

## ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДОВ ВИСМУТА-СУРЬМЫ

**Юсупова Дилфуза Аминовна**

Ферганский государственный университет, Фергана, Узбекистан

доцент, кандидат физико-математических наук

### ARTICLE INFO.

#### **Kalit so'zlar:**

пленочные гетерогенные  
полупроводниковые  
материалы, теллуриды  
висмута-сурьмы, наложенная  
деформация,  
чувствительность к  
деформации, электрические  
свойства, линейная регрессия,  
технологические применения,  
физические свойства, методы  
исследования, анализ данных,  
уравнение линейной регрессии

### Annotatsiya:

В данной статье исследуется чувствительность пленочных гетерогенных полупроводниковых материалов (ГПМ) на основе теллуридов висмута-сурьмы к наложенной деформации. Методы синтеза материалов, наложения деформации и измерения сопротивления использовались для изучения влияния наложенной деформации на электрические свойства ГПМ. Результаты показали линейную зависимость между сопротивлением материалов и числом циклов деформации, что свидетельствует о возможности использования линейной регрессии для анализа этих данных. Обсуждение результатов исследования указывает на важность понимания влияния наложенной деформации на свойства ГПМ и их потенциала для применения в различных областях технологии. Эта работа представляет собой важный шаг в понимании физических свойств ГПМ и их возможного применения в новых технологиях.

<http://www.gospodarkainnowacje.pl/> © 2024 LWAB.

### Введение:

Материалы на основе теллуридов висмута-сурьмы привлекают все большее внимание в полупроводниковой индустрии благодаря их уникальным свойствам и потенциальным применениям. В частности, пленочные гетерогенные полупроводниковые материалы (ГПМ) на основе этих теллуридов обладают перспективными характеристиками, которые могут быть использованы в различных областях, включая электронику, фотонику и датчикоостроение.

В данном исследовании мы сосредоточились на изучении чувствительности к наложенной

деформации таких пленочных гетерогенных полупроводниковых материалов на основе теллуридов висмута-сурьмы. Целью данного исследования является раскрытие механизмов, лежащих в основе изменений свойств этих материалов при механическом воздействии, а также оценка их потенциала для применения в устройствах, требующих высокой чувствительности к деформации.

Изучение чувствительности ГПМ к деформации имеет важное практическое значение, поскольку такие материалы могут быть применены в различных типах датчиков, активно реагирующих на механические изменения окружающей среды. Понимание влияния деформации на свойства материалов открывает новые перспективы для разработки устройств с высокой чувствительностью и точностью.

В нашей работе мы представляем результаты исследований, направленных на изучение эффектов наложенной деформации на свойства пленочных гетерогенных полупроводниковых материалов на основе теллуридов висмута-сурьмы. Полученные данные не только способствуют расширению наших знаний о физических свойствах этих материалов, но и могут быть полезны для дальнейших исследований и разработок в области механически чувствительных полупроводниковых устройств.

#### Методы.

Пленочные гетерогенные полупроводниковые материалы (ГПМ) на основе теллуридов висмута-сурьмы были синтезированы с использованием соответствующих технологий синтеза и методов обработки материалов. Образцы материалов подвергались наложенной регулярной деформации с помощью соответствующих механических устройств или методов, обеспечивающих точное управление уровнем и характером деформации. Сопротивление пленочных ГПМ измерялось в зависимости от числа циклов деформации с использованием специализированных электрических измерительных устройств и методов анализа. Данные об изменениях сопротивления в зависимости от деформации были анализированы с помощью статистических методов, включая линейную регрессию, чтобы оценить связь между этими переменными. Эти методы обеспечили основу для изучения чувствительности пленочных ГПМ к наложенной деформации и позволили получить результаты, представленные в данной статье.

**Результаты.** Исследованы чувствительные к наложенной деформации пленочные гетерогенные полупроводниковые материалы (ГПМ) на основе теллуридов висмута-сурьмы. В работе рассмотрены ГПМ, находящиеся в установившемся режиме. Регистрация, начинается с числа циклов  $N = N_0$ , величины  $R(N, \sigma)$  - ее сопротивления через равное число циклов  $n$  - наложенной регулярной деформации:

$$R(N) : R(N_0) = R_0 ; R(N_0 + n) = R(N_1) = R_1 ; \dots R(N_0 + i \cdot n) = R(N_i) = R_i ; \dots (1)$$

Индекс  $i = 1, 2, \dots, k, k+1, \dots$ ;  $N_0$  - произвольное число предварительно наложенных на ГПМ циклов деформации.

Допускается, что динамика рассматриваемой ГПМ эффективно описывается всего одной независимой переменной. Тогда на плоскости  $R(N_i), R(N_i + 1)$  все точки последовательности  $R_0, R_1, R_2, \dots, R_i, \dots (2)$  будут ложиться на прямую:

$$R_{i+1} = B[\sigma] * R_i + (1 - B[\sigma]) * M[\sigma]$$

или в более удобных обозначениях:

$$R(i + 1) = B.R(i) + (1 - B) M$$

где  $B[\sigma]$  и  $M[\sigma]$  - константы в случае регулярных режимов нагружения;  $i$  - номер события: оно состоит в том, что на ГПМ наложено очередных  $n$  - циклов деформации, после чего проводится измерение его сопротивления. Для ГПМ с фиксированной начальной структурой и фиксированными параметрами нагружения, коэффициенты  $B$  и  $M$  могут быть определены из экспериментальных данных, если (2) рассматривать как соответствующее уравнение линейной регрессии [1]. Далее отдельно рассмотрен вопрос о числе событий необходимых и достаточных для определения параметров  $B$  и  $M$ .

Запишем (2), введя оператор  $Q[n; m, B, M]$  события:

$$R_{i+1} = Q[n; m, B, M] * R_i = B[m, \sigma] * R_i + (1 - B[m, \sigma]) * M \quad (3)$$

Индексы, характеризующие оператор  $Q$  имеют следующий смысл:  $n$  - число одинаковых циклов нагружения между двумя последовательными замерами величин сопротивления ГПМ;  $m$  - коэффициент асимметрии наложенной на ГПМ необратимой деформации;  $B$  и  $M$  - величины, зависящие от деформации. Для последовательности (2) идентичных событий можно вычислить результат применения оператора  $Q[n; m, B, M] = Q$ :

$$R_{i+2} = B^2 * R_i + (1 - B^2) * M. \quad (4)$$

Поэтому, если последовательность (2) состоит из  $1$  - членов, то

$$R_1 = B^1 * R_0 + (1 - B^1) * M. \quad (5)$$

Если коэффициент  $B < 1$ , то при  $1 \rightarrow \infty$ ,  $R[1 \rightarrow \infty] \rightarrow M$ . То есть, точка  $M$  является предельной точкой оператора  $Q$ . Другими словами, последовательное действие идентичных операторов  $Q$  на начальное сопротивление ГПМ  $R_0$  при  $\rightarrow \infty$  приводит к тому, что сопротивление ГПМ становится равным величине  $M(\sigma, \infty)$ .

Рассмотрена ситуация, когда динамика ГПМ описывается двумя независимыми переменными. В этом случае точки  $R[i]$  уже не ложатся на линию, а будут сложным образом разбросаны на плоскости  $R[i]$ ,  $R[i+1]$ . То есть теперь  $R[i+1]$  однозначно определяется только двумя предыдущими значениями  $R[i]$  и  $R[i+1]$ . Иными словами, если размерность вложения [2] динамической системы равна  $h$ , то величина  $R[i+1]$  оказывается функционально зависимой от  $R[i]$ ,  $R[i-1]$ ,  $R[i-2]$ , ...,  $R[i-h]$ ;  $h$  - штук предшествующих значений измеряемой физической величины. Параметры  $B[\sigma, m]$  и  $M[\sigma, m]$  зависят от величины и характера наложенных напряжений, а также от технологии изготовления пленочных ГПМ. В случае сложных режимов нагружения видно, что параметры  $B$  и  $M$  меняются. То есть, с изменением конструкционной структуры ГПМ характер миграции дефектов в гетерогенном полупроводниковом материале тоже меняется.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных для ситуации, когда в процессе нагружения структурно одинаковых ГПМ режимы меняются свидетельствуют, что характер миграции дефектов ГПМ, формирующих их эффективное сопротивление не зависит от величины начальных сопротивлений  $R_0$  и соответствует линейному оператору нагружения  $Q$ . Это позволяет не рассматривать внутренние механизмы приводящие к структурным мутациям ГПМ может рассматриваться в виде "черного ящика" получающего некоторые сигналы на входе (необратимая деформация) и выдающего сигналы на выходе (реакция  $R$ ). Линейность оператора нагружения позволяет рассчитать реакцию ГПМ на произвольный спектр наложенных деформаций.

Обсуждение:

Результаты исследования указывают на значительную чувствительность пленочных ГПМ на основе теллуридов висмута-сурьмы к наложенной деформации. Обсуждение этих результатов предполагает не только подтверждение эффекта деформации на электрические свойства материала, но и анализ механизмов, лежащих в основе этого эффекта. Возможные механизмы включают в себя изменение кристаллической структуры, миграцию дефектов и изменение электронной структуры материала.

Кроме того, обсуждаются перспективы применения полученных результатов в различных областях, включая создание новых типов сенсоров, активно реагирующих на механические воздействия, а также возможности в области энергетики, где материалы, чувствительные к деформации, могут использоваться для создания устройств для преобразования механической энергии в электрическую.

Таким образом, данное исследование не только расширяет наше понимание физических свойств пленочных ГПМ, но и предлагает новые перспективы их практического применения в различных областях науки и техники.

Заключение:

В результате проведенного исследования была подтверждена высокая чувствительность пленочных гетерогенных полупроводниковых материалов на основе теллуридов висмута-сурьмы к наложенной деформации. Полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии

деформации на электрические свойства этих материалов, что делает их перспективными для применения в различных областях, включая электронику, фотонику и сенсорiku.

Анализ результатов исследования позволяет предположить, что механизмы, лежащие в основе влияния деформации на электрические свойства материалов, могут быть связаны с изменением их кристаллической структуры, миграцией дефектов и изменением электронной структуры. Дальнейшие исследования в этом направлении могут способствовать более глубокому пониманию этих процессов и разработке новых материалов с улучшенными функциональными свойствами.

Таким образом, результаты нашего исследования представляют собой важный вклад в область изучения пленочных гетерогенных полупроводниковых материалов и могут быть полезны для разработки новых технологий и приложений в сфере электроники и сенсорики.

### Список использованной литературы

1. S. Shamirzaev. Modelling a fatigue imperfection of structural materials // *International Journal of Fatigue* 24 (2002) 777-782.
2. S. Shamirzaev. The theory of output parameters of a pressing powder mixture with random packaging density// *Solid State Sciences* 6 (2004) pp. 1125-1129
3. С.Шамирзаев, Э.Мухамедиев, Д.Юсупова, К.Онаркулов Простые модели усталостной повреждаемости гетерогенных материалов с очень сложной динамикой// *Физическая инженерия поверхности*, 2006. Т.4, №1-2.С.91-96
4. С.Шамирзаев, Д.Юсупова Динамика гетерогенных полупроводниковых материалов временной последовательностью ее эффективных сопротивлений//«Хозирги замон физикасининг долзарб муаммолари» V- респ Юсупова, Д. А., Сирожиддинова, С. З., & Толипов, Ж. (2023, November). ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ Теллуридов ВИСМУТА И СУРЬМЫ. In *Fergana state university conference* (pp. 71-71). ублика илимий-назарий конференцияси. Термиз 2010 .44-45 б.
5. Юсупова, Д. А., & Сирожиддинова, С. З. (2021). ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ И ГЕТЕРОФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ТЕЛЛУРИДОВ ВИСМУТА-СУРЬМЫ.
6. Юсупова, Д. А. (2022). ИЗУЧЕНИЯ РОЛИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.
7. Юсупова, Д. А. (2022). ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ . *Scientific Impulse*, 1(4), 1574-1580.
8. Юсупова, Д. А., & Толипов, Ж. (2022). ПОЛУЧЕНИЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДОВ ВИСМУТА-СУРЬМЫ. *Новости образования: исследование в XXI веке*, 1(4), 175-181.
9. Юсупова, Д. А. (2023). Эффективные электронные поверхностные состояния в полупроводниках. *World of Science*, 6(9), 77-81.
10. Юсупова, Д. А. (2022). ИЗУЧЕНИЯ РОЛИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.
11. Юсупова, Д. А. (2017). Исследование эффективной проводимости полупроводниковой смеси теллуридов висмута-сурьмы в отсутствие межгранульных поверхностных проводимостей. *Интеграция наук*, (4), 12-15.