

5. Долгов А.Н., Земченкова Н.В., Клячин Н.А., Прохорович Д.Е. Механизмы образования и транспортировки ионных потоков в плазме разряда сильноточной вакуумной искры // Физика плазмы. 2010. Т.36, № 8. С. 826 – 832.
6. Methling R., Popov S.A., Batrakov A.V., Uhrlandt D., Weltmann K.-D. Spectroscopy of Single Vacuum Arc Cathode Spots With Improved Sensitivity // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013.V. 41. Iss. 8/2. pp. 1904-1910.

Определение поверхностной радиоактивности образца, адсорбирующего тритий

С.А.Сарапулов, Б.Д.Лемешко, Ю.К.Пресняков, А.А.Коробейников
Москва, ВНИИА им. Н.А. Духова, 121110, ул. Суцеская, 22
e-mail: bogolubov@vniia.ru

Разработан метод позволяющий определять радиоактивность трития адсорбированного металлическим образцом из газовой среды. Метод основан на измерении тока между исследуемым образцом и регистрирующим электродом, помещенными в вакуумную камеру. Ток возникает вследствие бета распада адсорбированного трития. Токовая вольт-амперная характеристика имеет характерную форму, связанную с конечной энергией электронов бета распада. Показано, что регистрирующим электрод заряжается до разности потенциалов, достигающей несколько кВ. Ухудшение вакуума приводит к существенному изменению вольтамперной характеристики промежутка: образец с тритием – регистрирующий электрод, что позволяет диагностировать ухудшение вакуума.

Determination of the surface radioactivity of adsorbed tritium sample. S.A. Sarapulov, B.D. Lemesko, Yu.K. Presniakov, A.A. Korobeinikov. The method to determinate the tritium radioactivity is described. Tritium was absorbed in metallic sample from gas. The basis of the method is measurement of the current that flows between investigated sample and measuring electrode located in a vacuum chamber. The current appears because of the absorbed tritium decay. The current volt-ampere characteristic has a special form associated with the limited energy of electrons in beta decay. The measuring electrode is charged to potential difference of several kilovolts. Decrease of the vacuum quality leads to significant change of the gap volt-ampere characteristic (between sample with tritium and measuring electrode) which allows one to determine the reduction of vacuum quality.

Как известно, тритий при температуре ~300К (нормальные условия) представляет собой газ, который адсорбируется конструкционными сталями и многими другими материалами. Поэтому на практике возникает задача определения радиоактивности образца, адсорбировавшего тритий. Поскольку тритий это тяжелый радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада 12,33 года, излучающий в результате бета распада электроны с энергией от 0 до $E_{\text{бмакс}}=18,5$ КэВ ($E_{\text{средн.}}=6,5$ КэВ), то активность образца можно определять, регистрируя его бета активность. Однако малая энергия электронов бета распада трития делает весьма трудной их регистрацию, т.к. электроны с энергиями 0-6,5 кэВ имеют пробеги в воздухе до 5 мм. Существует ГОСТ 26306-84 [1], определяющий порядок измерения абсолютной активности бета радиоактивных образцов с максимальной энергией электронов 0,2-3,5 МэВ, согласно которому образец помещается в вакуум 6,6 Па ($5 \cdot 10^{-2}$ торр) и в "геометрии 2 π " измеряется ток бета электронов $I_{\beta 0}$, возникающий в результате распада изотопа. По формуле (1)

$$A = \frac{I_{\beta 0}}{e} \quad (1)$$

определяют радиоактивность изотопа. Метод учитывает только те электроны, которые вылетели из радиоактивного образца наружу. Т.е. учитывается радиоактивность некоторого

приповерхностного слоя образца, толщина которого определяется пробегом электронов бета распада, т.е. их энергией.

В случае адсорбции газообразного трития поверхностью исследуемого образца атомы трития находятся на поверхности материала, бета электроны теряют очень небольшую часть своей энергии и поэтому можно считать, что практически все бета электроны с вектором скорости направленным наружу вылетают из исследуемого образца (ИО). В этом случае для измерения бета-тока можно использовать регистрирующий электрод (РЭ), рис. 1, расположив ИО и РЭ в вакуумной исследовательской камере (ИК), при этом вакуум внутри камеры должен быть не хуже $10^{-3} \div 10^{-4}$ торр.

Если электрически соединить электроды ИО и РЭ, то в цепи ИО – РЭ будет течь электрический ток $I_{\beta 0}$ (бета-ток), определяемый количеством бета электронов, испускаемых ИО в единицу времени, т.е. его активностью A и зарядом, собранным электродом РЭ, определяемым коэффициентом собирания α , формула (2).

$$I_{\beta 0} = A \cdot e \cdot \alpha. \quad (2)$$

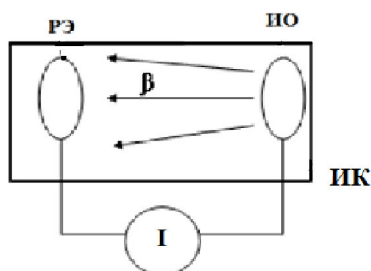


Рис. 1. Электрическая схема измерения бета тока, ИО- исследуемый образец, РЭ-регистрирующий электрод, ИК -вакуумная исследовательская камера.

В предлагаемой геометрической модели собирания бета-электронов считается, что тритиевый образец испускает электроны изотропно и только часть из них попадает на собирающий электрод РЭ, что можно в первом приближении учесть расчетным геометрическим коэффициентом собирания $\alpha_{\text{расч.}}$.

Геометрический коэффициент $\alpha_{\text{расч.}}$ можно рассчитать по формуле

$$\alpha_{\text{расч.}} = \frac{1}{S_{\text{И}}} \cdot \int \int \frac{1}{4\pi \cdot l^2} dS_{\text{К}} \cdot dS_{\text{И}} \quad (3),$$

где $S_{\text{И}}$ - площадь ИО, $dS_{\text{И}}$ и $dS_{\text{К}}$ элементарные площади на ИО и регистрирующем электроде РЭ, l - расстояние между элементами $dS_{\text{И}}$ и $dS_{\text{К}}$ на ИО и РЭ.

С другой стороны, измерив ток $I_{\beta 0}$ между ИО и РЭ и учитывая геометрию электродов коэффициентом собирания $\alpha_{\text{расч.}}$, можно вычислить радиоактивность ИО $A_{\text{расч.}}$:

$$A_{\text{расч.}} = \frac{I_{\beta 0}}{\alpha_{\text{расч.}} \cdot e}, \quad (4)$$

где e – заряд электрона.

Коэффициент собирания α также можно определить из экспериментальных результатов, зная начальную тритиевую активность ИО $A_{\text{эсп.}}$ (известную при изготовлении контрольных образцов) и измеряя бета-ток $I_{\beta 0}$, по формуле:

$$\alpha_{\text{эсп.}} = \frac{I_{\beta 0}}{A_{\text{эсп.}} \cdot e}, \quad (5)$$

где e – заряд электрона.

Для ряда исследуемых образцов значения величин радиоактивности $A_{\text{эсп.}}$, усреднённые данные измерения бета токов $I_{\beta 0}$, полученные экспериментально геометрические коэффициенты $\alpha_{\text{эсп.}}$ (формула (5)), рассчитанные $\alpha_{\text{расч.}}$ (формула (3)), а также вычисленные значения радиоактивности ИО $A_{\text{расч.}}$ (формула (4)), на основе измерений бета-токов $I_{\beta 0}$ и расчетных $\alpha_{\text{расч.}}$ (формула 3) представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр \ Тип образца	ИО 1	ИО 2	ИО 3
Бета-ток $I_{\beta 0}$, нА	0,13	0,32	2,18
Геометрический коэффициент $\alpha_{\text{расч.}}$	0,016	0,021	0,065
Геометрический коэффициент $\alpha_{\text{эсп.}}$	0,015	0,018	0,052
Рассчитанная радиоактивность ИО $A_{\text{расч.}}$, $\times 10^{-10}$ Бк	5,1	9,5	20,9
Радиоактивность ИО (исходные экспериментальные данные) $A_{\text{эсп.}}$, $\cdot 10^{-10}$ Бк	5,5	11,1	26,0

Как следует из представленных в таблице 1 результатов, наблюдается хорошее соответствие между рассчитанными $\alpha_{\text{расч.}}$ и измеренными $\alpha_{\text{эсп.}}$ геометрическими коэффициентами. Рассчитанные активности $A_{\text{расч.}}$ близки к экспериментально измеренным $A_{\text{эсп.}}$, наблюдается систематическое отличие на 10-20%.

Измерения бета-тока между РЭ и ИО с приложением разности потенциалов, снятие вольтамперной характеристики (ВАХ), позволяет расширить возможности метода. Электрическая схема для измерения ВАХ представлена на рис. 2.

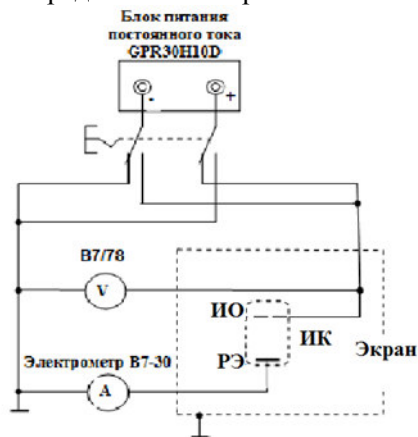


Рис. 2. Электрическая схема для снятия вольтамперной характеристики.

ВАХ имеют характерный «S»-образный вид (рис.3) с насыщением по току, как при приложении положительного, так и отрицательного напряжения между ИО и РЭ. Величина тока I_{β} при приложении электрического напряжения положительной полярности в области насыщения примерно в $I_{\beta}/I_{\beta 0}=2,5 - 3$ раза больше по сравнению со значением $I_{\beta 0}$ без электрического поля. Данное отношение зависит от геометрии электродов и их взаимного расположения. При приложении отрицательного напряжения U между ИО и РЭ появляется тормозящее поле (барьер), препятствующее попаданию бета-электронов на РЭ. Преодолевают этот барьер только электроны с энергией $>eU$.

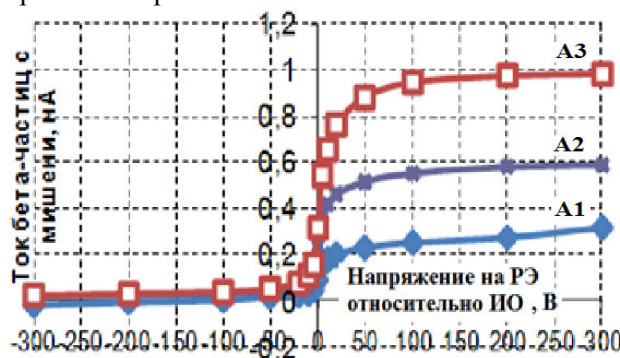


Рис. 3. Вольтамперные характеристики при разных активностях ИО, $A3 > A2 > A1$.

Для оценки влияния проводимости изолятора ИК на бета-ток при снятии вольтамперных характеристик, проведены измерения тока утечки между ИО и РЭ (рис. 2). Результаты измерений тока утечки через стеклянный изолятор ИК представлены на рис. 4.

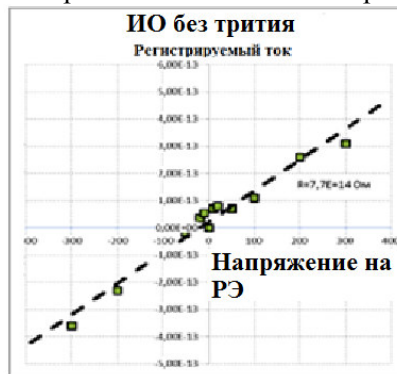


Рис. 4. Зависимость тока утечки через изолятор ИК от приложенного напряжения (ИО без трития).

На данном графике построена ВАХ изолятора ИК. По наклону ВАХ определено сопротивление изоляции $R \sim 7,7 \cdot 10^{14}$ Ом. При приложении напряжения 100 В ток утечки через изолятор не превышает $1,5 \cdot 10^{-13}$ А, т.е. вклад тока утечки пренебрежимо мал, так как составляет около сотой процента при бета-токе 1 нА.

Изменение вольтамперных характеристик при ухудшении вакуума внутри ИК

Проанализируем, как меняется форма ВАХ между ИО и РЭ при ухудшении вакуума и повышении давления внутри объема ИК по причине натекания воздуха. Один из таких случаев (характерный случай) показан на рис. 5.

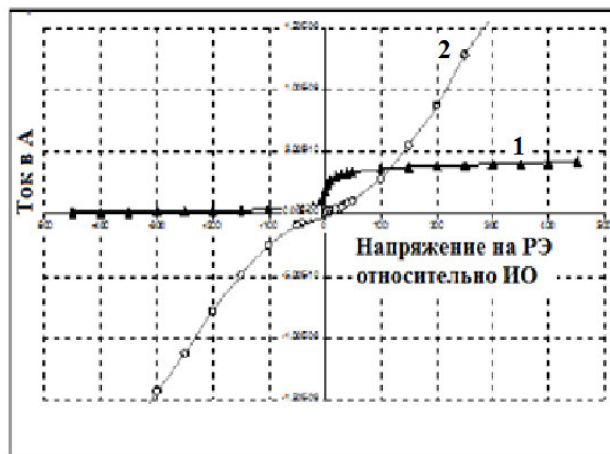


Рис. 5. Типичная ВАХ -1, ВАХ с потерей герметичности корпуса ИК -2.

Если внутрь ИК натекает атмосферный воздух вследствие трещины в корпусе и т.п., то длина свободного пробега электронов уменьшается, они теряют свою энергию на ионизацию молекул газа. Проводимость промежутка увеличивается. Таким образом, вакуумная ИК становится похожа на ионизационную камеру [2]. Величина I_{B0} при $U=0$ В приближается к нулю, поскольку усиливается процесс рекомбинации ионов и электронов. При приложении напряжения между собирающим электродом и мишенью, величина тока увеличивается, поскольку растёт газовое усиление. При достаточно большом давлении газа в ИК уже становится неважно, какая полярность между электродами ИК.

Зависимость тока $I(U)$ между мишенным и собирающим электродами от напряжения U можно представить в следующем виде:

$$I(U) = \sigma_b \cdot U + f_\beta(U) + f_{гус}(U) \quad (6)$$

U – напряжение на собирающем электроде, σ_b – проводимость стеклянного баллона, $f_\beta(U) = A \cdot e \cdot \alpha$ – ток бета-электронов, $f_{гус}(U) = I_0 \cdot C \cdot p \cdot e^{-B \cdot U/U}$ – ток газового усиления, зависящий от природы газа и давления внутри трубки. I_0 – бета-ток с поверхности мишени, C и B – константы, характеризующие среду и геометрию электродов, p – давление газа внутри ИК.

Заряд РЭ электронами бета-распада

Если оставить ИК без электрического соединения радиоактивного ИО и РЭ, со временем происходит накопление отрицательного заряда на электроде РЭ и понижение его потенциала.

Электрическая схема измерения разности потенциалов между ИО и РЭ представлена на рис. 6, где $R_{экв}$ и $C_{экв}$ – эквивалентные сопротивление и ёмкость ИК с вольтметром.

Заряд эквивалентной ёмкости бета-электронами описывается следующим уравнением:

$$C_{экв} \cdot \frac{dU}{dt} = I \cdot P(E_\beta \geq eU) - \frac{U}{R_{экв}} \quad (7)$$

где $C_{экв}$ – эквивалентная ёмкость системы, равная сумме ёмкости промежутка ИО-РЭ и ёмкости вольтметра;

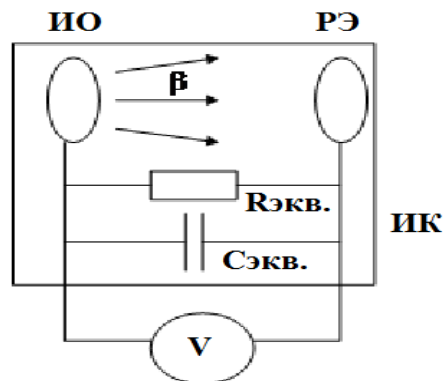


Рис. 6. Схема измерения разности потенциалов между ИО и РЭ.

U – напряжение на РЭ относительно ИО; $P(E_\beta > e \cdot U)$ – вероятность электронам бета-распада иметь кинетическую энергию E_β достаточную для преодоления задерживающего потенциала U на РЭ. Предельное значение задерживающего потенциала $U_{пред} = E_{\beta \max} / e = 18,5 \text{ кВ}$. $I \cdot P(E_\beta > e \cdot U)$ – ток заряда эквивалентной ёмкости, возникающий вследствие вылета бета-частиц (электронов) с ИО при распаде трития, который меняется от максимального значения $I = A \cdot e \cdot \alpha$ при $U=0$ до значения $I \cdot P(E_\beta > e \cdot U)$, зависящего от напряжения U на собирающем электроде.

$\frac{U}{R_{экв}}$ – ток утечки, зависящий от величины сопротивления $R_{экв}$, которое равно параллельно

соединённым сопротивлениям изолятора между ИО и РЭ и параллельно включённому собственному сопротивлению киловольтметра, α – коэффициент сбора бета-электронов.

Проводя оценку величины максимального напряжения, до которого может зарядиться эквивалентный конденсатор, примем, для простоты рассмотрения, что функция плотности распределения бета-электронов по энергиям постоянна на интервале $0 \div E_{\beta \max}$ и равна $p(E) = 1/E_{\beta \max}$. Тогда функция распределения (вероятность электрону иметь энергию от 0 до E) $P(0 \div E) = E/E_{\beta \max}$. Запишем функцию распределения через напряжение на промежутке ИО-РЭ: $P(U) = eU/E_{\beta \max} = U/U_{пред}$. Тогда вероятность $P(E_\beta > e \cdot U)$ бета-электронам иметь энергию больше $e \cdot U$, $P(E_\beta > e \cdot U) \equiv 1 - P(U)$, где U напряжение на РЭ:

$$P(E_\beta > eU) = 1 - P(U) = 1 - \frac{U}{U_{пред}}, \quad (8)$$

где $U_{пред}$ – предельное значение напряжения, до которого может зарядиться эквивалентная ёмкость, если утечки нет и сопротивление $R_{экв} = \infty$.

В этом случае уравнение (7) примет вид:

$$C_{\text{экв}} \cdot \frac{dU}{dt} = I \cdot \left(1 - \frac{U}{U_{\text{пред}}}\right) - \frac{U}{R_{\text{экв}}} \quad (9)$$

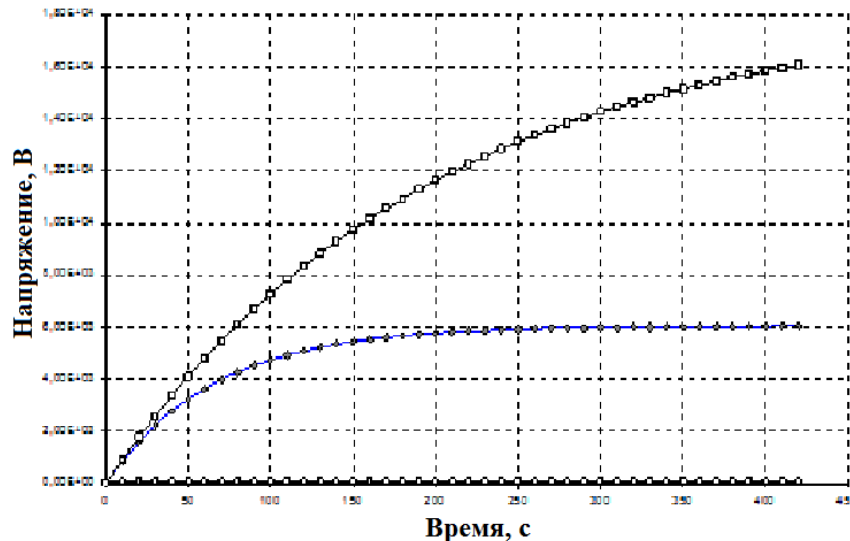
и при $t \rightarrow \infty$ (когда $dU/dt = 0$) максимальное напряжение U_{max} на электродах ИО-РЭ будет равно:

$$U_{\text{max}} = \frac{U_{\text{пред}}}{1 + \frac{U_{\text{пред}}}{I \cdot R_{\text{экв}}}} \quad (10)$$

Решение в общем виде для заданной нами функции распределения энергии бета-электронов будет иметь вид:

$$U(I, t) = \frac{U_{\text{пред}} \cdot R_{\text{экв}} \cdot I}{U_{\text{пред}} + R_{\text{экв}} \cdot I} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{I}{U_{\text{пред}} \cdot C_{\text{экв}}} + \frac{1}{R_{\text{экв}} \cdot C_{\text{экв}}}\right) \cdot t}\right) \quad (11).$$

Ток I можно определить по току в цепи ИО – РЭ при их "закорачивании" через чувствительный амперметр (в наших экспериментах $I=1,2$ нА). Для различных значений параметра $R_{\text{экв}}$, будем иметь серию кривых $U(t)$ заряда эквивалентной ёмкости $C_{\text{экв}}$ ($C_{\text{экв}}=20$ пФ), показанных на рис. 7. Нижняя кривая соответствует $R_{\text{экв}}=7.8\text{E}+10$ Ом ($\ll R_{\text{экв}}$), верхняя - $R_{\text{экв}}=7.8\text{E}+14$ Ом ($\gg R_{\text{экв}}$), средняя - $R_{\text{экв}}=7.8\text{E}+12$ Ом равного суммарному сопротивлению изолятора ИК и вольтметра.



I

Рис.7. Зависимости роста напряжения на эквивалентной емкости при различных значениях $R_{\text{экв}}$.

Максимальное напряжение U_{max} , до которого может зарядиться эквивалентный конденсатор, можно получить после подстановки значений параметров в формулу (10), $U_{\text{max}} = 6000$ В.

Для изучения явления зарядки электродов ИО-РЭ при распаде трития в ИО была собрана схема, приведённая на рис. 6. В качестве вольтметра был использован электростатический вольтметр С196. Экспериментальные данные в виде зависимости напряжения на эквивалентном конденсаторе от времени заряда показаны на рис. 8. Электроды ИО-РЭ заряжаются до напряжения 3 кВ за время 550 с, наклон кривой $U(t)$ позволяет прогнозировать максимальное напряжение заряда в 5-6 кВ. Из формы кривой $U(t)$ следует, что экспериментальная зависимость явно не экспоненциальная. Это, по всей вероятности, связано с особенностью распределения бета-частиц по энергии. Оно, очевидно, неравномерное по энергии (как предполагалось в расчете). Увеличение отрицательного потенциала на РЭ до значения $U_{\text{не}}$ даёт электронам бета-распада с кинетической энергией меньше $e \cdot U$ достичь РЭ.

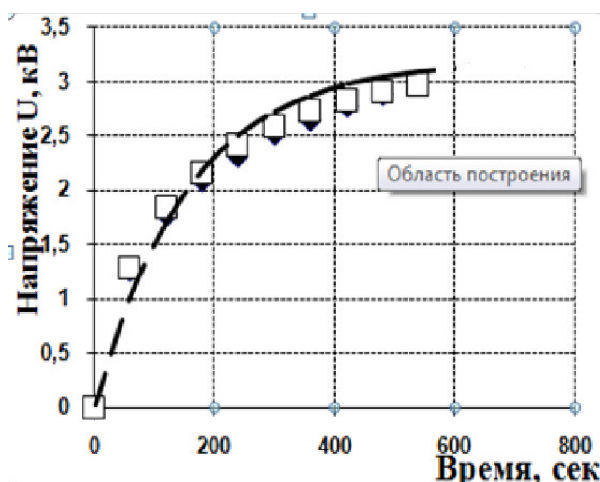


Рис. 8. Экспериментальная зависимость напряжения между электродами ИО-РЭ от времени.

Таким образом, экспериментально показано, что между электродами: ИО с тритием и РЭ возникает разность потенциалов, достигающая нескольких кВ.

Выводы

Разработан метод, позволяющий определять радиоактивность трития адсорбированного металлическим образцом из газовой среды.

Показано, что между образцом с тритием ИО и регистрирующим электродом РЭ возникает разность потенциалов, достигающая нескольких кВ.

Ухудшение вакуума внутри исследовательской камеры приводит к характерному изменению вольтамперной характеристики промежутка образец с тритием – регистрирующий электрод.

Литература

1. ГОСТ26306-84
2. Сидоренко В.В., Кузнецов Ю.А., Оводенко А.А. "Детекторы ионизирующих излучений". Справочник. Л., Судостроение, 1984.