

θ°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
$f = 1,$ $g = 0$	3,34	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$3,59 \cdot 10^{-4}$	$2,40 \cdot 10^{-6}$	$2,69 \cdot 10^{-8}$	$9,21 \cdot 10^{-10}$
$\frac{\omega}{m} = 0,1$	2,70	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$2,80 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-6}$	$2,07 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-10}$
$\frac{\omega}{m} = 0,01$	2,54	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,68 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-8}$	$6,45 \cdot 10^{-10}$

Приводим численную оценку влияния зарядового форм-фактора электрона $f(q^2)$ на сечение рассеяния.

Электродинамический расчет формфакторов f и g приводит к более быстрому убыванию g с ростом q^2 по сравнению с f . Согласно этим расчетам ($\hbar=c=1$)

$$f = 1 - \frac{\alpha}{\pi} \left[\ln \frac{m}{2\omega} + \ln \frac{E}{m} \right] \ln \frac{q^2}{m^2}, \quad (5)$$

где ω — максимальная энергия фотонов, испускаемых электроном в процессе рассеяния ($\omega \ll m$). Результаты вычисления угловой зависимости сечения рассеяния неполяризованных электронов на ядре Al^{27} при $E=200$ Мэв для $f=1$, а также для значения f из (5) при $\omega/m=0,01$ и $0,1$, представлены в таблице. При этом использованы форм-факторы F_C, F_Q, F_{M1} и F_{M3} , полученные в [7] из упругого рассеяния электронов с энергией $E=80-200$ Мэв.

Сечения, получаемые из (3) при $f=1$ и $g=0$, оказываются завышенными по сравнению с экспериментальными данными [7]. Из приведенной таблицы видно, что это завышение может быть устранено путем введения форм-факторов электрона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pratt R. H., Walecka J. D., Griffy T. A. Nucl. Phys., **64**, 677, 1965.
2. Willey R. Nucl. Phys., **40**, 529, 1963.
3. Керимов Б. К., Эль Гавхари А. «Изв. АН СССР», сер. физич., **32**, 2064, 1968.
4. Rand R. E., Frosch R., Yearian M. R. Phys. Rev., **144**, 859, 1966.
5. Соколов А. А., Керимов Б. К. Ann. der Phys., **7**, 46, 1958; Соколов А. А. Введение в квантовую электродинамику. М., 1958.
6. Лифшиц Е. М., Путаевский Л. П. Релятивистская квантовая теория поля, ч. 2. М., 1971.
7. Stovall T., Vinciguerra D., Bernhiem M. Nucl. Phys., **A 91**, 513, 1967.

Поступила в редакцию
7.8 1972 г.

Кафедра
теоретической физики

УДК 54.33

М. В. НАЗАРОВ, Н. Н. СЕДОВ, В. Г. ДЮКОВ

КРИОГЕННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЭМИССИОННЫЙ МИКРОСКОП

Электронная микроскопия позволяет исследовать объекты и физические процессы, протекающие в них, в широком интервале температур. Для просвечивающего и растворного микроскопов созданы приставки, дающие возможность изучать объекты как при температурах выше комнатной, так и при низких температурах. Для широкого класса объектов, которые удобно изучать методами количественной эмиссионной микроскопии

(полупроводниковые приборы, микросхемы и др.), исследования проводятся только при комнатных температурах и выше. Однако представляет большой интерес также изучение и таких явлений и процессов, которые протекают при температурах ниже комнатной.

Для этого нами был разработан и построен новый криогенный эмиссионный микроскоп на базе эмиссионного микроскопа с заземленным катодом¹. Образец в таком микроскопе может охлаждаться до 77° К. Устройство прибора представлено на рис. 1. Образец (9) закрепляется в нижней части стального стакана (8), в который заливается жидкий азот или иной хладагент. Конструкция держателя позволяет перемещать образец в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Для защиты образца от теплового излучения стенок микроскопа имеется защитный экран, находящийся при температуре жидкого азота. Кроме того, для уменьшения теплового излучения колонны микроскопа и предохранения образца от образования углеводородной пленки при охлаждении фокусирующий электрод (7), окружающий объект со всех сторон, также находится при температуре жидкого азота. Вакуумная система микроскопа для предотвращения проникновения паров масла в колонну снабжена рядом ловушек (ионизационного типа в форвакуумной линии и несколькими азотными ловушками, одна из которых (4) показана на рис. 1 в высоковакуумной части).

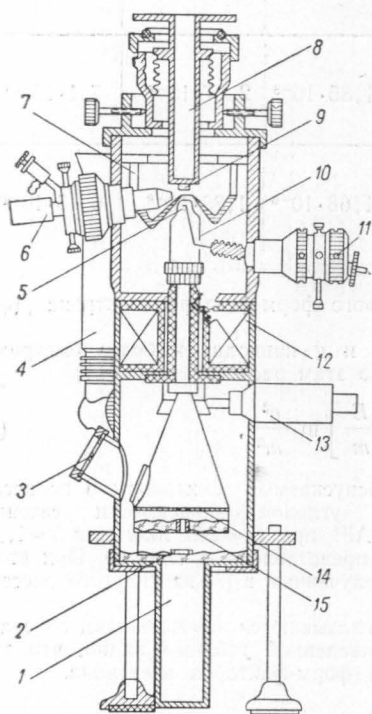


Рис. 1. Разрез криогенного электронного эмиссионного микроскопа

В этом приборе криогенный объектодержатель (8) и исследуемый объект (9) находятся под потенциалом земли, а на анод (10) подается положительное ускоряющее напряжение до 25 кВ через высоковольтный ввод (13). Это существенно облегчает конструкцию криогенной части микроскопа и позволяет легко использовать сложные радиосхемы включения образца. Эмиссия вторичных электронов с поверхности исследуемого объекта вызывается бомбардировкой ее ионным пучком, создаваемым ионной пушкой (6).

Целесообразность применения ионного источника обусловлена тем, что, подбирая соответствующий режим работы пушки изменением прикладываемого напряжения (от 3 до 10 кВ), можно создать ионный пучок с такой энергией, что он будет очищать поверхность образца, не вызывая нарушений поверхности. Катод (9), фокусирующий электрод (7) и анод (10) образуют трехэлектродный иммерсионный объектив. Магнитная проекционная линза (12) позволяет изменять электронно-оптическое увеличение микроскопа от 40 до 300^x в зависимости от тока возбуждения в обмотке линзы.

Применение апертурной диафрагмы (5) повышает разрешение прибора до 1 мкм. Без нарушения вакуума в колонне микроскопа диафрагма может выводиться с оси прибора при помощи устройства (11).

В нижней части колонны микроскопа имеются два окна: смотровое (3) и окно для фотографирования. Для проведения количественных измерений в центре экрана (14) имеется отверстие диаметром 0,2 мм, под которым устанавливается анализатор электронов по скоростям (15) и сцинтиллятор (2). Свечение последнего улавливается ФЭУ (1), сигнал которого подается на измерительные приборы.

Исследовать в криогенном электронном микроскопе можно полупроводниковые приборы. Известно, что с понижением температуры область объемного заряда в *p-n*-переходе расширяется. В этом можно наглядно убедиться по изображению *p-n*-перехода на экране микроскопа и подавая на *p-n*-переход напряжение в обратном направлении.

На рис. 2 представлены фотографии одного и того же участка диффузионного кремниевого диода до (а) и после охлаждения до температуры жидкого азота (б). После охлаждения темная полоса, соответствующая ширине слоя объемного заряда, увеличивается. Видно также, что по качеству изображение, полученное после охлажде-

1 См. М. В. Назаров, В. Г. Дюков, Н. Н. Седов, Г. И. Шелковников. «Приборы и техника эксперимента», 1972, № 5.

ния, не уступает изображению в обычном режиме работы эмиссионного микроскопа при комнатной температуре. Это говорит о том, что на поверхности объекта при понижении температуры не образуется углеводородная пленка толщины, достаточной, чтобы исказить изображение.

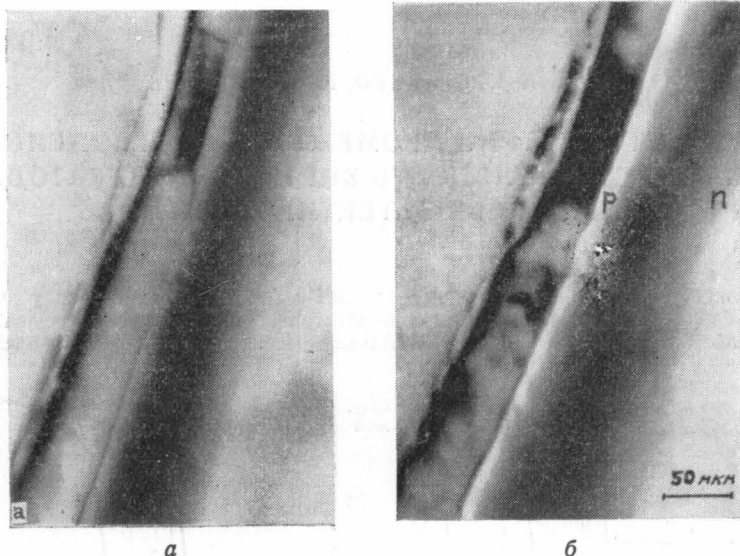


Рис. 2. Изображение диффузионного кремниевого $p-n$ -перехода: *a* — до охлаждения при $T=300^\circ\text{K}$, *б* — после охлаждения до $T=77^\circ\text{K}$ ($V_{обр}=40\text{ в}$)

Количественные данные для того же образца приведены на рис. 3. При комнатной и азотной температурах измерялось распределение потенциала на поверхности. Для сравнения на этом же рисунке приведена кривая распределения потенциала, снятая зондовым методом при комнатной температуре.

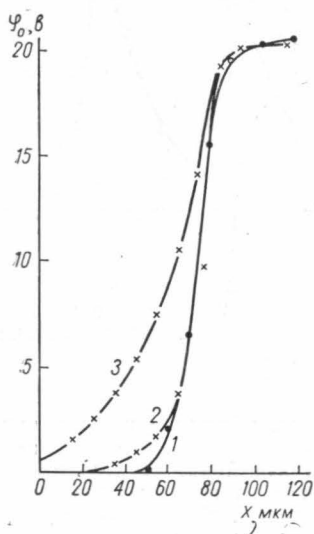


Рис. 3. Распределение потенциала в $p-n$ -переходе. Кривые 1 и 2 измерены соответственно зондовым и электронно-оптическим методами при $T=300^\circ\text{K}$, 3 — электронно-оптическим методом при $T=77^\circ\text{K}$

Высокая точность измерений (до десятых долей вольта по напряжению и 2 $\mu\text{м}$ по координате), широкий интервал температур, сочетание качественной наглядной информации (возможность получения фотографий) с количественной их интерпретацией делают криогенный электронный эмиссионный микроскоп удобным и перспективным

средством для дальнейшего исследования процессов и явлений при низких температурах.

Поступила в редакцию
7.8 1972 г.

Кафедра
электроники

УДК 621.376.232

А. И. КОСТИЕНКО, Ю. А. ПИРОГОВ

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПРОМЕЖУТКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА ПРИ СВЧ-ДЕТЕКТИРОВАНИИ

При экспериментальном исследовании СВЧ-детектирования на виртуальном катоде было обнаружено, что конфигурация коллектора, перед которым создавался виртуальный катод, существенно влияет на величину детекторного эффекта, обусловленного

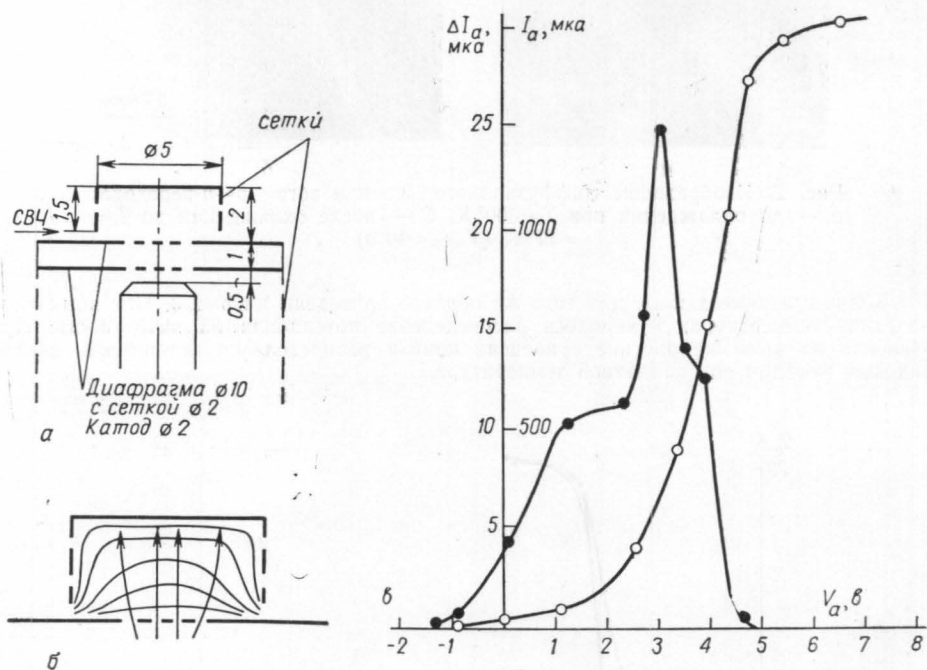


Рис. 1. Расположение электродов в экспериментальном макете с коллектором закрытого типа (а); эквипотенциалы и ход электронных траекторий в рабочем промежутке прибора (б); ○ — вольтамперная и ● — детекторная характеристики «закрытого» промежутка (в)

нелинейными свойствами этого катода. Так, при облучении нерезонансных промежутков, изображенных на рис. 1 и 2, одинаковым по мощности сигналом диапазона $\lambda = 1,2$ см (в промежутке существовал виртуальный катод) детекторный ток в цепи коллектора закрытого типа (рис. 1, а) оказался на порядок больше (рис. 1, в), чем в открытом, плоскоэлектродном промежутке (рис. 2, в). Если же сравнивать их токовые чувствительности (детекторный ток на единицу падающей на виртуальный катод мощности), то чувствительность виртуального катода в промежутке закрытого типа была почти на два порядка большей ($5 \cdot 10^{-1}$ а/вт против 10^{-2} а/вт). В настоящем сообщении объясняется влияние геометрии коллектора (по остальным параметрам макета были практически одинаковы) на чувствительность виртуального катода к СВЧ-возмущению в электронном пучке.