



## РАЗРАБОТКА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВОД

Умаров А.А., Зарипов О.О.,

Ташкентский государственный технический  
университет имени Ислама Каримова  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.8355439>

### Abstract.

Статья посвящена исследованию по повышению быстродействия фотодиодных структур. В частности, речь идёт о разработке гетероструктуры для применения в волоконно-оптических датчиках. Приводятся результаты исследования особенностей быстродействия многослойной фоточувствительной структуры на основе арсенида галлия с потенциальными барьерами.

**Keywords:** фотодиодные структуры, гетероструктура, волоконно-оптические датчики, быстродействие, оптический диапазон, импульс, фоточувствительность.

В последнее время интенсивные исследования ведутся по повышению быстродействия фотодиодных структур на основе различных полупроводников. Большинство из них посвящено фотодиодам на основе InGaAs и германия, обеспечивающих охват длинноволнового оптического диапазона. Однако в фотоприемниках с высокоомной базой улучшение временных характеристик приводит к ухудшению фотоэлектрических параметров. Например, для повышения быстродействия необходимо уменьшить толщину базовой области, что приводит к увеличению обратного тока и снижению фоточувствительности. В частности, увеличение диаметра фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP показало [43], что по мере увеличения диаметра от 0,1 мм до 2 мм темновые токи увеличиваются от 20 мкА до 1400 мкА, а время нарастания и спада импульса увеличивается от 3 до 300 нс, при этом емкости возрастают от 10 пФ до 3000 пФ. Также имеются сведения о снижении темнового тока в р-і-п-фотодиодах за счет уменьшения площади фотодиода в диаметре до 50 мкм [44]. Вместе с тем для достижения высокой частоты фотоприемные диоды стали изготавливать на основе графена [45]. Аналогично высокие рабочие частоты достигнуты на фотодиодах из InGaAs используемых для амплитудно-фазового преобразования колебаний оптической мощности [46]. В другой работе [47] в качестве фотоприемника предложено использовать термоэлементы, в которых требования к быстродействию не столь важны, они определяются реакцией человека и могут составлять десятые доли секунды, что позволяет использовать накопленный сигнал. При этом для уменьшения влияния изменяющейся температуры внешней среды на параметры сам приемник должен иметь минимальные размеры.

Один из основных параметров фотодиода – быстродействие определяется структурой фотодиода, материалом, напряжённостью электрического поля в слабелегированной области. Обычно быстродействие определяют как время, необходимое для нарастания прямоугольного импульса от уровня 0.1 до 0.9 от установившегося максимального значения импульсов света. Максимальная величина (обычно  $\tau_{\text{нар}}$ ) берётся в качестве характеристики времени отклика фотодиода.

С увеличением частоты модуляции входного оптического импульса максимальное значение фототока уменьшается. Предельная частота определяется как частота модуляции, при которой токовая чувствительность уменьшается до 0.7 от максимального значения токовой чувствительности при низких частотах модуляции. Времена нарастания и спада главным образом влияют на полосу пропускания или скорость передачи сигнала. Наиболее быстрыми являются р-і-п-фотодиоды. У лавинных фотодиодов увеличение коэффициента умножения сопровождается уменьшением быстродействия по сравнению с р-і-п-фотодиодами.

Анализ литературных данных показывает, что сравнительно широкое использование фотодиодов на основе арсенида индия достигается за счет существенного уменьшения рабочей площади структуры приводящей к уменьшению общей величины обратного генерационного тока и емкости до требуемых значений. Однако при этом возможность локального пробоя из-за высоких значений плотности обратного тока требует принятия физико-технологических мер по выравниванию напряженности электрического поля по площади структуры фотодиода.

Следует отметить, что при значительно больших площадях 4-40 мм<sup>2</sup> путем подбора материала базовой области и использования физических свойств образования перехода металл-полупроводник в арсениде галлия, а также технологической интеграции перехода металл-полупроводник с выпрямляющим р-п-переходом и созданием условий смыкания смежных потенциальных барьеров получены фотодиодные структуры с низкими темновыми токами (10-(6-7) А/см<sup>2</sup>) и высокой фоточувствительностью (2 до 20 А/Вт) [49].

В настоящей работе приводятся результаты исследования особенностей быстродействия многослойной фоточувствительной структуры на основе арсенида галлия с потенциальными барьерами.

Объект исследования и методика эксперимента. Исследуемые образцы получены на подложке арсенида галлия с удельным сопротивлением 1·10<sup>7</sup> Ом·см и ориентированной в кристаллографическом направлении (100), толщиной 350 мкм при диаметре 3 см путем последовательного напыления слоя nCdS при 750°C и слоя nInP при температуре 500 °С. Полупрозрачные слои золота получены также напылением в вакууме при температуре 420 °С. Площади исследуемых многослойных Au-vGaAs:O-nCdS-nInP-Au-структур скрайбированием доводились до размеров 3x4 мм<sup>2</sup>.

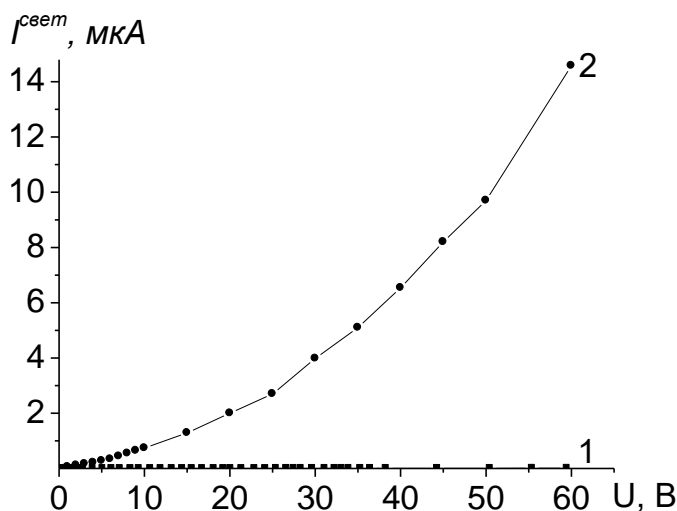
Вольтамперные характеристики в темноте и при подсветке снимались по стандартной схеме. Рабочее напряжение с шагом 0.2 и 0.5 вольт подавалось от блока питания типа Б5-48. Напряжение и ток фиксировали универсальным вольтметром В7-21А. Минимальный ток был равен 1 нА, относительная погрешность измерения 0.2-0.4%. Подсветку интегральным светом осуществляли от галогенной лампы с максимумом излучения 0.55 мкм. Интенсивность освещения измеряли люксметром Ю-116 с погрешностью измерения 2%.

Приведенная на рис. 28 вольтамперная характеристика исследуемой фотодиодной структуры в одном из режимов включения в темноте и при подсветке интегральным светом от галогенной лампы с максимум при 0.55 мкм показывает, что по мере увеличения рабочего напряжения световой ток приобретает ярко выраженный суперлинейный характер. Низкие значения темнового тока (10 нА), в отличие от

лавинных фотодиодов с нарастающим током, простираются до 60 В и выше. При этом фототок - разность значений светового и темнового токов по мере увеличения рабочего напряжения возрастает, что указывает на наличие внутреннего фотоэлектрического усиления. То есть с напряжением токовая фоточувствительность  $S_i^\phi$  увеличивается:

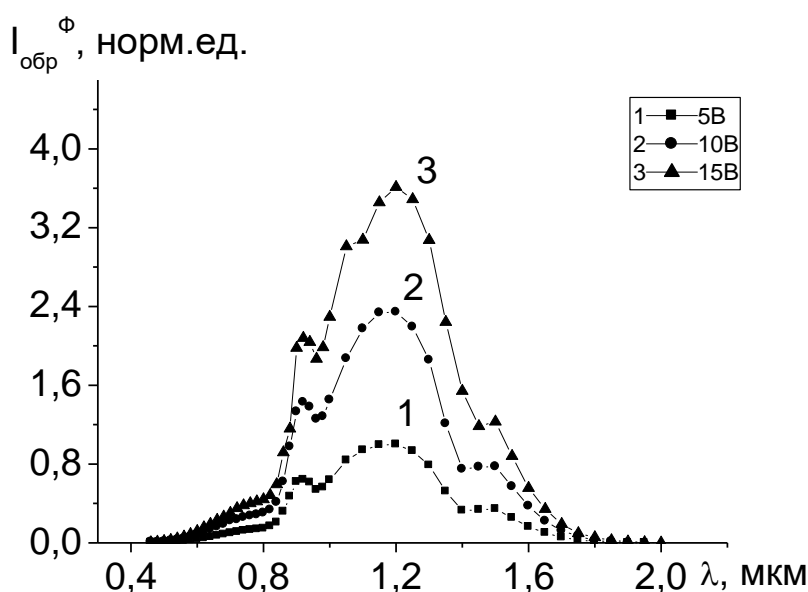
$$S_i^\phi = \frac{I^\phi}{\phi}, \text{ A/Вт}$$

где  $\phi_{\text{лм}} = E_{\text{лк}} \times S, \text{ м}^2, I^\phi = I^{\text{св}} - I^{\text{тем}}$



**Рис. 28.** Вольтамперная характеристика исследуемой фотодиодной структуры в темноте

Спектральные характеристики исследуемых Au-vGaAs:O-nCdS-nInP-Au-структур охватывает от 0.5 мкм до 1.6 мкм с характерными пиками в примесной области спектра, рис. 2.

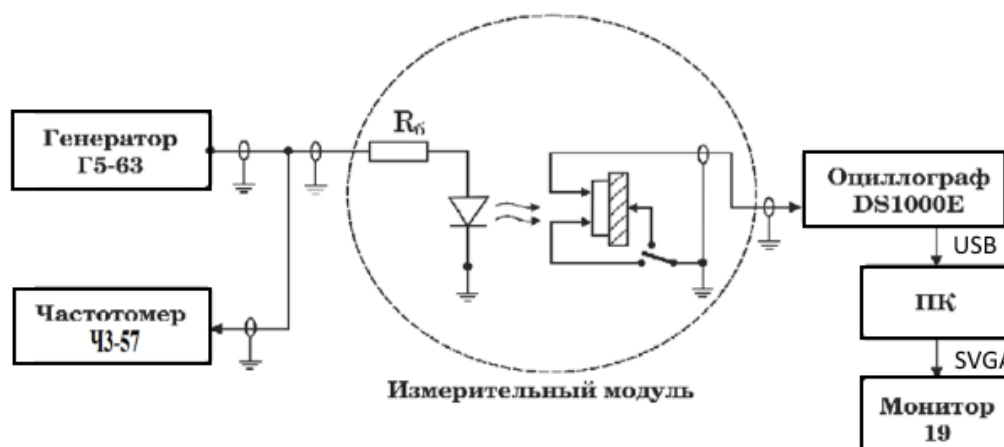


**Рис. 29.** Спектральная характеристика Au-nInP-nCdS-vGaAs:O-Au - структуры в режиме запирания освещаемого nInP -Au перехода

По мере увеличения запирающего напряжения спектральная чувствительность во всем диапазоне спектра увеличивается, особенно при длине волны 1.2-1.25 мкм. Имеются также пики при 0.85-0.9 и 1.55 мкм, а также привлекательным является фоточувствительность в диапазоне 1.31 мкм. Соответственно в указанных длинах волн оптического диапазона полученные многослойные фоточувствительные структуры, имея малые значения емкости (25÷50 пФ) [50] представляют интерес для приема и обработки оптического сигнала.

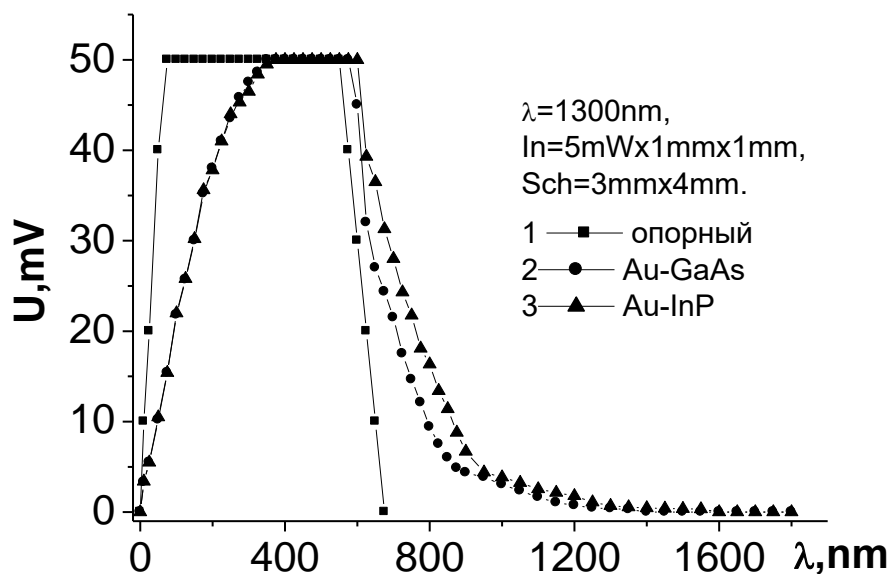
Следует также отметить, что обычно фоточувствительность фотодиода снижается при увеличении частоты входного модулированного оптического сигнала формирующего временные характеристики, так называемые времена нарастания  $t_n$  и спада  $t_c$  фототока.

Измерение временных характеристик экспериментальных образцов проводили с помощью схемы состоящей из излучателя световых импульсов, возбуждаемого от генератора прямоугольных импульсов Г5-63 с крутым подъемом и спадом с длительностью 500-600 нс, частотомера ЧЗ-57 и исследуемого фотоприемника с электронным усилителем, выход, которого соединен к цифровому осциллографу DS1000E и монитору, используемых для обработки данных измерений, рис. 30. В качестве излучателя использовали светодиод ИК диапазона с длиной волны  $\lambda=1300$  нм.



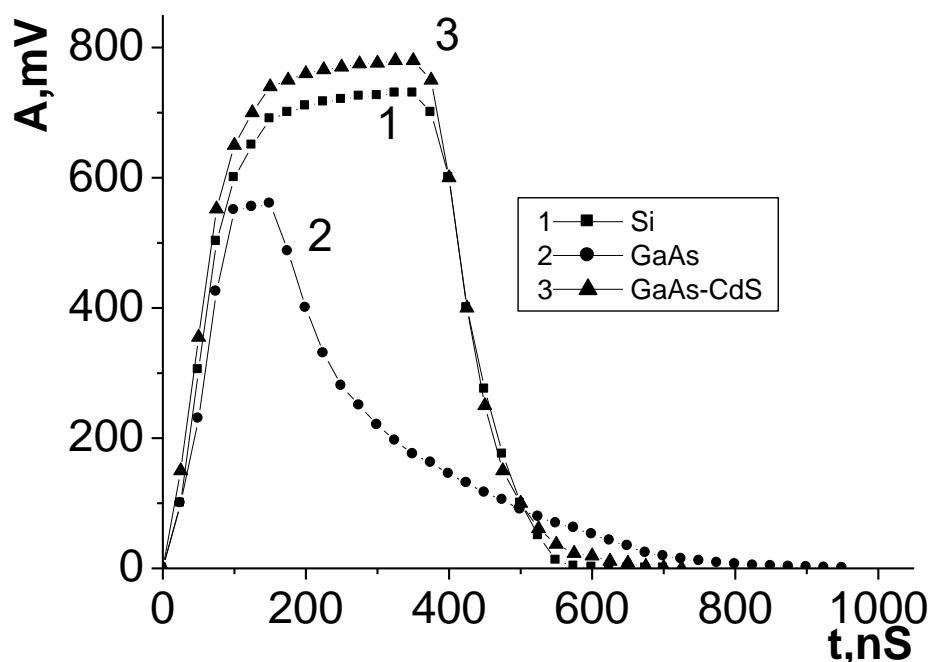
**Рис. 30.** Электрическая схема измерения временных характеристик фотодиодных структур

Форма опорного импульса подаваемого на светодиод – излучатель и импульсы фототоков формируемых в фотоприемнике, освещаемом с различных поверхностей прямоугольным световым импульсом с длиной волны 1300 нм, для одного из образцов Au-nInP-vGaAs:O-Au приведены на рис. 31. Откуда определяется время нарастания, исчисляемое с момента начала облучения фотоприемника прямоугольным световым импульсом, за которое фототок от 0.1 величины достигает до 0.9 (0.63) максимального своего значения. Этот параметр также называется временем восстановления, что равносильно быстрдействию.



**Рис. 31.** Форма опорного импульса и импульсов фототока при подсветке Au-nInP-V GaAs:O-Au фотоприемника прямоугольным световым импульсом с различных поверхностей

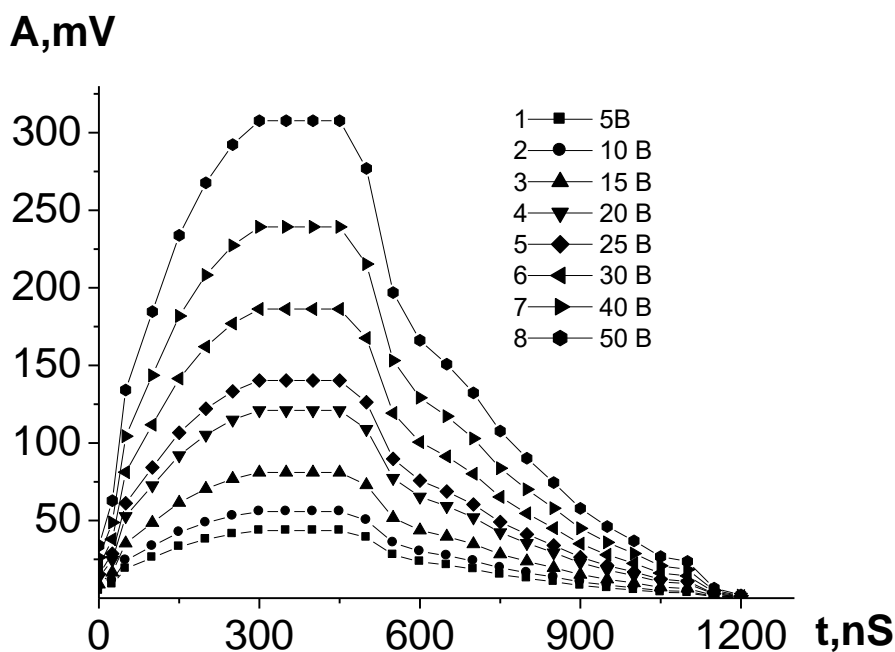
Форма импульса формируемого на фотодиоде от подаваемого прямоугольного светового импульса от излучателя с длиной волны 1300 нм также для образцов на основе кремния (Au-nSi-Au) и сформированных на арсениде галлия гетеропереходных фотодиодов приведена на рис. 32.



**Рис. 32.** Форма импульса формируемого на фотодиодах: Au-nSi-Au; Au-vGaAs-Au; Au-nCdS-vGaAs:O-Au

Импульсы фототоков создаваемых в фотодиоде, освещаемым с длиной волны излучения 1300 нс, приведены на рис. 33. Как видно из рисунка, амплитуда импульса

формируемого на фотодиоде от светового прямоугольного импульса с длиной волны 1300 нм от запирающего напряжения возрастает до 307.7 мВ, а время нарастания составляет 252 нс.



**Рис. 33.** Форма импульса формируемого на *Au-nInP-nCdS-vGaAs:O-Au* фотодиоде от светового прямоугольного импульса

В свою очередь время спада определено временем, за которое фототок уменьшается в 2.718 раза после окончания светового импульса. На основе этой зависимости по спаду прямоугольного импульса определены времена жизни неосновных носителей:

$$\tau_n = \frac{kT \Delta t_c}{e \Delta U}$$

Результаты исследований временных параметров, определенные для нескольких исследуемых образцов, сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Образец	Приемная поверхность	tн-время нарастания	tс-время спада	$\tau_n$ -время жизни неосн. носителей	
Излучатель 1300 нм					
1	Au-nSi-Au	$\Phi \rightarrow \text{Au-Si-}$	106 нс	165 нс	99 нс
2	Au-nInP-nCdS- $\nu$ GaAs:O-Au	$\Phi \rightarrow \text{Au- nInP-CdS}$	240нс	318нс	148нс
		$\text{GaAs-Au} \leftarrow \Phi$	239нс	276нс	120нс
3	Au-nInP-CdS-nGaAs:Te-In+Sn	$\Phi \rightarrow \text{Au-nInP}$	97,3 нс	532нс	94нс
4	Au-Ge-nInP-CdS-nGaAs:Te-In+Sn	$\Phi \rightarrow \text{Au-Ge-nInP}$	159нс	200нс	90нс

Как видно из таблицы для исследуемых многослойных фоточувствительных структур с барьерами металл-полупроводник время нарастания оптического сигнала

находится в интервале от 100 до 250 нс, а время спада от 160 до 500 нс и время жизни неосновных носителей от 90 до 150 нс. Если принять к сведению, что в фотодиодах на основе гетероструктур InAs/InAsSbP по мере увеличения диаметра площади структуры от 0.1 до 2 мм время нарастания и спада возрастает от 10 до 300 нс, то приведенные в таблице 1 данные временных характеристик отвечают требованиям, предъявляемым к фотодиодам для систем оптической связи. В частности, на основе этих многослойных фоточувствительных структур были изготовлены экспериментальные фотоприемные модули [51] для приема оптических сигналов в спектральном диапазоне 0.7 мкм.

В результате проведенных исследований установлено, что по быстродействию многослойные фоточувствительные Au-nInP-nCdS-vGaAs:O-Au-структуры с потенциальными барьерами не уступают известным аналогам на основе InGaAs гетероструктур в широком оптическом диапазоне, используемом для приема и передачи оптического сигнала. Они, являясь работоспособными при комнатной температуре, по величине темнового тока и емкости, превосходят известные аналоги на основе гетероструктур.

### References:

1. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990.- 256 с.
2. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы : Сборник статей / Под ред С. А. Дмитриева. Издательство: Connect, 2000. -376 с.
3. Листвин А.В. Оптические волокна для линий связи. –М., Изд. ВЭЛКОМ, 2002.
4. Andreev I.A., Serebrennikova O.Yu., Sokoolovsky G.S., Dyudelev V.V., Ilinsky N.D., Konovalov G.G., Kunisina E.V., Yakovlev Yu.P. High-speed photodiodes for the middle infrared spectral range 1.2 ÷ 2.4 μm based on GaSb / GaInAsSb / GaAlAsSb heterostructures with a transmission bandwidth of 2 ÷ 5 GHz. // Semiconductors, 2013, Vol 47, rel. 8. p.1109-1115.
5. Ryzhii M ,Otsuji T, Mitin V. Characteristics of p-i-n terahertz and infrared photodiodes based on multiple graphene layer structures. Japanese Journal of Applied Physics (2011) 50 (7 PART 1) DOI: 10.1143/JJAP.50.070117.
6. Андреев Д.С., Варганова В.С., Хакушев П.Е., Чинарева И.В., Дирочка А.И. Уменьшение времени восстановления чувствительности в р-і-п-фотодиодах на основе InGaAs/InP после воздействия мощных импульсных фоновых засветок. Прикладная физика, 2015, № 6. С. 70-73.
7. Демьянович М.В. и др. Новая волоконно-оптическая дуговая защита для комплектных распределительных устройств. – Энергетик, 2001, №5, с. 24-26.
8. Мурашкина Т. И. Особенности построения амплитудных ВОД // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. Всероссийск. науч. -техн. конф. 24-26 ноября 1998. - Москва, 1998. - С. 185- 186.
9. Коптев Ю. Н., Гориш А. В. Датчиковая аппаратура для ракетно- космической техники // Радиотехника. - 1995. - № 10.
10. Мурашкина Т. И. Повышение надежности волоконно-оптических датчиков-материалы IV Международной науч. -техн. конф. 4-5 июня 1998. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. -1998. -Ч. 2.
11. Zakirov, R., Zaripov, O., Umarov, A. Fiber optic temperature sensors in the aircraft fuel system application. International Conference on Information Science and Communication

Technologies: applications, trends and opportunities. Uzbekistan, Tashkent-Urgench, November 3-5, 2021.

