

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ПЛЕНКИ

УДК 621.315.592

PACS numbers: 73.50.Yg, 73.61.At, 73.61.Cw, 81.40.Rs

И. Е. Проценко, Л. В. Однодворец, А. Н. Черноус*

Сумский государственный университет, физико-технический факультет
Украина, 244007 Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2

*Сумский государственный педагогический институт
Украина, 244027 Сумы, ул. Ромненская, 87

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ Cr, Ni, Cr/Ni И Ge

Изучен тензорезистивный эффект в поликристаллических (Cr, Ni, Cr/Ni), аморфных и высокодисперсных (Ge) пленках в условиях деформации на растяжение и сжатие. Симметричный характер деформационной зависимости для исследованных пленок можно объяснить в терминах изменения концентрации носителей электрического тока (в случае Cr, Ni, Cr/Ni и α -Ge) и ширины запрещенной зоны (в случае α -Ge).

Вивчено тензорезистивний ефект в полікристалічних (Cr, Ni, Cr/Ni), аморфних та високодисперсних (Ge) плівках в умовах деформації на розтяг і стиснення. Симетричний характер деформаційної залежності для досліджених плівок можна пояснити зміною концентрації носіїв електричного струму (у випадку Cr, Ni, Cr/Ni та α -Ge) та ширини забороненої зони (у випадку α -Ge).

The tension resistive effect in polycrystalline (Cr, Ni, Cr/Ni), amorphous, and high-dispersed (Ge) films under deformation conditions of tension and compression is investigated. The symmetric character of deformation dependence for such films may be explained by the change of electric current carriers' concentration (for the Cr, Ni, Cr/Ni, and α -Ge films) or forbidden band gap (for the α -Ge film).

Ключевые слова: коэффициент тензочувствительности, деформация сжатия и растяжения, ширина запрещенной зоны.

Введение

Известен ряд работ [1—6], в которых исследовался эффект тензочувствительности в процессе растяжения и последующего сжатия тонкой поликристаллической пленки полупроводника или металла.

Так, в работах [1, 2] был изучен тензорезистивный эффект в пленках халькогенидов висмута и сурьмы $(\text{BiSb})_2$ $(\text{TeSe})_3$ толщиной 0,3—0,8 мкм. В зависимости от материала подложки (слюда, стекло и полиамид) величина коэффициента продольной тензочувствительности γ_l имеет соответственно значения: 5—6, 20—22 и 581—597 (отметим, что величина γ_l определяется как угловой коэффициент зависимости $\Delta R/R_0$ от ϵ_l , где ΔR и

R_0 — изменение и начальное значение сопротивления, ϵ_l — деформация). Относительно большие значения γ_l в последнем случае авторы [1, 2] связывают с образованием микротрещин в пленке в процессе ее тензометрирования и, как результат этого, возникновением высоких энергетических барьеров, которые преодолеваются носителями электрического заряда посредством туннелирования.

Было замечено [1], что угловой коэффициент деформационной зависимости $\Delta R/R_0$ от ϵ_l при сжатии уменьшается (соответственно уменьшается и γ_l), что обуславливает несимметричный характер деформационной зависимости относительно растяжения и сжатия пленки.

В работе [3] на примере исследования тензорезистивного эффекта в пленках $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ делается вывод, что относительно большие значения γ_1 связаны с микротрещинами в пленке, но образуются они не в процессе тензометрирования, а при релаксации макронапряжений термического происхождения, возникающих на границе пленка/П (П — подложка). По оценке [3] величина деформации ϵ_1 порядка 10^4 на порядок меньше деформации, обусловленной макронапряжениями.

Отмеченная в [1] несимметричность зависимости $\Delta R/R_n$ от ϵ_1 при переходе от деформации растяжения к сжатию, очевидно, наблюдалась лишь в полупроводниковых пленках, так как в случае пленок RuO_2 , $\text{WO}_3/\text{RuO}_2/\text{П}$, $\text{BaTiO}_3/\text{RuO}_2/\text{П}$ и т. п. [4], Cu [5] и манганина [6] она симметрична. Характерной особенностью тензорезистивного эффекта в этом случае является то, что знак приращения ΔR различный: $\Delta R > 0$ при растяжении; $\Delta R < 0$ при сжатии пленки. Величина γ_1 во всех этих пленках имеет относительно малое значение: 9 — 15 (RuO_2); 53 ($\text{WO}_3/\text{RuO}_2/\text{П}$); 0,2 (манганин); 3 (Cu).

Методика эксперимента

В настоящей работе представлены результаты аналогичных исследований на примере одно- и двухслойных поликристаллических пленок Cr , Ni и $\text{Cr}/\text{Ni}/\text{П}$ и аморфных или высокодисперсных пленок Ge . Методика получения образцов и исследование тензорезистивного эффекта описаны в наших более ранних работах (см., например, [7, 8]). Отличие состоит лишь в том, что пленочные образцы после деформации на растяжение сжимались в тех же экспериментальных условиях после разворота подложки с пленкой на 180° (подчеркнем, что обе деформации осуществляются путем изгиба консолидно закрепленной подложки с пленкой с помощью микровинта).

Величина ϵ_1 рассчитывалась согласно соотношению $\epsilon_1 = Dh/l_n^2$, где D и l_n — толщина и

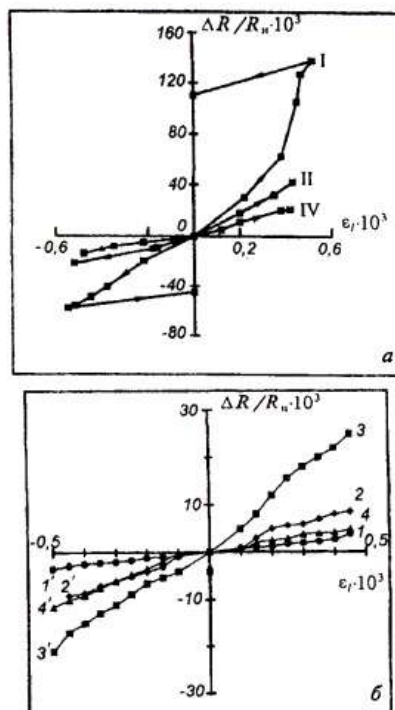


Рис. 1. Зависимость $\Delta R/R_n$ от ϵ_1 для пленки $\text{Cr}(80)/\text{Ni}(130)/\text{П}$ (а) и $\text{Cr}(80)$, $\text{Ni}(50)$, $\text{Cr}(80)/\text{Ni}(130)/\text{П}$ в неотожженном и отоженном состояниях (IV деформационный цикл) (б) (I — IV — номер деформационного цикла «нагрузка — снятие нагрузки»: I — I' — пленка Cr ; 2 — 2' — Ni ; 3 — 3' — Cr/Ni неотожженная; 4 — 4' — Cr/Ni отоженная; толщина в нанометрах указана в скобках)

начальная длина подложки, h — величина прогиба подложки (более подробно см. [7]).

Ширина запрещенной зоны в высокодисперсных пленках Ge рассчитывалась по угловому коэффициенту зависимости $\ln \sigma$ от $(2kT)^{-1}$, полученной при заданной деформации подложки (σ — удельная проводимость, k — постоянная Больцмана).

Структурное состояние пленок изучалось методом электронографии, а их толщина определялась с помощью интерферометра Линника.

Результаты и их обсуждение

Как следует из рис. 1, деформационные зависимости $\Delta R/R_n$ от ϵ_1 имеют почти симметричный характер независимо ни от номера

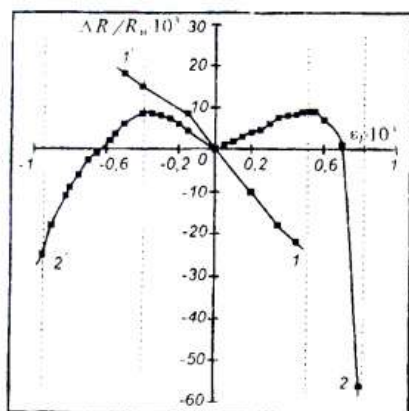


Рис. 2. Зависимость $\Delta R/R_0$ от ϵ_x (IV деформационный цикл) для аморфной ($d = 25$ нм) (кривая 1 - 1') и высокодисперсной ($d = 100$ нм) пленки Ge (кривая 2 - 2')

деформационного цикла (рис. 1, а), ни от материала пленки (рис. 1, б). В то же время в отожженных пленках (на рис. 1, б представлены данные лишь для пленки Cr/Ni/P) несимметричность зависимости значительно увеличивается, что приводит к отличию величины γ_I : 13 и 31 при деформации на растяжение и сжатие соответственно.

В полупроводниковых пленках Ge наблюдаются такие отличия по сравнению с пленками Cr, Ni и Cr/Ni/P. Во-первых, в аморфных пленках (толщины порядка 10 нм) знак изменения сопротивления имеет противоположный характер, при деформации растяжения или сжатия $R < 0$ или $R > 0$ соответственно (рис. 2). Величина коэффициента тензочувствительности $\gamma_I = -100$, хотя он является размерно-зависимым (от толщины пленки) параметром и монотонно уменьшается с ростом толщины до значения -500 .

Во-вторых, в высокодисперсных пленках Ge характер зависимости $\Delta R/R_0$ от ϵ_x резко изменяется (рис. 2). Это проявляется в том, что до деформации $\epsilon_x = (0,4 \div 0,5) \cdot 10^{-3}$ сопротивление увеличивается, что обуславливает положительное (деформация растяжения) или отрицательное (сжатие) значение γ_I . Затем сопротивление в процессе деформации начинает уменьшаться, но совершенно различными темпами и четко выявляется несиммет-

ричность относительно оси y зависимости $\Delta R/R_0$ от ϵ_x .

Для объяснения результатов, представленных на рис. 1, б, для металлических пленок достаточно воспользоваться классическим соотношением, согласно которому σn (n — концентрация электронов). При деформации на растяжение или сжатие объем пленки увеличивается или уменьшается соответственно, что в свою очередь приводит к уменьшению или увеличению концентрации электронов и соответствующему росту или уменьшению сопротивления. Численная оценка величины $\Delta R/R_0$ полностью согласуется с экспериментальными значениями.

Отметим также, что резкое отличие в величине тензорезистивного эффекта для неотожженных и отожженных пленок Cr/Ni/P (кривые 3—3' и 4—4' на рис. 1, б), очевидно, связано с уменьшением роли зернограничного рассеяния электронов из-за укрупнения зерен во втором случае и, как следствие этого, уменьшения площади межзеренных границ.

Что касается аморфных или высокодисперсных пленок Ge, необходимо отметить следующее. Известно [9], что в аморфных веществах зона проводимости очень размыта за счет локализованных энергетических уровней за ее пределами. Поэтому применительно к аморфным материалам более правильно будет говорить не о ширине запрещенной зоны ΔE , а о энергии активации электропроводности, связанной с локализованными уровнями. Ее

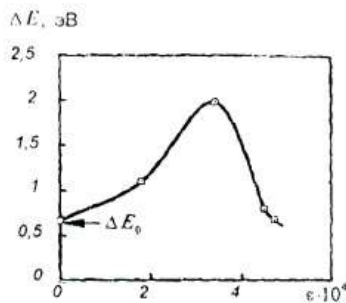


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны высокодисперсных пленок Ge от деформации на растяжение

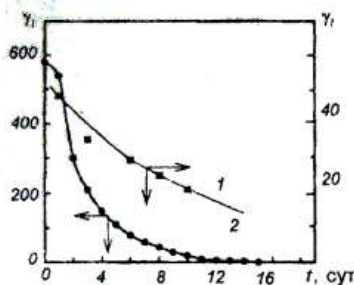


Рис. 4. Зависимость коэффициента тензочувствительности γ_t от времени выдержки в вакууме для поликристаллической пленки Cr(30)/Ni(40)/Π (1) и высокодисперсной пленки Ge(160) (2)

изменение в процессе деформации на растяжение или сжатие и определяет зависимость $I-I'$ на рис. 2.

В случае же высокодисперсных пленок (кривая 2—2' на рис. 2) характер изменения $\Delta R/R_n$ от ϵ_b , судя по нашим измерениям, полностью определяется зависимостью ΔE от ϵ_t (рис. 3).

Что касается механизмов, связанных с образованием микротрещин [1, 3], то они в нашем случае не проявляются, так как, с одной стороны, деформационная зависимость для аморфных пленок имеет симметричный характер, а с другой — величина деформации пленки за счет макронапряжений термического происхождения на границе пленка/Π $\Delta \epsilon_T = \Delta \alpha \Delta T$ ($\Delta \alpha = \alpha - \alpha_n$, где α и α_n — термический коэффициент линейного расширения) не выше экспериментальных величин ϵ_r .

На рис. 4 представлена зависимость γ_t от времени выдержки пленки в вакууме (ресурс работы) для поликристаллической пленки Cr/Ni/Π и высокодисперсной Ge. Эти данные показывают, что пленки Cr/Ni/Π и Ge не могут быть использованы в качестве тензодатчиков для длительной работы.

Выводы

1. Увеличение или уменьшение сопротивления поликристаллических пленок Cr, Ni и Cr/Ni при деформации на растяжение или сжатие можно объяснить изменением концентрации электронов из-за соответствующего изменения объема пленки; в случае отожженных пленок Cr/Ni надо учитывать также уменьшение роли зернограничного рассеяния электронов в результате укрупнения кристаллитов.

2. Сложный характер деформационной зависимости $\Delta R/R_n$ от ϵ_t высокодисперсных пленок Ge объясняется зависимостью ширины запрещенной зоны ΔE от ϵ_t (сначала увеличивается от $\Delta E = 0,67$ до 2,0 эВ, а затем уменьшается до 0,67 эВ).

Эта работа была частично поддержана Международной Соросовской программой поддержки образования в области точных наук (ISSEP), грант № PSU052138.

1. Абдураимов В. Э., Бойков Ю. А., Кутасов В. А. // ФТТ. — 1984. — 26, вып. 2. — С. 284.
2. Абдураимов В. Э., Бойков Ю. А., Кутасов В. А. // ФТТ. — 1985. — 27, вып. 7. — С. 2168.
3. Атакулов Ш. Б., Шамсиддинов А. Н. // ДАН УзССР. — 1986. — № 1. — С. 29.
4. Abe O., Taketa Y., Haradome M. // Rev. Sci. Instrum. — 1988. — 59, № 8. — P. 1394.
5. Rajanna K., Mohan S. // Phys. status. solidi. (A). — 1988. — 105, No. 2. — P. K181.
6. Rajanna K., Mohan S. // Thin Solid Films. — 1989. — 172, № 1. — P. 45.
7. Петренко С. В., Проценко И. Е., Шамомя В. Г. // Металлофизика. — 1986. — 8, № 6. — С. 22.
8. Проценко И. Е., Черноус А. Н. // Металлофизика и новейшие технологии. — 1994. — 16, № 12. — С. 18.
9. Маделунг О. Физика твердого тела. Локализованные состояния. — Москва: Наука, 1985.

Получено 28.06.1995 (оконч. вариант 06.03.1996)