



ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ $(Bi,Sb)_2Te_3$

Онаркулов К.Э.

Сирожидинова С.З.

Холматова Р.М.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.8170759>

Аннотация

В работе приведены результаты исследования влияния температуры подложки и предварительной деформации подложек на электрофизические и деформационные характеристики пленочных структур на основе $(Bi,Sb)_2Te_3$.

Ключевые слова: конденсат, деформация, тензочувствительность, тензодачик, подложка, тензорезистор, термопара, полупроводники.

В настоящее время во многих странах мира проводятся научно-исследовательские работы по изучению низкоразмерных объектов, потому что они в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективные в электронике, материаловедении и нанотехнологии. Потенциал полупроводниковых материалов с низкой размерности обусловлен тем фактом, что появляется практическая возможность получения материалов с заранее заданными физико-химическими, оптическими, электрофизическими, фотоэлектрическими и магнитными свойствами.

В последние два десятилетия внимание ученых сосредоточено на исследовании свойств низкоразмерных объектов [1]. При этом на первый план выходят технологические разработки, связанные с получением структур заданных форм и размеров. Перспективной технологией получения таких структур является парофазные методы осаждения конденсата [2, 3]. При их реализации, как правило, имеют место морфологические изменения поверхности наращиваемых слоев за счет механических напряжений, обусловленные несоответствиями постоянных решеток, коэффициентов линейного расширения конденсата и подложки. Размер, форма и плотность структуры зависят от температуры подложки и условий, обеспечивающих формирование только 2D- или 3D-структур [1]. В конденсатах, при любых способах осаждения, возникают внутренние макронапряжения, которые приводят к изменению ряда структурно-чувствительных свойств пленок, к их растрескиванию или отделению от подложки [4]. Изучение внутренних напряжений может дать информацию о процессах роста структуры и строении пленок, поведения дефектов и влияния окружающей среды на эти процессы.

Изменение физико-технологических условий конденсации существенно влияет на величину и знак напряжений в пленках. Хотя в настоящее время нет единой точки зрения причины образования внутренних напряжений, накопленный экспериментальный материал позволяет делать некоторые обобщения. В процессе конденсации материал оказывается насыщенным различными несовершенствами кристаллического строения в виде избыточных вакансий, дислокаций и может содержать замурованные поры. Полупроводниковым пленкам такие несовершенства

могут придать механические и электрические свойства, не соответствующие свойствам массивного материала. Существующие предположения о причинах таких отличий связываются, в основном, с аномально высокой плотностью, а также влиянием свободных поверхностей. Все эти несовершенства приводят к возникновению больших внутренних напряжений[5,6].

Для определения зависимости относительного изменения тока $\Delta I/I$ от деформации ε нами были изготовлены образцы на предварительно напряженных подложках из оксидированного дюралюминия. Одновременно напылялись 5 образцов с различным уровнем предварительной деформации и одна контрольная пленка без деформации подложки. Температура подложек для каждой партии была постоянной и контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Ниже приводятся результаты для образцов, которые осаждались при температуре подложки $t_n = 50 \div 120^\circ\text{C}$.

На рис. 1 приведена зависимость $\Delta I/I$ от ε для пленок, полученных при температуре подложки $t_n = 50^\circ\text{C}$ при различных уровнях предварительной деформации. Видно, что наклон зависимости $\Delta I/I$ от ε для контрольного образца имеет больший угол при растяжении, чем при сжатии. С ростом уровня предварительной деформации эта разница уменьшается, а когда предварительная деформация достигает $\varepsilon_{np} = 0,75 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. углы наклонов становятся равными друг-другу (кривая 3). Дальнейшее увеличение предварительной деформации приводит к нарушению линейности деформационной характеристики. На рисунке это соответствует кривым 5 и 6.

Таким образом, пленки конденсированные при $t_n = 50^\circ\text{C}$ и предварительной упругой деформации подложки $\varepsilon_{np} = 0,75 \cdot 10^{-3}$ отн.ед, имеют линейные деформационные характеристики.

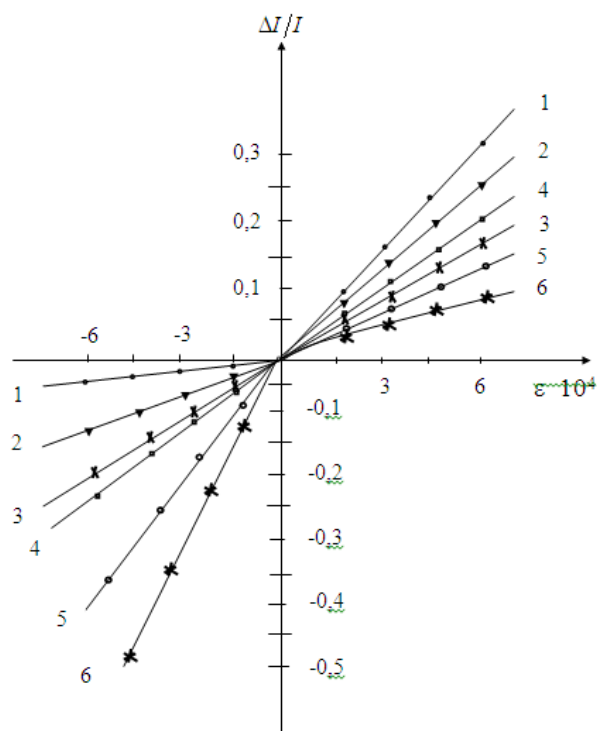


Рис.1. Деформационная зависимость пленок от уровня предварительной деформации ($t_n = 60^\circ\text{C}$). 1 - ($\varepsilon_{np} = 0$), 2 - ($\varepsilon_{np} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.), 3 - ($\varepsilon_{np} = 0,75 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.), 4 - ($\varepsilon_{np} = 0,9 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.), 5 - ($\varepsilon_{np} = 1 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.), 6 - ($\varepsilon_{np} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.).

На рис.2 приведены аналогичные зависимости образцов полученных при $t_n = 60^\circ\text{C}$ с различными уровнями предварительной деформации. Кривая 1 является деформационной характеристикой контрольной пленки с $\varepsilon_{np} = 0$, 2,3,4,5 соответственно с предварительной деформацией подложки $\varepsilon_{np} = 0,75 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.; $\varepsilon_{np} = 0,9 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.; $\varepsilon_{np} = 1 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. и $\varepsilon_{np} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. Как видно из рисунка, углы наклонов зависимостей с увеличением уровня предварительной деформации подложки при растяжении и сжатии приближаются друг к другу и когда $\varepsilon_{np} = 0,9 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. - становятся равными. В этом случае, тензорезистор имеет линейную деформационную характеристику (кривая 3).

Дальнейший рост предварительной деформации подложки приводит к нарушению линейности (кривые 4,5).

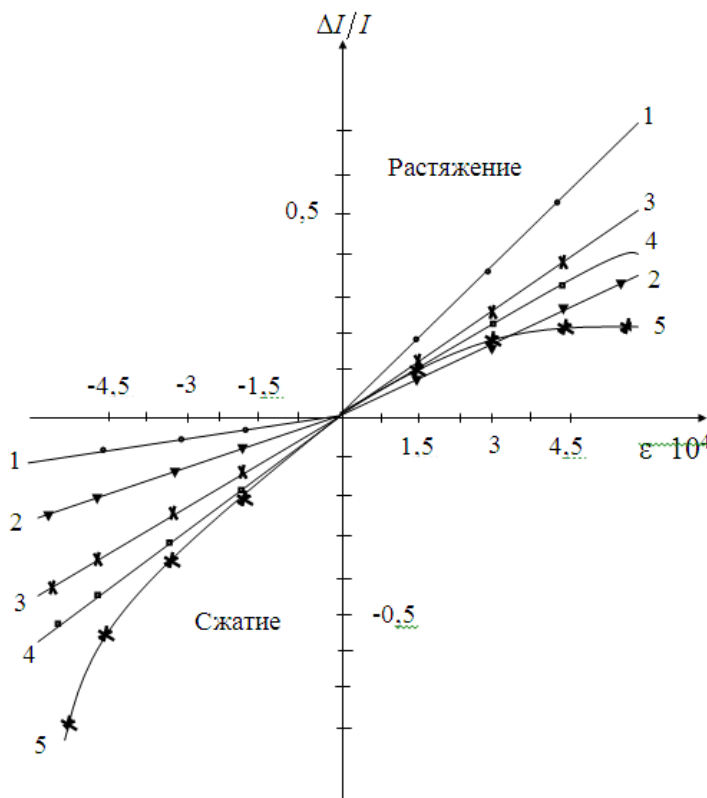


Рис.2. Деформационная зависимость пленок от уровня предварительной деформации ($t_n = 70^\circ\text{C}$).

Аналогичные результаты получены и для пленок полученных при температурах подложки $t_n = 110^\circ\text{C}$ и $t_n = 120^\circ\text{C}$. В этом случае линейные характеристики наблюдаются при предварительной деформации подложек

соответственно на $\varepsilon_{np} = 1,75 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. и $\varepsilon_{np} = 2 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.

Дальнейший рост температуры и предварительной деформации подложек приводит к уменьшению тензочувствительности.

Проведенные исследования показывают, что изменяя температуру и деформационное состояние подложки можно частично или полностью исключить влияние внутренних напряжений на вид деформационных характеристик и тензочувствительность.

Видно, что изменяя температуру и механическое состояние подложки можно найти оптимальные технологические параметры для получения тензорезисторов с большой тензочувствительностью и линейной деформационной характеристикой. В качестве оптимального диапазона t_n был найден диапазон температур от $t_n = 85^\circ\text{C}$, до $t_n = 95^\circ\text{C}$, при котором тензорезистор имеет наибольшую и одинаковую тензочувствительность при растяжении и сжатии.

Исследуемые образцы деформировались до $\varepsilon = 10^{-3}$ отн.ед., что позволяет многократно деформировать один и тот же образец. Измерения производили на постоянном токе. Коэффициент тензочувствительности пленок вычисляли по выражению $K = \Delta R / R \cdot \varepsilon$. Погрешность при определении K складывалась в основном из погрешности определения относительных деформаций и относительного изменения сопротивления $\Delta R / R$. Максимальная погрешность измерения не превышало $2 \div 5\%$.

На рис. 3. приведена зависимость коэффициента тензочувствительности (K) от температуры подложки (t_n) для образцов, полученных на предварительно деформированных подложках. Из рисунка видно, что зависимость K от t_n при растяжении и сжатии имеет одинаковый характер, но имеет сложный вид состоящей из двух симметричных участков А и Б, соответствующих росту и спаду K (при $50-90^\circ\text{C}$ участок А и $90-120^\circ\text{C}$ участок Б). Видно, что максимум K наблюдается при $t_n = 90^\circ\text{C}$.

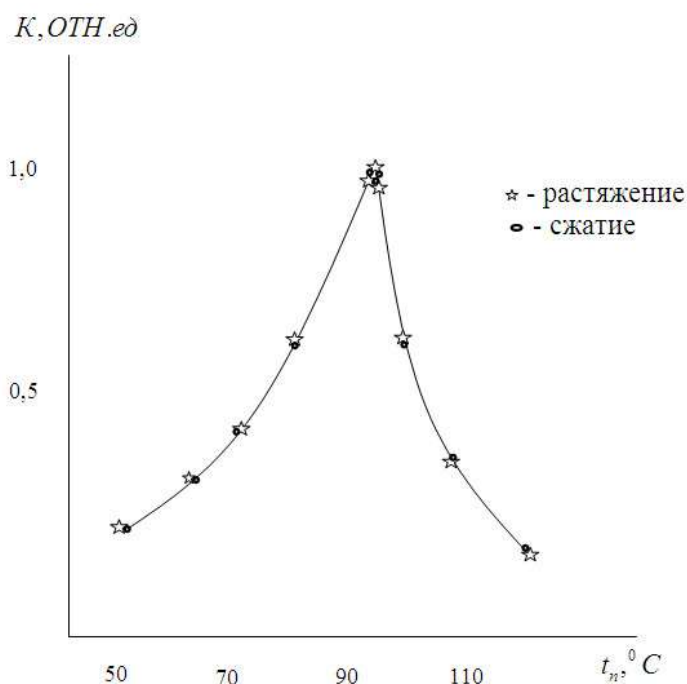


Рис.3. Относительные зависимости коэффициента

тензочувствительности от температуры подложки.

На основе приведенных экспериментальных данных можно судить о том, как внутренние напряжения сжатия, возникающие в процессе получения пленок на упруго деформированных нагретых подложках, компенсируются при возвращении подложек с пленками в первоначальное состояние. Компенсируя внутренние напряжения контролируемыми предварительными упругими деформациями подложки и линеаризуя деформационные характеристики тензоэлементов, можно оценить внутренние напряжения возникающие в пленочных элементах [7-17].

ВЫВОДЫ

1. Нелинейность деформационных характеристик пленочных тен-зорезисторов из $\rho-(Bi,Sb)_2Te_3$, связана с наличием в пленках внутренних механических напряжений.
 2. Разработан способ получения тензорезистивных пленочных элементов на предварительно деформированных подложках. Установлено, что изменяя температуру подложки и уровень предварительной упругой деформации можно линеаризовать деформационные характеристики тензорезисторов.
- Для получения тензочувствительной пленки с линеаризованной деформационной характеристикой рекомендуется оптимальный режим: $t_n = 90^\circ C$, $\varepsilon_{np} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ отн.ед.

Литература:

1. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем / Под ред. А.Я. Шика. М.: Наука, 2001. – 160 с.
2. Дубровский В.Г., Цырлин Г.З.. Кинетика роста пленок при зародышевом механизме формирования слоев // Физика и техника полупроводников. 2005. Т.39, № 11. – С. 1312–1319.
3. Онаркулов К.Э., Юлдашев А.А., Азимов Т.М, Йўлдошқори Ш.А Висмут-сурма теллурид юпка пардаларнинг электрофизик хоссаларига технологик жараённинг таъсири. ФарДУ илмий хабарлар. №2., 2017 й. Б. 32-36.
4. Онаркулов К.Э. Влияние одноосной деформации на проводимость фотопроводимость пленок PbS. Ф.Т.П.1996.Т.30.В.1. С. 82-86.
5. Принц В. Я., Голод С. В.. Упругие наноболочки на основе кремниевых пленок: формирование, свойства и практическое применение. // Прикладная механика и техническая физика. 2006. т. 47, №6. С.114-128.
6. Коваленко Д.А., Петров В.В. Исследование внутренних механических напряжений, возникающих в структурах Si-SiO₂-ЦТС. Journal of nano- and electronic physics. 2015. Vol. 7 No 3, 03036(5pp).
7. Онаркулов К.Э. Ахмедов М.М. Расулов Р.Т. Температурные и частотные зависимости кинетических коэффициентов тензочувствительных пленок Bi₂xSbx₂Te₃. Узбекский физический журнал V4. № 4. 2002. С.67-73.
8. Онаркулов, К. Э., & Зайнолобидинова, С. М. (2022). СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА АНОМАЛЬНОГО ФОТОНАПРЯЖЕНИЯ. PEDAGOGICAL SCIENCES AND TEACHING METHODS, 13(2), 228-232.

- 9.Зайнолобидинова, С. М. (2018). Формирование эффекта аномального фотонапряжения поликристаллических структурах. Интеграция наук, (4), 38-41.
- 10.Атакулов, С. Б., Зайнолобидинова, С. М., Набиев, Г. А., & Отаджонов, С. М. (2011). К теории аномальных фотоэлектрических и фотомагнитных эффектов в полупроводниковых пленках. Узбекский физический журнал, 13(4), 255-260.
- 11.Зайнолобидинова, С., & Рахимова, Л. (2022). КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЗРАЧНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА. Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences, 2(10-2), 910-915.
- 12.Egamberdiyevich, O. K., Malikovna, Z. S., Ugli, X. M. B., & Abdusattor-Ugli, E. E. (2021). Used for effect interpretation abnormal photo voltage. ACADEMICIA: AN INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY RESEARCH JOURNAL, 11(2), 783-786.
- 13.Atakulov, S. B., Zaynolobidinova, S. M., Otajonov, S. M., & Tukhtamatov, O. A. (2011). The penetrability of potential barrier on grain boundaries in semiconductor polycrystals. Uzbekiston Fizika Zhurnali, 13(5), 334-340.
- 14.Зайнолобидинова, С. М., & Тўйчиева, М. К. (2022). ПОЛИКРИСТАЛЛ СТРУКТУРАЛИ МАТЕРИАЛЛАРДА ЧЕГАРА СОҲАЛАРИНИНГ ЭЛЕКТРОНЛАРНИНГ КЎЧИРИЛИШИГА ТАЪСИРИ. Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences, 2(5), 372-374.
- 15.Зайнолобидинова, С. М. (2017). СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ И КЕРАМИК И ЭЛЕКТРОННОЕ СТРОЕНИЕ МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ. In Успехи науки 2017 (pp. 10-12).
- 16.Зайнолобидинова, С. М., & Хамракулова, М. (2017). МОДЕЛЬ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВЫСОТЫ БАРЬЕРА НА ГРАНИЦА ЗЕРЕН. In Успехи науки 2017 (pp. 12-15).
- 17.Алимов, Н. Э., Зайнолобиддинова, С. М., Отажонов, С. М., Халилов, М. М., Юсупова, Д. А., & Якубова, Ш. (2016). Змінювання потенційних бар'єрів низькорозмірних тонких плівок р-CdTe в умовах зовнішніх впливів. Журнал фізики та інженерії поверхні, 1(1), 52-56.