

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ИХ ПЛЕНОК НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА АНОМАЛЬНОГО ФОТОНАПРЯЖЕНИЯ**

**Зокиров Адхам Илхомжон угли**

Преподаватель кафедры физики, Ферганский государственный университет,  
Фергана, Узбекистан  
a.zokirov3001@gmail.com

**Зайнолобидинова Сапура Маликовна**

Преподаватель кафедры физики, Ферганский государственный университет,  
Фергана, Узбекистан

### **АННОТАЦИЯ**

*В работе приведены результаты исследования влияния структурных особенностей поликристаллических пленок полупроводников на формирование эффекта аномального фотонапряжения и возможные механизмы эффекта аномального фотонапряжения. Эксперименты с пленками PbTe показали, что последовательное заполнение границ кристаллитов кислородом, в них можно наблюдать различное поведение эффекта аномального фотонапряжения.*

***Ключевые слова:** фотонапряжение, энергия, концентрация, поликристалл, электрон, пленка, фотодырки, фотоэлектроны, рекомбинация, подложка, шероховатость, дислокация, потенциальный барьер.*

### **ABSTRACT**

*The paper presents the results of studying the influence of structural features of polycrystalline semiconductor films on the formation of the anomalous photovoltage effect and the possible mechanism of the anomalous photovoltage effect. Experiments with PbTe films have shown that successive filling of crystallite boundaries with oxygen leads to different behavior of the anomalous photovoltage effect.*

***Keywords:** photovoltage, energy, concentration, polycrystal, electron, film, photoholes, photoelectrons, recombination, substrate, roughness, dislocation, potential barrier.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Механизмы эффекта аномального фотонапряжения обсуждаются давно, но ни один из них не дает полного объяснения тех или иных закономерностей эффекта в рамках одной модели. Интерес к явлению не ослаб и по сей день, что, возможно, связано с неудовлетворенностью исследователей существующими объяснениями эффекта [1]. Дело в том, что все физические модели,

разрабатывавшиеся по настоящее время, включали в себя хотя бы одно допущение, никак не соответствующее реальной физической ситуации, например, существование  $p$ - $n$ -переходов в монополярном полупроводнике или специфическое «дендритное» строение приповерхностного слоя пленок [2, 3, 4]. (Как будет указано ниже  $n$ - $p$ - $n$ - или  $p$ - $n$ - $p$ -переходы в монополярном полупроводнике возникать могут, но их природа отлична от предлагаемых в более ранних работах). Теоретические работы в большинстве посвящены усовершенствованию  $p$ - $n$  - переходной модели (см. напр. [5]). В модели [6] считается, что зерна полупроводникового материала  $n$ -типа разделены диэлектрической прослойкой, на разных сторонах которой имеются поверхностные состояния (ПС), имеющие разные характеристики (уровни энергии, концентрации, сечения захвата фотоносителей). Такое предположение необходимо для обоснования асимметрии свойств границ кристаллитов (ГК), без которой генерация фотоЭДС просто невозможна. Т.е. вновь в рассмотрение вводится искусственно надуманный параметр, хотя хорошо известно, что АФН можно наблюдать и в достаточно совершенных блочных поликристаллах, где образование прослоек проблематично [7, 8]. На наш взгляд, такому обилию подходов к интерпретации эффекта способствовали некоторые, кажущиеся противоречивыми, закономерности в наблюдении эффекта на разных объектах. Опираясь на ряд наиболее интересных экспериментов [2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13], перечислим их.

## ЛИТЕРАТУРА И МЕТОД

Во-первых, в подавляющем большинстве случаев для обнаружения эффекта АФН, при получении образцов не требовалось привлечение технологии косоугольного напыления, достаточно было освещать пленки под углом к поверхности подложки. В других типах пленок эффект проявлялся лишь при косом напылении (например, пленки CdTe).

Во-вторых, исследование зависимости фотонапряжения  $V_{\text{АФН}}$  от угла освещения обнаружило, что в одних типах пленок (Ge, PbS и др.) при освещении под углом, близким к углу напыления пленки, наблюдается инверсия знака  $V_{\text{АФН}}$ , в других типах - инверсии нет (CdTe).

Наконец, существуют материалы (GaAs), пленки которых могут быть и того, и другого типа.

Не приводя здесь более подробного описания эффекта, остановимся на механизме явления, который, на наш взгляд, очень прост, но в то же время

достоверно объясняет эффект. Предлагаемая модель не содержит предположений, хоть как-то противоречащих реальной структуре и другим свойствам поликристаллов, в которых наблюдается АФН. Это и понятно: одной конкретной структуре не могут соответствовать две разные модели, хотя в рамках каждой из них имеется возможность объяснить различные физические явления, наблюдаемые в поликристаллах.

### **ОБСУЖДЕНИЕ**

Модель, использованная для интерпретации эффекта АФН: Рассмотрим для определенности поликристаллическую пленку  $n$  – типа с акцепторными межзеренными ПС, имеющими один дискретный энергетический уровень  $E_s$ , расположенный в запрещенной зоне. Уровень легирования в пленках -  $N_d$ , примеси полностью ионизированы; концентрация ПС -  $N_s$ . Если  $E_F^T > E_s$  ( $E_F^T$  - уровень Ферми в темноте), электроны проводимости захватываются на ПС, образуя симметричный относительно ГК потенциальный барьер высотой  $\phi$ , так как объемные свойства зерен по обе стороны ГК идентичны, а ПС коллективизированы соприкасающимися зернами. Модель пленки (а), дно зоны проводимости  $E_c$  в темноте (б) и при стационарном освещении перпендикулярно падающим на поверхность пленки светом с длиной волны из области собственного поглощения материала пленки (в) изображены на рис. 1 [14, 15]. Модель соответствует моделям в [16, 17, 18], где успешно развита теория эффекта Холла и фотоэлектрики в поликристаллических пленках полупроводников.

При освещении пленки собственным светом происходит генерация электронно-дырочных пар, которые пространственно разделяются потенциальным барьером ГК. Фотодырки захватываются ПС, понижая высоту барьера. Фотоэлектроны скапливаются у подножия барьеров, которые препятствуют их захвату на ПС и рекомбинации. Возникает стационарная фотопроводимость. Так как в рамках модели все зерна одинаковы по геометрическим размерам, уровню легирования, концентрации и энергии ПС, изменения в пленке при освещении одинаковы на каждой ГК и симметричны относительно ГК, что и отображено на рис. 1, в. В такой системе при нормальном освещении возникновение эффекта АФН исключено.

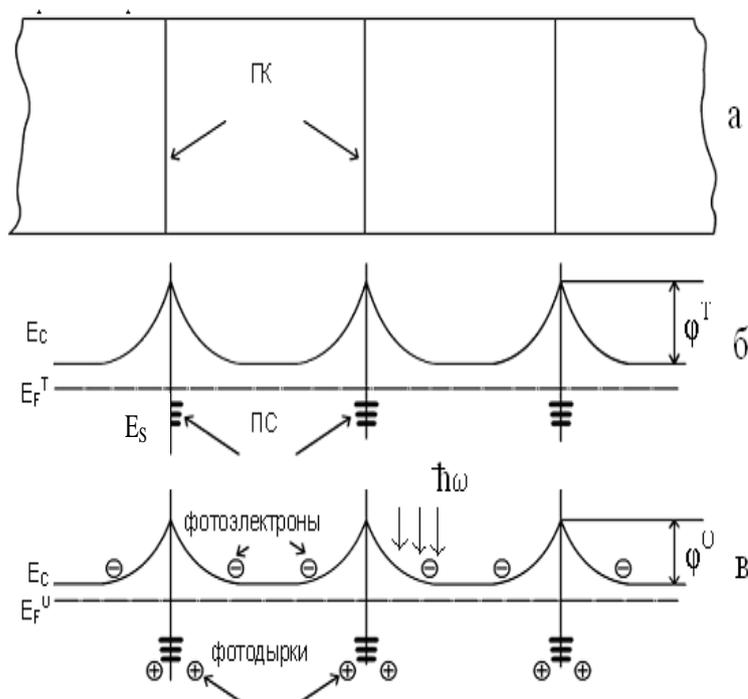


Рис. 1. Модель поликристаллической пленки (а), искривление зоны проводимости в темноте (б) и при освещении нормально падающим пучком света (в).  $\phi^T$  и  $\phi^U$  высоты потенциального барьера у ГК в темноте и при освещении соответственно.  $E_F^U$  - неравновесный квазиуровень Ферми при освещении ( $\phi^T > \phi^U$ ,  $E_F^U > E_F^T$ ) [14, 15].

Прежде чем приступить к обсуждению эффекта АФН остановимся на вопросе соответствия модели на рис. 1, реальным поликристаллическим объектам. Известно, что пленки, обладающие АФН, обычно, получают термовакuumной конденсацией вещества на диэлектрические подложки (например, стекло). Такие пленки непрерывно растут в направлении молекулярного пучка и имеют столбчатую структуру. Изменение направления молекулярного пучка, например, путем изменения положения подложки – напылением на подложки, плоскость которых не перпендикулярна молекулярному пучку (косое напыление), ведет к точно такому же изменению направления непрерывного роста пленок [13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментально подтверждено, что поверхность каждого зерна на ГК «шероховата» [16]. Это так называемый рельеф «естественной шероховатости»,

который также обусловлен требованием минимальности свободной энергии. Шероховатости могут быть и причиной возникновения на ГК ПС [12].

Понятие индивидуальности поверхности кристаллита на ГК, в оптических явлениях необходимо учитывать особенности прохождения света через ГК, в частности, ее отражательную способность. Шероховатости на ГК и могут быть первопричиной их такой способности. Сказанное проиллюстрировано на рис. 2 [14, 15].

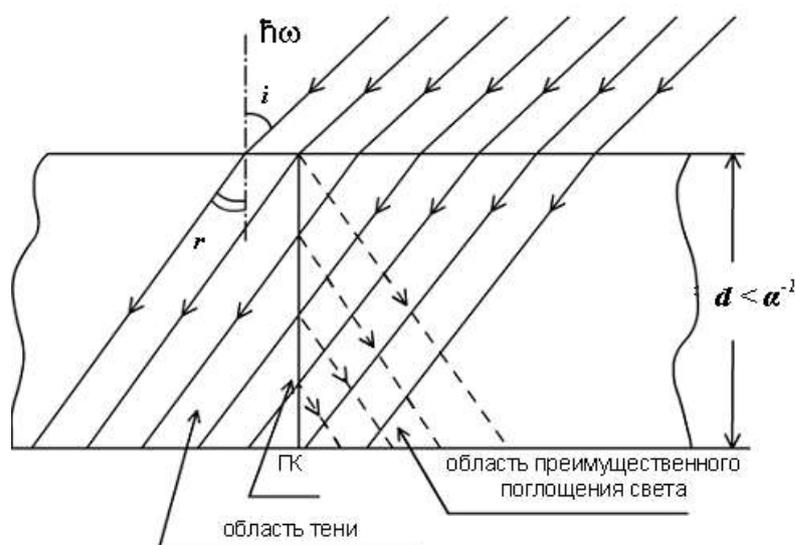


Рис. 2. Поглощение плоскопараллельного пучка света, падающего под углом  $i$  к пленке, полученной в условиях падения молекулярного пучка перпендикулярно плоскости подложки.  $r$  – угол преломления;  $d$  – толщина пленки;  $\alpha$  – коэффициент поглощения света. Положено, что коэффициент преломления на ГК не претерпевает изменений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат, следующий из рис. 2, – это неоднородность в поглощении света объемом пленки, которую вносит ГК, из-за отражения на ней падающего света. Симметрия, которая имеет место при нормальном падении светового пучка, нарушается при освещении под углом к поверхности и ведет к образованию областей преимущественного поглощения света и тени. Это является одной из естественных причин возникновения в таких структурах АФН. Луч, проникающий в область тени через ГК, имеет интенсивность ниже интенсивности первичного луча, прошедшего в пленку.

Таким образом, именно асимметрия в освещении ГК вызывает возникновение АФН [14, 15].

## REFERENCES

1. Онаркулов, К. Э., Юлдашев, А. А., Азимов, Т., & Йўлдошқори, Ш. (2017). Висмут-сурма теллурид юпка пардаларнинг электрофизик хоссаларига технологик жараённинг таъсири. ФарДУ илмий хабарлар, 2, 32-35.
2. Атакулов, Ш. Б. (1985). О перколяционной проводимости фоточувствительных химически осажденных слоев сернистого свинца. Физика и техника полупроводников, 19(7), 1324-1326.
3. Онаркулов, М. К., Отажонов, С. М., Ботиров, К. А., Юнусов, Н., Мамаджонов, У. М., & Каххорова, Б. А. (2020). Устройство для изучения тензочувствительности в фоточувствительных полупроводниковых пленках. Universum: технические науки, (2-1 (71)), 55-58.
4. Atakulov, S. B., & Onarkulov, K. E. (1985). Percolation conduction in photosensitive chemically deposited lead sulfide films. soviet physics semiconductors-ussr, 19(7), 811-812.
5. Ахмедов, М. М., Гайназарова, К. И., Кадыров, К. С., & Онаркулов, М. К. (2020). О химическом составе тензочувствительных пленок на основе системы Bi-Sb-Te. Universum: технические науки, (2-1 (71)), 38-42.
6. Шамирзаев, С. Х., Юсупова, Д. А., Мухамедиев, Э. Д., & Онаркулов, К. Э. (2006). Определение эффективной плотности электронных поверхностных состояний в нанокристаллических пленках  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ . Физическая инженерия поверхности.
7. Неустроев, Л. Н., Онаркулов, К. Э., & Осипов, В. В. (1986). Температурные зависимости основных параметров фоточувствительных поликристаллических пленок PbS. Микроэлектроника, 15(3), 244-254.
8. Karimberdi, O., Usmanov, Y., & Toolanboy, A. (2020). Semiconductor sensor for detecting volume changes at low temperatures. European Journal of Molecular & Clinical Medicine, 7(2), 2353-2358.
9. Ma'Rifjonovich, A. T., & Egamberdiyevich, O. K. (2020). Effect of commutation solder on the operating characteristics of cooling elements based on bismuth and antimony chalcogenides. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, (1-2), 21-25.
10. Atakulov, S. B., & ONARKULOV, K. (1985). Conductivité de percolation de couches photosensibles de sulfure de plomb déposées chimiquement. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 19(7), 1324-1326.
11. Набиев, М. Б., Онаркулов, К. Э., Ахмедов, М., Гайназарова, К., & Исроилжоннова, Г. С. (2017). Разработка и исследование экстремальных

режимов работы полупроводниковых термоэлементов нестационарного термоэлектрического охлаждения. In Актуальные вопросы высшего профессионального образования (pp. 101-104).

12. Зокиров, А. И. У., & Ташланова, Д. М. (2022). О природе микрофотоэлементов. Ta'lim fidoylari, 5(9), 269-272.

13. Зокиров, А., & Гайназарова, К. (2022). ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АФН ПЛЕНОК ИЗ ХАЛЬКОГЕНИДОВ КАДМИЯ. Scientific Collection «InterConf», (103), 202-208.

14. Зокиров, А. И. У., & Ташланова, Д. М. (2022). АФН-ПЛЕНКА КАК МИКРОФОТОБАТАРЕЯ. Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences, 2(Special Issue 4-2), 854-860.

15. Ахмедов, Б. Б., Хошимов, Х. А. У., & Зокиров, А. И. У. (2022). РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ. Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences, 2(Special Issue 4-2), 942-947.

16. Neustroev, L. N., Onarkulov, K. E., & Osipov, V. V. (1987). Temperature functions of basic parameters for photosensitive polycrystalline films of PbS. Sov. Microelectron.:(United States), 15(3).