

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОСФИДА ГАЛЛИЯ И ФОТОДИОДЫ ШОТТКИ НА ЕГО ОСНОВЕ

Мелебаев Д., Аннабердиева М.Р., Котыров М., Ташлиева А.М.
 Туркменский государственный университет имени Махтумгули
 744000, проспект Сапармырат Туркменбаши 31, Ашхабад, Туркменистан
 DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2021.2.65.393

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрены оптические и люминесцентные свойства фосфида галлия (GaP) и спектральные характеристики GaP p-n, m-s-структур для изучения энергетической зонной структуры GaP. Исходя из литературных данных построена зависимость коэффициента поглощения вблизи и выше края фундаментального поглощения от энергии фотона $h\nu=2-6$ эВ в GaP (300 K) для обсуждения полученных экспериментальных результатов.

Приводятся результаты изучения спектров fotocувствительности барьеров Шоттки Au-n-GaP, Au-p-GaP, изготовленных методом химического осаждения нанослоя Au (~15 нм) на поверхности GaP.

Сопоставлением спектра поглощения GaP со спектрами фототока Au-n-GaP и Au-p-GaP структур в видимой и ультрафиолетовой (УФ) области спектра установлено, что обычно фототок (I_{f_0}) в m-s-структурах при $h\nu$ меньшей энергии прямых оптических переходов (E_0) экспоненциально увеличивается с ростом $h\nu$, при $h\nu > E_0$ он возрастает сначала линейно, а затем – сублинейно. Линейный участок в спектре начинается при $h\nu = E_0$, что позволяет определить E_0 непосредственно из спектра I_{f_0} m-s-структуры при освещении m-s-перехода через нанослой Au. Использование этой методики определена E_0 , для GaP n- и p-типа она составила 2,80-2,83 эВ (300 K). Фотоэлектрическим измерением GaP m-s-структур по методике Спитцера и Мида $I_{f_0} \approx (h\nu - q\phi_{B_0})^2$ определена ширина запрещенной зоны (E_g) GaP, она составила 2,26 эВ (300 K) как для n-, так и для p-типа.

В данной работе впервые исследован спектр fotocувствительности Au-p-GaP в широкой области энергий фотонов и получены новые данные об энергетической зонной структуре GaP и сделан вывод о возможности использования Au-p-GaP структур для создания высокоэффективных фотоприёмников УФ излучения.

ABSTRACT

In this paper, the optical and luminescent properties of gallium phosphide (GaP) and spectral characteristics of GaP p-n, m-s structures for studying the energy-band structure of GaP were considered. Based on literature data, the absorption coefficient dependence was constructed near and above the fundamental absorption edge of the photon energy $h\nu=2-6$ eV in GaP (300 K) to discuss the obtained experimental results.

The results of the photosensitivity spectra study of Au-n-GaP, Au-p-GaP Schottky barriers are presented, which were produced by the chemical deposition of Au nanoscale (~15 nm) on the GaP surface.

By comparing the absorption spectrum of GaP with the photocurrent spectra of Au-n-GaP and Au-p-GaP structures in the visible and ultraviolet (UV) region of the spectrum, it has been established that usually the photocurrent (I_{f_0}) in m-s structures increases exponentially with the growth of $h\nu$, at $h\nu > E_0$ it increases first linearly and then sublinearly. The linear section in the spectrum begins at $h\nu = E_0$, which makes it possible to determine E_0 directly from the spectrum of the m-s structure when the m-s junction is illuminated through the Au nanolayer. Using this technique, E_0 was determined, for GaP n- and p-type it was 2.80-2.83 eV (300 K). Photoelectric measurement of GaP m-s structures by Spitzer and Mead method determined the width of the band gap (E_g) of GaP, it was 2.26 eV (300 K) for both n- and p-type.

In this paper, for the first time was investigated the photosensitivity spectrum of Au-p-GaP in a wide range of photon energies and new data on the GaP energy-band structure were obtained, and also it was concluded that Au-p-GaP structures can be used to make UV photoreceivers with high-performance.

Ключевые слова: зонная структура, поглощение, фосфид галлия, p-n-структура, fotocувствительность, m-s-структура, ширина запрещенной зоны, высота барьера, золото.

Keywords: energy-band structure, absorption, gallium phosphide, p-n structure, band-gap width, barrier height, gold.

Введение

Ведущие научные центры мира в последние годы усиленно занимаются исследованием свойств широкозонных полупроводников A^3B^5 и барьерных структур на их основе для создания эффективных электронных и оптоэлектронных полупроводниковых приборов [1-5]. Подавляющее большинство из них основано на гетероструктурах,

состоящих из толстых слоёв GaN и тонких (единицы или десятки нанометров) слоев AlGaN и InGaN с содержанием алюминия и индия не более 30%. В отдельных случаях в конструкции приборных структур содержатся слои AlN (зародышевые, буферные или барьерные), также, однако, небольшой толщины. В тоже время введение в конструкцию прибора толстых

(единицы микрон) слоёв AlN в качестве изолирующих буферных слоёв или широкозонных окон для ввода и вывода излучения со стороны подложек, позволяет улучшать параметры уже существующих приборов и создать приборы нового типа [6-8]. В работе [9] представлен обзор свойств полупроводниковых материалов с широкой запрещённой зоной, таких как алмаз, алмазоподобные углеродные плёнки, SiC, GaP, GaN и AlGaIn/GaN, которые используются в квантовых, оптоэлектронных и микроволновом применении; обсуждаются самые последние достижения и перспективы развития на основе экспериментальных и теоретических результатов, полученных для полупроводниковых приборов с широкой запрещённой зоной.

В последние годы в связи с требованиями медицины, биологии, военной техники и проблемой «озоновой дыры» сформировалась ультрафиолетовая электроника. Её особенностью является необходимость регистрировать слабые, но сильно влияющие на жизнедеятельность человека сигналы на фоне мощного видимого и инфракрасного излучения. Основой ультрафиолетовой фотоэлектроники являются: p-n-структуры на основе Si, барьеры Шоттки на основе GaP, p-n-структуры и барьеры Шоттки на основе GaN и AlGaIn (солнечно-слепые приборы), SiC-структуры с потенциальными барьерами (высокотемпературные приборы), ZnO- и ZnS-фоторезисторы и диоды Шоттки [2]. Для регистрации ультрафиолетового излучения более перспективны широкозонные полупроводниковые структуры с потенциальными барьерами, в частности с барьером Шоттки на основе Au-окисел-p-GaP наноструктур, из-за высокой фоточувствительности в коротковолновой области спектра. В этих структурах при энергии фотонов $h\nu > 5$ эВ начинается процесс лавинного умножения носителей заряда и происходит резкий рост коротковолновой фоточувствительности. Типичные значения токовой фоточувствительности вблизи $h\nu \approx 6,0$ эВ достигает $\sim 0,25$ А/Вт (300 К) в присутствии внутреннего электрического поля ($E_{m_0} \approx 2 \cdot 10^5$ В/см) [10].

Эксперимент

Среди широкозонных полупроводников A^3B^5 особое место занимают бинарные полупроводники фосфида галлия (GaP). Одни из первых светодиодов красного и зелёного излучения были созданы на основе GaP [5,11,12] и накопленный с тех пор опыт исследований GaP открыл путь для дальнейшего усовершенствования светоизлучающих диодов и фотодиодов в коротковолновой области спектра и создания источников ультрафиолетового излучения на основе нитридов (бинарных полупроводниковых соединений InN, GaN, AlN и твёрдых растворов $Al_xIn_{1-x}N$, $Al_xGa_{1-x}N$).

Эпитаксиальные GaP-технологии, разработанные к настоящему времени в ряде научных центров позволяют получить высококачественные эпитаксиальные слои, которые могли бы служить основой для создания силовых электронных приборов и фотоэлектронных преобразующих диодных структур различного назначения, работоспособных в температурном диапазоне до 400°C . Метод газовой и жидкофазной эпитаксии, наряду с молекулярно-лучевой эпитаксией [41], используется для получения высококачественных слоёв GaP и структур на их основе [13,14].

Настоящая работа посвящена изучению на основе литературных данных оптических свойств GaP, p-n-переходов и барьеров Шоттки на его основе; исследованию спектров фоточувствительности поверхностно-барьерных структур Au-n-GaP и Au-p-GaP с целью определения фундаментальных параметров фосфида галлия и сравнения полученных в ходе эксперимента результатов с коэффициентом поглощения света в GaP.

Для создания оптоэлектронных приборов (фотодиодов, светодиодов, лазеров) и других дискретных приборов необходимо знать оптические параметры и зонную структуру полупроводниковых материалов [15-18]. Одним из хорошо изученных полупроводников и разработанным технологически в промышленном масштабе является GaP. Некоторые свойства GaP представлены в таблице.

Таблица

Свойства GaP при комнатной температуре [5]

Величина	Обозначение	GaP	Единица измерения
Структура кристалла		Z	—
Прямозонный (D)/непрямозонный (I)		I	—
Постоянная решетки	a_0	5,4512	Å
Ширина запрещенной зоны	E_g	2,26	эВ
Концентрация собственных носителей зарядов	n_i	$1,6 \cdot 10^0$	см^{-3}
Эффективная ПС на краю ЗП	N_c	$1,9 \cdot 10^{19}$	см^{-3}
Эффективная ПС на краю ВЗ	N_v	$1,2 \cdot 10^{19}$	см^{-3}
Подвижность электронов	μ_n	110	$\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
Подвижность дырок	μ_p	75	$\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
Коэффициент диффузии электронов	D_n	2,8	$\text{см}^2/\text{с}$
Коэффициент диффузии дырок	D_p	1,9	$\text{см}^2/\text{с}$
Электронное сродство	χ	3,8	В
Время жизни неосновных носителей	τ	10^{-6}	с

Эффективная масса электрона (ПС)	m_e^*	0,82 m_e	–
Эффективная масса тяжелой дырки (ПС)	m_{hh}^*	0,60 m_e	–
Относительная диэлектрическая постоянная	ϵ_r	11,1	–
Показатель преломления	n	3,0	–
Коэффициент поглощения вблизи E_g	α	10^3	$см^{-1}$

* Z – сфалерит, ПС – плотность состояний, ЗП – зона проводимости, ВЗ – валентная зона.

Большое внимание изучению энергетической зонной структуры и энергии электронных переходов между особыми точками в зоне

Бриллюэна для GaP посвящены многие работы [15,18,20-30].

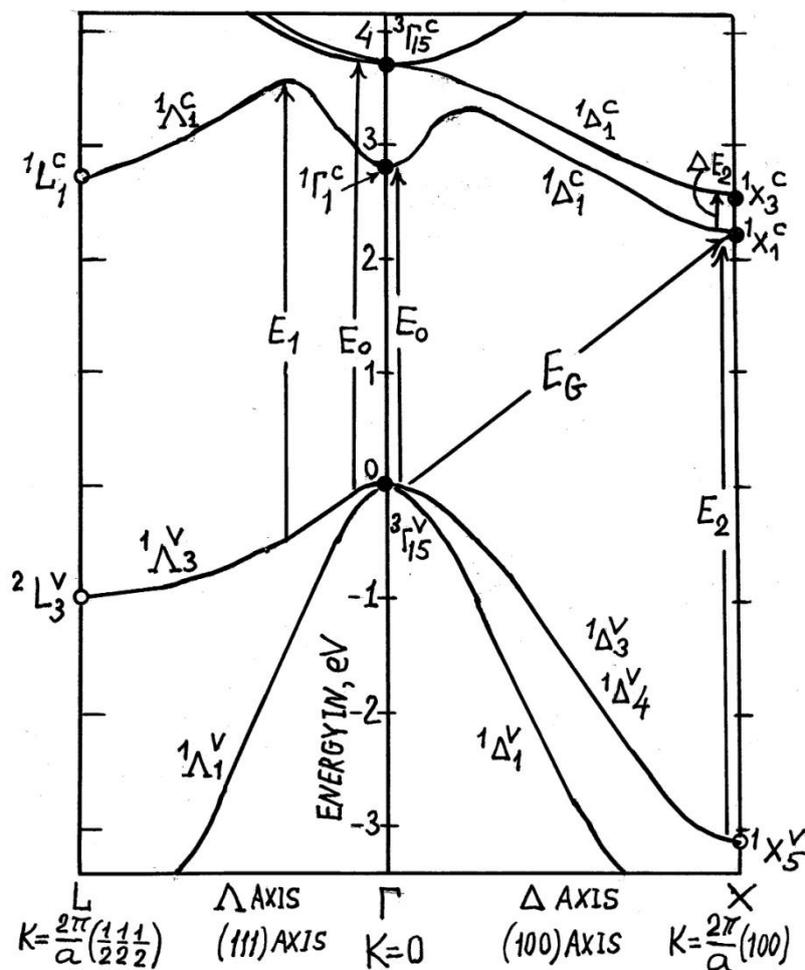


Рис. 1. Зонная структура фосфида галлия [29].
 Параметры зонной структуры приведены в работах [15,16,29,30].

Особенностью зонной структуры GaP является то, что абсолютный максимум валентной зоны расположен в центре зоны Бриллюэна при $k=0$ в точке с симметрией Γ_{15} , а абсолютный минимум зоны проводимости – вблизи края зоны Бриллюэна в точке с симметрией X_1 (рис.1). Таким образом, краевые межзонные переходы в GaP непрямые, они запрещены в первом порядке теории возмущений. Неизвестно, насколько смещён максимум валентной зоны от точки $k=0$ вследствие отсутствия инверсионной симметрии [30]. Исходя из этой теории нельзя сказать, удалён ли и насколько от

края зоны Бриллюэна минимум E_c , а это существенно для знания числа эквивалентных минимумов ($k=3$ или $k=6$) [30]. (В тех случаях, когда число минимумов несущественно, можно считать особую точку X расположенной на границе зоны Бриллюэна [31^a]).

Экспериментальное изучение энергетической зонной структуры GaP приводится на основе исследований спектров поглощения [26, 32^a, 33^a,33,34^a], спектров отражения [29,35^a], спектра вентильного фотоэффекта [27,28,36^a,70], эффекта Франца-Келдыша [34,35], электроотражения [36].

Оптические измерения являются наиболее подходящими при определении зонной структуры полупроводников. Электронные переходы, вызванные фотонами, могут происходить между различными зонами, что позволяет определять ширину запрещенной зоны (E_g). Если же они происходят в пределах одной зоны, то возникает поглощение на свободных носителях. Вблизи края поглощения, где значения $(h\nu - E_g)$ сравнимы с энергией связи экситона, нужно учитывать кулоновское взаимодействие между свободной дыркой и электроном. Для $h\nu < E_g$ поглощение происходит непрерывно из-за наличия возбужденных состояний экситона. При $h\nu \gg E_g$ в процессах поглощения участвуют зоны с более

высокой энергией и на коэффициент поглощения может сказываться сложная зонная структура (рис.1).

Спитцер и др. [26^a] измеряли спектр поглощения фосфида галлия при комнатной температуре в интервале 2,1÷2,8 эВ. Полученные результаты они объяснили непрямыми переходами вблизи порога (2,20 эВ) и сменяющими их прямыми переходами (E_0) при более высоких энергиях. Зависимость коэффициента поглощения от энергии квантов возбуждающего света для прямых переходов в зоне проводимости фосфида галлия при отсутствии вырождения электронов имеет вид [34^a]:

$$K_{13}(\omega) = \frac{4\pi^{3/2}\hbar e^2 f_{13} n}{3ncm(kT)^{3/2}} \left(\frac{\Delta_{13}}{\hbar\omega}\right) \frac{m^*}{m_1^*} (\hbar\omega - \Delta_{13})^{1/2} \exp\left[-\frac{m^*(\hbar\omega - \Delta_{13})}{m_1^* kT}\right]. \quad (1)$$

Здесь f_{13} —сила осциллятора для переходов с первой в третью подзону, энергетический зазор между которыми равен Δ_{13} ; m_1^* —эффективная масса электрона в i -й подзоне, $m^* = m_1^* m_3^* (m_1^* + m_3^*)^{-1}$. Сравнение уравнения (1) с экспериментальной кривой поглощения показывает их удовлетворительное соответствие [34^a]. Если же предположить, что между ветвями зоны проходят не прямые переходы, то для данного конкретного случая рассчитанная полоса поглощения сильно отличается от результатов эксперимента.

В квантовой теории поглощение и испускание инфракрасного излучения представляется как процесс взаимодействия фотонов и фононов. Фундаментальным полосам соответствует однофотонный процесс: поглощается квант света – возникает один фонон. Из законов сохранения энергии и импульса следует, что таким фононом может быть только либо LO–, либо TO–фонон, поскольку акустические фононы при частотах колебаний, соответствующих инфракрасному спектру, обладают импульсом, значительно большим, чем кванты света [16].

Фотоны, имеющие энергию большую, чем ширина запрещенной зоны E_g , способны возбуждать электроны из валентной зоны в зону проводимости. Коэффициент поглощения для таких фотонов обычно порядка 10^4 см^{-1} . Спектр поглощения фосфида галлия при комнатной температуре в интервале энергий фотонов:

$h\nu = 2,1 \div 2,8 \text{ эВ}$ [26]; $h\nu = 2,3 \div 3,1 \text{ эВ}$ [38]; $h\nu = 2,3 \div 6,0 \text{ эВ}$ [20] приведены в указанных работах. Использование литературных данных построен график коэффициента поглощения для GaP в интервале $h\nu = 2,2 \div 6,0 \text{ эВ}$ при 300 К (рис.2).

Оптические и люминесцентные свойства фосфида галлия рассмотрены во многих работах и показаны два типа оптических переходов [29,30] (рис.1). Когда волновой вектор $k=0$ полупроводника имеет «прямую зонную структуру», фосфид галлия обладает двумя типами переходов, как прямыми переходами (E_0), так и непрямыми переходами (E_g), но в самом деле GaP считается непрямозонным полупроводником. Коэффициенты поглощения света в таких полупроводниках как GaP, показаны на рис. 2.

Фосфид галлия оказался полупроводником, весьма удобным для оптических исследований. Ряд явлений, в первую очередь связанных с люминесценцией фосфида галлия, происходящей с участием примесных центров, был впервые обнаружен и подробно исследован именно в этом материале [30,37^a]. Поэтому полученных данных об оптических, люминесцентных и фотоэлектрических свойствах фосфида галлия могут оказаться весьма полезными при анализе рекомбинационного излучения различных широкозонных полупроводниковых материалов и структур на их основе [5].

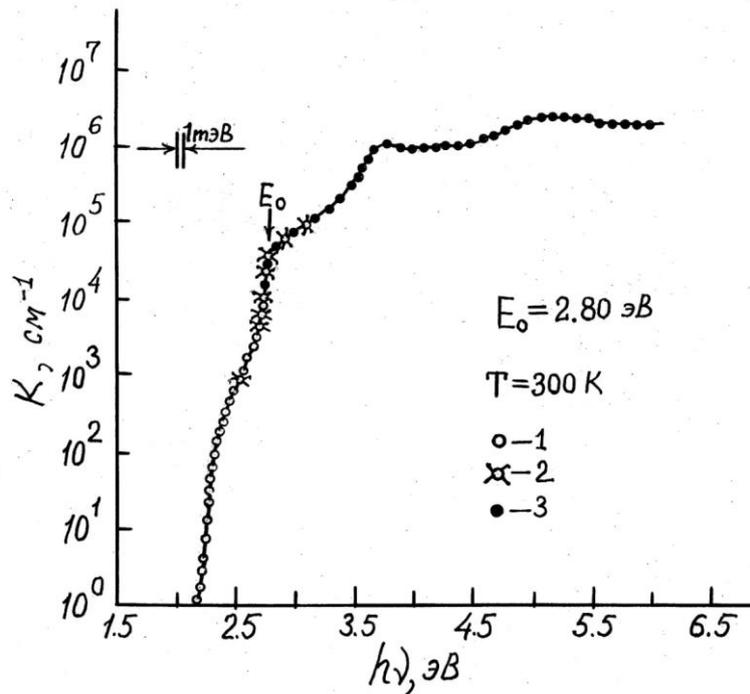


Рис. 2. Коэффициент поглощения света в фосфиде галлия. Экспериментальные данные из работ: 1 – [26], 2 – [38], 3 – [20].

Для исследования зонных структур полупроводников используются различные методы. Мид и Спитцер [27,53] предложили напылять металлическую плёнку на поверхность полупроводника и наблюдать фотовольтаический эффект. Фото-ЭДС пропорциональна оптическому поглощению, если область, обеднённая носителями, и диффузионная длина неосновных носителей в получающемся переходе гораздо меньше глубины проникновения света. При этом устраняются трудности, связанные с приготовлением очень тонких образцов, необходимых в экспериментах по поглощению. Использование вентильного фотоэффекта с измерением спектра фототока структур металл (m)-полупроводник (s), Мид и Спитцер [28,54] впервые исследовали зонную структуру полупроводников с измерением ширины запрещённой зоны, ими было также показано преимущество фотоэлектрического метода при разделении прямых и непрямых переходов. Впоследствии, в монографии Зи [54] и в других работах [38^a,39^a,63,64], было показано, что фотоэлектрический метод измерения является самым точным методом определения высоты барьера поверхностно-барьерных m-s-структур. В дальнейшем для определения зонных параметров как варизонных, так и гомозонных полупроводников, был предложен модернизированный контактный фотоэлектрический метод [69,70].

Ширина запрещённой зоны E_g , один из наиболее важных параметров, определяющих спектры излучения и другие оптические свойства, исследовалась во многих работах [30,37,39]. Наиболее надёжные данные в широком интервале температур получены из спектров поглощения [3,24,40,41] и согласуются в пределах ошибки опыта и методики обработки измерений [30].

В работе Варшни [42] было предложено эмпирическое приближение для зависимости $E_g(T)$ во всём интервале изменения T для различных полупроводников. Оно качественно учитывает изменение E_g с T не только из-за теплового расширения, но и вследствие электронно-фононного взаимодействия: $E_g(T) = E_g(0^\circ\text{K}) - \alpha T^2 / (T + \Theta)$, где Θ – температура порядка дебаевской температуры Θ_D , а α – подбираемая константа. В работе [24] показано, что данная формула при $\Theta = 460\text{K}$, $\alpha = 6,2 \cdot 10^{-4} (\text{°K})^{-1}$ выполняется для GaP вплоть до 1270 K (рис.3), причём значения равны: $E_g = 2,338 \pm 0,001 \text{ eV}$;
 $E_g = 2,338 - 6,2 \cdot 10^{-4} T^2 / (T + 460)$

Так, данные о крае низкотемпературного внутреннего поглощения GaP, полученные из различных кристаллов данного полупроводника, толщиной от $\sim 0,35 \text{ мк}$ и $\sim 0,6 \text{ см}$ при 25 K приведены в работе [32]. Температурные зависимости низкоэнергетических прямых и непрямых энергетических зон прослеживались до 300 K.

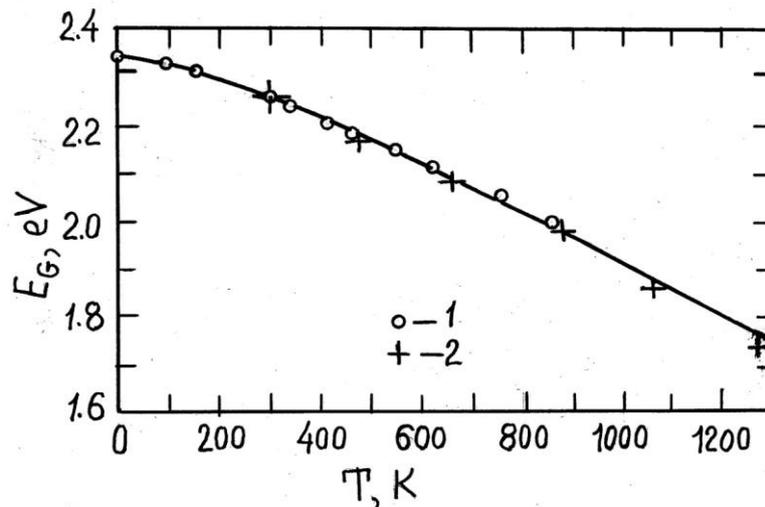


Рис. 3. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны (E_g) GaP [24]. 1 – [43], 2 – [24].

Оптические свойства p-n-структур на основе GaP, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, подробно рассмотрены в работе [12]. Модель, позволяющая оценить плотность дислокаций в области объёмного заряда p-n-перехода приведена в работе [44], для p-n-структур из GaP на подложках GaP плотность дислокаций составила 10^5 – 10^6 см⁻².

При пропускании тока через диод на основе GaP в прямом направлении наблюдается электролюминисценция (ЭЛ): при небольшой примеси Zn в GaP в случае p-n-перехода наблюдается зелёная ЭЛ ($\lambda_{\max}=0,565$ мк), присутствие Zn и O₂ обнаруживает красную ЭЛ ($\lambda_{\max}=0,71$ и $0,945$ мк). В этом случае энергетический переход, отвечающий за ЭЛ находится или между двумя уровнями Sn и Au-Zn электродов, или между зоной и одним из уровней [45-47]. Изучение влияния доноров и акцепторов на оптические свойства GaP приведено в работах [22,23,25,48-50].

Исследование спектрального распределения фотолюминисценции в n-GaP, p-GaP, легированном Zn, p-n-перехода в GaP в зависимости от температуры и уровня инжекции рассмотрено в работе [51]. При этом было выяснено, что спектральное распределение рекомбинационного излучения не зависит от механизма возбуждения. Помимо максимумов ~1,8 и 2,0 эВ в p-n-переходах, имеются максимумы ~2,4 и 2,8 эВ, связанные с прямыми и непрямыми переходами из зоны в зону, что было выяснено при измерении спектральной зависимости фото-ЭДС. При комнатной температуре напряжение холостого хода в фотоэлементах достигало 1,2 В.

В p-n-переходах в GaP [52] фототок состоит из тока носителей, генерированных светом в толще перехода и на расстоянии диффузионной длины от него. Величина фототока определяет величину диффузионной длины. Размножение носителей тока в p-n-переходах в GaP качественно и количественно подобно этому явлению в кремнии.

Технология поверхностно-барьерных диодов Шоттки включает в себя подготовку поверхности полупроводника (полировка, травление, очистка), создание омического контакта вплавлением тонких слоёв металла в полупроводник [55] и создание барьерного контакта либо напылением металла на сколотую в высоком вакууме поверхность полупроводника [27], либо электрохимическим [8] или низкотемпературным химическим [55,57] осаждением металла на химически обработанную поверхность полупроводника.

Изучение наноструктурированных фотодиодов Шоттки впервые было начато в 1976 году во главе полупроводникового твёрдого раствора GaAs_{1-x}P_x [57]. Использованием низкотемпературной химической нанотехнологии был разработан фотоприёмник видимого и ультрафиолетового излучения на основе Au-GaAs_{1-x}P_x поверхностно-барьерных структур. При $x=0,4$ GaAs_{1-x}P_x поверхностно-барьерные структуры имеют высокую фоточувствительность (вплоть до 0,4 эл./фот.) в видимой и ультрафиолетовой областях спектра и практически не чувствительны к инфракрасному излучению. Максимальная эффективность достигается при толщине слоя золота около 15 нм (рис.4) [57]. Данная методика была использована в дальнейшем для создания высокоэффективных фотодиодов Шоттки на основе GaP [10,58,59].

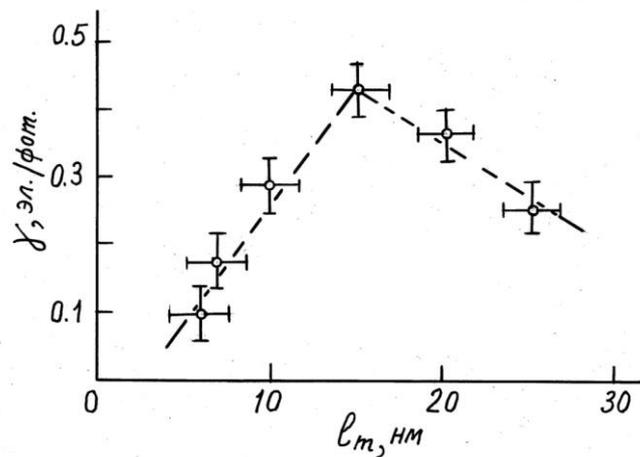


Рис. 4. Зависимость квантовой эффективности Au-GaAs_{1-x}P_x от толщины слоя Au (T=300 K) [57].

В работе [60] проведён широкий комплекс работ по разработке и исследованию высокочувствительных фотоприёмников с барьером Шоттки на основе GaP, GaP_xAs_{1-x} и GaAs. Исследованием электрофизических характеристик Au-n-GaP показано, что они близки к идеальному барьеру Шоттки и обладают фоточувствительностью в области 200 – 510 нм. Максимальная фоточувствительность наблюдается при (430 – 440) нм. Токовая чувствительность при λ_{max} достигает до значения 0,15 А/Вт. При $\lambda=254$ нм токовая чувствительность равна 0,04 А/Вт (рис. 5).

Использование GaP в фотоэлектропреобразователях для УФ области спектра основано на том, что, хотя GaP имеет $E_g = 2,26$ эВ, что значительно меньше энергии квантов УФ излучения, этот полупроводник непрямозонный и имеет пороговую энергию прямых оптических переходов с высоким коэффициентом поглощения света ($E_0 = 2,8$ эВ), достаточно близкую к границе УФ области спектра [58,60,62].

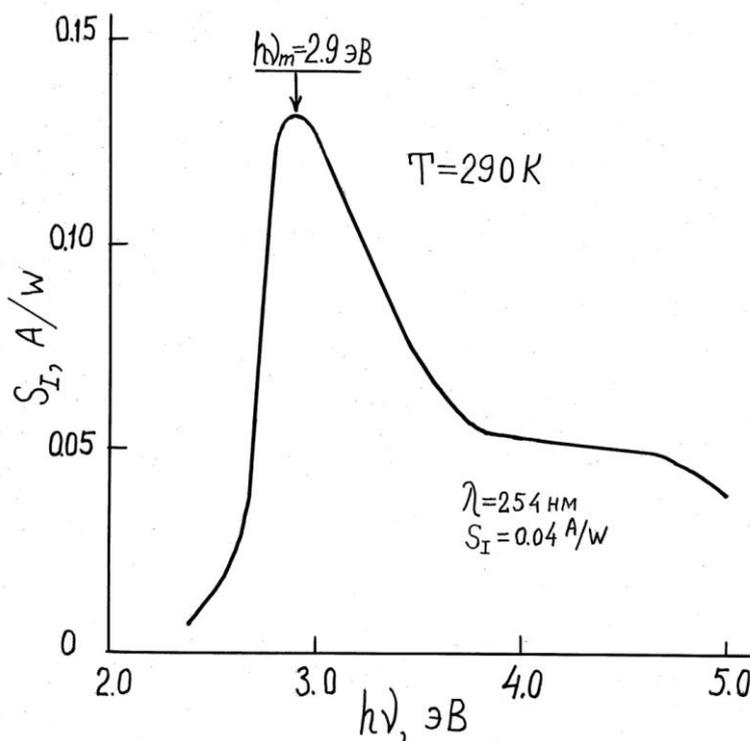


Рис. 5. Спектральная характеристика фотодиода на основе GaP [60].

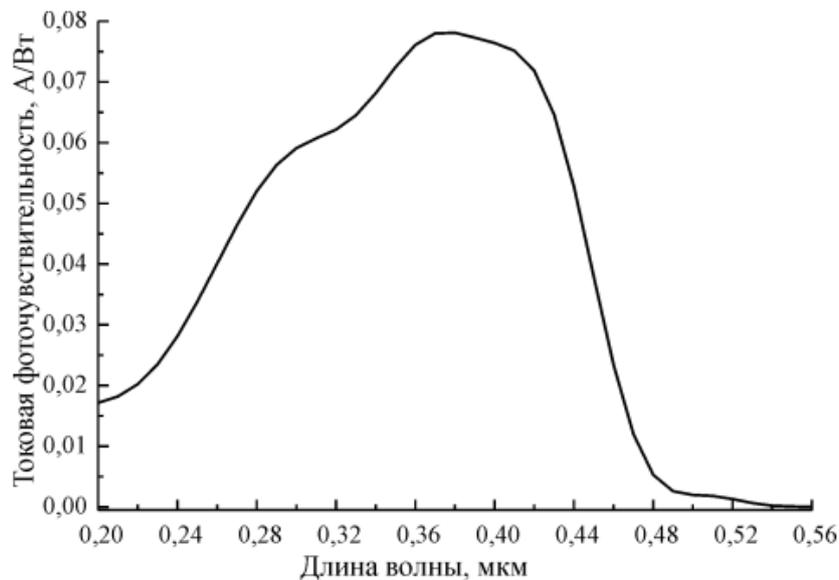


Рис. 6. Спектр фоточувствительности фотоэлектронпреобразователя с барьером Шоттки Au-n-GaP [63]. $T=300\text{ K}$.

Спектральная область фотодиодов Шоттки Au-GaP [38,63] составляла 0,2-0,55 мкм (рис. 6) с максимумом при $\sim 0,4$ мкм. Величина S_1 достигала 0,12 А/Вт в максимуме спектра и 0,03 А/Вт

при 0,254 мкм. При энергиях фотонов $\hbar\omega > 3,7\text{ эВ}$ коэффициент поглощения света в GaP превышает $6 \cdot 10^5\text{ см}^{-1}$ [64]. Малая потеря фоточувствительности в УФ области спектра связана с неполным разделением неравновесных

носителей заряда [63]. Использование ИТО (смесь SnO_2 и In_2O_3) вместо Au [65] приводит к тому, что токовая монохроматическая чувствительность к излучению с длиной волны 250 нм у такой структуры достигает 0,1- 0,12 А/Вт. Интересно отметить, что фотоотклик диодов Au-GaP, изготовленных в системе масляной диффузии, в пределах экспериментальной ошибки не изменился наличием внешних загрязнений [66].

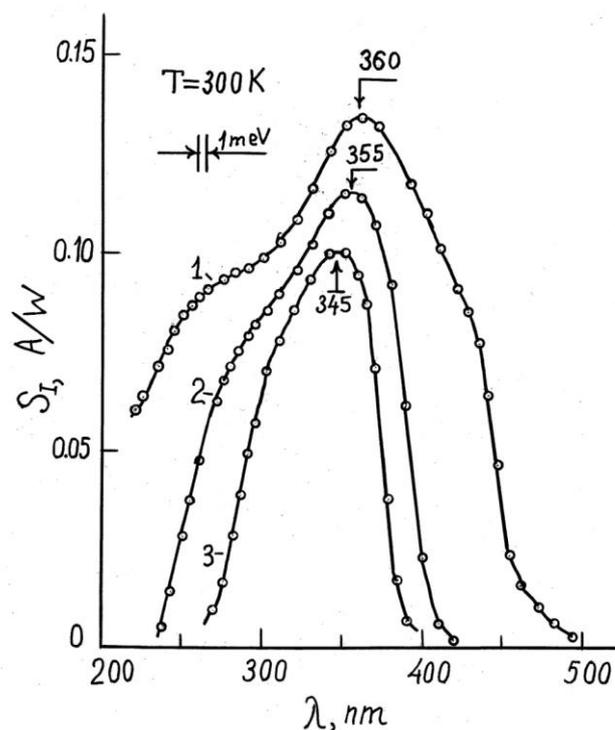


Рис. 7. Фоточувствительность Au-окисел-n-GaP: 1-отсутствие УФС; 2-УФС-5; 3-УФС-2 [59].

Комплектация GaP фотодиодов УФС-2 светофильтром делает их спектр близким к спектру солнечного УФ излучения. Спектры токовой фоточувствительности (S_1) Au-окисел-n-GaP фотоприёмника без светофильтра (1), со светофильтром УФС-5 (2) и со светофильтром УФС-2 (3) представлены на рис. 7. Высокая фоточувствительность (ФЧ) прибора в УФ области спектра обеспечивается большим значением пороговой энергии прямых оптических переходов GaP ($E_0=2,8$ эВ, 300 К) [59].

При этом световая чувствительность фотодиодов на основе GaP при температуре $(-190\div 300)^\circ\text{C}$ в области $(250\div 410)$ нм остаётся практически постоянной [60].

Результаты изучения влияния коэффициента идеальности β (толщины промежуточного слоя δ) на коротковолновую фоточувствительность GaP структур (рис. 8) приведены в работе [61]. Создание поверхностно-барьерных

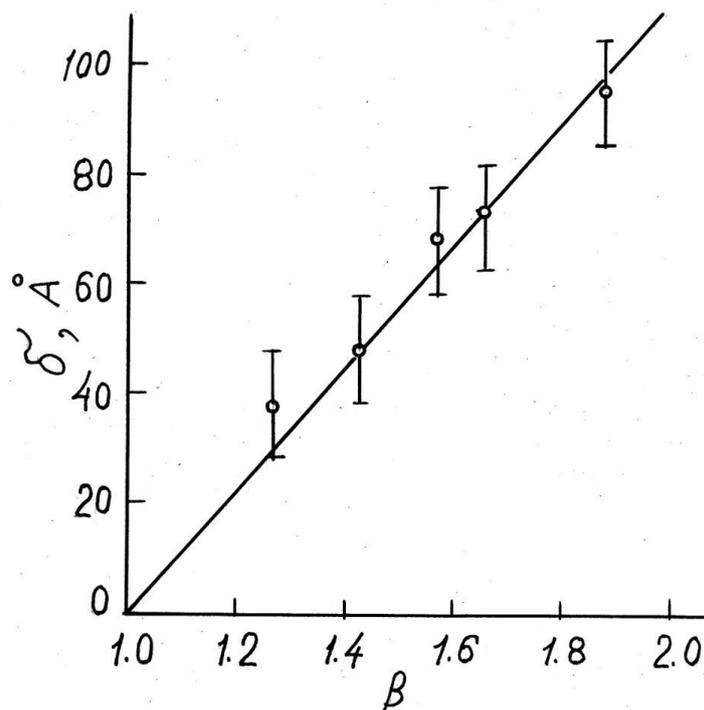


Рис. 8. Зависимость толщины диэлектрического слоя δ в структурах GaP от их коэффициента идеальности β [61].
структур металл-полупроводник на основе GaP с тонким промежуточным слоем ($\delta=30-60$ Å) между полупроводником и металлом позволяет существенно повысить их фоточувствительность в ультрафиолетовой области спектра (рис. 9).

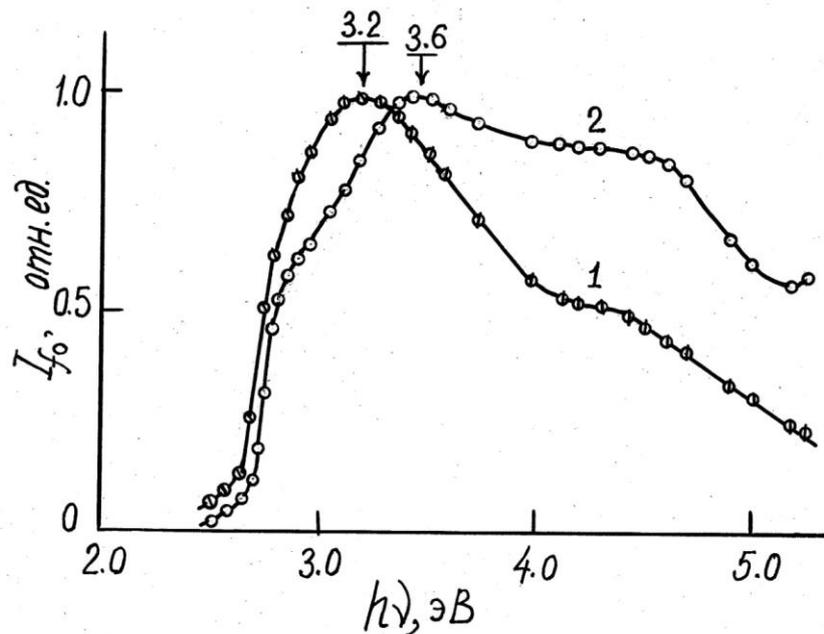


Рис. 9. Спектры фототока Au-n-GaP с разными коэффициентами идеальности β ($1 - \beta = 1,07$
 $2 - \beta = 1,44$) [61].

Спектры фоточувствительности диодов Шоттки Au-GaP в относительных единицах при энергии фотонов $h\nu < 2,8$ эВ приведены в работах [62,66] и определены высоты поверхностного потенциального барьера. Исследования спектров квантовой эффективности фотоприёмников Au-n-GaP-n⁺-GaP установили, что с уменьшением плотности состояний на поверхности фосфида галлия от $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$ до $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$ квантовая эффективность фотоприёмника в области энергии 3-5 эВ возрастает в 3-4 раза [67].

Измерение фоточувствительности структур Au-n-GaP при обратном смещении выполнено в работе [64]. При $h\nu \cong E_g$ наблюдался рост отношения $I_f(U)/I_f(0)$ с возрастанием энергии фотонов, что связано с началом генерации носителей тока в полупроводнике и обусловлено изменением толщины слоя объёмного заряда W под влиянием напряжения U . С дальнейшим ростом $h\nu$, вплоть до начала прямых переходов в GaP, отношение $I_f(U)/I_f(0)$ слабо зависело от энергии фотонов из-за однородности генерации электронно-дырочных пар в фотоактивном слое (слабое поглощение света). На фоне такого изменения в области $h\nu = 2,2-2,3$ эВ при 300 К и 2,3-2,4 эВ при 80 К наблюдалась структура, связанная с эффектом Франца-Кельдыша для непрямых оптических переходов [35,64]. Эта структура по форме несколько отличалась от образца к образцу. Кроме того, при 80 К отмечен небольшой максимум $I_f(U)/I_f(0)$ в области $h\nu \cong 2,65$ эВ. Подобный максимум наблюдался и ранее в спектрах изменения фототока p-n-переходов [35] и коэффициент поглощения GaP [34] и связывался с

непрямыми переходами в расположенном более высоко минимуме зоны проводимости.

Следует отметить, что поверхностно-барьерные структуры на основе широкозонных полупроводников A^{III}B^V имеют спадающую коротковолновую фоточувствительность с ростом $h\nu$, в связи с переходом горячих электронов из полупроводника в металл [41].

Результаты и их обсуждение

В данной работе объектом исследования служили Au-n-GaP/n⁺-GaP и Au-p-GaP/p⁺-GaP структуры. В качестве подложек использовались пластинки n⁺-GaP ($n^+ = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 300 К), p⁺-GaP ($p^+ = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 300 К) соответственно, толщиной 350-400 мкм, изготовленные методом Чохральского. Активные слои n-GaP и p-GaP толщиной 10-20 мкм выращивались методом жидкофазной эпитаксии [68]. Омический контакт к подложке n⁺-GaP и p⁺-GaP изготовлялся вплавлением индия (In) [10], сплава [56], содержащего 97% In + 3% Zn соответственно, в атмосфере водорода при температуре 550 °С в течение около 5 мин. Наноструктурированный барьерный контакт создавался химическим осаждением слоя золота при комнатной температуре (300 К) из раствора золотохлористоводородной кислоты H₂AuCl₄ по методике [57]. Толщина барьерных слоёв золота, согласно эллипсометрическим данным, составляла 10-15 нм. Площадь барьерного контакта (Au) у разных структур имела значение от 0,05 до 0,2 см². Конструктивная схема барьеров Шоттки (БШ) Au-n-GaP и Au-p-GaP, а также условия их освещения представлены на рис.10.

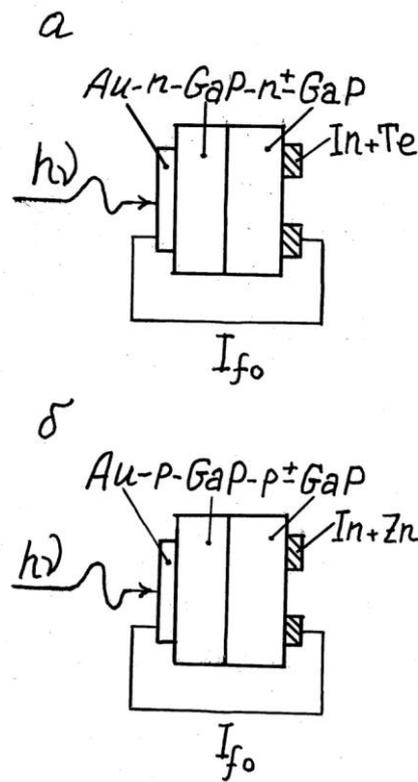


Рис.10. Конструктивная схема наноструктурированного фотодиода:
 а) Au-n-GaP, б) Au-p-GaP.

Были исследованы вольт-ёмкостные (C-U) характеристики и спектр фототока короткого замыкания ($I_f - h\nu$) созданных Au-n-GaP и Au-p-GaP диодных структур при 300 К. На основе анализа электрических (C-U) и использованием модернизированного фотоэлектрического метода [69] фотоэлектрических ($I_{f_0} - h\nu$) свойств БШ определялись параметры кристаллов GaP: концентрация носителей заряда (N_a-N_a , N_d-N_a), энергия прямых межзонных переходов E_0 . Оценивались также параметры энергетических диаграмм БШ: ширина слоя объёмного заряда W_0 , максимальное электрическое поле E_{m_0} при нулевом смещении и $q\Phi_{B_0}$.

Для определения параметров энергетической диаграммы Au-n-GaP и Au-p-GaP структур измерения C-U характеристик проводились на частоте 10 кГц. Зависимость дифференциальной ёмкости C от напряжения U для исследуемых и контрольных структур линейна в координатах $1/C^2 = f(U)$, что соответствует теории Шоттки.

Типичные спектры фоточувствительности БШ Au-n-GaP и Au-p-GaP в спектральном диапазоне 0,9 – 3,8 эВ при их освещении со стороны слоя Au представлены на рис. 11, 12.

При энергиях фотонов $1,30 \text{ эВ} < h\nu < 2,26 \text{ эВ}$ (рис. 11), $0,78 \text{ эВ} < h\nu < 2,26 \text{ эВ}$ (рис. 12) зависимость фототока короткого замыкания I_{f_0} от энергии фотонов $h\nu$ для Au-n-GaP и Au-p-GaP соответственно оказалась квадратичной,

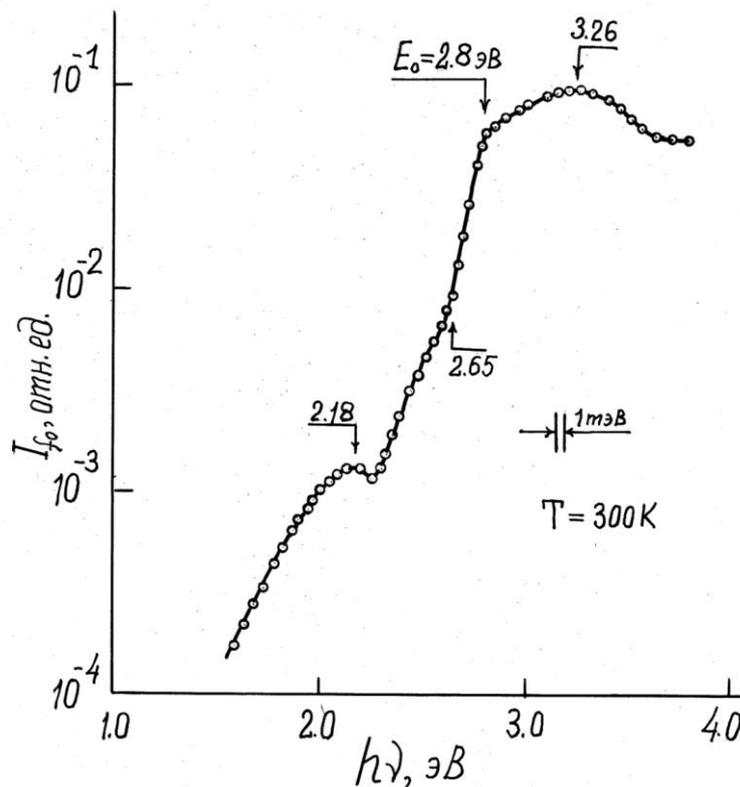


Рис. 11. Спектр фоточувствительности Au-n-GaP при освещении со стороны слоя Au.

что соответствует закону Фаулера, а высота барьера, определённая из $I_{f_0} \approx (h\nu - q\phi_{B_0})$ и составляющая 1,30 эВ для Au-n-GaP, 0,78 эВ для Au-p-GaP,

равна высоте барьера 1,36 эВ и 0,86 эВ для Au-n-GaP и Au-p-GaP соответственно, определённой по данным C – U характеристикам из выражения: $q\phi_{B_0} = qU_D - \mu = qU_C + kT - \mu$, где U_D – диффузионный потенциал, k – постоянная Больцмана, U_C – ёмкостное напряжение отсечки, μ – энергия уровня Ферми (E_f). В данном случае I_{f_0} обусловлен фотоэмиссией носителей заряда, переходящих из металла в полупроводник через

барьер [28,53,54]. В исследованных Au-n-GaP и Au-p-GaP структурах в области фотонов $q\phi_{B_0} < h\nu < E_g$ в спектре фототока наблюдался локальный максимум при $h\nu \approx 2,18$ эВ (рис.11,12). Данное явление может быть связано с экситонным поглощением, поскольку кристалл слабо легирован донорами (акцепторами), или переходами мелкие доноры (акцепторы) – зона проводимости. Связанные носители заряда, появляющиеся в результате таких переходов, выбрасываются в разрешённые зоны электрическим полем в слое объёмного заряда и фононами в объёме, создавая фототок.

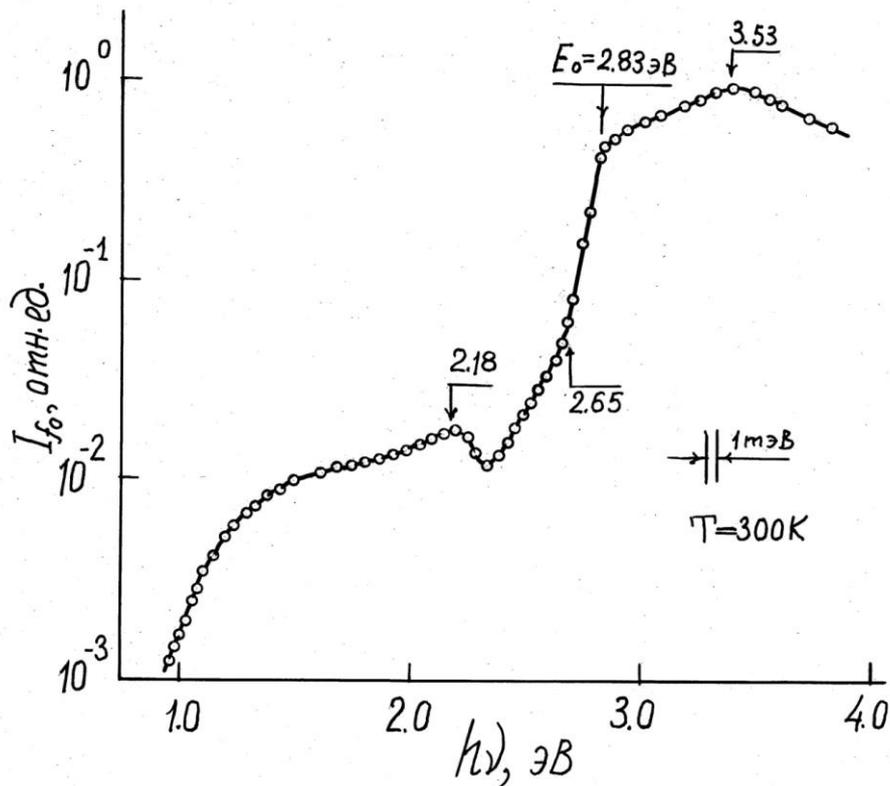


Рис. 11. Спектр фоточувствительности Au-p-GaP при освещении со стороны слоя Au.

При энергиях фотонов $h\nu \geq 2,26\text{эВ}$ зависимость фототока от энергии фотонов вначале растёт, затем практически не изменяется, а далее слабо уменьшается. Фототок данных структур при $h\nu \geq E_g$ обусловлен возбуждением электронно-дырочных пар в полупроводнике и разделением их полем поверхностного потенциального барьера E_{m_0} . При $h\nu \geq 2,3\text{эВ}$ наблюдается резкий рост фоточувствительности, связанный с началом межзонных переходов в GaP [64]. В области 2,3-2,8 эВ существует хорошее соответствие спектров фоточувствительности и коэффициента оптического поглощения в фосфиде галлия, измеренного в [39], при комнатной температуре.

При анализе экспериментальной зависимости I_{f_0} от $h\nu$ для Au-p-GaP структур по известной методике [70,71] было определено значение энергии прямых оптических переходов E_0 (рис. 11, 12), которое составляло 2,80 эВ для Au-n-GaP (рис. 11) и 2,83 эВ для Au-p-GaP (рис. 12), при 300 К.

При энергиях фотонов, больших, чем энергия прямых переходов E_0 фототок практически не зависит от энергии фотонов, что соответствует формуле Гартнера: $I_{f_0} = -q\Phi \left[1 - \frac{\exp(-kW)}{1+kL_p} \right]$, где Φ – поток фотонов, прошедших в полупроводнике, W – ширина слоя объёмного заряда, L_p – диффузионная длина неосновных носителей заряда, k – коэффициент поглощения.

Экспериментальные зависимости $I_{f_0}^{1/2}$ от $h\nu$ (рис. 13) оказываются линейными. Высота барьера $q\Phi_{B_0}$, ширина запрещённой зоны E_g определялись путём экстраполяции этой зависимости к значению $I_{f_0}^{1/2} = 0$. В исследованной Au-p-GaP структуре величина $q\Phi_{B_0}$ оказалась равной 0,78 эВ [72] (для Au-n-GaP составляла 1,30 эВ), $E_g=2,26$ эВ в соответствии с данными [5].

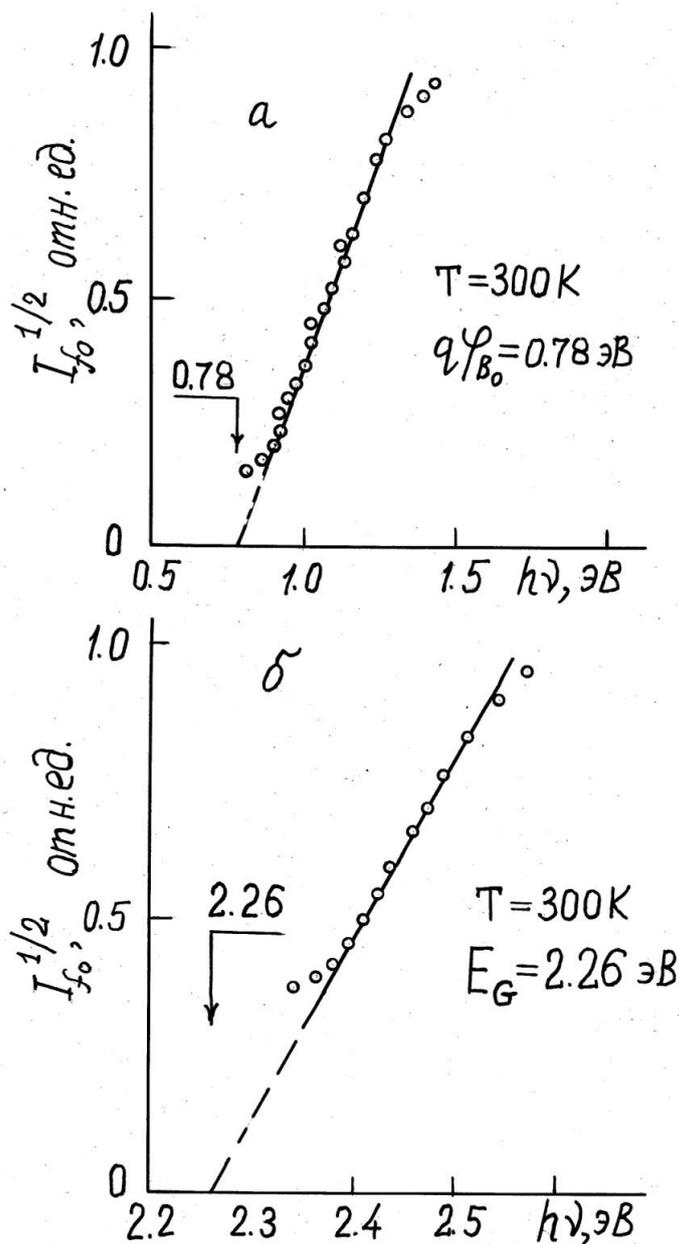


Рис. 13. Зависимости корня квадратного из величины фототока $I_{f_0}^{1/2}$ от энергии фотонов $h\nu$ для m - s -структуры Au - p - GaP .

Следует отметить, что фоточувствительность исследованных структур при $h\nu < E_g$ (2,26 эВ при 300 К) на два и более порядков ниже фоточувствительности в ультрафиолетовой области спектра ($h\nu = 3,2 - 3,8$ эВ).

Заключение

Полученные экспериментальные данные позволяют разработку фотоприёмников из фосфид галлиевых структур для актуальных участков УФ области спектра и создание миниатюрных измерительных устройств на их основе, позволяющих, в частности, проводить мониторинг УФ с целью определения влияния УФ излучения на жизнедеятельность человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алфёров Ж.И. Физика и жизнь.-Изд.2-е, доп. -М.: СПб: Наука,2001.-288 с.
2. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Полупроводниковые фотопреобразователи для ультрафиолетовой области спектра // ФТП. - 2003. - Т.37. - Вып.9. - С. 1025-1055.
3. Галчина Н.А., Коган Л.М., Социн Н.П., Широков С.С., Юнович А.Э. Спектры электролюминесценции ультрафиолетовых светодиодов на основе p - n -гетероструктур $InGaN/AlGaIn/GaN$, покрытых люминофорами // ФТП. - 2007. - Т.41. - Вып.9. - С.1143-1148.
4. Tut Turgut, Gokkavas Mutlu, Inal Ayse, Ozbay Ekmel. $Al_xGa_{1-x}N$ -based avalanche photodiodes

- with high reproducible avalanche gain // *Appl. Phys. Lett.* - 2007. - V.90. - No.16. - P. 16506/1-16506/3.4.
5. Шуберт Ф. Светодиоды: Пер. с англ. / Под ред. А.Э.Юновича. - 2-е изд. - М.:Физматлит, 2008. - 496 с.
 6. Жилиев Ю.В., Родин С.Н. Рост слоёв нитрида галлия методом хлоридной газовой эпитаксии при пониженной температуре источника // Письма в ЖТФ. - 2010. - Т.36. - Вып.9. - С.11-16.
 7. Лудин В.В., Николаев, Сахаров А.В., Брунков П.Н., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф. Эпитаксия слоёв AlN с высокой скоростью роста в планетарном МОС-гидридном реакторе // Письма в ЖТФ. - 2010. - Т.36. - Вып.24. - С.33-39.
 8. Сорокин Л.М., Калмыков А.Е., Бессолов В.Н., Феоктистов Н.А., Осипов А.В., Кукушкин С.А., Веселов Н.В. Структурная характеристика эпитаксиальных слоёв GaN на кремнии: влияние буферных слоёв // Письма в ЖТФ. - 2011. - Т.37. - Вып.7. - С.72-79.
 9. Buniatyan V.V., Aroutiounian V.M. Wide gap semiconductor microwave devices // *J. Phys. D.* - 2007. - V.40. - No. 20. - P.6355-6385.
 10. Мелебаев Д. Фотоприёмники ультрафиолетового излучения на основе наноструктур Au-окисел-n-GaP // Труды Межд. науч.-техн. конф. «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ'10). - Санкт-Петербург: Изд. Политехнического университета. - 2010. - С.114-115.
 11. Грачёв В.М., Евстропов В.В., Елисева Н.М. и др. Высокоэффективные диоды-источники красного излучения из GaP // ФТП. - 1968. - Т.2. - Вып.7. - С.1055.
 12. Lorenz M.R., Pilkuhn M. Preparation and Properties of Solution Grown Epitaxial p-n-junctions in GaP // *J. Appl. Phys.* - 1966. - Vol. 37. - No.11. - P.4094-4102.
 13. Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П., Макаренко В.Г. Влияние иттербия на электрофизические свойства эпитаксиальных слоёв n-GaP // ФТП. - 1988. - Т.22. - Вып.1. - С.158-161.
 14. Жилиев Ю.В., Панютин Е.А., Фёдоров Л.М. Высокотемпературные диоды на основе фосфида галлия // Письма в ЖТФ. - 2009. - Т.35. - Вып.17. - С.50-57.
 15. Гавриленко В.И., Грехов А.М., Корбутяк Д.В., Литовченко В.Г. Оптические свойства полупроводников: Справочник. - Киев: «Наукова думка», 1987. - 607с.
 16. Грибковский В.П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. - Минск: «Наука и техника», 1975. - 464 с.
 17. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Физматлит, 2008. - 488 с.
 18. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности - М.: Наука, 2006. - 490 с.
 19. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. - М.: Физматлит, 2009. - 336 с.
 20. Aspnes D.E., Studna A.A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1,5 to 6,0 eV // *Phys. Rev. B.* - 1983. - Vol.27. - No.2. - P.985-1009.
 21. Cohen M.L. and Bergstresser T.K. Band structures and Pseudopotential Form Factors for Fourteen Semiconductors of the Diamond and Zincblende Structures // *Phys. Rev.* - 1966. - Vol.141. - No.2. - P.789-796.
 22. Dean P.J., Faulkner R.A., Kimura S. Optical Properties of the Donor Tin in Gallium Phosphide // *Phys. Rev. B.* - 1970. - Vol.2.-No.10.-P.4062-4076.
 23. Onton A., Morgan T.N. Effect of Uniaxial Stress on Excitons Bound to Bismuth in GaP // *Phys. Rev. B.* - 1970. - Vol.1. - No.6. - P.2592-2604.
 24. Panish M.B., Casey H.C., Jr. Temperature Dependence of the Energy Gap in GaAs and GaP // *J. Appl. Phys.* - 1969.-Vol.40.-No.1.-P.163-167.
 25. Phillips J.C. Dielectric Theory of Impurity Binding Energies. II. Donor and Isoelectronic Impurities in GaP // *Phys. Rev. B.* - 1970. - Vol.1. - No.4. - P.1545-1548.
 26. Spitzer W.G., Gershenzon M., Frosch C.J., Gibbs D.F. // *J. Phys. Chem. Sol.* - 1959. - Vol.11. - P.339.
 27. Spitzer W.G., Mead C.A. Barrier Height Studies on Metal-Semiconductor Systems // *J. Appl. Phys.* - 1963. - Vol. 34. - No.10. - P.3061-3069.
 28. Spitzer W.G., Mead C.A. Conduction Band Minima of Ga(As_{1-x}P_x) // *Phys. Rev.* - 1964. - Vol. 133. - No. 3A. - P. A872-A875.
 29. Zallen R., Paul W. Band structure of Gallium Phosphide from Optical Experiments at High Pressure // *Phys. Rev.* - 1964. - Vol.134. - No.6A. - P. A1628-A1641.
 30. Юнович А.Э. Излучательная рекомбинация и оптические свойства фосфида галлия // Излучательная рекомбинация в полупроводниках. - М.: Наука, 1972. - С.224-304.
 31. Спайсер У.Е., Иден Р.К. // Труды IX Межд. конф. по физ. полупр. - Т.1. - Москва. - 1968. - С.68.
 - 31^a. Morgan T.N., Welber B., Bhargava R.N. Optical properties of Cd-O and Zn-O complexes in GaP // *Phys. Rev.* - 1968. - V.166. - P.751.
 32. Dean P.J., Kaminsky G., Zetterstrom R.B. Intrinsic Optical Absorption of Gallium Phosphide between 2,33 and 3,12 eV // *J. Appl. Phys.* - 1967. - Vol.38. - No.9. - P.3551-3556.
 - 32^a. Kleinman D.A., Spitzer W.G. Infrared lattice absorption of GaP // *Phys. Rev.* - 1960. - V.118. - P.110.
 33. Гуткин А.А., Наследов Д.Н., Фараджев Ф.Э. Электропоглощение в GaP в области не прямых оптических переходов // ФТП. - 1973. - Том7. - Вып.7. - С.1280-1286.
 - 33^a. Пихтин А.Н., Яськов Д.А. Край собственного поглощения фосфида галлия // ФТТ. - 1969. - Т.11. - Вып.3. - С.560-566.
 34. Субашиев В.К., Чаликян Г.А. Эффект Франца-Келдыша и оптическое поглощение GaP_xAs_{1-x} // Тр. IX Межд. конф. по физ. полупр. - Т. 1. - Л.: Изд-во «Наука», 1969. - С.397.
 - 34^a. Шмарцев Ю.В., Ременюк А.Д. Поглощение инфракрасного излучения в фосфиде

галлия n-типа. III. О структуре зоны проводимости // ФТП. – 1969. – Т.3. – С.1697.

35. Kozakov O., Nasledov D.N., Slobodchikov S.V. Franz-Keldysh effect on indirect transitions in GaP // Phys. Stat. Sol. - 1969. - V. 35. - No.1.-P.139-144.

35^a. Белле М.Л., Алферов Ж.И., Григорьева В.С., Крадинова Л.В., Прочухан В.Д. Оптическое отражение фосфида галлия, арсенида галлия и их твёрдых растворов // ФТТ. – 1966. – Т.8. – Вып.9. – С.2623-2627.

36. Thompson A.G., Cardona M., Shaklee K.L., Wooley J.C. Electroreflectance in the GaAs-GaP Alloys // Phys. Rev. - 1966. - Vol.146. -No.2.-P.601-610.

36^a. Crowell C.R., Spitzer W.G., Howarth L.E., Labate E.E. Attenuation length measurements of hot electrons in metal films // Phys. Rev. – 1962. – Vol.127. – No.6. – P.2006-2015.

37. Джонсон Е. Поглощение вблизи края фундаментальной полосы // Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$): Пер с англ. / Под ред. Уиллардсона Р. и Бира А. - М.: Изд-во Мир, 1970. - 488с.

37^a. Берг А., Дин П. Светодиоды: Пер с англ. / Под ред. Юновича А.Э. – М.: Изд-во «Мир», 1979. – 686 с.

38. Huges R.C., Zipperian T.E., Dawson L.R., Biefeld R.M., Walko R.J., Dvorack M.A. Gallium phosphide junctions with low leakage for energy conversion and near ultraviolet detectors // J. Appl. Phys. - 1991. - Vol.69. - No.9. - P.6500-6505.

38^a. Mead C.A. Metal-semiconductor surface barriers // Sol. State Electronics - 1966. - Vol.9. - No.11-12. - P.1023-1033.

39. Серафин Б., Беннетт Х. Оптические параметры ряда соединений $A^{III}B^V$ // Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$): Пер с англ. / Под ред. Уиллардсона Р. и Бира А. - М.: Изд-во Мир, 1970. - 488с.

39^a. Мелебаев Д., Мелебаева Г.Д., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. Фоточувствительность и определение высоты барьеров Шоттки в структурах Au-n-GaAs // ЖТФ. – 2008. – Т.78. – Вып.1. – С.137-142.

40. Dean P.J., Thomas D.G. Intrinsic absorption-edge spectrum of gallium phosphide // Phys. Rev. - 1966. - V.150. - P. 690.

41. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктура : Пер. с англ. / Под ред. Ченг Л., Плог К. – М.: Мир, 1989. – 584 с.

42. Varshni Y.P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors // Physica. - 1967. - V.34. - P.149.

43. Lorenz M.R., Pettit G.D., Taylor R.C. // Phys. Rev. - 1971. - Vol.171. - P.876.

44. Евстропов В.В., Джумаева М., Жилиев Ю.В., Назаров Н., Ситникова А.А., Фёдоров Л.М. Дислокационное происхождение и модель избыточного туннельного тока в p-n-структурах на основе GaP // ФТП. - 2000. - Том.34. - Вып.11. - С.1357-1362.

45. Logan R.A., White H.G., Wiegmann W. Efficient green electroluminescence in nitrogen-doped GaP p-n-junctions // Appl. Phys. Lett. - 1968. - Vol.13. - No.4. - P.139-141.

46. Logan R.A., White H.G., Wiegmann W. Efficient green electroluminescent junctions in GaP // Sol. State Electronics. - 1971. - Vol.14. - P.55-70.

47. Stakiewicz J., Allen J.W. Injection electroluminescence at p-n-junctions in zinc-doped gallium phosphide // J. Phys. Chem. Sol. - 1962. - Vol.23. - P.881-884.

48. Lorenz M.R., Pettit G.D., Blum S.E. Optical properties of the Ge donor and acceptor in GaP // Solid State Commun. - 1972. - Vol.10. - P.705-708.

49. Onton A., Taylor R.C. Spectroscopic Study of Tellurium Donors in GaP // Phys. Rev. B. - 1970. - Vol.1. - No.6. - P.2587-2591.

50. Wiley J.D., DrDomenico M. Jr. Free-Carrier Absorption in n-Type GaP // Phys. Rev. B. - 1970. - Vol.1. - No.4. - P.1655-1659.

51. Grimmeiss H.G., Rabenau A., Koelmans H. Some properties of p-n-junctions in GaP // J. Appl. Phys. Suppl. - 1961. - Vol.32. - No.10. - P.2123-2127.

52. Logan R.A., Chynoweth A.G. Charge multiplications in GaP p-n-junctions // J. Appl. Phys. - 1962. - Vol. 33. - No.5 - P.1649-1654.

53. Mead C.A., Spitzer W.G. Conduction band minima at AlAs and AlSb // Phys. Rev. Letters - 1963. - Vol.11. - No.8. - P.358-361.

54. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов: Пер. с англ. / Под ред. Трутко А.Ф. - М.: «Энергия». - 1973. - 656 с.

55. Гольдберг Ю.А., Царенков Б.В. Современное состояние разработок и исследований поверхностно-барьерных структур металл-полупроводник A^3B^5 , создаваемых методом химического осаждения металлов // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. – Киев, 1978. - Вып. 27. - С.33-43.

56. Dörbeck F.H. Electrochemically deposited Schottky contacts on GaAs // Sol. State Electronics - 1966. - Vol.9. - No.11-12. - P.1135-1136.

57. Беркелиев А., Гольдберг Ю. А., Мелебаев Д., Царенков Б.В. Фотоприёмник видимого и ультрафиолетового излучения на основе $GaAs_{1-x}P_x$ поверхностно-барьерных структур. // ФТП. - 1976. - Т. 10. - Вып. 8. - С. 1532-1534.

58. Жилиев Ю.В., Сергеев Д.В., Полетаев Н.К., Старобинец С.М., Фёдоров Л.М., Мелебаев Д., Дурдымурадова М. Создание и исследование структур с барьером Шоттки на основе GaP. - Л., 1988.

59. Мелебаев Д. Высокоэффективные фотоприёмники ультрафиолетового излучения на основе GaP МДП структур // Тр. VII Междунар. научно-практич. конф. «СИЭТ-2006». - г. Одесса. - 2006. - С.164.

60. Стафеев В.И., Анисимова И.Д. Фотодиоды с барьером Шоттки на основе GaP, GaP_xAs_{1-x} и GaAs для УФ и видимого диапазонов спектра // ФТП. - 1994. - Т.28. - Вып.3. - С. 461-466.

61. Видгорович Е.Н., Гольдберг Ю.А., Дурдымурадова М.Г., Мелебаев Д., Царенков Б.В.

Коротковолновая фоточувствительность поверхностно-барьерных структур: влияние промежуточного диэлектрического слоя // ФТП. - 1991. - Т.25. - Вып.8. - С.1419-1422.

62. White H.G., Logan R.A. GaP Surface-Barrier Diodes // J. Appl. Phys. - 1963. - Vol.34. - No.7. - P.1990-1997.

63. Царенков Б.В., Гольдберг Ю.А., Гусев Г.В., Огурцов В.И. Фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур Au-n-GaP в ультрафиолетовой области спектра // ФТП. - 1974. - № 2. - С.410-413.

64. Гуткин А.А., Дмитриев М.В., Наследов Д.Н. Фоточувствительность поверхностно-барьерных диодов Au-n-GaP в области спектра 1,4-5,2 эВ // ФТП. - 1972. - Т.6. - Вып.3. - С. 502-508.

65. Добровольский Ю.Г. Фотодиод на основе GaP с повышенной фоточувствительностью в коротковолновой области УФ-спектра // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2012. - № 5. - С.31-34.

66. Cowley M., Heffner H. Gallium Phosphide-Gold Surface Barrier // J. Appl. Phys. - 1964. - V. 35. - No.1. - P. 255-256.

67. Жилиев Ю.В., Мелебаев Д., Полетаев Н.К., Сергеев Д.В., Федоров Л.М. Ультрафиолетовый поверхностно-барьерный фотоприёмник на основе

n-p⁺GaP эпитаксиальных структур // Тр. I Всес. конф. по физ. осн. твердотел. электрон. - Том А. - Л. - 1989. - С.190-191.

68. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов / Под. ред. Алфёрова Ж.И. М.: «Сов. радио», 1975. – 328 с.

69. Беркелиев А., Гольдберг Ю.А., Именков А.Н., Мелебаев Д., Розыева М.Х. Фотоэлектрический метод определения параметров варизонных полупроводников // Изв. АН. ТССР. – Сер. ФТХ и ГН. – 1986. – Вып.1. – С.8-14.

70. Конников С. Г., Мелебаев Д., Рудь В. Ю. Исследование зонной структуры полупроводниковых твердых растворов GaP_xAs_{1-x} фотоэлектрическим методом // Письма в ЖТФ. - 1993. - Т.19. - Вып.13. - С.47-54.

71. Конников С.Г., Мелебаев Д., Рудь В.Ю. Поляриметрический эффект в GaP_xAs_{1-x} поверхностно-барьерных структурах // ФТП. - 1993. - Т.27. - Вып.4. - С.57-64.

72. Ташлиева А.М. Фоточувствительность барьеров Шоттки Au-p-GaP // Тез. докл. Российской конф. и школы по акт. пробл. полупр. нанофотоэлектрон. (ФОТОНИКА-2011). - г. Новосибирск. - 2011. - С.119.

УДК 378.146

ПРИМЕНЕНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ КОХОНЕНА ДЛЯ АНАЛИЗА БАЗЫ ПАТЕНТОВ

DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2021.2.65.392

Пастухова Галина Витальевна

*Академическая школа информационных технологий при ПННУ,
614003, Россия, г. Пермь, улица Чернышевского, д. 28*

Рассматривается одна из технологий кластеризации – самоорганизующиеся сети Кохонена, проанализированы узкие места для анализа данных подобными алгоритмами. Затронуты общие проблемы адаптации математических моделей и применимости самих алгоритмов кластеризации.

Задача классификации – одна из древнейших задач, суть которой в разбиение множества исследуемых объектов на однородные в некотором смысле группы. Основание для классификации диктуется природой того, что классифицируем, хотя порой необходимо за основание брать такие метрики, для которых существуют объективные способы их измерения.

Также надо четко различать классификацию от типологии, последнее значительно шире. Под типологией понимается метод научного познания, в основе которого расчленение объектов и их группировка с помощью обобщенной, идеализированной модели или типа.

Типология может либо непосредственно основываться на понятии типа как основной логической единице расчленения изучаемой реальности, либо использовать иные логические формы, такие как:

- классификация, цель которой сводится к построению иерархических систем классов и их подклассов на основе некоторых признаков, не свойственных самим объектам (название, число) или присущих им;

- систематика, предполагающая максимально полную и расчлененную классификацию данного множества объектов с фиксированной иерархией единиц описания;

- таксономия, в рамках которой специально исследуются и обосновываются принципы рациональной классификации и систематики [5, С. 563-564].

Один из способов решения задачи автоматической классификации – это технология кластерного анализа, группы однородности в нем называются кластерами. Алгоритмы кластеризации очень похожи на алгоритмы классификации, но есть и принципиальные различия.

Так, например, алгоритмы классификации позволяют отнести в определенный класс каждый объект с заранее известными параметрами, полученными на этапе обучения и каждый объект может принадлежать только одной группе разбиения, что зачастую создает довольно таки жесткую модель, по ряду признаков «оторванную»