

ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ С ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОКРЫТОЙ НИТРИДОМ ТИТАНА

*О. С. Орлов¹, И. Н. Мешков,
А. Ю. Рудаков, А. В. Филиппов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Эксперимент по измерению коэффициента вторичной электронной эмиссии с поверхности образца нержавеющей стали X18H9T, покрытой нитридом титана, выполнен на специализированном стенде в ЛЯП ОИЯИ. Работа связана с известной проблемой образования электронных облаков в вакуумной камере ускорителя при прохождении пучка заряженных частиц. Полученные результаты позволяют оценить эффективность используемых покрытий на основе нитрида титана для подавления процессов образования электронных облаков.

The experiment on measurement of secondary electron yield from surface of a stainless steel X18H9T sample covered with titanium nitride is performed at special stand in LNP JINR. This work is related to known problem of electron clouds formation in a vacuum chamber by a propagating charge particle beam. The obtained results allow one to estimate efficiency of coating nitride titanium for suppression of the process of electron cloud creation.

PACS: 68.49.Jk

ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБЛАКА

Электронные облака представляют собой скопления вторично-эмиссионных электронов, образованных в камере ускорителя в результате ускорения ионизационных электронов остаточного газа в электрическом поле пучка частиц ускорителя и их резонансным размножением в результате вторичной эмиссии электронов со стенок вакуумной камеры ускорителя. По своей природе это явление аналогично известному эффекту «мультипактора» — развитию разряда в резонаторах СВЧ-приборов. Плотность электронных облаков зависит от коэффициента вторичной электронной эмиссии ($K_{ВЭЭ}$) материала вакуумной камеры. Наличие на стенке вакуумной камеры покрытия из TiN снижает $K_{ВЭЭ}$.

¹E-mail: iorlov89@gmail.com

В ускорителях и коллайдерах с высокой интенсивностью пучков электронные облака создают положительную обратную связь, возбуждающую неустойчивость пучков. Появление электронных облаков приводит также к росту давления в вакуумной камере, вплоть до полной потери пучка, поскольку образование электронных облаков сопровождается десорбцией молекул газов, адсорбированных в стенках камеры. При этом возрастает тепловая нагрузка на криогенные поверхности вакуумной камеры. Рост давления в вакуумной камере вызывает также рост эмиттанса пучка из-за рассеяния частиц пучка на остаточном газе. Кроме того, нарушается работа аппаратуры диагностики пучка из-за электромагнитных помех, возникающих от вторичных электронов.

Предварительные расчеты $K_{ВЭЭ}$, проведенные для вакуумной камеры коллайдера NICA, показали, что для материала стенки с $K_{ВЭЭ}$ меньше 1,3 эффект является несущественным [1].

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Измерение коэффициента вторичной электрон-электронной эмиссии осуществлено на специализированном стенде «Рекуператор» [2] при облучении исследуемого образца электронным пучком с энергией в диапазоне от 50 до 1300 эВ. Принципиальная схема измерения $K_{ВЭЭ}$ представлена на рис. 1. Ускоренный первичный электронный пучок (I_1 , E_1) попадает на исследуемый образец и выбивает из него вторичные электроны (E_2 , I_2). На образец подается отрицательный потенциал, величина которого выбирается в диапазоне от -2000 до 0 В в зависимости от выбранного значения энергии падающих электронов

$$E_1 = e(U_{\text{кат}} - U_{\text{обр}}). \quad (1)$$

Вторичные электроны, вылетающие из образца в направлении, противоположном первичному пучку, отклоняются на некоторый угол под воздействием скрещенных электрического E_{\perp} и магнитного B_{\parallel} полей, за счет меньшей энергии, по сравнению с первичными электронами, отклоняются на больший угол и высаживаются на стенку вакуумной камеры.

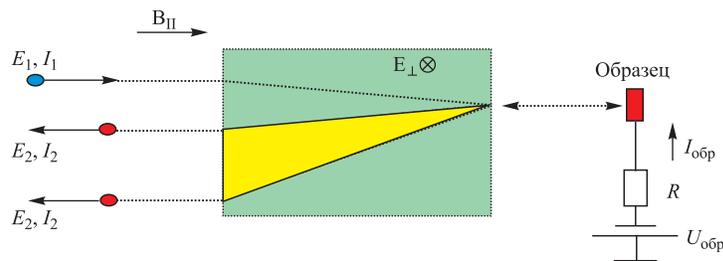


Рис. 1. Принципиальная схема измерения $K_{ВЭЭ}$: E_1 , I_1 — энергия и ток первичных электронов; E_2 , I_2 — энергия и ток вторичных электронов; U — потенциал образца; I — ток источника, обеспечивающего потенциал образца; E_{\perp} — поперечное электрическое поле; B_{\parallel} — продольное магнитное поле

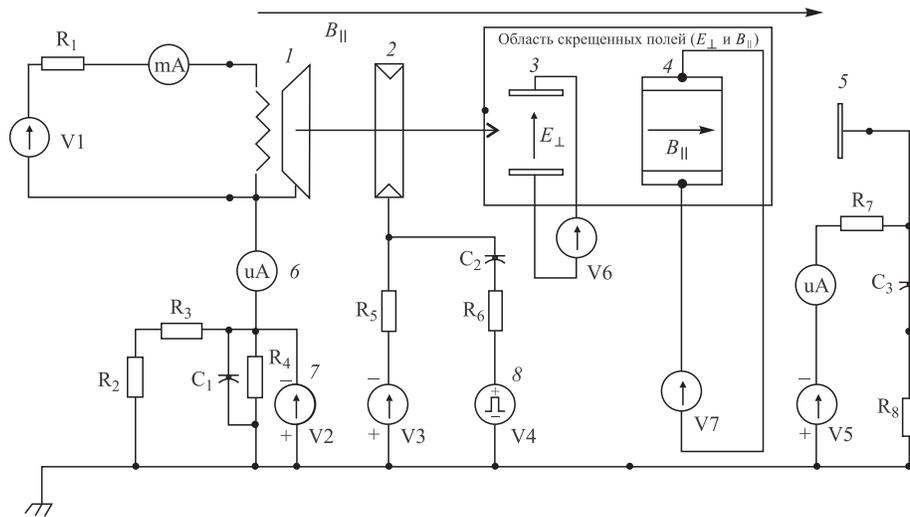


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — катод электронной пушки; 2 — управляющий электрод; 3 — пластины E_{\perp} ; 4 — соленоид; 5 — образец; 6 — амперметр; 7 — источник постоянного напряжения; 8 — импульсный источник напряжения; E_{\perp} , B_{\parallel} — компоненты скрещенных электрического и магнитного полей

$K_{ВЭЭ}$ определяется из значений тока первичного пучка I_1 и тока вторичных электронов, равного току источника напряжения, подключенного к исследуемому образцу $I_{обр}$ (рис. 1):

$$K_{ВЭЭ} = \frac{I_1 - I_{обр}}{I_1}. \quad (2)$$

Схема эксперимента представлена на рис. 2.

В экспериментах измерялась зависимость $K_{ВЭЭ}$ от энергии электронов первичного пучка и от значения плотности заряда, вносимого первичным пучком на поверхность образца. Измерения производились без очистки образца и с очисткой образца электронным пучком с целью удаления с поверхности образца молекул абсорбированного остаточного газа.

Очистка производилась с помощью внесения пучка электронов на поверхность образца двумя методами. В первом случае пучок электронов имел ту же энергию, что и при измерении $K_{ВЭЭ}$. Во втором случае энергия изменялась в диапазоне от 50 эВ до потенциала катода, с шагом 50 эВ.

При измерении $K_{ВЭЭ}$ с очисткой облучение образца первичным электронным пучком производилось в постоянном режиме. Измерение $K_{ВЭЭ}$ без очистки производилось в импульсном режиме, который обеспечивался с помощью управляющего электрода и импульсного источника напряжения.

Результаты измерений коэффициента вторичной электронной эмиссии представлены на рис. 3. Измерениями установлено, что покрытие TiN не вносит заметных изменений в значение $K_{ВЭЭ}$ образца: кривые для не покрытых и покрытых TiN слабо отличаются (рис. 3, а, б, в). В то же время очистка образца электронным пучком играет

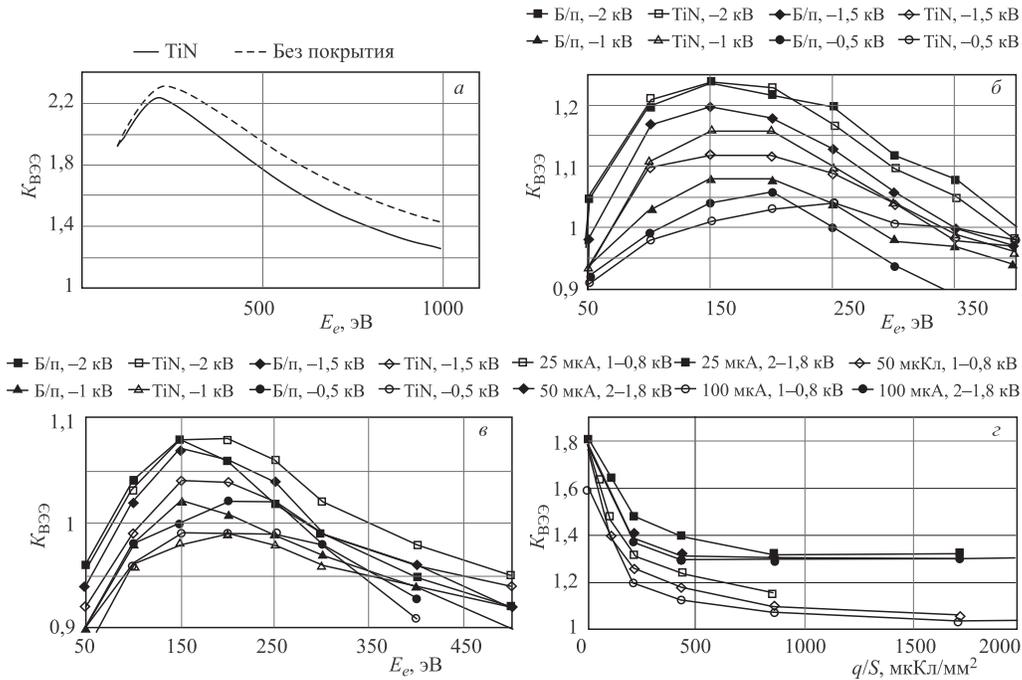


Рис. 3. Результаты измерений $K_{ВЭЭ}$ образцов нержавеющей стали X18H9T без покрытия и покрытых TiN: а) контрольные измерения $K_{ВЭЭ}$ образца без предварительной очистки (импульсный режим); б) зависимость $K_{ВЭЭ}$ от энергии падающих электронов E_e (очистка пластины производилась только на энергии измерения $K_{ВЭЭ}$); в) зависимость $K_{ВЭЭ}$ образца от энергии падающих электронов E_e , очистка производилась по всему измеряемому спектру энергий, плотность заряда, очищающего пучка, составляла 10 мкКл/мм²; г) зависимость $K_{ВЭЭ}$ образца от плотности заряда, внесенного очищающим пучком

существенную роль — она уменьшает $K_{ВЭЭ}$ образца примерно вдвое (рис. 3, а, б, в). При этом очистка по всему спектру энергии падающих электронов уменьшает $K_{ВЭЭ}$ образца не более, чем на 10%, по сравнению с очисткой только на энергии измерения $K_{ВЭЭ}$ (рис. 3, б, в).

Значение $K_{ВЭЭ}$ образца достигает равновесного значения (около 1,2) уже при плотности заряда, внесенного очищающим пучком, $q/S \approx 500$ мкКл/мм² (рис. 3, г).

ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННОГО РЕЗУЛЬТАТА

С целью проверки полученных результатов образцы с покрытием TiN, на которых произведены эксперименты, были направлены в «Technology department Vacuum, Surfaces and Coatings» ЦЕРН, где методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) был определен состав поверхности образца с TiN-покрытием и измерен их $K_{ВЭЭ}$. Результаты, полученные в ЦЕРН, представлены на рис. 4.

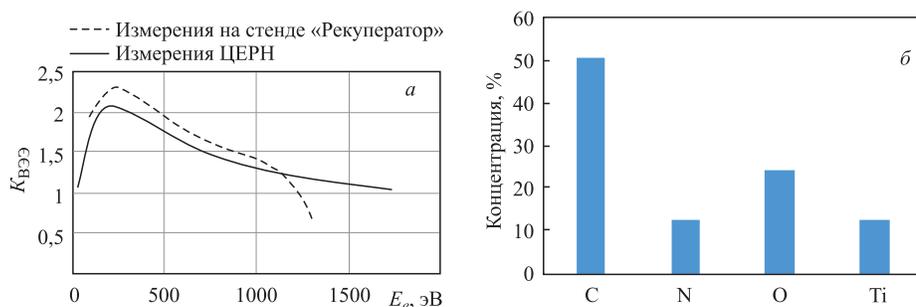


Рис. 4. Результаты измерения «Technology department Vacuum, Surfaces and Coatings» ЦЕРН методом РФЭС: а) сравнение экспериментальной зависимости $K_{вээ}$ от энергии падающих электронов для образцов, покрытых TiN, полученных в «Technology department Vacuum, Surfaces and Coatings» ЦЕРН и на стенде «Рекуператор»; б) состав поверхности образца, полученный в «Technology department Vacuum, Surfaces and Coatings» ЦЕРН методом РФЭС

Как видно из рис. 4, результаты, полученные в экспериментах на стенде «Рекуператор», практически совпадают с результатами экспериментов в «Technology department Vacuum, Surfaces and Coatings» ЦЕРН. Наибольшее отличие $K_{вээ}$ наблюдается на энергиях более 1000 эВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отработана методика измерения $K_{вээ}$ поверхности исследуемых образцов материалов на стенде «Рекуператор». Сравнение результатов измерений образцов нержавеющей стали X18H9T показывает незначительные различия $K_{вээ}$ при исследуемых вакуумных условиях. Для оценки эффективности использования материала покрытий вакуумных камер необходимо в дальнейшем исследовать динамику $K_{вээ}$ образцов при процессах абсорбции и десорбции остаточного газа в зависимости от вакуумных условий — давления, температуры и состава остаточного газа. Контрольные измерения в «Technology department Vacuum, Surfaces and Coatings» ЦЕРН показали совпадение с результатами экспериментов ОИЯИ в пределах 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов А. В., Кузнецов А. Б., Мешков И. Н. Electron-Cloudless Mode of the NICA Collider // Письма в ЭЧАЯ. А. Тяжелые ионы. 2011. Т. 8, № 10. С. 87–90.
2. Мешков И. Н., Рудаков А. Ю. Экспериментальные исследования вторичной электрон-электронной эмиссии с поверхности вакуумных камер // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5(174–175). С. 678–681.