

02;11;12

О возможности исключения энергетического порога регистрации электронов полупроводниковыми детекторами

© И.В. Еремин, С.Г. Конников, К.Ю. Погребницкий

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 26 февраля 2003 г.

Описан способ регистрации электронов полупроводниковыми приборами, позволяющий устранить энергетический порог.

Список устройств, применяющихся для регистрации и анализа электронной эмиссии, достаточно широк. Это электростатические анализаторы, газонаполненные анализаторы, микроканальные пластины и т.д. Альтернативой для перечисленных типов устройств детектирования электронов являются полупроводниковые детекторы излучений (ППД) на основе $p-n$ -перехода, широко используемые в настоящее время для спектрометрии ядерных частиц, включая электроны средних и больших энергий (десятки keV и выше). Они имеют несомненные достоинства по отношению к прочим видам детектирующих устройств. Однако существует ряд причин, ограничивающих их использование как анализаторов электронов низких энергий (в диапазоне keV).

В настоящей работе рассматривается подход, позволяющий исключить энергетический порог регистрации электронов полупроводниковыми детекторами за счет предварительного ускорения электронов в электростатическом поле, создаваемом между исследуемым образцом, эмитирующим электроны, и полупроводниковым детектором. Использование такого подхода позволит снять принципиальный фактор, сдерживающий их использование в ряду диагностических методов, основанных на анализе электронной эмиссии с исследуемого объекта, как, например, методов EXAFS (Extended x-ray absorption fine structure), (S)EXAFS (SurfaceEXAFS), XANESS (X-ray absorption near-edge structure).

Введение. Среди способов исследования фундаментальных свойств различных образцов от твердого тела до биологических объектов

на атомном уровне важное место занимают методы, основанные на явлении эмиссии электронов с поверхности образца, в частности при их возбуждении рентгеновским излучением. В этой связи важна не только задача детектирования эмитированных из образца электронов, но и их спектрометрия. Для регистрации спектра электронной эмиссии обычно используются электростатические и магнитные анализаторы, основанные на том, что во внешних полях электроны разных энергий движутся по разным траекториям. Обладая рекордным разрешением по энергии, анализаторы этого типа относительно громоздки, сложны в изготовлении, наладке и эксплуатации. Кроме того, диапазон высоко-разрешающего анализа по энергии электронов достаточно узок, что существенно ограничивает возможности их применения. Более светосильные, газонаполненные пропорциональные анализаторы спектра электронов, обладающие сравнительно малыми габаритами и простой конструкцией, предполагают размещение образца внутри газовой камеры, что для большинства методов неприемлемо. Широкое применение как детекторы электронов нашли микроканальные электронные умножители, которые, наряду с малыми размерами, простотой конструкции и высокой чувствительностью, однако, являются энергодисперсионными только в узком диапазоне энергии регистрируемых электронов. Вследствие этого они используются в основном для регистрации так называемого квантового выхода эмиссии электронов.

Альтернативой для перечисленных типов устройств детектирования электронов являются полупроводниковые детекторы излучений (ППД) на основе $p-n$ -перехода, широко используемые в настоящее время для спектрометрии ядерных частиц, включая электроны средних и больших энергий (десятки keV и выше). Они имеют несомненные достоинства по отношению к прочим видам детектирующих устройств, в частности:

- позволяют регистрировать частицы в широком энергетическом диапазоне одновременно, что обеспечивает меньшее время накопления статистически достоверной информации;
- широкий диапазон размеров от $10 \mu\text{m}^2$ до 100cm^2 и конфигурации чувствительной площади;
- возможность выполнения в виде одно- или двухкоординатных матриц, что обеспечивает позиционную чувствительность;
- высокая технологичность изготовления детекторов и сопутствующей электроники;
- компактность и малый вес.

Несмотря на перечисленные достоинства, существует ряд причин, сдерживающих их использование как анализаторов электронов низких энергий (в диапазоне keV), таких как:

- наличие энергетического порога регистрации, ниже которого не обеспечивается достоверность передачи спектра энергий или наблюдается полная потеря чувствительности;
- шумы детектора и регистрирующей электроники, интерферирующие со спектром электронов в области энергий ниже нескольких keV.

Применительно к задаче спектрометрии фотоэлектронов с энергиями в диапазоне, начинающемся от единиц eV полупроводниковыми детекторами, отмеченные недостатки являются принципиальными, а их преодоление важно для расширения областей их применения.

В настоящей работе рассматривается подход, позволяющий исключить энергетический порог регистрации электронов полупроводниковыми детекторами и тем самым снять принципиальный фактор, сдерживающий их использование в ряду диагностических методов, основанных на анализе электронной эмиссии с исследуемого объекта, как, например, методов EXAFS (Extended x-ray absorption fine structure), (S)EXAFS (SurfaceEXAFS), XANESS (X-ray absorption near-edge structure).

Принцип регистрации и возможность его реализации. В методах анализа структуры и состава твердого тела, основанных на фотоэлектронной эмиссии, исследуемые образцы подвергаются воздействию излучения, вызывающего эмиссию электронов. Так, например, в методе EXAFS поверхность образца облучается рентгеновскими фотонами с энергией порядка нескольких keV, поглощение которых происходит в основном путем ионизации внутренних оболочек атомов образца [1]. Это обуславливает рождение серий так называемых первичных электронов (фотоэлектроны, Оже-электроны), энергетический спектр которых в зависимости от атомарного состава образца лежит в диапазоне от единиц eV до нескольких keV. Часть из рожденных электронов может покинуть поверхность образца, что и составляет явление электронной эмиссии, возбуждаемой рентгеновским излучением [1]. Таким образом, энергетический спектр электронов, эмитируемых твердым телом под воздействием рентгеновского излучения, лежит в диапазоне, начинающемся от нулевой энергии до максимальной энергии рентгеновских фотонов, падающих на образец.

Очевидно, что процесс преобразования энергии электронов в электрический сигнал в любом детекторе приводит к искажению информации об их истинном энергетическом спектре.

При использовании ППД один из основных факторов, искажающих спектр электронов, связан с наличием мертвого слоя на поверхности детектора, не чувствительного к электронам входного окна [2,3]. Толщина входного окна лежит в диапазоне от сотен ангстрем до нескольких микрон и зависит не только от физической толщины слоя сильнолегированного полупроводника, образующего $p^+ - n$ -переход, но и от распределения электрического поля в приповерхностной области $p^+ - n$ -перехода [4]. В результате энергия зарегистрированного электрона, т.е. энергия, выделенная в чувствительном объеме детектора и пропорционально преобразуемая в электрический сигнал, будет меньше истинной на величину энергии, поглощенной при прохождении им входного окна:

$$\Delta_w = \varepsilon W,$$

где ε — удельные потери энергии электрона в материале входного окна; W — эффективная толщина входного окна.

Таким образом, электроны с энергией ниже Δ_w не будут зарегистрированы, а спектр электронов с $E > \Delta_w$ будет смещен в область более низких энергий:

$$E^* = E - \Delta_w,$$

где E^* — энергия электронов в зарегистрированном спектре. При величине ε порядка $1 \text{ keV}/\mu\text{m}$ следует ожидать порога энергии регистрации $\Delta_w \geq 1 \text{ keV}$ [5].

На рис. 1, *a I* и *a 2* изображено истинное распределение электронов по энергии, а на рис. 1, *b I* — влияние на него входного окна детектора: спектр, лежащий левее прерывистой линии, зарегистрирован не будет.

Другим фактором, ограничивающим энергетический диапазон регистрации спектра электронов в области низких энергий, являются шумы, возникающие в результате протекания темнового тока в полупроводниковом детекторе и процессов при усилении сигнала, формируемого детектором. Интенсивность шумовых импульсов прогрессивно возрастает с уменьшением их амплитуды (рис. 1, *c I*), что создает фон, маскирующий спектр электронов, или полностью подавляет регистрируемый спектр, когда интенсивность счета шумовых импульсов превышает интенсивность полезного сигнала [3]. На рис. 1, *d I* приведен достоверный спектр (справа от пунктирной линии).

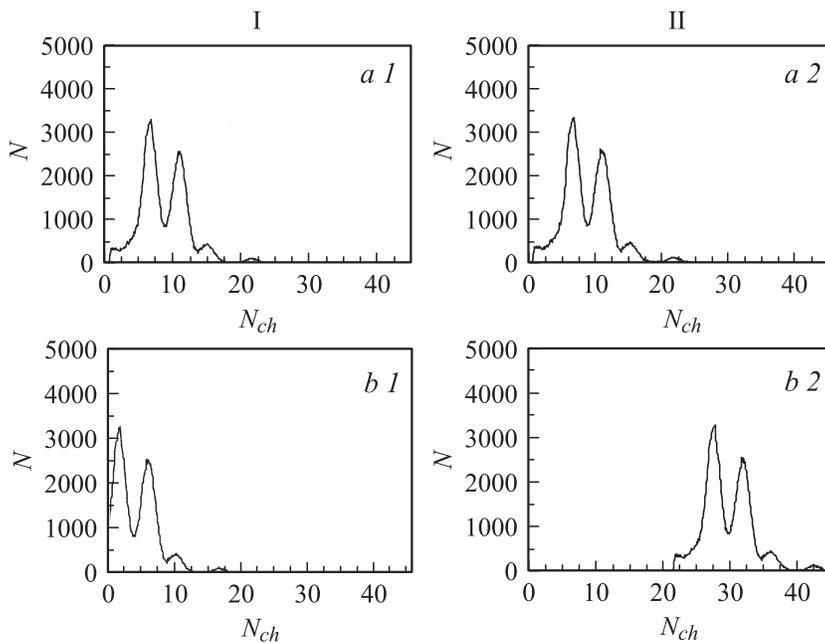


Рис. 1. I — современное состояние, II — новый подход. *a 1*: 1 — шум, 2 — полезный сигнал. N_{ch} — номер канала.

С учетом рассмотренных факторов достоверный энергетический спектр не может быть получен в диапазоне энергий $0 \div \Delta_w + \Delta_n$ (где Δ_n — эквивалентная энергия шумовых импульсов, скорость счета которых равна скорости счета электронов).

Для преодоления указанных ограничений предлагается использовать предварительное ускорение электронов в электростатическом поле, создаваемом между исследуемым образцом, эмитирующим электроны, и полупроводниковым детектором. Частичным аналогом предлагаемого пути является принцип действия различного рода фотоумножителей и фотоэлектронных преобразователей изображения. В них фотоэлектроны, эмитированные фотокатодом, ускоряются в электростатическом поле и регистрируются на аноде. Однако в таких устройствах регистрация фотоэлектронов не предполагает их спектрометрии и полезная информация содержится в интенсивности эмиссии.

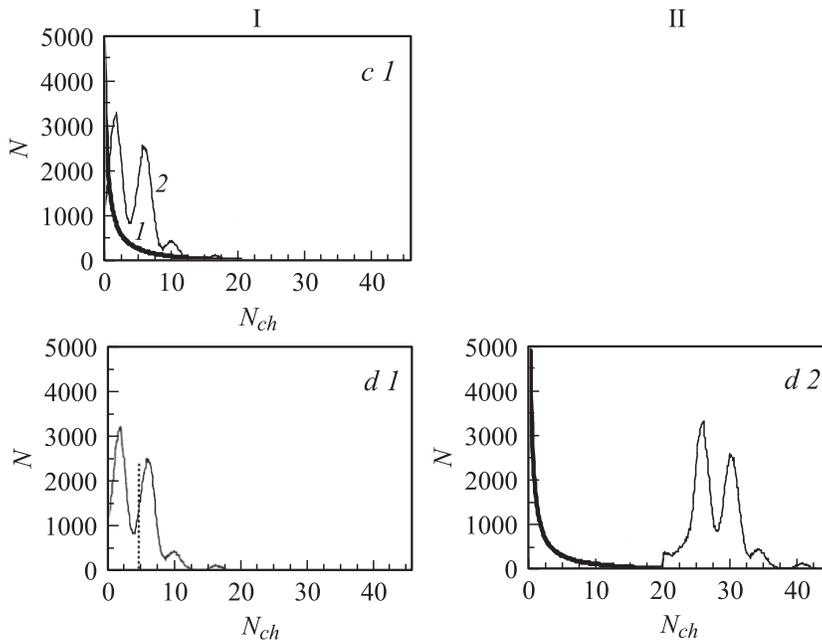


Рис. 1 (продолжение).

Рис. 2 иллюстрирует геометрию ускоряющей системы, адаптированной к задачам методики EXAFS. В силу цилиндрической геометрии угловое распределение эмитируемых электронов сохраняется, а их энергия адитивно увеличивается на величину $q\varphi$, где q — заряд электрона, φ — потенциал между образцом и чувствительной поверхностью детектора (рис. 1, *b 2*). При величине $q\varphi$ большей величины $\Delta_w + \Delta_n$ будут зарегистрированы все эмитированные электроны (рис. 1, *d 1*), причем их спектр не будет иметь искажений, связанных со входным окном и фоном шумовых импульсов. Принципиально важным является то, что путем вычитания из полученного спектра постоянной составляющей q можно восстановить истинный спектр эмитированных электронов.

Выбор величины ускоряющего потенциала φ зависит от характеристик детектора, толщины его входного окна и величины шума. Очевидно, что с практической точки зрения величину потенциала φ следует минимизировать. Это может быть достигнуто за счет умень-

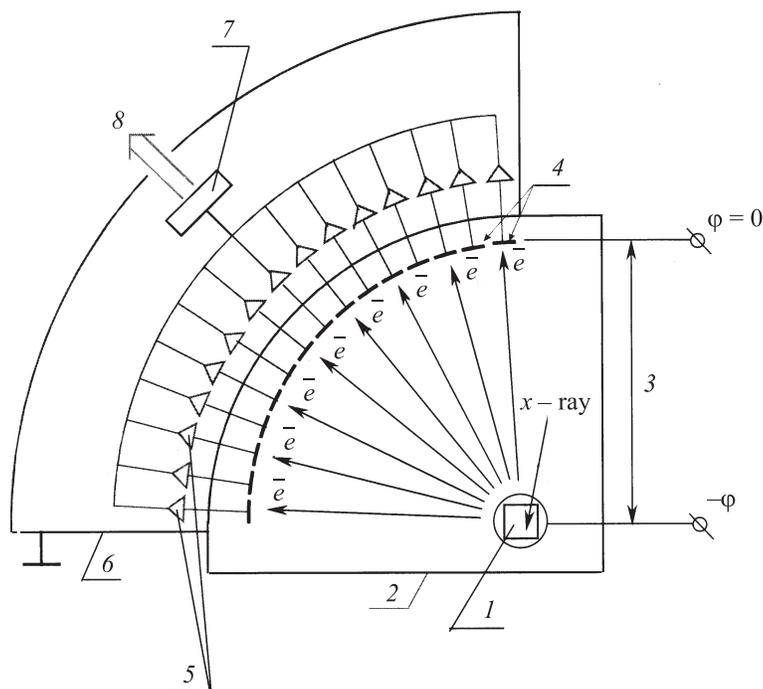


Рис. 2. 1 — исследуемый образец; 2 — вакуумная камера; 3 — область электростатического ускорения; 4 — одиночные детекторы; 5 — зарядочувствительные предусилители; 6 — экран; 7 — мультипликатор; 8 — к спектрометрическому усилителю.

шения толщины входного окна и уровня шума. Кроме этого, рассеяние электронов во входном окне детектора приводит к флуктуациям той части энергии, которая поглощается в чувствительном объеме детектора и превращается в электрический сигнал. Поэтому для достижения лучшей разрешающей способности по энергии уменьшение толщины входного окна является принципиально важным. В результате предлагаемый подход позволяет регистрировать весь спектр электронов, начиная с нулевой энергии, и исключает влияние толщины входного окна полупроводникового детектора и шумов как факторов, создающих порог регистрации электронов низких энергий (рис. 1, *d 2*).

В рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии создание спектрометров фотоэлектронов с предварительным ускорением позволит увеличить объем и качество получаемой информации и, как следствие, расширит аналитические эксплуатационные возможности методов.

Кроме аналитических установок с анализом электронной эмиссии предлагаемая система регистрации электронов может найти применение для:

- регистрации отраженных электронов в электронной микроскопии;
- регистрации радиоактивных элементов, излучающих электроны низких энергий, в частности трития.

Список литературы

- [1] *X-Ray Absorption. Principles, applications, techniques of EXAFS, SEXAFS and XANES* / Ed. by D.C. Koningsberger and R. Prins. A. Wiley-Interscience Publication. New York, 1988.
- [2] *Клаус Грунен. Детекторы элементарных частиц: Справочное издание* / Пер. с англ. Новосибирск, 1999.
- [3] *Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике* / Под ред. Ю.К. Акимова: М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [4] *Kemmer J. // Nuclear Instruments and Methods. 1980. V. 169. P. 499.*
- [5] *Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. V. 17. Semiconductors. New York, 1982.*