

СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ФОТОННО-ИНЖЕКЦИОННЫЕ КОММУТАТОРЫ НА ОСНОВЕ GaAs-AlGaAs и ИМПУЛЬСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Султанов Ахмаджон

Наманганский инженерно-технологический институт.

Абдулазизов Бахром Тошмирза ўғли

Наманганский Государственный Университет.

E-mail: sulix80@mail.ru

E-mail: bt_abdulazizov@mail.ru

Аннотация: Интерес генерации сверхкоротких оптических импульсов большой мощности обусловлен широким их применением в различных областях. Фото-проводящие полупроводниковые коммутаторы на основе полуизолирующих материалов широко используются для импульсных систем большой мощности, таких как широкополосные импульсные радиолокаторы, мощные импульсные лазеры, системы микроволнового диапазона большой мощности.

Ключевые слова: Гетеропереходы, импульсный генератор, транзистор, тиристор, коммутатор, импульс, вольт-амперной характеристики.

GaAs-AlGaAs ASOSIDAGI ULTRA TEZ TA'SIR QILUVCHI FOTON- IN'EKTSIYA KALITLARI VA IMPULS GENERATORLARI

Sultanov Ahmadjon

Namangan muhandislik-texnologiya instituti.

Abdulazizov Bahrom Toshmirza o'g'li

Namangan Davlat Universiteti.

E-mail: sulix80@mail.ru

E-mail: bt_abdulazizov@mail.ru

Annotatsiya: Yuqori quvvatli Ultra qisqa optik impulslarni ishlab chiqarishga qiziqish ularning turli sohalarda keng qo'llanilishi bilan bog'liq. Yarim

izolyatsiyalovchi maeriallarga asoslangan foto o'tkazuvchan yarimo'tkazgichli kalitlar keng polosali impulsli radarlar, kuchli impulsli lazerlar, yuqori quvvatli mikroto'lqinli diapazonli tizimlar kabi yuqori quvvatli impulsli tizimlar uchun keng qo'llaniladi.

Kalit so'zlar: Geteroo'tishlar, impuls generatori, tranzistor, tiristor, kalit, impuls, volt-ampere xususiyatlari.

ULTRAFast PHOTONIC INJECTION GaAs-AlGaAs BASED SWITCHES AND PULSE GENERATORS

Sultanov Ahmadjon

Namangan Institute of Engineering and Technology.

Abdulazizov Bahrom Toshmirza ugli

Namangan State University.

E-mail: sulix80@mail.ru

E-mail: bt_abdulazizov@mail.ru

Annotation: The interest in generating ultrashort optical pulses of high power is due to their wide application in various fields. Photo-conducting semiconductor switches based on semi-insulating materials are widely used for high-power pulsed systems such as broadband pulsed radars, high-power pulsed lasers, and high-power microwave systems.

Keywords: Heterojunctions, pulse generator, transistor, thyristor, switch, pulse, voltage-ampere characteristics.

Введение. Среди известных фотопроводящих полупроводниковых приборов [1,5,10,11], арсенид галлиевые приборы привлекают значительный интерес благодаря их высокой чувствительности к оптическому воздействию. Высокий внутренний квантовый выход излучательной рекомбинации, возможность управления шириной запрещенной зоны слоев $n-p^0-i-n^0$ структуры в процессе эпитаксиального выращивания многослойных гетероструктур **GaAs-AlGaAs**

позволили по новому подойти к разработке импульсных тиристоров, получивших название фотонно-инжекционных.

Приборная структура фотонно-инжекционного высоковольтного коммутатора содержит **P-p-N** – гетеросветодиод и **N-n⁰-p⁰-n⁺** транзистор со слаболегированными **n⁰** и **p⁰** – областями. Схематическое изображение которой и характер распределения ширины запрещённой зоны вдоль структуры дано на рисунок 1.

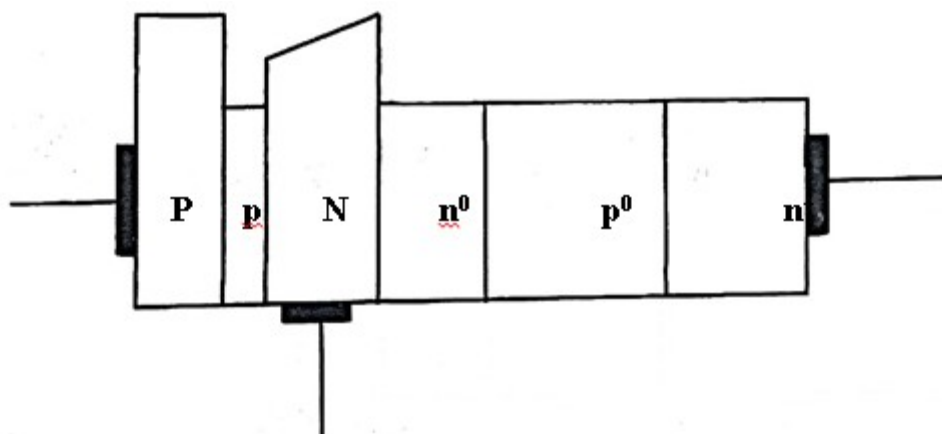


Рисунок 1. Схематическое изображение и характер распределения ширины зоны ФИИК.

В отличие от кремния, основного материала для силовой электроники, гетеропереходы **GaAs-AlGaAs** позволяют преобразовывать путем промежуточного преобразования тока управления в свет и последующего преобразования оптический сигнал в электрический внутри приборной структуры. Эти открывают новые возможности для конструирования силовых приборов.

Метод. Простейшего варианта конструкции приборной структура фотонно-инжекционных импульсных коммутаторов (ФИИК), как видно из рис.-1, состоит из двух частей: высоковольтных плавных **p⁰-i-n⁰** переходов **GaAs**, являющихся базовыми областями коммутатора, и **GaAs-AlGaAs** светодиодов для оптического запуска прибора. Структуры ФИИК изготавливались методом жидкофазной эпитаксии в два этапа [4,7,12,13]. На первом этапе в кварцевом контейнере выращивались высоковольтные **GaAs n⁺ - p⁰ - n⁰** структуры с

напряжением пробоя $> 1,5 \text{ кВ}$ и далее в графитовом контейнере требуемые **AlGaAs** гетероструктура – светодиодные части структуры.

Работа исследованных структур основана на принципе преобразования входного электрического сигнала I_1 в световой с последующим преобразованием света в выходной электрический сигнал I_2 , являющийся в сумме с I_1 током накачки гетеросветодиода. Контроль для согласования спектрального состава излучательных и фотоэлектрических характеристик многослойных приборных структур производился установке **КСВУ-6**.

Методология. В тиристорном режиме включения высоковольтного коммутатора (рисунок 2) в исходном состоянии ток $I_2 = 0$, коллекторный переход смещен в обратном направлении, тиристор заперт и ток $I_2 = 0$. При включении тока I_1 в базе светодиода накапливается избыточный заряд электронов и дырок. Электронно-дырочная пары рекомбинируют в базе светодиода с излучением фотонов, большая часть которых доходит до коллектора и поглощается в нем.

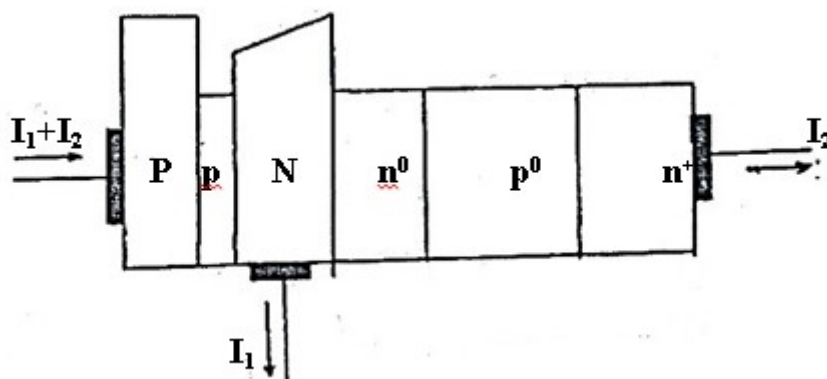


Рисунок 2. Тиристорной режим включения высоковольтного фотонно-инжекционного импульсного коммутатора.

В результате в коллекторе генерируется электронно-дырочная плазма. Под действием внешнего электрического поля генерированные светом электроны из n^0 – области удаляются в N – слой, а генерированные в n^0 – области дырки движутся по направлению к обратному смещенному переходу в p- базу. Для

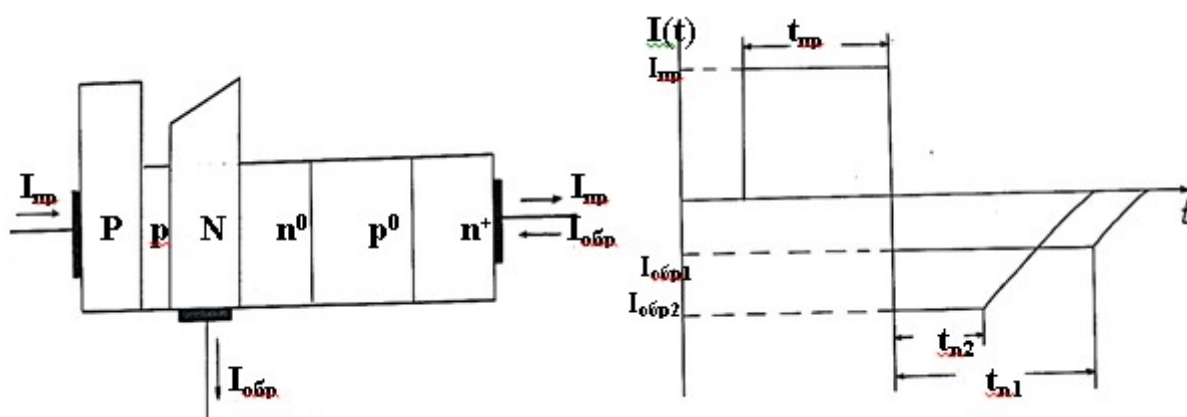
поддержания квази нейтральности базы n^+ - эмиттер инжектирует электроны, часть которых, пройдя базу, поступает в коллектор.

В результате через $N-n^0-p^0-n^+$ структуру протекает ток I_2 , значение которого тем больше, чем больше ток I_1 ; через светодиод – сумма токов I_1 и I_2 . При дальнейшем увеличении тока I_1 и достижении условия лавинного роста тока I_2 тиристор переходит во включенное состояние. В этом режиме через структуры протекает ток I_2 , ограниченный внешней цепью, и в отсутствие тока I_1 , а коллекторный переход $N-n^0-p^0-n^+$ структуры смещен в прямом направлении [2,6.8].

В транзисторном режиме включения высоковольтного коммутатора в отсутствие ток через светодиод $N-n^0-p^0-n^+$ - структура закрыта и ток $I_2 = 0$. Если $I_1 \neq 0$, то в базе светодиода накапливается избыточный заряд электронов и дырок. Электронно-дырочные пары рекомбинируют в базе светодиода с излучением фотонов, большая часть которых доходит до коллектора и поглощается электронное – дырочная плазма. Под действием внешнего электрического поля генерированные светом электроны из n^0 - области удаляются в N – слой, а генерированные в n^0 – области дырки движутся по направлению к обратному смещенному коллекторному переходу и перебрасываются полем перехода в p^0 - базу транзистора. Для поддержания квази нейтральности базы n^+ - эмиттер инжектирует электроны, часть которых, пройдя базу, поступает в коллектор. В результате через $N-n^0-p^0-n^+$ структуру протекает ток I_2 , значение которого тем больше, чем больше ток I_1 . При наличии нагрузки в цепи коллектора и I_1 , больше некоторого значения, n^0-p^0 переход сместится в прямом направлении и транзистор перейдет из активного режима работы в режим насыщения [3,4].

Из описания устройства и принцип работы высоковольтных коммутаторов видно, что их свойства определяются преимущественно характером протекания рекомбинационных процессов в слаболегированных областях. Одним из параметров, определяющих эффективность диффузионной связи областях $P-p-N-n^0-p^0-n^+$ структуры.

Определение времени жизни электронов в p^0 – базе $N-n^0-p^0-n^+$ структуры проводилось разностным методом. Испытуемый прибор включался как тиристор и через него пропускались два пары импульсов прямого и обратного тока прямоу-гольной формы (рисунок 3), в которых амплитуды прямых токов равны $I_{пр.1} = I_{пр.2} = I_{пр.}$, а обратных различаются в e раз $I_{обр.1} = e \cdot I_{обр.2}$. Измерялась длительность фаз высокой обратной проводимости t_{n1} и t_{n2} , соответствующая первой и второй парам импульсов тока, и затем рассчитывалось время жизни электронов из соотношения $\tau_n = t_{n1} - t_{n2}$.



аРисунок 3. Схема включения и эпюра токов, поясняющие метод измерения время жизни электронов в p^0 -базе $N-n^0-p^0-n^+$ структуры.

Определение время жизни дырок в n^0 – коллекторе $N-n^0-p^0-n^+$ структуры проводилось также разностным методом, сущность которого в данном случае заключалась в следующем. Испытуемый прибор включался как транзистор и через него пропускали две пары импульсов тока базы и коллектора (рисунок 4), в которых амплитуды коллекторных токов равны $I_{k1} = I_{k2} = I_k$, а амплитуды токов базы различаются в e раз $I_{б1} = e \cdot I_{б2}$. Измерялись значения времени рассасывания t_{p1} и t_{p2} , соответствующие первой и второй парам импульсов тока, и далее рассчитывалось время жизни дырок из соотношения $\tau_p = t_{p1} - t_{p2}$.

Результаты измерений значений времени жизни фотонно-инжекционных структурах приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№ прибора	1	2	3	4	5
τ_n , МКС	0,20	0,24	0,70	0,70	0,80
τ_p , МКС	0,11	0,12	0,60	0,55	0,65
τ_H , МКС	0,25	0,35	0,85	1,00	1,00

Из приведенной таблицы видно, что времена жизни дырок в n^0 – и электронов в p^0 – областях лежит в диапазоне сотен наносекунд, и определяются концентрацией и сечением захвата неконтролируемо вводимых рекомбинационных центров.

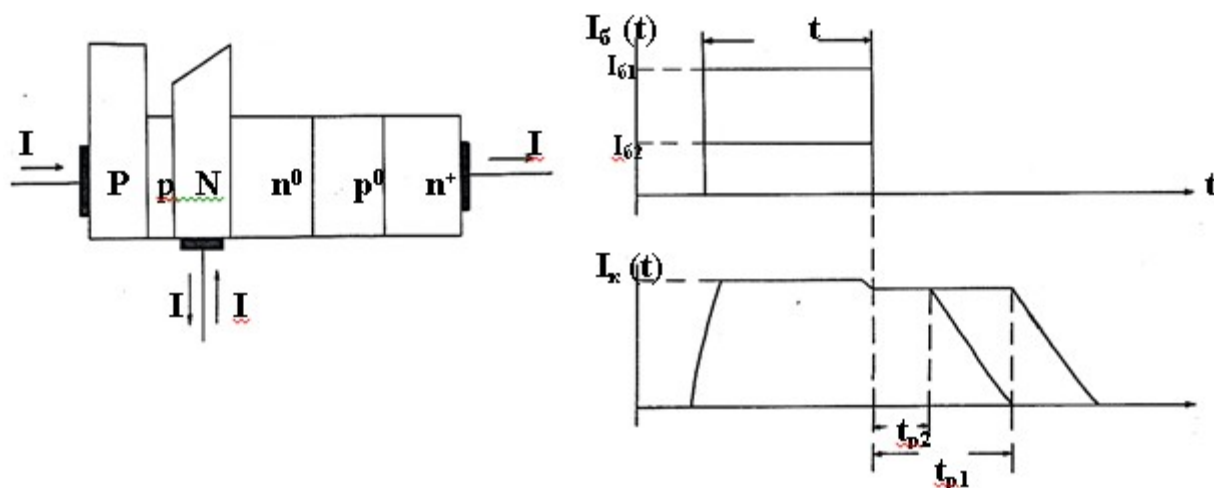


Рисунок 4. Схема включения и эпюра токов, поясняющие метод измерения жизни дырок в n^0 -коллекторе N- p^0 - n^+ структуры.

На рисунок 5 приведена вольт-амперная характеристика одного исследованных высоковольтных коммутаторов, включенного по схеме, представленной на рисунок 3 [4]. Видно, что ВАХ имеет несколько характерных участков. Участок характеристиками между точками **О** и **А** соответствует закрытому состоянию (прямому запираению) с очень высоким сопротивлением. Прямое переключение (или включение) происходит при выполнении условия $\frac{du}{dt} = 0$.

Соответствующее напряжение называется напряжением включения $U_{\text{вкл}}$, и ток – током включения $I_{\text{вкл}}$. Между точками **А** и **В** находится участок характеристики с отрицательным сопротивлением. Участок между точками **В** и **С** соответствует открытому состоянию (прямой проводимости). В точке **В**, где снова $\frac{du}{dt} = 0$, через прибор протекает минимальный удерживающий ток $I_{\text{удер}}$, а на приборе фиксируется минимальное удерживающее напряжение $U_{\text{удер}}$. Участок **О** и **Д** описывает режим обратного запираания, а участок между точками **Д** и **Г** – режим обратного пробоя.

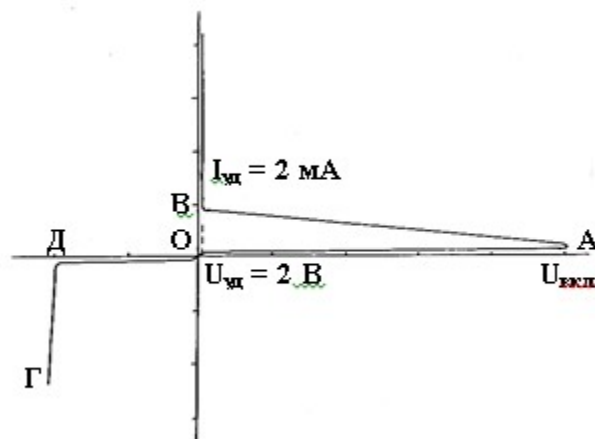


Рисунок 5. Вольт-амперная характеристика высоковольтных фотонно-инжекционных коммутатора. Вертикале: 1 деления – 2 мА; $U_{\text{уд}} = 2$ В. Горизонтالي: 1 деления – 100 В. $I_{\text{упр}} = 8$ мА.

S – образный вид ВАХ, соответствует структурам тиристорного типа, а каждый участок хорошо экспериментально изучен и написан, например, с использованием двух транзисторной модели [9]. Вместо с тем ВАХ фотонно-инжекционных коммутаторов имеет свои особенности.

Для объяснения особенности статических характеристик приборной структуры в режиме прямого запираания использовали формулой, полученной на основе двух транзисторной модели [9], и связывающей I_2 анодный ток с I_1

током управления и обратным током центрального высоковольтного p^0-n^0 перехода:

$$I_2 = \frac{\alpha_2 I_1 + I_{k0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1)$$

Формула (1) описывает статическую характеристику в диапазоне напряжений вплоть до пробоя (после пробоя структура работает как p^0-n^0 диод.

В Таблица 2 показано динамические характеристики ФИИК

Таблица 2.

Параметры ФИИК	№ 1	№ 2	№ 3
Допустимые напряжения в закрытом состоянии U, В	500	800	1200
Импульсный ток в открытом состоянии I, А	50	75	40
Время нарастания импульса (по уровню 0,1÷0,9), нс	0,2÷1,5	0,3÷2,5	0,2÷0,5
Стабильность момента переключения Δt , пс	50	< 40	< 25
Максимальная частота повторения импульсов кГц	50	200	250
Максимальная длительность импульса тока Т, нс	0,5÷100	0,5÷10 0	0,5÷100
Минимальная задержка, нс	< 10	< 10	< 10
Рабочие температуры	200 °С.	200 °С.	200 °С.

Как видно из таблица 2, по своим динамическим и выходным характеристикам ФИИК с внутренней оптической связью между $p^0 - n^0$ переходами выделяются среди трехэлектродных полупроводниковых переключателей.

Характеристики образцов генератора на базе ФИИК приведена на таблице – 3.

Таблица 3.

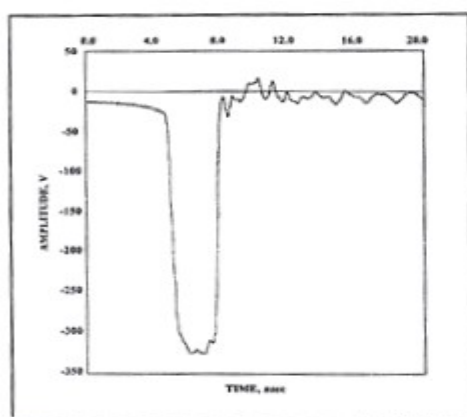
№ образца генератора	Время нарастания, t, нс	Длительность импульса, Т, нс	частота, кГц	Амплитуда импульса, U, В
1	0,35	1,5 ÷ 15	50	450
2	< 1	5 ÷ 20	5	1000
3	1,5	5 ÷ 15	10	2000

Модель генератора	Время нарастания, t, нс	Длительность импульса, T, нс	PRF, кГц	Амплитуда импульса, I, А
4	0,3	3 ÷ 50	10 ÷ 50	15
5	1,6	3 ÷ 50	10 ÷ 20	30
6	2,5	5 ÷ 10	10	75

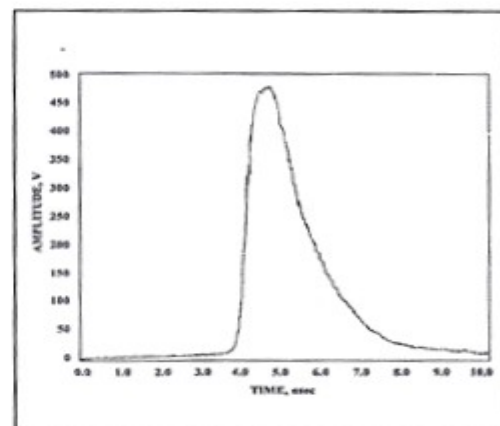
На рисунок 6, а, б. приведены осциллограммы напряжения на нагрузке U модуляторов на выходе.

Закключение. Как видно из таблица 3 и из рис-6, особенности генераторов на базе ФИИК являются следующие характеристики:

- Субнаносекундные времена нарастания и спада;
- Высокая радиационная стабильность момента переключения относительно импульса управления;
- Большая мощность на выходе при малых потерях энергии;
- Наносекундные времена задержки переключения относительно импульса управления (на порядок меньше, чем у генераторов на основе кремниевых приборов);
- Основное практическое преимущество ФИИК – у него есть электрод управления (в отличие от большинства мощных быстродействующих коммутаторов). Это значительно упрощает его использование в схемах – не требуется применения внешнего лазера или специальной схмотехники для запуска прибора.



а)



б)

Рисунок 6. Осциллограммы напряжения модуляторов на выходе.

Из вышеприведённых анализа ФИИТ и генераторы на базе **GaAs** ФИИК имеют заметные преимущества. **GaAs** ФИИК могут генерировать импульсы в широком диапазоне длительностей, включая и ультракороткие, вплоть до **0,5 нс**. Это может быть использовано в широкополосных импульсных радиолокационных системах.

Такие генераторы соединенные с импульсными лазерными системами большой мощности, используются для измерения времени пролёта сигнала от физических объектов, для измерения расстояния, скорости и ускорения объектов. Особенности конструкции и работы ФИИК позволяют реализовать высокую разрешающую способность при модуляции ультракоротких оптических импульсов и желаемую оптическую мощность посредством увеличения амплитуды тока.

Таким образом,- генераторы на базе **GaAs** ФИИК могут коммутировать как импульсы высокого напряжения, так и импульсы тока большой амплитуды;

- генераторы на базе **GaAs** ФИИК могут производить импульсы с субнано-секундными временами нарастания и спада;

- генераторы на базе **GaAs** ФИИК имеют лучшие частотные характеристики (частоты повторения импульсов) по сравнению с другими импульсными генераторами большой мощности.

Литературы

[1] Vainshtein S.N. Significant Effect of Emitter Area on the Efficiency, Stability and Reliability of Picosecond Switching in a GaAs Bipolar Transistor Structure/ Yuferev V.S., Kostamovaara J.T., Kulagina M.M., Moilanen H.T. // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol 57, № 4. 2010.

- [2] Хур Дж.Х., Харирад П., Хуммель С.Г., Дзуско К.М., Даркус П.Д., Феттерман Х.Р., Гундерсен М.А. 1990. Оптотиристор на основе GaAs для импульсных при-ложений. – Транзакции IEEE // Electron's Deviced т. 12., Вип. 37. стр.1220-1225.
- [3] Кюренян А.С. 2012. Исследование ударной ионизации и лавинного пробоя в высоковольтных р-п переходах. Афтореферат. Диссер. на ученой степ. кан.физ.мат. наук. Москва. ВЭИ им.Ленина.
- [4] Султанов А.М. 2022. Разработка технологии создания и исследование фотонно-инжекционных коммутаторов на основе гетероструктур GaAs-AlGaAs. Монография, Наманганский Инженерно-технологический институт, кафедра физика, Узбекистан, 160115, Наманган, ул. Касансайская 7. 116 стр.
- [5] Саркат Т., Мазумдер С.К. 2007. Эпитаксиальное проектирование гетероструктуры с прямым оптическим управлением на основе GaAs/AlGaAs на основе силового устройства с латеральным супер переходом для быстрого повторяющегося переключения.// Транзакции IEEE на электронных устройствах. том. 54. №.3. Март.
- [6] Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. 2014. GaAs-диоды для PFC SMPS UPS IPM Solar invertors и замены синхронных выпрямителей // Силовая электроника. № 6. вып.2.
- [7] Sultanov A.M., Abdukarimov A.A., Kufian M.Z. 2023. Development of technology for creating high-voltage p^0-n^0 junctions based jn GaAs. Bullitin of the karaganda university. Physics series № 4 (112). pp. 50-56. [8]
- Rozhkov A.V., A.M.Sultanov. 2023. Investihation of the effect of Mn impurity on high-voltage p^0-n^0 heterojunctions based on a low-doped GaAs layer. Science and in Karakalpakstan. ISSSN 2181-9201. № 3/2 (15).
- [9] Ebers J.J. 1952. Four-Terminal p-n-p-n transistors. Proc. IRE, 40, 1361.
- [10] П.Ж. Байматов, Б.Т. Абдулазизов, М.С. Тохиржонов. Влияние тонкого слоя InAs на энергию электрона в квантовой яме гетероструктур AlAs/InxGa1-xAs/AlAs «Узбекский физический журнал» 25 (4).

[11] P.Baymatov, B.Abdulazizov, M.Tokhirjonov Electron eigenvalues in quantum well of AlAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /AlAs heterostructures with InAs nanoinserts, The European Physical Journal B 96 (8), 118.

[12] Б.Т. Абдулазизов, М.С. Тохиржонов
Расчет уровней Ландау и энергии циклотронного перехода электронов в квантовой яме InAs/AlSb, «Узбекский физический журнал» 24 (4), 263-267.

[13] Б.Т. Абдулазизов, М.С. Тохиржонов, Одночастичная энтропия в двумерном электронном газе в узкозонных полупроводниках, «Узбекский физический журнал» 23 (4).