

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛОСКОГО ВАРИКАПА С ЭЛЕКТРОННЫМ КЛАСТЕРОМ

В.Г.Сапогин, К.В.Сапогин

В заметке предложена элементарная теория, позволяющая найти количественные связи между физическими величинами, сопровождающими эффект появления большой статической ёмкости в варикапе с электронным кластером. Рассмотрен случай электризации кластера электронов, в котором напряжённость поля отклика, создаваемая электронами, больше, чем напряжённость внешнего поля. Введён параметр электризации электронного кластера. Он показывает во сколько раз ёмкость варикапа с кластером электронов больше, чем ёмкость того же варикапа без кластера. Получено соотношение для электроёмкости с кластером электронов. Оценены физические параметры работы варикапа. Оценки по порядку величин совпадают с результатами известных экспериментальных исследований.

Группа экспериментаторов в патенте [1] обнаружила, что электрическая ёмкость вакуумного диода с термоэлектронной эмиссией, имеющего изолированный анод, при высоких напряжениях между катодом и анодом (десятки киловольт) может иметь большие различные значения.

В заметке делается попытка найти физические причины обнаруженного явления и на их основе предложить математическую модель, позволяющую найти количественные связи между физическими величинами, сопровождающими появление большой статической ёмкости в варикапе с электронным кластером.

На рис. 1 показано схематично распределение газа электронов внутри вакуумного цилиндрического диода. На рисунке обозначено 1 – катод диода, 2 – вынесенный анод диода, 3 – стеклянный баллон, 4 – газ электронов.

Из рисунка видно, что диод с вынесенным за стекло анодом 2 представляет собой не просто вакуумный конденсатор, а конденсатор, в котором вместо диэлектрика используется газ электронов. Как показано в монографии [2], газ одноимённых зарядов при определённых условиях может занимать конечный объём и удерживаться в этом объёме силами полевого происхождения.

Силы полевого происхождения, обнаруженные В.Сапогиным в [2], связаны с градиентом давления собственного электрического поля. Они уравнивают кулоновские силы взаимодействующих зарядов системы в любом элементарном объёме газа. Силы полевого происхождения универсальны. Они компенсируют кулоновское взаимодействие зарядов противоположного знака в плазмоиде шаровой молнии, которая представляет собой каноническое состояние газообразного вещества в виде тонкостенного пузыря.

Ядро любого атома также представляет собой тонкостенный пузырь из разноимённых зарядов. Можно построить плазменную модель ядра со сверхвысокой температурой, имеющую диаметр порядка нанометров. Такая модель позволяет обосновать физическую природу ядерных сил, до сих пор скрытую от естествоиспытателя.

В газе из электронов кулоновские силы взаимодействия между ними оказываются ПРИТЯГИВАЮЩИМИ. Систему зарядов уравнивают от возможного коллапса силы полевого происхождения, действующие на их массовую плотность. Именно это свойство электронов и создаёт условия для неизвестного ранее, исключительно красивого физического явления: КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПУЗЫРЬКИ ЗАРЯДОВ при их выходе из любого источника. Экспериментально это явление было впервые обнаружено в 1987 году американским исследователем К.Шоулдерсом в вакуумном диоде с острым катодом [3].

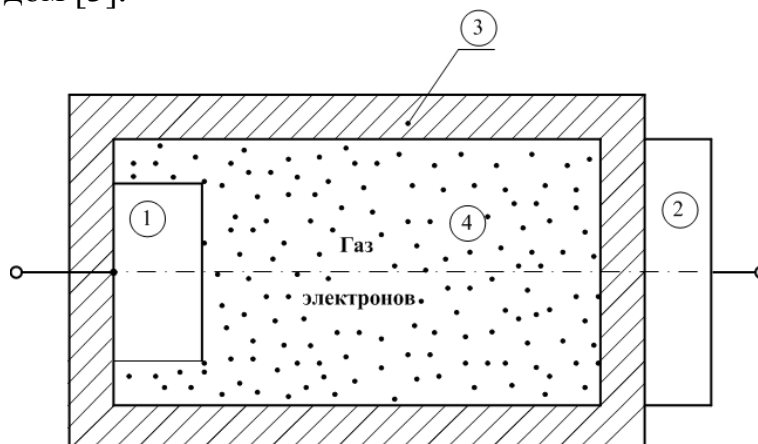


Рис. 1. Распределение газа электронов внутри вакуумного диода

В газе из положительных зарядов кулоновские силы между частицами РАСТАЛКИВАЮЩИЕ, а компенсируют от возможного разлёта частиц силы полевого происхождения.

Расчёты, выполненные в монографии [2], показывают, что газ электронов, находящийся в произвольном объёме, обычно сильно неоднороден. Для упрощения поставленной задачи будем считать, что газ электронов внутри диода однороден и имеет определённое значение средней концентрации n_e .

На рис. 2 показан схематично плоский конденсатор с газом электронов, физические свойства которого будем дальше исследовать. На рис. 2 металлические обкладки 1-1 плоского конденсатора с расстоянием d друг от друга имеют площадь S . Цифрой 2 обозначен кластер зарядов, находящийся в закрытом объёме $V=Sl$, из которого электроны выйти не могут (объём обозначен пунктиром).

Ограниченный объём газа электронов 2 формируется внутри вакуумной колбы благодаря эффекту кластеризации электронов, открытым К.Шоулдерсом. Электроны поставляются из тонкой плёнки зарядов, сформированной на поверхности катода. Сильно неоднородное поле острейшего катода градиентом своего давления (действует на массовую плотность вещества) сбрасывает плёнку зарядов в объём V всегда так, что она, уменьшаясь в объёме, увеличивает свою объёмную плотность зарядов в пузырьке.

Как показано в [4], возможны два режима вывода электронной плёнки из инжектора в вакуум: с постоянным ускорением и постоянной скоростью.

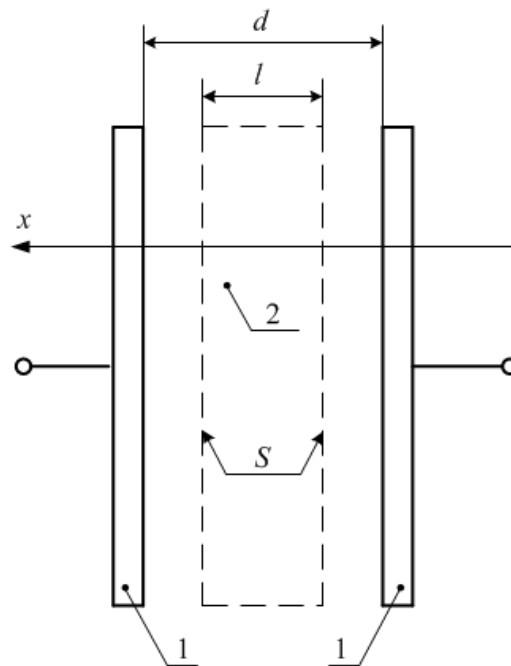


Рис. 2. Плоский конденсатор с газом электронов

Оба режима формируют в пространстве между катодом и стеклянной колбой зарядовые кластеры, которые перемещиваются и заполняют объём V за конечное время. Окончательно заполненный объём V представляет собой кластер макроскопических размеров, удерживающий все электроны, пришедшие из источника.

Под действием внешнего электрического поля напряжённостью \vec{E}_0 электроны могут перемещаться на расстояние l в направлении оси x , указанной на рисунке, но уходить за поверхность S кластера они не могут.

При подаче внешнего электрического поля \vec{E}_0 на обкладки конденсатора кластер электронов поляризуется так, как указано на рис. 3.

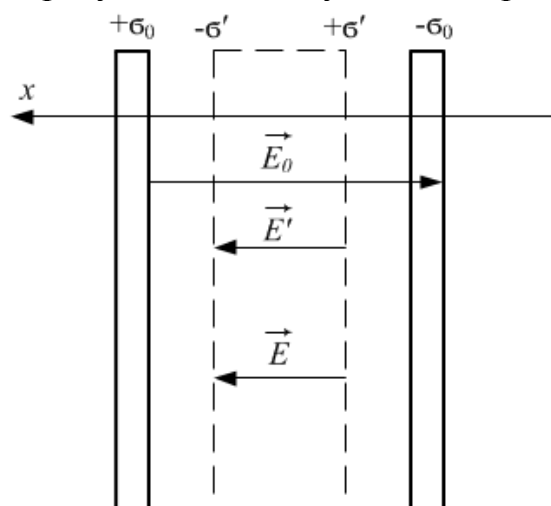


Рис. 3. Расположение основных векторов электрического поля в конденсаторе с кластером электронов

На рис. 3 обозначено направление силовых линий внешнего электрического поля \vec{E}_0 и поля отклика электронов \vec{E}' . Результирующая напряжённость поля в кластере электронов обозначена \vec{E} . Там же указаны значения поверхностной плотности зарядов на обкладках конденсатора σ_0 и поверхностная плотность зарядов поля отклика электронов σ' . Предполагается, что при перемещении одного электрона на его первоначальном месте образуется дырка. Дырка – феноменологический объект физики твёрдого тела, заряд которого равен и противоположен заряду электрона.

Тогда напряжённость результирующего поля \vec{E} внутри области V подчиняется принципу суперпозиции и имеет вид

$$\vec{E} = \vec{E}' + \vec{E}_0. \quad (1)$$

Проецируя его на направление оси x , запишем

$$E = E' - E_0. \quad (2)$$

Вектор напряжённости результирующего поля направлен по оси x . Далее индекс «'» принадлежит физическим параметрам поля отклика, создаваемого электронами кластера.

В (2) рассмотрим случай положительных значений E . *Будем рассматривать такой случай электризации газа электронов, в котором напряжённость поля отклика, создаваемая электронами E' больше, чем напряжённость внешнего поля E_0 .*

Напомним, что при выводе базовых соотношений, учитывающих влияние диэлектрика на внешнее электрическое поле, предполагается, что поле отклика E' , образованное дипольными молекулами диэлектрика, всегда меньше, чем внешнее поле E_0 (см., например, [5]). *В этом и заключается важнейшее физическое отличие электризации газа электронов от электризации дипольных молекул во внешнем электрическом поле.*

Разделим обе части (2) на напряжённость внешнего электрического поля

$$\frac{E}{E_0} = \frac{E'}{E_0} - 1. \quad (3)$$

Введём безразмерный параметр электризации газа электронов

$$\mathcal{G} = E' / E_0 > 1. \quad (4)$$

Он показывает во сколько раз напряжённость поля, создаваемая кластером электронов, превышает напряжённость внешнего электрического поля \vec{E}_0 .

В силу плоской симметрии напряжённость поля отклика электронов связана с поверхностной плотностью заряда известным в электростатике соотношением

$$E' = \sigma' / \varepsilon_0, \quad (5)$$

где ε_0 – электрическая постоянная. В связи с этим соотношение (4) можно записать и через поверхностные плотности зарядов

$$\frac{E}{E_0} = \mathcal{G} - 1 = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0 E_0} - 1 = \frac{\sigma'}{\sigma_0} - 1. \quad (6)$$

Для случая, когда поверхностная плотность газа электронов значительно больше, чем поверхностная плотность зарядов на пластинах конденсатора, значение $\mathcal{G} \gg 1$. Из (6) следует, что для этого случая

$$\mathcal{G} \approx E/E_0. \quad (7)$$

Она показывает во сколько раз напряжённость результирующего поля в газе электронов больше, чем напряжённость поля, создаваемая обкладками конденсатора.

Выразим из (6) параметр электризации через статическую ёмкость плоского конденсатора

$$\mathcal{G} = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0 E_0} = \frac{\sigma' d}{\varepsilon_0 U_0} = \frac{\sigma' d S}{\varepsilon_0 U_0 S} = \frac{q' d}{\varepsilon_0 U_0 S} = \frac{dC}{\varepsilon_0 S} = \frac{C}{C_0}. \quad (8)$$

где $C_0 = \varepsilon_0 S/d$ – ёмкость обкладок конденсатора, а $C = q'/U_0$ – ёмкость конденсатора с электронным кластером, которая зависит от внешнего напряжения на обкладках конденсатора. Зависящая от напряжения электроёмкость указывает на то, что это варикап.

Из (8) следует ещё один физический смысл параметра электризации. Он показывает во сколько раз ёмкость варикапа с электронным кластером больше, чем ёмкость варикапа без кластера. Значение этого параметра совпадает с отношением электрической энергии внутреннего конденсатора W к энергии внешнего конденсатора.

Получим связь ёмкости варикапа с физическими параметрами газа электронов. В объёме газа V находится N электронов, рассчитываемых из соотношения

$$N = n_e V. \quad (9)$$

Заряд, индуцированный электронами на всей пластине, находим из соотношения

$$q' = e \eta n_e V. \quad (10)$$

В (10) учтён тот факт, что на пластины уходит только доля электронов из всего объёма электронного кластера. Значение доли обозначено через η . Отсюда ёмкость конденсатора с кластером электронов имеет вид

$$C = q'/U_0 = \eta C_*, \quad (11)$$

где

$$C_* = e n_e V / U_0 \quad (12)$$

– масштаб электроёмкости электронного кластера также зависит от напряжения на обкладках конденсатора. **Из (12) следует важнейшее свойство, позволяющее увеличивать масштаб ёмкости. Она тем больше, чем больше объём электронного кластера, находящегося между обкладками.**

Из (11) следует, что объёмная плотность ёмкости варикапа связана с масштабом объёмной плотности заряда системы ρ_*

$$C_V = C/V = q'/(V U_0) = \rho_*/U_0 = e n_e / U_0. \quad (13)$$

При фиксированном значении внешнего напряжения она тем больше, чем больше масштаб объёмной плотности заряда.

В варикапе с электронным кластером возможны три режима накопления заряда. **В первом режиме** концентрация электронов в кластере такая, что эффективный заряд q' (или масштаб объёмной плотности) на пластинах объёма V не зависит от внешнего напряжения

$$q' = CU_0 = \text{const}. \quad (14)$$

Ёмкость варикапа в первом режиме будет убывать обратно пропорционально внешнему напряжению.

При высоких концентрациях электронов в газе возможен **второй режим**, когда масштаб объёмной плотности заряда ρ_* будет линейно зависеть от внешнего напряжения. **Во втором режиме ёмкость варикапа не будет зависеть от напряжения.**

При сверхвысоких концентрациях электронов возможен **третий режим** накопления, при котором внутри кластера из электронов образуется пузырьковая структура [6]. В третьем режиме накопления ёмкость варикапа с пузырьками зарядов будет самая большая. **Она будет увеличиваться пропорционально внешнему напряжению.**

Примерные вольт-фарадные характеристики трех режимов накопления зарядов варикапом представлены на рис. 4. Обозначения 1-2-3 соответствуют номеру режима.

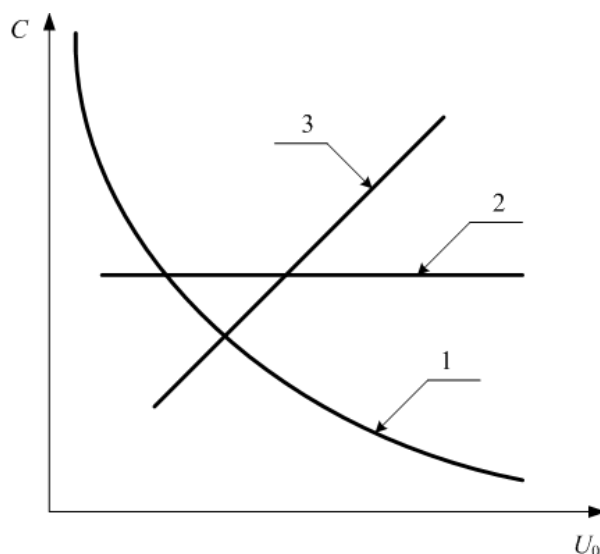


Рис. 4. Режимы накопления электронов плоским варикапом

Оценки для первого режима работы конденсатора с газом электронов для объёма $V=Sc=3 \times 5=15 \text{ см}^3$ (примерный объём лампы 1Ц21П) для пяти напряжений на конденсаторе 25 кВ, 1 кВ, 220 В, 5 В и 1 В (выбираем масштаб объёмной плотности заряда $1,6 \cdot \text{МКл/м}^3$ на порядок меньше, чем в электронном кластере К.Шоулдерса [3]) вынесены в табл. 1.

В первой колонке таблицы U_0 – напряжение на варикапе; во второй – объёмная плотность ёмкости; в третьей – значение ёмкости электронного кластера, в четвёртой – геометрическая ёмкость обкладок конденсатора; в пятой – коэффициент электризации кластера; в шестой – заряд отклика,

наведённый на пластины кластера; в седьмой – электрическая энергия электронного кластера.

Таблица 1. Физические параметры работы варикапа в первом режиме

U_0 (вольт)	C_V (Ф/м ³)	C (мФ)	C_0 (пФ)	θ	q' (Кл)	W (Дж)
25000	64	0,96	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{10}$	24	$30 \cdot 10^3$
1000	$1,6 \cdot 10^3$	24	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{11}$	24	$12 \cdot 10^3$
220	$7,6 \cdot 10^3$	114	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{12}$	24	$2,5 \cdot 10^3$
5	$3,2 \cdot 10^5$	4800	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{13}$	24	600
1	$1,6 \cdot 10^6$	24000	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{14}$	24	12

Из таблицы видно, что на объёме лампы 1Ц21П при изменении внешнего напряжения от 25 кВ до 1 В можно получить эффект увеличения ёмкости конденсатора кластером электронов в диапазоне от 0,96 мФ до 24 Ф при постоянном эффективном заряде отклика 24 Кл. Возможно дальнейшее увеличение ёмкости конденсатора на один два порядка в том же объёме при переходе к режимам высокой и сверхвысокой концентрации электронов, приводящей к накоплению пузырьковых структур зарядов.

Результаты расчётов в табл. 1 по порядку величин совпадают с результатами экспериментальных исследований, проведённых в [1].

Полученные количественные связи между физическими величинами варикапа с электронным кластером позволяют предложить обоснованные методики измерений параметров разнообразных варикапов и переводят обнаруженный эффект увеличения ёмкости с инженерно-технического уровня на уровень фундаментальных исследований.

Выводы

1. Предложена элементарная теория, объясняющая физический эффект появления большой статической ёмкости в варикапе с электронным кластером.
2. Кулоновские силы взаимодействия между электронами кластера притягивающие. Уравновешивают систему зарядов силы полевого происхождения, обнаруженные В.Сапогиным [2]. Они действуют на массовую плотность электронного кластера и удерживают кластер внутри вакуумного диода с вынесенным анодом от коллапса.
3. Эксперименты по формированию стационарного электронного кластера сантиметровых размеров внутри диода с вынесенным анодом [1] следует считать независимым подтверждением явления кластеризации электронов в микронные пузырьки зарядов, обнаруженных К.Шоулдерсом в 1987 году [3].
4. При электризации электронного кластера, в котором напряжённость поля отклика, создаваемая электронами больше,

чем напряжённость внешнего поля, получено соотношение для электроёмкости варикапа, зависящей от внешнего электрического поля.

5. В объёме кластера электронов в 15 см^3 электроёмкость может изменяться от 0,96 мФ до 24 Ф при изменении напряжения от 25 кВ до 1 В с постоянным зарядом отклика в 24 Кл.
6. Оценки совпадают с результатами проведённых экспериментов по порядку величин.
7. В варикапе с электронным кластером возможны три режима накопления заряда. В первом режиме ёмкость варикапа будет убывать обратно пропорционально внешнему напряжению. Во втором, ёмкость варикапа не зависит от напряжения. В третьем режиме она будет увеличиваться пропорционально внешнему напряжению.

Литература

1. Холошенко Р.С., Коваленко Г.В. и др. Патент WO 2011031189A1 <https://www.google.com/patents/WO2011031189A1?cl=ru> Вакуумный конденсатор. 2011.
2. Сапогин В.Г. Механизмы удержания вещества самосогласованным полем. Монография. Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2000 г., -253 .
3. Kenneth R. Shoulders. A Tale of Discovery. 1987, Jupiter Technologies, Austin, Texas, USA.
4. Сапогин В.Г., Холошенко Р.С., Ирганг М. Градиентный электронный инжектор автоэмиссионного катода с угловой апертурой. Научно-методическое пособие. Таганрог. Изд-во Ступина С.А., 2017 г., - с.43.
5. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. М: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1988. – 496 с.
6. Сапогин В.Г. Технологии персональной энергетики на пузырьковых структурах зарядов (физические основы). ИД «Академия Естествознания», М., 2020 г., – с. 70.

Сапогин Владимир Георгиевич
кандидат физико-математических наук,
профессор кафедры физики ИТА ЮФУ, г.Таганрог
[*sapogin@mail.ru*](mailto:sapogin@mail.ru)
Сапогин Константин Владимирович,
[*konstantin.v.sapogin@gmail.com*](mailto:konstantin.v.sapogin@gmail.com)