

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.1

ОСОБЕННОСТИ РЕКОМБИНАЦИОННОЙ ЭМИССИИ  
МОНОКРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМА И НИОБИЯ

В. А. Маштакова, Б. Б. Шишкин

*(кафедра электроники)*

1. В настоящей работе измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) вакуумных диодов с металлическими монокристаллическими электродами. Объекты исследования: кристаллографическая плоскость (100) монокристалла вольфрама и грань (110) монокристалла ниобия. Точность выведения граней вольфрама ( $\sim 30'$ ) и ниобия ( $\sim 3^\circ$ ) контролировалась по лауэграммам. Кристаллы полировались механическим и электролитическим способами. Топография поверхности исследована в растровом электронном микроскопе; заметный контраст отсутствовал при увеличениях до  $10^4$  раз. Исследование поверхностного состава кристаллов методом оже-спектроскопии показало, что на поверхностях всех кристаллов присутствуют следы углерода и кислорода. Интенсивность пиков углерода и кислорода резко уменьшалась при ионной бомбардировке кристаллов и при длительном прогреве их при температурах, близких к температурам плавления. Можно утверждать, что объекты исследования — атомно-чистые грани монокристаллов вольфрама и ниобия.

2. Конструкция симметричного вакуумного диода и методика измерения ВАХ подробно изложены в работе [1]. Предельное давление остаточных газов в приборе составляло  $10^{-11}$  мм рт. ст., давление в процессе измерений ВАХ не превышало  $10^{-9}$  мм рт. ст. Для диодов с различными объектами измерено по четыре серии ВАХ. Результаты хорошо воспроизводятся. Анализируемая серия ВАХ для грани (100) вольфрама содержит 25 кривых, измеренных в интервале температур  $T = 1675—2150$  К. Анализируемая серия ВАХ для грани (110) ниобия содержит 28 кривых в интервале  $T = 1730—2080$  К.

3. В работах [1, 2] сообщалось об аномалиях на ВАХ диодов с вольфрамовыми термокатодами. Аномалии возникают при температурах катода  $T$ , превышающих характеристические термоэмиссионные температуры  $\Theta_{тэ}$ . «Ступеньки» на ВАХ при  $T > \Theta_{тэ}$  в случае вольфрама можно рассматривать как скачки напряжения  $u$ .

В настоящей работе обнаружены аномалии на начальных участках ВАХ диодов с электродами из ниобия (грань (110)). Аномалии возникают при  $T > \Theta_{тэ} \cong 1870$  К (рис. 1). Как следует из анализа рис. 1, «ступеньки» на ВАХ в случае электродов из ниобия можно рассматривать как скачки тока диода.

Результаты измерений температурной зависимости плотности эмиссионных токов  $j_s(T)$  представлены в ричардсоновских координатах  $y = \lg j_s/T^2$  и  $x = 5040/T$  на рис. 2. Ошибка метода измерений величины  $y$  в ваших опытах не превышала 0,8%. Анализ численных значений эффективных работ выхода  $\Phi_{эф}(T)$  [3], рассчитанных для грани (100) вольфрама, показал, что промахов в измерениях  $j_s(T)$  нет. Предположим, что известное уравнение Ричардсона—Дэшмана

$$j_s = A_p T^2 \exp \left\{ -\frac{e\Phi_p}{kT} \right\}, \quad (1)$$

где  $A_p$  и  $\Phi_p$  — постоянная Зоммерфельда и работа выхода,  $e$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана, справедливо во всем интервале  $T$ . По 25 экспериментальным точкам  $y_i(x_i)$  для грани (100) вольфрама рассчитаны ричардсоновские эмиссионные параметры:  $\Phi_p = 4,9 \pm 0,05$  В,  $A_p = 6,2_{-1,7}^{+2,1} \times 10^7$  А/(м<sup>2</sup>·К<sup>2</sup>). Здесь и ниже указываются стандартные отклонения от наиболее вероятных значений, рассчитанных по методу наименьших квадратов. Для шести точек отклонения рассчитанных значений  $y_i$  от экспериментальных выходят за пределы метода измерений

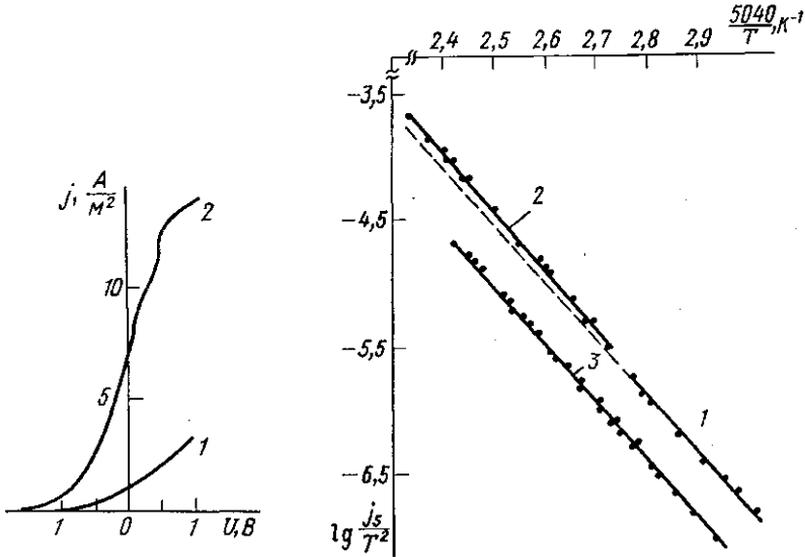


Рис. 1. Нормальная (1) и anomальная (2) ВАХ диода с термокатодом из ниобия, грань (110).  $T = 1865$  (1) и  $2065$  (2) К

Рис. 2. Прямые Ричардсона: 1 — низкотемпературная прямая, вольфрам, грань (100); 2 — высокотемпературная прямая, вольфрам, грань (100); 3 — ниобий, грань (110)

Ду. Таким образом, возникает противоречие: по расчетам  $\Phi_{эф}(T)$  промахов в измерениях  $j_s(T)$  нет, а по расчетам  $\Phi_p$  и  $A_p$  примерно каждое четвертое измерение ВАХ следует причислить к промахам.

Предположим, что при  $T \sim \Theta_{тэ}$  «прямая» Ричардсона испытывает излом. Разделим всю температурную область  $\Delta T$  на две подобласти: низкотемпературную (нт) — от  $1675$  до  $\Theta_{тэ} = 1820$  К и высокотемпературную (вт) — от  $1820$  до  $2150$  К. Допустим, что в каждой из этих подобластей справедливо уравнение (1), и рассчитаем ричардсоновские постоянные. В результате найдем

$$(\Phi_p)_{нт} = 4,4 \pm 0,2 \text{ В}; \quad (\Phi_p)_{вт} = 4,76 \pm 0,04 \text{ В};$$

$$(A_p)_{нт} = 2_{-1}^{+4} \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^2}; \quad (A_p)_{вт} = 2,8_{-0,6}^{+0,7} \cdot 10^7 \frac{\text{А}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^2}.$$

Таким образом, при  $T = \Theta_{тэ}$  обе ричардсоновские постоянные возрастают. Найденные нами значения  $(\Phi_p)_{нт}$  и  $(A_p)_{вт}$  хорошо коррелируют с результатами прецизионных измерений [4], а значения  $(\Phi_p)_{вт}$  и  $(A_p)_{вт}$  совпадают с результатами [5].

По 28 экспериментальным точкам  $y_i(x_i)$  для грани (110) ниобия рассчитаем:  $\varphi_p = 4,66 \pm 0,04$  В,  $A_p = 4,1_{-0,9}^{+1} \cdot 10^6$  А/(м<sup>2</sup>·К<sup>2</sup>). В пределах ошибок измерений для грани ниобия (110) ричардсоновские параметры остаются постоянными во всем температурном интервале.

4. Если низкотемпературную прямую Ричардсона для грани (100) вольфрама экстраполировать (пунктирная прямая на рис. 2) в высокотемпературную область, то окажется, что экстремальные значения  $j_s$  в 2—3 раза превосходят расчетные. В соответствии с основной идеей работы [2] будем считать, что при  $T \geq \Theta_{тз}$  на ток термоэлектронной эмиссии накладывается ток рекомбинационной эмиссии, обусловленной рекомбинацией френкелевских пар. В каждом элементарном акте рекомбинации освобождается энергия, примерно равная по величине удвоенной теплоте образования вакансий ( $Q_v$ ). Для всех основных граней переходных металлов эта энергия достаточна для создания в электронной жидкости металлов элементарных возбуждений на уровни, превышающие уровень вакуума. Исключение составляет плотная грань (110) ниобия. По результатам [6]  $(Q_v)_{Nb} = 2,15$  В. Следовательно,  $(2Q_v)_{Nb} < \varphi_p$  и на грани (110) ниобия рекомбинационная эмиссия не должна наблюдаться. Экспериментальные результаты настоящей работы подтверждают этот вывод.

Ступеньки на ВАХ ниобия, по всей видимости, обусловлены флуктуационными процессами, следствием которых является образование небольшого количества медленных электронов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Маштакова В. А., Воронков С. Н., Шишкин Б. Б. Изв. АН СССР, сер. физ., 1979, 43, с. 1830. [2] Маштакова В. А., Шишкин Б. Б. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, с. 99. [3] Hensley E. B. J. Appl. Phys., 1961, 32, p. 301. [4] Abeu A. E. J. Appl. Phys., 1968, 39, p. 120. [5] Султанов В. М., Шуппе Г. Н. Изв. АН УзССР, сер. физ.-мат. наук, 1965, 5, с. 49. [6] Крафтмахер Я. А. ФТТ, 1964, 6, с. 503.

Поступила в редакцию  
29.12.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 2

УДК 535.373.132

#### ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОФОСФОРА SrS, АКТИВИРОВАННОГО ЦЕРИЕМ

М.-Л. Ю. Аллсалу, В. В. Михайлин, В. В. Нелипа, Э. Ю. Педак  
(кафедра теоретической физики)

В работе исследованы спектры люминесценции и спектры возбуждения люминесценции сульфида стронция, активированного церием. Концентрация церия в образцах изменялась от 0,01 до 2,0 мол. %. Церий вводился в сульфид стронция в виде  $Ce_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ . Синтез кристаллофосфоров был проведен в атмосфере серы либо при ограниченном доступе воздуха. Фазовая чистота фосфоров  $\sim 98\%$ .

Люминесцентные свойства сульфидов, активированных церием, исследовались в работах [1, 4]. В  $MgS-Ce$ ,  $CaS-Ce$  и  $SrS-Ce$  обнаружены две полосы свечения [1, 2, 4], которые приписываются переходам с нижнего уровня  $5d$ -конфигурации на уровни  ${}^2F_{5/2}$  и  ${}^2F_{7/2}$