

**В.Г.Сапогин**

**Р.С.Холошенко**

**М.Ирганг**

**ГРАДИЕНТНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ИНЖЕКТОР  
АВТОЭМИССИОННОГО КАТОДА  
С УГЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ**

Научно-методическое пособие

**Таганрог 2017**

УДК 621.38

Сапогин В.Г., Холошенко Р.С., Ирганг М. Градиентный электронный инжектор автоэмиссионного катода с угловой апертурой: Научно-методическое пособие. – Таганрог: Издатель Ступин А.Н., 2017. – 44 с.

В брошюре представлена элементарная теория работы градиентного электронного инжектора автоэмиссионного катода с угловой апертурой. Выяснено существование двух режимов вывода зарядов из инжектора в вакуум. Исследован эффект формирования зарядового кластера при выводе электронной шубы с поверхности катода в вакуум. Предложена схема вакуумного накопителя зарядов с апертурным инжектором. Приводятся оценки физических параметров зарядовых кластеров, следующие из теории, в сантиметровом диапазоне размеров. Полученные значения сравниваются с экспериментами Шоулдерса. Обсуждаются новые направления научно-технических исследований автоэлектронных инжекторов. Полученные результаты представляют интерес для решения проблемы создания высокоэффективных автоэмиссионных катодов нового поколения.

Для научных работников, преподавателей университетов и высших технических учебных заведений, аспирантов и магистров технического направления 210100 – электроника и микроэлектроника.

Табл. 1. Ил. 17. Библиогр. 21 назв.

#### **Рецензенты:**

Директор института высоких технологий и пьезотехники, доктор технических наук, профессор РИА **Панич А.Е.**;

Советник ректората ДГТУ, заведующий кафедрой «Информационные системы и радиотехника», доктор технических наук, профессор **Прокопенко Н.Н.**

**ISBN 978-5-9909129-9-1**

**© В.Г.Сапогин, Р.С.Холошенко, М.Ирганг, 2017**

## Введение

Вакуумная электроника возникла после создания широкого класса электровакуумных ламповых приборов. Они работали только тогда, когда включалось напряжение накала, которое создавало косвенный или прямой нагрев катода. Для появления электронов в межэлектродном промежутке катоды ламп нужно было нагревать до температуры порядка  $2000^{\circ}\text{C}$ . Позднее придумали оксидные катоды косвенного накала, которые позволили снизить температуру нагрева катода до  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Для создания тока между катодом и анодом, находящихся на миллиметровых расстояниях друг от друга при напряжениях до киловольта, требовалось генерировать электроны из отрицательно заряженного катода, применяя явление термоэлектронной эмиссии. Физика появления зарядов у поверхности катода проста и понятна. Для того, чтобы электрон вышел из металла, необходимо сообщить ему работу, которая называлась работой выхода. Разные металлы имели разную работу выхода. Наиболее распространённый металл, устанавливаемый в катоде, вольфрам имел работу выхода около 4 эВ.

При подаче напряжения между анодом и катодом на катоде возникает «шуба электронов», толщина которой зависит от приложенного анодного напряжения и изменяется при холодном катоде от микронов до десятка микрон. Когда газ электронов подогревают за счёт накала катода, то толщина шубы увеличивается до размера от 1 мм до 5 мм и выше. Причина раздувания электронного облака и появления термоэлектронной эмиссии нагрев металлического катода до высокой температуры.

Для выведения электронов на большие расстояния от катода его снабжают дополнительными электродами. Среди них известны: электронно-оптическая пушка Пирса, за ним стоит фокусирующий электрод, за ним стоит ускоряющий электрод, а далее система формирования электронного пучка. Все они используют неоднородное распределение напряжённости электрического поля, создаваемое электродами, которое позволяет собрать расходящийся цилиндрический электронный пучок (в нём сильно проявляют себя кулоновские силы расталкивания) и сфокусировать его на люминофор экрана электронно-лучевой пушки, либо другого электронного прибора. Часто в дополнительной системе формирования электронного пучка используется осесимметричное неоднородное магнитное поле.

К настоящему времени уже отработаны технологии вывода цилиндрического и планарных пучков в различных электронных приборах. Часто эти системы называют электронными пушками. Пушки формируют определённые токи пучка, которые изменяются от 1 мкА до 1 мА в электронно-лучевых и телевизионных трубках. В нашем университете, по идее Г.В.Дудко, разработаны пушки, транспортирующие ленточный пучок площадью  $50\text{ мм}^2$  с током до 100 мА для полировки стекла. Вследствие этого, эти системы следуют назвать низкотоковыми.

Заметим, что применяемый иногда термин «слаботочный пучок» не может иметь отношение к слабому току пучка, поскольку ток в термине превращается в некоторую слабую точность, не имеющую под собой никаких оснований.

Когда исследовались схемы для вывода высокотоковых пучков (при исследовании возможностей создания пучкового оружия), то кулоновское взаимодействие между зарядами пучка уже было таким сильным, что предложенные решения для геометрической оптики были пересмотрены и предложены другие, которые рассчитывались совсем из других принципов взаимодействия электронов в поле пучка. Нам такие схемы вывода не известны. Они, по-видимому, были засекречены. Удалось ли их вообще построить, тоже неизвестно. Поговаривали, что идея создания пучкового оружия пришла от американцев и была дезинформацией, на исследование которой СССР бесполезно потратила немало средств.

Единственное, что нам было известно, так это то, что для проверки американской дезинформации по созданию пучкового оружия военными был создан Московский радиотехнический институт (МРТИ). Об этом рассказал человек, который там работал несколько лет. Он сам создал мощную электронную пушку. При помощи её он попытался вывести высокотоковый электронный пучок в атмосферу. У него ничего не получилось. Вылетающий пучок моментально превращался в светящийся объект сантиметровых размеров, имеющий вид шаровой молнии. Как теперь становится ясным, пучок электронов начал формировать зарядовые кластеры сантиметровых размеров, которые быстро высвечивали в воздухе всю накопленную энергию пучка. За полученные уникальные результаты сотрудник получил «пинок благодарности». Он был быстро уволен без объяснения причин.

### **Проблемы создания автоэмиссионных катодов**

Когда исследователи катодов решили построить автоэмиссионный катод без внешнего подогрева, то столкнулись с серьёзной проблемой его создания. Оказалось, что при миллиметровых расстояниях между катодом и анодом ток в такой вакуумной системе не течёт даже при приложении десятков киловольт. Это потом было сформулировано как требования для создания автоэмиссионных катодов. Считалось, что для получения автоэмиссионного тока на поверхности катода требуется создать напряжённости электрических полей от 3000 В/мкм до 5000 В/мкм. Многочисленные эксперименты показали невозможность создания автоэлектронных катодов с такими полями.

Как теперь становится понятным, физические причины необходимости приложения таких огромных полей для получения автоэлектронной эмиссии лежат в неудачных конструкциях автоэмиссионных катодов. Обычно использовались осесимметричные цилиндрические, либо плоские электроды, в которых прикладываемые внешние электрические поля создавали направление вектора напряжённости электрического поля, которое было поперечно

поверхности катода. Если бы была применена конструкция острейного катода, то значения упомянутых полей снизились бы от 2 до 20 В/мкм.

Величайший физик современности Кен Шоулдерс в конце 19 века, работая в Бодеге (Калифорния), понял, что для создания эффективного автоэлектронного катода расстояние между катодом и анодом нужно уменьшать до микрометров и использовать в области катода внешние неоднородные электрические поля. Он первым предложил применить в качестве эмиттера острейный катод.

Своими гигантскими трудами, в течение 30-и лет, он создал новую область науки вакуумную микроэлектронику. Его первый триод выглядел так (см. рис. 1). Рисунок взят из его публикаций [1,2].

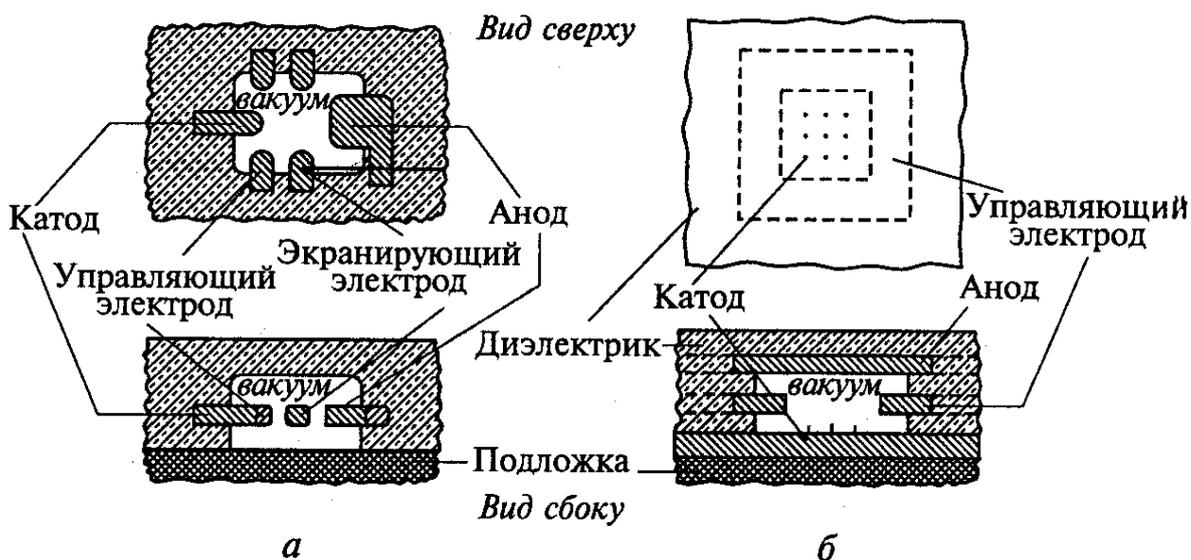


Рис. 1. Триод Шоулдерса.

Обратите внимание на рисунок. Он схематичен. Уже тогда в катоде он использовал острейный эмиттер, но не показал его (мы в этом уверены). Близко расположено кольцо управляющего электрода, затем экранирующий электрод и, наконец, удалённый анод.

Чем принципиально отличается конструкция от обычных электронных ламп? Насколько нам известно, все электронные лампы, которые производили в последние годы, имели наиболее распространённую цилиндрическую симметрию. На оси – подогревной катод, а анод выполнялся в виде соосного цилиндра. Как было распределено внешнее электрическое поле в такой лампе? Оно было радиально неоднородным. Напряжённость поля убывала от оси по направлению радиуса  $\sim 1/r$ . На аноде напряжённость поля была самая маленькая. Поверхности одинаковой напряженности были цилиндрами. Напряженность на каждом, более удалённом от катода цилиндре, была меньше, чем значение напряжённости на более близком к катоду внутреннем цилиндре. Но вектор напряжённости самого поля входил в анод и катод одинаково перпендикулярно. Он был перпендикулярен поверхности катода и поверхности анода.

Несколько слов о том, как был направлен градиент давления внешнего электрического поля в такой системе. О существовании такой силовой физической величины внутри вакуумного диода его исследователи никогда не задумывались. Он имел одну радиальную компоненту убывающую  $\sim 1/r^3$  и направленную против  $r$ . Направление градиента давления было также перпендикулярно поверхности цилиндрического катода и не имело составляющей в поперечном направлении оси системы.

Слой шубы зарядов лежал на поверхности катода между катодом и анодом. Если катод был холодным, то вектор напряжённости поля был поперечен и тонкой шубе электронов. Его действие приводило к увеличению толщины шубы на десятки микрометров. Этого было недостаточно, чтобы шуба стала высотой в миллиметры. Поэтому тока не было.

А в триоде Шоулдерса (см. рис.1) расстояние между острым катодом и управляющим электродом было порядка микрометра. В связи с этим, внешнее электрическое поле, в котором находилась шуба электронов, было сильно поперечно неоднородным. Оно не только увеличивало толщину шубы, но и создавало объёмную плотность сил в виде градиента давления напряжённости электрического поля, который толкал тонкий слой электронов в направлении малых значений сил коллективного взаимодействия электронов в слое. В этом, мы считаем, и проявила себя гениальность человека, который обнаружил существование всех этих процессов, не имея под руками их математического описания.

То есть, он понял, что создавая разнообразные внешние поперечно неоднородные поля электрического поля внутри газа электронов, можно управлять перемещением этого слоя электронов. То есть, заставить шубу из электронов «двигаться в нужном вам направлении». На рис. 1 электроны коллективом должны двигаться в направлении наибольшей неоднородности поля, создаваемого инжектором. При этом поле анода триода, конечно, притягивает к себе сформированный слой зарядов, но мы уверены, что управляющий электрод играет здесь самую важную роль (играет роль анода, создавая своеобразный инжектор электронов). Поэтому в системе электрических полей и возникла триодная структура.

Анод триода Шоулдерса и экранирующий электрод играют здесь вспомогательную роль. Они могут быть, а могут и не быть. Электроны, все равно, будут двигаться в направлении, противоположном направлению градиента давления электрического поля, до определённого момента. Когда анода триода нет, то остаётся просто в том месте, куда направляются электроны, сформировать область главного накопителя (ГН), и тогда возникнет новый электронный прибор, играющий роль накопительного устройства, похожего на вакуумный конденсатор. Дополнительный анод накопителя может быть изолирован и вынесен наружу, для того, чтобы область, где находится анод, была ещё и удерживающей ловушкой для избыточного заряда электронов.

При проведении экспериментов по реализации вакуумного конденсатора может потребоваться введение анода триода внутрь вакуумного промежутка. Такие вспомогательные измерительные приборы позволят определить, насколько быстро происходит накопление заряда на аноде триода и какие при этом плотности токов и вольт-амперные характеристики могут быть реализованы. И какими физическими параметрами обладает автоэлектронный инжектор (речь идёт о физических параметрах, приводимых ниже в табл. 1)? Ведь в будущем потребуются изготовление инжекторов с предельно большой плотностью тока.

Приводимые выше, огромные значения напряжённости электрических полей уже не требуются. Они уменьшились до значений от 20 до 70 В/мкм (определены экспериментально). А это два порядка. А плотности токов, полученные в экспериментах Шоулдерса, лежали в диапазоне от  $10^4$  до  $10^8$  А/см<sup>2</sup> [3]. При площади катода в 1 см<sup>2</sup> исследователь будет иметь средний ток миллион ампер. И греть ничего не нужно. Вот вам, и никем не замеченное, величайшее открытие. Кен Шоулдерс красиво обошёл существующую 30 лет проблему, и мало всего прочего показал, что из фонтанирующего, как из крана, автоэлектронного катода можно забирать электроны столько, сколько их туда поступает от внешнего источника.

Здесь следует заметить, что в своих поисках EV (*Electrum Validum*) Шоулдерс не был в одиночестве. Примерно в это же время научная группа академика Месяца Г.А. исследовала взрывную термоэлектронную эмиссию из катода [4] (заметим, что Кен рассказывал о визите академика Месяца к нему в 90-х годах). В экспериментах Месяца к катоду быстро подводилась высокая концентрация тепловой энергии. Она приводила к взрывам, которые происходили в маленьких областях катода. Обычно эти микрообласти представляли собой шероховатости катода выступающие в виде острых образований. Эти шероховатости быстро нагревались и выбрасывали отдельно сформированные в виде лавин порции электронов. Сама область перегрева и выбрасываемая ею порция электронов была названа «Эктоном».

В моей диссертации по данным, приводимым в [4], были рассчитаны значения величины заряда одной выбрасываемой порции в зоне перегрева. Поразительно, но в выбрасываемой порции количество электронов попадало в диапазон значений количества электронов, указанных Шоулдерсом для EV. Таких оценок сотрудники академика Месяца не делали. В этом и была основная физическая причина того, что область эктона в катоде сначала сильно разогревалась, а затем, по окончании порции электронов, быстро остывала.

О чём это всё может говорить? О том, что вместе с Шоулдерсом они натолкнулись на целое явление формирования зарядовых кластеров у металлической поверхности любого катода. Но остались вопросы. Почему заряд, вылетающий из области катода, может содержать в себе ограниченное количество электронов? И всегда ли катод работает в режиме выбрасывания порций? На эти вопросы пока нет ответов.

Справедливости ради, необходимо сказать несколько слов о катоде Спиндта [5], который был создан на молибденовом катоде в 1968 году, через 7 лет после создания триода Шоулдерса. По моим понятиям, катод Спиндта – это первый автоэлектронный инжектор (термин «пушка» занят в электронно-оптических приборах), при создании которого была понята важная мысль: анод, принимающий поток электронов, может и отсутствовать. Катод Спиндта с геометрическими размерами приведён на рис. 2.

На рис. 2 представлено схематическое изображение тонкоплёночного эмиттера автоэмиссионного катода Спиндта. Рисунок взят из [3]. На рис. 2 введены обозначения: 1 – молибденовый корпус; 2 – изолирующий слой из двуокиси кремния; молибденовая плёнка-диафрагма управляющего электрода; 4 – кремниевая подложка.

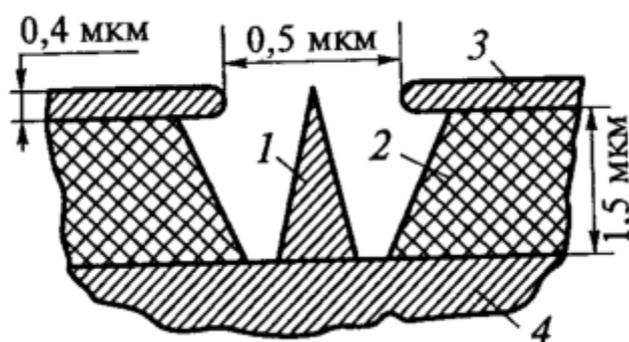


Рис. 2. Катод Спиндта.

Исследования показали, что наибольшее значение плотности автоэмиссионного тока достигается в том случае, когда острие катода находится на уровне молибденовой плёнки-диафрагмы управляющего электрода. В этом случае создаётся такое неоднородное распределение электрического поля в зазоре, которое характеризуется самым высоким значением его градиента давления. Как вы, читатель, догадываетесь, оно возникает в области расположения верхней части острия.

Представляет интерес привести в табл. 1 значения физических параметров, характеризующих катод Спиндта.

Таблица 1.

N п/п	Наименование	Обозначение	Единицы измерения
1.	Площадь основания острейного катода	$S_k=0,2 \text{ мкм}^2$	$\text{мкм}^2$
2.	Радиус кривизны острия	$R=50 \text{ нм}$	нм
3.	Площадь токового шнура, отбираемого в рабочем режиме	$S=0,4 \text{ мкм}^2$	$\text{мкм}^2$
4.	Номинальное значение рабочего тока	$I=50-150 \text{ мкА}$	мкА
5.	Достигаемое значение плотности тока при номинальном режиме	$J=2-8 \text{ А/см}^2$	$\text{А/см}^2$

6.	Напряжённость тянущего электрического поля при номинальном значении рабочего тока	$E=70-200$ В/мкм	В/мкм
7.	Технический вакуум, требуемый для работы	$P=10^{-9}$ мм.рт.ст	(мм.рт.ст.)
8.	Время, необходимое для накопления заряда $Q$ в 1 кл в вакуумном накопителе (ВК) одним катодом	$T=2,8$ часа для тока 100 мкА	часы
9.	Время, необходимое для накопления заряда $Q$ в 1 кл в вакуумном накопителе (ВК) матрицей из 100 эмиттеров	$T=3,4$ минуты для тока 5 мА	минуты
10.	Площадь полной области эмиссии	$S_{\text{э}}=0,0625$ мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>
11.	Плотность упаковки эмиттеров для решётки 100 эмиттеров	1600 на см <sup>2</sup>	на см <sup>2</sup>
12.	Плотность упаковки эмиттеров для решётки с 5000 эмиттеров	640 000 на см <sup>2</sup>	

Любопытно, но данные, приводимые ранее, указывают на то, что электрические параметры, полученные в триоде Шоулдерса, на несколько порядков превышают параметры, достигнутые в катоде Спиндта. Но, катоду Спиндта повезло больше: он получил широкое коммерческое приложение для создания плазменных панелей.

### **Зарядовый кластер Шоулдерса (*Electrum Validum, EV*)**

Здесь следует отметить любопытный момент, который присутствует при изложении материала о пророке вакуумной электроники К. Шоулдерсе (в монографии [3], написанной для физиков, авторы считают его пророком). Ни в одном месте монографии [3] (она была издана в 2004 г.) вы не найдёте информации о самом важном открытии К. Шоулдерса, которое было им сделано после ухода из Стенфордского университета. На своих острых катодах в 1980 - х годах он обнаружил новый физический объект, который был им назван *Electrum Validum* или, по современному, Зарядовый Кластер (ЗК). Авторы монографии [3] почему-то решили не знакомить российского читателя с этим величайшим открытием, сделанным пророком человечества.

Кен Шоулдерс в своей монографии [6] смог решить ряд экспериментальных проблем: проблему генерации ЗК, проблему измерения их физических и геометрических параметров, проблему ориентации их движения, проблему сепарации их друг от друга и проблему их взаимодействия с поверхностью металла, с волнами и т.д. и т.п. Следует заметить, что он работал с острыми металлическими катодами без покрытия.

Поясню, не до конца понятые многими читателями, моменты в проведённых экспериментах Шоулдерса. Многие исследователи считают геометрическую форму ЗК эллипсоидом. Это не совсем правильно. Выводы о его геометрическом строении можно сделать только по фотографиям, на которых показано его падение под углом на поверхность титана. Образованный кратер из расплава металла, на который упал кластер, на плоской поверхности титана имеет ограниченную в пространстве форму, приближённую к кольцевой. Как показано в монографии [7], причина этого заключается в том, что в ЗК может существовать область, в которой отсутствуют заряды. То есть, он очень похож на мыльный пузырь.

Как показано в монографии, причина появления эллиптической формы кратера при падении на плоскую поверхность металла может быть связана с изменением функции распределения зарядов. В момент удара происходит преобразование функции распределения зарядов налетающего кластера в функцию распределения плотности выделения избыточной энергии на плоской поверхности. Из анализа преобразования видно, что область расплава при нормальном падении кластера на поверхность металла может иметь форму окружности, а при падении под острым углом форму эллипса. Из изложенного следует, что в обычном состоянии зарядовый кластер имеет сферическую форму с полостью, то есть является пузырём из электронов.

Отношение большинства учёных РАН, считающих себя научно-технической элитой нашей страны, к экспериментам Шоулдерса и попыткам создать возможное физико-математическое описание ЗК можно сформулировать одним известным утверждением А.П.Чехова: «Этого не может быть, потому, что этого не может быть никогда!!!».

Но, следует философски относиться к тем, кому Бог не дал разума для того, чтобы постигнуть новое интереснейшее явление, открытое в физике пространственного заряда. Не зная, и не понимая обнаруженных Шоулдерсом свойств EV, невозможно освоить предложенные им современные технологии создания зарядовых кластеров с высокой плотностью [8-12]. Да, осилит дорогу идущий!

Для того чтобы понять, каким образом зарядовые кластеры Шоулдерса могут перемещаться в неоднородных электростатических полях, создаваемых определённой конфигурацией электродов, сначала нужно разобраться в одном немаловажном моменте: какими силами удерживается любой зарядовый кластер от его кулоновского расталкивания? Это позволит выяснить, почему в экспериментах Шоулдерса при генерации ЗК не выполняется фундаментальное теоретическое построение под названием «теорема Ирншоу».

Для этого необходимо привести небольшую часть материала из автореферата моей докторской диссертации [13]. «Рассмотрим возможные направления объёмных сил, удерживающих внешнюю атмосферу полого кластера, состоящего из положительных зарядов (левая часть рис. 3). Предположим, что в произвольном элементе объёма сила  $\rho\vec{E}$  совпадает по направлению с внешней нормалью (ось  $x$ ).

Из уравнений (1) и (5), приводимых в автореферате, следует, что направление градиента давления зарядов совпадает с направлением вектора  $\vec{E}$ . Поскольку вектор  $\vec{E}$  совпадает с направлением оси  $x$ , то его единственная проекция положительна. Из уравнения (2) следует, что в этом объеме дивергенция  $\frac{dE}{dx} > 0$  и напряженность поля нарастает в направлении оси  $x$ . Это нарастание формирует градиент давления поля, имеющий такое же направление, как и градиент давления зарядов.

Кроме того, для любого уравнения состояния они оказываются равными друг другу, в связи с чем, выполняется условие удержания (7). Сила  $\vec{f}$ , компенсирующая  $\rho\vec{E}$ , противоположна градиенту давления поля и равна ему по модулю.

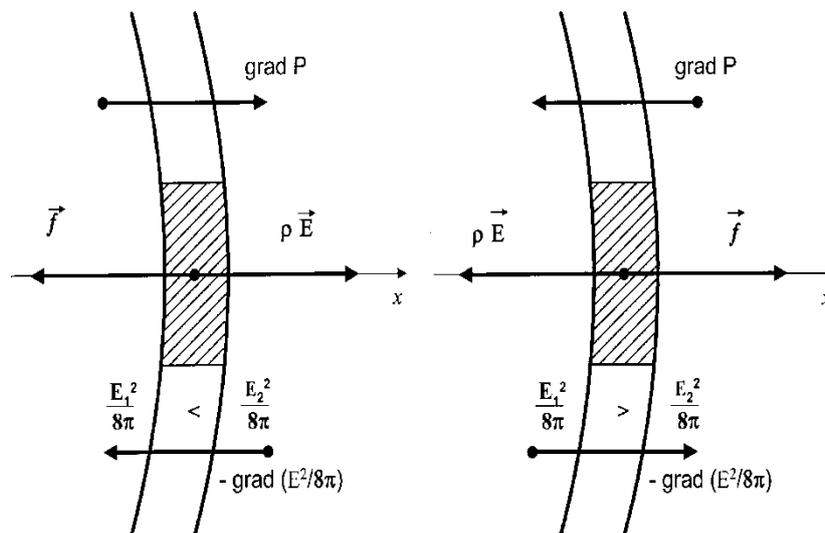


Рис. 3. Возможные направления объемных сил, удерживающих в равновесии квазиплоский слой положительных зарядов полого кластера.

Рассмотрим физику удержания в равновесии элементарного объема положительных зарядов во внутренней атмосфере кластера (правая часть рис. 3). Как и ранее, градиент давления зарядов совпадает с направлением объемной силы  $\rho\vec{E}$  и равен ей. Но теперь их направления противоположны направлению внешней нормали и единственная проекция вектора  $\vec{E}$  отрицательна. Тогда из уравнения (2) следует, что в этом объеме  $\frac{dE}{dx} < 0$  и напряженность поля убывает с ростом  $x$ . Это убывание формирует градиент давления поля, направленный против оси  $x$  и равный градиенту давления зарядов (7). Газостатическая сила, компенсирующая силу  $\rho\vec{E}$ , направлена по оси  $x$  и противоположна градиенту давления поля.»

Самый важный вывод для дальнейшего понимания физики удержания одноимённых зарядов в ограниченной области пространства следующий:

элементарный объём зарядов любого знака в кластере удерживается двумя противоположно направленными силами. Одна из объёмных сил – сила, направленная по вектору напряжённости электрического поля (для положительных зарядов), а другая – сила, направленная против градиента давления самосогласованного поля. И если первая сила, действует на элементарный заряд кластера (или на зарядовую плотность кластера), то вторая действует на массовую плотность того же кластера точно также, как действует сила Бернулли.

Найденные условия удержания ЗК позволяют понять физические причины невыполнения теоремы Ирншоу в рассмотренном случае. Она сформулирована для системы точечных зарядов, у которых предполагается, что их кулоновское взаимодействие преобладает над полевым взаимодействием.

Правильные физические причины удержания элементарного объёма зарядов в ограниченной области пространства приводят к важному выводу: на любой ограниченный в пространстве протяжённый сгусток одноимённых зарядов, находящихся во внешнем электрическом поле, всегда действуют две силы – сила электрическая и сила газостатическая, связанная с градиентом давления внешнего электрического поля. В зависимости от направления внешнего электрического поля и направления градиента давления эти силы могут быть либо одного, либо различных направлений. Результирующая электрическая сила действия на протяжённый несимметричный заряд будет ещё зависеть от ориентации его оси симметрии по отношению к направлению силовых линий внешнего электрического поля.

Несколько слов об электрогравитационных аппаратах Томаса Таунсенда Брауна. Следуя объяснению, изложенному в [14], суть эффекта Бифельда-Брауна, открытого в 1921 году, состоит в следующем. Противоположные силы кулоновского притяжения двух или более тел могут быть и не равны друг другу. В результате этого, в системе заряженных тел (диполе) может существовать суммарная ненулевая действующая сила, направленная от отрицательного электрода к положительному электроду.

Появившаяся суммарная действующая сила будет изменять вес асимметричного электрического конденсатора, имеющего твёрдый диэлектрик особой формы, при больших напряжениях. При одной ориентации действующей силы его вес будет увеличиваться, а при другой – уменьшаться.

Дальнейшие экспериментальные исследования Фролова А.В. [14] показали, что большую роль в создании движущей силы в асимметричных электрических конденсаторах играет упругость материала диэлектрика.

На наш взгляд, проявление обнаруженного факта, заключающегося в том, что силы кулоновского взаимодействия протяжённых систем зарядов могут быть и не равны друг другу, указывает на существование внутри асимметричных электрических конденсаторов ещё одной, не учитываемой ранее силы, силы, связанной с градиентом давления электрического поля. Она действует на массовую плотность диэлектрика и приводит к изменению результирующей силы, действующей на весь конденсатор, рассматриваемый

как отдельное тело. Поэтому упругость диэлектрика и влияет на распределение градиента давления поля внутри конденсатора, что изменяет величину результирующей силы.

Такое же, двухсиловое, взаимодействие существует и при гравитационном взаимодействии протяжённых тел. На любой, ограниченный в пространстве, протяжённый объём гравитирующих масс, или твёрдое тело, находящихся во внешнем гравитационном поле, всегда действуют две силы. Эти силы, при движении тела в центральном поле, имеют противоположные направления – сила гравитационная и сила газостатическая, связанная с градиентом давления внешнего гравитационного поля. Они отличаются от электрических сил тем, что та и другая силы действуют на массовую плотность вещества. Результирующая гравитационная сила, действующая на протяжённый несимметричный объём масс, или несимметричное твёрдое тело, будет ещё зависеть от ориентации его оси симметрии по отношению к направлению силовых линий внешнего гравитационного поля.

На этом предположении в [15] построена самосогласованная теория гравитации, которая является продолжением исследований Р.Эмдена [16], посвящённых равновесию газовых шаров. В ней найдены решения уравнения Эмдена для потенциала, которые описывают распределения полей и физических параметров известных и неизвестных астрофизических объектов.

Из теории следует, например, что Тунгусский феномен мог представлять собой полый, рыхлый космический снежок огромной массы, состоящий из ледяных пылинок наноскопических размеров. Плотность потока частиц при нормальном падении такого «пузыря» на землю будет существенно меньше в центре, чем в соседних слоях. Тогда в эпицентре падения производимые разрушения будут минимальны, что совпадает с наблюдениями. Лес, сохранившийся в эпицентре после падения (по данным экспедиции Кулика Л.А., 1921 г.), представлял собой ободранные от веток вертикально стоящие деревья («мачтовый лес»). Вне эпицентра они все были повалены на 30-км по всем направлениям тайги.

Откуда мог появиться снежный пузырь такой массы в космических просторах? Ответ на этот непростой вопрос пришёл только недавно. Исследования зондами последних лет планет солнечной системы, проводимые несколько лет в США (см. серию фильмов ВВС «Чудеса солнечной системы», 2009), обнаружили на 61-м спутнике Сатурна Энцеладе, в его южной части, существование десятков гигантских ледяных гейзеров. Они располагаются на каньонах и трещинах спутника. Обнаруженная геологическая активность южной части Энцелада создаёт потоки ледяных пылинок, которые удаляются с большой скоростью от спутника на тысячи и десятки тысяч километров. Чудо солнечной системы позволяет высказать гипотезу о том, что Тунгусский снежок и был «космическим пришельцем», рождённым на Энцеладе.

Только наличие двух сил, действующих на спутники планет солнечной системы, может объяснить причины обнаруженной в последние годы неожиданной геологической активности спутников Сатурна и спутников

других планет солнечной системы. Перемещаясь по эллиптическим траекториям миллионами лет, они переходят в различные области, в которых изменяется соотношение между указанными силами. Приложенные в противоположных направлениях, они сжимают и растягивают вещество движущегося космического тела. В действие вступает закон упругости Гука (для сжатия и растяжения он требует наличия двух сил), который перекачивает работу этих сил в энергию упругой деформации любого космического тела. А она, в свою очередь, и приводит к геологической активности рассмотренных спутников, которая проявляется либо в виде эруптивных выбросов пылевого вещества на спутнике Юпитера Ио, либо в виде ледяных гейзеров на Энцеладе.

Наша планета таким же образом получает дополнительную энергию расширения/сжатия в свою земную кору. Эта энергия поддерживает тектоническую и геологическую активность земли на определённом уровне многие миллионы лет.

Из изложенного выше ясно, что система зарядов и полей внутри зарядового кластера обладают сильной неоднородностью. Как показывают решения исходной системы уравнений, плотность заряда, напряженность поля и градиент давления напряженности поля сильно неоднородны на границе кластера. Это приводит к тому, что в сферическом случае на внешней и на внутренней поверхностях кластера имеет место увеличение концентрации электронов до значений, превышающих среднее значение концентрации электронов в твёрдом теле. В этом и заключается причина его необычного поведения при движении внутри твёрдого тела. Он может рассверливать кристаллическую решётку твёрдого тела и поглощать собою образовавшееся газообразное вещество.

В этом и заключается основная причина того, что при генерации EV Шоулдерсу приходилось достаточно часто менять отработанный острый катод на новый катод. Кластеры постепенно, как напильником, срезали его коническую поверхность и он истончался.

В этом смысле ЗК – это достаточно опасный объект при его удержании и сборе в накопительных системах, ограниченных высоковольтной керамикой. При больших накопленных энергиях он может проявлять наблюдаемые свойства шаровой молнии, которая может свободно проходить через стеклянные твердотельные препятствия.

Из изложенного становится понятным, что внешнее электрическое поле может воздействовать на ЗК так же двумя физическими параметрами: вектором напряженности и градиентом давления напряженности электрического поля. Именно они, в не параллельных друг другу электродах инжектора, могут создавать разнообразные условия для формирования и транспортировки в определённом направлении пространства инжектора зарядовых кластеров, образованных в области расположения отрицательного электрода.

## Распределение внешнего электрического поля между электродами вакуумных диодов с высокой симметрией

Как мы уже упоминали, при изготовлении вакуумных диодов с косвенным накалом были приняты две основные формы их симметрии: плоская и цилиндрическая.

На рис. 4 представлена плоская форма электродов. Предполагается, что выполнено условие, при котором расстояние между плоскими обкладками  $d$  во много раз меньше, чем корень квадратный из площади пластин. Это условие позволяет рассматривать одномерный случай зависимости потенциала  $\varphi$  системы от координаты  $x$ .

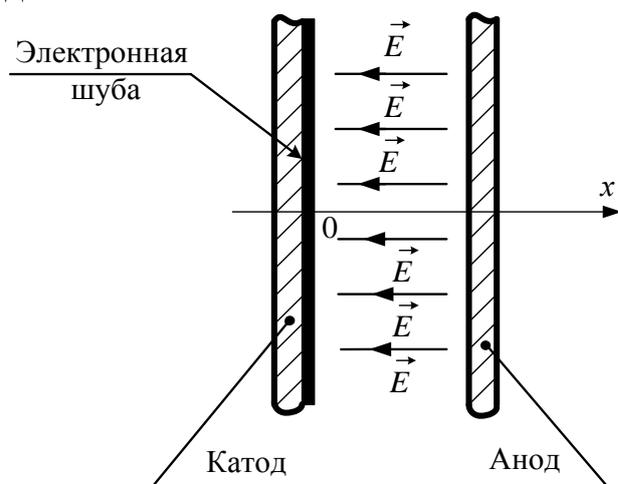


Рис. 4. Плоская геометрия электродов.

Координата  $x$  системы направлена перпендикулярно пластинам катода и анода. Они выделены штрихом. Нуль координаты совпадает с местоположением катода. Направление координаты выбрано от катода к аноду. Анод находится при значении координаты  $x=d$ , где  $d$  – расстояние между катодом и анодом. По законам, следующим из электростатики, в области, где отсутствуют заряды потенциал электрического поля – линейная нарастающая функция координат (принята калибровка скалярного потенциала  $\varphi(0) = 0$ ) представляет собой решение уравнения Лапласа

$$\varphi = E \cdot x, \quad (1)$$

где  $E$  – постоянная, совпадающая с модулем вектора напряжённости электрического поля системы. Эквипотенциальные поверхности представляют собой плоскости равного потенциала, которые параллельны пластинам (на рисунке не указаны), но перпендикулярны силовым линиям электрического поля (направление силовых линий указано стрелками). В каждой точке эквипотенциальной поверхности вектор напряжённости поперечен поверхности. Наибольший потенциал  $\varphi(d) = Ed = U$  (где  $U$  – напряжение на обкладках конденсатора) достигается на аноде.

Производная по  $x$  от (1), взятая с противоположным знаком ( $E_x = -d\varphi/dx = -E$ ), как раз и даёт направление вектора напряжённости против оси  $x$ . Она описывает однородное электрическое поле во всём пространстве. Направление вектора  $\vec{E}$  указано на рис. 4.

В этой симметрии существует простая связь напряженности электрического поля системы с разностью потенциалов, приложенной к пластинам

$$E = U/d, \quad (2)$$

где  $U$  – разность потенциалов, а  $d$  – расстояние между обкладками (см. рис. 4).

Давление  $D$ , создаваемое полем в этом случае, пропорционально  $E^2$  и однородно (постоянно) во всём пространстве диода. Градиент давления  $G$  пропорционален производной от давления  $G = dD/dx$ . Он обращается в нуль во всей области пространства, занятого пластинами.

Плоская система электродов может приводить только к незначительному увеличению толщины электронной шубы, образующейся на катоде, действием напряжённости внешнего поля системы. Электроны шубы будут стремиться двигаться против силовых линий внешнего электрического поля, но силы коллективного взаимодействия оказываются значительно больше и продолжают удерживать шубу у поверхности катода. Нулевой градиент давления внешнего электрического поля никакого действия на заряды шубы не оказывает. В связи с этим, система плоских электродов не может быть использована в качестве конструкции инжектора электронов.

Заметим, что технически реализовать поле плоского конденсатора невозможно по той причине, что трудно расположить две пластины плоскопараллельно с достаточной степенью точности. Любой, даже сколь-нибудь малый угол, приводящий к перекосу пластин, как показано ниже, приводит к появлению градиента давления поля, который будет воздействовать на шубу электронов и приводить её к движению в направлении поперечном направлению напряжённости поля. При напряжениях в тысячи вольт это будет приводить к сбрасыванию заряда на положительный электрод через внешнюю поверхность диэлектрика. То есть, к высоковольтному пробою плоского конденсатора, что и наблюдается на практике.

Вторая симметрия, наиболее часто используемая в диодах, – цилиндрическая. На рис. 5 приведены схематически электроды вакуумного диода и направление силовых линий электрического поля. Напряжённость поля  $E_r$  внутри диода направлена против радиуса и убывает с его ростом, как  $1/r$ . Она неоднородна и имеет большее значение у поверхности катода. Потенциал системы логарифмический и нарастает к аноду. Эквипотенциальные поверхности – это цилиндры с постоянным потенциалом.

Потенциал обычно калибруют так, чтобы на поверхности катода он обращался в нуль. Давление поля в системе  $D$  пропорционально  $E^2$ . Поэтому давление с ростом  $r$  убывает быстрее, как  $1/r^2$ . Распределение давления поля неоднородно. Градиент давления поля нигде в нуль не обращается. Он убывает

ещё быстрее, чем давление поля, как  $1/r^3$ . Градиент давления направлен против оси  $r$ .

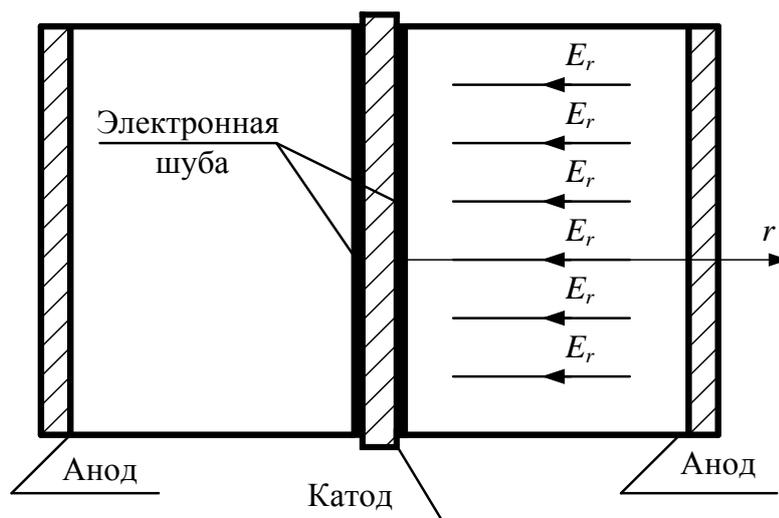


Рис. 5. Цилиндрическая геометрия электродов.

Сила  $f$ , противоположная градиенту давления, перпендикулярна поверхности катода, направлена против  $E_r$  и действует на слой электронной шубы растягивая его в направлении радиальной координаты. Обе силы, действующие на шубу электронов  $E_r$  и  $f$ , направлены в одну сторону и перпендикулярны поверхности катода. Они немного увеличивают толщину электронной шубы, но при отсутствии нагрева катода не могут заполнить всё расстояние между катодом и анодом. Введение косвенного накала позволяет заполнить промежуток между катодом и анодом вплоть до расстояний 5 мм.

На рис. 6 показано схематически исследуемая экспериментально авторами патента [17] конфигурация, выполненная на основе вакуумного диода 1Ц21П с дополнительным анодом, заизолированным в керамике. Такое расположение электродов приводит к появлению сильно неоднородной области в районе конца осесимметричного катода. В области 1, обозначенной пунктиром, возникает пучок силовых линий внешнего поля, который входит перпендикулярно в эквипотенциальную поверхность катода.

Этот пучок силовых линий образует градиент давления поля, направленный по оси к катоду. Сила, отбрасывающая электроны шубы, противоположна градиенту давления поля и направлена к аноду. В ту же самую сторону направлена электрическая сила, действующая на объёмную плотность зарядов электронного облака. То есть, обе силы складываются в одном направлении и отбрасывают электроны на анод.

Эта конфигурация должна давать самый большой накопленный заряд вблизи анода с керамикой. При проведении экспериментов могла возникнуть ситуация, когда подогрев анода «раздул» размеры электронного облака до размеров управляющего электрода, указанного на рис. 6. Увеличение облака до таких размеров не может изменить возникающей неоднородности электрического поля. Просто электроны начнут стягиваться с управляющего электрода.

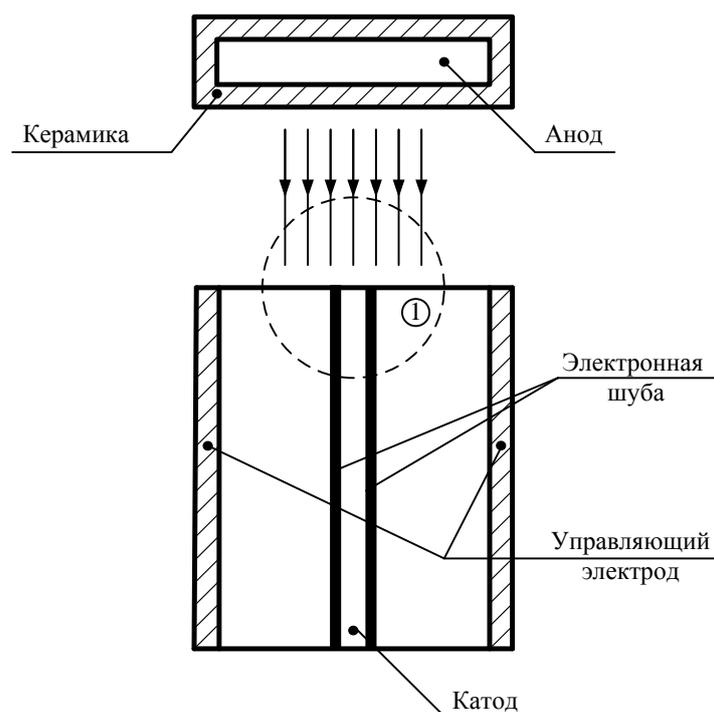


Рис. 6. Конфигурация электродов на основе модифицированного вакуумного диода 1Ц21П.

Как видно из геометрии системы, она очень похожа на триод Шоулдерса и катод Спиндта. Это позволяет её представить ещё в одном варианте планарной геометрии, показанной на рис. 7.

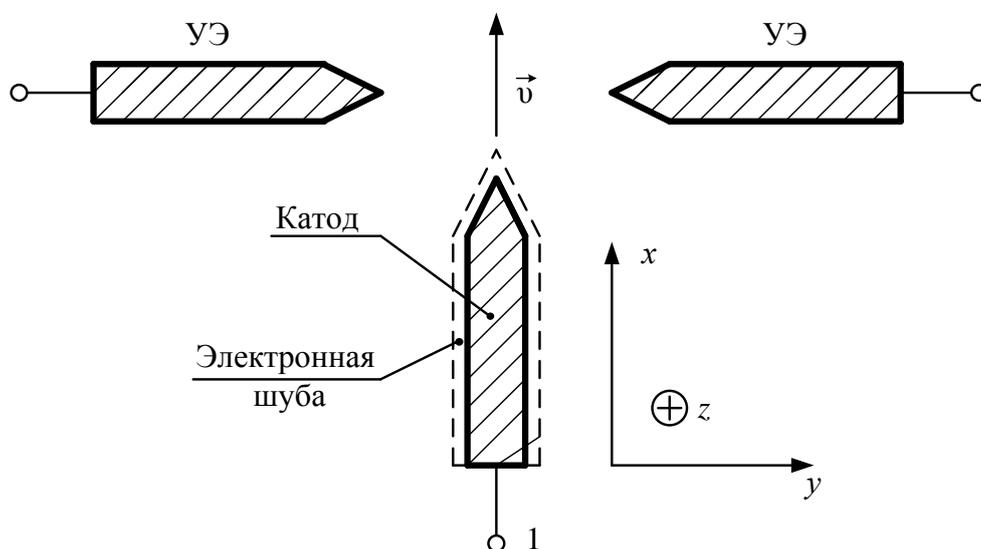


Рис. 7. Планарный трёхножевой инжектор.

На рис. 7 введены обозначения: УЭ – управляющие электроды, которые связаны между собой электрическим соединением (на рисунке не указано). Электрод 1 формирует электронную шубу. Все три электрода выполнены в виде заострённых ножей. Неоднородность электрического поля формирует необходимые силы для выбрасывания заряда со скоростью  $\vec{v}$  (указана стрелка) в направлении оси  $x$ . В направлении оси  $z$  электроды могут быть произвольной,

но одинаковой длины. Увеличение длины электродов в направлении оси  $z$  позволит увеличивать полный ток, снимаемый с ножевого инжектора 1.

### Градиентный электронный инжектор с угловой апертурой

На рис. 8 представлен схематично инжектор с угловой апертурой в полярных координатах  $(r, \varphi)$ . Пластина катода лежит в плоскости  $\varphi = 0 = const$ , а пластина анода, по отношению к пластине катода, симметрично развернута на апертурный угол  $\theta$ . Пластина анода лежит в плоскости  $\varphi = \theta = const$ . Расстояния от оси  $z$  до ближней части пластин катода и анода и для дальней части пластин катода и анода – одинаковы. Они обозначены через  $R_1$  и  $R_2$  – соответственно. Катод и анод на рис. 8 заштрихованы.

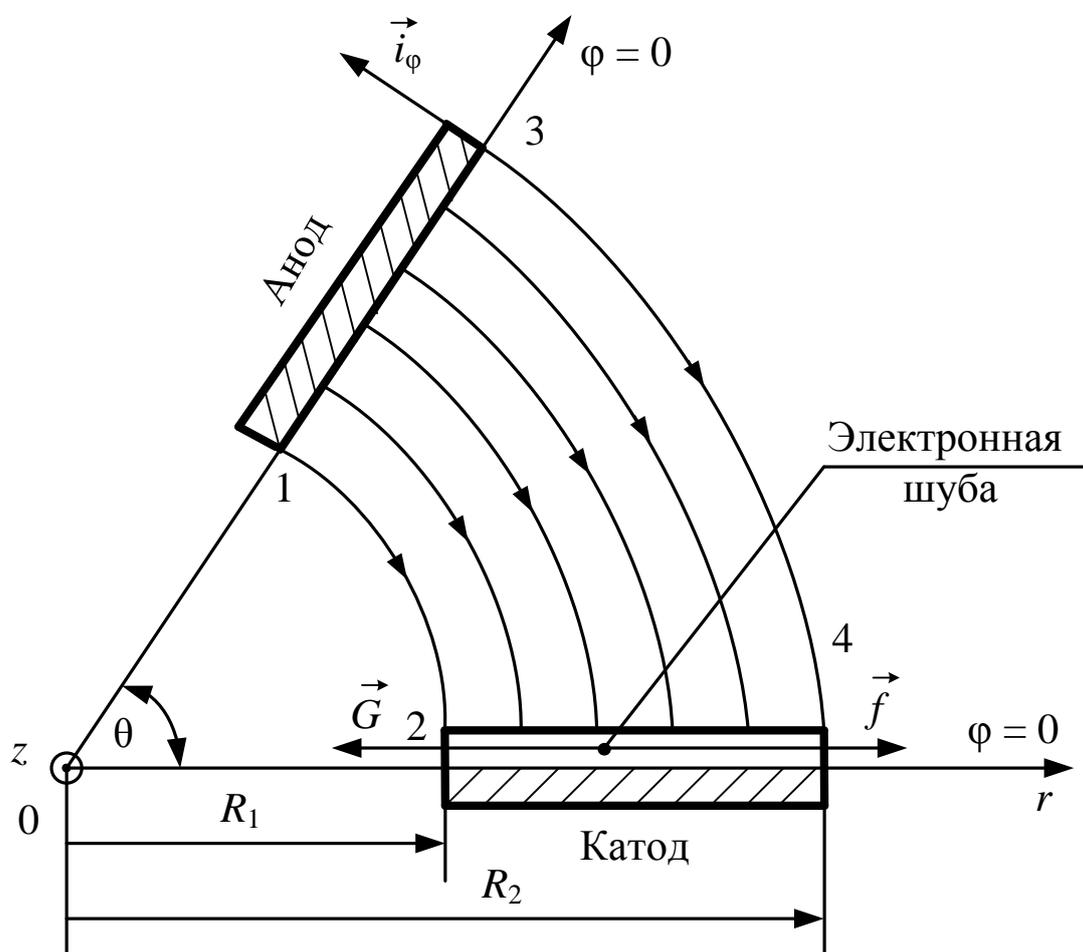


Рис. 8. Градиентный инжектор с угловой апертурой.

Потенциалы катода и анода постоянны и отличаются друг от друга на напряжение  $U$ , приложенное к пластинам инжектора. В рассматриваемом случае потенциал системы  $\Phi$  зависит только от угла  $\varphi$ . Приближённое решение, следующее из уравнения Лапласа, будет выполняться тем лучше, чем радиальные размеры катода и анода будут больше расстояния  $R_1$ .

Предложенная симметрия электродов позволяет указать на вид силовых линий электрического поля. Они представляют собой ограниченные участки окружностей. Силовая линия 1-2 ограничивает первую (внутреннюю) область системы, а силовая линия 3-4 ограничивает вторую (внешнюю) область системы. Направление силовых линий указано стрелками. Вектор напряжённости электрического поля имеет единственную компоненту  $E_\varphi$ , которая касательная к силовой линии и имеет направление, противоположное единичному вектору  $\vec{i}_\varphi$ .

На рис. 8 указано также направление градиента давления внешнего поля  $\vec{G}$  и направление силы  $\vec{f}$ , противоположной градиенту давления. Сила  $f$  стягивает электронную шубу в направлении оси  $r$ . Поскольку силы имеют только радиальные компоненты, то пучок электронов будет двигаться в плоскости  $\varphi = 0 = const$  в сторону увеличения радиуса. Именно в этом направлении и следует располагать пространство дрейфа и накопитель электронов.

Пространственные распределения электрического поля системы следует рассчитать из уравнения Лапласа. Для потенциала  $\Phi$ , зависящего от угла, оно имеет вид:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} = 0. \quad (1)$$

Решение (1) имеет вид линейной функции от угла  $\varphi$ , взятого в радианах (далее все углы в полярных координатах измеряются в радианах)

$$\Phi = C_1 \varphi + C_2, \quad (2)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные. Решение справедливо в области 1-2-3-4, указанной на рис. 8. Калибруя потенциал на катоде  $\Phi(0)=0$ , получим  $C_2=0$ . Привлекая связь потенциала с напряжённостью поля, получим, что  $C_1$  совпадает с масштабом напряжения электрического поля системы  $U_*$

$$E_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{d\Phi}{d\varphi} = -\frac{C_1}{r} = -\frac{U_*}{r} \quad (3)$$

Как и следовало ожидать, единственная компонента поля системы  $E_\varphi$  убывает, как  $1/r$  и направлена против вектора  $\vec{i}_\varphi$ . Из (3) следует масштаб напряжённости поля  $E_*$

$$E_* = U_* / R_1. \quad (4)$$

Приложенная к пластинам разность потенциалов  $U$  связана с масштабами системы соотношением

$$U = E_* R_1 \theta = U_* \theta \quad (5)$$

Давление поля определяем из соотношения

$$D = \frac{\varepsilon_0 E_\varphi^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 E_*^2 R_1^2}{2r^2} = D_* R_1^2 / r^2, \quad (6)$$

где

$$D_* = \varepsilon_0 E_*^2 / 2 \quad (7)$$

– масштаб давления поля, а  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м – электрическая постоянная. Как видно из (6), давление поля убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

По (6) вычислим проекцию градиента давления

$$G_r = \frac{dD}{dr} = -\frac{\varepsilon_0 E_*^2 R_1^2}{r^3} = -G_* \frac{R_1^3}{r^3}, \quad (8)$$

где  $G_* = \varepsilon_0 E_*^2 / R_1 = 2D_* / R_1$  – масштаб градиента давления. Сам градиент направлен против оси  $r$ . Объёмная плотность силы  $f$ , противоположная градиенту давления, выталкивает слой зарядов, лежащих у поверхности катода, в направлении увеличения радиуса (см. рис. 8).

Несколько слов о направлении сил, действующих на слой электронов у катода, в этой геометрии электродов. Вектор напряжённости поля  $E_\varphi$  направлен перпендикулярно катоду по всей его площади. Вектор напряжённости входит в слой электронов и стремится увеличить толщину его шубы. Для холодных катодов это увеличение незначительно. Вторая объёмная сила  $f$  связана с градиентом давления. Она противоположна ему. Направление её действия совпадает с радиус-вектором системы. Она приложена сразу ко всем электронам шубы. В этом направлении действие коллективных сил, удерживающих электроны в шубе незначительно. В связи с этим слой электронов легко снимается и начинает своё движение в направлении оси координаты  $r$  (на рис. 8 на право).

Обсудим зависимость масштабов физических величин от геометрических параметров системы. Из (4) и (5) видно, что для одного и того же напряжения между обкладками  $U$  масштаб напряжённости  $E_*$  увеличивается с уменьшением переменных  $R_1$  и  $\theta$ . Для одного и того же напряжения на обкладках  $U$  масштаб напряжения  $U_*$  возрастает обратно пропорционально  $\theta$ . Масштаб давления поля растёт пропорционально квадрату масштаба напряжённости поля. А масштаб градиента давления поля прямо пропорционален квадрату напряжённости и обратно пропорционален  $R_1$  в первой степени.

Длина дуги любой силовой линии напряжённости электрического поля рассчитывается из простого соотношения ( $\theta$  в радианах). Для силовой линии 1-2 имеем

$$l_1 = R_1 \theta, \quad (9)$$

А для силовой линии 3-4 аналогично

$$l_2 = R_2 \theta. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что на более длинной линии будет достигаться меньшее значение напряжённости поля, поскольку напряжение на обкладках одинаково.

## О двух режимах вывода зарядов из инжектора

Геометрические параметры выводимого из инжектора планарного пучка представлены на рис. 9. Применены следующие обозначения: толщина пучка  $d$ , ширина пучка  $H$ , длина пучка  $R_2 - R_1$ .

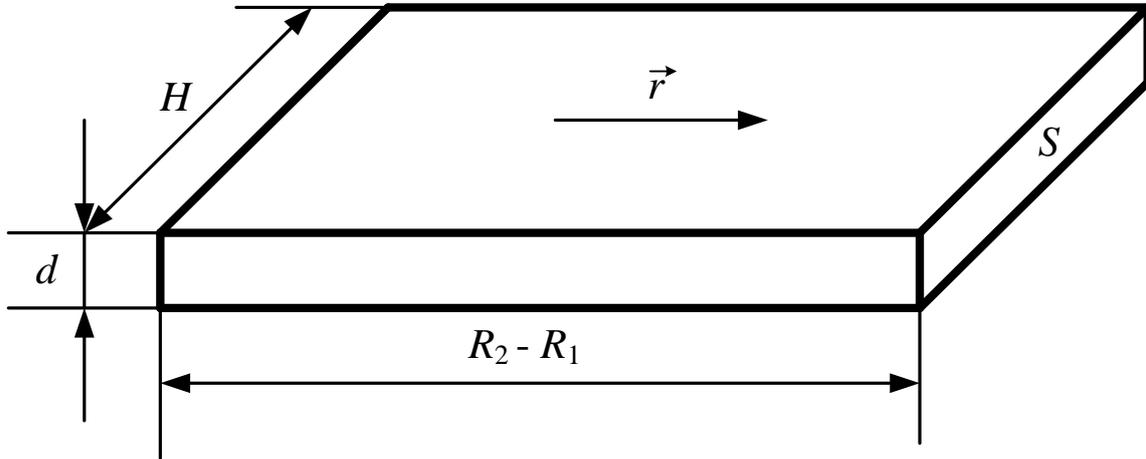


Рис. 9. Планарный слой зарядов у поверхности электродов.

Буквой  $S = Hd$  обозначена площадь поперечного сечения пучка, перпендикулярная направлению его движения вдоль оси  $r$ .

Среднее значение градиента давления поля, действующего на площадь слоя  $S$ , равно

$$\langle G \rangle = \frac{D_2 - D_1}{R_2 - R_1} = -\frac{G_*}{2} \frac{R_1}{R_2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = -\frac{D_*}{R_2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (11)$$

Средняя объёмная сила, действующая на слой зарядов, направлена против градиента давления поля и равна ему по модулю

$$\langle f \rangle = -\langle G \rangle. \quad (12)$$

При постоянном действии этой силы на выделенный слой электронов слой начинает ускоренное движение центра масс в том случае, если при движении слоя зарядов по катоду он не испытывает сил сопротивления. Это движение возникает всегда, когда поверхность катода – относительно гладкая. Это первый вид движения электронов по поверхности катода. Такое движение может реализоваться только в том случае, если слой электронов будет оставаться несжимаемым. При этом будем считать, что после ухода последнего электрона слоя весь слой движется с постоянной скоростью в вакууме при отсутствии внешних полей.

Если при движении зарядов слоя по катоду заряды испытывают вязкое трение, то через некоторое время движение становится стационарным и поток зарядов уже движется с постоянной стационарной скоростью. Причина возможного появления вязкого трения может быть связана с реальной шероховатостью поверхности металлического катода, либо с наличием на его поверхности микроскопических выступов, либо нанотрубок, которые необходимо пересекать потоку электронов. Также будем считать, что и в этом

случае после ухода последнего электрона слоя весь слой движется с постоянной скоростью в вакууме при отсутствии внешних полей. Это второй вид движения электронов по поверхности катода.

### Ускоренное движение центра масс несжимаемого слоя зарядов

В этом приближении будем считать, что слой зарядов несжимаем. Сам слой зарядов характеризуется однородной концентрацией электронов

$$n_0 = N/V, \quad (13)$$

где  $N$  – количество электронов, а  $V$  – объём зарядов слоя.

Из (13) легко построить объёмную плотность массы слоя

$$\rho_m = mn_0, \quad (14)$$

где  $m$  – масса электрона; объёмная плотность заряда слоя имеет вид

$$\rho_e = en_0, \quad (15)$$

где  $e$  – заряд электрона.

Запишем уравнение динамики для центра масс несжимаемого слоя зарядов

$$\langle f \rangle = \rho_m a, \quad (16)$$

где  $a$  – ускорение слоя зарядов. С учётом (11), (12) и (14) получим ускорение слоя

$$a = a_*(1 + R_1/R_2), \quad (17)$$

где

$$a_* = \frac{\varepsilon_0 E_*^2}{2mn_0 R_2} = \frac{D_*}{mn_0 R_2} \quad (18)$$

– масштаб ускорения.

Конечная скорость выхода слоя несжимаемых зарядов в вакуум

$$v_k = \sqrt{2a(R_2 - R_1)} = v_* \sqrt{(1 - R_1^2/R_2^2)}, \quad (19)$$

где

$$v_* = E_* \sqrt{\varepsilon_0 / (mn_0)} \quad (20)$$

– масштаб скорости.

Время выхода слоя зарядов в вакуум

$$\tau = \sqrt{\frac{2(R_2 - R_1)}{a}} = \tau_* \sqrt{\frac{(1 - R_1/R_2)}{(1 + R_1/R_2)}}, \quad (21)$$

где

$$\tau_* = \frac{2R_2}{E_*} \sqrt{mn_0 / \varepsilon_0} \quad (22)$$

– масштаб времени.

В этом же приближении рассчитаем параметры выводимого слоя несжимаемых зарядов. Заряд, накопленный в слое при однородной плотности

$$q = en_0 V = en_0 dH(R_2 - R_1). \quad (23)$$

Плотность тока пучка, выводимого из инжектора

$$j = en_0 v_k = j_* \sqrt{(1 - R_1^2/R_2^2)}, \quad (24)$$

где 
$$j_* = eE_* \sqrt{\varepsilon_0 n_0 / m} \quad (25)$$

– масштаб плотности тока.

Выводимый средний ток из инжектора

$$i = jdH = i_* \sqrt{(1 - R_1^2 / R_2^2)}, \quad (26)$$

где 
$$i_* = j_* dH \quad (27)$$

– масштаб тока.

Омическое сопротивление при ускоренном выводе пучка как целого

$$R = \frac{U}{i} = \frac{R_*}{\sqrt{(1 - R_1^2 / R_2^2)}}, \quad (28)$$

где 
$$R_* = \frac{R_1 \theta}{edH} \sqrt{m / (n_0 \varepsilon_0)} \quad (29)$$

– масштаб омического сопротивления. Он не зависит от напряжения, в связи с чем, вольтамперная характеристика такого инжектора с приёмным анодом будет линейная. Как видно из (29), масштаб омического сопротивления сильно зависит от угловой апертуры. Значение омического сопротивления (28) и будет давать основной вклад в сопротивление, которое подключено последовательно в цепь заряда конденсатора.

### Вязкое движение центра масс несжимаемого слоя зарядов

Запишем основное дифференциальное уравнение первого порядка, описывающее движение тела в вязкой среде (все переменные спроецированы на направление движения)

$$\langle f \rangle - \mu v = \rho_m \frac{dv}{dt}, \quad (30)$$

где  $\mu$  – приведённый к объёму коэффициент вязкости. При  $\frac{dv}{dt} \rightarrow 0$  из (30) следует стационарная скорость движения слоя

$$v_c = \langle f \rangle / \mu = \frac{D_*}{\mu R_2} (1 + R_1 / R_2) = v_{c*} (1 + R_1 / R_2), \quad (31)$$

где  $v_{c*}$  – масштаб стационарной скорости.

Время выхода слоя зарядов в вакуум при равномерном движении

$$T = \frac{R_2 - R_1}{v_c} = T_* \frac{(1 - R_1 / R_2)}{(1 + R_1 / R_2)}, \quad (32)$$

где 
$$T_* = \mu R_2^2 / D_* \quad (33)$$

– масштаб времени.

Плотность тока пучка, выводимого из инжектора

$$j = en_0 v_c = j_* (1 + R_1 / R_2), \quad (34)$$

где 
$$j_* = en_0 D_* / (\mu R_2) \quad (35)$$

– масштаб плотности тока.

Выводимый средний ток из инжектора

$$i = jdH = i_*(1 + R_1 / R_2), \quad (36)$$

где

$$i_* = j_*dH \quad (37)$$

– масштаб тока.

Омическое сопротивление при ускоренном выводе пучка как целого

$$R = \frac{U}{i} = \frac{R_*}{(1 + R_1 / R_2)}, \quad (38)$$

где

$$R_* = \frac{2\mu R_1 R_2 \theta}{e \varepsilon_0 n_0 E_* dH} \quad (39)$$

– масштаб омического сопротивления в этом случае, как и ранее, пропорционален угловой апертуре, но уже зависит от масштаба напряжённости электрического поля  $E_*$ . В этом режиме работы сопротивление имеет фиксированное значение, но будет изменяться при изменении амплитуды напряжения, приложенного к инжектору.

Чем выше будет напряжение на инжекторе, тем ниже будет значение омического сопротивления, которое, так же как и в предыдущем режиме, будет определять постоянную  $RC$  цепи заряда. То есть, вольтамперная характеристика, описывающая вязкое движение слоя зарядов, будет квадратичная по напряжению. В этом и заключается принципиальное отличие двух режимов работы электронного инжектора с угловой апертурой.

На рис. 10 представлены схематично две вольт-амперные характеристики, которые будут реализоваться в автоэлектронном инжекторе при наличии третьего электрода внутри пространства дрейфа – анода. Первая характеристика описывает ускоренное движение зарядов токового слоя, а вторая – вязкое движение зарядов того же слоя.

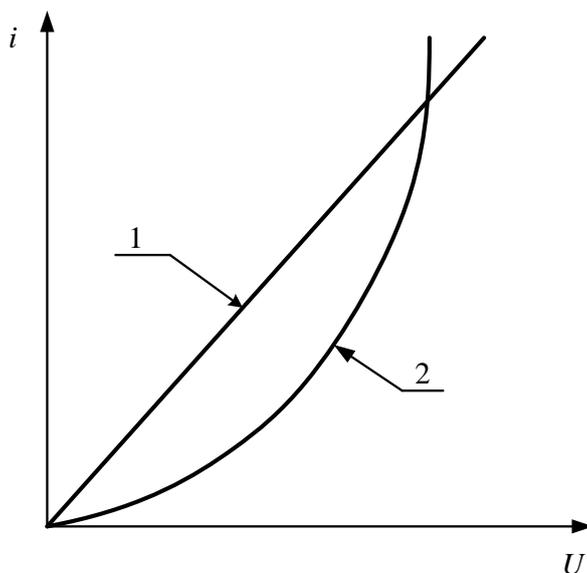


Рис. 10. Вольтамперные характеристики автоэмиссионного инжектора с угловой апертурой для двух режимов работы.

## Об эффекте формирования зарядовых кластеров слоем зарядов, выходящих в вакуум

Поскольку электронная шуба в реальных условиях является сжимаемой, то точное описание эффекта деформации шубы при её движении у поверхности катода не представляется возможным. Причина этого заключается в том, что в начальный момент, по предположению, она представляет собой однородный слой электронов. В направлении оси  $r$  на каждый её элементарный слой  $dx$ , находящийся на расстоянии  $x$ , действует своя объёмная плотность сил  $\vec{f}$ , которая убывает обратно пропорционально кубу расстояния (см.(8)).

На рис. 11 представлен увеличенный размер электронной шубы, лежащей на катоде, и действующая на её элементарный объём плотность сил  $\vec{f}$ . Введены обозначения:  $S$  – площадь поперечного сечения слоя зарядов,  $x$  – расстояние элементарного слоя от плоскости  $R_1=const$ ,  $dx$  – толщина элементарного слоя зарядов; Числа 2 и 4 обозначают силовые линии напряжённости электрического поля в областях пространства 1 (внутри системы) и 2 (вне системы) соответственно.

Из рис. 11 видно, что на плоский слой зарядов, прижатый к плоскости  $R_1=const$ , действует самый большой градиент давления (она ближе к оси  $z$  на рис. 8). Постепенное удаление элементарного слоя зарядов в направлении оси  $x$  приводит к убыванию градиента давления, действующего на такой элементарный слой. На элементарный слой зарядов, прижатый к плоскости  $R_2=const$ , действует самый маленький градиент давления поля. Это приводит к тому, что при одинаковой плотности слоёв, элементарный слой у плоскости  $R_1=const$  получает большее ускорение, чем такой же слой, прижатый к плоскости  $R_2=const$ .

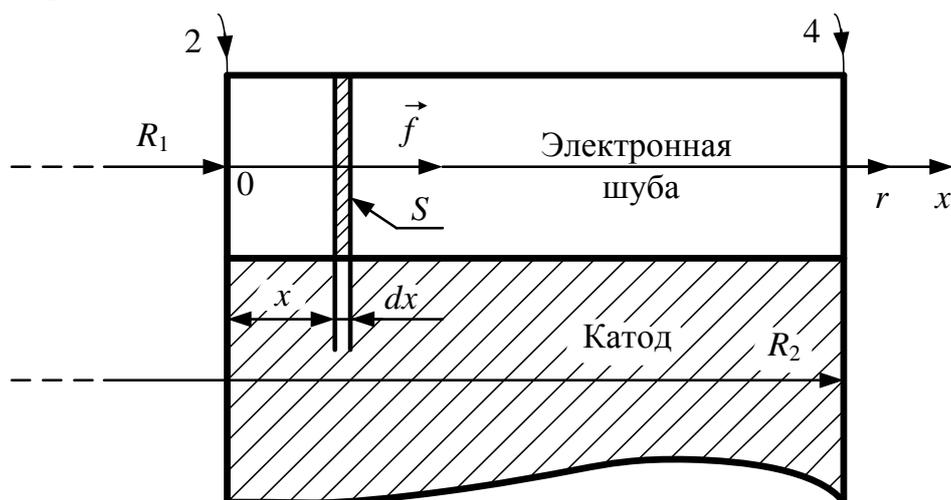


Рис. 11. Увеличенный размер электронной шубы.

Таким образом, на весь слой в начальный момент времени действует поле ускорений, которое уменьшается обратно пропорционально кубу расстояния. В следующий момент времени каждый неподвижный элементарный слой

начинает приобретать скорость. Через один и тот же элемент времени слой зарядов будет иметь поле скоростей, убывающее с ростом координаты  $x$  – места расположения элементарного объёма.

Весь слой начинает движение с разным значением ускорения, присущему отдельному элементарному слою. Перемещение в соседнюю точку уменьшает ускорение каждого элементарного слоя, приводя к изменению его скорости движения. Начнётся сжатие исходного слоя зарядов и перемешивание. Слой зарядов перестаёт быть однородным. Явление сжатия очень похоже на явление бунчировки «самосжатия» пучка электронов, которое возникает в прямопролётных клистронах. В нашем случае эффект сжатия приводит к формированию ограниченного в пространстве зарядового кластера (ЗК).

Оценим время сжатия слоя зарядов (время образования ЗК) в следующем приближении: а) первоначальные ускорения, полученные крайними элементарными слоями, прижатыми к плоскостям  $R_1$  и  $R_2$ , остаются неизменными в течение всего времени движения центра масс слоя в вакуум; б) в течение всего времени движения центра масс концентрация зарядов в слое остаётся однородной и увеличивается одинаково во всём слое.

Координата левого крайнего элементарного слоя изменяется во времени по закону

$$x_1 = \frac{f_1 \tau^2}{2\rho_m}. \quad (40)$$

Аналогично, координата правого крайнего элементарного слоя изменяется по закону

$$x_2 = \frac{f_2 \tau^2}{2\rho_m} + R_2 - R_1. \quad (41)$$

Новая длина слоя

$$l_1 = x_2 - x_1. \quad (42)$$

Найдём время, за которое новая длина слоя  $l_1$  обратится в нуль из соотношения  $x_1 = x_2$ . Из него следует соотношение, из которого можно оценить порядок времени образования ЗК

$$\tau_{3k} = \sqrt{\frac{2\rho_m R_2 (1 - R_1 / R_2)}{G_* (1 - R_1^3 / R_2^3)}} = \tau_{3k*} \sqrt{\frac{(1 - R_1 / R_2)}{(1 - R_1^3 / R_2^3)}}, \quad (43)$$

где  $\tau_{3k*}$  – масштаб времени образования ЗК.

В связи с тем, что любой инжектор электронов преобразует плотность заряда  $\rho_0$  исходного заряженного слоя в плотность заряда  $\rho_k$  выбрасываемого кластера можно ввести параметр преобразования плотности заряда инжектором

$$\beta = \rho_k / \rho_0 > 1. \quad (44)$$

## Вакуумный накопитель зарядов с автоэлектронным инжектором

На рис. 12 представлена функциональная структура вакуумного накопителя зарядов с автоэлектронным инжектором с угловой апертурой.

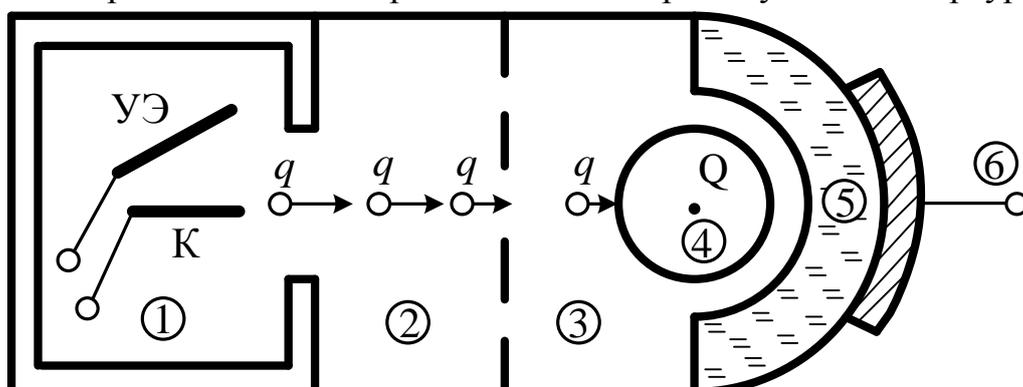


Рис. 12. Функциональная схема вакуумного накопителя.

На рис. 12 приняты обозначения:  $K$  – катод,  $УЭ$  – управляющий электрод,  $q$  – заряд, переносимый одиночным кластером,  $Q$  – заряд, собранный в главном накопителе. Цифрами в кружочках обозначены 1 – автоэлектронный инжектор, 2 – пространство дрейфа, 3 – главный накопитель (ГН), 4 – область, занятая накопленными зарядовыми кластерами с зарядом  $Q$ , 5 – высоковольтная керамика, 6 – анод накопителя.

Приводимая функциональная структура при накоплении зарядов в ГН изменяет свою электрическую ёмкость относительно электродов, которые подсоединены к  $УЭ$  и  $K$ . При этом начальная электроёмкость устройства совпадает со значением электроёмкости между электродами  $УЭ$  и  $K$  при отсутствии зарядов в главном накопителе. Последующая электроёмкость устройства будет зависеть от значения накопленного заряда  $Q$ . Она может значительно возрастать.

Причины этого заключаются в том, что накопленный заряд  $Q$  системы обычно образует сферический зарядовый кластер, прижимаемый анодом 6 к высоковольтной керамике 5. Ёмкость такого кластера уже зависит от заряда, который им накоплен. Как показывают предварительные эксперименты, можно достигнуть увеличения ёмкости сферического кластера, по сравнению с межэлектродной ёмкостью  $УЭ-K$  до значений порядка  $10^9$  раз.

При этом накопление заряда установкой сопровождается подведением импульсов одинакового высокого напряжения на обкладки  $УЭ$  и  $K$ . Подведённый заряд сбрасывается с катода градиентом давления поля инжектора и направляется через пространство дрейфа в главный накопитель. Одиночные зарядовые кластеры объединяются в накопителе самосогласованным полем. Их поле скоростей указано схематично на рис. 12.

Процесс накопления заряда прекращается в тот момент, когда накопленные в заряд  $Q$  кластеры начинают создавать градиент давления поля у поверхности кластера  $Q$  того же порядка, какой они имеют сами. Но, это необходимое условие окончания накопления зарядов таким вакуумным

конденсатором должно быть дополнено достаточным условием обращением в нуль скорости налетающего ЗК.

Первый зарядовый кластер, влетевший в главный накопитель, для следующего ЗК будет иметь тот же градиент давления поля, что и предыдущий, если они одинаковы по геометрическим размерам и значению заряда. Их слияние будет происходить по причине того, что второй налетающий ЗК будет иметь ненулевую конечную скорость.

Если, по каким либо причинам, он остановится рядом с первым и их слияния не произойдет, то накопленный заряд  $Q$  может изменить свою сферическую центральную структуру на сферическую систему, заполненную пузырьками зарядовых кластеров различных размеров типа bubble's structure. Такое отличие можно зафиксировать по величине объемной плотности пространственного заряда, находящегося к концу заряда в главном накопителе.

Рассмотренный прибор увеличения ёмкости с ростом накопления зарядов следует отнести к классу приборов, использующих объемные плотности скоплений зарядов высокой плотности HDCC (*High Density Charge Cluster*), открытый и запатентованный Кеном Шоулдерсом в [8-12].

### Возможные конструктивные решения для автоэмиссионных инжекторов

На рис. 13 представлен модифицированный планарный автоэмиссионный инжектор с угловой апертурой  $\theta$ . На рис. 13 цифрами обозначены: 1 – катод, 2 – управляющий электрод. Мы будем сохранять принятые обозначения на всех следующих технологических прототипах. Жирная стрелка указывает направление противоположное градиенту давления электрического поля инжектора.

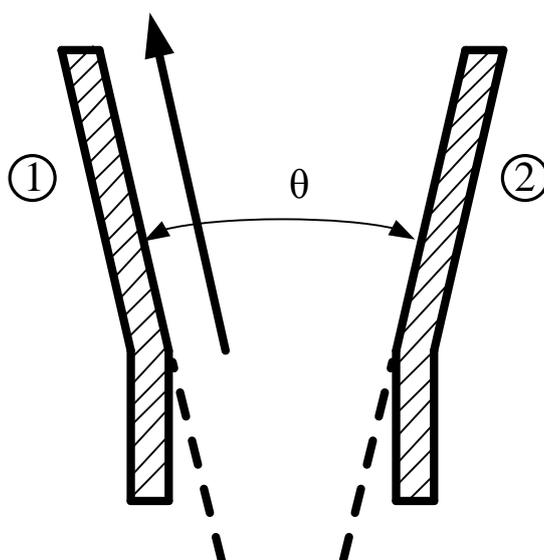


Рис. 13. Модифицированный планарный автоэмиссионный инжектор.

В этом направлении будет выводиться слой группирующихся зарядов. В этом же направлении должен находиться главный накопитель системы. Полученные расчёты такого инжектора указывают на то, что можно получать инжекторы с большим градиентом давления. Это будут инжекторы, которые имеют апертурный угол порядка 0,1 радиана и меньше.

На рис. 14 представлен осесимметричный инжектор, имеющий угловую апертуру  $\theta$  с острым катодом. В этом случае формирование зарядовых кластеров будет происходить в направлении, указанном жирной стрелкой. Уменьшение апертурного угла будет способствовать увеличению градиентов давления в инжекторе. При  $\theta \rightarrow 0$  инжектор переходит в конструкцию, предложенную Шоулдерсом. Отдельно она изображена на рис. 15.

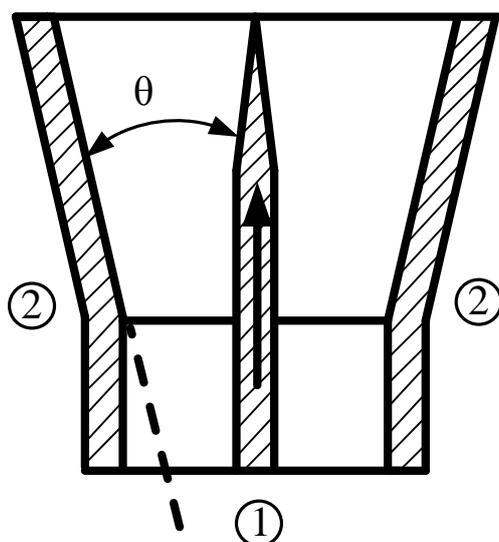


Рис. 14. Осесимметричный инжектор с угловой апертурой.

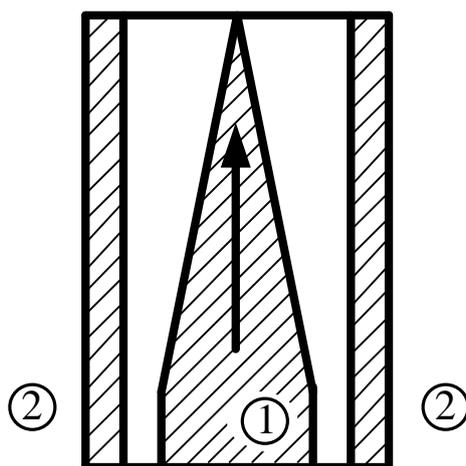


Рис. 15. Конструкция Шоулдерса.

На рис. 16 представлен осесимметричный инжектор, который отличается от предыдущих инжекторов введением по оси катода полого канала. Он нужен для того, чтобы заряды скапливались в искусственном кратере катода и формировали зарядовый кластер с размерами выходного отверстия.

Направление движения зарядовых кластеров совпадает с жирной стрелкой. Изменение кратера катода будет приводить к изменению геометрических размеров ЗК.

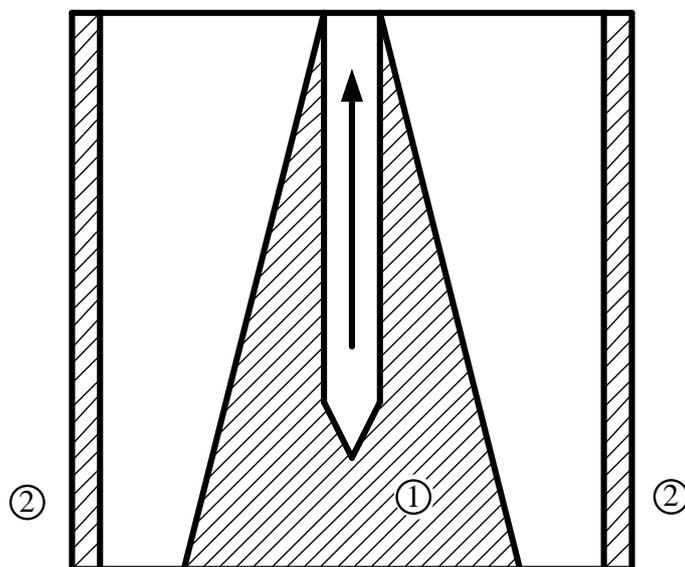


Рис. 16. Осесимметричный инжектор с полым каналом.

На рис. 17 представлен осесимметричный конический инжектор с малым апертурным углом. Он должен быть устойчивым по отношению к износу поверхности генерации ЗК. Малый апертурный угол будет давать значительные градиенты давления в инжекторе. В нём может быть также предусмотрен полый канал для формирования ЗК с размерами выходного отверстия.

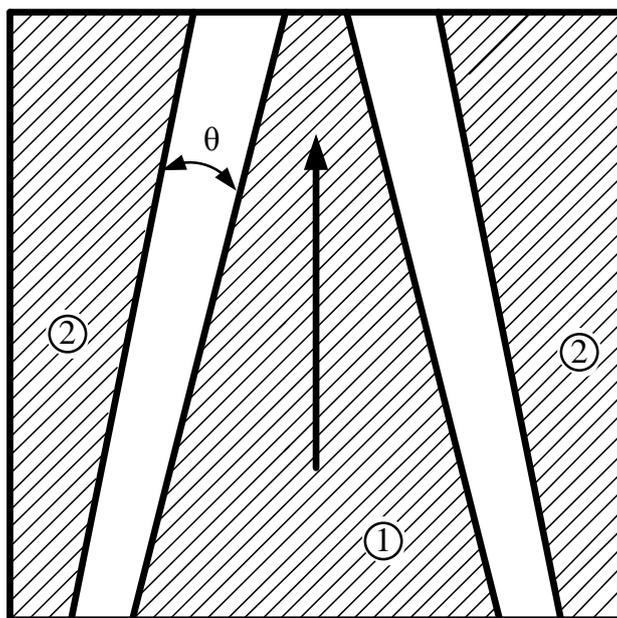


Рис. 17. Осесимметричный конический инжектор с малой апертурой.

## Оценки физических параметров инжектора и вакуумного накопителя зарядовых кластеров в сантиметровом диапазоне размеров

1. *Характеристики электронного облака.* Радиус  $R_1=10$  мм. Радиус  $R_2=30$  мм. Длина слоя  $R_2-R_1=20$  мм. Ширина слоя  $H=20$  мм. Толщина слоя  $d=10$  мкм. Площадь поперечного сечения слоя зарядов  $S=Hd=2 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>. Объём слоя  $V=(R_2-R_1)S=40 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>. Предположим, что объёмная плотность зарядов облака совпадает со средней плотностью зарядов в EV Шоулдерса  $\rho_e=4 \cdot 10^5$  Кл/м<sup>3</sup>. Такой слой при однородном распределении зарядов содержит заряд  $q=1,6$  мКл. Он будет совпадать с зарядом одиночного кластера, уходящего в пространство дрейфа. Один слой содержит количество электронов  $N=10^{16}$ . Это на пять порядков выше, чем в EV Шоулдерса. Концентрация электронов в слое  $n_0=2,5 \cdot 10^{24}$  м<sup>-3</sup>. Полученные цифры не могут быть достигнуты в острых инжекторах миллиметровых размеров. Площадь исходной поверхности катода инжектора 40 мм<sup>2</sup>.

2. *Электрические характеристики накопителя.* По данным эксперимента в накопитель пришло  $Q=90$  Кл. Напряжение (потенциал) накопителя  $U=25$  кВ. Электрическая ёмкость накопителя  $C=3,6$  мФ против начальной ёмкости 3,0 пФ.

3. *Угловая апертура инжектора  $\theta=1$  ( $57,3^\circ$ ).* Для такой апертуры масштаб напряжения совпадает с напряжением на инжекторе  $U^*=U$ . Масштаб напряжённости поля  $E^*=2,5 \cdot 10^6$  В/м= $2,5$  В/мкм. Цифра близка к значениям напряжённости, достигаемым в работающих катодах-инжекторах Шоулдерса-Спиндта. Масштаб давления поля  $D^*=28$  Па. Масштаб градиента давления поля  $G^*=5,5$  кПа/м.

4. *Количество зарядовых кластеров  $N_k$ , необходимых для сбора заряда  $Q=90$  Кл в главном накопителе.*  $N_k=Q/q=56000$  кластеров.

**РЕЖИМ РАБОТЫ ИНЖЕКТОРА №1. Ускоренное движение центра масс несжимаемого слоя зарядов.**

5. Масштаб ускорения слоя зарядов  $a^*=4 \cdot 10^8$  м/с<sup>2</sup>. Масштаб скорости  $v^*=5 \cdot 10^3$  м/с. Масштаб времени выхода слоя зарядов в вакуум  $\tau^*=12 \cdot 10^{-6}$  с. Масштаб плотности тока пучка, выводимого из инжектора  $j^*=2 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>= $2 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Огромная величина (приводится в [3]) оказывается меньше на три порядка, чем порядок величин, наблюдаемый в триоде Шоулдерса  $\sim 10^8$  А/см<sup>2</sup>. Масштаб тока пучка  $i^*=400$  А значительно превышает достигнутые в автоэлектронных катодах. Масштаб омического сопротивления  $R^*=63$  Ом.

6. Если предположить, что длительность импульса внешнего источника питания совпадает с масштабом времени выхода слоя зарядов в вакуум, а затем следует «пауза», занимающая такое же время (импульс внешнего поля отсутствует), то полное время выноса в главный накопитель заряда в 90 Кл составит 1,5 с.

## **РЕЖИМ РАБОТЫ ИНЖЕКТОРА №2. Вязкое движение центра масс несжимаемого слоя зарядов.**

7. Выбираем коэффициент вязкости, приведённый к объёму  $\mu=18,7 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ . Масштаб скорости понижается на два порядка  $v_*=50 \text{ м}/\text{с}$ . Масштаб времени выхода слоя зарядов в вакуум увеличивается до  $T_*=6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ . Масштаб плотности тока пучка, выводимого из инжектора  $j_*=2 \cdot 10^7 \text{ А}/\text{м}^2=2 \cdot 10^3 \text{ А}/\text{см}^2$ . Также не малая величина. Масштаб тока пучка уменьшился в 100 раз  $i_*=4 \text{ А}$ , а масштаб омического сопротивления  $R_*=6,3 \text{ кОм}$  увеличился в 100 раз.

8. Если предположить, что длительность импульса внешнего источника питания совпадает с масштабом времени выхода слоя зарядов в вакуум, а затем следует «пауза», занимающая такое же время (импульс внешнего поля отсутствует), то полное время выноса в главный накопитель заряда в 90 Кл составит 67,2 с.

9. Из соотношения (43) можно оценить масштаб времени образования ЗК для исходных параметров установки. Оно составляет величину  $\tau_{3k}=4 \text{ мкс}$ . Это время в три раза меньше масштаба времени соскальзывания заряда с катода при ускоренном движении центра масс.

10. Оценим радиус сферического зарядового кластера в главном накопителе из ёмкостных соображений. Обобщим значение ёмкости, полученное нами для плоского накопителя [18], на сферическую симметрию. Получим соотношение

$$C = 4\pi\vartheta\epsilon_0 R, \quad (45)$$

где  $\vartheta$  – безразмерный коэффициент электризации. Из экспериментов для лампы 1Ц21П имеем  $\vartheta=1,2 \cdot 10^9$ . Тогда из (45) следует радиус кластера в главном накопителе  $R=2,7 \text{ см}$ . Если его перевести в объём шара, то получим  $82,5 \text{ см}^3$ . Как он помещался в объём лампы  $24 \text{ см}^3$  не очень понятно, но рассчитанные величины отличаются всего в 3,4 раза, что допустимо. Нам кажется, что кластер «вылез» из стеклянной колбы лампы и его уже удерживал внешний изолятор, в который была помещена лампа.

11. По полученным числам легко вычислить фактическую плотность заряда кластера в главном накопителе. Она равна  $1,1 \text{ Кл}/\text{см}^3$ . Это всего в  $\beta=2,73$  раза больше, чем объёмная плотность заряда в плёнке, лежащей на поверхности анода. Отсюда понятна проблема, стоящая при создании любых электронных инжекторов: коэффициент преобразования плотности заряда  $\beta$  (отношение плотности заряда в ГН к плотности заряда в плёнке) должно быть в 10 (или лучше в 100) раз больше.

12. Рассчитаем градиенты давления у поверхности заряженного сферического кластера из следующих соображений. Поле для внешнего наблюдателя будет спадать обратно пропорционально квадрату расстояния

$$E = kQ/r^2. \quad (46)$$

Вводя над поверхностью кластера радиусом  $R$  высоту  $h$ , оценим в приближении  $h/R \ll 1$  возникающие градиенты давления. Давление поля изменяется по закону

$$D = D_*(1 + h/R)^{-4}, \quad (47)$$

где масштаб давления вычисляется из соотношения

$$D_* = \frac{\varepsilon_0 k^2 Q^2}{2R^4}. \quad (48)$$

Масштаб градиента давления следует из (48)

$$G_* = \frac{2\varepsilon_0 k^2 Q^2}{R^5}. \quad (49)$$

Соотношение (49) позволяет вычислять масштабы величин для заряженных шаров произвольного радиуса с любым зарядом. Для накопленного заряда в ГН получим значительный масштаб градиента давления  $G_* = 8 \cdot 10^{20}$  Па/м.

13. По соотношению (49) можно определить радиус зарядового кластера  $R_{зк}$ , слетающего с эмиссионного катода с зарядом  $q = 1,6 \cdot 10^{-3}$  Кл, и имеющего такой же градиент давления поля. Он оказывается равен  $R_{зк} = 260$  мкм. А средняя плотность заряда в таком кластере  $22$  Кл/см<sup>3</sup>. То есть, ЗК, слетая с пластин, сначала увеличивает свою среднюю плотность заряда с  $0,4$  до  $22$  Кл/см<sup>3</sup>. А уходя в накопитель, приобретает объёмную плотность заряда в  $1,1$  Кл/см<sup>3</sup>. Такое уменьшение в  $20$  раз указывает на формирование в ГН вакуумного диода 1Ц21П пузырьковой структуры (*bulb's structure*) ЗК.

### **Новые направления исследований и применения автоэлектронных инжекторов**

Правильно понятый механизм формирования ЗК в автоэлектронном инжекторе позволяет предложить новые направления исследований и применения автоэлектронных инжекторов. Последние эксперименты по протеканию постоянного тока ( $1$  А) в водородной плазме атмосферного давления [19] с накачкой электрической энергии в  $30$  кВт указали на то, что в ней возникает избыточное энерговыделение, как тепловое, так и электрическое. Работы были начаты группой академика Б.И.Каторгина в НПО «Энергомаш» (Химки) в 2005 году.

При проведении экспериментов водородная плазма зажигалась между латунными цилиндрическими соосными электродами, находящимися друг от друга на расстоянии около  $12$  см. Возникающие в плазме токи располагались в виде сотен светящихся шнуров по образующей цилиндра. На уровне постоянного тока в  $1$  А были зарегистрированы микросекундные хаотические выбросы тока с амплитудой до  $60$  А, которые и объясняли причины избыточного энерговыделения.

В личной беседе с экспериментаторами было выяснено, что избыточную тепловую и электрическую энергию в объём плазмы поставляют зарядовые

кластеры-плазмойды. Они образуются на границах электрод-плазма в том самом месте, где происходит скачок напряжённости электрического поля. Этот скачок появляется из-за сильной неоднородности проводимости в этом месте (переход металл-плазма).

По реактору избыточного катодного тока, возникающего в водородном потоке движущейся плазмы, была опубликована совместная работа в [20].

В наше время, одним из авторов [19], на этом принципе в частной лаборатории построен сверхединичный нагревательный прибор, который поставляют тепловую энергию потребителю с коэффициентом 2. На других газах им же зарегистрирована избыточная электрическая энергия, которая на порядок отличается от вводимой в объём плазмы.

В настоящее время стало понятно, что за эффективность этой трансформации энергии в плазме отвечает геометрия электродов. Рассчитанные и предложенные нами прототипы автоэмиссионных инжекторов необходимо применить для формирования более эффективных зарядовых кластеров-плазмойдов в водородной плазме и плазме других газов. При этом для поиска эффекта на переменном токе можно пробовать либо симметричные пары электродов, либо применять дополнительную инжекторную накачку зарядовыми кластерами-плазмойдами.

Для реализации такой кластерно-плазмойдной программы следует создать предложенные прототипы в сантиметровых размерах пока из меди. Затем выполнить небольшую исследовательскую работу, которая позволит выяснить при каких геометриях электродов (острийная, планарная, цилиндрическая) и расстояниях между ними происходит пробой в воздухе. Сами электроды следует подключать к блоку накачки на переменном токе с 15-и киловаттной мощностью, выполненному на тороидальных катушках.

Это позволит измерить пробивные напряжения на переменном токе и их зависимость от расстояния между электродами и самой геометрией электродов. Известная цифра по пробивному напряжению в воздухе 25 кВ/см взята из экспериментов Пашена для атмосферного давления и температуры воздуха 20<sup>0</sup>С. Они проводились для постоянного тока и для различных расстояний между плоскими цилиндрическими электродами. На переменном токе для других геометрий электродов её можно уменьшить на порядок.

После отработки этих экспериментов будет ясно, какие окончательные размеры нужно установить для инжекторов, формирующих кластеры-плазмойды в атмосферном воздухе или водородной плазме. Потом отработанные инжекторы можно использовать для генерации зарядовых кластеров, либо плазмойдов с отрицательным зарядом миллиметровых и больших радиусов не только в атмосферном воздухе (что интересно для исследования снижения радиоактивности мишеней, либо генерации искусственной шаровой молнии), но и в плазме водорода и других газов для создания сверхединичных приборов широкого назначения.

Замечательным свойством исследуемых несимметричных инжекторов сантиметровых и миллиметровых размеров является тот факт, что при

определённых геометриях они будут обладать вентильными свойствами. Причина этого заключается в том, что подача на них переменного напряжения будет приводить к срыву электронной подушки на инжекторе только в тот момент, когда на катоде будет находиться отрицательная полуволна напряжения. Она будет в течение 20 мс формировать электронную шубу на катоде и срывать её в направлении мишени.

При положительной полуволне напряжения электроны, попадающие на другой электрод, не смогут двигаться в направлении градиента давления поля, который определяется геометрией системы, поскольку в этот момент он направлен так, что прижимает их к тому электроду, на котором они находятся.

Сам градиент давления поля не может изменить своё направление в пространстве, поскольку он зависит только от квадрата напряжённости. Поэтому изменение направления силовых линий напряжённости электрического поля не может изменить направление градиента давления поля.

Думаем, что свойство вентильности инжекторов будет наблюдаться не только в вакууме, но и при наличии внешней атмосферы. Заметим, что уменьшение размеров предложенных инжекторов до наноразмеров приведёт к потере упомянутых выше вентильных свойств. В этом случае катод и управляющий электрод всегда будут находиться в порождаемом ими электронном облаке, которое будет иметь проводимость, не зависящую от полярности электродов.

Предлагаемое направление исследований также позволит создать воздушные накопительные конденсаторы с большой ёмкостью.

## ВЫВОДЫ

*1. Физические причины удержания одноимённых зарядов в ограниченной области пространства следующие: элементарный объём зарядов любого знака в кластере удерживается двумя противоположно направленными силами. Одна из сил – сила, направленная по вектору напряжённости электрического поля (для положительных зарядов), а другая – сила, направленная против градиента давления самосогласованного поля. И если первая сила, действует на элементарный заряд кластера (или на зарядовую плотность кластера), то вторая действует на массовую плотность того же кластера точно также, как действует сила Бернулли.*

*2. Плоская система электродов может приводить только к незначительному увеличению толщины электронной шубы, образующейся на катоде, действием напряжённости внешнего поля системы. Электроны шубы будут стремиться двигаться против силовых линий внешнего электрического поля, но силы коллективного взаимодействия оказываются значительно больше и продолжают удерживать шубу у поверхности катода. Нулевой градиент давления внешнего электрического поля никакого действия на заряды шубы не оказывает. В связи с этим, система плоских*

электродов не может быть использована в качестве конструкции инжектора электронов.

3. В цилиндрической симметрии электродов на шубу электронов действуют две силы – электрическая, связанная с напряжённостью поля, а вторая – газостатическая, связанная с градиентом давления электрического поля. Они обе направлены в одну сторону и перпендикулярны поверхности катода. Силы немного увеличивают толщину электронной шубы, но при отсутствии нагрева катода не могут заполнить всё расстояние между катодом и анодом.

4. Экспериментально исследуемая конфигурация, выполненная на основе вакуумного диода 1Ц21П с дополнительным анодом, изолированным в керамику, имела область с сильно неоднородным полем в районе конца осесимметричного катода. Силы, отбрасывающие заряды электронного облака, направлены в одну сторону к аноду. Это и объясняет обнаруженный эффект накопления зарядов.

5. Предложен планарный трёхножевой инжектор, который формирует необходимые силы для выбрасывания заряда в направлении острия катода.

6. Исследованы распределения электрических полей в градиентном электронном инжекторе с угловой апертурой.

7. Рассчитано направление и величина силы, стягивающей электронную шубу в направлении оси  $r$ .

8. Выяснено существование двух режимов вывода зарядов из инжектора: ускоренное движение центра масс несжимаемого слоя зарядов и его вязкое движение.

9. Рассчитаны основные физические параметры вывода зарядов из инжектора: ускорение, конечная скорость, время выхода зарядов в вакуум, плотность тока, средний ток пучка, омическое сопротивление и вольтамперные характеристики процесса вывода.

10. Полученные параметры в сотни раз отличаются друг от друга для разных режимов работы. Это указывает на то, что триод Шоулдерса и катод Спиндта работали в различных режимах вывода слоя электронов в вакуум.

11. Исследован эффект формирования зарядовых кластеров слоем зарядов, выходящих в вакуум. Сделаны оценки масштаба времени образования ЗК.

12. Введён параметр преобразования плотности зарядов инжектором.

13. Предложено схемное решение для конструкции вакуумного конденсатора в виде вакуумного накопителя зарядов с автоэлектронным инжектором.

14. Обсуждаются конструктивные решения для автоэлектронных инжекторов: модифицированный планарный инжектор; осесимметричный

инжектор с угловой апертурой; осесимметричный инжектор, с полым каналом; осесимметричный конический инжектор с малой апертурой.

15. Приведены оценки физических параметров инжектора и вакуумного накопителя зарядовых кластеров в сантиметровом диапазоне размеров, из которых следует, что в экспериментах с лампой 1Ц21П радиус кластера с зарядом в 90 Кл в главном накопителе составлял 2,7 см.

16. На математической модели выяснено, что ЗК, слетая с пластин инжектора, увеличивает свою среднюю плотность заряда с 0,4 до 22 Кл/см<sup>3</sup>. А уходя в накопитель, приобретает объёмную плотность заряда в 1,1 Кл/см<sup>3</sup>. Такое уменьшение в 20 раз указывает на формирование в главном накопителе вакуумного диода 1Ц21П пузырьковой структуры (bulb's structure) ЗК.

17. Потенциал всех переносимых зарядовых кластеров и зарядового кластера в главном накопителе всегда совпадает с разностью потенциалов, приложенной между катодом и управляющим электродом инжектора.

18. Оценки геометрических размеров вакуумного конденсатора указывают на то, что для накопления заряда в 90 Кл требуется рабочая область, занятая прибором, около 800 см<sup>3</sup>.

19. Электрическая ёмкость, измеряемая относительно катода и управляющего электрода инжектора, складывается из двух составляющих: межэлектродной ёмкости инжектора и ёмкости зарядового кластера в главном накопителе. Поскольку последняя ёмкость может превышать первую в миллионы и миллиарды раз, то это и указывает на перспективность предлагаемого способа накопления зарядов.

20. Образование bubble's structure внутри изолятора главного накопителя можно избежать, используя для накопления внешнюю поверхность полой металлической сферы, закрытой диэлектриком, обычно применяемую в пеллетронах.

21. Приближённое аналитическое решение, найденное для инжектора с угловой апертурой, применимо только для инжекторов с такой высокой симметрией в области не слишком маленьких угловых апертур  $\theta > 0,1$ . Распределение электростатических полей для инжекторов с острой и цилиндрической геометриями можно найти только численными методами решения уравнения Лапласа.

22. Упомянутое свойство вентильности несимметричных инжекторов представляет интерес для создания нового класса мощных выпрямляющих устройств на вакуумных триодах.

23. Вентильное свойство отсутствует у инжектора с угловой апертурой. Изменение полярности электродов будет приводить к выбрасыванию электронной шубы в другом направлении. Оно будет параллельно той плоскости, которая в этот момент будет заряжена отрицательно. Эффект можно использовать для сбора зарядов в двух накопителях одновременно.

24. Уменьшение габаритов инжекторов до миллиметровых размеров позволит их применить для построения мощных источников сфокусированных ЗК в СВЧ-клистронах. Для этого можно использовать режим постоянного тока, который будет на выход инжектора поставлять удерживаемый самосогласованным полем цилиндрический пучок электронов [21], но промодулированный по плотности

25. Области применения разработанных электронных инжекторов нам видятся в вакуумных и воздушных системах накопления заряда; в системах генерации ЗК и плазмоидов для их отдельного использования при бомбардировке радиоактивных мишеней с целью снизить их радиоактивность, либо для технологий обработки поверхности мишени ЗК; в системах создания нелетального оружия электрического воздействия; в попытках экспериментального воспроизведения искусственной шаровой молнии на уровне накопленного заряда от 1 до 100 Кл.

26. Градиентные инжекторы могут быть применены для создания особой плазмы, насыщенной зарядовыми кластерами и плазоидами. Исследования свойств такой водородной плазмы при атмосферных давлениях с накачкой в 30 кВт мощности указывают на возможность её использования для создания сверхединичных приборов энергетики, которые могут быть применены как для теплового нагрева, так и для сверхединичного преобразования электрической энергии, вводимой в плазму.

## Заключение

В заключительной части брошюры необходимо уделить внимание неожиданно возникшей конкуренции математических моделей, объясняющих автоэлектронную эмиссию.

Первая модель эмиссии электронов из металла была построена Фаулером и Нордгеймом в 1928 году. В её основу был положен туннельный эффект, чрезвычайно модный в то время. Этот эффект был рождён бурно развивающейся квантовой теорией. Он не имел аналогов в классической физике и смог объяснить и предсказать большое число непонятных явлений. Из них: резонансное прохождение электронов через потенциальный барьер Л.И.Мандельштама и М.А.Леонтовича; явление  $\alpha$  - радиоактивности тяжёлых ядер, предложенное Г.Гамовым; явление слияния лёгких ядер при термоядерных реакциях; работа сверхпроводящего перехода Джозефсона и туннельного диода; и, наконец, теория холодной эмиссии электронов твёрдого тела с его поверхности.

Для объяснения эффекта холодной эмиссии авторы использовали базовые положения физики твёрдого тела, существующие в зонной теории металлов. На границе раздела металл-вакуум образуется потенциальный барьер. По мере увеличения внешнего приложенного поля понижается величина потенциального барьера над уровнем Ферми и уменьшается его ширина.

Следовательно, увеличивается вероятность проникновения через барьер электронов, находящихся в металле, и подлетающих к барьеру со стороны металла. Роль внешнего поля сводится только к изменению формы потенциального барьера, уменьшению его высоты и ширины. В рамках такой математической модели плотность тока автоэлектронной эмиссии выражается зависимостью

$$J = AF^2 \exp(-B \cdot \varphi^2 / F), \quad (50)$$

где  $\varphi$  - работа выхода электрона из металла, измеряемая в электрон-вольтах,  $F$  – напряжённость внешнего электрического поля (измеряется в В/мкм), а плотность тока  $J$  измеряется в А/мкм<sup>2</sup>. Функции  $A$  и  $B$  зависят от геометрии системы и работы выхода. Из (50) следует, что вольт-амперная характеристика автокатода Фаулера-Нордгейма сильно нелинейная.

Уточним, какую же автоэмиссию описывает предложенная математическая модель? Она описывает автоэлектронную эмиссию, создаваемую свободными электронами твёрдого тела, выходящими из металла. Какие принятые здесь умолчания не прописались в контексте решаемой задачи?

Самое важное умолчание следует отнести к принятой модели электризации металла. Она состоит в следующем. Рассматриваемый металл – макроскопический катод, в котором проявляются квантовые свойства. Он подключён к отрицательному полюсу источника. Внешняя, по отношению к катоду, напряжённость поля формируется анодом, который подключён к положительному полюсу источника тока.

Каждый электрон, выходящий из металла катода в вакуум, уносит отрицательный заряд из катода. На короткое время катод заряжается положительно, и возникшее коллективное электрическое поле перемещает недостающий заряд из источника в катод.

То есть модель электризации такова: каждый свободный электрон, уходящий из катода в вакуум, должен быть замещён электроном, приходящим из источника тока. Только для такой модели электризации металла будет справедливо соотношение (50).

Предложенная нами модель электризации металла принципиально отличается от модели Фаулера-Нордгейма. Мы считаем, что при подключении двух макроскопических металлических электродов к источнику постоянного тока отрицательный электрод-катод собирает избыточные отрицательные заряды, поставляемые источником, у своей поверхности.

Эти избыточные заряды при определённых напряжениях источника образуют на поверхности катода атмосферу зарядов, толщина которой зависит от величины приложенного напряжения и геометрии самого электрода. Такая атмосфера будет существовать в стационарном состоянии до тех пор, пока её удерживает источник тока.

Электроны этой атмосферы не имеют никакого отношения к свободным электронам, находящимся в металле, которому сообщён избыточный заряд. Избыточный заряд может изменить неоднородность статического

распределения свободных электронов внутри металла, но использовать их в качестве носителей тока автоэлектронной эмиссии избыточный заряд не в состоянии. В связи с этим, в нашей модели свободные электроны катода никакого автоэмиссионного тока не создают.

Автоэмиссионный ток в нашей модели возникает только тогда, когда между катодом и анодом создаётся неоднородное электрическое поле. Неоднородность распределения поля необходима для перемещения атмосферы избыточных отрицательных зарядов в определённом направлении.

Чтобы помочь современному инженеру решить возникшую задачу Буриданова осла и сделать выбор между двумя математическими моделями поступим следующим образом. Определим характерные масштабы полей разных моделей и сравним их с экспериментами Шоулдерса.

Характерные масштабы полей, реализуемые в автоэмиссионном катоде с туннельным эффектом можно найти в монографии [3] на с. 504. «Для получения автоэмиссионного тока на поверхности катода требуется создать напряжённость поля  $(3 \div 5) \cdot 10^7$  В/см. Для типичного значения работы выхода  $\phi=4,5$  эВ при этом достигается плотность тока порядка  $10^7$  А/см<sup>2</sup>».

Характерные масштабы полей, реализующиеся в нашей модели при ускоренном движении центра масс несжимаемого слоя зарядов достигают величины  $E_*=2,5 \cdot 10^6$  В/м= $2,5 \cdot 10^4$  В/см= $2,5$  В/мкм при масштабе плотности тока порядка  $j_*=2 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Из сравнения видно, что значения в нашей модели, меньше на три порядка по напряжённости поля и на два порядка по плотности тока, чем в модели с туннельным эффектом.

Значения, приводимые Шоулдерсом: напряжённость поля от 20 до 70 В/мкм, а плотности тока лежат в диапазоне от  $10^4$  до  $10^8$  А/см<sup>2</sup>. Напряжённость поля нашей модели на порядок ниже нижней границы значений, а плотность тока попадает в указанный диапазон. Такое совпадение не может быть случайным.

*Поскольку наши оценки оказались очень близкими к значениям, полученным в экспериментах Шоулдерса, то это убеждает нас в том, что не каждый умозрительный математический догмат представляет собой истину высшей пробы для физики.*

*Четыре года назад пророк твёрдой электроники умер, так и не дождавшись престижных премий за свою уникальную работу, и того момента, когда человечество перестанет тратить деньги на подогрев катодов с термоэлектронной эмиссией.*

Все пожелания по улучшению содержания рукописи просим направлять Сапогину Владимиру Георгиевичу по адресу электронной почты: [sapogin@mail.ru](mailto:sapogin@mail.ru)

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Shoulders K.R. Microelectronics using electron beam activated machining techniques/Ed. F.L. Alt//Advances in Computers. 1961. V.2. P.135.*
2. Шоулдерс К. Комплексные системы на микроминиатюрных электровакуумных приборах. – Микроэлектроника и большие системы. М.: Мир, 1967. С.119.
3. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков. Том 2. М: Изд-во Физматлит. 2004. – С. 646.
4. Месяц Г.А. Эктон – лавина электронов из металла. Успехи физических наук. 1995. Т. 165. С. 601-626; Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. С. 88.
5. *Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E.R. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones//Journal of Applied Physics. 1976. V. 47, No 12. P. 5248.*
6. *Shoulders K.R. EV. A Tale of Discovery. JupiterTechnolodgies, Austin, Texas, USA, 1987, - p. 258.*
7. Сапогин В.Г. Механизмы удержания вещества самосогласованным полем. Монография. Таганрог: изд-во ТРТУ, 2000. – 254 с.
8. *Shoulders K.R. Patent USA, 5,018,180(1991).*
9. *Shoulders K.R. Patent USA, 5,054,046(1991).*
10. *Shoulders K.R. Patent USA, 5,054,047(1991).*
11. *Shoulders K.R. Patent USA, 5,123,039(1992).*
12. *Shoulders K.R. Patent USA, 5,148,461(1992).*
13. Автореферат докторской диссертации «Механизмы удержания вещества самосогласованным полем», Ростов-на-Дону, изд-во РГУ, 2003, с. 33.
14. Фролов А.В. Обзор антигравитационных технологий. Новая энергетика 2(25), 2015 г., с. 18-24.
15. Сапогин В.Г. Газовые шары Эмдена в самосогласованной теории гравитации. Таганрог. Изд-во ТТИ ЮФУ. 2009. – С. 99.
16. *Emden R. Gaskugeln. Leipzig und Berlin. 1907. – P. 497.*
17. Холошенко Р.С., Коваленко Г.В. и др. Патент WO 2011031189A1 <https://www.google.com/patents/WO2011031189A1?c1=ru> Вакуумный конденсатор. 2011.
18. Сапогин В.Г., Холошенко Р.С., Ирганг М. Электрическая ёмкость плоского вакуумного конденсатора с изменяющейся электризацией. – С. 13. 2017 г. (подготовлена к печати).
19. Горелик Е.П., Каторгин А.Б., Каторгин Б.И., Марин М.Ю. Экспериментальные исследования электрического разряда в продольном потоке водорода. Известия РАН, серия Энергетика, 2009, №4. С. 25-29
20. Ефимов Е.А., Марин М.Ю., Сапогин В.Г. Водородный автономный источник питания. Изд-во ОАО «Концерн Внешэнергоснаб», 2010, с. 33.
21. *Vladimir G. Sapogin. On Compensation of Coulomb Interaction of Charges by Bam's Self-Consistent Field. 1 st IEEE International Conference on Circuit and Systems for Communications. Proceedings. 26-28 June, 2002, St.Petersburg, Russia. P. 408-411.*

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Проблемы создания автоэмиссионных катодов	4
Зарядовый кластер Шоулдерса	9
Распределение внешнего электрического поля между электродами вакуумных диодов с высокой симметрией	15
Градиентный электронный инжектор с угловой апертурой	19
О двух режимах вывода зарядов из инжектора	22
Ускоренное движение центра масс несжимаемого слоя зарядов	23
Вязкое движение центра масс несжимаемого слоя зарядов	24
Об эффекте формирования зарядового кластера слоем зарядов, выходящих в вакуум	26
Вакуумный накопитель зарядов с автоэлектронным инжектором	28
Возможные конструктивные решения для автоэмиссионных инжекторов	29
Оценки физических параметров инжектора и вакуумного накопителя зарядовых кластеров в сантиметровом диапазоне размеров	32
Новые направления исследований и применения автоэлектронных инжекторов	34
Выводы	36
Заключение	39
Литература	42
Содержание	43

Формат бумаги 60x84/16. Печатных листов 2,75

Бумага офсетная. Заказ № \_\_\_\_

Тираж 100 экз

---

Отпечатано в типографии издательства Ступина А.Н.  
347900, Ростовская область, г. Таганрог, пер. Лермонтовский, 25  
Тел./факс (8634) 311-288.