

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ ДВУОКИСИ ВАНАДИЯ

Р.Р. Андроненко, А.А. Волков, Б.П. Горшунов

УДК 537.226

Сообщается о результатах измерений спектров динамической проводимости двуокиси ванадия (VO_2) в полупроводниковой фазе на частотах 200-1000 ГГц в интервале температур 90-340 К.

Двуокись ванадия VO_2 — вещество с фазовым переходом (ФП) металл — полупроводник. Переход происходит при температуре $T_{II} = 340$ К и сопровождается резким изменением электропроводности до 5 порядков величины /1/. Механизм ФП в VO_2 до конца к настоящему времени не выяснен ввиду сложности анализа эффектов электрон-фононного и электрон-электронного взаимодействий, играющих определяющую роль в динамике ФП.

Свойства электронной и фононной подсистем в VO_2 тесно связаны с характером электропроводности низкотемпературной (полупроводниковой) фазы. Измерения статической σ^0 и динамической σ^ω проводимости в интервале частот $\nu \approx 10^3$ Гц — 24 ГГц /2,4/ показывают, что доминирующим в полупроводниковой фазе является прыжковый механизм электропереноса по локализованным электронным состояниям. В то же время при интерпретации экспериментальных данных существуют определенные трудности, связанные с выбором конкретной модели прыжковой проводимости /3,4/.

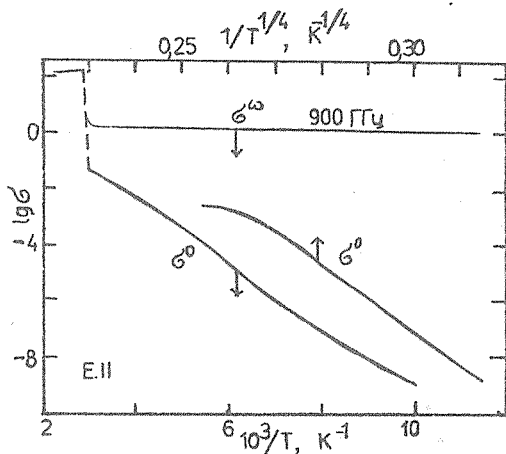
В целях дальнейшего накопления экспериментальных данных по динамической проводимости VO_2 нами были выполнены первые измерения полупроводниковой фазы VO_2 в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

Измерения σ^ω проводились на спектрометре "ЭПСИЛОН" /5/ в диапазоне частот $\nu \approx 200-1000$ ГГц при температурах $T \approx 90-340$ К. Исследовались монокристаллические образцы VO_2 при двух ориентациях вектора поляризации волны \vec{E} относительно моноклинной оси a_m : $E \parallel$ и $E \perp$. Типичные погрешности измерений составили $\sim 10\%$.

На тех же образцах была измерена статическая проводимость VO_2 в интервале температур $T \approx 100-500$ К для ориентации $E \parallel$.

Результаты измерений показаны на рис. 1 и 2. Статическая проводимость

σ^0 (рис. 1) в точке ФП испытывает скачок на три порядка величины. В металлической фазе она слабо уменьшается с ростом температуры, а в полупроводниковой фазе изменяется по активационному закону $\sigma^0 \propto \exp(-E_a/kT)$ с переменным значением энергии активации E_a . Динамическая проводимость σ^ω обнаруживает намного более слабую температурную зависимость (рис. 1). Измеренные частотные зависимости динамической проводимости σ^ω показаны в двойном логарифмическом масштабе на рис. 2. Для двух ориентаций E|| и E⊥ дисперсия σ^ω описывается зависимостью $\sigma^\omega = A\nu^s$, $A = \text{const}$, $s \approx 0,9-1,6$ для E|| и $s \approx 1,2-1,3$ для E⊥.



Р и с. 1. Температурная зависимость статической σ^0 и динамической σ^ω проводимостей ($\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) монокристалла VO_2

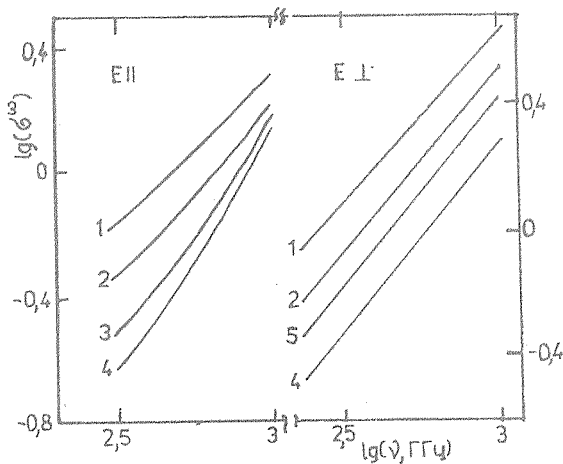
Наши измерения показывают (рис. 1), что температурная зависимость статической проводимости при $T \lesssim 180 \text{ K}$ ($1/T^{1/4} \gtrsim 0,27$) имеет вид

$$\sigma^0 \sim \exp[-(T_0/T)^{1/4}], T_0 \approx 1,8 \cdot 10^8 \text{ K}, \quad (1)$$

что соответствует закону Мотта для модели прыжковой проводимости по хаотически расположенным центрам локализации [6]. При этом

$$T_0 \approx 10/a^3 kN, \quad (2)$$

где a — радиус локализации; N — плотность состояний у уровня Ферми; k — постоянная Больцмана.



Р и с. 2. Частотная зависимость σ^ω ($\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) монокристалла VO_2 , измеренная при различных температурах T , К: 1 - 329, 2 - 226, 3 - 147, 4 - 91, 5 - 137

В рамках этой модели динамическая проводимость должна состоять из двух вкладов – фононного и бесфононного [7]:

$$\sigma^\omega = \sigma_\Phi + \sigma_{\text{б}\Phi}, \quad (3)$$

$$\sigma_\Phi = (\pi^5/6) e^2 \nu k T N^2 (a/2)^5 \ln^4 (\nu_\Phi/2\pi\nu),$$

$$\sigma_{\text{б}\Phi} = (\pi^3/3) e^2 N^2 h \nu^2 (a/2)^5 \ln^4 (2J_0/h\nu),$$

где e – заряд электрона; $\nu_\Phi \approx 10^{12}$ Гц; $J_0 \approx 0,1$ эВ.

Расчёт согласно (3) с учетом (1) и (2) для $a \gg 1 \text{ \AA}$ дает для σ^ω значения, на несколько порядков меньше измеренных (например, при $T = 90$ К и $\nu = 300$ ГГц $\sigma_{\text{эксп}}^\omega \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{\text{расч}}^\omega \leq 10^7 \text{ с}^{-1}$). Это свидетельствует о том, что полученные экспериментальные данные не могут быть объяснены в рамках данной модели.

Можно предположить, что локализация в VO_2 носит поляронный характер и вызвана сильным электрон-фононным взаимодействием, характерным для этого вещества [1]. В таком случае электроперенос осуществляется перескоками квазичастиц (полиронов малого радиуса [6]) и описывается в переменных полях с помощью формулы $\sigma^\omega \propto \omega^2 \tau / (1 + \omega^2 \tau^2)$, дающей на высоких ($\omega \tau \gg 1$) частотах $\sigma^\omega = \text{const}$. Измеренные в данной рабо-

те зависимости $\sigma^\omega(\nu)$ могут быть объяснены, если допустить существование некоторой функции распределения $G(\tau)$ времен релаксации τ

$$\int_0^{\infty} \frac{G(\tau) \omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau = A\nu^s.$$

Отсюда $G(\tau) = 2A\tau^{-s-1}/\Gamma(s/2)\Gamma(1-s/2)$ (Γ — гамма-функция). При $T = 90$ К, например, $G(\tau)$ имеет вид: $G(\tau) = 1,9 \cdot 10^{-4} \tau^{-2,26}$.

В рамки модели поляронной проводимости укладывается и зависимость $\sigma^0(T)$ (рис. 1), если учитывать вклад в проводимость многофонных процессов, когда полярон взаимодействует не с одним, а с большим числом фононов. В работе [8] было показано, что в этом случае может наблюдаться зависимость $\sigma^0(T)$ типа измеренной в данной работе.

В заключение авторы выражают благодарность К.М. Голанту и И.М. Юрину за помощь при статических измерениях, а также В.В. Брыксину за интерес к работе и полезные дискуссии.

Поступила в редакцию 23 июля 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Бугаев и др. Фазовый переход металл — полупроводник и его применение. Л., Наука, 1979.
2. S. Kabashima et al., J. Phys. Soc. Jap., 32, 158 (1972).
3. J.F. Paimier et al., Sol. St. Comm., 14, 575 (1973).
4. J.M. Reyes et al., Can. J. Phys., 54, 413 (1976).
5. А.А. Волков и др. ПТЭ № 2, 236 (1984).
6. Н. Мотт и др. Электронные процессы в некристаллических веществах. М., Мир, 1974.
7. Х. Беттгер и др. ФТТ, 18, 1888 (1976).
8. D. Emin. Phys. Rev. Lett., 32, 303 (1974).