

ЗАВИСИМОСТЬ АНИЗОТРОПИИ ТЕРМОЭДС ПЛЕНОК РЬТЕ ОТ ПРОВОДИМОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Бойков Ю. А., Данилов В. А., Кусаинов О. М., Кутасов В. А.

Создание и исследование пленочных структур со значительной анизотропией коэффициента термоэдс представляет интерес в связи с разработкой быстродействующих термоэлектрических преобразователей. Возникающая в пленочной термоэлектрической системе продольная термоэдс ε в условиях нормального к плоскости подложки градиента температуры и изотропной проводимости может быть представлена в виде [1]

$$\varepsilon \sim (\alpha_x \chi_y - \alpha_y \chi_x) \sin 2\psi, \quad (1)$$

где α_x , α_y , χ_x , χ_y — компоненты тензоров термоэдс и теплопроводности, ψ — угол между плоскостью подложки и выделенным кристаллографическим на-

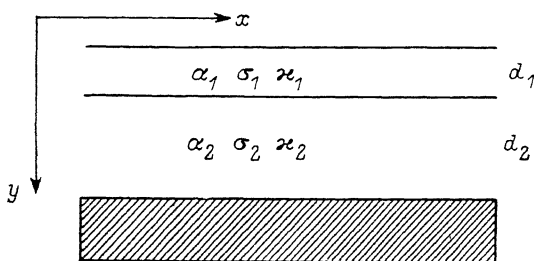


Рис. 1. Двухслойная пленка.

σ_1 , α_1 , χ_1 и σ_2 , α_2 , χ_2 — электропроводность, коэффициент термоэдс и теплопроводность в приповерхностном слое и в объеме пленки соответственно.

правлением в пленке. Необходимым условием достижения высокой чувствительности анизотропных преобразователей, как следует из (1), является значительная анизотропия термоэлектрических параметров и обеспечение оптимального угла ψ . Анизотропия коэффициента термоэдс $\Delta\alpha = \alpha_x - \alpha_y$ в пленочной системе может быть обусловлена характеристиками исходного материала, особенностями кристаллической структуры сформированных слоев, наличием в их объеме концентрационных неоднородностей [2] и т. д.

Одним из примеров неоднородной по концентрации системы является пленка, приповерхностный слой которой имеет инверсную проводимость (рис. 1). Если удельная теплопроводность во всем объеме пленки одинакова, то значения α , измеренные вдоль x и y , можно представить в виде

$$\alpha_x = \frac{a_1 \sigma_1 d_1 + a_2 \sigma_2 d_2}{d_1 \sigma_1 + d_2 \sigma_2}, \quad (2)$$

$$\alpha_y = \frac{a_1 d_1 + a_2 d_2}{d_1 + d_2}. \quad (3)$$

Когда толщина приповерхностного слоя с инверсной проводимостью много меньше толщины пленки ($d_1 \ll d_2$), то из (2) и (3) получаем

$$\Delta\alpha = |(\alpha_2 - \alpha_1)(\sigma_1 - \sigma_2)d_1/\sigma d|, \quad (4)$$

где $d\sigma = \sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2$, $d = d_1 + d_2$.

В работе исследованы электропроводность σ , коэффициент термоэдс α и $\Delta\alpha$ пленок n -РЬТе и p -РЬТе ($d = 5$ мкм), у свободной поверхности которых имеется слой с инверсной проводимостью.

Пленки выращивались методом горячей стенки, в качестве подложек использовались свежие сколы ВаF₂. Выращенные слои являлись поликристалли-

ческими, имела место четко выраженная преимущественная ориентация кристаллитов (111) PbTe || (111) BaF_2 .

Концентрацию носителей заряда в формируемых слоях удавалось менять в широких пределах за счет отступления от стехиометрии, варьируя разность температур сублимации исходного материала и конденсации паровой фазы на подложку. Для формирования у поверхности пленок $p\text{-PbTe}$ слоя с электронной проводимостью свежеприготовленные конденсаты подвергались термообработке в вакууме в течение 1 ч при температуре, равной температуре конденсации (450—470 °C). В процессе термообработки приповерхностный слой пленки и области, прилегающие к границам кристаллитов в ее объеме, обеднялись халькогеном вследствие его реиспарения [3]. Поскольку избыточный свинец в PbTe обладает донорным действием, проводимость приповерхностного слоя после термообработки становится электронной, а области у границ кристаллитов в объеме слоя $p\text{-PbTe}$ обедняются основными носителями. Для формирования у поверхности пленки $n\text{-PbTe}$ слоя с дырочной проводимостью конденсаты выдерживались в атмосфере воздуха в течение 10 дней при комнатной температуре.

Концентрация носителей заряда n в свежеприготовленных пленках, как следует из полученных данных по коэффициенту Холла, не превышала $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а их холловская подвижность составляла менее 80 % от соответствующих величин для монокристаллов PbTe [4]. Поскольку решеточная теплопроводность PbTe изотропна и при $n < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ не зависит от концентрации носителей заряда, а их собственный вклад в теплоперенос мал, можно считать, что $\chi_1 = \chi_2$.

Изменение электрофизических параметров пленок PbTe в процессе образования у свободной поверхности слоя с инверсной проводимостью исследованы авторами в [5, 6]. Толщина приповерхностного слоя с инверсной проводимостью в пленках $n\text{-PbTe}$ при адсорбции на их свободной поверхности молекул кислорода имеет значение порядка дебаевской длины экранирования, которая много меньше d . На малость d_1 в исследованных пленках $p\text{-PbTe}$ указывает характер температурных зависимостей σ в условиях примесной проводимости.

Величина $\Delta\alpha$, измеренная на пленках $n\text{-PbTe}$, приповерхностный слой которых имел дырочную проводимость, оказалась близкой к нулю. Как следует из данных, приведенных на рис. 2, электропроводность и коэффициент термоэдс в исследованных слоях изменялись с температурой характерным для $n\text{-PbTe}$ образом, т. е. электрофизические свойства указанных пленок при $T < 300 \text{ K}$ определялись параметрами слоя с электронной проводимостью $\sigma_1 d_1 \ll \sigma_2 d_2 \approx \approx \sigma d$ и $(\sigma_1 - \sigma_2) d_1 \ll \sigma d$. В таких условиях, как следует из (3), величина $\Delta\alpha$ должна быть близкой к нулю, что согласуется с экспериментально полученными данными.

Величина $\Delta\alpha$, измеренная на пленках $p\text{-PbTe}$, приповерхностный слой которых имел электронную проводимость, достигала 200 мкВ/К. Изменения α и σ для соответствующей пленки $p\text{-PbTe}$ показаны на рис. 2. Области, прилегающие к границам кристаллитов в слое с дырочной проводимостью, обеднены халькогеном и представляют собой потенциальные барьеры для основных носителей, по этой причине при $T < 300 \text{ K}$ наблюдается возрастание электропроводности пленок с температурой

$$\sigma \sim \sigma_0 \exp(-e\varphi/kT), \quad (5)$$

где φ — высота потенциальных барьеров на границах кристаллитов. Рассеяние дырок на потенциальных барьерах снижает проводимость слоя с дырочной проводимостью, что приводит к возрастанию относительного вклада приповерхностного слоя в электропроводность пленки, причем с понижением температуры этот вклад возрастает. Области, прилегающие к границам зерен в слое с электронной проводимостью, обогащены свинцом и не оказывают существенного влияния на подвижность электронов. Возрастанием вклада приповерхностного слоя с электронной проводимостью в пленке $p\text{-PbTe}$ с понижением температуры объясняются высокие абсолютные значения производной $d\alpha/dT$ при $T < 300 \text{ K}$, а также изменение знака α и характера температурной зависимости σ при $T \approx 240 \text{ K}$.

Таким образом, уже при $T \approx 300$ К за счет высоких значений σ_1 по сравнению с σ_2 произведение $(\sigma_1 - \sigma_2) d_1$ оказывается сравнимым с od , и поскольку разность $(\alpha_2 - \alpha_1)$ имела значения 500–700 мкВ/К, величина $\Delta\alpha$ достигала в соответствии в (5) нескольких сотен микровольт на градус.

Для создания высокочувствительных анизотропных пленочных преобразователей, как указывалось выше, принципиальное значение имеет оптимальная

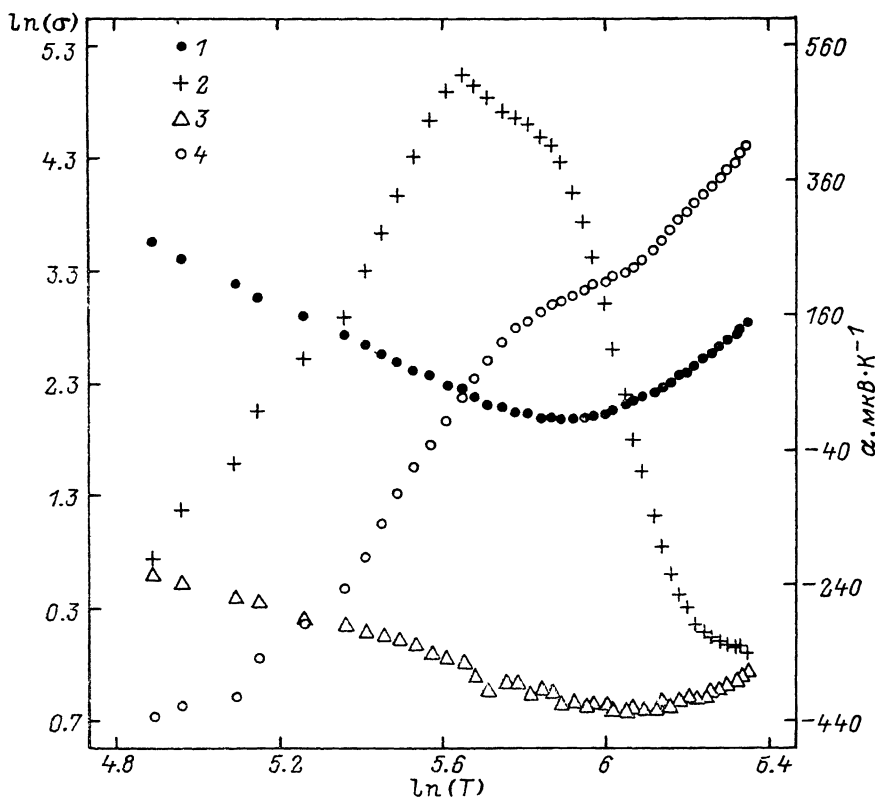


Рис. 2. Изменение с температурой электропроводности (1, 4) и коэффициента термоэдс (2, 3) пленок RbTe, обладающих электронной (1, 3) и дырочной (2, 4) проводимостью в объеме, со слоем инверсной проводимости у свободной поверхности.

ориентация осей x и y в слое термоэлектрического материала относительно плоскости теплоприемника. Когда ось [111] в пленке RbTe перпендикулярна плоскости подложки, кристаллиты на свободной поверхности ограничены, как правило, плоскостями (100) и имеют вид тетраэдрических пиков [4]. Такой характер поверхности роста пленок RbTe благоприятен для формирования анизотропных пленочных структур с нужной ориентацией, наиболее сложным при этом является создание различной концентрации носителей заряда на противоположащих гранях кристаллитов, чтобы сделать вклады в ϵ от соответствующих участков пленки неэквивалентными, поскольку они имеют различные знаки.

Список литературы

- [1] Пилат И. М., Великов А. Б., Казанская Л. Л., Ашеулов А. А. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 5. С. 1019–1021.
- [2] Бабин В. П., Гудкин Т. С., Дашевский З. М. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 4. С. 748–753.
- [3] Бойков Ю. А., Кутасов В. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 5. С. 1604–1606.
- [4] Egerton R. F. // Phil. Mag. 1969. V. 20. N 165. P. 547–561.
- [5] Бойков Ю. А., Данилов В. А., Кутасов В. А. // ФТТ. 1985. Т. 27. В. 11. С. 3473–3476.
- [6] Бойков Ю. А., Данилов В. А., Кутасов В. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 12. С. 3688–3691.