

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI  
OLIIY TA'LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

FARG'ONA DAVLAT UNIVERSITETI

**FarDU.  
ILMIY  
XABARLAR**

1995-yildan nashr etiladi  
Yilda 6 marta chiqadi

**2024/3--SON  
ILOVA TO'PLAM**

**НАУЧНЫЙ  
ВЕСТНИК.  
ФерГУ**

Издаётся с 1995 года  
Выходит 6 раз в год

<b>Sh.K.Yakubova</b> Methodological and didactic requirements for demonstration experiments in secondary school .....	130
<b>Д.А.Юсупова</b> Влияние деформации и введения примесей на уровень ферми и плотность эффективного поверхностного заряда в пленках теллуридов висмута-сурьмы .....	134
<b>F.K.Yusupova</b> Turdosh fanlar integratsiyasini takomillashtirishda picrat modelini qo'llash.....	140
<b>A.A.Yuldashev</b> Sifatli optronlar yaratish.....	144
<b>Sh.A.Yuldashev, S.M.Zaynolobidina</b> Ikkilamchi issiqlikni yorug'likga aylantiruvchi optoelektron qurilma .....	149
<b>E.A.Ergashev</b> Biologik suyuqliklarning suvsizlanishida yuzaga kelgan fatsiyalarning xususiyatlarini baholash .....	154
KIMYO	
<b>M.Y.Ismoilov, Sh.V.Inobiddinova</b> <i>Peganum harmala</i> o'simligini makro va mikroelementlari .....	158
<b>M.Y.Ismoilov</b> Tog' minerallari tarkibini tadqiq qilish.....	163
<b>M.Y.Ismoilov</b> Farg'ona vodiysi tog' minerallari tarkibini tadqiq qilish .....	170
<b>M.T.Kurbanova, G.I.Qoraboyeva, D.U.Mamaraimova, I.J.Jalolov</b> <i>Xanthoparmelia conspersa</i> va <i>Xanthoria elegans</i> lishayniklarining flavonoid tarkibini tadqiq etish .....	173
<b>G.I.Qoraboyeva, M.T.Kurbanova, I.J.Jalolov</b> <i>Dermatocarpon miniatum</i> va <i>Lecanora argopholis</i> lishayniklarining flavonoid tarkibini tadqiq etish .....	176
<b>S.A.Karimova, M.Y.Imomova</b> <i>Rubus idaeus</i> L. (Malina) va <i>Rubus caesius</i> L. (Ko'kimtir maymunjon) o'simliklari tarkibidagi vitaminlar miqdorini aniqlash .....	180
<b>J.I.Tursunov, A.A.Ibragimov</b> <i>Aconitum septentrionale</i> Koelle o'simligidan $\beta$ -sitosterin ajratib olish .....	186
<b>R.M.Nazirtashova, Sh.M.Qirg'izov, J.I.Tursunov</b> <i>Cucumis sativus</i> o'simligi poya va barg qismini antioksidantlik xususiyatini o'rganish .....	189
<b>T.Sh.Amirova, M.O.Rasulova, G.A.Umarova</b> Qoramol, qo'y va echki terisining IQ spektrlari tahlili .....	193
<b>T.Sh.Amirova, Sh.Sh.Shermatova</b> O'simliklardan bo'yoq olish va ularni IQ spektrini o'rganish .....	197
<b>O.M.Nazarov, T.Sh.Amirova, S.R.Komilova</b> Matolarning rang mustahkamligi, terga chidamligi va rangini ishqalanishga chidamligini aniqlash .....	204
<b>T.Sh.Amirova, Z.B.Xoliqova</b> Ipak matolarining IQ spektri tahlili .....	208
<b>O.A.Abduhamidova, O.M.Nazarov</b> Yerqalampir o'simligining kimyoviy tarkibi va xalq tabobatida qo'llanilish usullari .....	213
<b>I.R.Asqarov, M.A.Xolmatova</b> Ravocho ( <i>Rheum</i> ) va Jusay ( <i>Allium odorum</i> ) o'simliklari aralashmasi asosida olingan "AS RHEUM" oziq-ovqat qo'shimchasining suvda eruvchi vitaminlar tahlili .....	216
<b>X.N.Saminov, O.M.Nazarov, Q.M.Sherg'oziyev</b> <i>Punica granatum</i> L. o'simligining aminokislota tarkibini o'rganish.....	219
<b>O.M.Nazarov, X.N.Saminov</b> Биологическая активность растений рода <i>Nitraria</i> .....	224
<b>M.A.Axmadaliyev, N.M.Yakubova</b> Turli o'simliklar asosida furfurool olish.....	228



UO'K: 538.935:538.975:539.2

**VISMUT-SURMA TELLURID FILMLARDA FERMI DARAJASI VA SAMARALI ZARYADA SIQTISHGA DEFORMATSIYA VA NOLOQLIK KIRISHINING TA'SIRI.****ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И ВВЕДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ НА УРОВЕНЬ ФЕРМИ И ПЛОТНОСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА В ПЛЕНКАХ ТЕЛЛУРИДОВ ВИСМУТА-СУРЬМЫ****INFLUENCE OF DEFORMATION AND IMPURITY INTRODUCTION ON THE FERMI LEVEL AND EFFECTIVE SURFACE CHARGE DENSITY IN BISMUTH-ANTIMONY TELLURIDE FILMS****Юсупова Д.А<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Ферганский государственный университет**Аннотация:**

В свете современной тенденции к миниатюризации электронных устройств и приборов, значительное внимание уделяется изучению свойств тонких поликристаллических пленок полупроводников, которые играют ключевую роль в современной электронике. Особый интерес представляют границы раздела в таких структурах, которые могут влиять на их свойства и создавать новые возможности для разработки устройств с уникальными характеристиками. В данной работе представлены методы изучения роли эффективной плотности электронных поверхностных состояний в гетерогенных пленках  $Bi_2Te_3$ - $Sb_2Te_3$ . Этот исследовательский подход направлен на более глубокое понимание физических процессов, происходящих в таких системах, и может способствовать разработке новых материалов и технологий в области нанoeлектроники.

**Annotatsiya**

Hozirgi vaqtda elektron qurilmalar va asboblarni miniaturalashtirish tendentsiyasini hisobga olgan holda, zamonaviy elektronikada asosiy rol o'ynaydigan yarim o'tkazgichlarning yupqa polikristal plyonkalarining xususiyatlarini o'rganishga katta e'tibor qaratilmoqda. Bunday tuzilmalardagi interfeyslar alohida qiziqish uyg'otadi, bu ularning xususiyatlariga ta'sir qilishi va o'ziga xos xususiyatlarga ega qurilmalarni ishlab chiqish uchun yangi imkoniyatlar yaratishi mumkin. Ushbu maqolada heterojen  $Bi_2Te_3$ - $Sb_2Te_3$  plyonkalarida elektron sirt holatlarining samarali zichligi rolini o'rganish usullari keltirilgan. Ushbu tadqiqot yondashuvi bunday tizimlarda sodir bo'ladigan jismoniy jarayonlarni chuqurroq tushunishga qaratilgan va nanoelektronika sohasida yangi materiallar va texnologiyalarni ishlab chiqishga hissa qo'shishi mumkin.

**Abstract**

In light of the current trend towards miniaturization of electronic devices and instruments, considerable attention is paid to the study of the properties of thin polycrystalline films of semiconductors, which play a key role in modern electronics. Of particular interest are the interfaces in such structures, which can influence their properties and create new opportunities for the development of devices with unique characteristics. This paper presents methods for studying the role of the effective density of electronic surface states in heterogeneous  $Bi_2Te_3$ - $Sb_2Te_3$  films. This research approach aims to gain a deeper understanding of the physical processes occurring in such systems and can contribute to the development of new materials and technologies in the field of nanoelectronics.

**Ключевые слова:** поверхностные состояния, границы раздела, межзеренные границы, поликристаллические пленки, эффективная плотность состояний, тензочувствительные пленки, электронная структура, примеси, дефекты, уровень Ферми, плотность заряда, деформация.

**Kalit so'zlar:** sirt holatlari, interfeyslar, don chegaralari, polikristal plyonkalar, holatlarning samarali zichligi, deformatsiyaga sezgir plyonkalar, elektron struktura, aralashmalar, nuqsonlar, Fermi darajasi, zaryad zichligi, deformatsiya.

**Key words:** surface states, interfaces, grain boundaries, polycrystalline films, effective density of states, strain-sensitive films, electronic structure, impurities, defects, Fermi level, charge density, deformation.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная электроника стремительно движется в направлении миниатюризации устройств, что отражается в постоянном уменьшении размеров рабочих структур и в поиске новых материалов с уникальными свойствами. Одним из ключевых направлений в этом контексте является изучение свойств тонких поликристаллических пленок полупроводников, которые широко применяются в современной электронике. Важную роль в определении электрических и оптических характеристик таких структур играют поверхностные и межзеренные границы, влияние которых становится более заметным при уменьшении размеров структур.

Однако изучение эффектов, связанных с поверхностями и границами раздела, представляет собой сложную задачу из-за необходимости упрощения сложных реальных систем. В реальных условиях поверхности и границы взаимодействуют с окружающей средой, что приводит к образованию покрытий, адсорбции инородных атомов и окислению поверхности. Важным является также влияние дефектов и примесей на электронную структуру и электрические свойства материалов.

Целью данной работы является разработка методов изучения роли эффективной плотности электронных поверхностных состояний гетерогенных пленок  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ . Для достижения этой цели рассматривается влияние различных факторов, таких как деформация и введение примесей, на изменение уровня Ферми и плотности эффективного поверхностного заряда в пленках теллуридов висмута-сурьмы.

В данной работе представлен анализ результатов экспериментов, проведенных на поликристаллических пленках, а также обсуждаются проблемы и перспективы дальнейших исследований в этой области.

В современной эпохе активно продолжается стремление к уменьшению размеров электронных устройств, что проявляется в непрерывном уменьшении размеров рабочих структур и формировании сложных многослойных и наноструктурированных композиций. Эта тенденция приводит к возросшему вниманию к границам раздела и их влиянию на свойства материалов. В частности, в области наноэлектроники интерес к границам раздела, включая гетерогенные, становится все более актуальным.

Тонкие поликристаллические пленки полупроводников являются одними из самых распространенных объектов, применяемых в современной электронике. Исследование свойств межзеренных границ, которые существенно влияют на характеристики таких пленок, представляет собой важную задачу как с научной, так и с практической точек зрения. В этой связи цель нашей работы заключается в разработке методов для изучения роли эффективной плотности электронных поверхностных состояний в многослойных структурах на основе халькогенидов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ .

Подход к изучению этих пленок направлен на выявление влияния различных факторов на электронные свойства материала, включая воздействие деформации и введение примесей. В рамках данного исследования мы сосредотачиваем внимание на изменениях уровня Ферми и плотности эффективного поверхностного заряда в пленках теллуридов висмута-сурьмы.

Наша работа включает анализ результатов экспериментов на тензочувствительных поликристаллических пленках и обсуждение возможных путей дальнейших исследований в этой области. Мы уверены, что полученные результаты не только способствуют глубокому пониманию физических процессов в гетерогенных пленках, но и могут быть использованы в разработке новых материалов и технологий для наноэлектроники.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В изучении свойств поверхности и границ раздела особую значимость приобретает необходимость радикального упрощения сложных реальных систем. Поэтому создание атомарно-чистых поверхностей или резких границ раздела представляет интерес, хотя требует больших усилий.

В исследовании свойств поверхности и границ раздела значительное значение приобретает необходимость упрощения сложных систем. Поэтому создание атомарно-

чистых поверхностей или резких границ раздела представляет интерес, хотя требует больших усилий. В реальных ситуациях взаимодействие поверхностей с окружающей средой приводит к образованию покрытой поверхности вследствие сорбции инородных атомов, окисления и прочего.

Примером таких объектов являются межзеренные границы раздела. За счет диффузии и дрейфа носителей заряда, зарядки границ раздела могут распространяться в объем образца, изменяя его электрофизические свойства. Это затрудняет изучение границ раздела, но позволяет применять классические методы их исследования, такие как измерение проводимости, емкости и фотоэлектрические исследования. Взаимодействие поверхностей на границе раздела приводит к изменению их химического состава, что приводит к образованию гетерофазной границы с собственными свойствами.

Комплексное изучение таких систем с использованием современных методов диагностики может дать информацию о свойствах границ раздела и их влиянии на параметры структур. Одномерные модели межзеренных границ в полупроводниковых пленках не учитывают всю разнообразие этих границ, что приводит к неопределенности результатов. Электронная структура межзеренных границ чувствительна к захвату примесей, что может способствовать получению пленок с уникальными свойствами.

На межзеренных границах обычно находятся адсорбированные атомы, вакансии и другие дефекты. Энергетическая структура примесей и дефектов в зернах, а также плотности поверхностных электронных состояний зависят от процесса получения поликристалла. Электрические свойства поликристаллических пленок определяются сетью всех электрически активных межзеренных границ внутри пленки. Работа с тензочувствительными поликристаллическими пленками теллуридов висмута-сурьмы демонстрирует необходимость разработки методов изучения роли эффективной плотности электронных поверхностных состояний гетерогенных пленок на основе анализа экспериментальных данных.

Их энергетические уровни зависят от соответствия электронной и пространственной структур примесей и матричной решетки. Определение природы этих состояний в запрещенной зоне представляет сложную проблему.

Недостатком большинства существующих методов является изменение чувствительности метода с изменением концентрации компенсирующих примесей, а также с изменением величины наложенных на образцах физических полей (температура, деформация, электрические, магнитные поля). Электрические свойства поликристаллической пленки определяется сетью всех электрически активных МЗГ внутри пленки.

Рассматриваемые нами поликристаллические пленки теллуридов висмута-сурьмы имеют средний линейный размер одной гранулы  $\sim 30$  нм ( $3 \cdot 10^{-6}$  см). Общая площадь межгранульной поверхности достигает  $60$  см<sup>2</sup>. Поверхностные уровни заряжены, так как на поверхности существует обмен носителями между поверхностными электронными состояниями и объемом

Поверхностные электронные состояния играют важную роль в процессах рекомбинации и захвата зарядов, их влияние определяется такими параметрами, как сечения захвата электрона ( $C_n$ ) и дырки ( $C_p$ ), концентрация поверхностных состояний ( $N_{ss}$ ), а также их тип и энергетическое положение ( $E_s$ ). В связи с этим становится актуальной разработка методов, которые бы позволили оценить эффективную плотность электронных поверхностных состояний в гетерогенных пленках, основываясь на анализе экспериментальных данных. Для определения эффективной плотности поверхностных состояний необходимо найти как изменение уровня Ферми  $\Delta F$  так и изменение  $\Delta Q$  плотности эффективного поверхностного заряда.

Изменение уровня Ферми ( $F$ ) и потенциала поверхностного заряда ( $Q$ ) может происходить под воздействием внешних факторов, таких как изменения температуры, деформации или введение примесных атомов. Например, в работе [1] было выявлено, что введение примесных атомов олова в  $Bi_2Te_3$  приводит к перераспределению плотности электронных состояний. Этот процесс сопровождается появлением пика плотности

## FIZIKA-TEXNIKA

состояний на фоне разрешенного спектра валентной зоны, а также изменениями в энергии связи и химическими сдвигами основных уровней теллура и висмута. В данной работе рассмотрено изменение  $F$  и  $Q$  в плёнках теллуридов висмута – сурьмы при наложении необратимой деформации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами найдено  $n=5$  при деформационном интервале между экспериментальными точками равно  $\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} = 10^{-6}$ . Это позволяет в пределах любых пяти, следующих одна за другой точек, считать  $\Delta F(\varepsilon_i)$  и  $b_i(\varepsilon_i)$  не зависящими от деформации. Вне данного интервала  $\Delta F(\varepsilon_i)$  и  $b_i(\varepsilon_i)$  зависят от деформации.

Проведём расчет эффективной плотности поверхностных состояний  $N_{ss}$  для различных величин наложенной деформации -  $\varepsilon_i$ . Как отмечалось в [3,4], для определения эффективной плотности поверхностных состояний необходимо найти как изменение уровня Ферми  $\Delta F(\varepsilon_i)$ , так и изменение  $\Delta Q_{ss}(\varepsilon_i)$  плотности эффективного поверхностного заряда:

$$N_{ss} = U \cdot \Delta C(\varepsilon_i) / \Delta F_i(\varepsilon_i).$$

На рис.1 и рис.2 приведены зависимости сопротивления  $R(\varepsilon_i)$  и ёмкости  $C(\varepsilon_i)$  образцов гетерогенных плёнок теллуридов висмута – сурьмы, от наложенной деформации сопротивление и ёмкость образцов измерялись для одного полного цикла симметричной нагрузки (растяжение – от нуля до  $\varepsilon_{max}$  и затем от  $\varepsilon_{max}$  до нуля и обратно в область сжатия до  $-\varepsilon'_{max}$  и затем снова до нуля) для частоты  $f=240$  кГц.

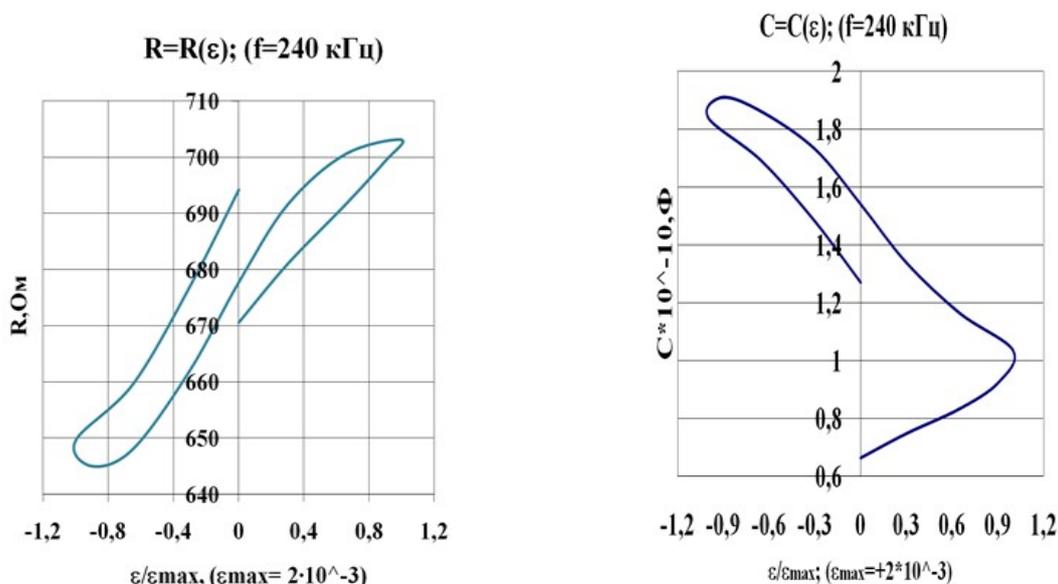


Рис. 1 и Рис.2 Зависимости высокочастотных сопротивления ( $R[\varepsilon]$ ) и ёмкости ( $C[\varepsilon]$ ) плёнок  $Bi_2Te_3-Sb_2Te_3$  от величины наложенной деформации ( $\varepsilon$  – соответствует одному полному симметричному циклу: растяжение от 0 до максимального значения равного  $10^{-4}$  относительных единиц, затем возврат до нулевого значения и далее сжатие до  $-\varepsilon_{max}$  с возвратом опять до исходного нулевого значения), измеренных на частоте 240 кГц.

На рис.3 и рис.4 приведены зависимости эффективной плотности электронных поверхностных состояний  $N_{ss}(\varepsilon_i)$  от наложенной деформации. Из рисунка можно судить о необратимости гетерогенных структур при наложении деформации, т.е. электронная структура гетерогенной полупроводниковой плёнки сильно изменяется при наложении циклической деформации.

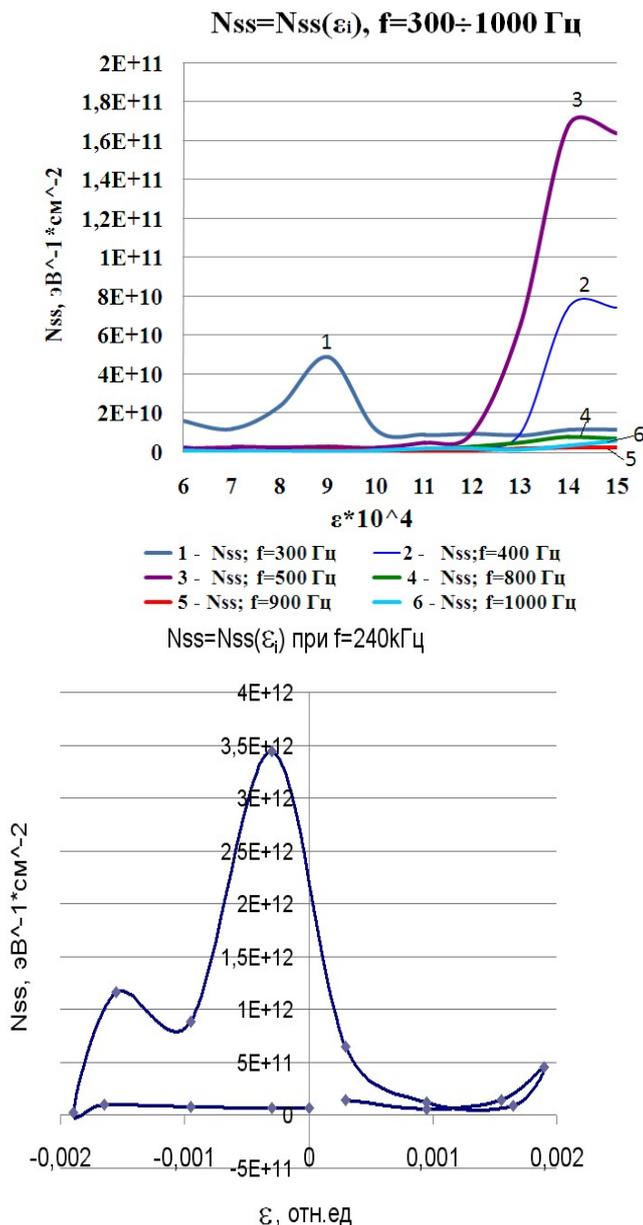


Рис.3 и Рис.4. Зависимость от наложенной деформации эффективной плотности электронных поверхностных состояний плёнок  $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$ , найденные по экспериментальным данным, приведенным и Рис.1-2 (для  $f=240 \text{ кГц}$ , после наложения 3840 циклов симметричной деформации ( $\epsilon = \pm 10^{-4}$ )).

На рис.3, например, для частот 400 и 500 Гц,  $N_{ss}$  резко увеличивается к концу растяжения плёнки, которое имеет место сразу после наложения 20-го цикла симметричной деформации. На рис.4  $N_{ss}$  имеет максимальное значение в области сжатия плёнки, которое имеет место сразу после наложения 3840-го цикла той же деформации ( $\epsilon = \pm 10^{-4}$ ).

### ВЫВОДЫ

По вариациям активной и реактивной частей импеданса полупроводниковых смесей теллуридов висмута-сурьмы при наложении необратимой циклической деформации определена эффективная плотность электронных поверхностных состояний и найдена ее деформационная зависимость. Установлено, что при достаточно больших значениях деформации ( $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ ) и большого числа наложенных циклов деформации, плёнки, которые имеют одинаковые  $N_{ss}(\epsilon, N)$ , могли бы быть использованы в качестве чувствительных элементов малоцикловых датчиков накопленной усталостной повреждаемости.

## FIZIKA-TEKNIKA

Наша работа подчеркивает важность изучения свойств поверхности и границ раздела в полупроводниковых пленках. Мы выявили, что хотя создание атомарно-чистых поверхностей и резких границ раздела представляет значительные трудности, это имеет важное значение для понимания и контроля электрофизических свойств таких структур. Методы классической диагностики, такие как измерение проводимости и емкости, оказываются полезными для изучения границ раздела, несмотря на их сложность. Важно также учитывать влияние химического состава на формирование гетерофазных границ и их взаимодействие с объемом зерна. Наша работа подчеркивает необходимость разработки новых методов изучения роли эффективной плотности электронных поверхностных состояний гетерогенных пленок на основе анализа экспериментальных данных.

**ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Гасенкова И.В., Житинская М.К. Перераспределение электронной плотности в  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , легированном Sn. //ФТТ, 1999, т.41, в. 11, с.1969-1972.
2. С.Х.Шамирзаев, Д.А.Юсупова, Э.Д.Мухамедиев Деформационная зависимость эффективной плотности электронных поверхностных состояний в нанокристаллических пленках  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  // Материалы третьей международной конференции, посвященной 15-летию независимости Узбекистана «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» 26-27 сентября 2006 г., Ташкент. С.302-304.
3. С.Шамирзаев, Д.А.Юсупова Э.Мухамедиев, К.Онаркулов Определение эффективной плотности электронных поверхностных состояний в нанокристаллических пленках  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  // Физическая инженерия поверхности, 2006. Т.4, №1-2.С. 86-90
4. Д.А.Юсупова. Исследование влияния деформации на изменения концентрации поверхностных состояний, уровня Ферми и заряда поверхности раздела нанокристаллических пленок теллуридов висмута и сурьмы. // Проблемы современной науки и образования 2019. № 12 (145).Часть 2.Российский импакт-фактор: 1,72 .Научно-методический журнал Москва .2019. .С. 8-12
5. 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).
6. Юсупова, Д. А. (2023). Эффективные электронные поверхностные состояния в полупроводниках. World of Science, 6(9), 77-81.
7. Юсупова, Д. А., & Сирожиддинова, С. З. (2021). ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ И ГЕТЕРОФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ТЕЛЛУРИДОВ ВИСМУТА-СУРЬМЫ.
8. Юсупова, Д. А. (2022). ИЗУЧЕНИЯ РОЛИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ. Involta Ilmiy Jurnal Vol. 1 No.6 , 416-424