



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Г. А. Месяц, Первичные и вторичные процессы взрывной электронной эмиссии,
Прикл. мех. техн. физ., 1980, том 21, выпуск 5, 138–144

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.168

14 января 2025 г., 18:25:52



13. Каменщиков В. А., Пластинин Ю. А. и др. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М., Машиностроение, 1971.
14. Соколова И. А. Коэффициенты переноса и моменты интегралов столкновения высокотемпературного воздуха. Дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1972.

УДК 537. 533

ПЕРВИЧНЫЕ И ВТОРИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЗРЫВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Г. А. Месяц

(Томск)

Явление взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ) заключается в интенсивном испускании электронного тока вследствие перехода материала катода из конденсированной фазы в плотную плазму в результате разогрева локальных областей собственным эмиссионным током [1—6]. Открытие ВЭЭ позволило не только по-новому подойти к объяснению многих физических процессов в вакуумных и газовых разрядах, в электрических дугах, но и создать новые типы электронных источников больших токов, применение которых в квантовой электронике, СВЧ-электронике, импульсной рентгенотехнике и т. д. произвело подлинную революцию, так как в большинстве случаев удалось на многие порядки увеличить импульсную мощность излучения. Научные исследования в области ВЭЭ, а также исследования процессов в диодах с ВЭЭ, успешное развитие техники мощных наносекундных импульсов и релятивистских электронных пучков позволили развить новое направление в электронике — сильноточную электронику.

Взрывная электронная эмиссия — сложное явление. Она включает процессы, ведущие к созданию фазового перехода, процессы, происходящие на границе металла с плазмой, и ее взаимодействие с током электронов. ВЭЭ характеризуется большой плотностью плазмы (не менее 10^{20} см⁻³) в катодной части зоны эмиссии, сильной ее неоднородностью в малых объемах ($\sim 10^{-6}$ — 10^{-3} см⁻³), малыми временами протекания процессов (10^{-10} — 10^{-8} с), большой плотностью тока на катоде (10^7 — 10^8 А/см²) и т. д. Это явление имеет несколько стадий, основными из которых являются процессы инициирования ВЭЭ, первичные и вторичные процессы.

1. Инициирование ВЭЭ. Процесс инициирования ВЭЭ состоит в том, чтобы создать на катоде первоначальный фазовый переход металл—плазма, который бы обеспечил ток электронов, способный затем поддержать этот переход самостоятельно. Для осуществления такого перехода необходимо создать большую концентрацию энергии в микрообъеме катода, чтобы обеспечить взрыв этого объема. Поэтому такая эмиссия и получила название взрывной. Большая концентрация энергии в микрообъеме может создаваться различными способами (удар быстрой макрочастицы о катод, сфокусированный луч лазера или ионов и т. д.), однако наиболее часто встречается и широко используется для инициирования ВЭЭ автоэлектронная эмиссия (АЭЭ).

Важным параметром, характеризующим ВЭЭ, является зависимость времени задержки взрыва t_3 участка катода от плотности тока j АЭЭ. Экспериментальные [7] и теоретические [8] исследования приводят к зависимости

$$\int_0^{t_3} j^2(t) dt = \text{const.}$$

Для вольфрама $\text{const} = 4 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{см}^4$ [7], поэтому для получения $t_3 = 10^{-9}$ с необходимо иметь $j \approx 10^9 \text{ А}/\text{см}^2$, что достигается при электри-

ческом поле $E \approx 10^8$ В/см. Такую высокую напряженность электрического поля можно получить на кончике специально созданного тонкого микроэммиттера. Однако взрывная эмиссия возникает и при использовании плоских электродов, когда средняя напряженность поля $E > > 10^5$ В/см. Это объясняется значительным усилением поля и понижением работы выхода локальных областей катода, что обусловлено наличием на любой плоской поверхности катода микроскопических выступов, диэлектрических пленок и включений, а также адсорбированных газов [9].

Для количественной оценки влияния микровыступов используют понятие коэффициента усиления электрического поля β . В случае простых геометрических форм выступов (полуэллипсоид, сфера на тонком основании, цилиндр со сферическим кончиком и т. д.) при $\beta \gg 1$ коэффициент усиления поля [9] $\beta = ah/r$, где h и r — высота и радиус кончика выступа. Коэффициент a для различных случаев составляет 0,4—1. В большом числе измерений показано, что на плоском катоде ВЭЭ возникает за время $t_3 \approx 10^{-9}$ с при поле $E \geq 10^5$ В/см. Следовательно, необходимо предположить наличие $\beta = 10^3$. Однако многочисленные прямые наблюдения не всегда приводят к обнаружению микровыступов с величинами h/r , соответствующим таким β . Чаще всего обнаруживаются величины $\beta = 10$ —100.

Это противоречие объясняется совместным влиянием микроострий и диэлектрических пленок и включений, что проявляется, в частности, в значительных темновых токах электронов при $E < 10^5$ В/см, а также в сильном влиянии загрязнений катода на снижение электрической прочности вакуумных промежутков. Количество диэлектрических загрязнений, например, порядка 10^{-8} — 10^{-7} Г/см², что при удельном весе загрязнений 1—10 Г/см³ соответствует менее чем моноатомному слою, уже приводит к заметному снижению вакуумной прочности [10]. Их влияние на инициирование ВЭЭ обусловлено образованием островков, роль которых проявляется в снижении работы выхода участков катода, а также в «самозарядке», приводящей к дополнительному повышению электрического поля на катоде [10]. Такая «самозарядка» может происходить как за счет анодных ионов и ионов остаточных газов, так и за счет процессов в самом диэлектрике (ударная ионизация в толще и в порах островка, выход электронов из диэлектрика в вакуум, фотоэффект и т. д.). Поверхностная зарядка островка до напряженности поля 10^6 В/см приводит к его пробое, что инициирует ВЭЭ. обстоятельное исследование процессов, инициирующих ВЭЭ, было сделано в работе [4].

2. Первичные процессы. Взрыв микроучастка катода, образование катодной плазмы, эффекты, обуславливающие эмиссию электронов из первичного эмиссионного центра, будем называть первичными процессами. Поскольку первичные и вторичные катодные процессы обусловлены в значительной мере свойствами катодной плазмы и ее взаимодействием с эмиттирующими электронами и катодом, рассмотрим эти вопросы более подробно.

После взрыва микроучастка катода образуется так называемый катодный факел, который состоит в основном из плазмы и паров материала катода. Распределение концентрации плазмы в катодном факеле неоднородно. Концентрация плазмы непосредственно у катода составляет $\sim 10^{20}$ см⁻³ [5], а затем она уменьшается по радиусу факела. Средняя концентрация частиц в плазме при токе ~ 100 А за время от 5 до 20 нс падает с 10^7 см⁻³ до $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³ [5]. Важной характеристикой катодной плазмы является скорость ее разлета в вакуум. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что в начальный период времени $t < 10^{-7}$ с скорость разлета плазмы для большинства металлов составляет $(1-3) \times$

$\times 10^6$ см/с [11], а затем она существенно уменьшается, по крайней мере на порядок. Скорость плазмы на начальном этапе удовлетворительно объясняется в рамках модели адиабатического разлета, предложенной в [6] и развитой в [12]. Более внимательное изучение процесса разлета катодной плазмы в начальный период указывает на необходимость учета нагрева плазмы джоулевым теплом, так как, во-первых, проводимость катодной плазмы значительно меньше проводимости металла, во-вторых, после взрыва происходит сильный рост тока электронов. Оценки показывают, что оценка нагрева плазмы с учетом проводимости по классическим формулам [13] приводит к температуре электронов 10—20 эВ.

Для расчета тока ВЭЭ можно пользоваться «законом 3/2», учитывающим конфигурацию плазмы [14, 5]. В общем виде без учета релятивистских эффектов и собственного магнитного поля пучка электронов соотношение для определения электронного тока запишется в виде [5]

$$(2.1) \quad i/u^{3/2} = F(vt/d),$$

где u , d — разность потенциалов и расстояние между катодом и анодом; v — скорость расширения плазмы. Например, для случая, когда факел образуется на кончике острейшего катода при $vt \ll d$,

$$F(vt/d) = Avt/d,$$

где $A = 37 \cdot 10^{-6} \text{ АВ}^{3/2}$ [15].

В процессе разлета плазмы ее концентрация будет снижаться. Когда концентрация плазмы снизится настолько, что пропускаемый ею тепловой ток сравняется с током по «закону 3/2», скорость движения ее границы станет замедляться, как это имеет место в стационарных плазменных источниках электронов [16]. Это приведет к замедлению роста тока по сравнению с (2.1). В этом режиме электронный ток будет равен тепловому току плазмы. Такой режим ВЭЭ получил название режима насыщения. В эксперименте с вакуумным промежутком (острый катод — плоский анод) длиной 2 см при напряжении 30 кВ концентрация плазмы в режиме насыщения при $j \approx 10 \text{ А/см}^2$ составляла $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а при $j = 1 \text{ А/см}^2$ соответственно $\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Характер роста тока соответствует описанной выше картине, если ток насыщения не ниже десятка ампер. При меньших токах (порядка ампер) фаза насыщения может завершиться обрывом тока. Ток, при котором происходит его обрыв, тем больше, чем больше время функционирования взрывной эмиссии. Процессы отбора тока электронов при ВЭЭ и генерация плазмы на катоде взаимосвязаны. Чем больше ток, тем больше генерируется плазма. Поэтому существует пороговый ток, ниже которого эмиссия электронов из плазмы не происходит [17].

Если плотность тока, отбираемого из плазмы, достигает величины порядка 10^2 А/см^2 , то вместо режима насыщения начинается неустойчивый режим ВЭЭ, для которого характерно появление хаотических выбросов на осциллограммах тока ВЭЭ, амплитуда которых в 2—3 раза превосходит ток по «закону 3/2», а длительность $\sim 10^{-8}$ с. Поэтому начальный режим расширения плазмы и ограничения тока ВЭЭ объемным зарядом электронов будем называть устойчивым. Одновременно с выбросами в неустойчивом режиме в 5 и более раз возрастает плотность на оси пучка. В моменты выбросов тока происходит ускорение некоторого количества положительных ионов катодной плазмы в сторону анода. Энергия этих ионов достигает 0,3—10 МэВ при разности потенциалов 80—3000 кВ [18].

Одной из важных особенностей неустойчивой ВЭЭ является кратковременное возрастание потенциала периферийных участков катодной плазмы во время всплесков тока [19]. Существование этого эффекта сно-

ва убедительно доказано в работе [20] при измерении потенциала плазмы с помощью плавающих зондов. Есть несколько причин существования такого эффекта. Во-первых, по мере роста тока электронов ВЭЭ может наступить такой момент, когда число электронов, эмиттируемых плазмой в вакуум, будет больше, чем их поступает в плазму из катода, что приведет к зарядке плазмы. Во-вторых, потенциал плазмы может возрасти за счет омического падения напряжения на ней. Кроме того, в [21] была показана связь всплесков потенциала катодной плазмы и электронного тока ВЭЭ с неравномерностью поступления материала катода в плазму.

Одной из основных проблем в первичных процессах является механизм эмиссии электронов из катода в плазму. Можно предположить, что выход электронов из катода в плазму обусловлен термоавтоэлектронной эмиссией под действием электрического поля, возникающего на границе катод—плазма за счет разделения зарядов [5]. Если учесть, что плотность электронного тока на катоде порядка $\sim 10^8$ А/см² [5], температура плазмы $\sim 4-5$ эВ [22], то электрическое поле в катодном слое должно быть $(0,6-1) \cdot 10^8$ В/см. Это соответствует концентрации плазмы непосредственно на катоде порядка 10^{20} см⁻³. Голографические и интерферометрические измерения [23, 24] показали, что на расстоянии $\sim 10^{-2}$ см от кончика катода концентрация плазмы достигает 10^{19} см⁻³, что не противоречит сделанным выше оценкам.

Заметим, что при попадании ионов на поверхность катода потенциальный барьер, сквозь который необходимо протуннелировать электрону, в процессе акта эмиссии может приобретать сложную конфигурацию. В частности, возможен случай двух или более туннельных барьеров, разделенных потенциальными ямами. При этом возможно резонансное туннелирование, когда результирующий коэффициент прозрачности близок к единице. Интересный подход развит в работе [25]. Рассматривая эмиссию электронов из металла в плазму, авторы учли подбарьерные столкновения туннелирующих электронов с ионами плазмы. Это приводит также к эффекту резонансного туннелирования, способствующему получению больших плотностей тока.

3. Образование новых эмиссионных центров. Одним из важнейших вторичных процессов является образование новых центров ВЭЭ на катоде под действием плазмы первичного факела. Наблюдение структуры электронного потока в диоде с плоскими электродами показало, что в процессе ВЭЭ в непосредственной близости от первичного центра эмиссии возникают новые центры [26]. Затем прямыми экспериментами было показано [27], что при расширении плазмы по поверхности катода в присутствии внешнего электрического поля новые эмиссионные центры (ЭЦ) возникают при взаимодействии плазмы с катодом. Новые ЭЦ могут образовываться как прямо возле старых на расстоянии не более 10^{-4} см, так и на значительном удалении от них. Причем новые ЭЦ образовывались на расстоянии $r < 10^{-2}$ см, а затем при $r > 0,2$ см [20]. В промежутке между ними была зона, где практически новых ЭЦ не возникало.

Для выяснения механизма возникновения новых ЭЦ рассмотрим более внимательно условия на границе катод—плазма. Напряженность электрического поля E в прикатодном слое и его толщина L в случае бесстолкновительного режима определяются из выражений [28]

$$E = E_i(eU_K/kT_i)^{1/4}, \quad L = L_i(eU_K/kT_i)^{3/4},$$

где $E_i = (4\pi n_i kT_i)^{1/2}$; $L_i = (kT_i/4\pi n_e e^2)^{1/2}$; U_K — катодное падение; n_i , T_i — концентрация и температура ионов плазмы. Примем $v = 2 \cdot 10^6$ см/с, $kT_i = 5$ эВ, а значение U_K равным катодному падению в вакуумной дуге.

Концентрацию плазмы будем оценивать по уносу массы, полагая $n_{i,e} \sim 1/r^2$ [12], где r — радиус.

При $U_k = 15$ В поле $E = 10^8$ В/см, необходимое для начала ВЭЭ, может быть достигнуто при $r \approx 10^{-4}$ см, т. е. непосредственно в зоне эмиссии. По-видимому, именно это обстоятельство обуславливает появление новых ЭЦ в кратерах первичных ЭЦ [29]. В этих условиях при $r = 10^{-3} - 1$ см длина $L = 10^{-5} - 10^{-3}$ см, а поле $E = 10^6 - 10^4$ В/см.

Новый ЭМ в этих условиях за счет взрыва острий может возникнуть только при малых r , если коэффициент усиления поля $\beta = 100$, т. е. при высоте острия $h \approx 100 r$. Однако заметное усиление поля будет достигаться только при остриях, размеры которых $h \ll L$, так как катодная плазма экранирует острия больших размеров. При этом размер катодного радиуса острий будет не более 10^{-7} см. В этих условиях значительную роль начинают играть размерные эффекты, приводящие к тому, что электроны рассеиваются на границах эмиттирующего выступа [30]. Критическая плотность тока, необходимая для разрушения такого микровыступа, уменьшается в $2r_k/\lambda$ раз, где λ — длина свободного пробега электрон-фононного взаимодействия при температуре разрушения катода. Это обстоятельство облегчает возникновение новых центров ВЭЭ под плазмой. Однако, по-видимому, вероятность появления ЭЦ за счет прямого взрыва острий под плазмой возможна только в зоне, прилегающей к первичному ЭЦ.

Одним из вероятных механизмов образования ЭЦ в этой области является зарядка диэлектрических включений и пленок на катоде потоком ионов из плазмы и их последующий пробой. Помимо зарядки диэлектрика, может происходить сток заряда с него через объемное сопротивление либо разрядов по поверхности диэлектрика. Напряженность поля определится из соотношения $E(t) = j\rho[1 - \exp(-t/\rho\epsilon_0\epsilon)]$, где ρ — удельное сопротивление диэлектрика; ϵ_0, ϵ — диэлектрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость; $j = en_i v_i$ — плотность тока. При $t/\rho\epsilon_0\epsilon \ll 1$ получаем очевидную линейную зависимость

$$E \approx jt/\epsilon\epsilon_0.$$

Из исследования пробоя тонких диэлектрических пленок известно [31], что пробой происходит в местах микровыступов на катоде. При $E > 10^6$ В/см время запаздывания пробоя составляет $< 10^{-9}$ с. Следовательно, время зарядки пленки до пробивного напряжения при малой утечке запишется в виде

$$(3.1) \quad t_3 \sim \epsilon_0\epsilon E/en_i v_i.$$

Можно предположить, почему новые ЭЦ появляются на малом и большом удалении r от первичного ЭЦ. Так как $n_i \sim 1/r^2$, то, согласно (3.1), время $t_3 \sim r^2/v_i$. Поэтому при малых r пробой пленки и появление новых ЭЦ происходит из-за большой концентрации плазмы, а при больших r — из-за сильного возрастания потенциала граничных слоев плазмы и увеличения v_i . Последнее подтверждается совпадением момента появления нового ЭЦ и всплеска потенциала плазмы, измеренного зондовым методом [20].

Наложение поперечного магнитного поля приводит к созданию новых ЭЦ на поверхности катода [32]. Эксперименты, проведенные в коаксиальном диоде с дисковым катодом, на кромке которого искусственно инициировалось появление первичного ЭЦ, показали, что размножение ЭЦ происходит в направлении дрейфа плазмы. С помощью зондов, установленных на различных расстояниях от места инициирования первичного ЭЦ, определялась скорость движения границы образования новых

ЭЦ, которая составляла (2—3) 10^6 см/с. Установлено, что новые ЭЦ возникают эстафетно по мере роста тока в диоде и повышения потенциала периферийных участков плазмы (до киловольт). При этом происходит зарядка ионным током и пробой диэлектрических пленок и включений, что инициирует возникновение новых ЭЦ.

4. Эффект экранировки. Во вторичном процессе ВЭЭ имеются эффекты, способствующие появлению новых ЭЦ и препятствующие им. Последние обусловлены тем, что появление какого-либо ЭЦ приводит к возникновению и росту тока электронов. Объемный заряд этих электронов снижает электрическое поле в области, прилегающей к ЭЦ. Даже незначительное снижение поля приводит к существенному уменьшению тока автоэлектронной эмиссии с микроострий, что тормозит спонтанное возникновение новых ЭЦ. Этот эффект отчетливо проявляется в диоде с многоострийным катодом. В таких диодах обычно число взорвавшихся острий меньше, чем их общее количество. Например, было два катода, в первом на одно острие приходилось 0,16 см², а во втором — 1,25 см². При этом уменьшение расстояния между катодом и анодом от 100 до 40 мм приводит к росту числа взорвавшихся острий в первом случае от 1 до 4%, а во втором — от 25 до 60%.

Для оценки эффекта экранировки рассчитывалось влияние объемного заряда на электрическое поле соседних острий. Пусть на вершине острия высотой a имеется плазменный шар радиуса $r = vt$, из которого по «закону $3/2$ » вытягивается ток. Задача решалась самосогласованно с учетом объемного заряда. Расчеты показали, что при $r = a/100$ в точке с координатами $x = a$, $\sqrt{y^2 + z^2} = a/2$ потенциал поля уменьшится на 21%, а при $r = a/3,5$ — на 65%.

Одна из возможностей снижения эффекта экранировки состоит в использовании магнитного поля. Электроны из катодной плазмы ЭЦ эмитируются в разных направлениях, и поэтому площадь на катоде, где проявляется объемный заряд электронов, будет большой. Магнитное поле сужает электронный пучок и уменьшает эту площадь. Например, эксперименты с коаксиальным диодом показали, что при длительности импульса 5 нс, диаметре катода $d = 15$ мм и потенциале катода 500 кВ рост магнитного поля от 0 до 30 кЭ приводит к увеличению числа новых ЭЦ с 3—5 до 50 и более. При этом возможность появления ЭЦ за счет дрейфа плазмы исключалась, так как плазма за время импульса продвинется не более чем на 0,1 мм.

Поступила 28 III 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г. А. Исследования по генерированию мощных наносекундных импульсов. Дис. на соиск. учен. степени д-ра физ.-мат. наук. Томск, 1966.
2. Фурсей Г. Н., Воронцов-Вельяминов П. Н. Качественная модель инициирования вакуумной дуги. — ЖТФ, 1967, т. 37, № 10.
3. Бугаев С. П., Искольдский А. М., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Электронно-оптическое наблюдение инициирования и развития импульсного пробоя короткого вакуумного промежутка. — ЖТФ, 1967, т. 37, № 12.
4. Фурсей Г. П. Исследование автоэлектронной эмиссии в экстремально сильных электрических полях и условиях перехода к вакуумной дуге. Дис. на соиск. учен. степени д-ра физ.-мат. наук. Ленинград, 1972.
5. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Взрывная эмиссия электронов из металлических острий. — Письма в ЖЭТФ, 1971, т. 13, с. 7—10.
6. Mesyats G. A. The role of fast processes in vacuum breakdown. — In: Proc. X Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Invited Papers, Oxford, 1971.
7. Карцев Г. К., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И., Ротштейн В. П., Фурсей Г. Н. Исследование временных характеристик перехода АЭЭ в вакуумную дугу. — ДАН СССР, 1970, т. 192, № 2.

8. Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Шубин А. Ф. Расчет термоавтоэмиссии, предшествующей взрыву микроэммиттеров под воздействием импульсов автоэлектронного тока.— Изв. высш. учебн. заведений. Физика, 1970, № 4.
9. Сливков И. Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М., Атомиздат, 1972.
10. Железников Ф. Г. О механизме эмиссионных процессов, вызывающих проводимость вакуумной изоляции.— ЖТФ, 1978, т. 48, вып. 6.
11. Бугаев С. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Взрывная эмиссия электронов.— УФН, 1975, т. 115, № 1.
12. Литвинов Е. А. Кинетика катодного факела при ВЭЭ.— В сб.: Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов. Новосибирск, Наука, 1974.
13. Снитцер Л. Физика полностью ионизованного газа. М., Мир, 1965.
14. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Рост тока в искре при импульсном пробое коротких вакуумных промежутков.— Изв. высш. учебн. заведений. Физика, 1968, № 1.
15. Месяц Г. А., Литвинов Е. А. О вольт-амперной характеристике диода с острым катодом в режиме взрывной эмиссии электронов.— Изв. высш. учебн. заведений. Физика, 1972, № 8.
16. Крейнделъ Ю. Е. Плазменные источники электронов. М., Атомиздат, 1977.
17. Баженов Г. П., Чесноков С. М. О минимальном токе ВЭЭ.— Изв. высш. учебн. заведений. Физика, 1976, № 11.
18. Корол Е. Д., Плютто А. А. Ускорение ионов катодного материала при вакуумном пробое.— ЖТФ, 1970, т. 40, № 12.
19. Корол Е. Д., Плютто А. А. Потенциал плазмы катодного факела в начальной стадии вакуумного пробоя.— Изв. высш. учебн. заведений. Физика, 1973, № 4.
20. Проскуровский Д. И., Пучкарев В. Ф. Образование новых эмиссионных центров на катоде в процессе коммутации электрического тока в вакууме.— ЖТФ, 1979, т. 49, вып. 12.
21. Баженов Г. П., Ладыженский О. Б., Чесноков С. М., Шпак В. Г. Зондовая диагностика колебаний потенциала плазмы в диодах со взрывной эмиссией.— ЖТФ, 1979, т. 49, вып. 1.
22. Бакирт Р. Б., Бугаев С. П., Стасьев В. П., Литвинов Е. А. Исследование формирования сильноточной вакуумной искры методом скоростной интерферометрии.— ТВТ, 1976, № 6.
23. Бакирт Р. Б., Кудинов А. П., Литвинов Е. А. Исследование прикатодной плазмы в начальной фазе вакуумного разряда.— ЖТФ, 1973, т. 43, № 1.
24. Mix L. P., Kelly I. G., Kuswa G. W., Swain D. W., Olsen I. N. Holographic measurements of the plasma in a high current field emission diode.— J. Vac. Sci. Technol., 1973, vol. 10, N 6.
25. Лившиц И. М., Мейерович Б. Э. О резонансной автоэлектронной эмиссии из металла в плазму.— ДАН СССР, 1979, т. 249, № 4.
26. Баженов Г. П. Экспериментальное исследование взрывной эмиссии электронов. Дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. Томск, 1973.
27. Mesyats G. A. Electron explosive emission and electrical discharge in vacuum.— In: Proc. VI Intern. Symposium on Discharges and Electrical Ins. in Vacuum, Invited Papers, Swansea, UK, 1974.
23. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М., Наука, 1970.
29. Проскуровский Д. П., Янкелевич Е. Б. О капельной фракции эрозии катода при ВЭЭ.— Радиотехника и электроника, 1979, т. 24, вып. 1.
30. Литвинов Е. А., Старобинец А. А. Предельные токи автоэлектронной эмиссии.— ЖТФ, 1977, т. 47, вып. 10.
31. Воробьев Г. А., Мухачев В. А. Пробой тонких диэлектрических пленок. М., Сов. радио, 1977.
32. Mesyats G. A., Proskourovsky D. I., Puchkarev V. F. On effects resulting in appearance of new emission centers at explosive electron emission.— In: Proc. VIII Intern. Symposium on Disch. and El. Ins. in Vac., Albuquerque, USA, 1978.