

- [3] Лабунюв В. А., Литвинович Г. В. и др. // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1983. № 7 (180). С. 27—30.  
 [4] Roman Elisa, Riwan Richarad // Surf. Sci. 1982. Vol. 118. N 3. P. 682—696.  
 [5] Качурин Г. А., Степина Н. П. // ФТП. 1982. Т. 16. Вып. 7. С. 1152.  
 [6] Krebs K. U. // Vacuum. 1983. Vol. 33. N 9. P. 555—563.

Научно-исследовательский  
 технологический институт  
 Рязань

Поступило в Редакцию  
 27 ноября 1990 г.  
 В окончательной редакции  
 12 мая 1991 г.

05

Журнал технической физики, т. 61, в. 10, 1991

© 1991 г.

## ИЗМЕРЕНИЕ СРОДСТВА К ЭЛЕКТРОНУ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

О. М. Артамонов, С. Н. Самарин

### Введение

Применительно к твердым телам понятие «сродство к электрону» используется обычно для описания энергетической диаграммы диэлектриков и полупроводников. В этом случае под сродством к электрону понимается энергетическое расстояние от уровня вакуума до дна зоны проводимости (рис. 1). Однако такое определение физической величины, не связанное с процессом, в котором она проявляется, и без уточнения способа ее измерения приводит к неоднозначности

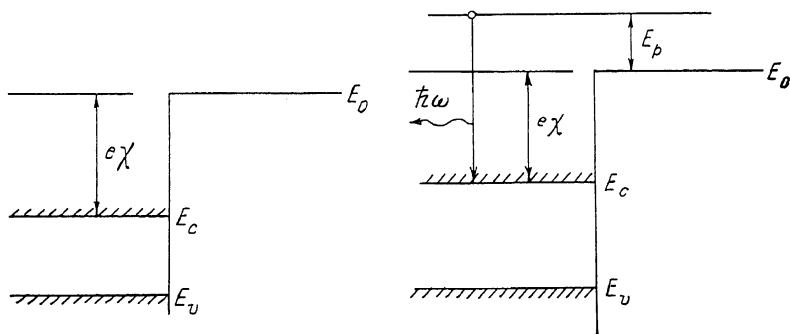


Рис. 1. Энергетическая диаграмма полупроводника.

Рис. 2. Энергетическая диаграмма, поясняющая принцип измерения сродства к электрону полупроводника.

этого понятия. Вместе с тем во многих физических процессах (например, при протекании тока сквозь слоистую структуру) важной характеристикой твердого тела является величина энергии, которая выделяется при релаксации электрона с уровня вакуума на наименьшее незаполненное энергетическое состояние в твердом теле. Очевидно, именно эту характеристику следует называть сродством к электрону твердого тела  $e\chi$  (по аналогии с определяемой таким образом в атомной физике величиной сродства к электрону атомов и молекул).

Знание о величине сродства к электрону твердых тел необходимо при подборе материалов для формирования полупроводниковых сверхрешеток и различных гетероструктур.

До недавнего времени не существовало адекватного способа измерения сродства к электрону твердых тел. Информация, получаемая об этой характеристике из фотоэмиссионных данных с использованием значения ширины запрещенной

зоны, полученной в оптических измерениях, относится к возбужденной электронной системе, и вычисленное из этих данных значение  $e\chi$  может отличаться от истинного на величину до 0.6 эВ [1].

### Физические основы способа измерения сродства к электрону

Развитие методик, основанных на явлении радиационного захвата электрона (РЗЭ) твердым телом [2] (в зарубежной литературе оно называется обращенной фотоэмиссией), позволяет производить прямое измерение величины  $e\chi$ . Сущность этого способа иллюстрируется рис. 2. Если поверхность образца облучается электронами с энергией  $E_p$  относительно уровня вакуума  $E_0$  и в возникающем при этом электромагнитном излучении максимальная энергия фотонов равна  $\hbar\omega$ , то сродство к электрону определяется соотношением

$$e\chi = \hbar\omega - E_p. \quad (1)$$

В изохроматном варианте методики радиационного захвата этот способ реализуется следующим образом [3]. Анализатор излучения настраивается на регистрацию фотонов с энергией  $\hbar\omega$ . Энергия электронов, которыми облучается образец, изменяется от 0 до  $E_p$  — порогового значения, при котором появляется излучение на частоте  $\omega$ . Тогда сродство к электрону определяется тем же соотношением (1).

Очевидно, что для того чтобы зафиксировать оптический переход на дно зоны проводимости и при этом знать энергетическое положение начального состояния (энергию  $E_p$ ), необходимо выполнение соотношения  $\hbar\omega > e\chi$ .

Таким образом, для осуществления процесса измерения сродства к электрону в изохроматном варианте методики необходимо иметь селективный детектор излучения для регистрации фотонов с энергией  $\hbar\omega$ , обеспечить соотношение  $\hbar\omega > e\chi$ , измерить пороговое значение энергии электронов  $E_p$  относительно уровня вакуума  $E_0$ .

### Экспериментальные результаты

Описанный способ измерения сродства к электрону металлов практически осуществлен с помощью прибора, схема которого показана на рис. 3. Образец 1 расположен в фокусе эллиптического зеркала 2. Электронная пушка 3 формирует

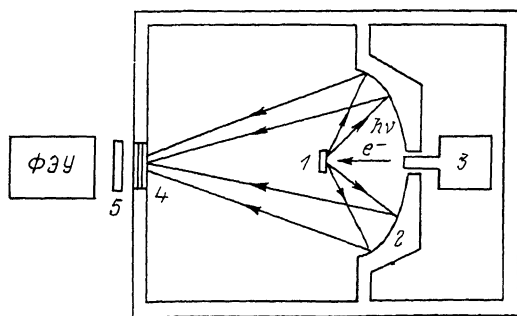


Рис. 3. Схема экспериментального прибора для измерения сродства к электрону твердых тел.

рует параксиальный пучок электронов. Энергию электронов можно изменять от 0 до 10 эВ. Во втором фокусе зеркала расположено выходное окно 4 вакуумной камеры. Интерференционный фильтр 5 служит для выделения узкого спектрального интервала на длине волны  $\lambda = 322$  нм с полушириной  $\Delta\lambda = \pm 5$  нм. Фотоэлектронный умножитель регистрирует излучение. В эксперименте измерялась зависимость интенсивности излучения  $S$  как функции энергии электронов  $E$ , а также ток  $I$  в цепи образца как функции энергии электронов. Для

определения пороговых значений энергии удобно использовать модуляционный режим измерений с записью производных по энергии от соответствующих зависимостей. Первый максимум на кривой  $dI/dE$  определяет положение уровня вакуума на шкале энергий и служит началом отсчета кинетической энергии электрона вблизи поверхности образца. Первый максимум на кривой  $dS/dE$  определяет пороговое значение энергии  $E_p$  электронов, при которой появляется излучение с фиксированной энергией фотонов  $\hbar\omega$ . Величина электронного сродства определяется следующим образом:  $e\chi = \hbar\omega - E_p$ . В случае когда условие  $\hbar\omega > e\chi$  не выполняется (в эксперименте это проявляется в том, что два упомянутых максимума совпадают по энергии), уровень вакуума образца понижается на величину  $\Delta$  путем напыления на его поверхность электроположительного адсорбата (в случае образцов W и Ag напылялся La). Затем измерялось сродство к электрону  $e\chi_1$  образовавшейся поверхности. А сродство к электрону исходного образца  $e\chi$  находилось из соотношения  $e\chi = e\chi_1 + \Delta$ .

Рассмотренный метод был практически реализован в случае W (110), Ag (111) и поликристаллического La. Полученные значения величины электронного сродства этих металлов ( $e\chi_{La} = 3$  эВ,  $e\chi_{Ag} = 4.7$  эВ,  $e\chi_W = 5.3$  эВ) хорошо согласуются в рамках погрешности с работой выхода этих материалов [4]. Это соответствует естественному предположению о том, что в случае металла работа выхода практически равна сродству к электрону.

### Заключение

Сродство к электрону твердого тела может быть определено как максимальное значение энергии, которая выделяется при захвате электрона с нулевой кинетической энергией твердым телом. В одноэлектронной модели твердого тела это означает переход электрона с уровня вакуума на наименьшее незаполненное состояние в твердом теле. Сродство к электрону зависит от поверхностных условий, от агрегатного состояния твердого тела, от кристаллографической ориентации поверхности. Таким образом, совершенно недостаточно определять сродство к электрону как энергетическое расстояние от уровня вакуума до дна зоны проводимости (в полупроводнике) или до уровня Ферми в металле. Используя явление радиационного захвата электрона твердым телом, можно адекватным образом измерить сродство к электрону исследуемой поверхности.

### Список литературы

- [1] *Straub D., Ley L., Himpfel F. J.* // Phys. Rev. 1986. Vol. B15. N 4. P. 2607—2614.
- [2] *Dose V.* // Progr. Surf. Sci. 1983. Vol. 13. P. 225—284.
- [3] *Артамонов О. М., Самарин С. Н., Яковлев И. И.* // ФТТ. 1986. Т. 28. Вып. 8. С. 2536—2538.
- [4] *Фоменко В. С.* Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1981.

С.-Петербургский  
государственный университет

Поступило в Редакцию  
28 ноября 1990 г.

## К ВОПРОСУ ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ ВАКУУМНОГО ПРОБОЯ МИКРОЧАСТИЦАМИ

В. А. Трифонов, Т. И. Козловская

Одна из моделей вакуумного пробоя предполагает, что иницирование его возможно за счет вытягивания с поверхности электродов и переноса через межэлектродный промежуток микрочастиц. В ряде экспериментов [1, 2] удалось