

## Влияние циклической деформации на электропроводность пленок $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$ на переменном токе

© Х.М. Сулаймонов

Ферганский политехнический институт,  
150107 Фергана, Узбекистан  
e-mail: uzferfizika@mail.ru

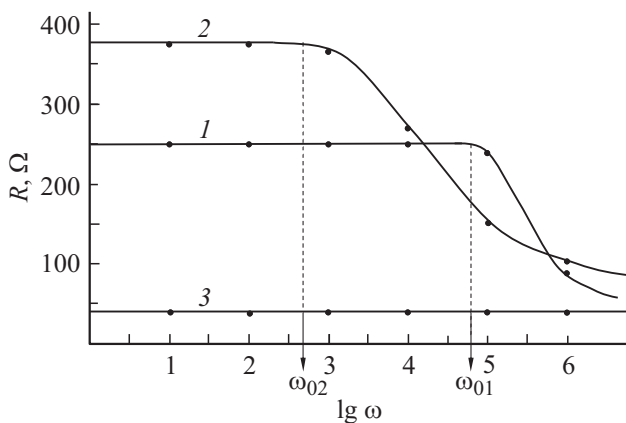
(Поступило в Редакцию 25 мая 2016 г.)

Обнаружено, что сопротивление пористой поликристаллической  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  пленки, выращенной термовакуумным испарением при температуре подложки  $T_s \leq 363$  К, резко уменьшается вблизи пороговой частоты  $\omega_0 \approx 10^5$  Hz переменного тока до значений сопротивления плотных пленок с  $T_s \approx 423$  К. После воздействия  $N \approx 10^5$  циклов механической деформации с амплитудой  $\epsilon = \pm 1 \cdot 10^{-3}$  а.у. сопротивление пленки увеличивается в 1.5 раза, а значение уменьшается почти в  $10^2$  раз, что качественно удовлетворительно объясняется моделью микроконтактирующих блоков.

DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44258.1904

Изучение механизмов электропроводности позволяет определить тип и степень неоднородности полупроводниковой пленочной структуры [1,2]. Это особенно является эффективным, если использовать переменный электрический ток, когда электропроводность в основном определяется емкостным сопротивлением межкристаллического интерфейса. В настоящей работе исследована частотная зависимость сопротивления тензорезистивных пленок  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  под действием циклической знакопеременной механической деформации. Поликристаллические пленки толщиной  $3-4 \mu\text{m}$  и размерами  $5 \times 30 \text{mm}$  на полиамидной подложке изготавливались методом термического испарения в вакууме [3,4]. Тензометрические измерения проводились при комнатной температуре в интервале частот  $0 \leq \omega \leq 10^7$  Hz.

На рис. 1 представлены частотные зависимости сопротивления пленок, полученных при температуре подложки  $T_s = 363$  и  $423$  К до (кривые 1, 3) и после (2, 3) воздействия  $N = 5 \cdot 10^5$  циклов деформации с амплитудой



**Рис. 1.** Зависимость сопротивления пленок  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  от частоты напряжения питания: кривая 1 — до воздействия, 2 — после воздействия  $N = 5 \cdot 10^5$  циклов деформации для пленок с  $T_s = 363$  К, 3 —  $T_s = 423$  К.

$\epsilon = \pm 1 \cdot 10^{-3}$  а.у. Видно, что в исследуемом диапазоне частот переменного тока сопротивление пленок с малой пористостью (кривая 3), так же как и сопротивление массивного образца, практически не изменяется с частотой. Относительно высокое значение сопротивления  $R_f$  пленки с  $T_s = 363$  К на постоянном токе или в области частот  $\omega \leq \omega_0$  переменного тока обусловлено ее пористой структурой. Поэтому в окрестности пороговой частоты  $\omega_0$  величина  $R_f$  резко уменьшается с увеличением частоты в пределах  $\omega = 10^5-10^6$  Hz до значений, характерных по порядку величины сопротивления более плотных пленок.

Сопротивление поликристаллической пленки  $R_f$  модельно представим через комбинации сопротивлений системы микроблоков с эквивалентной схемой, состоящей из сопротивления самого кристаллита  $R_{cr}$  и последовательно соединенного с ним сопротивления контакта между зернами  $R_k$ , зашунтированного емкостью  $C$  интерфейса (рис. 2). Характерной для такой эквивалентной цепочки в трех измерениях будет зависимость ее сопротивления от частоты приложенного напряжения. Исходя из кривых 1, 2 рис. 1, при значениях частоты электрического сигнала, определяемых условием

$$\omega \geq \omega_0 \approx (R_k C)^{-1}, \quad (1)$$

можно представить частотную зависимость сопротивления пленки

$$R_f \approx ((\omega C)^{-1} + R_{cr}) N_{com}/N_{par}, \quad (2)$$

где  $N_{com}$  — среднее количество кристаллических зерен одной цепи в направлении прохождения тока,  $N_{par}$  — количество параллельно соединенных проводящих цепей в направлении, перпендикулярном направлению тока.

Как видно из рис. 1, под действием  $N = 5 \cdot 10^5$  циклов знакопеременной деформации сопротивление пленки увеличивается в 1.5 раза, а критическое значение  $\omega_0$ , определяемое неоднородностью пленки, уменьшается

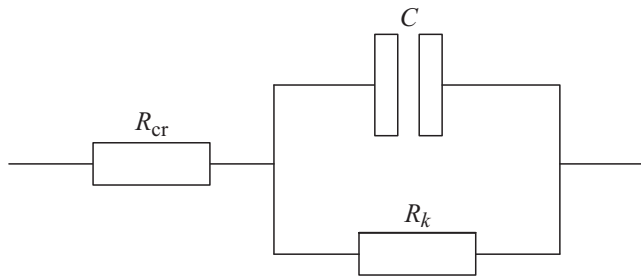


Рис. 2. Эквивалентная схема сопротивления микроблока поликристаллической пленки.

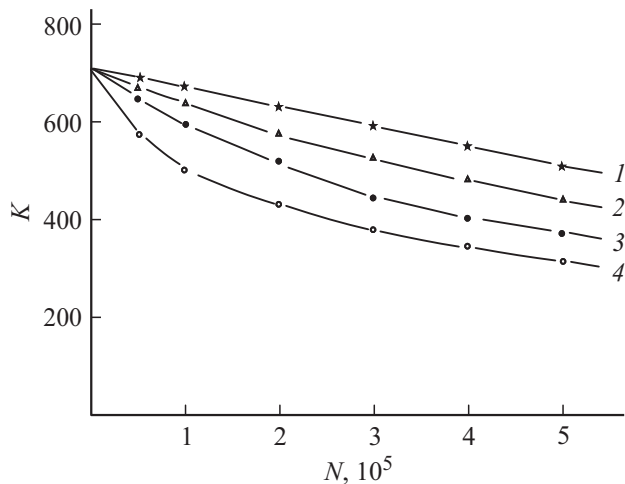


Рис. 3. Зависимость КТЧ пленок  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$  от числа деформационных циклов при амплитудах относительных деформаций  $\varepsilon \cdot 10^3$ :  $\pm 0.25$  (1),  $\pm 0.5$  (2),  $\pm 0.75$  (3) и  $\pm 1.0$  а.е. (4).

почти на два порядка —  $\omega_{01}/\omega_{02} \approx 10^2$  (ср. кривые 1 и 2). Последнее обусловлено тем, что в соответствии с формулой (1) с ростом циклов деформации увеличивается значение  $R_k C$ . Естественно, что при действии циклов деформации растяжения–сжатия в результате истирания контактирующих поверхностей зерен увеличивается ширина зазора и площади контактов между кристаллитами. Это приводит к росту как активного, так и емкостного сопротивления пленки, уменьшая также количество непосредственно контактирующих частиц, имеющих малую величину контактного сопротивления  $R_k$ . Следовательно, предлагаемая здесь модель микроблоков позволяет качественно объяснять экспериментальные результаты, представленные на рис. 1.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента тензочувствительности (КТЧ), определяемой формулой  $K = \Delta R / (R_0 \varepsilon)$  (где  $\varepsilon = \Delta l / l_0$  и  $\Delta l = l(\varepsilon) - l_0$  — относительная и абсолютная деформации,  $\Delta R = R(\varepsilon) - R_0$ ,  $R_0$  — электрическое сопротивление образца при  $\varepsilon = 0$ ), от числа циклов деформации  $N$  для разных значений ее амплитуды  $\varepsilon$  при частоте  $\omega \cong 10^2$  Hz. Видно, что с увеличением числа циклов знакопеременной деформации и ее амплитуды уменьшается КТЧ. Начиная со

значения  $N \approx 5 \cdot 10^5$  в зависимостях  $K(N)$  наблюдается тенденция к насыщению. Это можно объяснить следующим образом. После воздействия циклов деформации концентрация заблокированных связей между кристаллитами станет ниже значений, характерных для полного протекания [5]. Электропроводность пленки определяется туннелированием носителей через диэлектрические зазоры между зернами. Это приводит к уменьшению КТЧ, который определяется теперь в основном тензоэффектами, связанными с изменением при деформации параметров зазора между кристаллитами, а не изменением количества непосредственных контактов между зернами. Следовательно, экспериментально наблюдаемое изменение КТЧ от числа циклов деформаций также не противоречит предлагаемой модели. Согласуется также с данной моделью и изменение температурной зависимости сопротивления пленки  $R_f$  от числа циклов деформации: с ростом  $N$  увеличивается  $R_f$  и минимум на температурной зависимости смещается в область более высоких температур [3].

Таким образом, электрофизические характеристики пленок, содержащих микроблоки, существенно изменяются с частотой переменного тока в окрестности порогового значения  $\omega_0$  и под воздействием деформационных циклов. Предложенная модель, описывающая электропроводность через микроконтактирующие поверхности кристаллитов, на основе теории протекания [5] качественно объясняет высокие значения величины КТЧ пленок и их деформационной характеристики. Изменение сопротивления и КТЧ пленок от циклов деформации, частоты приложенного переменного электрического напряжения и температуры объясняется изменением параметров пористого зазора между кристаллитами и образованием новых микротрещин пленки.

В заключение отметим, что поликристаллические пленки из соединения  $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2\text{Te}_3$ , полученные термическим испарением в вакууме при оптимальных технологических параметрах, могут быть применены в качестве датчиков накопления усталостных повреждений.

Автор выражает благодарность Н.Х. Юлдашеву за полезные обсуждения экспериментальных результатов.

## Список литературы

- [1] Ушаков В.В., Клевков Ю.В. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 11. С. 1298–1302.
- [2] Мирсагатов Ш.А., Шамирзаев С.Х., Махмудов М.А. // Узб. физ. журн. 1996. № 2. С. 36–40.
- [3] Абдуллаев Э.А., Юлдашев Н.Х., Султанов Ш.Д. Эффект пьезосопротивления в халькогенидах свинца и висмута. Ч. II. Фергана: Фаргона, 2006. 118 с.
- [4] Sulaymonov Kh.M., Yuldashev N.Kh. The Third European Conference on Physics and Mathematics, 12<sup>th</sup> September, Vienna, Austria, 2015. 19 p.
- [5] Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982. 124 с.