
**ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ, МОДЕЛИ
И МЕТОДЫ АНАЛИЗА**

УДК 537.533.2

© В. И. Маслов, А. Х. Хусаинов, А. Л. Шилов

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ
КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ**

Описана установка для исследований пространственно-временных электронных корреляций как в эмиссионном потоке, так и внутри самого эмиттера электронов. Измерения проводятся при динамической откачке в вакууме (10^{-6} – 10^{-7} Па). В режиме измерения статистики полевой электронной эмиссии при потоке электронов до 10^3 е/с чувствительность к парным актам составила величину < 0.05 %. При регистрации Si(Li)-детектором электронов с энергией ~ 10 кэВ достигнуто энергетическое разрешение ~ 500 эВ.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальные проблемы фундаментальной и прикладной физики, вакуумной электроники и нанoeлектроники тесно связаны с задачами многочастичного взаимодействия. Эффективным и перспективным методом исследования корреляционных эффектов, обусловленных многоэлектронным взаимодействием, являются измерения статистики полевой электронной эмиссии (ПЭЭ), которая вследствие особенностей ПЭЭ [1] позволяет получить уникальную информацию не только о самом эмиссионном потоке, но и о процессах как на поверхности, так и внутри твердого тела-эмиттера [2, 3].

Выполненные в последние десятилетия исследования, использующие указанный подход, подтвердили, что параметры статистики ПЭЭ содержат интересные и важные данные о пространственно-временном взаимодействии в электронной подсистеме твердого тела [4, 5]. Одновременно эти и другие научно-поисковые работы показали, что для проведения систематизированных исследований по данной тематике необходимо было существенно модернизировать имеющиеся экспериментальные установки [2, 3]. В частности, специфика проведения измерений ПЭЭ из ВТСП-соединений и углеродных эмиттеров требует непрерывной вакуумной откачки. Данная работа посвящена результатам, полученным в этом направлении.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Отпаянные стеклянные экспериментальные приборы были заменены на металлостеклянную вакуумную конструкцию с динамической откачкой. Этот этап значительно ускорил процедуру выведения установки в режим измерения после технологической замены элементов: эмиттера, детектора, диафрагмы. Несомненно, эта позиция по-

высила надежность экспериментального прибора. Радикальное конструктивное изменение — сделать измерительную камеру полностью из металла или металлокерамики на данном этапе изыскательских работ представляется нецелесообразным.

2. Катодно-сильфонный узел выполнен на фланцевом соединении, что позволило облегчить и ускорить процедуру смены образца (катода) и зондирующей диафрагмы. По этой же причине и регистрирующий блок подсоединяется к экспериментальному прибору посредством фланцевого уплотнения. В обоих фланцах уплотнительные прокладки изготовлены из фторопласта.

3. Усовершенствование тракта регистрации улучшило энергетическое разрешение с 1.5 кэВ до 500 эВ. Этот весьма важный шаг вперед выполнен с главной целью — повысить точность амплитудного анализа и расширить функциональные возможности установки. Наша установка позволяет проводить изучение свойств ПЭЭ и термоэлектронной эмиссии в широком температурном интервале (80–2000) К. Уместно отметить здесь, что модификации экспериментальных приборов имели некоторые технические отличия, как например: для измерения статистики ПЭЭ из ВТСП-соединений катодная ножка имела дополнительно 2 ввода для измерения температуры образца термометрическим способом.

Схема установки приведена на рис. 1. Экспериментальный прибор 1 патрубком соединяется с вакуумной системой непрерывной откачки, выполненной на базе форвакуумного насоса и магниторазрядного насоса НМД-0,16. Контроль высокого вакуума осуществляется датчиком ПММ-46.

Изучаемый образец 2, подготовленный соответствующим образом, закрепляется в катодном узле 3, конструкция которого позволяет с помощью экранирующего цилиндра варьировать рабочее напряжение, а также в небольших пределах изменять площадь зондируемого участка поверх-

ности эмиттера. Посредством сильфонного узла 4 можно выводить в зондовое отверстие электронный поток с заданного участка (кристаллографического направления) катода. При этом на катоднолюминесцентном стекле (КЛС) 5, закрепленном на аноде 6 можно наблюдать автоэмиссионную картину, что особо важно при контроле чистоты поверхности эмиттера. На аноде под КЛС устанавливается прецизионная диафрагма с зондовым отверстием. Диаметр последнего определяет параметр пространственной корреляции изучаемого процесса. Параметр пространственной корреляции варьировался в диапазоне 20 нм–1 мм.

В описываемой установке для исследования статистики ПЭЭ применяется метод раздельной регистрации групп электронов различной численности, использующий пропорциональный детектор и амплитудный анализатор. Узел регистрации 7 подсоединяется к прибору, как и катод, посредством фланцевого уплотнения 8. Для регистрации электронов используется кремниевый полупроводниковый детектор (ППД) типа используемых в ядерной физике для измерений бета-излучения [6]. Хорошо зарекомендовали себя в наших экспериментах Si-ППД поверхностно-барьерного типа и Si(Li)-ППД.

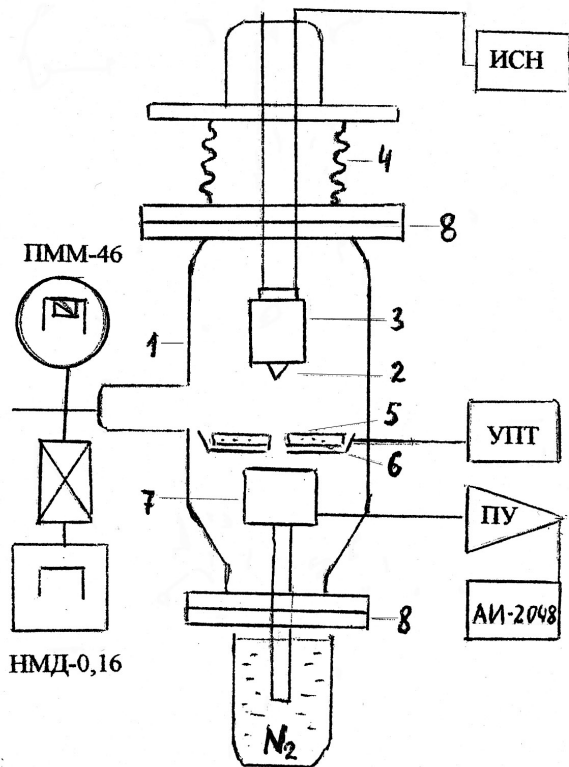


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования электронных корреляционных эффектов

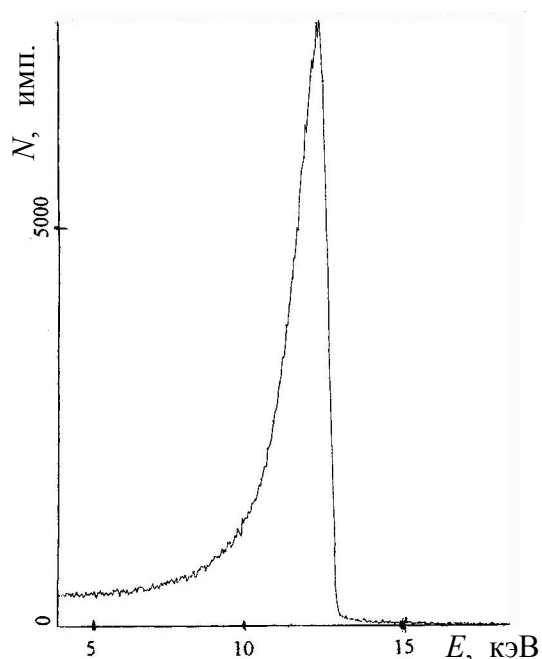
Зарядочувствительный усилитель имеет оптоэлектронную обратную связь; полевой транзистор головного каскада отбирается по оптимальным частотно-шумовым параметрам [7]. Сформированные электрические импульсы с предварительного усилителя (ПУ) поступают для их последующей обработки в анализатор импульсов АИ-2048, выполненный на базе персонального компьютера. Амплитудный анализатор представляет собой многофункциональный аналого-цифровой преобразователь с шиной ISA, устанавливаемый в IBM-совместимый компьютер. Программное обеспечение задает режим работы, накопление и обработку амплитудных распределений. Обработка включает в себя процедуру энергетической калибровки, поиск и идентификацию пиков, сглаживание, алгебраические действия со спектрами и т.п. Программное обеспечение работает в среде Windows. Основные характеристики АИ-2048: число разрядов (каналов) преобразования — 11 (2048); время преобразования — 1.2 мкс; интегральная нелинейность — не более 0.1%. Применение АЦП с программным обеспечением вместо многоканального анализатора импульсов типа АИ-1024 увеличило точность измерения, повысило быстродействие и ускорило обработку данных, а также расширило функциональные возможности: в частности, предполагается кроме измерения статистики ПЭЭ проводить временной анализ корреляционных эффектов.

Временное разрешение установки в режиме измерения статистики ПЭЭ при использовании описываемых экспериментальных приборов определяется длительностью формируемого импульса в спектрометрическом тракте: ее величину можно дискретно менять в пределах (2–10) мкс.

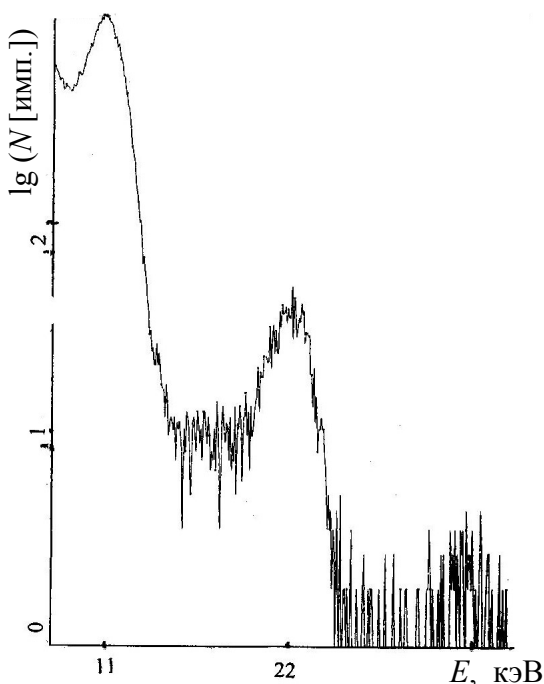
Специфика узлов экспериментальных приборов не позволяет их прогревать при температуре выше 150 °С; это накладывает ограничения на величину предельного значения вакуума (10^{-6} – 10^{-7}) Па. Высокое напряжение на катоде варьировалось в интервале 3–20 кВ с помощью источника стабилизированного напряжения (ИСН). ИСН имеет 2 режима управления — ручное и от персонального компьютера.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Достигнуто энергетическое разрешение в режиме статистики ПЭЭ на уровне 500 эВ. При этом шумы электроники составили всего 250 эВ. Увеличение уровня шума в режиме статистики ПЭЭ относительно шумов электроники обусловлено наводками и помехами от ИСН несмотря на их подавление и тщательное экранирование регистрирующего тракта. Шумовой порог, составивший величину ~1.5 кэВ, способствовал уменьшению



а



б

Рис. 2. Спектры статистики ПЭЭ.
а — эмиттер из вольфрама;
б — эмиттер из фуллеренсодержащего углерода;
здесь E — энергия электронов, N — число отсчетов (импульсов) за время экспозиции

рабочего эмиссионного напряжения на 3–5 кВ, что, таким образом, понизило требования к электрической прочности и, в свою очередь, уменьшило величину электрических помех в спектрометрическом тракте. Достигнутое энергетическое разрешение улучшило чувствительность к парным актам до величины $< 0.05\%$ при потоке электронов до 10^3 е/с и длительности рабочего импульса 3 мкс.

Реперный спектр статистики ПЭЭ из вольфрама приведен на рис. 2, а. Для сравнения на рис. 2, б приведен спектр статистики ПЭЭ из фуллеренсодержащего углерода, полученный на модернизированной установке, но со старым блоком регистрации, имеющим энергетическое разрешение ~ 1.5 кэВ. Обработка спектров статистики ПЭЭ из углеродных катодов показала, что в эмиссионном потоке относительная величина групп из двух скоррелированных электронов составляет несколько процентов, при этом величина пика превышает уровень пуассоновских наложений более чем в 20 раз. На рис. 2, б можно видеть и пик, обусловленный группами из трех скоррелированных электронов. Многоэлектронный характер холодной эмиссии (ПЭЭ) из наноуглеродных структур, возможно, является ключом к объяснению удивительнейших свойств материалов этого класса.

Достигнутый уровень шумов позволил расширить диапазон измерения вольт-амперных характеристик эмиттеров в режиме счета отдельных электронов до величины 0.1 электрона в секунду (10^{-20} А).

Вектор ближайшей цели направлен на объединение настоящей установки с уникальной методикой прецизионного временного анализа [3].

Авторы искренне благодарят В.В. Гребенщикова, А.В. Маслевцова и М.П. Жукова за высококвалифицированную работу и творческий подход к поставленным техническим задачам при создании данного диагностического комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1958. 272 с.
2. Маслов В.И., Фурсей Г.Н., Кочерыженков А.В., Афанасьева Н.П. Установка для исследования статистики автоэлектронной эмиссии при низких температурах // ПТЭ. 1987. № 5. С. 133–135.
3. Маслов В.И., Фурсей Г.Н., Кочерыженков А.В. Методика исследования статистики автоэлектронной эмиссии в широком диапазоне плотностей тока // ПТЭ. 1990. № 2. С. 145–149.
4. Fursey G.N., Kocheryzhenkov A.V. and Maslov V.I. The quantity of elementary acts and

- the statistics of field emission // Surf. Sci. 1991. V. 246. P. 365–372.
5. Маслов В.И. Туннелирование скоррелированных электронов при полевой электронной эмиссии // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, вып. 5. С. 72–75.
 6. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Под ред. Ю.К. Акимова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.
 7. Iwanczyk J.S. Low noise, low power, miniaturized processing electronics for X-ray detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. 1992. V. 322, N 3. P. 543–550.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (Маслов В.И.)

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, г. Гатчина (Хусаинов А.Х.)

Санкт-Петербургский государственный университет (Шилов А.Л.)

Материал поступил в редакцию 17.05.2006.

AN EXPERIMENTAL SETUP FOR INVESTIGATION OF ELECTRON CORRELATION EFFECTS

V. I. Maslov¹, A. Kh. Khusainov², A. L. Shilov

¹*Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

²*Petersburg Institute of Nuclear Physics*

Saint-Petersburg State University

An experimental setup for investigation of the space-temporal electron correlations in the emission flux and in the interior of the electron emitter is described. The measurements are performed in the vacuum (10^{-6} – 10^{-7} Pa) during continuous pumping. The sensitivity level to paired acts was $< 0.05\%$ for measurements of the field electron emission statistics with an electron flux of $\sim 10^3$ e/s. The energy resolution with a Si(Li)-detector reached 500 eV.