

Емельянов А.А.
Емельянова Е.А.

**Импульсные
технологии
повышения
электрической
прочности в
вакууме**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 537.521.7
ББК 31.241
Е 60



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 08-08-07029*

Емельянов А. А., Емельянова Е. А. **Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 160 с. — ISBN 978-5-9221-1071-6.

Монография посвящена проблеме повышения электрической прочности вакуумной изоляции. Изложены механизм инициирования импульсного пробоя, критерий оптимальности и методы оценки электрической прочности, достигаемой при реализации оптимальных режимов импульсного кондиционирования, экспериментальные результаты, составившие основу импульсных технологий повышения электрической прочности вакуумных промежутков с цельнометаллическими и напыленными пленочными электродами, технологии устранения автоэмиссионных явлений в микроканальных усилителях яркости.

Для специалистов в области вакуумных и газовых разрядов, электрофизики, электротехнологий, высоковольтной электротехники, разработчиков высоковольтной электровакуумной и фотоэлектронной аппаратуры. Может быть полезной студентам соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-9221-1071-6

© ФИЗМАТЛИТ, 2009

© А. А. Емельянов, Е. А. Емельянова, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Кондиционирование электродов в вакууме.	8
§ 1.1. Состояние поверхности электродов в вакууме.	9
§ 1.2. Тлеющий разряд	13
§ 1.3. Ток в полувакууме	15
§ 1.4. Предпробойные токи	15
§ 1.5. Пробои.	17
§ 1.6. Высоковольтные наносекундные импульсы	21
1.6.1. Предпробойный режим (22). 1.6.2. Режим взрывной эмиссии (24).	
Глава 2. Инициирование импульсного пробоя.	26
§ 2.1. Критерий инициирования	26
§ 2.2. Запаздывание пробоя	29
§ 2.3. Фронт импульса и запаздывание	31
2.3.1. Косоугольный импульс (31). 2.3.2. Прямоугольный импульс с конечным фронтом (34).	
§ 2.4. Материал катода и запаздывание пробоя	36
Глава 3. Оптимальные режимы кондиционирования электродов вакуумного промежутка	39
§ 3.1. Критерий оптимальности.	39
§ 3.2. Оценка эмиссионных параметров катода	40
3.2.1. Коэффициент усиления поля (41). 3.2.2. Работа выхода (49).	
§ 3.3. Оценка электрической прочности	51
Глава 4. Цельнометаллические электроды	54
§ 4.1. Миллиметровые промежутки	54
4.1.1. Экспериментальная установка (54). 4.1.2. Предпробойные токи (57). 4.1.3. Электрическая прочность (61).	
§ 4.2. Сантиметровые промежутки.	67
4.2.1. Экспериментальная установка (67). 4.2.2. Запаздывание пробоя (69). 4.2.3. Напряжение пробоя (71). 4.2.4. Оптимизация расположения электродов (76).	
Глава 5. Пленочные электроды	80
§ 5.1. Экспериментальная установка	81
§ 5.2. Воздействие большого числа импульсов.	84
§ 5.3. Контролируемая импульсная обработка	87
§ 5.4. Воздействие одиночных импульсов	91
§ 5.5. Напряжения пробоя и возникновения локальных свечений	99
§ 5.6. Форма импульса и запаздывание пробоя	103
§ 5.7. Импульсная электрическая прочность ускоряющего промежутка	105
§ 5.8. Импульсная электрическая прочность МКП.	107
§ 5.9. Технологические режимы кондиционирования.	111
§ 5.10. Приборы обнаружения слабых свечений.	115
Глава 6. Эффективность оптимальных режимов кондиционирования	118
§ 6.1. Проверка критериев катодного механизма	118
6.1.1. Стационарный режим (118). 6.1.2. Пробои постоянного тока (122). 6.1.3. Оптимальные режимы импульсного кондиционирования (124). 6.1.4. Импульсный режим (126).	

§ 6.2. Форма импульса и эффективность повышения электрической прочности	132
§ 6.3. Импульсная электрическая прочность	137
§ 6.4. Эффект полного напряжения	140
Заключение	148
Список литературы	150

Введение

Достижение высокой электрической прочности является одной из основных проблем при разработке и эксплуатации высоковольтных электровакуумных приборов и конструкций. Вакуумная электрическая изоляция применяется в конденсаторах и разрядниках, электронно-оптических преобразователях и фотоэлектронных умножителях, рентгеновских трубках и ускорителях заряженных частиц, генераторах электромагнитного излучения и т. п.

К настоящему времени получены значительные результаты по физике процессов, приводящих к возникновению и развитию электрических явлений в вакууме [1–9]. Открытие и всестороннее исследование Г. А. Месяцем, С. П. Бугаевым, Г. Н. Фурсеем, Е. А. Литвиновым, Д. И. Проскуровским и др. явления взрывной эмиссии электронов [4–6, 9] привело к новым представлениям о механизме инициирования и развития электрического разряда в вакууме. Однако, несмотря на значительные достижения в физике вакуумных разрядов, больших успехов в области повышения электрической прочности высоковольтных электровакуумных приборов (ЭВП) и конструкций высокого напряжения достигнуто не было [7, 10–12].

Традиционные технологии повышения электрической прочности основаны на применении длительно воздействующих напряжений. Электроды высоковольтных ЭВП и конструкций после окончания предварительной обработки подвергаются на заключительной стадии кондиционированию тлеющим разрядом, током в полувакууме, предпробойными токами и пробоями. Однако использование длительно воздействующих напряжений не позволяет достигать высоких значений электрической прочности в случае цельнометаллических электродов, а в случае напыленных пленочных электродов оказывается либо малоэффективным, либо не применимым в принципе.

На практике электрическую прочность повышают, увеличивая размеры межэлектродных промежутков, используя специальные материалы при изготовлении электродов, применяя трудоемкие технологии обработки поверхности и сложные электронные схемы защиты оборудования [7].

Электрическая прочность — один из важнейших параметров высоковольтных ЭВП. Уменьшение токов утечки, повышение напряжения пробоя и стабилизация их значений становятся особенно актуальными при разработке и эксплуатации приборов с большими рабочими поверхностями электродов. В высоковольтной высокочастотной аппаратуре широкое применение находят вакуумные конденсаторы [10]. В отличие от других типов ЭВП они имеют электродную систему значи-

тельной площади. Большая рабочая поверхность электродов обостряет проблему электрической прочности, которая обеспечивает надежность и стабильность мощных радиопередающих систем. Разработка новых технологий, направленных на повышение электрической прочности вакуумной изоляции, имеет важное практическое значение.

Широкое распространение в оптико-физическом приборостроении, астрономии, ядерно-физических исследованиях, медицине и других сферах деятельности получили фотоэлектронные приборы (ФЭП) с микроканальным усилением: электронно-оптические преобразователи, фотоэлектронные умножители, временные и позиционно-чувствительные детекторы, детекторы различных видов излучения, вакуумные промежутки которых образованы напыленными пленочными электродами [13]. В процессе производства и эксплуатации ФЭП с микроканальным усилением на выходной поверхности микроканальной пластины (МКП) могут возникать эмиссионные центры, приводящие к появлению локальных свечений на катодолюминесцентном экране усилителей яркости или недопустимо больших токов в фотоэлектронных умножителях в отсутствие светового сигнала на фотокатоде.

Для ликвидации эмиссионных центров и связанных с ними негативных явлений, как правило, применяют технологии, использующие кондиционирование темновыми токами в предпробойном режиме. Однако эффективность такой обработки невысока, а вероятность разрушения металлизации в результате инициирования пробоя при длительном воздействии высокого напряжения значительна. Проведение исследований, направленных на разработку новых технологий, реализующих оптимальные режимы импульсного кондиционирования и улучшающих характеристики вакуумных промежутков с напыленными электродами, имеет несомненную практическую значимость.

Таким образом, недостаточная электрическая прочность электровакуумных приборов и конструкций дает основание для разработки новых технологических решений, основу которых составляет применение высоковольтных импульсов наносекундного диапазона длительностей.

Экспериментальные исследования [14–18], выполненные при изучении начальной стадии взрывной эмиссии электронов, позволили установить, что эффективность воздействия электрических разрядов наносекундной длительности на поверхность катода достаточно высока. Однако эксперименты выполнены в основном на острых катодах, моделирующих идеальный эмиттер. Для обоснования целесообразности высоковольтного наносекундного кондиционирования при улучшении эксплуатационных характеристик высоковольтных вакуумных конструкций и приборов необходимо выполнить комплекс исследований с цельнометаллическими и напыленными электродами, обладающими развитой рабочей поверхностью. Полученные в результате таких исследований экспериментальные данные дают основание для разработки

импульсных технологий повышения электрической прочности в вакууме.

Импульсное кондиционирование связано с процессами на поверхности электродов и, прежде всего, с процессами, инициирующими пробой. Теоретическое рассмотрение инициирования вакуумного пробоя выполнено численными методами при решении задачи о распределении температуры в эмиттере правильной геометрической формы в результате воздействия прямоугольного высоковольтного импульса [19–21]. Выявляя влияние параметров высоковольтных импульсов, материала и формы электродов на инициирование пробоя, целесообразно упростить задачу, введя ограничения по длительности, что даст возможность получить аналитические решения, позволяющие оптимизировать режимы кондиционирования и оценивать электрическую прочность, достигаемую в результате реализации оптимальных режимов.

В монографии обобщены выполненные авторами исследования по разработке импульсных технологий повышения электрической прочности высоковольтных электровакуумных приборов и конструкций как с цельнометаллическими, так и с напыленными электродами, с использованием импульсов разной формы и длительности, а также известные экспериментальные результаты, полученные при оптимальных режимах воздействия.

Глава 1

КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ В ВАКУУМЕ

Одной из основных характеристик высоковольтных электровакуумных приборов и конструкций является электрическая прочность вакуумной изоляции. Электрической прочностью вакуумной изоляции называют напряженность однородного электрического поля, при которой происходит пробой вакуумного промежутка. От электрической прочности зависят габариты изделий и уровень их рабочего напряжения. Вакуумный пробой — искровой разряд, характеризуемый резким спадом напряжения на межэлектродном промежутке и переходом к низковольтному дуговому разряду в парах материала электродов при достаточной мощности источника питания. Возникновению электрического пробоя предшествует протекание в межэлектродном промежутке более или менее стабильного тока, резко зависящего от приложенного к промежутку напряжения. Токи, протекающие в промежутке при напряжении, меньшем напряжения пробоя, называют предпробойными токами. Кроме предпробойных токов в вакуумном промежутке наблюдают периодически повторяющиеся самогасящиеся импульсы тока, называемые микроразрядами. Возникновение микроразрядов не приводит к спаду приложенного к промежутку напряжения.

Одним из основных факторов, определяющих электрическую прочность, является состояние поверхности электродов, образующих вакуумный промежуток. Присутствие на электродных поверхностях микровыступов, слабосвязанных частиц, оксидных пленок, загрязнений, диэлектрических и газовых включений определяет величину предпробойных токов и напряжения пробоя. В технологическом процессе производства высоковольтных ЭВП применяют различные методы обработки поверхности электродов, повышающие электрическую прочность вакуумной изоляции.

Перед установкой электродов на рабочее место их подвергают предварительной обработке. Механическая обработка позволяет получать поверхности с малыми неровностями, но создает аморфный слой с остатками карбидов и абразивных материалов, продуктов химических реакций и загрязнений. Механическую обработку завершают очисткой, обезжириванием, промывкой и ультразвуковой обработкой электродов. После установки на рабочее место электроды подвергают обезгаживанию продолжительным нагревом. По завершении обезгаживания электроды кондиционируют тлеющим разрядом, током в полувакууме,

предпробойными токами и пробоями при длительно действующих напряжениях.

Кондиционирование или тренировка электродов вакуумного промежутка повторяющимся электрическим воздействием имеет целью максимально очистить поверхность электродов от возможных микронеровностей, газовых и диэлектрических включений, микрочастиц, приводящих к неустойчивой работе промежутка, и довести электрическую прочность до заданного высокого и стабильного уровня.

§ 1.1. Состояние поверхности электродов в вакууме

Приложение высокого напряжения к электродам вакуумного промежутка изменяет микрорельеф поверхности. Длительное воздействие напряжения активизирует поверхностную диффузию и миграцию загрязнений, рост микровыступов, вытягивание острий, перестройку, испарение и десорбцию под действием электрического поля, перенос микрочастиц на противоположный электрод.

Состояние поверхности электродов и, в первую очередь катода, определяет, в основном, электрическую прочность вакуумной изоляции. Измерение предпробойных токов, протекающих через промежуток при фиксированном напряжении, позволяет оценивать состояние катодной поверхности. Лучшему состоянию поверхности соответствует меньший ток и большая электрическая прочность при неизменных прочих условиях. Измерение интенсивности рентгеновского излучения, создаваемого предпробойными токами, также применяют при оценке состояния катодной поверхности и электрической прочности.

Токи, протекающие в вакуумном промежутке под воздействием высокого напряжения, вызваны автоэлектронной эмиссией. Теория иницирования пробоя электронной эмиссией была разработана в 1928 г. Фаулером и Нордгеймом [22]. При низких температурах ($T \leq 300$ К) основное уравнение Фаулера-Нордгейма обычно представляют в виде [7, 8]

$$j = 1,54 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{t^2(y)\varphi} \exp \{ -6,83 \cdot 10^9 \varphi^{3/2} \vartheta(y) E^{-1} \}, \quad (1.1)$$

где j — плотность тока автоэлектронной эмиссии, А/м²; E — напряженность электрического поля, В/м; φ — работа выхода электрона, эВ; $t(y)$ и $\vartheta(y)$ — табулированные функции с параметром $y = 3,79 \cdot 10^{-5} E^{1/2} \varphi^{-1}$, зависящим от напряженности и работы выхода [23]. При напряженности $E > 10^9$ В/м, обеспечивающей возникновение полевой эмиссии, функция $t(y)$ является медленно изменяющейся и может быть принята равной $t(y) = 1$ [22].

Предпробойные токи между электродами с протяженной рабочей поверхностью имеют дискретную природу, вызваны автоэлектронной

эмиссией с отдельных участков поверхности катода и качественно соответствуют уравнению Фаулера–Нордгейма

$$I = BE^2 \exp\{-b/E\}, \quad (1.2)$$

где I — сила тока, А; B , b — константы, зависящие от состояния поверхности электродов [23]. В условиях тщательно очищенных электродов в сверхвысоком вакууме предпробойный ток обусловлен электронами, доля ионной компоненты возрастает по мере увеличения загрязненности электродов [24–26]. При изменении формы электродов или расстояния между ними предпробойная проводимость определяется только напряженностью E на катоде [27–29].

Предпробойные токи, удовлетворяющие соотношению (1.2), наблюдаются при напряженности $E > 10^7$ В/м, на два порядка величины меньшей значения, необходимого для возникновения автоэлектронной эмиссии.

Это расхождение объясняется наличием на поверхности катода эмитирующих микровыступов, усиливающих электрическое поле. Коэффициент усиления, равный отношению микронапряженностей на вершине выступа E и у его основания E_0 :

$$\beta = \frac{E}{E_0},$$

принимает при этом значения $\beta \approx 100$. Существование таких выступов подтверждается дискретностью распределения эмиссии по поверхности электродов и наличием в предпробойном токе тонких электронных пучков [25, 30, 31].

Исследование расположения и структуры эмиссионных центров выполнено с помощью люминесцентного экрана, размещенного за сетчатым анодом [32, 33]. В местах эмиссии в 80% случаев обнаружены микровыступы. Изучение профилей микровыступов с помощью теневого электронного микроскопа позволило оценить величину коэффициента усиления поля $\beta > 100$. Микровыступы на катодах из различных металлов наблюдались в работах [34–38].

Начиная с работы Альперта [39], эмиссионные центры представляются в виде микровыступов с высоким значением коэффициента усиления поля β [28, 40, 41]. Ток I с микровыступа удовлетворяет уравнению (1.1), в котором микронапряженность E электрического поля на поверхности катода выражена через усиленную выступом макронапряженность E_0 :

$$E = \beta E_0. \quad (1.3)$$

Используя параболическую аппроксимацию функции Нордгейма [16]

$$\vartheta(y) = 0,965 - 1,1y^2 \quad (1.4)$$

и соотношение (1.3), авторы [7] получили выражение

$$\lg(I/E_0^2) = \lg(1,54 \cdot 10^{-6} \beta^2 A_{эм} \varphi^{-1} 10^{4,52\varphi^{-1/2}}) - 2,84 \cdot 10^9 \varphi^{3/2} (\beta E_0)^{-1}, \quad (1.5)$$

где $A_{эм}$ — площадь эмитирующей области.

Приведенную зависимость $\lg(I/E_0^2) = f(1/E_0^2)$ называют вольтамперной характеристикой в координатах Фаулера–Нордгейма. Для тока полевой эмиссии зависимость (1.5) линейна. Задаваясь значением работы выхода φ , по крутизне характеристики определяют коэффициент усиления поля

$$\beta = -2,84 \cdot 10^9 \varphi^{3/2} \left[\frac{d(\lg I/E_0^2)}{d(1/E_0)} \right]^{-1}, \quad (1.6)$$

а по отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат, — площадь эмиссии

$$A_{эм} = 6,49 \cdot 10^5 \varphi \beta^{-2} 10^{\{\lg(I/E_0^2)\}_{E_0=\infty} - 4,52\varphi^{-1/2}}. \quad (1.7)$$

Предпробойный ток, как правило, обусловлен одновременным действием нескольких микровыступов [42–46]. Коэффициент усиления β , определяемый из выражения (1.6) по суммарной силе тока I , соответствует наиболее острому микровыступу:

$$\beta \approx \max \beta_i, \quad (1.8)$$

а площадь эмиссии $A_{эм}$, найденная из выражения (1.7), больше максимальной площади отдельного микровыступа, но меньше суммарной площади эмиссии всех выступов:

$$\max A_{эм i} < A_{эм} < \sum A_{эм i}. \quad (1.9)$$

Исследования эмиссионных центров на плоском катоде, расположенном внутри камеры сканирующего электронного микроскопа, выполнены в работах [47–49]. Применение зондирующих анодных отверстий позволило определить эмиссионные параметры отдельных участков катода с последующим изучением их микрорельефа. Во всех случаях эмиссионный ток удовлетворял уравнению Фаулера–Нордгейма, однако исследованные участки не содержали микроострий с коэффициентами $\beta > 200$. Центрам эмиссии со значениями коэффициента усиления $500 \leq \beta \leq 700$ и площади эмиссии $10^{-17} < A_{эм} < 5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$, определенными с помощью выражений (1.6) и (1.7) из вольтамперных характеристик, соответствовали инородные включения, повреждению поверхности — центр с коэффициентом $\beta = 230$.

Применение анодного микрозонда в сканирующем электронном микроскопе позволило определить диэлектрические микровключения в центрах эмиссии [50]. Использование аппаратуры с перфорирован-

ным анодом [51] и рентгеновских микроанализаторов [52] подтвердило наличие микропримесей внутри эмитирующих участков.

Исследование энергетических спектров электронов [51] показало, что, в отличие от чисто металлического эмиттера, для микроучастков катода с коэффициентом усиления $\beta > 200$ характерны сдвиг спектра на величину от 0,1 эВ до 0,25 эВ относительно уровня Ферми, большая полуширина и почти симметричное распределение по энергиям. Наличие инородных включений в местах электронной эмиссии с высокими значениями коэффициента усиления $\beta > 200$, сдвиг энергетического спектра, люминесцентный характер свечения в месте эмиссии объяснены присутствием неметаллических эмиссионных центров с пониженным значением работы выхода [53].

Явлениям, положенным в основу механизма неметаллических центров эмиссии, дано и другое объяснение [54]. Исследования эмиссионных центров на монокристаллическом вольфрамовом острие и протяженной медной поверхности, выполненные в отсутствие неметаллических включений, показали, что коэффициент усиления и площадь эмиссии, определенные по предпробойным токам, имели значения $200 \leq \beta \leq 800$ и $10^{-18} < A_{эм} < 10^{-16} \text{ м}^2$, соответствующие инородным включениям.

На рис. 1.1 приведено изображение участка поверхности медного катода, обработанного вакуумной дугой и соответствующего повышенным значениям коэффициента усиления β и пониженным значениям эмитирующей площади $A_{эм}$, наблюдаемым при наличии неметаллических центров эмиссии. Изображение получено с помощью растрового электронного микроскопа при 5000-кратном увеличении [54]. Высокие значения коэффициента усиления, сдвиг энергетического спектра электронов, эффекты свечения объяснены взаимодействием эмиссии электронов и ионной бомбардировки.

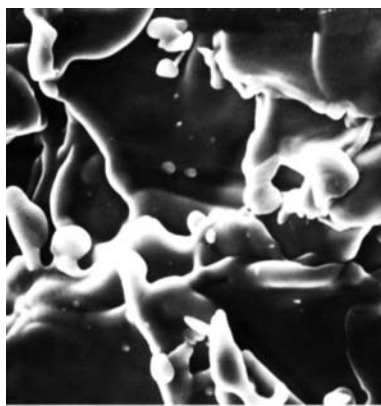


Рис. 1.1. Поверхность медного катода после возникновения вакуумной дуги, увеличение 5000

Таким образом, коэффициент усиления поля β можно рассматривать как параметр, характеризующий качество поверхности катода. Коэффициент усиления может быть использован для оценки электрической прочности в процессе кондиционирования электродов. Параметр β , вычисленный по предпробойным токам, характеризует не только микрорельеф, но и чистоту катодной поверхности, наличие на ней загрязнений и дефектов. Высококачественной обработке поверхности, приводящей к большей электрической прочности, соответствуют меньшие значения β и большие величины $A_{эм}$. Экспериментально установлено, что меньшему коэффициенту β соответствует большее напряжение пробоя [55–57], это обстоятельство и используют для качественной оценки электрической прочности вакуумной изоляции.

§ 1.2. Тлеющий разряд

Тлеющий разряд в инертном газе удаляет загрязнения с поверхности электродов в результате бомбардировки медленными ионами, при этом повышается работа выхода электрона и электрическая прочность вакуумного промежутка.

Зажигание тлеющего разряда в водороде при давлении $0,4 \leq P \leq 4$ кПа, плотности тока $\approx 2,5$ А/м² и полярности электродов, обратной рабочей, может удвоить пробивное напряжение [58]. В работах [59–61], выполненных под руководством П. Н. Чистякова, кондиционирование тлеющим разрядом сопровождалось достижением высокой электрической прочности. Так, в результате восьмичасового прогрева молибденовых электродов при $T \leq 950^\circ$ С электронной бомбардировкой в высоком вакууме и последующего кондиционирования тлеющим разрядом в атмосфере аргона в течение часа при давлении 0,4 кПа и токе 0,1 А был получен устойчивый предпробойный ток $I = 1$ мкА в промежутке $d = 0,12$ мм при напряженности электрического поля $E_0 = 2,5 \cdot 10^8$ В/м. Во время кондиционирования свечение равномерно покрывало рабочую поверхность электродов. Контроль поверхности с помощью послеразрядной эмиссии показал отсутствие диэлектрических пленок и включений.

В технологическом процессе производства высоковольтных вакуумных выключателей и конденсаторов применяют кондиционирование тлеющим разрядом переменного тока. Контакты вакуумных коммутационных устройств обезгаживают в разомкнутом положении, зажигая разряд в среде инертного газа или водорода [62].

Однако под действием ионной бомбардировки интенсивное разложение оксидов и обезгаживание имеют место лишь на поверхности катода. Кондиционирование сопровождается переносом отрицательно заряженных частиц примесей и загрязнений с поверхности катода на противоположный электрод. Использование переменного тока означает, что при смене полярности отрицательно заряженные частицы будут перенесены в обратном направлении. Непрерывная смена полярности

при обработке контактов коммутлирующего устройства тлеющим разрядом переменного тока не дает требуемого качества очистки и обезгаживания контактов, снижает долговечность и надежность работы коммутлирующего устройства.

С целью устранения указанного недостатка предложено [63] ввести в рабочую камеру дополнительный электрод и зажигать разряд постоянного тока между ним и соединенными электрически контактами, прикладывая к последним отрицательный потенциал, а по окончании кондиционирования выводить дополнительный электрод из рабочего объема коммутлирующего устройства. Использование разряда постоянного тока и дополнительного электрода в качестве анода позволяет подвергать ионной бомбардировке оба контакта одновременно, удаляя примеси и загрязнения с поверхности контактов на дополнительный электрод и исключая перенос в обратном направлении.

Схема обезгаживания контактов приведена на рис. 1.2.

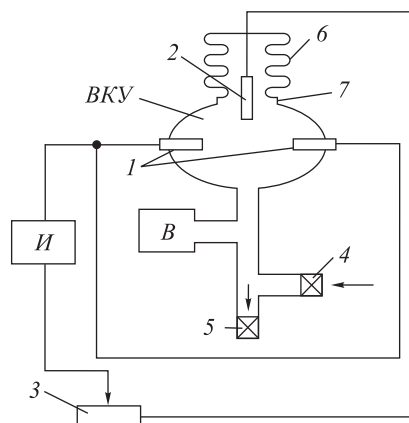


Рис. 1.2. Схема обезгаживания контактов вакуумного коммутлирующего устройства

В оболочку вакуумного коммутлирующего устройства, контакты 1 которого разомкнуты, вводят дополнительный электрод 2. Контакты соединяют между собой электрически и подсоединяют к отрицательному выводу источника питания И. Дополнительный электрод соединяют с положительным полюсом источника через нагрузочный резистор 3. Через натекатель 4 при закрытом вентиле 5 напускают в рабочую камеру инертный газ. Давление в камере контролируют вакуумметром В. Зажигание тлеющего разряда между дополнительным электродом и электрически соединенными контактами приводит к разогреву и обезгаживанию контактов ионной бомбардировкой. Разряд переносит ионизированные примеси и загрязнения с поверхности контактов на дополнительный электрод. Ток разряда регулируют нагрузочным сопротивлением. После разогрева контактов до красного

свечения напряжение снимают и через вентиль удаляют выделившиеся из контактов газы и загрязнения, затем вновь напускают инертный газ в рабочую камеру и при закрытом вентиле повторяют указанный цикл обезгаживания. По окончании обезгаживания контактов дополнительный электрод, введенный с помощью сильфона *b* через штенгель *7* внутрь коммутирующего устройства, выводят из оболочки, а штенгель отпаивают вместе с дополнительным электродом.

Эффективность кондиционирования электродов тлеющим разрядом зависит от вида используемого газа. Наилучшими для кондиционирования газами являются гелий и азот [7].

§ 1.3. Ток в полувакууме

В тлеющем разряде энергия бомбардирующих катод ионов не превышает 0,5 кэВ и не приводит к существенным изменениям его поверхности. Кондиционирование током в полувакууме, или «газовое» кондиционирование, основано на сглаживании микровыступов поверхности катода в результате бомбардировки ионами инертного газа [64]. Оно более мощное и обладает избирательным воздействием на эмиссионные участки катодной поверхности. Тренировка заключается в напуске в вакуумную систему инертного газа при давлении $10^{-2} \leq P \leq 10^{-1}$ Па и пропускании через промежуток тока $\sim 10^{-4}$ А при напряжении ~ 20 кВ. Электроны, эмитируемые с поверхности катода, ионизируют молекулы инертного газа вблизи центров эмиссии, поэтому ионной бомбардировке подвергаются именно эмитирующие участки катода. Кондиционирование продолжают до ликвидации источника эмиссии.

Обработка поверхности катода током в полувакууме значительно снижает предпробойные токи и повышает электрическую прочность вакуумной изоляции. Так, в результате многочасового кондиционирования током $3 \cdot 10^{-4}$ А при давлении $\sim 10^{-2}$ Па электрическая прочность вакуумного промежутка $d = 0,25$ мм между вольфрамовыми электродами диаметром 35 мм достигла значения $E_0 = 2 \cdot 10^8$ В/м, в 4 раза превышающего значение, получаемое при тренировке пробоями [64].

§ 1.4. Предпробойные токи

В технологическом процессе производства маломощных ЭВП используют кондиционирование предпробойными токами, осуществляемое по схеме, приведенной на рис. 1.3.

Балластный резистор R_6 , играя роль элемента обратной связи, стабилизирует напряжение U на электродах прибора, не допуская его увеличения до пробивного $U_{пр}$. Во время кондиционирования с ростом тока возрастает падение напряжения на сопротивлении R_6 балластного резистора, что приводит к уменьшению напряжения на вакуумном промежутке $ВП$. В зависимости от типа тренируемого прибора ве-