

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ НА ПРОВОДИМОСТЬ ПЛЕНОК VO₂

Е. И. Никулин, Ф. А. Чудновский, Е. Б. Шаджин, Д. А. Мясников

Двуокись ванадия представляет собой материал с фазовым переходом металл—полупроводник, происходящим при температуре $T_c=340$ К. Ниже критической температуры VO₂—полупроводник с энергией активации $\Delta E=0.5$ эВ, выше T_c —металл [1]. Такие обладающие фазовым переходом системы используются в технике для записи и хранения оптической информации [2], а также для создания оптических коммутаторов с электронно-лучевой адресацией, например управляемых электронным лучом лазерных зеркал [3]. Эти обстоятельства определяют актуальность исследования изменения свойств пленок окислов ванадия при различных внешних воздействиях, таких как мощные световые импульсы, электронная или ионная бомбардировка и т. п.

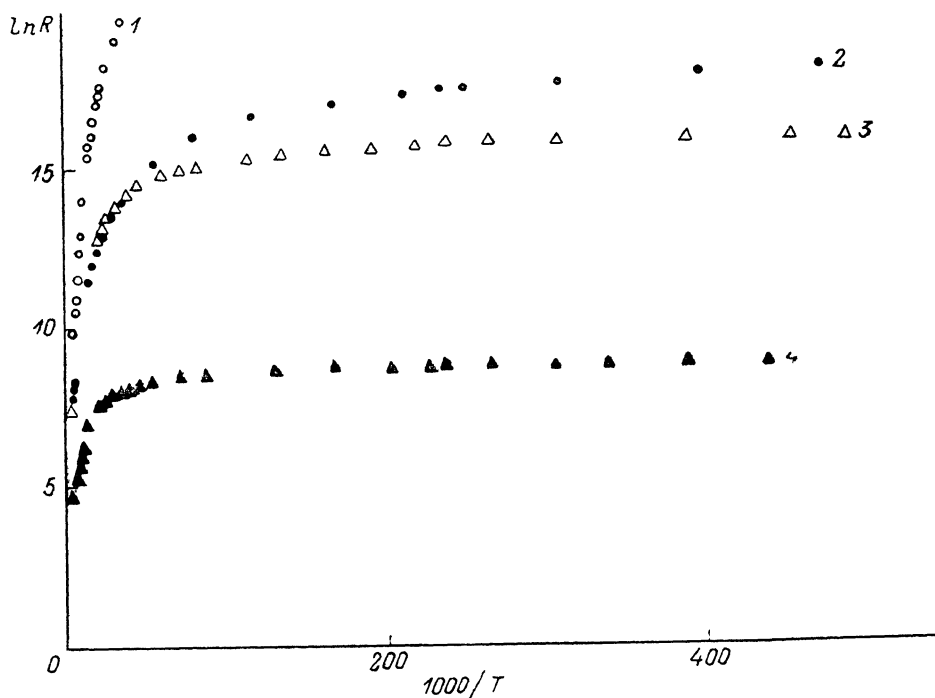


Рис. 1. Зависимость сопротивления пленки VO₂ от обратной температуры для различных доз облучения.

В данной работе исследовано влияние облучения электронным пучком на проводимость пленки двуокиси ванадия в широком интервале температур (340—1.6 К).

Пленки VO₂ толщиной 3000—6000 Å, синтезированные методом пиролиза металлоорганических соединений ванадия на ситалловой подложке, облучались пучком электронов с энергией 7 кэВ, причем доза облучения варьировалась в пределах от $3 \cdot 10^{18}$ до $6 \cdot 10^{19}$ э/см². Облучение производилось при температуре на 10—15° большей температуры фазового перехода, когда образец находился в металлическом состоянии. Сопротивление образцов было измерено в интервале от 1.6 К до температуры фазового перехода 340 К.

На рис. 1 представлена температурная зависимость сопротивления образцов, получивших различную дозу облучения (1 — $3 \cdot 10^{18}$, 2 — $1 \cdot 10^{19}$, 3 — $1.5 \cdot 10^{19}$, 4 — $6 \cdot 10^{19}$).

При высоких температурах, как можно видеть, ход температурной зависимости сопротивления носит полупроводниковый характер с энергией активации $\Delta E=0.1$ эВ.

При низких температурах интерпретация экспериментальных результатов в предположении однородности состава пленки неоднозначна. Так, если предположить, что облученный образец является сильно легированным в результате электронной бомбардировки полупро-

водником, то температурное изменение величины сопротивления является недостаточным (так, например, в образце 2 сопротивление возрастает в четыре раза при понижении температуры от 4.2 до 1.6 К). Если же предположить, что облученные образцы являются металлом, то, наоборот, температурное изменение сопротивления слишком велико (например, для наиболее сильно облученного образца 4 сопротивление возрастает на 12 % при изменении температуры в интервале 4.2—1.6 К).

Поэтому разумно предположить, что облученные образцы представляют собой смесь полупроводниковой и металлической фаз (например, в виде сетки тонких нитей металла, ячейки которой заполнены полупроводником). В этом случае эквивалентную схему такой системы можно представить в виде параллельно соединенных проводников — полупроводника и сверхтонкой металлической нити, причем, как показывают расчеты, сопротивление металлической нити, толщина которой не превышает нескольких сотен ангстрем, весьма велико. Поэтому в области высоких температур и наблюдается характерная для полупроводника температурная зависимость проводимости, так как его сопротивление значительно ниже сопротивления нитей. При понижении температуры сопротивление полупроводника

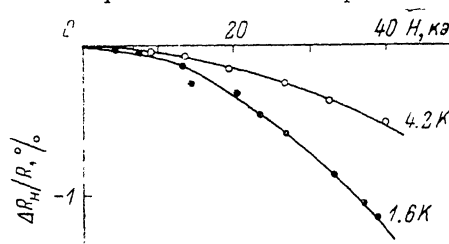


Рис. 2. Магнитосопротивление облученной пленки VO_2 (образец 2) при 4.2 и 1.6 К.

Точки — эксперимент, сплошная линия — теория.

резко возрастает, тогда как сопротивление сверхтонкой металлической нити практически не меняется. При достаточно низких температурах сопротивление образца определяется сопротивлением сетки нитей и слабо зависит от температуры. Известно, однако, что при гелиевых температурах сопротивление металлических проводников практически не зависит от температуры, тогда как в нашем случае зависимость от температуры сохраняется, хотя и уменьшается с увеличением дозы облучения. Причина этого, по нашему мнению, заключается в следующем.

В настоящее время можно считать установленным, что при облучении электронами образуются радиационные дефекты за счет разрыва связи V—O и ухода кислорода через поверхность пленки [4]. Поскольку для окисных пленок является характерной зернистая структура, причем каждое зерно, по-видимому, представляет собой сложное образование с центральным ядром и оболочкой из окислов, содержание кислорода в которых увеличивается от середины к периферии (что диктуется технологией синтеза пленки и подтверждается рядом оптических измерений), то при бомбардировке электронами избыточные атомы ванадия остаются либо в виде доноров в полупроводниковой оболочке зерна, либо, при больших дозах облучения, образуют цепочки металлизированных зерен, которые и играют роль нитей. Таким образом, минимальный диаметр нити должен не слишком отличаться от размера зерна (заметим, что облученные образцы сохраняют свои свойства длительное время при хранении в вакууме или атмосфере инертного газа, но при доступе кислорода в течение нескольких часов восстанавливают свойства, присущие им до облучения).

Поэтому для слабооблученных образцов, когда нити состоят из зерен, разделенных тонкими полупроводниковыми прослойками, и степень металлизации недостаточна для создания замкнутой сетки металлических нитей, наблюдается некоторая температурная зависимость сопротивления в области низких (4.2—1.6 К) температур, причем тем меньшая, чем больше доза облучения, т. е. чем выше степень металлизации.

Однако и в случае сильно облученных образцов сохраняется зависимость сопротивления от температуры, что можно объяснить явлением локализации электронов в одномерных проводящих нитях [5].

С целью проверки последнего предположения нами было измерено магнитосопротивление облученных пленок VO_2 в полях до 40 кэ при гелиевых температурах (рис. 2). Магнитное поле направлялось как параллельно, так и перпендикулярно плоскости образца. При этом было установлено, что в пределах ошибок эксперимента магнитосопротивление не зависело от ориентации магнитного поля. Независимость магнитосопротивления от ориентации магнитного поля свидетельствует в пользу предположения об одномерности проводящих нитей. Само магнитосопротивление оказалось отрицательным, и его величина $\Delta R_H | R_{H=0} = (R_H - R_{H=0}) | R_{H=0}$ достигала в среднем 2 % при $H=40$ кэ. На отдельных образцах величина магнитосопротивления оказывалась равной 5—7 %, причем в них наблюдался гистерезис по магнитному полю.

г. е. при выключении магнитного поля величина сопротивления оказывалась на 1—2 % меньше исходной. Величина гистерезиса зависела от скорости изменения магнитного поля и числа рабочих циклов.

Поскольку, согласно нашим предположениям, проводимость сильно облученных электродами пленок VO_2 при гелиевых температурах определяется сверхтонкими нитями металлического ванадия, то можно считать, что магнитное поле подавляет локализацию, что и приводит к отрицательному магнитосопротивлению.

Вопрос о влиянии магнитного поля на систему слабо локализованных электронов (в случае тонкой нити) был рассмотрен в работе [6]. После некоторого преобразования формула, полученная в этой работе, принимает вид

$$\frac{\Delta R_H}{R_{H=0}} = K \left\{ \left[1 + \left(\frac{H}{H_c} \right)^2 \right]^{-1/2} - 1 \right\}, \quad (1)$$

где K — множитель, зависящий от температуры и геометрии образца, а H_c — величина критического магнитного поля, вызывающего делокализацию электронов. На рис. 2 представлены результаты измерения магнитосопротивления одного из образцов 2 при 4.2 и 1.6 К. Сплошные кривые рассчитаны по формуле (1) при $H_c = 95$ кэ. Наблюдается хорошее совпадение теории с экспериментом. Магнитосопротивление сильнооблученного образца 4 также хорошо отвечает зависимости (1) при $H_c = 50$ кэ.

В заключение приведем основные выводы работы.

1. Облучение пленки VO_2 электронным пучком приводит к образованию металлической фазы V, которая сохраняется в отсутствие кислорода.
2. При высокой (комнатной) температуре сопротивление облученных пленок VO_2 обусловлено полупроводниковой фазой, при низких (гелиевых) — металлической.
3. Магнитосопротивление облученных пленок VO_2 при гелиевых температурах отрицательно и хорошо описывается теорией магнитосопротивления тонких нитей при низких температурах.

Авторы признательны Б. П. Захарчене и Б. З. Спиваку за обсуждение результатов и М. Ю. Герману за приготовление образцов.

Литература

- [1] Мотт Н. Ф. Переходы металл—изолятор. М.: Наука, 1979, с. 237—245.
- [2] Захарченя Б. П., Мешковский И. О., Теруков Е. И., Чудновский Ф. А. Письма в ЖТФ, 1975, т. 1, № 1, с. 9—11.
- [3] Chivian J. S., Scott M. W., Case W. E., Krasutsky N. J. IEEE J. Quant. Electron., 1985, в. QE-21, N 4, p. 383—390.
- [4] Аброян И. А., Подсвилов О. А. Тез. докл. II Всес. конф. «Физика окислых пленок». Петрозаводск, 1987, т. 1. 12 с.
- [5] Thouless D. J. Phys. Rev. Lett., 1977, в. 39, N 18, p. 1167—1169.
- [6] Альтшулер Б. Л., Аронов А. Г. Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, № 10, с. 515—518.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
8 декабря 1987 г.

НИЗКОДОБРОТНЫЙ РЕЗОНАТОР ФАБРИ—ПЕРО НА ОСНОВЕ ДИФFUЗИОННОГО СТЕКЛЯННОГО СВЕТОВОДА

В. М. Абусея, Е. И. Кухарева, Е. И. Леонов,
А. А. Липовский, С. Э. Хабаров

В последние годы исследователями проявляется значительный интерес к резонаторам типа Фабри—Перо на основе оптических волноводов, формируемых в подложках из ниобата лития [1, 2] или арсенида галлия [3]. Несмотря на низкую добротность подобных резонаторов, в литературе имеются сообщения об их использовании в качестве чувствительного элемента