

УДК 539.231

**НОВЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ С АНОМАЛЬНЫМИ
ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ**

*Нурдинова Разияхон Абдихаликовна**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроника и приборостроение» Ферганского политехнического института, Фергана, Узбекистан. e-mail: nurdinovar2016@mail.ru

Алимжонова Арофатхон Шавкат кизи, бакалавр Ферганского филиала Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, город Фергана, Узбекистан. e-mail: f.success2898@gmail.com

Аннотация. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований эффекта аномального фотовольтаического напряжения. Сформулирована и определена природа процессов, приводящих к возникновению аномально высоких фотоэлектрических напряжений. Проведены исследования энергетических параметров пленок.

Ключевые слова: аномальное фотонапряжение (АФН), вольт-амперные характеристики, люкс-вольтовые характеристики, спектры фотонапряжения.

**NEW ASPECTS OF APPLICATION OF ELEMENTS WITH ANOMALOUS
PHOTOVOLTIC VOLTAGE**

*Nurdinova Raziyakhan Abdikhalikovna**, Cand. Tech. Sc., Senior Lecturer of the Department of Physics of Fergana Polytechnic Institute, Fergana, Uzbekistan

Alimjonova Arofatkhan Shavkat qizi, Student of Fergana branch of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Fergana, Uzbekistan

Abstract. In this paper, the results of experimental studies of the APV effect are carried out and its theory is developed. The nature of microprocesses leading to the occurrence of anomalously high photoelectric voltages (APV-effect) is formulated and determined. The energy parameters of the APV films were studied

Key words: anomalous photovoltage (AHV), current-voltage characteristics, lux-volt characteristics, photovoltage spectra.

1. Введение

В последние годы со стороны разработчиков приборов микроэлектроники большое внимание уделяется исследованию эффекта аномального фотонапряжения на основе которого, возможно создать уникальные оптоэлектронные приборы для измерительной и преобразовательной техники [1-9]. Результаты научных исследований показали, что при освещении пленки из многих полупроводниковых материалов, изготовленных с помощью специальной технологии, генерируется фотовольтаическое напряжение порядка несколько тысяч вольт (эффект аномального фотонапряжения). Спектральный диапазон чувствительности этих полупроводниковых материалов довольно широк: начиная с видимого вплоть до инфракрасной области спектра. Изучение фотоэлектрических эффектов и модификации технологии получения тонкопленочных структур с эффектом аномального фотовольтаического напряжения (АФН) является актуальным вопросом современной физики полупроводников. Целью данной работы является целенаправленное исследование в следующих направлениях:

1. Усовершенствование технологии получения элементов с аномальным фотонапряжением в виде полупроводниковых структур, в том числе из супермногослойных структур;
2. Управление выходными параметрами и воспроизводимостью фоточувствительности исследуемых образцов;
3. Исследование влияния изовалентных примесей и внешних условий на эффект аномального фотонапряжения;
4. Исследование влияние поляризованного света на проявление аномального фотонапряжения в магнитном поле;
5. Разработка устройства для получения АФН пленок.

В этом направлении выполнен ряд научных исследований. Например, в работе [11], приведена иерархия развития аномально высоких фотоэлектрических напряжений в полупроводниковых пленках с определенным углом осаждения.

В работе [12] исследованы аномально высокие фотонапряжения в молибдате тербия, а работе [13] изложены результаты исследования переходного поверхностного фотонапряжения р-типа в более сложных структурах из Cu_3BiS_3 . Роль радиационных и безизлучательных релаксационных процессов в генерации света в кремнии определена в работе [14]. В работах Э.И. Адировича были получены плёнки германия и изучены их свойства. Напыление пленок толщиной 0,1 мкм проводилось под углом 45-60 градусов при температуре подложки 200-400°C. При комнатной температуре значение АФН составила 100 В.

Несмотря на широкое изучение АФН-элементов, остаются неизученными вопросы фотоэлектрических, фотомангнитных, магнито-оптических и других свойств пленок с эффектом аномального фотовольтаического напряжения.

2. Методика исследования

Технологический режим получения АФН-пленок зависит от большого числа параметров, таких как температура испарителя и подложки, угол напыления, толщина пленки, состав и давление остаточных газов в вакуумной камере, условия термической обработки пленок после напыления. При этом каждому полупроводниковому материалу соответствует свой оптимальный режим и часто небольшие отклонения от него даже по одному из параметров приводят к исчезновению АФН-эффекта в изготавливаемых пленках. Поэтому разработка технологии получения АФН-пленок из того или иного материала требует проведения большой экспериментальной работы, большого количества пробных напылений при последовательном варьировании нескольких технологических параметров, их сочетаний и нахождения параметров, специфичных для получения АФН-эффекта на пленках из данного полупроводникового материала.

Нами также исследован АФН-эффект в пленках и кристаллах, полученных легированным изовалентными примесями и обладающих эффектом двойного лучепреломления. Была разработана специальная методика и установка для получения АФН-пленок из различных полупроводниковых материалов, которая описана в [7]. Методика и соответствующая ей установка вполне обеспечивают в пленке неоднородность по структуре и по составу. При освещении неоднородного поликристаллического полупроводника может возникать вентиляция фото-ЭДС, на барьерах разного типа. Например, в пленках CdTe , CdSe , ZnS и др. наблюдается так называемый АФН-эффект, заключающийся в возникновении аномально высоких фотонапряжений, превышающих ширину запрещенной зоны

соответствующего полупроводника. Оказывается, что АФН-пленка представляет собой сложную супер многослойную (СМС) систему, состоящую из большого числа микрофотоэлементов ($\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$ и более), каждый из которых связан с какой-либо структурной особенностью пленки, наличием межкристаллических прослоек или зерен, границ блоков и т.д. Кроме вентильной фото-ЭДС, эффект может обуславливаться диффузионной (демберовской) фото-ЭДС, в объеме микрокристалла. В неоднородных СМС структурах фото-ЭДС преимущественно определяется межкристаллитным веществом. По величине фото-ЭДС и фотопроводимости можно определить подвижность носителей заряда. Поликристаллические и аморфные АФН-пленки (Sb_2S_3 и Sb_2Se_3) могут иметь весьма высокие эффективное объемное удельное сопротивление ($\sim 10^{10} \div 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) и низкую подвижность носителей заряда. Это связано с наличием кристаллических включений в аморфной фазе, где локализуются микрогетеропереходы [8].

В результате выполненных исследований АФН-эффект впервые обнаружен в селениде меди и индии, теллуриде кадмия с изовалентными примесями (Cu, Ag и Au), в германии и кремнии (Al, Ga и In), и в некоторых эквимолекулярных соединениях ($\text{PbSeSb}_2\text{Se}_3$ или $\text{PbSSb}_2\text{Se}_4$). В качестве подложки использованы полированные стеклянные, керамические и сегнетоэлектрические пластины. Установлено, что АФН-пленки получают только при косом напылении на подложку. Между испарителем и подложкой в вакуумной камере была установлена шторка, перемещаемая с помощью электромагнитного привода параллельно поверхности источника. Изменяя скорость перемещения шторки и наклон подложки по отношению к оси молекулярного пучка, можно было независимо управлять угловой анизотропией напыления и градиентом толщины пленок, получая, в частности, пленки постоянной толщины при наклонном напылении и клинообразные пленки при напылении по нормали. Пленки обоих типов были нами получены на всех исследованных полупроводниковых материалах. Из экспериментальных результатов следует, что АФН-пленки образуются только при однородном и анизотропном напылении независимо от наличия или отсутствия градиента толщины. Исследования кристаллической структуры показали, что один из факторов возникновения АФН-эффекта, является неоднородность по структуре и по составу. Кроме того, в АФН-пленках как при фотодиффузионном и так при фотовольтаическом механизме выполняется

$$V_{\text{АФН}} = f(V, R_0),$$

т.е. АФН-эффект может возникать только в высокоомных пленках, V -интенсивность падающего света; R_0 – темновое сопротивление пленки.

3. Результаты и их обсуждение

С целью определения области применения и технических возможностей АФН-эффекта мы провели исследования фотоэлектрических, магнитоэлектрических и фотоэлектретных свойств полученных нами АФН-пленках и АФН-элементов на основе сегнетоэлектриков [8].

Проведены экспериментальные и теоретические исследования вольтамперных (ВАХ), люкс-вольтных (ЛВХ) и спектральных (СХ) характеристик АФН-пленок [7].

Основываясь на предложенной в работах [1-5] модели АФН-пленки теллурида кадмия, и учитывая сложность структуры, неоднородность по структуре и по составу других АФН-пленок, обобщая результаты [6], проведены экспериментальные и теоретические исследования вольтамперных (ВАХ), люкс-вольтных (ЛВХ) и спектральных (СХ) характеристик АФН-пленках [7].

Результаты исследований показали, что темновые ВАХ линейны до значений $E=5 \cdot 10^3$ В/см, в более сильных полях вплоть до пробойных ($E=5 \cdot 10^5$ В/см) – сверхлинейны. Линейный участок ВАХ в начале координат зависит от степени шунтирования микро-p-n-переходов. После линейного участка ВАХ имеет сверхлинейную область. Однако, согласно теории когда между переходами смещенных в прямом направлении и смещенных в обратном направлении происходит эффект переноса инжектированных носителей ($\alpha = 1$), после сверхлинейного участка должен наблюдаться снова линейный участок, который нам не удалось обнаружить. Физический смысл суперлинейности ВАХ состоит в том, что пока рекомбинационные потери инжекционного тока в p-n-областях составляют малую долю тока насыщения единичного перехода, практически все прикладываемое к переходам напряжение падает на эмиттерах. При достаточно больших токах основную роль начинает играть обратно смещенный p-n-переход. ВАХ становится сублинейной. На экспериментальной ВАХ переход от сверхлинейного участка к сублинейному не обнаружен.

При освещении образцов ВАХ спрямляется и при высоких освещенностях интенсивности света, становится линейной.

Спрявление ВАХ при больших освещенностях света связано, по-видимому, с уменьшением дифференциального сопротивления обратно смещенных переходов и падения напряжения на последовательном сопротивлении.

Еще одним из важнейших характеристик эффекта аномального фотонапряжения является люкс-вольтовые характеристики (ЛВХ), которые исследованы в работе [7]. Результаты показали, что люкс-вольтовые характеристики халькогенидов при комнатной температуре линейны вплоть до интенсивности света $V=0,35$ Вт/см². При температуре жидкого азота линейность ЛВХ сохраняется лишь до интенсивностей возбуждения $V < 2 \cdot 10^{-2}$ Вт/см². Существенно, что при 77К фотонапряжение резко возрастает в области малых интенсивностей света и уже при $V=10^{-6}$ Вт/см² достигает значений порядка 1В, а дальнейшее увеличение интенсивности возбуждения приводит к росту аномального фотонапряжения вплоть до нескольких десятков тысяч вольт, причем насыщение не наблюдается до $V=0,35$ Вт/см².

Наряду с ЛВХ в пленках различных веществ наблюдается спектральная зависимость с инверсией знака фотонапряжения (рис.1). Результаты измерений спектров аномального фотонапряжения CdTe, Si, Ge, GaAs, Se, GaP и халькогенидных сплавов показали, что АФН-эффект вызывается светом из области собственного поглощения. В рамках спектральных исследований были сняты полярные диаграммы (зависимость фотонапряжения от угла освещения АФН-пленок монохроматическим светом), они дают возможность однозначно определить приходу возникновения АФН в микрофотоэлементах.

Отсутствие инверсии знака на полярных диаграммах, позволяет сделать однозначный вывод о фотовольтаическом (p-n-переходом) механизме АФН-эффекта, если в полярных диаграммах наблюдается инверсия в области коротких монохроматических волн (вблизи угла напыления пленки), то вероятен диффузионный (Демберском) механизм.

Таким образом, комбинация полярных (угловых) и спектральных измерений дает однозначный ответ на вопрос о природе микрофотоэлементов в АФН-пленках.

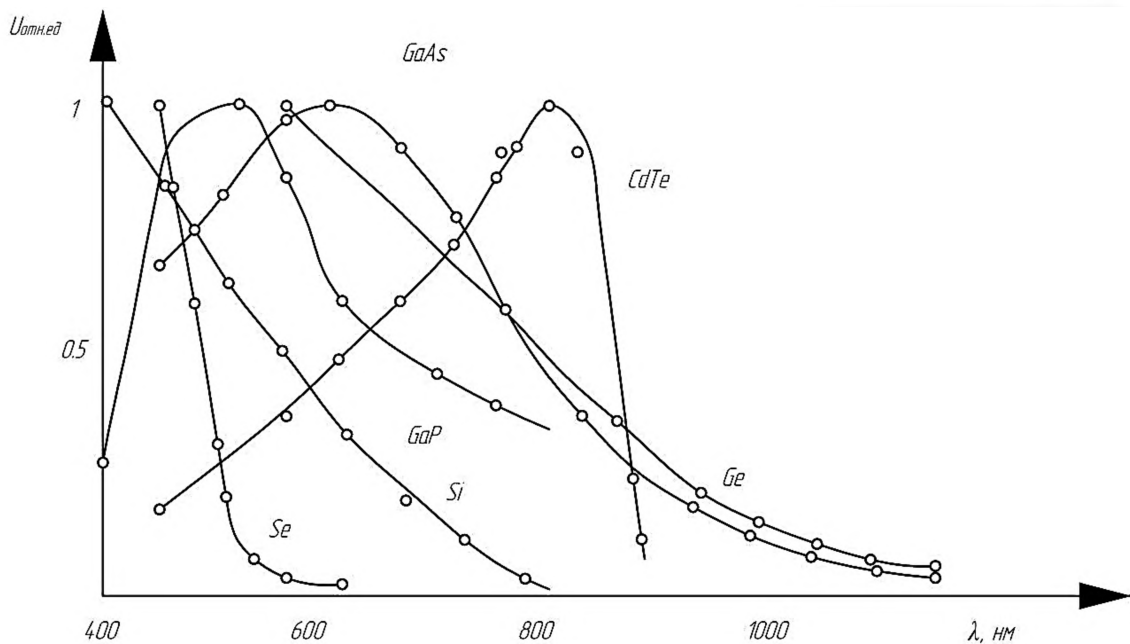


Рис. 1. Типичные спектры фотонапряжения АФН-плёнок: Si, Se, GaAs, Ge, GaP, CdTe;

4. Заключение

Разработан и исследован anomalно большой фотоэлектрический эффект в полупроводниковых пленках, легированных изовалентными примесями.

Использование электрооптических и магнитооптических свойств АФН-элементов позволяет создать оптоэлектронные измерительные трансформаторы напряжения (ОИТН) и тока (ОИТТ). Оптоэлектронные трансформаторы напряжения имеют коэффициент трансформации порядка 1000. АФН-элементы могут служить в качестве первичных преобразователей информации, например, электрических, оптических, неэлектрических величин. Поэтому АФН-элементы могут быть источниками больших электростатических полей.

По результатам исследований (ВАХ, ЛВХ, СХ и электромагнитными измерениями) можно определить все необходимые характеристические параметры и величины для разработки новых оптоэлектронных приборов для контроля и измерения определенных параметров на основе эффекта anomalного фотонапряжения.

Литература

1. Касимахунова А.М., Нурдинова Р.А. «АФН-элементы с двойным лучепреломлением» *Uzbek Journal of Physics*, 2017 Vol.19 (№5), PP 302-306.
2. З.И. Мирзаева., Г.А.Набиев, К.М.Эргашов. Фотоэлектрическое состояние без внешнего поляризирующего поля в однородных полупроводниках, *Фундаментальные и прикладные исследования (ФИП)*, 2008, Т.6, №1-2, с.65-69.
3. Б.Х.Каримов., Фотовольтаический эффект в сегнетоэлектрике SbSi и ZnO, *Фундаментальные и прикладные исследования (ФИП)*, 2008, №1-2, с.70-74.
4. Yang, J. Seidel, S. J. Byrnes, P. Shafer, C.-H. Yang, M. D. Rossell, P. Yu, Y.-H. Chu, Above-bandgap voltages from ferroelectric photovoltaic devices S. Articles published online: 10 January 2010, doi: 10.1038, *nano*.2009, P.451.

5. Lutz, J. Schlangenotto, H.Scheuermann, U.De Doncker “Semiconductor Power De Uices“, Springer Uerlag Berlin Heidelberg 2011, ISBN 978-3-642-11124-2 References 432.

6. Н.Р.Рахимов АФН-пленки и их применение , Новосибирск: СибНИИ, 2005, с.64.

7. Касимахунова А.М., Найманбаев Р., Мамадалиева Л.К., Нурдинова Р.А., Олимов Ш.А. «Исследования некоторых явлений в АФН-структурах с изовалентными примесями для разработки приборов и устройств неразрушающего контроля и измерения», г. Москва, Computational nanotechnology, № 2, 2018 г.с.72-76

8. Kasimakhunova A., Naymanbayev R., Mamadalieva L., Nurdinova R., Olimov Sh., «Research of AHV-effect in films and rystalswith the effect of the double luxurification», г. Москва, Computational nanotechnology, № 2, 2018 г.с.44-48

9.ФридкинВ.М. Фотосегнетоэлектрикиг. Москва, Наука, М.,1979, с.46-54

10 D.Toker, I.Balberg, O.Zelaya-Angel, E.Savir, and O.Millo Size-dependent local conductance properties of CdSe nanocrystal ensembles, Phys. Rev. B73, Published 19 January 2006, P.045317.

11. Dinesh Kumar Development of anomalously high photovoltages in obliquely deposited semiconductor films, 2007 International Workshop on Physics of Semiconductor Devices, 16-20 Dec. 2007, P.9866733.

12. F. Mesa, G. Gordillo, T. Dittrich, K. Ellmer, R. Baier, S. Sadewasser,,Transient surface photoUoltage of p-type Cu₃BiS₃”, Appl. Phys. Lett. 96 (2010) 082113.

13. M. DovratY. GoshenI. PopovJ. JedrzejewskiI. BalbergA. Sa'a, The role of radiative and nonradiative relaxation processes in the generation of light from silicon, June 2005, Pages 3440-3444

14. Б.К. Пономарев, И.А. Корнев, В.Д. Негрий, Г.М. Виздрик, Б.С. Редькин Аномально высокие фотонапряжения в молибдате тербия, Физика твердого тела, 1998, том 40, № 4; с.89-96

15. С.М.Отажонов, Н.Алимов, О.Икромжонов О возможности усиления сцинтиляционного излучения нанокристаллических пленок CdS полученных на селенида цинка, ФПП ФИП PSE, 2008, т. 6, № 1-2, с.74-82.

References

1. Kasimakhunova A.M, Nurdinova R.A. *AFN-jelementy s dvojnym lucheprelomleniem* [The AHV elements with double refraction], Uzbek Jornal of Physics, 2017 Vol.19 (no. 5), pp 302-306.

2. Z. I. Mirzayeva., G. A. Nabiev, K. M. Ergashov *Fotojelektretnoe sostojanie bez vneshnego poljarizujushhego polja v odnorodnyh poluprovodnikah*[Photoelectric state without an external polarizing field in homogeneous semiconductors]*Fundamental'nye i prikladnye issledovanija* [Basic and applied research], 2008. pt. 6, no. 1-2. pp. 65-69. (In Russ.)

3.В. Kh. Karimov., *Fotovol'taicheskij jeffekt v segnetojelektrike SbSi i ZnO* [Photovoltaic effect in SbSi and ZnO ferroelectrics],*Fundamental'nye i prikladnye issledovanija* [Basic and applied research], 2008. pt. 6, no. 1-2. pp. 70-74. (In Russ.)

4. Yang, J. Seidel, S. J. Byrnes, P. Shafer, C-H. Yang, M. D. Rossell, P. Yu, Y.-H. Chu, Above-bandgap voltages from ferroelectric photovoltaic devices S. Articles published online: 10 january 2010, doi: 10.1038, nnano.2009, p.451.

5. Lutz, J. Schlangenotto, H.Scheuermann, U.De Doncker “Semiconductor Power De Uices“, Springer Uerlag Berlin Heidelberg 2011, ISBN 978-3-642-11124-2 References 432.

6. N. R. Rakhimov *AFN-pnenki i ih primenenie*, [AHV-films and their application], Novosibirsk: SibNIA, 2005, p.64. (In Russ.)
 7. Kasimakhunova A.M., Naimanbaev R., Mamadalieva L. K., Nurdinova R. A., Olimov SH. A. *Issledovanija nekotoryh javlenij v AFN-strukturah s izovalentnymi primesjami dlja razrabotki priborov i ustrojstv nerazrushajushhego kontrolja i izmerenija*, [Studies of certain phenomena in AHV structures with isovalent impurities for the development of devices and devices for non-destructive testing and measurement], Moscow, Computational nanotechnology, 2018, no.2, pp.72-76 (In Russ.)
 8. Kasimakhunova A., Naymanbayev R., Mamadalieva L., Nurdinova R., Olimov Sh., «Research of AHV-effect in films and rystals with the effect of the double luxurification», Moscow, Computational nanotechnology, 2018, no. 3, pp.44-48 (In Russ.)
 9. Fridkin V. M. *Fotosegnetoelektriki* [Fotosegnetoelektriks] Moscow, Nauka, Moscow, 1979, pp. 46-54 (In Russ.)
 10. D.Toker, I.Balberg, O.Zelaya-Angel, E.Savir, and O.Millo Size-dependent local conductance properties of CdSe nanocrystal ensembles, Phys. Rev. B73, Published 19 January 2006, P.045317.
 11. Dinesh Kumar Development of anomalously high photovoltages in obliquely deposited semiconductor films, 2007 International Workshop on Physics of Semiconductor Devices, 16-20 Dec. 2007, P.9866733.
 12. F. Mesa, G. Gordillo, T. Dittrich, K. Ellmer, R. Baier, S. Sadewasser,, "Transient surface photoUoltage of p-type Cu₃BiS₃", Appl. Phys. Lett. 96 (2010) 082113.
 13. M. Dovrat Y. Goshen I. Popov J. Jedrzejewski I. Balberg A. Sa'a, The role of radiative and nonradiative relaxation processes in the generation of light from silicon, June 2005, Pages 3440-3444
 14. B. K. Ponomarev, I. A. Kornev, V. D. Negriy, G. M. Vizdrick, B. S. Redkin *Anomal'no vysokie fotonaprjazhenija v molibdate terbija*, [Abnormally high photon stresses in terbium molybdenum], *Fizika tverdogo tela* [Solid state Physics], 1998. pt. 40, no. 4. pp. 89-96. (In Russ.)
 15. S. M. Otazhonov, N. Alimov, and O. Ikromzhonov *O vozmozhnosti usilenija scintiljacionnogo izluchenija nanokristallicheskih plenok SdS poluchennyh na selenida cinka* [On the possibility of enhancing scintillation radiation of nanocrystalline films Using zinc selenide], *Fundamental'nye i prikladnye issledovanija* [Basic and applied research], 2008, vol. 6, no. 1-2, pp. 74-82.
-

The text of the article was translated by Editorial Team of journal of "Semiconductor Physics and Microelectronics". For more information contact: ispm_uz@mail.ru

1. Introduction

In recent years, from the side of developers of microelectronic devices, much attention has been paid to the study of the effect of anomalous photovoltage based on which it is possible to create unique optoelectronic devices for measuring and conversion equipment [1-9]. The results of scientific studies have shown that when a film is illuminated from many semiconductor materials manufactured using special technology, a photovoltaic voltage of the order of several thousand volts is generated (anomalous photovoltage effect). The spectral sensitivity range of these semiconductor materials is quite wide: from the visible up to the infrared region. The study of photoelectric effects and modifications of the technology for producing thin-film structures with the effect of anomalous photovoltaic voltage (APV) is an urgent issue in modern semiconductor physics. The aim of this work is a focused study in the following areas:

1. Improving the technology for producing elements with anomalous photovoltage in the form of semiconductor structures, including from superlayer structures;
2. Control of output parameters and reproducibility of photosensitivity of the studied samples;
3. Investigation of the influence of isovalent impurities and external conditions on the effect of anomalous photovoltage;
4. Investigation of the effect of polarized light on the manifestation of anomalous photovoltage in a magnetic field;
5. Development of a device for producing APV films.

A number of scientific studies have been carried out in this direction. For example, in [11], a hierarchy of the development of abnormally high photoelectric voltages in semiconductor films with a certain angle of deposition is given.

Anomalously high photovoltages in terbium molybdate were studied in [12], and p-type transient surface photovoltage in more complex Cu_3BiS_3 structures was described in [13]. The role of radiation and non-radiative relaxation processes in the generation of light in silicon was determined in [14]. In the works of E.I. Adirovich obtained films of Germany and studied their properties. The films were sprayed at a thickness of $0,1 \mu\text{m}$ at an angle of 45-60 degrees at a substrate temperature of 200-400 ° C. At room temperature, the APV value was 100 V.

Despite the extensive study of APV elements, the issues of photoelectric, photomagnetic, magneto-optical, and other properties of films with the effect of anomalous photovoltaic voltage remain unexplored.

2. Research Methodology

The technological regime for the production of APV films depends on a large number of parameters, such as the temperature of the evaporator and the substrate, the deposition angle, the film thickness, the composition and pressure of the residual gases in the vacuum chamber, and the conditions for the thermal treatment of the films after deposition. In this case, each semiconductor material has its own optimal mode and often small deviations from it even in one of the parameters lead to the disappearance of the APV effect in the manufactured films. Therefore, the development of a technology for the production of APV films from one or another material requires a lot of experimental work, a large number of test sputtering with the sequential variation of several technological parameters, their combinations and finding parameters specific for obtaining the APV effect on films from this semiconductor material.

We also studied the APV effect in films and crystals obtained by doping with isovalent impurities and having the effect of birefringence. A special technique and setup was developed for the production of APV films from various semiconductor materials, which is described in [7]. The technique and the corresponding installation completely ensure heterogeneity in the film in structure and composition. When illuminating an inhomogeneous polycrystalline semiconductor,

photo-EMF ventilation can occur on barriers of various types. For example, in the films CdTe, CdSe, ZnS, etc., the so-called APV effect is observed, which consists in the appearance of anomalously high photovoltages exceeding the band gap of the corresponding semiconductor. It turns out that the APV film is a complex super multilayer (CSM) system consisting of a large number of microphotoelectric elements ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ or more), each of which is associated with some structural feature of the film, the presence of intercrystalline interlayers or grains, boundaries blocks, etc. In addition to the valve photo-EMF, the effect can be caused by diffusion (Demberovskiy) photo-EMF, in the volume of the microcrystal. In inhomogeneous CSM structures, photo-EMF is mainly determined by intergranular matter. The magnitude of the photo-EMF and photoconductivity can determine the mobility of charge carriers. Polycrystalline and amorphous APV films (Sb_2S_3 and Sb_2Se_3) can have very high effective volume resistivity ($\sim 10^{10} \div 10^{11} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$) and low carrier mobility. This is due to the presence of crystalline inclusions in the amorphous phase, where microheterojunctions are localized [8].

As a result of the studies, the APV effect was first detected in copper and indium selenide, cadmium telluride with isovalent impurities (Cu, Ag, and Au), in germanium and silicon (Al, Ga, and In), and in some equimolecular compounds ($\text{PbSeSb}_2\text{Se}_3$ or $\text{PbSSb}_2\text{Se}_4$). Polished glass, ceramic and ferroelectric plates were used as a substrate. It has been established that APV films are obtained only by oblique deposition on a substrate. A curtain was installed between the evaporator and the substrate in the vacuum chamber, which is moved using an electromagnetic drive parallel to the surface of the source. By varying the speed of movement of the curtain and the slope of the substrate with respect to the axis of the molecular beam, it was possible to independently control the angular anisotropy of the deposition and the gradient of the thickness of the films, obtaining, in particular, films of constant thickness under inclined deposition and wedge-shaped films during deposition along the normal. Films of both types were obtained by us on all investigated semiconductor materials. It follows from the experimental results that APV films are formed only with homogeneous and anisotropic sputtering, regardless of the presence or absence of a thickness gradient. Studies of the crystal structure showed that one of the factors in the occurrence of the APV effect is heterogeneity in structure and composition. In addition, in APV films both with the photodiffusion and photovoltaic mechanisms,

$$V_{\text{APV}} = f(B, R_0),$$

those. APV effect can occur only in high-resistance films, B-intensity of incident light; R_0 is the dark resistance of the film.

3. Results and discussion

In order to determine the scope and technical capabilities of the APV effect, we studied the photoelectric, magnetoelectric, and photoelectrical properties of the obtained APV films and APV elements based on ferroelectrics [8].

Experimental and theoretical studies of volt-ampere characteristic (VAC), lux-volt (LVC) and spectral (SC) characteristics of APV films have been performed [7].

Based on the model of the APV film of cadmium telluride proposed in [1–5], and taking into account the complexity of the structure and the heterogeneity in the structure and composition of other AFS films, generalizing the results of [6], experimental and theoretical studies of volt-ampere (VAC), lux -volt (LVC) and spectral (SC) characteristics of APV films [7].

The research results showed that the dark VAC characteristics are linear to values of $E = 5 \cdot 10^3 \text{ V / cm}$, in stronger fields, up to breakdown fields ($E = 5 \cdot 10^5 \text{ V / cm}$), they are superlinear. The linear portion of the VAC at the origin depends on the degree of shunting of the micro-p-n junctions. After a linear section, the VAC has a superlinear region. However, according to the theory, when the effect of transfer of injected carriers ($\alpha = 1$) occurs between the transitions of the forward-shifted and biased in the opposite direction, after the superlinear section, a linear section

should again be observed that we could not detect. The physical meaning of the superlinearity of the VAC is that while the recombination losses of the injection current in the pn regions make up a small fraction of the saturation current of a single transition, almost all the voltage applied to the transitions drops at the emitters. At sufficiently large currents, the reverse role of p-n junctions begins to play the main role. VAC becomes sublinear. In the experimental VAC, no transition from the superlinear to the sublinear region was detected.

When the samples are illuminated, the VAC is rectified and, at high illuminations, the light intensities become linear.

The rectification of the VAC at high light illuminations is apparently associated with a decrease in the differential resistance of the reverse biased transitions and the voltage drop across the series resistance.

One of the most important characteristics of the anomalous photovoltage effect is the lux-volt characteristics (LVC), which were studied in [7]. The results showed that the lux-volt characteristics of chalcogenides at room temperature are linear up to the light intensity $B = 0.35 \text{ W / cm}^2$. At liquid nitrogen temperature, the linearity of the LVC is retained only up to the excitation intensities $B < 2 \cdot 10^{-2} \text{ W / cm}^2$. It is significant that at 77 K the photovoltage sharply increases in the region of low light intensities and reaches values of the order of 1 V already at $B = 10^{-6} \text{ VT / cm}^2$, and a further increase in the excitation intensity leads to an increase in the anomalous photovoltage up to several tens of thousands of volts, and saturation is not observed up to $B = 0.35 \text{ W / cm}^2$.

Along with the LVC in the films of various substances, a spectral dependence is observed with an inverse sign of the photovoltage (fig. 1). The results of measurements of the anomalous photovoltage spectra of CdTe, Si, Ge, GaAs, Se, GaP and chalcogenide alloys showed that the APV effect is caused by light from the intrinsic region absorption. In the framework of spectral studies, polar diagrams were taken (the dependence of the photovoltage on the angle of illumination of the APV films with monochromatic light), they make it possible to unambiguously determine the arrival of the occurrence of APV in microphotoelements.

The absence of sign inversion in the polar diagrams makes it possible to draw an unambiguous conclusion about the photovoltaic (p-n junction) mechanism of the APV effect, if in the polar diagrams an inversion is observed in the region of short monochromatic waves (near the film deposition angle), then the diffusion (Dembers) mechanism is likely.

Thus, a combination of polar (angular) and spectral measurements gives an unambiguous answer to the question about the nature of microphotoelements in APV films.

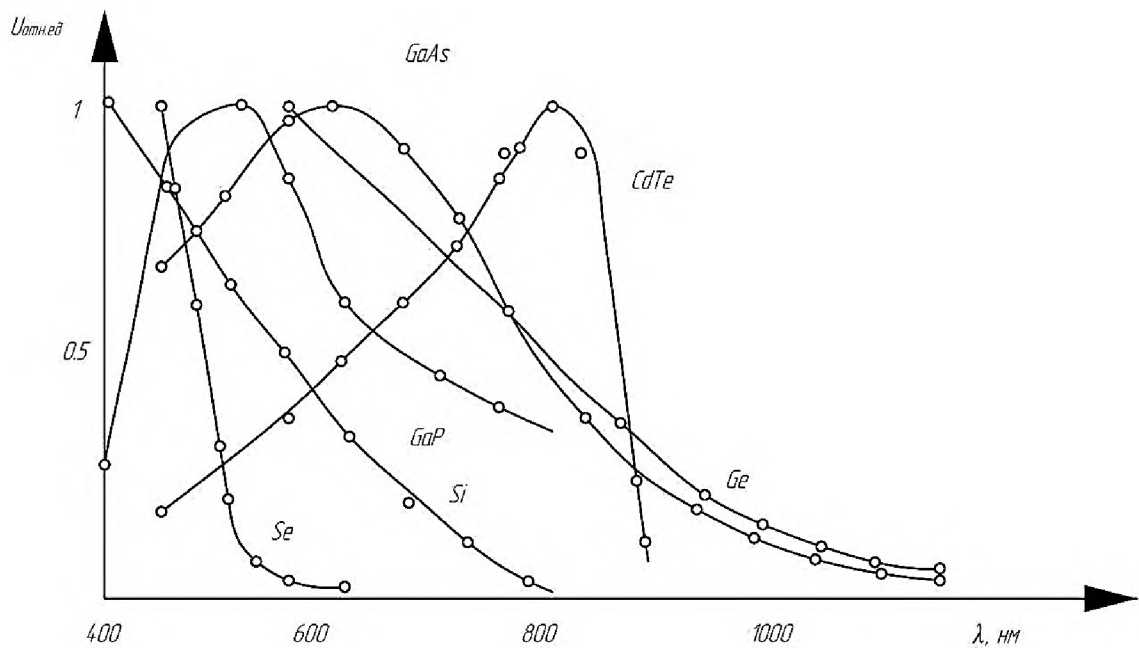


Fig. 1. Typical photovoltage spectra of APV films: Si, Se, CdAs, Ge, CdP, CdTe;

4. Conclusion

An anomalously large photoelectric effect was developed and investigated in semiconductor films doped with isovalent impurities.

The use of the electro-optical and magneto-optical properties of APV elements makes it possible to create optoelectronic measuring transformers for voltage (OMTV) and current (OMTC). Optoelectronic voltage transformers have a transformation coefficient of the order of 1000. APV elements can serve as primary converters of information, for example, electrical, optical, non-electrical quantities. Therefore, APV elements can be sources of large electrostatic fields.

According to the research results (VAC, LVC, SC and electromagnetic measurements), it is possible to determine all the necessary characteristic parameters and quantities for the development of new optoelectronic devices for monitoring and measuring certain parameters based on the anomalous photovoltage effect.