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

УДК 539.12: 621.385.833.2

© В. Д. Белов, А. О. Голубок

**ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО НАНОЗОНДА
С ЭНЕРГОАНАЛИЗИРУЮЩИМИ СИСТЕМАМИ
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

В статье проведена оценка возможностей реализации канала детектирования заряженных частиц (электронов или ионов), построенного на сочетании твердотельного нанозонда с электростатической энергоанализирующей системой, включающей светосильный энергоанализатор высокого разрешения и интегральный детектор потока заряженных частиц. В качестве энергоанализатора применен спектрометр на основе аксиальносимметричного электростатического тороидального зеркала, обладающий высокими светосилой и разрешением по энергии, которые являются результатом совмещения в пространстве двух фокусировок второго порядка и большой дисперсии по энергии, превышающей в 1.5 раза величину дисперсии полусферического анализатора. Для существования острой фокусировки оптимальны направления движения частиц, составляющие с осью аксиальной симметрии углы в интервале значений от 28° до 55° . Большой телесный угол входящего пучка частиц (равный двум стерadianам) обеспечивает энергоанализатору светосилу не менее 30 % от 2π . Свойства фокусировки таковы, что при угловом растворе пучка, равном 25° , энергетическое разрешение по основанию спектральных линий может быть лучше, чем $\Delta E/E = 0.1$ %. Простая геометрия poleобразующих электродов делает технологичной и компактной конструкцию энергоанализатора.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общепризнано, что одним из магистральных путей развития науки и техники является путь развития нанотехнологии. Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) — один из базовых приборов в современной нанотехнологии. Визуализация микро- и наноструктур на поверхности образцов в СЗМ основана на детектировании локального взаимодействия твердотельного нанозонда и образца. Измеряя туннельный ток или локальную силу взаимодействия нанозонда и образца в процессе прецизионного механического сканирования, можно не только визуализировать топографию поверхности, но и построить пространственную карту электронных и механических характеристик образца (электрического потенциала, работы выхода электронов, плотности электронных состояний, механической твердости, коэффициента трения).

Характер взаимодействия зонд—образец может иметь различную природу. Например, взаимодействие за счет протекания туннельного тока используется в сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Возникновение силового взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса) лежит в основе метода атомно-силовой микроскопии (АСМ). В оптическом микроскопе ближнего поля детектируются оптические фотоны. Работа емкостного микроскопа основана на электростатическом взаимодействии, магнитного — на действии магнитных

сил, фрикционных — на действии сил трения. Таким образом, существуют различные каналы получения контраста в СЗМ.

Для исключения разрушения зонда и образца в области наноконтакта в процессе визуализации объекта обычно стремятся минимизировать величины взаимодействия между зондом и образцом, которые могут быть достаточно большими. Например, значения напряженности локального электрического поля E , плотности электрического j и механического давления P могут достигать величин $E \sim 10^8$ В/см², $j \sim 10^9$ А/см², $P \sim 10^9$ Н/м² соответственно. Совместное или раздельное действие этих факторов может инициировать разнообразные явления в области наноконтакта, среди которых: разогрев, пластическая деформация, поляризация, электрохимические реакции, полевое испарение, массоперенос за счет ионных токов и т. д. [1].

Одним из возможных новых каналов получения контраста является детектирование заряженных частиц, эмиттируемых из зоны локального механического контакта твердотельного зонда и исследуемой поверхности (экзо- и трибоэмиссия) в результате воздействия на поверхность высоких механических давлений, высоких напряженностей электрического поля и больших плотностей тока. Хотя макромасштабные эффекты экзо- и трибоэмиссии известны [2, 3], явления экзо- и трибоэмиссии, сопутствующие работе СЗМ, до последнего времени практически не исследованы. Идеи исследовать эмиссию заряженных частиц при

взаимодействии зонда с поверхностью уже высказывались ранее [4], но экспериментально они еще не осуществились.

В настоящей работе проведена оценка возможностей реализации канала детектирования заряженных частиц (электронов или ионов), построенного на сочетании твердотельного нанозонда с электростатической энергоанализирующей системой, включающей светосильный энергоанализатор высокого разрешения и интегральный детектор потока заряженных частиц. В качестве энергоанализатора применен спектрометр на основе тороидального зеркала [5, 6] с упрощенной геометрией полеобразующих электродов, обеспечивающей технологичность и компактность конструкции, а также высокую светосилу и разрешение по энергии.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗОНДА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОМЕТРА

В самом простом рассмотрении, позволяющем произвести необходимые оценки, зонд СЗМ представляет собой твердотельное (например, из проводящего материала) острие, ориентированное в направлении нормали к поверхности исследуемого образца. Острие обычно имеет форму конуса с закругленной вершиной, полный угловой раствор конуса около 30° , радиус сферичности вершины меньше или примерно равен 200 нм.

В процессе эксперимента острие-зонд подводят к поверхности, импульсно воздействуют им на нее, касаясь или вдавливая зонд в поверхность, и до следующего цикла воздействия отводят от поверхности на определенное расстояние. Чтобы наблюдать эмиссию частиц из зоны контакта, необходимо наличие разности потенциалов между поверхностью и острием. Разность потенциалов должна быть отрицательной, если на острие нулевой потенциал и ожидается эмиссия электронов с кинетическими энергиями начиная от минимальной величины, или положительной — для регистрации положительно заряженных ионов. Эта разность потенциалов может быть создана подачей на образец импульса напряжения соответствующей знака заряда частиц полярности в момент прерывания механического контакта зонда с поверхностью. Закон изменения амплитуды импульса напряжения во времени следует выбрать таким, чтобы не существовали условия для возникновения автоэлектронной эмиссии с поверхностями взаимодействующих объектов. Можно ожидать, что такие условия будут реализованы, если напряженность электростатического поля в зазоре между зондом и поверхностью образца не превы-

сит величины порядка 10^5 В/см [7]. Для зонда с радиусом сферичности вершины 200 нм при идеально гладкой поверхности образца и максимальной амплитуде импульса напряжения порядка 0.1 В напряженность поля в зазоре менее 10^5 В/см будет при удалении зонда от поверхности на расстоянии более 100 ангстрем (10 нм). Соответствующую этим условиям макроскопическую картину пространственного распределения электронов экзоэмиссии, испускаемых поверхностью, характеризуют показанные на рис. 1 изображения угловых направлений распространения электронов различных энергий, построенные в предположении их первоначально изотропного распределения по углам вылета из поверхности образца.

Электроны, эмиттируемые с поверхности, попадают в электрическое поле, окружающее зонд, ускоряются им, изменяя первоначальные направления движения. Эти изменения тем больше, чем меньше начальные кинетические энергии электронов и чем выше напряженность поля в зазоре между зондом и поверхностью образца.

Представление о характере изменений угловых распределений в группах электронов с одинаковыми начальными энергиями, влияния на эти распределения положений зонда относительно поверхности и центров эмиссии относительно центра контакта дают диаграммы на рис. 2, детализирующие картины пространственных распределений, показанных на рис. 1.

Первоначально распространяющийся во все стороны пучок с широким угловым распределением трансформируется в окружающий зонд полый конический пучок с узким угловым распределением для электронов низких энергий. Линии, образующие контур пучка со стороны, обращенной к зонду, ограничиваются линиями, образующими поверхность зонда. В этом случае зонд представляет собой непрозрачный экран — ловушку для электронов, попадающих в него. Контур внешней границы пучка определенным образом связан с шириной энергетического распределения эмиттированных электронов. Чем выше энергия электронов, тем больше угловой раствор конического пучка.

Пользуясь приведенными выше оценками, можно сформулировать основные критерии для выбора энергоанализирующей и детектирующей системы:

1) ввиду малых размеров объектов исследования система должна быть светосильной, чтобы обеспечить регистрацию потоков частиц предельно низкой интенсивности;

2) наряду с высокой светосилой система должна допускать возможность вести параллельный анализ энергетического и углового распределений, знание которых может дать дополнительную информацию о строении объектов;

3) система должна быть компактной, чтобы обеспечить эффективную экранировку от внешних статических и динамических электромагнитных

полей, а также иметь удобную геометрию для совмещения с устройствами зонда.

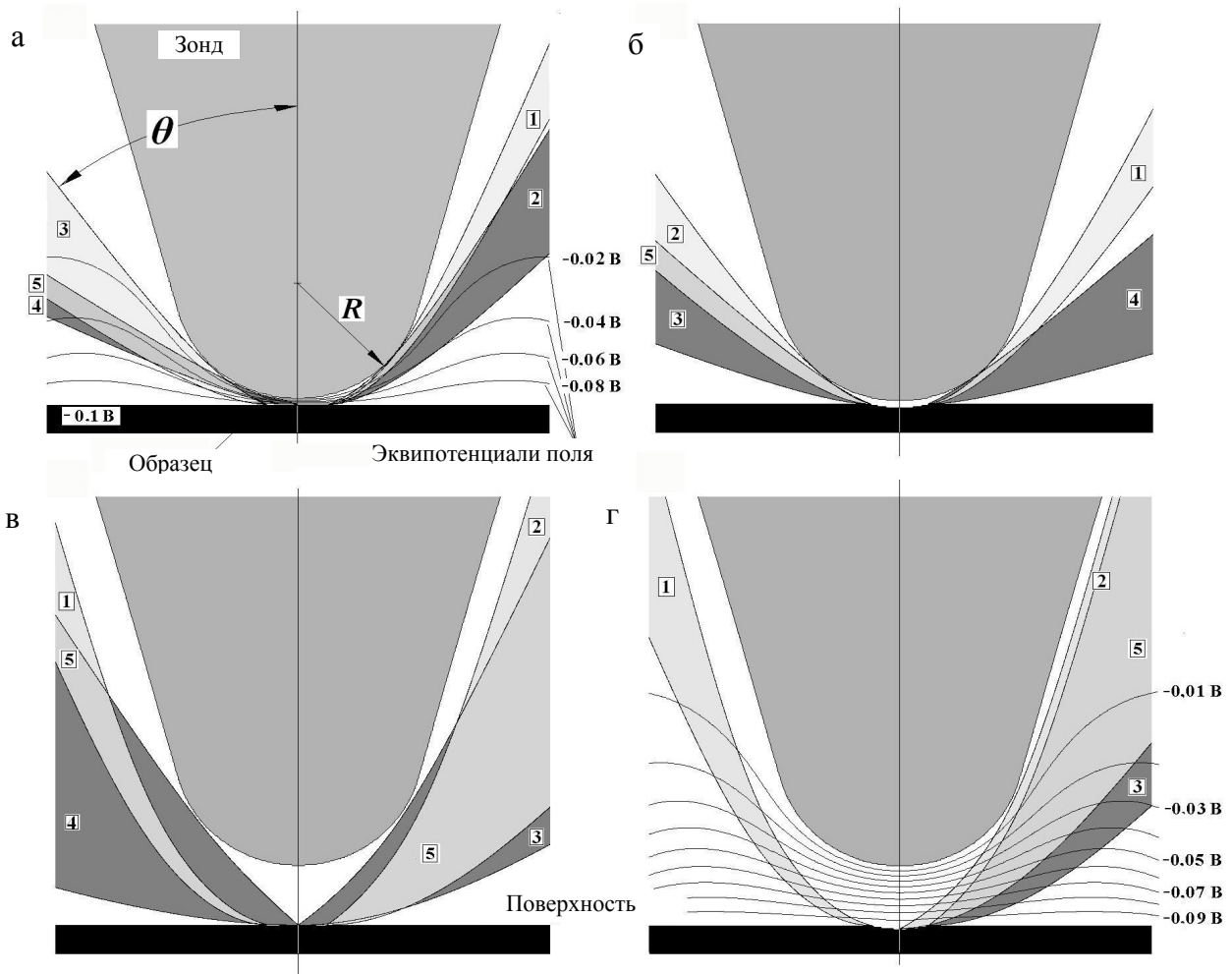


Рис. 1. Картины пространственного распределения испускаемых электронов в зависимости от их начальной энергии, величины зазора между зондом и поверхностью и позиции центров эмиссии на поверхности образца.

а — зонд удален от поверхности образца на расстояние, равное 10 нм; контуры пучков 1, 2, 3, 4 соответствуют угловым направлениям движения электронов с начальными кинетическими энергиями 0.2, 0.3, 0.4, 1 эВ; в пучках 1, 2, 3 электроны испускаются из позиций, удаленных от центра контакта на 45 нм; пучок 4 соответствует позиции эмиссии в центре контакта; 5 — область перекрытия траекторий в пучках 3 и 4; θ — угол между направлением движения электронов и осью зонда; максимальным углом вылета соответствует угол $\theta = 90^\circ$; минимальными углами θ характеризуются направления движения, при которых электроны на дальнейшем пути не испытывают столкновений с зондом;

б — эмиссия происходит с границ кратера на поверхности образца после неупругой деформации в результате ударного воздействия зонда; диаметр кратера равен 90 нм; глубина — 5 нм; контуры пучков 1, 2, 3, 4 соответствуют угловым направлениям движения электронов с начальными кинетическими энергиями 0.3, 0.4, 0.8, 1 эВ; 5 — область перекрытия траекторий в пучках 2 и 3;

в — зонд удален от поверхности на расстояние, равное 100 нм; контуры пучков 1, 2, 3, 4 соответствуют угловым направлениям движения электронов с начальными кинетическими энергиями 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 эВ; в пучках 1, 2 электроны испускаются из позиций, удаленных от центра контакта на 45 нм; пучки 3 и 4 соответствуют эмиссии из центра контакта; 5 — области перекрытия траекторий в пучках 2 и 3, 1 и 4;

г — контуры пучков 1, 2, 3 соответствуют угловым направлениям движения электронов с начальными кинетическими энергиями 0.05, 0.1, 0.1 эВ; пучки 1, 3 характеризуют движение электронов, испускаемых с границ кратера; пучок 2 характеризует эмиссию из центра кратера; 5 — область перекрытия траекторий в пучках 2 и 3

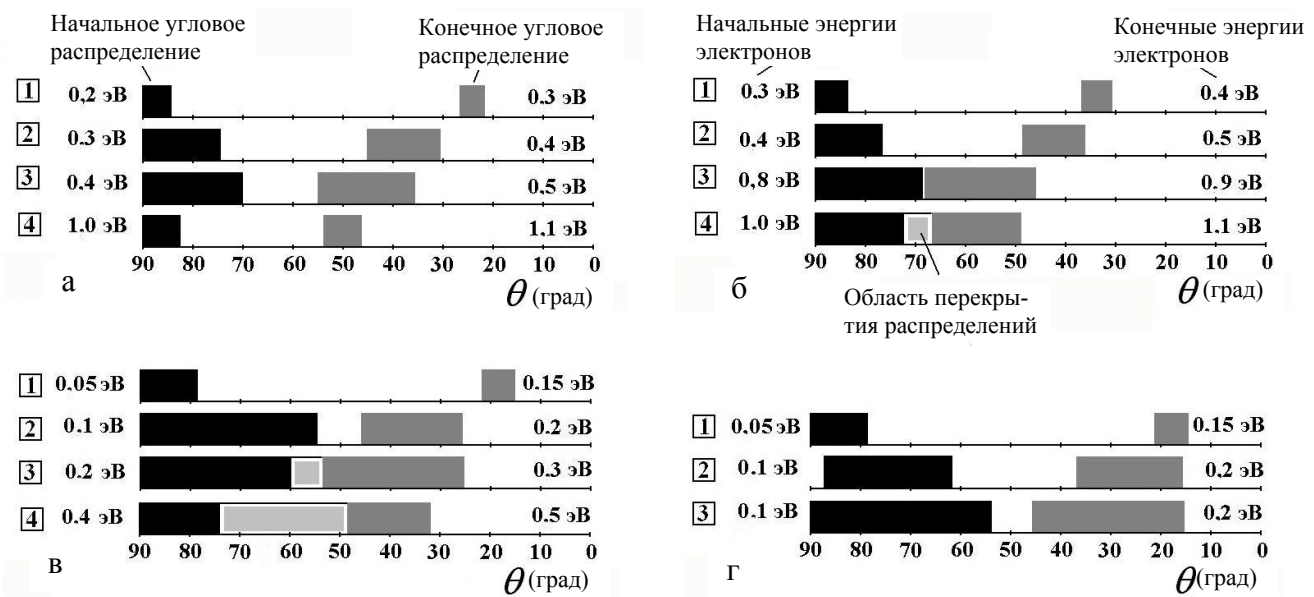


Рис. 2. Диаграммы, иллюстрирующие изменения угловых распределений в группах электронов определенной энергии. Обозначения, энергии в группах электронов, углы θ в начальных и конечных состояниях соответствуют картинам пространственных распределений эмиссии электронов на рис. 1

"НЕТРАДИЦИОННЫЕ" РЕШЕНИЯ СВЕТСИЛЬНЫХ ЭНЕРГОАНАЛИЗИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Полностью перечисленным требованиям не может удовлетворить практически ни один из используемых для энергоанализа традиционных типов и разновидностей спектрометров. Тем не менее, известны отдельные решения, обладающие частью отмеченных свойств.

Анализируя движение нерелятивистских заряженных частиц в электростатическом поле сферического конденсатора, Сар-Эль [8] нашел решение энергоанализатора с предельно высокой светосилой и разрешением, благодаря существованию в системе условий для идеальной фокусировки пучков моноэнергетических частиц. Эти условия осуществляются в аксиальносимметричной конфигурации сферического конденсатора, исполняющего роль сферического зеркала, образуемого сеточными сферическими концентрическими электродами. Радиус внешней сферы вдвое больше радиуса внутренней, точечный источник частиц расположен на оси симметрии системы в бесполом пространстве внутренней сферы. При наличии на обкладках конденсатора тормозящей частицы разности потенциалов, соответствующей по величине их кинетической энергии, траектории частиц, движущихся из точечного источника на оси во всех возможных направлениях, будут сходиться в точку на этой же оси в симметричном источнику положении, образуя идеальный фокус.

Если источник размещен на эквипотенциальной поверхности внутренней сферы, линейная дисперсия по энергии системы равна дисперсии по энергии в классическом варианте полусферического анализатора с радиусом главной траектории частиц (характеризующей движение по окружности), равным радиусу этой сферы. Подобная схема наиболее предпочтительна в плане конструкции, которая может обеспечить размещение и юстировку всех необходимых элементов анализатора (зонда, апертурных диафрагм, детектора и т. д.). Гипотетическая схема энергоанализирующей системы, построенной на этой основе, приведена на рис. 3, а. Систему удобно охарактеризовать следующими геометрическими параметрами:

- базисной длиной L_s , равной расстоянию по оси системы от точечного источника до выходной диафрагмы, ограничивающей сечение и угловой раствор пучка частиц на входе в детектор;

- максимальным угловым раствором пучка 2θ , определяющим внешние границы полого конического пучка, воспринимаемого системой;

- угловым раствором входящего (анализируемого) пучка α , определяющим телесный угол полого конического пучка Ω , воспринимаемого системой;

- геометрической светосилой G , равной отношению (в процентах) угла Ω к полному телесному углу, равному 2π , в системе зонд—поверхность при изотропном распределении эмиттируемых поверхностью частиц.

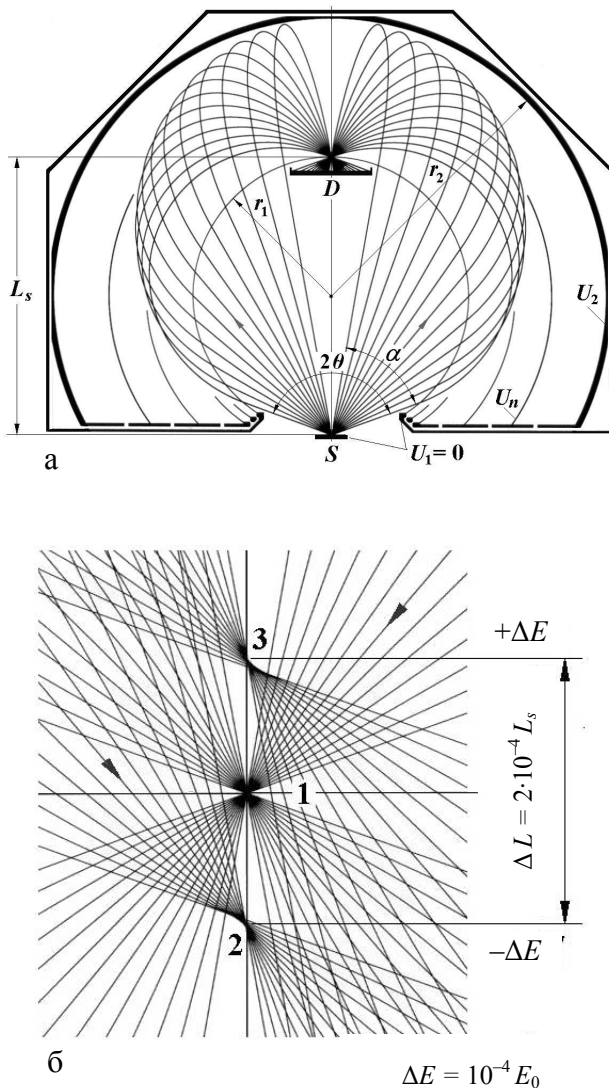


Рис. 3. Гипотетическая схема энергоанализатора с идеальной фокусировкой на основе решения, найденного Сар-Элем [8], (а) и вид фрагментов траекторий, соответствующих пучкам моноэнергетических частиц различных энергий, в окрестности идеального фокуса (б).

S — источник частиц, D — детектор частиц, L_s — базисная длина, r_2 и r_1 — радиусы внешнего и внутреннего сферических электродов, $L_s = 2r_1$, $r_2 = 2r_1$, U_2 и U_1 — потенциалы на внешнем и внутреннем сферических электродах, U_n — потенциал на электродах для коррекции поля в зазоре

В идеальном случае (отсутствие потерь, абсолютная точность изготовления элементов системы, эффективность регистрации равна 1 и т. д.) геометрическая светосила определяет долю частиц от полного их числа в данном интервале энергий,

которая может быть обнаружена с помощью энергоанализирующей системы. Для системы на рис. 3, а $L_s = 2r_1$, $2\theta = 140^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\Omega = 4$ стерадиана, $G = 64\%$.

В отличие от полусферического анализатора система не имеет плоскости дисперсии. В силу аксиальной симметрии фокусы моноэнергетических частиц различной энергии располагаются на оси системы, причем из-за отсутствия для таких частиц условий идеальности фокусировки она деградирует, трансформируясь в фокусировку второго порядка. Картины видоизменений фокусировки иллюстрируют изображенные на рис. 3, б фрагменты траекторий 1, 2 и 3 частиц, энергии которых отличаются на $\pm \Delta E = 10^{-4} E_0$, где E_0 — энергия частиц в идеальном фокусе (фрагмент 1). Чтобы выделить идеально сфокусированный пучок с энергетическим разрешением $\Delta E/E = 0.01\%$, радиус апертурного отверстия в диафрагме, разделяющей пучки частиц различных энергий, должен быть менее $2 \cdot 10^{-5} L_s$, что соответствует размерам в единицы микрон при базисной длине L_s энергоанализатора порядка 100 мм. Требования точности такого же уровня предъявляются к сферическим электродам и другим элементам системы. Ограничиваясь разрешением порядка 0.1% и уменьшая угловой растр α анализируемого пучка на 20–30 градусов, можно увеличить размеры апертурного отверстия до десятков микрон при микронных допусках на изготовление остальных элементов анализатора.

Таким образом, реализация потенциальных возможностей системы представляет собой проблемную задачу даже для современного уровня технологий. Отсутствие возможности вести параллельный анализ энергоугловых распределений (нельзя разделить и регистрировать одновременно пучки частиц различной энергии) является дополнительным ограничением на применимость этой системы.

Частично альтернативным сферическому зеркалу сочетанием светосилы и разрешения обладает аксиальносимметричная электростатическая энергоанализирующая система с градиентом поля вдоль оси симметрии, показанная на рис. 4, а, разработанная Зигбаном с соавторами [9]. В ряде свойств она аналогична наиболее распространенному типу энергоанализатора "цилиндрическое зеркало" (фокусировка вида ось—ось, наличие сеточной границы раздела областей поля и бесполового пространства на пути частиц в анализаторе, пространственная фокусировка по угловым направлениям второго порядка). Благодаря структуре поля с градиентом вдоль оси система обладает лучшим по сравнению с цилиндрическим зеркалом качеством пространственной фокусировки и, в конечном результате, большей светосилой и разрешением по энергии.

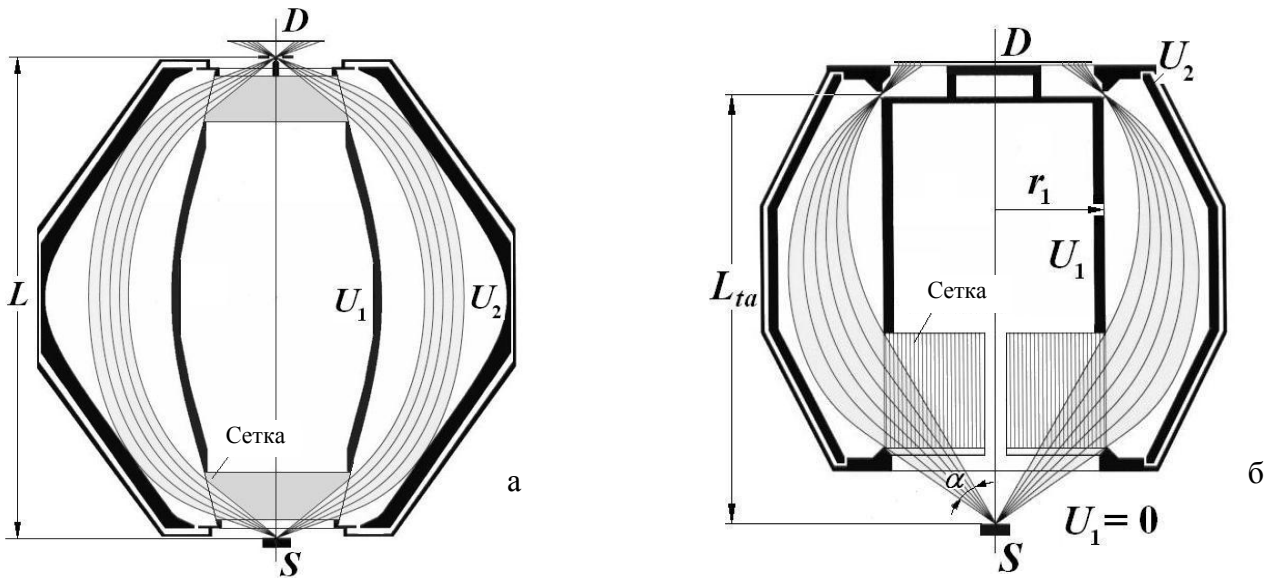


Рис. 4. Альтернативные решения энергоанализирующих систем.
 а — возможная схема энергоанализатора на основе решений авторов работы [9];
 б — схема энергоанализатора на основе аксиально-симметричного тороидального зеркала с фокусировкой вида ось—кольцо и упрощенной формой электродов [6];
 в — вид фрагментов траекторий на выходе тороидального зеркала; фрагменты с индексами 1 и 2 соответствуют моноэнергетическим частицам с энергиями, отличающимися на 1 %

Система имеет такую же линейную дисперсию по энергии, как и аксиально-симметричное сферическое зеркало, но существенно меньшие внешние размеры при одинаковой с ним базисной длине $L = L_s$. По данным авторов [9], оптимальные значения углов раствора θ входного пучка для этой системы находятся в интервале $55^\circ < \theta < 70^\circ$, что соответствует верхней границе значений входных углов сферического зеркала. Экспериментальная реализация системы [9, 10] показывает возможность получения энергетического разрешения около 0.3 % при телесном угле Ω входящего в систему пучка, равном 1.5 стерadian (угол раствора α пучка около 18°). По оценкам авторов [9], при уменьшении углового раствора α до 10° может быть получено разрешение порядка 0.05 %.

Вследствие фокусировки вида ось—ось систе-

ма имеет ограничения и недостатки, свойственные сферическому зеркалу, кроме того, большие апертурные углы θ системы при сочетании с зондом исключают возможность ее применения для регистрации низкоэнергетических компонент спектра эмиттируемых поверхностью заряженных частиц.

СВЕТОСИЛЬНЫЙ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОР НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ТОРОИДАЛЬНОГО ЗЕРКАЛА

Ряд преимуществ в сопоставлении с рассмотренными выше решениями энергоанализаторов имеет энергоанализирующая система на основе аксиально-симметричного электростатического тороидального зеркала с фокусировкой вида ось—кольцо [5, 6]. Схематический вид системы с упро-

щенной геометрией полеобразующих электродов приведен на рис. 4, б. Базисная длина системы связана с величиной радиуса цилиндрического электрода, выделяющего область бесполевого пространства, соотношением $L_{ia} = 3.9 r_1$. Система обладает высоким качеством фокусировки, являющейся результатом совмещения в пространстве двух фокусировок второго порядка, и имеет дисперсию по энергии, в 1.5 раза большую дисперсии сферического зеркала. Эти свойства тороидального зеркала иллюстрируют изображенные на рис. 4, в фрагменты 1 и 2 пучков частиц, энергии которых отличаются на 1%. При таком приращении энергии изменение базисной длины L_{ia} системы составляет величину $\Delta L_{ia} = 1.5 \cdot 10^{-2} L_{ia}$.

Для существования острой фокусировки наиболее оптимальны углы входа θ частиц в систему в интервале значений $28^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$. Свойства фокусировки таковы, что при угловом растворе α входящего в анализатор пучка, равном 25° , энергетическое разрешение по основанию спектральных линий может быть лучше $\Delta E/E = 0.1\%$. Размер щели δL_{ia} в кольцеобразной диафрагме, обеспечивающей 100% пропускание пучка частиц, примерно равен $0.6 \cdot 10^{-3} L_{ia}$. Большой телесный угол воспринимаемого системой пучка (примерно 2 стерadiana) обеспечивает ей светосилу не менее 30%. При ограничении углов раствора пучка в пределах $\alpha = 10^\circ$ теоретически возможно энергетическое разрешение $\Delta E/E = 0.01\%$. Система имеет область дисперсии, протяженность которой может достигать нескольких процентов от максимальной энергии; при этом местом фокусов частиц является линия образующей конической поверхности, пересекающая в плоскости аксиальной симметрии поверхность цилиндрического электрода под углом, равным 22° . Пологость линии фокусов и большая дисперсия по энергии системы позволяют путем установки диафрагм вывести отдельно пучки различных энергий на координатно-чувствительный детектор и реализовать таким образом возможность параллельного анализа энергоугловых распределений частиц. Пример подобного исполнения системы показан на рис. 5, а.

Геометрия системы позволяет разместить в бесполовом пространстве U_1 , ограничиваемом цилиндрическим электродом, коаксиально с этим электродом интегральный детектор потока заряженных частиц, обеспечивающий регистрацию эмиттируемых поверхностью заряженных частиц в широкой области их энергоугловых распределений. Детектор выполнен в виде аксиальносимметричной электростатической полой конической иммерсионной линзы, работающей в режиме ускорения частиц при наличии на ней управляющего потенциала U_3 . Поле линзы, распространяясь

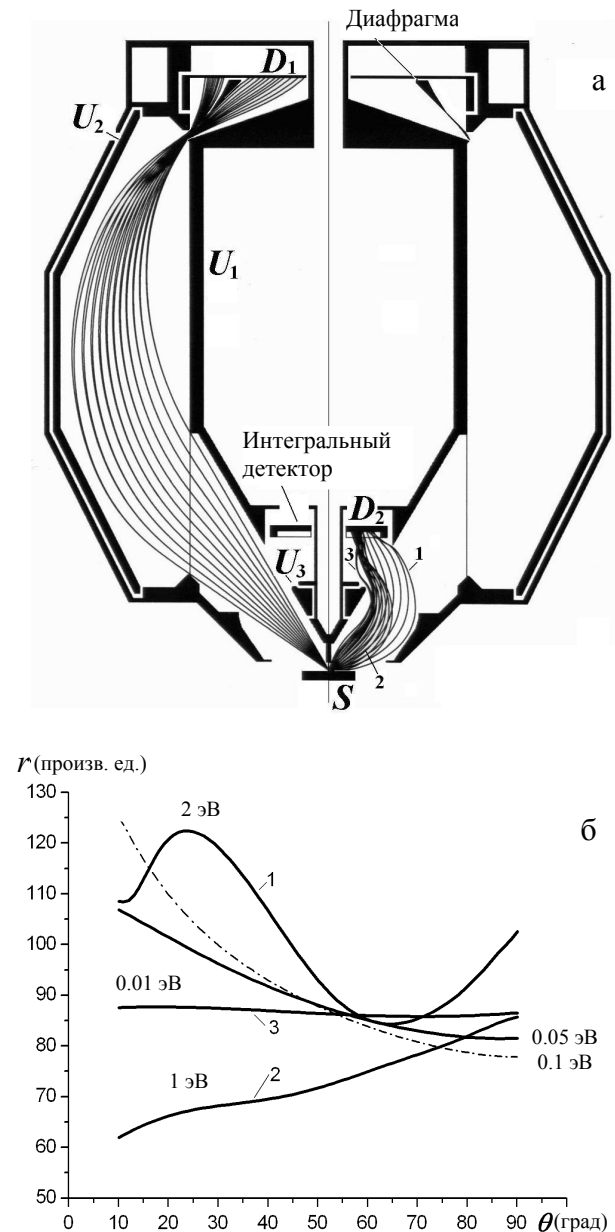


Рис. 5. Концептуальная схема энергоанализатора в комбинации с интегральным детектором эмиттируемых поверхностью заряженных частиц (а) и графики, характеризующие распределение пучков частиц по поверхности координатно-чувствительного детектора в зависимости от угла вылета частиц и их энергии (б).

D_1 и D_2 — координатно-чувствительные детекторы; группы траекторий 1, 2 и 3 характеризуют пучки частиц с энергиями 2, 1 и 0.01 эВ соответственно; θ — угол между направлением вылета и нормалью к поверхности; r — положение пучка относительно оси аксиальной симметрии системы; кривые распределений 1, 2, 3 на (б) соответствуют пучкам 1, 2, 3 на изображении (а)

до поверхности, направляет эмиттируемые частицы на координатно-чувствительный детектор D_2 . Величина управляющего потенциала U_3 связана с верхним граничным значением энергии E_a частиц, поступающих на детектор, соотношением $U_3 = k \cdot E_a / q$, где k — параметр связи, q — заряд частиц. Оптимальные для работы детектора значения k лежат в интервале $5 \leq k \leq 7.5$. Графики на рис. 5, б показывают вид функций распределения пучков частиц по поверхности координатно-чувствительного детектора в зависимости от энергии частиц и угла вылета с поверхности образца. Построенные на рис. 6 гистограммы 1 и 2 характеризуют вероятный вид распределения интенсивности сигнала для пучков 1 и 2 на рис. 5, а в различных точках поверхности координатно-чувствительного детектора D_2 .

В комбинации системы с нанозондом выбранная геометрия линзы и ее фокусирующие свойства предоставляют возможность регистрации эмиттируемых частиц низкоэнергетичной области спектра с эффективностью, близкой к 100 %. Изменяя величину потенциала U_3 и анализируя распределение интенсивности сигнала на детекторе D_2 , можно установить оптимальные рабочие режимы нанозонда и энергоанализатора высокого энергетического разрешения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры показывают высокую эффективность канала детектирования заряженных частиц, построенного на сочетании твердотельного нанозонда с энергоанализирующей системой на основе электростатического тороидального зеркала, включающей светосильный энергоанализатор высокого разрешения и интегральный детектор потока заряженных частиц. Применение в качестве энергоанализатора системы с упрощенной геометрией полеобразующих электродов обеспечивает технологичность и компактность конструкции, а также высокие светосилу и разрешение по энергии.

Авторы благодарят М.И. Явора за полезные замечания, дискуссии и предоставление возможности использования программ моделирования электроннооптических систем [11]. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 06-02-08212-офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Неволин В.* Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2005. 152 с.
2. *Rabinowicz E.* Exoelectrons // *Scientific American*. 1977. V. 236, N 1. P. 74–82.
3. *Миц Р.И., Мильман И.И., Крюк Е.И.* Экзоэлектронная эмиссия полупроводников // *УФН*. 1976. Т. 119, вып. 4. С. 749–764.
4. *Голубок А.О.* Сканирующая зондовая микроскопия и разработки ИАНП РАН в области СЗМ // *Научное приборостроение*. 1999. Т. 9, № 4. С. 64–73.
5. *Belov V.D., Yavor M.I.* Two-stage systems with intermediate beam retarding for energy and spatial analysis of photoelectrons // *Nucl. Instrum. Meth.* 1999. V. A427. P. 197–202.
6. *Belov V.D., Yavor M.I.* New type of high-resolution and high-transmission energy analyzers based on toroidal mirrors // *J. Electron Spectr.* 1999. V. 104. P. 47–54.
7. *Елинсон М.И., Васильев Г.Ф.* Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматгиз, 1958. 272 с.
8. *Sar-El H.Z.* More on the spherical condenser as an analyzer. I. Nonrelativistic part // *Nucl. Instrum. Meth.* 1966. V. 42. P. 71–76.
9. *Siegbahn K., Kholine N., Golikov G.* A high resolution and large transmission electron spectrometer // *Nucl. Instrum. Meth.* 1997. V. A384. P. 563–574.
10. *Isari K., Kobayashi E., Mase K., Tanaka K.* Construction and evaluation of an electron-ion coincidence apparatus using a large transmission coaxially symmetric mirror electron energy analyzer // *Surf. Sci.* 2003. V. 528. P. 261–265.
11. *Dahl A.* SIMION 7 User's Manual. Idaho National Engineering Lab., 2000. 657 p.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

Материал поступил в редакцию 28.11.2006.

SPECIFIC FEATURES OF A COMBINATION OF A SOLID-STATE SURFACE PROBE WITH HIGH-RESOLUTION ENERGY ANALYZERS

V. D. Belov, A. O. Golubok

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg;
Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*

The paper discusses a possibility of implementing a detection channel for charged particles (electrons or ions) based on a combination of a solid-state surface probe with an electrostatic energy analyzing system comprising a high-transmission high-resolution energy analyzer and an integral detector of charged particle beams. As the energy analyzer, a spectrometer based on an axially symmetric electrostatic toroidal mirror is used; it is characterized by high transmission and high energy resolution ensured by spatial superposition of two second-order focusing points and a high energy dispersion (1.5 times greater than that of hemispherical analyzers). The finest focusing is observed for charged particles moving at the angles of 28 to 55° from the axis of symmetry. The large solid angle of the incoming particle beam (two steradians) ensures the energy analyzer transmission of at least 30 % of 2π . The focusing is performed so that, at the beam angular divergence of 25°, the energy resolution at the base of the spectral lines can be better than $\Delta E/E = 0.1$ %. Simple geometry of the field-forming electrodes makes the analyzer design quite compact and manufacturable.