия с $Z = 75$ Ом. Более длинные импульсы получали с помощью модуляторных ламп ГМИ-90.

Для изменения распределения магнитного поля вдоль пушки, катушки питались от трех отдельных источников, а катушки, создающие скачок магнитного поля, можно было двигать по оси Z . Запуск всех импульсных схем был синхронизован с напряжением сети, чтобы избежать явлений, связанных с изменением фазы тока накала катода и т.д.

В качестве регистрирующего устройства применялся электростатический анализатор 8, состоящий из двух вольфрамовых сеток и коллектора. Первая сетка со стороны пучка находилась под потенциалом земли, на вторую подавался отрицательный задерживающий потенциал. Сигнал с коллектора подавался на измеритель временных интервалов И2-7 при работе с короткими сгустками электронов $t < 20$ нсек/ или на осциллограф С1-15 при работе с протяженным пучком.

Высокочастотные колебания регистрировались с помощью штыревых зондов 1, сигнал которых подавался на приемник П-5-1 или через широкополосный усилитель УЗ-11 на осциллограф С1-31. При фотографировании пучка применялся коллектор из медной фольги, к которой прикладывалась фотобумага и получали, таким образом, рентгеновское изображение поперечного сечения пучка. Аналогичным образом внутрь трубы дрейфа, вдоль пучка вводилась "шаговая" пластина из металла достаточной толщины с фотобумагой по обеим сторонам для измерения величины шага траектории электронов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился на установке, схема которой приведена на рис. 1. Отрицательный импульс высокого напряжения (U_a) подавался на катод. Известно $/5/$, что

для любой величины $U_a = U_c$ существует критическое магнитное поле $B = B_c$, при котором происходит отсечка анодного тока. В результате при $B \geq B_c$ или $U_a \leq U_c$ вокруг катода образуется облако пространственного заряда с радиусом внешней границы r_x /радиус Хелла/. Величины U_a , B и r_x связаны следующими соотношениями:

$$u_a = \frac{eB^2 r_a^2}{8m} \left[1 - \left(\frac{r_k}{r_a} \right)^2 \right]^2 \quad /1/$$

$$u_a = \frac{eB^2 r_x^2}{8m} \left(1 - \frac{r_k^2}{r_x^2} \right) \left[\left(1 + 2 \ln \frac{r_a}{r_x} \right) \left(1 - \frac{r_k^2}{r_x^2} \right) + \left(4 \ln \frac{r_a}{r_x} \right) \frac{r_k^2}{r_x^2} \right], \quad /2/$$

где r_k , r_a - соответственно радиусы катода и анода; e , m - соответственно заряд и масса электрона.

При этом электроны могут либо вращаться вокруг катода /однопоточный режим/ /5/, либо возвращаться на катод /двухпоточный режим/. Может осуществляться и так называемый бидромический режим /6/, при котором на определенных радиусах образуются слои пространственного заряда - виртуальные катоды ($r=0$, $\dot{r}=0$) или виртуальные квазикатоды ($\dot{r}=0$).

Из /2/ видно, что если U_a или B менять во времени, то и радиус электронного облака будет меняться. Создавая условия для вывода электронов в пространство дрейфа только с определенного радиуса r_0 , можно получить короткий электронный сгусток. Например, при двухпоточном режиме работы в области катода величину магнитного поля (B) можно подобрать такой, что все электроны с энергией, меньшей заданной ($W < W_0$), возвратятся на катод. Электроны с $W > W_0$ попадут на анод. Если имеется сила F_z , действующая на электроны по оси z , то электроны с энергией $W \approx W_0$, соответствующие напряжению $U_a = U_0$, пройдут в пространство дрейфа.

При однопоточном режиме работы на конце катода устанавливается специальный диск /экран/ с радиусом

$r \leq r_0$, на который и попадут электроны с энергией $W < W_0$, т.е. с радиусом $r < r_0$. Можно идти также путем создания осевой силы F_z , зависящей от радиуса $F_z = F'(z)$, или создавать область минимума магнитного поля /см. рис. 4/, чтобы электроны с энергией, больше заданной, попали на стенки трубы дрейфа.

Пользуясь уравнением /2/, оценим длительность сгустка, которую можно получить. В нашем эксперименте создавались условия прохождения электронов с $3 \leq \beta \leq 3,5$ /см/ /двухпоточный режим/.

Если $b_c = 200$ Гс, $U_a \approx t$, то при $\dot{U}_a = 10^{12}$ в/сек радиус электронного облака изменится с 3 до 3,5 см за время $t \approx 3 \cdot 10^{-9}$ сек. Приблизительно это и будет длительность сгустка. Если $U_a \approx 10$ кВ, $B_z \approx t$, то такой же длительности сгустка соответствует $\dot{B} \approx 10^{10}$ Гс/сек. В процессе вывода электронов в пространство дрейфа их продольную скорость (V_z) путем подбора геометрии полей можно получить $\approx 10^7$ м/сек. Из приведенных оценок видно, что, обеспечив $\dot{U} \approx 10^{13}$ В/сек или $\dot{B} \approx 4 \cdot 10^{10}$ Гс/сек, можно получить сгусток длительностью $t \leq 10^{-9}$ сек, что соответствует длине сгустка $l \leq 1$ см.

Плотность заряда (ρ) в сгустке приблизительно будет равна Бриллюэновской

$$\rho = \frac{\epsilon_0 e B^2}{2m} \left(1 + \frac{r_k^4}{r_a^4} \right). \quad /3/$$

Из /1/ и /3/ видно, что при катоде достаточно большого диаметра можно получать сгустки с большой плотностью заряда. В нашем эксперименте $r_a = 5$ см; $r_k = 2,2$ см для электронов с энергией, соответствующей $U_a = 10$ кВ. Из /1/ и /3/ получим:

$$B_c = 200 \text{ Гс}, \quad \rho = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Кул/м}^3.$$

При получении сгустка путем одновременного изменения величины U_a и B_z можно осуществить азимутальное ускорение электронного облака в области катода. Чтобы

показать это, рассмотрим уравнения движения электрона в скрещенных полях, зависящие от времени:

$$\ddot{r} - r \dot{\theta}^2 = \frac{e}{m} E_r + \frac{e}{m} r \dot{\theta} B_z, \quad /4/$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} (r^2 \dot{\theta}) = \frac{e}{m} E_\theta - \frac{e}{m} \dot{r} B_z, \quad /5/$$

где E_r , E_θ - радиальная и азимутальная компоненты электрического поля.

Зададим закон изменения магнитного поля (B_z) в следующем виде:

$$B(t) = B_1 f(t) + B_0$$

$$B_1 f(t) \geq 0; \quad f(t)|_{t=0} = 0.$$

Считая, что в статическом состоянии устанавливается режим Бриллюэна^{/5/} и что B_z не зависит от радиуса, имеем:

$$E_\theta = -\frac{r}{2} \frac{dB_z}{dt}.$$

С учетом того, что при $t=0$, $r=r_k$, решение уравнения /5/ будет иметь вид:

$$\dot{\theta} = -\frac{e B_0}{m} \left(1 - \frac{r_k^2}{r^2}\right) - \frac{e}{2m} B_1 f(t). \quad /6/$$

Подставив /6/ в /4/ и наложив условие движения электрона по окружности $\dot{r} \equiv 0$ /режим Бриллюэна/, получим требуемый закон изменения электрического поля.

$$E_z(t) = \frac{r e B_1^2}{m} \left[f(t) + \frac{B_0}{B_1} \right] - \frac{r e B_0^2}{4m} \frac{r_k^4}{r^4}. \quad /7/$$

Из /7/ видно, что функция изменения электрического поля должна быть квадратом функции изменения магнитного поля. Тогда в области катода можно сформировать

ускоренное в азимутальном направлении электронное облако и затем, приложив импульс силы в продольном направлении, вывести его в пространство дрейфа.

Продольная сила (F_z) на электроны создавалась следующими способами:

1. За счет осевой компоненты электрического поля (E_z) -/анод и катод конусные/.

2. За счет радиальной компоненты магнитного поля (B_z) в области катода.

Для уменьшения продольных размеров сгустка в области дрейфа применяли следующие конфигурации магнитных полей:

1. Адиабатически растущее вдоль оси /кривая б, рис. 4/.

2. Резко растущее вдоль оси /кривая а, рис. 5/.

3. Резко падающее со сменой знака /кривая б, рис. 5/. Расчет требуемого перепада производился по данным работы /7/.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

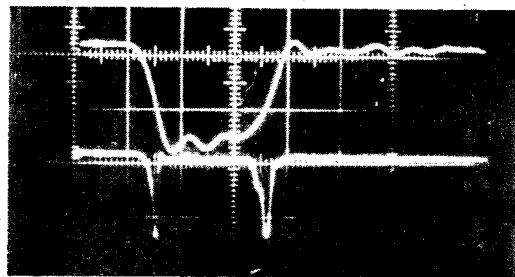
Сначала измерения проводились при сравнительно медленном изменении во времени электрического или магнитного поля.

На рис. 2а приведена осциллограмма изменения высокого напряжения U_a на катоде /верхний луч/ и импульс электронного тока на коллекторе /нижний луч/.

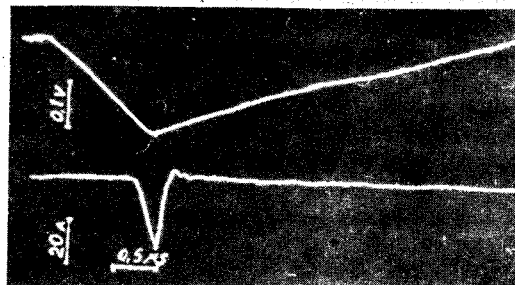
На рис. 2б приведена осциллограмма изменения магнитного поля в области катода /верхний луч/ и импульс тока на коллекторе /нижний луч/.

Из этих осциллограмм видно, что магнитное поле меняется гораздо медленнее электрического, но импульсы тока на коллекторе имеют почти равную длительность, т.е. радиус электронного облака сильнее зависит от магнитного поля, как и следует из соотношения /2/.

На рис. 3а показан импульс тока электронов на коллекторе при быстром изменении электрического поля в области катода, за счет крутого фронта импульса напряжения / $\dot{U}_a = 10^{12}$ В/сек/. Зная длительность им-



а



б

Рис. 2а - осциллограмма импульса высокого напряжения $u_a = 20$ кВ /верхний луч/ и тока коллектора 20 а/дел /нижний луч/, скорость развертки 1 мксек/дел. б/ импульс индукционного датчика магнитного поля 0,1 В 40 Гс /верхний луч/ и импульс коллектора /нижний луч/.

пульса тока (t) на коллекторе, его величину /или величину заряда сгустка/ и скорость электронов, можно определить длину сгустка (ℓ) и плотность электронов в нем.

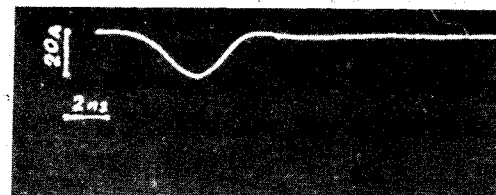
Конструкция коллектора позволила получить постоянную разрешения измерительной цепи $\tau = 0,5 \cdot 10^{-9}$ сек, что накладывает ограничение на минимальную величину t , которую можно измерить. Из рис. 3а видно, что $t \approx 4 \cdot 10^{-9}$ сек.

Нужно также учесть, что при влете сгустка в пространство сетка - коллектор анализатора создается наведенный ток, поэтому

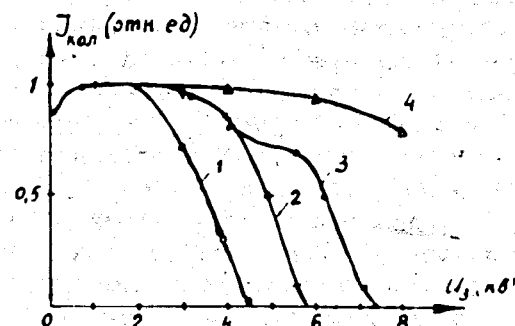
$$\ell = v_z (t - 3\tau) - d, \quad /8/$$

где d - расстояние между сеткой и коллектором, равно 4 см.

Задавая величиной продольной скорости $v_z = 3,7 \cdot 10^7$ м/сек, что соответствует продольной энергии электронов 4 кэВ, из /4/ определим, что $\ell \approx 5$ см.



а



б

Рис. 3а - осциллограмма тока коллектора при следующих параметрах импульса высокого напряжения: амплитуда: $u_a = 17$ кВ, длина переднего фронта $t_f = 17$ нсек; б - зависимость тока коллектора /отн. ед./ от величины задерживающего потенциала на сетке анализатора при различных u_a и токе накала I_H ; 1 - $u_a = 4$ кВ; $I_H = 650$ А; 2 - $u_a = 6,6$ кВ, $I_H = 600$ А; 3 - $u_a = 6,5$ кВ, $I_H = 710$ А; 4 - $u_a = 6,5$ кВ, $I_H = 730$ А.

Величина заряда Q сгустка определялась по напряжению, создаваемому зарядом на известной емкости. Измеренная величина $Q \approx 0,4 \cdot 10^{-8}$ Кл, что соответствует $N \approx 2,5 \cdot 10^{10}$, N - число электронов в сгустке.

Определив величину объема сгустка, найдем плотность заряда ρ . При вышеуказанных параметрах $\rho = 0,8 \cdot 10^{-4}$ Кл/м³, что хорошо согласуется с /3/. Для получения сгустков длиной $\ell \leq 5$ см при $v_z > 3,7 \cdot 10^7$ м/сек,

применяли дополнительное сокращение продольных размеров сгустка в пространстве дрейфа за счет магнитного сжатия.

На рис. 4 и 5 приведены фотографии поперечного сечения пучка и соответствующие кривые магнитного поля $B_z(z)$, откуда можно сделать вывод о том, что при "плавном" нарастании магнитного поля происходит двумерное сжатие сгустка /пог и z /, а при резком росте и при резком перепаде с переменной знака (B_z), /см. рис. 5 кривые а и б соответственно/ происходит одномерное сжатие размера сгустка /продольное/, т.е. наиболее эффективное сокращение продольного размера пучка /за счет перехода продольной скорости в азимутальную/ достигается при "скачке" магнитного поля.

Уменьшение продольной скорости электронов определялось по величине задержки импульса тока на коллекторе. Изменение B_z , соответствующее переходу от кривой а рис. 4, к кривой а рис. 5 дает величину задержки, равную 5 нсек. Начальная продольная энергия равна 10 кВ. Из этих данных в грубом приближении /пренебрегая кулоновским взаимодействием/ можно оценить, что продольный размер сгустка уменьшался в 3 раза. Наиболее эффективное преобразование продольной скорости в поперечную происходит при "скачке" B_z со сменой знака /см. рис. 5 кривая б/.

Это подтверждается тем, что после прохождения такого "скачка" электроны отражались от магнитной пробки с зеркальным отношением, равным 2. Однако эффективность прохождения электронов при этом составляет всего 50%, в то время как в остальных случаях сгусток проходил почти без потерь.

Измерения интенсивности рентгеновского излучения сцинтилляционным счетчиком в эксперименте по получению сгустка с предварительным азимутальным ускорением показали, что эффект ускорения намного меньше ожидаемого. Это можно объяснить следующими причинами:

1. Недостаточное время существования электронов в области ускорения из-за наличия аксиального дрейфа электронов.

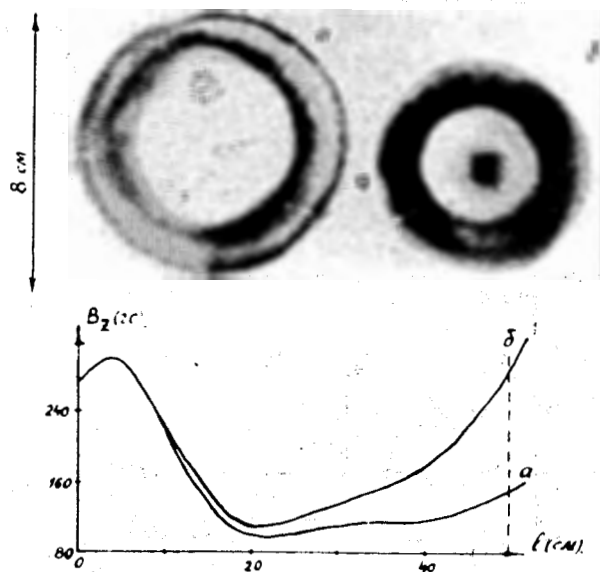


Рис. 4. Фото поперечного сечения пучка и соответствующие кривые магнитного поля (B_z). $U_a = 21$ кВ. Штриховой линией показано место установки кассеты.

2. Неустойчивость бриллуэновского состояния в начальном /статическом/ режиме.

3. Недостаточно точное соответствие между имеющимся и требуемым изменением величины $E_z(t)$.

Следует заметить, что предложенный нами механизм образования сгустка электронов не учитывает ряда факторов, на которые указывают эффекты, наблюдавшиеся в экспериментах:

1. На рис. 3б приведены кривые зависимости тока коллектора от потенциала задержки при различных величинах тока накала катода и высокого напряжения на катоде, откуда видно, что при больших токах эмиссии катода продольная энергия электронов может превышать величину, соответствующую приложенному напряжению.

К сожалению, полученные кривые задержки не дают количественной информации о разбросе скоростей элект-

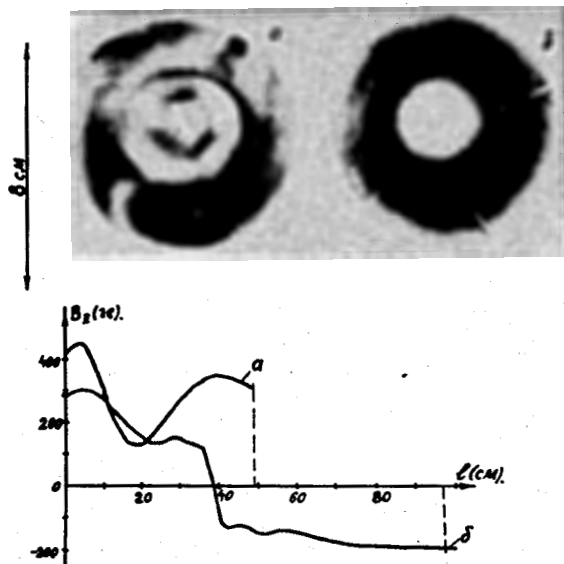


Рис. 5. Фото поперечного сечения пучка и соответствующие кривые магнитного поля (B_z). $u_a = 21$ кВ. Штриховой линией показано место установки кассеты.

ронов в сгустке из-за наличия магнитного поля, поперечной составляющей скорости электронов, эффекта вторичной эмиссии и т.д.

2. При $V > V_c$ продольный ток наблюдался при цилиндрическом аноде и катоде с экранами на торцах катода, т.е. продольный дрейф электронов существует даже без создания специальной осевой силы F_z . Аналогичный эффект в непрерывном режиме работы наблюдал Хирш^{9/} и объяснил его возникновением волн пространственного заряда.

3. Высокочастотные измерения показали наличие спектра шумов с максимумами на частотах $f = 43; 55; 84,3; 126$ МГц. Измерения проводились в диапазоне от 28 до 150 МГц.

Интенсивность шумов зависит от наклона магнитного поля в области катода и величины тока его эмиссии и связана с эффектами обратной бомбардировки катода и флуктуациями электронного тока.

Наличие "скачка" магнитного поля также приводило к возрастанию амплитуды шумов. При этом наблюдался эффект нагрева катода электронами, отразившимися от магнитного зеркала, что еще раз подтверждает наличие электронов, энергия которых превышает энергию, соответствующую максимальному приложенному напряжению.

4. На фото /рис. 4/ видны слои пространственного заряда, теория образования которых излагалась многими авторами /4,6/, но обнаружить их в аналогичных устройствах не удавалось, очевидно, из-за того, что не выполнялось условие

$$\frac{\pi}{\omega_c} \ll t_k, \quad /9/$$

где $\omega_c = \frac{e}{m} B$ - циклотронная частота, t_k - время нахождения электрона в области катода. Обычно длина катода (h) таких пушек мала, а величина продольной составляющей электрического поля велика, поэтому величина t_k мала и условие /3/ не выполняется. У нас же h достаточно велика, а E_z мала. Даже при конечной скорости в области катода $v_z = 2.10^7$ м/сек получим $t_k = 3.10^{-9}$ сек, в то время как $\pi/\omega_c = 6.10^{-10}$ сек.

При конусном аноде со средним диаметром 15 см и однородном магнитном поле $B_z = 2V_c$ наблюдалось три слоя пространственного заряда. Увеличение тока эмиссии /оксидный катод/ или наличие обратной бомбардировки катода приводит к "размытию" слоев.

5. При достаточно быстром изменении u_a импульс тока сгустка имеет величину даже большую, чем в установившемся режиме ($u_a = \text{Const}, B = \text{Const}$). Аналогичный эффект наблюдался и в экспериментах по получению сгустка с предварительным азимутальным ускорением электронного облака в области катода. В первом случае это, очевидно, связано с тем, что ток эмиссии ведет себя во времени как емкостный ток /8/, а во втором - возможно, улучшаются условия вывода электронов в пространстве дрейфа, но механизм эффекта не ясен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные результаты эксперимента указывают на то, что предложенный нами механизм образования сгустка, в основном является верным, но такие эффекты, как: наличие высокочастотных шумов, аномальная величина тока сгустка при $V = V(t)$ или $u_a = u(t)$, наличие высокоэнергетических электронов и т.д. свидетельствуют о том, что механизм образования сгустка является более сложным. Отсюда следует вывод: с помощью предложенной методики можно получить электронный сгусток длительностью $t < 10^{-9}$ сек при продольной скорости в области катода $v_z < 2 \cdot 10^7$ м/сек, т.е. длина сгустка $l < 2$ см. В области дрейфа с помощью скачка магнитного поля можно сократить продольный размер сгустка в 2-3 раза, если этому не препятствуют кулоновские силы. При работе с большим анодным напряжением и соответственно большим магнитным полем можно получить достаточно плотный сгусток. /Например, при $u_a \div 300$ кВ, $V \div 1000$ Гс получим, согласно /3/, $\rho = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^3$, т.е. $N = 10^{13}$. Следует учесть, что в простейшем рассмотрении при работе в режиме $V = \text{Const}$, $u_a = u(t)$ в пространстве дрейфа возможен эффект дополнительной группировки электронов /аналогично клистрону/. Поэтому при исследовании взаимодействия сгустка с резонатором зазор последнего лучше располагать в месте фокуса группировки.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ОНМУ, принимавшим активное участие в конструировании, изготовлении и сборке узлов установки: Л.В.Светову, А.А.Кузнецову, И.Н.Судакову, Ю.И.Галкину, Е.Б.Титову.

Литература

1. M.Friedman. Phys.Rev.Lett., vol. 25, No. 9, 567, 1972.
2. М.Л.Левин, А.Л.Минц. Доклады АН СССР, /сер. матем. и физ./, т. 204, 840 /1972/.
3. В.И.Векслер, В.П.Саранцев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-34402, Дубна, 1968.

4. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями, гл. 3, стр. 127, ИЛ, Москва, 1961.
5. Теория магнетрона /по Бриллюэну/. Сборник переводов. Изд. "Сов. радио", 1946.
6. В.Е.Белов, П.В.Родыгин. Изд-во высш. уч. заведений "Радиофизика", т. 4, 562, 1967.
7. M.Friedman. Plasma Phys., vol. 14, No. 12, 207, 1972.
8. И.В.Лебедев. "Электроника сверхвысоких частот", гл. , Москва, 1960.
9. E.H.Hirsch. Int. j. Electronics, vol. 22, No. 6, 591, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июня 1974 года.