

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ В НИЗКОВАКУУМНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШКАХ

Приведена методика расчета электрической прочности изоляционных промежутков в низковакуумных газоразрядных электронных пушках с полым анодом. Выделены следующие изоляционные промежутки: газовая изоляция, объем и поверхность диэлектрика. Рассмотрены особенности расчета электрической прочности в каждом из них. Выработаны рекомендации по использованию их при разработке рациональных конструкций низковакуумных газоразрядных электронных пушек.

Наведено методик розрахунку електричної міцності ізоляційних проміжків у низковакуумних газорозрядних електронних гарматах з порожнім анодом. Виділені наступні ізоляційні проміжки: газова ізоляція, об'єм і поверхня діелектрика. Розглянуті особливості розрахунку електричної міцності в кожному з них. Вироблені рекомендації по використанню їх при розробці раціональних конструкцій низковакуумних газорозрядних електронних гармат.

The design procedure of electrical strength isolation gaps in low vacuum gas-discharge electronic guns with the hollow anode is given. Are oozed following isolation gaps: gas isolation, volume and a surface of a dielectric. Features of calculation of electrical strength in each of them are viewed. Recommendations on their use are produced by development of rational constructions low vacuum gas-discharge electronic guns.

Введение. Низковакуумные газоразрядные электронные пушки (НГЭП) позволяют реализовать различные электронно-лучевые технологические процессы в низком вакууме (10...1000 Па) такие как: выращивание монокристаллов кремния; получение покрытий в среде реакционных газов; диагностики газовых потоков; модификации поверхности и ряд других [1...4]. Для надежной работы НГЭП необходимо обеспечение электрической прочности изоляционных промежутков при высоких ускоряющих напряжениях. Существующие методики расчета электрической прочности высоковакуумных электронных пушек для НГЭП не пригодны из-за наличия рабочего газа и горения высоковольтного тлеющего разряда. В известных литературных источниках отсутствует методика расчета изоляционных промежутков в НГЭП, в связи с этим актуальной является задача создания подобной методики, которая открывает возможности разработки оптимальных конструкций электронных пушек этого типа.

Целью работы является создание методики расчета электрической прочности изоляционных промежутков и выработка на ее основе рекомендаций по созданию конструкции НГЭП.

Основная часть. Работоспособность НГЭП в значительной степени зависит от правильности выбора электрической изоляции. На схематическом

изображении НГЭП (рис.1) выделены возможные, с точки зрения электрического пробоя, участки: а-а - пробой по объему диэлектрического изолятора; б-б - пробой газового промежутка анод-катод; с-с - пробой по поверхности диэлектрика в вакууме; d-d - пробой диэлектрика по поверхности в атмосфере. Природа механизма пробоя и оценка электрической прочности на каждом из участков различна. Поэтому в дальнейшем расчет электрической прочности изоляционных промежутков в НГЭП проводим, используя следующие виды пробоя: твердого диэлектрика, газового промежутка, пробоя диэлектрика по поверхности. Электрическая прочность изоляционных промежутков конструкции обеспечивает надежную работу НГЭП.

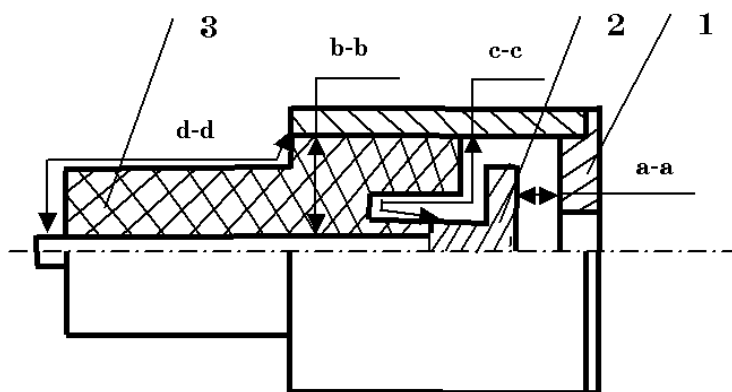


Рисунок 1 - Возможные участки электрического пробоя в НГЭП, где 1 – анод; 2 – катод; 3 – изолятор.

1.Электрическая прочность твердого диэлектрика. В НГЭП используются в качестве твердой изоляции керамика, стекло и органические диэлектрики. Существует две основные формы пробоя твердого диэлектрика: тепловой и электрический. Пробивная напряженность диэлектрика зависит от его химического строения и физических условий в которых он работает [5...7].

Разрушение диэлектрика при электрической форме пробоя происходит за счет электрических процессов в нем. Он наступает при достижении определенного значения напряженности электрического поля.

Тепловой пробой происходит, когда выделяемое в диэлектрике тепло превышает тепло отводимое от него. При этом возникает возрастающий нагрев диэлектрика до его расплавления или прожога, происходит тепловой пробой и образуется большой путь проводимости. Выделение тепла в диэлектрике изолятора НГЭП возникает вследствие диэлектрических потерь и тока проводимости. При работе в постоянном поле нагрев осуществляется только токами проводимости. В импульсном режиме действуют два механизма нагрева. Особую опасность для электрической изоляции НГЭП представляет режим пламенно-пучкового разряда, когда возникают ВЧ – колебания напряжения и резко возрастают диэлектрические потери и напряженности электрического поля. Это связано с тем обстоятельством, что

мощность диэлектрических потерь в изоляции определяется выражением $N = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta$, где ω - частота плазменных колебаний; C - емкость изоляции; U - напряжение; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь, равный отношению активного тока через изоляцию I_a к емкостному току I_c . При этом величина $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(T-T_0)}$, где T - температура диэлектрика; T_0 - температура окружающей среды; α - коэффициент ($\alpha \approx 0,02 \text{ } 1/^\circ\text{C}$), возрастает с повышением температуры, а следовательно и мощность диэлектрических потерь. Поэтому для снижения пробивного напряжения и увеличения электрической прочности твердого изолятора НГЭП необходимо обеспечить хорошее охлаждение изолятора и добиваться снижения мощности диэлектрических потерь.

Согласно механизма теплового пробоя по Вагнеру в неоднородных твердых диэлектриках минимальное напряжение U_{np} , при котором происходит пробой диэлектрика возможно рассчитать по следующей формуле [6]:

$$U_{np} = a \sqrt{\frac{k}{0,24 \cdot \gamma_0 \cdot e \cdot S \cdot \alpha}} = \sqrt{\frac{k}{0,24 \cdot \gamma_1 \cdot e \cdot S \cdot \alpha}} \cdot e^{\frac{\alpha}{2} t_0^0} \quad (1),$$

где a - толщина диэлектрика; k - коэффициент теплопроводности диэлектрика; t_0^0 - температура диэлектрика вне канала; γ - удельная проводимость диэлектрика при 0°C ; $\gamma_0 = \gamma_1 \cdot e^{\alpha t_0^0}$ - удельная проводимость; S - поперечное сечение канала; e - основание натурального логарифма; - температурный коэффициент.

Как показали исследования, на электрическую прочность твердого изолятора НГЭП существенное влияние оказывает время воздействия напряжения. В области разрядного времени в диапазоне $0,1 \dots 3 \cdot 10^5$ мкс пробой может быть только электрическим, так как за столь малые промежутки времени развиваются только электрические процессы. Снижение напряжения пробоя при времени воздействия $t > 3 \cdot 10^5$ мкс объясняется тепловыми процессами, которые протекают сравнительно медленно. Приближенное время пробоя при отсутствии теплообмена между нагреваемыми диэлектриком и окружающей средой имеет вид [7]:

$$t_{np} = \frac{C \cdot \rho}{0,24 \alpha \cdot \gamma_0 E^2}, \quad (2)$$

где γ_0 - удельная проводимость диэлектрика при начальной температуре; α - температурный коэффициент; C - удельная теплоемкость диэлектрика; ρ - плотность диэлектрика; E - напряженность поля в диэлектрике.

Кривая жизни изоляции приведена на рис.2, где по оси абсцисс отложено время действия напряжения, а по оси ординат - пробивное напряжение диэлектрика.

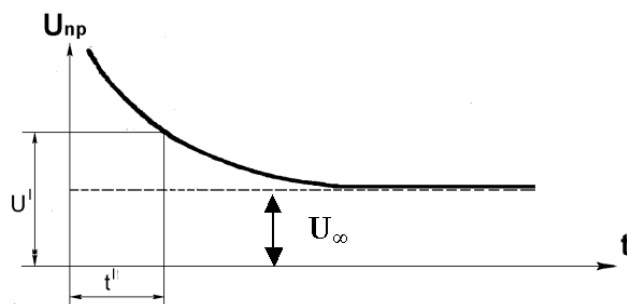


Рисунок 2 - Кривая жизни изоляции

Если напряжение приложено к диэлектрику в течение времени $t < t^1$ то изолятор не будет пробит. Если к объекту приложено $U < U_{\infty}$ то диэлектрик может выдержать это напряжение бесконечно длительное время.

Неоднородность электрического поля заметно уменьшает электрическую прочность диэлектрика. Снижение неоднородности электрического поля достигается в НГЭП за счет выбора рациональной формы электродов путем моделирования электрических полей и использования на изоляторе полупроводящих покрытий, для регулирования формы поля.

В качестве изоляторов для НГЭП рекомендуется использовать: электроизоляционные стекла, электротехнический фарфор и глиноземную керамику типа 22ХС.

Электрическая прочность изолятора из электротехнического фарфора составляет ~ 30 МВ/м, а глиноземной керамики типа 22ХС ~ 50 МВ/м.

2. Электрическая прочность газового промежутка. В газоразрядной электронной пушке напряжение зажигания разряда между катодом и анодом (участок а-а рис. 1.) определяется по левой ветви кривой зажигания Пашена (рис.3) . Последняя характеризуется $pd < pd_{min}$, где p - давление газа ; d - междуэлектродное расстояние анод-катод.

Левые ветви в этой области обладают большой крутизной и высоким напряжением зажигания. Конструкцию участка катод-анод при работе в этой области выбирают таким образом, чтобы разряд зажигался вдоль осевой линии анодного отверстия. Остальная часть катода имеет более высокое напряжение зажигания и газовый промежуток, находящийся между этой частью катода и анодом, работает как изолятор.

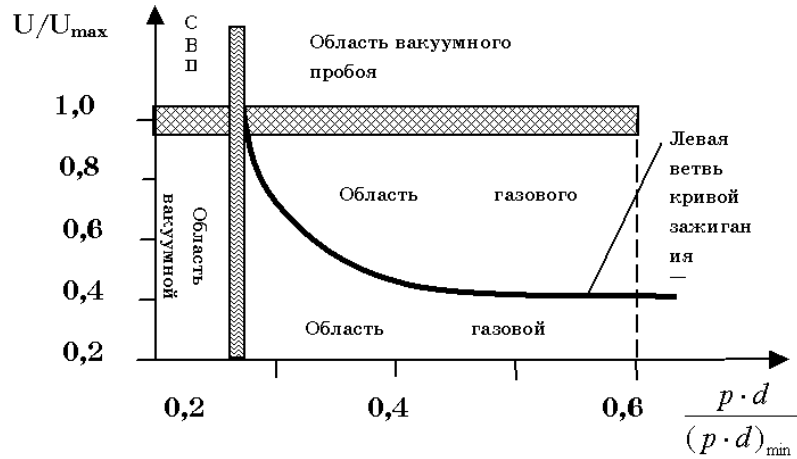


Рисунок 3 - Области работы газовой изоляции для $pd < pd_{min}$.

Для получения максимального рабочего давления, междуэлектродное расстояние целесообразно выбирать минимальным. Однако минимальное расстояние ограничено напряженностью электрического поля, при котором возникает автоэлектронная эмиссия катода. Заметное влияние автоэлектронной эмиссии начинается при значениях напряженности электрического поля $E \geq 40 \text{ кВ/мм}$ [6].

Оценку междуэлектродного расстояния проведем графически с учетом заданных $r_{max} = 9 \text{ мм рт. ст.}$, $E \geq 40 \text{ кВ/мм}$. Для этого строим левую ветвь кривой Пашена для гелия в координатах U_3 , p , d при $p = 9 \text{ мм рт.ст.}$ (рис.4.).

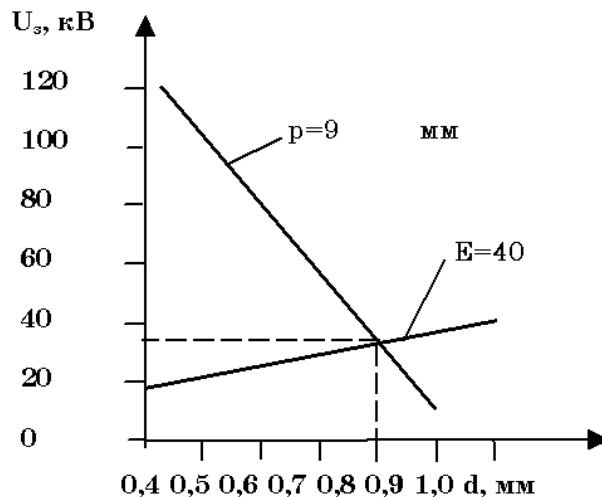


Рисунок 4 - Схема графического расчета междуэлектродного расстояния d

На этом же графике строится прямая $E = U_3/d = 40 \text{ кВ/мм}$. Точка пересечения графиков дает критическое напряжение зажигания $U_{3 \text{ кр}}$, для которых равновероятно зажигание разряда как от пробоя газа, так и от автоэлектронной эмиссии. Построение критической точки для гелия приведено

на рис. 4. Координаты этой точки составляют : $U_{з\text{кр}} = 35 \text{ кВ}$, $p = 9 \text{ мм рт. ст.}$, $d = 0,8 \text{ мм}$. Максимальное рабочее напряжение $U_{п}$ при $p = 9 \text{ мм рт. ст.}$, ограничиваемое автоэлектронной эмиссией, должно быть $U_{п} < U_{з\text{кр}}$, а $d_{\text{min}} \geq d_{\text{кр}}$.

3. Электрическая прочность твердого изолятора НГЭП по поверхности. Повышение электрической прочности к пробую по поверхности достигается в НГЭП с одной стороны путем использования керамических или стеклянных изоляторов, а с другой стороны - в конструкции изолятора изготавливаются специальные углубления и выступы, увеличивающие длину поверхности между электродами.

Снижение электрической прочности по поверхности происходит из-за наличия неоднородного электрического поля на поверхности и микрозазоров между твердым диэлектриком и электродом, что связано с различием диэлектрических проницаемостей воздуха и диэлектрика ($\frac{\epsilon_{\text{т.диэля}}}{\epsilon_{\text{возд}}} \approx 3 + 4$).

Поверхностный разряд развивается обычно следующим способом. Первоначально в местах наибольших напряженностей возникает коронный разряд, который постепенно расширяется. Далее при некотором напряжении появляются разряды в виде светящихся нитей, которые перемещаются по поверхности диэлектрика. Этот вид получил название – скользящих разрядов.

Длину канала скользящего разряда можно оценить по формуле [6]:

$$\ell_{\text{ен.}} = \chi \cdot c^2 u_n^5 \sqrt{\frac{du_n}{dt}}, \quad (3)$$

где χ - коэффициент определяемый опытным путем; c – удельная поверхностная емкость; $\frac{du_n}{dt}$ – скорость изменения приложенного напряжения.

Подставим в формулу (3) вместо $\ell_{\text{ен.}} = d_{\text{AK}}$ расстояние между электродами, приняв $c = \frac{\epsilon\epsilon_0}{d}$, где d – толщина диэлектрика и считая $\frac{dU_{п}}{dt}$ постоянным, получим значения напряжения, необходимого для пробоя изолятора по поверхности:

$$U_{пр} = \chi \cdot d_{\text{AK}}^{0,2} \left(\frac{d}{\epsilon\epsilon_0}\right)^{0,4}, \quad (4)$$

Из (4) следует, что на $U_{пр}$ больше влияет C чем d_{AK} . В связи с этим для увеличения $U_{пр}$ уменьшают C путем увеличения диаметра изолятора у электрода с которого ожидается развитие разряда, а также применяется нанесение на диэлектрик полупроводящего покрытия, которое способствует выравниванию распределения напряжения по поверхности изолятора.

Для увеличения $U_{пр}$ необходимо использовать малогигроскопичные диэлектрики или создавать покрытия из малогигроскопичных материалов, а также обеспечивать надежное, без микрозазоров, сопряжения тела изоля-

тора с металлической арматурой, используя цементные заделки и эластичные прокладки. Защита от пробоя по поверхности изолятора НГЭП находящегося при атмосферном давлении, может быть осуществлена путем помещения его в масло или другую среду с высокой электрической прочностью.

Выводы

1. Создана методика расчета электрической прочности изоляционных промежутков НГЭП, обеспечивающая электрическую прочность конструкции по следующим видам пробоя: твердого диэлектрика, газового промежутка, пробоя твердого диэлектрика по поверхности.

2. Выработаны рекомендации по повышению электрической прочности изоляционных промежутков при разработке конструкций НГЭП различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология .Пер. с нем. – М.: Энергия. 1980.- 528 с.
2. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кандалов, С.Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б.Е. Патона.– К.: Наукова думка, 1987.- 256 с.
3. Тутык В.А. Импульсный режим работы электронных газоразрядных пушек с полым анодом //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 3(26).- Днепропетровск, 2003, С. 151-160.
4. Тутык В.А., Гасик М.И. Энергетические параметры газоразрядных электронных пушек, используемых для оплавления поверхности изделий //Электрометаллургия. 2007. №10, С.24-30.
5. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме.- М.: Энергоатомиздат, 1986 . - 256 с.
6. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 464 с. 12.
7. Латам Р.В. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 192 с.