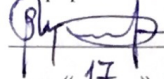


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

 В.П. Гермогенов
« 17 » июня 2019 г.

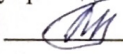
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

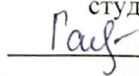
**ВЛИЯНИЕ ТИПА ГЛУБОКОЙ ПРИМЕСИ НА ВРЕМЕННУЮ
НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЛАВИННЫХ S-ДИОДОВ**

по основной образовательной программе подготовки бакалавров

Направление подготовки 03.03.03 – Радиофизика

Гальченко Регина Аркадьевна

Руководитель ВКР –
кандидат физ.-мат. наук,
доцент кафедры
полупроводниковой электроники
 Прудаев И.А.
« 31 » мая 2019 г.

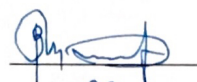
Автор работы
студентка группы № 753
 Гальченко Р.А.

Томск-2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники (КПЭ)

д-р физ.-мат. наук, профессор

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП

 В.П. Гермогенов
« 23 » 10 2018 г.

ЗАДАНИЕ

по подготовке ВКР бакалавра
студенту Гальченко Регине Аркадьевне группы № 753

1. Тема ВКР: Влияние типа глубокой примеси на временную нестабильность переключения лавинных S -диодов

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

- а) на кафедре 14.06.2019,
б) в ГЭК 21.06.2019

3. Краткое содержание работы:

Работа направлена на экспериментальное исследование временной нестабильности переключения S -диодов. В работе предлагается провести измерение времени задержки включения и статистического разброса этого параметра (джиттера) в зависимости от условий запуска (постоянное или импульсное напряжение смещения) и типа глубокой примеси, используемой при изготовлении структур для S -диодов (хром или железо). Ранее детальное исследование джиттера и способов управления им для лавинных S -диодов не проводилось, что обуславливает новизну настоящей работы.

4. Календарный график выполнения ВКР:

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| а) изучение литературы | 19.09.2018–20.12.2018 |
| б) проведение эксперимента | 19.09.2018–01.05.2019 |
| в) анализ результатов | 01.05.2019–15.05.2019 |
| г) написание ВКР | 15.05.2019–01.06.2019 |
| д) подготовка презентации работы | (01–12).06.2019 |

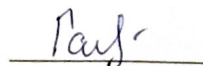
5. Дата выдачи задания « 24 » 10 2018 г.

Руководитель ВКР –
кандидат физ.-мат. наук,
доцент кафедры
полупроводниковой электроники



Прудаев И.А.

Задание приняла к исполнению



Гальченко Р.А.

РЕФЕРАТ

Работа содержит: 30 страниц, 14 рисунков, 2 таблицы, 24 источника.

АРСЕНИД ГАЛЛИЯ, ГЛУБОКИЕ ПРИМЕСИ, ЛАВИННЫЙ S-ДИОД,
ЗАДЕРЖКА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ, ДЖИТТЕР.

Целью работы является исследование временной нестабильности переключения S-диодов. В работе проведены измерения времени задержки включения и статистического разброса этого параметра (джиттера) в зависимости от условий запуска (постоянное или импульсное напряжение смещения) и типа глубокой примеси, используемой при изготовлении структур для S-диодов (хром или железо).

СОДЕРЖАНИЕ

1 Импульсный лавинный S -диод на основе GaAs	6
1.1 Способы получения лавинных S -диодов	6
1.2 Структура лавинного S -диода.....	8
1.3 Вольт-амперная характеристика лавинного S -диода.	10
1.4 Задержка пробоя и переключения π - v - n -структуры.....	13
2 Методика эксперимента.....	17
2.1 Методика создания лавинных S -диодов	17
2.2 Методы измерения характеристик лавинных S -диодов.....	19
3 Экспериментальная часть	22
3.1 Описание результатов.....	22

ВВЕДЕНИЕ

Арсенид галлия является одним из базовых и перспективных материалов микроэлектроники, благодаря ряду присущих ему свойств, таких как плотность $5,4 \text{ г/см}^3$, ширина запрещённой зоны $1,43 \text{ эВ}$ (при комнатной температуре $T=300\text{K}$), высокая подвижность электронов $8500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. С использованием глубоких примесей, хрома и железа в $n\text{-GaAs}$, получают такие приборы как импульсные лавинные S -диоды. Структура этих диодов основана на слоях $\pi\text{-v-n}$ -типа проводимости. Изготавливаемые S -диоды находят применение в таких областях как накачка полупроводниковых лазеров, в схемах формирователей наносекундных импульсов для сверхширокополосной локации. Исследуемые диоды находят такое применение в современной импульсной электронике, благодаря сверхбыстрому переключению из низкопроводящего в высокопроводящее состояние (за время от $0,05$ до 2 наносекунд). Сверхбыстрое переключение арсенид галлиевых структур из закрытого в открытое состояние происходит в режиме лавинного пробоя за время, меньшее времени пролета носителей через активную область. Механизм переключения и его временная нестабильность являются предметом исследования в настоящей работе.

Новизна работы заключается в том, что исследуемые импульсные лавинные S -диоды сделаны по новой технологии, когда диффузия примесей идёт в потоке аргона, запаянных кварцевых ампулах при давлении паров мышьяка 1 атм . Так же следует изучить временную нестабильность переключения S -диодов. В работе проведено измерение времени задержки включения и статистического разброса этого параметра (джиттера) в зависимости от условий запуска (постоянное или импульсное напряжение смещения) и типа глубокой примеси, используемой при изготовлении структур для S -диодов (хром или железо). Ранее детальное исследование джиттера и способов управления им для лавинных S -диодов не проводилось, что так же обуславливает новизну настоящей работы.

1 Импульсный лавинный S-диод на основе GaAs

1.1 Способы получения лавинных S-диодов

Импульсный S-диод – это полупроводниковый прибор с.в.ч.-электроники, на обратной ветви вольт-амперной характеристики которого наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления [1]. Для получения импульсных лавинных S-диодов в объем арсенида галлия проводится диффузия примесей, которые образуют глубокие акцепторные уровни в запрещенной зоне. К примесям с глубокими уровнями в полупроводниках относятся элементы, энергетические уровни которых отстоят от краёв зон разрешенных энергий на величину, сопоставимую с шириной запрещенной зоны. Примером таких примесей в соединениях A^3B^5 являются переходные металлы четвёртого периода: Fe, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni. Главной особенностью этих примесей является незавершённость d -оболочки, что и определяет их характерные свойства в полупроводниковых материалах.

Изучение d -примесей в полупроводниках позволило сформулировать основные черты, характерные для их поведения в кристаллах A^3B^5 . В узлах кристаллической решётки d -атомы отдают часть электронов на восстановление химической связи, а в междоузлиях электроны окружающих атомов отталкивают s -электроны в d -оболочку. В результате этого имеем: $3d^n4s^m \rightarrow 3d^{n+m-3}$ (примесь в узле A^3), $3d^n4s^m \rightarrow 3d^{n+m-5}$ (примесь в узле B^5), $3d^n4s^m \rightarrow 3d^{n+m}$ (примесь в междоузлии). Однозначно установлено, что в соединениях A^3B^5 и, в частности, в GaAs, $3d$ -примеси растворяются в узлах подрешетки A^3 и являются акцепторами.

В ряде работ [2-4] для изготовления лавинных импульсных S-диодов используют легирование n -GaAs примесями Cr и Fe. Выбор примесей именно хрома и железа обусловлен высоким значением удельного сопротивления GaAs. В таблице 1 приведены данные из монографии А. Милнса [5].

Таблица 1 – GaAs, легированный переходными металлами [5]

Примесь	Энергетический уровень, эВ	Растворимость, см ⁻³	Удельное сопротивление, Ом·см
Cr	0,8	$1,6 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^8$
Mn	0,1	10^{17}	0,15
Fe	0,49	10^{17}	$4 \cdot 10^4$
Co	0,16	10^{16}	2,2
Ni	0,35	10^{17}	17
V	0,8	-	-

Из таблицы видно, что GaAs легированный хромом и железом имеют наибольшее удельное сопротивление, что даёт возможность создавать полуизолирующий материал.

Остановимся на некоторых наиболее интересных эффектах, наблюдаемых в структурах на основе GaAs, компенсированного примесями Fe и Cr. Например, в системе GaAs:Cr атом Cr замещает атом Ga и имеет структуру $3d^3$, это его нейтральное состояние. Компенсированные атомы Cr приобретают электронную структуру $3d^4$, что соответствует отрицательно заряженному состоянию примеси Cr. Оставшиеся некомпенсированные атомы Cr по-прежнему будут в состоянии $3d^3$. Именно они поставляют дырки в валентную зону, но концентрация дырок мала из-за большой энергии ионизации атомов хрома. Аналогичная картина имеет место и для системы GaAs:Fe, где энергия ионизации также довольно велика. Следовательно, материал с двойным легированием мелкой донорной и глубокой акцепторной примесями будет высокоомным [6].

1.2 Структура лавинного S-диода

Если в GaAs имеются фоновые донорные и акцепторные примеси, а также легирующие мелкие донорные и глубокие акцепторные примеси с концентрациями N_{df} , N_{af} , N_d и N_t соответственно в соотношении $N_t > N_d > (N_{af} - N_{df})$, то фоновые примеси частично компенсируют друг друга, а электроны от оставшихся фоновых и мелких доноров компенсируют уровни d -примесей.

Если распределение компенсирующих примесей неоднородно по толщине, то формируется структура, состоящая из высокоомного слоя p -типа (π -слоя) в области, где выполняется условие $N_t > N_d > (N_{af} - N_{df})$, высокоомного слоя n -типа (v -слоя), где $N_d \geq N_t > (N_{df} - N_{af})$, и области объёмного заряда (ООЗ) на границе между ними. Таким образом, в полуизолирующем GaAs образуется π - v -переход, который проявляет одновременно свойства объёмного материала и электронно-дырочного перехода.

Легирование арсенида галлия железом может осуществляться несколькими путями: в процессе выращивания монокристаллов [7], диффузии, ионного легирования, газовой и молекулярно-лучевой эпитаксии [8]. Магнитные свойства GaAs:Fe интенсивно исследуются в работах [9, 10], а электрические в работах [11,12].

Рост легированных Fe и Cr слоёв проводится на сильнолегированных теллуром или оловом n^+ -подложках GaAs. В этом случае в объёме эпитаксиального слоя формируется π - v -переход, смещённый от границы с подложкой на некоторое расстояние.

На рисунке 1.1 показан вид профилей концентраций мелкой донорной примеси N_d и глубокой акцепторной N_a

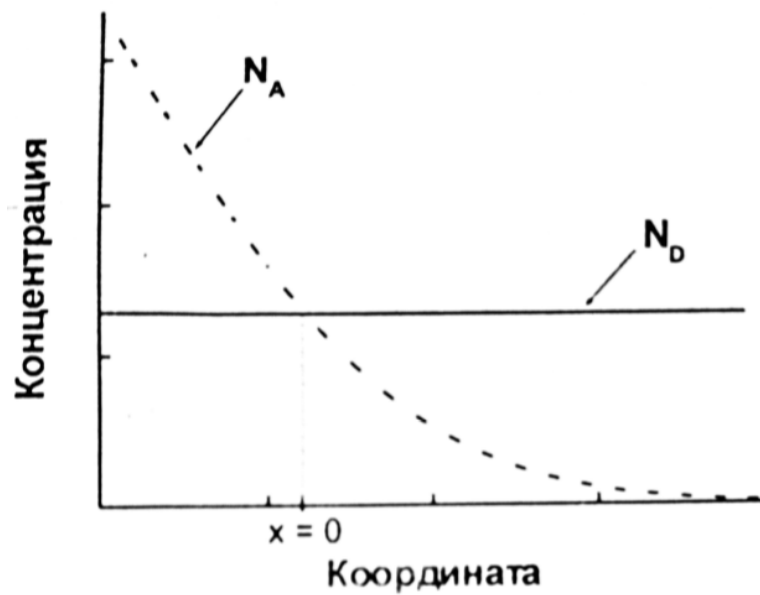


Рисунок 1.1 – Вид профилей концентрации примесей: N_d – мелкий донор, N_a – глубокий акцептор.

В точке $x = 0$ градиент разностной концентрации примесей составляет от 10^{18} до 10^{20} см $^{-3}$, поэтому электронно-дырочный переход можно считать плавным. При этом область, где концентрация атомов глубокого акцептора больше концентрации атомов мелкого донора ($N_a > N_d$), является областью с дырочным типом проводимости и высоким удельным сопротивлением. Эту область называют π -областью. Справа от точки $x = 0$ находится область, в которой основные носители электроны. Так как вблизи данной точки концентрация атомов акцептора сравнима или больше концентрации мелкого донора ($N_a \geq N_d$), то за счет явления компенсации концентрация электронов в этой области мала, а удельное сопротивление области много больше сопротивления исходного арсенида галлия n -типа ($\rho_v \gg \rho_n$). Данную область обозначают как v -область [14].

1.3 Вольт-амперная характеристика лавинного S-диода.

Отличительной особенностью разработанных π - v - n -структур является наличие участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) S-типа в обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) с большими перепадами токов и напряжений, малыми временами переключения из высокоомного в низкоомное состояние, малыми токами переключения. Таким образом, при подаче на S-диод обратного напряжения, превышающего напряжение переключения U_n , после некоторого времени задержки t_z , он переходит из высокоомного состояния в низкоомное проводящее состояние [13].

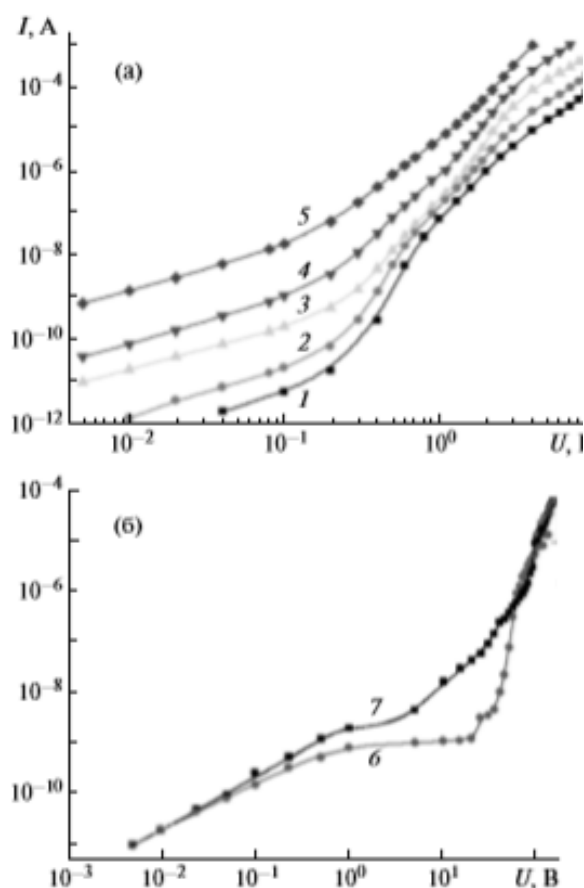


Рисунок 1.2. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ для полученных диффузией хрома в GaAs π - v - n -структур с толщиной базы 20–30 мкм: а – $T = 264$ К (1), 278 К (2), 295 К (3), 316 К (4), 349 К (5); б – $T = 295$ К при увеличении напряжения (6), $T = 295$ К при снижении напряжения [13].

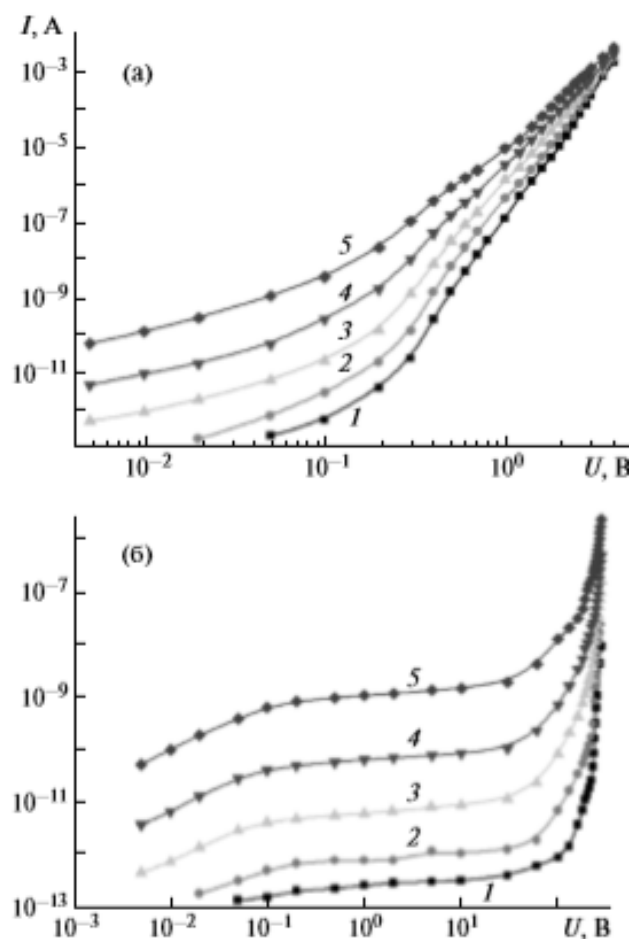


Рисунок 1.3. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ для π — v — n -структур, полученных диффузией хрома и железа в GaAs: 1 – $T = 266$ К, 2 – 279 К, 3 – 297 К, 4 – 318 К, 5 – 345 К.[13]

Участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на обратной ветви вольт-амперной характеристики импульсных лавинных S -диодов на основе π - v - n -структур из арсенида галлия формируется по механизму Хейтца-Кузьмина-Кюрегяна. [15]. Данный механизм проще рассматривать на примере ступенчатого π - v -перехода, находящегося в режиме лавинного пробоя. В процессе лавинного пробоя такого перехода происходит захват дырок на отрицательно заряженные глубокие акцепторные центры в v -области, что приводит к увеличению плотности заряда в области объёмного заряда перехода [16]:

$$\rho^e = e(N_D^+ - N_A^-), \quad (1)$$

где ρ^e – плотность заряда, e – элементарный заряд, N_D^+ – концентрация положительно заряженных ионов донора, N_A^- – концентрация отрицательно заряженных ионов глубокого акцептора в области объёмного заряда. Это приводит к росту максимальной напряжённости электрического поля в области объёмного заряда. Возрастание напряжённости поля приводит к увеличению лавинного тока. По мере увеличения лавинного тока, а, следовательно, и концентрации захваченных дырок, концентрация $N_A^-(x)$ будет уменьшаться, а напряжённость поля расти. Таким образом, в режиме лавинного пробоя в v -области возникает положительная обратная связь между максимальной напряжённостью поля и плотностью лавинного тока, которая и приводит к формированию участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

1.4 Задержка пробоя и переключения π - v - n -структуры

При подаче обратного напряжения электронные компоненты могут переходить в режим пробоя. Отдельные виды приборов специально спроектированы для работы в этом режиме. В большинстве случаев для электронных компонентов, не приспособленных к работе в этом режиме, электрический пробой является обратимым.

Чаще всего электрические пробой протекают по типу туннельных и лавинных. Механизм лавинного пробоя принято описывать с помощью явления ударной ионизации. Под действием сильного электрического поля носители зарядов ускоряются и могут набрать кинетическую энергию, достаточную для того, чтобы при соударении с атомами кристаллической решетки произошла ионизация атома. При этом электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости, приводя к возникновению дырки в валентной зоне. Рождающиеся при ионизации электроны и дырки сами начинают ускоряться и рождать другие пары, тем самым процесс приобретает характер лавины. Для того, чтобы носитель приобрел энергию, достаточную для ионизации атомов, требуется большая напряженность электрического поля, т.е. увеличение приложенного напряжения.

При подаче напряжения величиной $U_{обр} > U_n$ π - v - n -структура переключается в проводящее состояние, формируя импульс тока с субнаносекундным фронтом. Форма импульса, формируемого на согласованном с трактом сопротивлении нагрузки, схематически изображена на рисунке 1.4. Синхронно с подачей смещения на структуру на нагрузке формируется короткий импульс емкостного тока, амплитуда которого пропорциональна геометрической ёмкости структуры и скорости изменения напряжения на структуре (рисунок 3, б). Основной импульс появляется через время задержки, которое обозначается как t_z . Время задержки является функцией приложенного к образцу постоянного (U_o) и импульсного (U_n) напряжений, $t_z = \varphi(U_o, U_n)$.

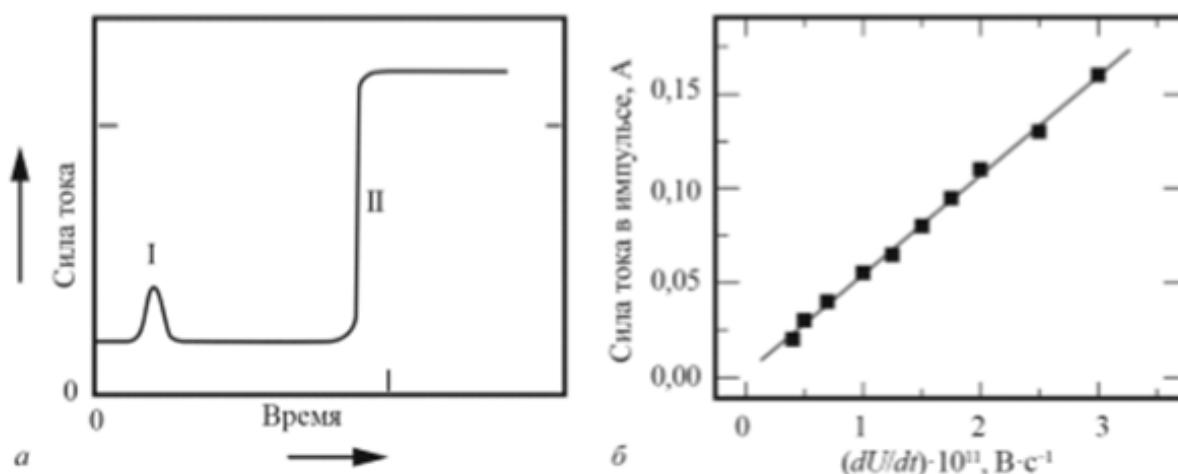


Рисунок 1.4 – Форма импульса на согласованной нагрузке в режиме обострения (а) и зависимость амплитуды импульса от скорости изменения подаваемого на π - v - n -структуру напряжения смещения (б) [6].

Чаще всего пробой начинается вблизи неоднородностей в распределении легирующих примесей кристалла–дефектов или дислокаций. В области дислокации увеличивается концентрация примеси. В результате этого увеличения концентрации примесей вблизи дислокации возрастает число носителей заряда и уменьшается эффективная толщина обедненного слоя, что приводит к локальному уменьшению напряжения пробоя. Такие локальные области пробоя называются областью микроплазмы. Ток, протекающий через каждую микроплазму, имеет характер коротких импульсов, появляющихся и исчезающих в случайные моменты времени.

Задержка переключения π - v - n -структуры связана с задержкой пробоя π - v -перехода по микроплазмам (МП). При наличии глубоких центров в канале МП задержку можно представить выражением [17]:

$$t_z = t_0 + t_l + t_{\text{рел}}, \quad (2)$$

где t_0 – статистическое время задержки лавины; t_l – время формирования лавины; $t_{\text{рел}}$ – релаксационное время, связанное с влиянием глубоких центров.

Процесс ударной ионизации сопровождается захватом свободных дырок на отрицательно заряженные глубокие центры в этом же слое, приводя к перезарядке. В результате этого процесса происходит лавинный рост E в слое умножения, рост тока через структуру и уменьшение толщины π – части ООЗ. Время установления этого процесса можно оценить из выражения [17]:

$$t_{\text{рел}} = 1/\sigma_p^- * v_p * p \quad (3)$$

Концентрация дырок p в слое умножения толщиной d_o' определяется соотношением: $p = \beta(\xi_m) * \Delta n * d_o'$, где Δn – начальная концентрация носителей заряда в МП, а $\beta(\xi_m)$ для GaAs дается выражением $\beta = \beta_o * \exp[-(\xi_o/\xi_m)^2]$. Концентрация зависит от напряжения.

Полагая, что в сильных электрических полях $v_p = v_m$, получим [17]:

$$t_3 = t_0 + t_1 * \exp(\xi_o/\xi_m)^2, \quad (4)$$

где $t_1 = (\sigma_p^- * v_m * \beta_o * \Delta n * d_o')^{-1}$.

В общем виде проанализировать зависимость t_3 от величины поданного напряжения невозможно, так как неизвестна аналитическая зависимость $t_0(\xi_m)$. Однако для некоторых частных случаев зависимость может быть упрощена. Одним из таких является случай, когда импульсное смещение накладывается на постоянное, а последнее выбирается в таком диапазоне напряжений, при которых в структуре протекает ток по МП. В этом случае вероятность нахождения носителя заряда в области МП равна единице, и величина $t_0 \approx q/j_{\text{обр}} * S_o$ (S_o – площадь сечения МП). Учитывая, что Δn связана с плотностью протекания тока простым соотношением $\Delta n = j_{\text{обр}}/q * v_m$, а $\xi_m = 2U_o/d_o$, где $d_o = [2\varepsilon\varepsilon_o * U_o/q * (N_d - N_i)]^{1/2}$, выражение (4) получим в виде [17]:

$$t_3 = t_{30} * \exp(B * U_o^{-1}), \quad (5)$$

где

$$t_{30} = \frac{q^{3/2} * (N_d - N_t)^{1/2}}{\sqrt{2} * (\epsilon\epsilon_0)^{1/2} * \sigma_p^- * \beta_0 * j_{обр} * U_0^{1/2}} \quad (6)$$

$$\text{а } B = [\epsilon\epsilon_0 * \xi_0^2 / 2q * (N_d - N_t)].$$

Можно увидеть по этому выражению, что время зависит по экспоненциальному закону от напряжения.

Наиболее вероятным механизмом изменения напряженности электрического поля в канале МП и, как следствие, изменение связанной с ним составляющей задержки, является захват дырок, образованных при лавинном пробое π - v -перехода, на глубокие отрицательно заряженные центры. Таким образом, задержка пробоя и переключения π - v - n -структуры в проводящее состояние связана с процессами, протекающими в области МП при пробое π - v -перехода. Основной вклад дают время запаздывания лавины и время захвата лавинных дырок на глубокие отрицательно заряженные центры [6].

2 Методика эксперимента

2.1 Методика создания лавинных S-диодов

Исследовались импульсные лавинные S-диоды, электронно-дырочный переход которых создавался легированием n -GaAs примесями Cr и Fe (рисунок 2.1). Исходные пластины GaAs для лавинных S-диодов были выращены методом вертикальной направленной кристаллизации. Образцы представляли собой опластины GaAs (100) с концентрацией донорной примеси $n = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, с одной стороны которых электронно-лучевым испарением наносили пленку хрома или железа толщиной ≈ 100 нм. Высокоомные слои GaAs получали путем диффузии в «открытой» системе в потоке осушенного аргона в печи диффузионных отжигов (УДО-3). Диффузия осуществлялась при температурах 800 – 1100 °С согласно технологии [18, 19]. В составе установки для проведения диффузии использовалась трехзонная печь производства фирмы ИТМ под управлением температурных микропроцессорных регуляторов РПН-4. Осушение аргона проводилось при помощи цеолита. Точка росы газа была не выше 70 °С и проверялась прибором ИВА.

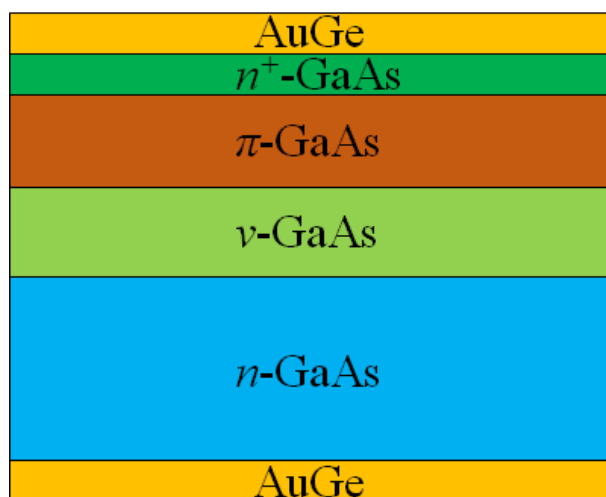


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение лавинного S-диода

Для получения эффективного инжектирующего контакта к GaAs π -типа дополнительно создавался n^+ -слой, путем диффузии Si. Полученные пластины

резали на дискретные квадратные диоды (350x350, 500x500, 1500x1500 мкм) при помощи дисковой резки на оборудовании ADT Vectus 7100. В качестве омических контактов использовался AuGe, которые были изготовлены с обеих сторон структуры.

После измерения электрических характеристик полученных диодов их помещали в политетрафторэтиленовый корпус с окном (рисунок 2.2). Лавинный S-диод заливался оптически прозрачным компаундом с высокой диэлектрической прочностью, для предотвращения разрушения поверхности кристаллов при электрическом пробое воздуха, тем самым, повышалась надежность изготавливаемых S-диодов.



Рисунок 2.2– Лавинные S-диоды во фторопластовом корпусе.

В таблице 2.1 представлены параметры полученных лавинных S-диодов.

Таблица 2.1-Параметры лавинных S-диодов

№	Структура диода	Диффузант	Напряжение переключения (в схеме релаксатора)
1	$M\text{-}\pi\text{-}n$	Fe	120
2	$M\text{-}\pi\text{-}v\text{-}n$	Fe, Cr	400
3	$M\text{-}v\text{-}n$	Cr	Не переключается
4	$n^+\text{-}\pi\text{-}v\text{-}n$	Fe	100
5	$p^+\text{-}\pi\text{-}v\text{-}n$	Fe	100
6	$p^+\text{-}\pi\text{-}v\text{-}n$	Fe	100

2.2 Методы измерения характеристик лавинных S-диодов

Для отбраковки изготовленных диодов и измерения величины напряжения переключения использовался характериограф Characteriscope-Z Type TR-4805 с механическим манипулятором, где в качестве зонда использовалась вольфрамовая игла.

В работе использовался импульсный режим запуска лавинного S-диода, когда в стационарном состоянии напряжение на диоде равно нулю [20]. Измерения проводились в схемах обострителя на нагрузочном сопротивлении 50 Ом с запускающим фронтом, равным 1-2 нс и 50 нс (рисунок 2.3, 2.4). Частота импульсов тока составляла 3 Гц – 1 кГц.

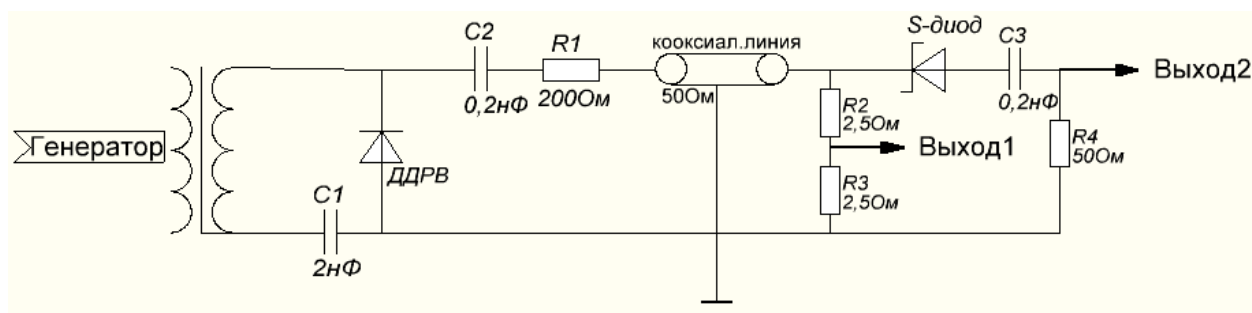


Рисунок 2.3 – Схема обострителя с ДДРВ–Дрейфовый диод с резким восстановлением.

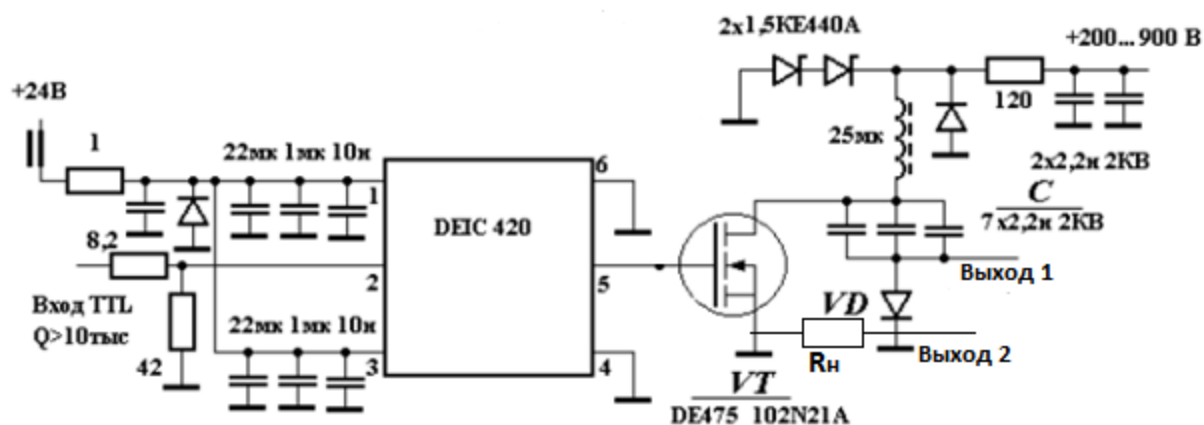


Рис.4 – Схема быстродействующего импульсного источника питания.

Измерения проводили с использованием осциллографа Tektronix дпо 70804С (полоса пропускания 8 ГГц, минимальный шумовой джиттер (временная нестабильность) 300 фс (RMS)) и с осциллографа LeCroy 104 Xs (1 ГГц). Измерение джиттера лавинного S-диода проводилось в автоматическом режиме с использованием программного обеспечения Tektronix. Джиттер определялся на уровне напряжения равном половине высоты переднего фронта импульса с нагрузочного сопротивления относительно половины высоты запускающего импульса.

В качестве запускающего генератора использовался специально изготовленный формирователь импульсов с перестраиваемой амплитудой (до 1000 В). В качестве источника питания использовался преобразователь постоянного напряжения TRACO THV 12-2000P (DC/DC-преобразователь). Входное напряжение преобразователя составляло +12 В, а максимальное выходное напряжение составляло +2 кВ. Схема установки для измерения джиттера представлена на рисунке 2.5.

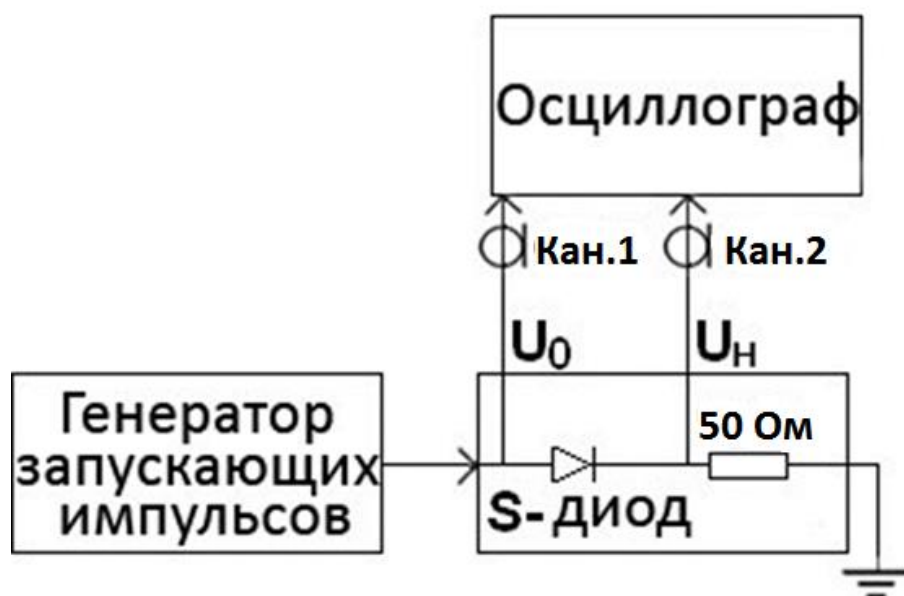


Рисунок 2.4 – Схема установки

3 Экспериментальная часть

3.1 Описание результатов

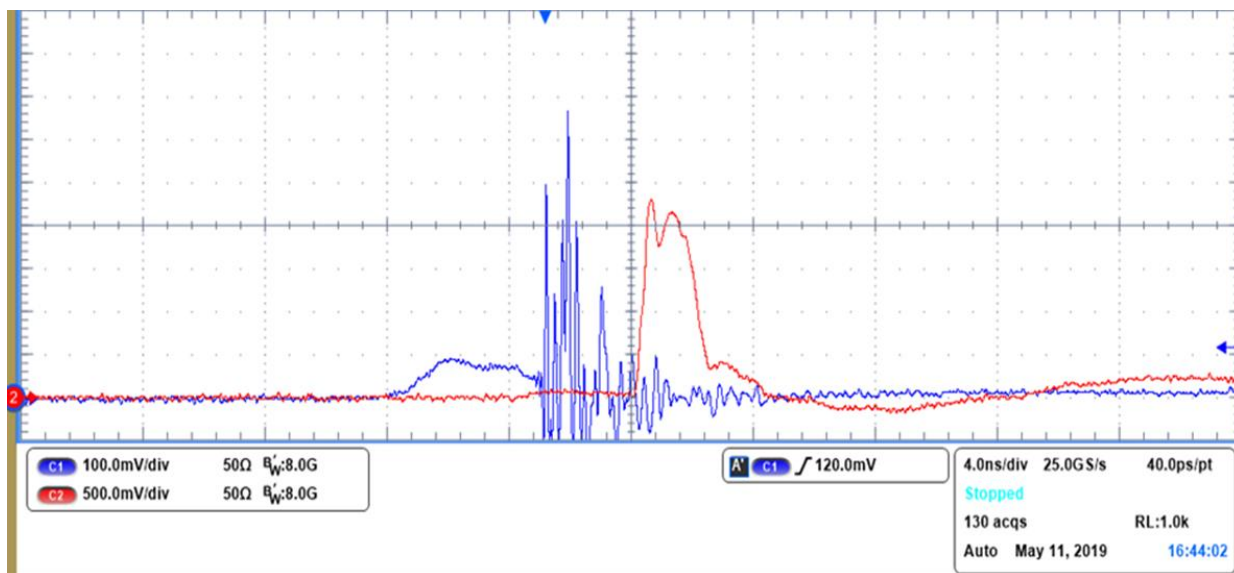


Рис.3.1– Изображение с осциллографа. Сигналы сняты со схемы обострителя с ДДРВ.

Из полученных данных строилась зависимость времени задержки переключения от величины напряжения. Наблюдаемая зависимость времени задержки переключения от напряжения близка к линейной в полулогарифмических координатах от U^{-1} (рисунок 3.2). С ростом напряжения в 1,5 раза время задержки переключения уменьшалось с 30мкс до 50 нс. Можно сделать вывод, что чем больше напряжение, тем меньше задержка переключения исследуемых структур. По величине напряжения, при котором лавинные S-диоды переходят в открытое проводящее состояние видно, что GaAs легированный Cr/Fe и Cr более высоковольтные, чем GaAs, легированный только Fe.

Согласно полученным результатам, время задержки зависит по экспоненциальному закону от обратного напряжения, что согласуется с выражением (5). Данный факт подтверждает гипотезу о том, что задержка переключения связана с процессами, протекающими в области микроплазмы при пробое π - v -перехода, а основной вклад дают время запаздывания лавины и время захвата лавинных дырок на глубокие отрицательно заряженные центры [6].

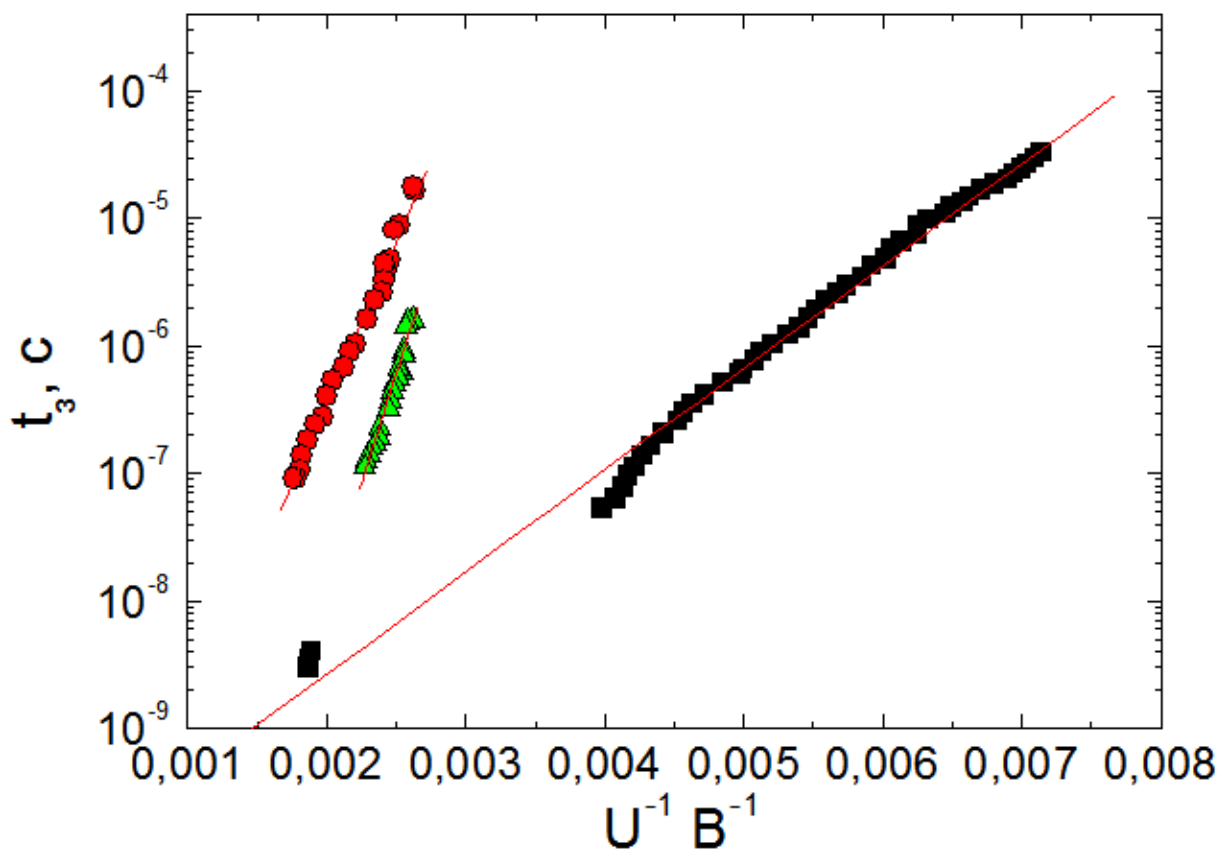


Рисунок 3.2 – Зависимость времени задержки переключения от величины напряжения.

При переключении S -диодов из различных партий наблюдается временная нестабильность переключения, так называемый джиттер, связанная с неуправляемым изменением времени задержки от включения к включению. Джиттер определяли на уровне напряжения равном половине высоты переднего фронта импульса с нагрузочного сопротивления относительно половины высоты запускающего импульса.

Типичная гистограмма для среднего времени задержки, представлена на рисунке 3.3. Гистограмма хорошо аппроксимируется нормальным распределением (сплошная линия, рис. 3.3), что говорит о случайном характере переключения. Это согласуется с общими представлениями о механизме переключения, который связывается со случайным процессом - лавинным размножением неравновесных носителей заряда при ударной ионизации.

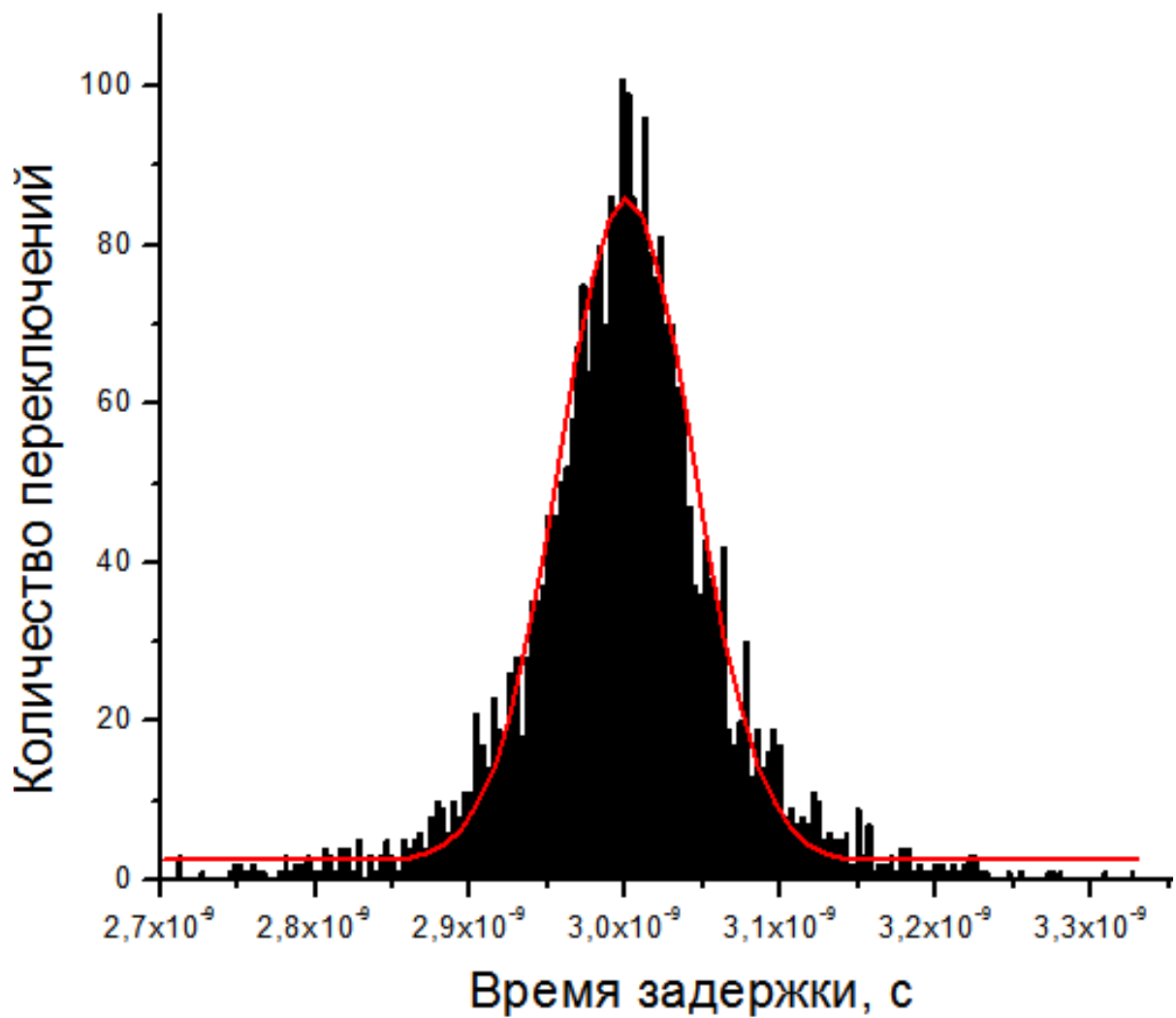


Рис.3.3 – Гистограмма переключений с нанесённой нормальной функцией распределения

На рисунке 3.4 показана зависимость джиттера от обратного напряжения. Здесь джиттер измерялся для 600 событий (переключений) и представлял собой общий диапазон (размах) измеренной временной нестабильности. Таким образом, джиттер равен $6 \cdot \sigma$ (σ - стандартное отклонение времени задержки) для нормальной функции:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

где параметр μ — математическое ожидание (среднее значение), а параметр σ — среднеквадратическое отклонение (σ^2 — дисперсия) распределения.

Из рисунка 3.4 видно, что джиттер уменьшается при увеличении импульсного напряжения. Для временной задержки 100 нс *S*-диоды на основе структур GaAs:Fe и GaAs:Cr, Fe имеют джиттер 1,4 нс и 2 нс, соответственно. Диоды на основе GaAs:Cr структуры имеют джиттер равный 20 нс при том же времени задержки.

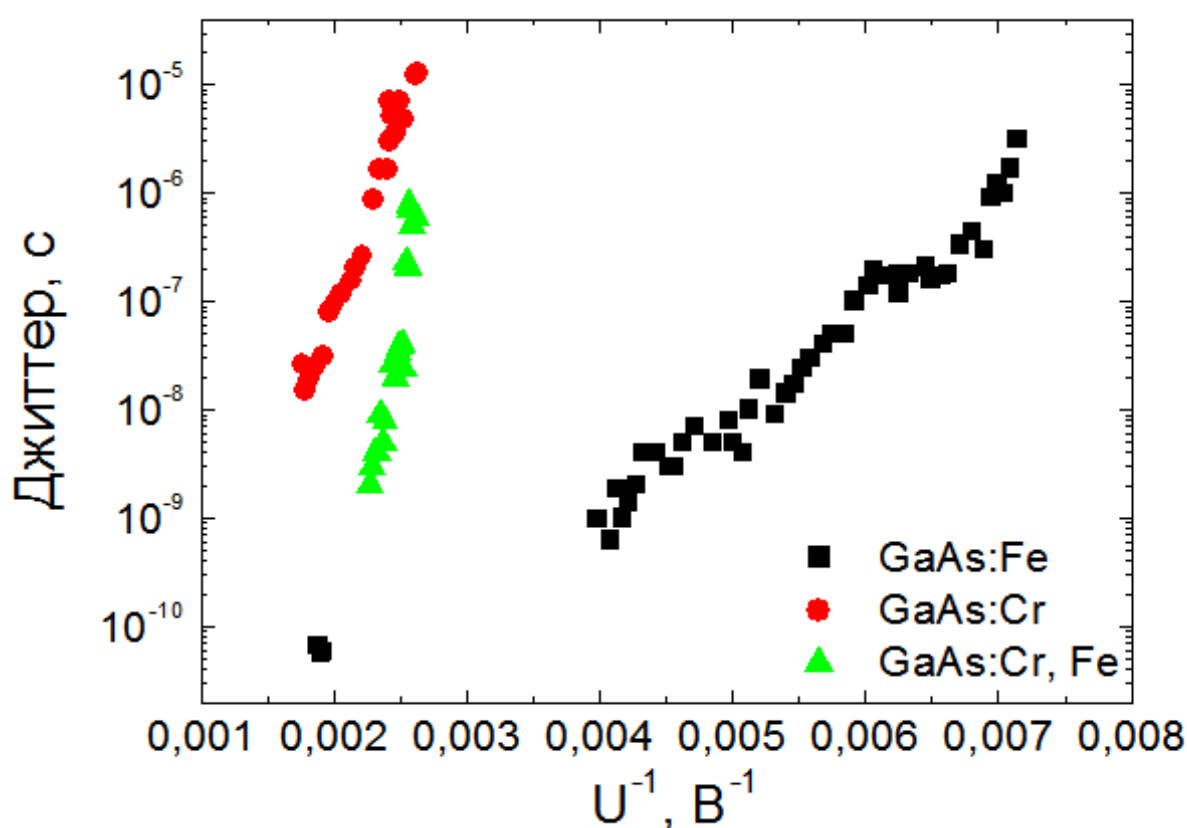


Рисунок 3.4 –Зависимость джиттера от обратного напряжения

На рисунке 3.5 показана зависимость отношения джиттера к временной задержке (отношение j/t_3) от импульсного напряжения запуска. Отношение j/t_3 характеризует относительную стабильность переключения и может быть использована в качестве критического параметра для сравнительного анализа различных типов *S*-диодов. Очевидно, что для повышения стабильности следует

уменьшить временную задержку переключения и соотношение j/t_3 должно быть постоянным. Однако в эксперименте отношение j/t_3 уменьшается и только при высоких поданных напряжениях выходит на насыщение. Этот факт можно объяснить изменением механизма задержки переключения: при насыщении для высоких напряжений мы имеем один механизм переключения с постоянным отношением j/t_3 .

В схеме с быстрым запуском лавинного S -диода (с ДДРВ ключом) измерения проведены только для низковольтных структур, легированных железом (4-6, таблица 2). Как видно из рисунка 3.4. в данном случае соотношение j/t_3 несколько увеличивается при росте поданного напряжения, но все равно остается ниже аналогичных значений для структур, легированных только хромом.

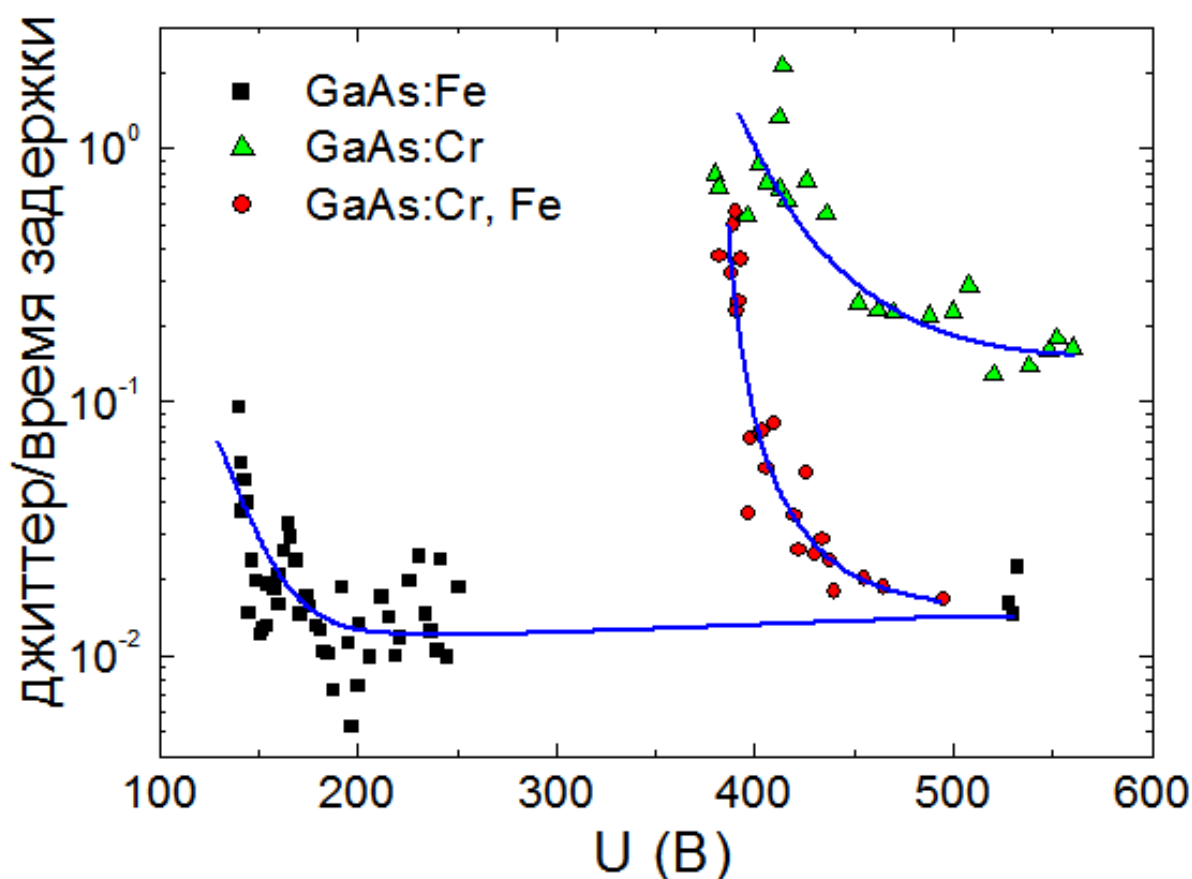


Рисунок 3.5–Зависимость отношения джиттера к временной задержке от импульсного напряжения запуска

Для применения на практике важно обеспечить более низкое соотношение j/t_3 . Эксперимент показывает, что нестабильность переключения S -диодов, легированных железом, на порядок меньше по сравнению с диодами,

легированными Cr. Предполагая постоянное соотношение j/t_3 , мы можем оценить джиттер для разных временных задержек. Например, при временных задержках 1-10 нс джиттер должен составлять 100-1000 пс для S-диодов, легированных Cr (около 10% временной задержки). Эти значения соответствуют стандартному отклонению 17-170 пс, которое очень близко к среднеквадратичному значению нормального распределения (σ , см. формулу 7) фотопроводящих ключей с высоким коэффициентом усиления GaAs (14-96 пс [21-24]). В связи с этим S-диодные структуры, легированные железом (GaAs:Fe и GaAs:Fe, Cr), выглядят более перспективными из-за более низкого джиттера (около 1 % временной задержки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование временной нестабильности переключения S -диодов, измерено времени задержки включения и статистического разброса этого параметра (джиттера) в зависимости от условий запуска (постоянное или импульсное напряжение смещения) и типа глубокой примеси, используемой при изготовлении структур для S -диодов (хром или железо).

Установлено, что время задержки зависит по экспоненциальному закону от обратного напряжения, что согласуется с ранее представленными экспериментальными данными. Таким образом, согласно полученным результатам, основной вклад в формирование времени задержки переключения дают время запаздывания лавины и время захвата лавинных дырок на глубокие отрицательно заряженные центры.

Представлены экспериментальные результаты исследования влияния типа глубокого уровня на временную задержку переключения и джиттер для различных S -диодов. Установлено, что время задержки переключения и джиттер имеют одинаковый характер зависимости от импульсного напряжения для всех измеренных S -диодов. В качестве критического параметра для сравнительного анализа стабильности переключения предложено использовать отношение джиттера к временной задержке (отношение j/t_3). В эксперименте было обнаружено уменьшение отношения j/t_3 и насыщение при увеличении импульсного напряжения запуска. Лавинные S -диоды, легированные примесями Fe и Cr/Fe, демонстрируют гораздо лучшую стабильность, чем диоды с Cr. Таким образом, S -диодные структуры, легированные железом, более перспективны из-за низкого джиттера, который достигает 1% от времени задержки переключения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Неменов Л.Л., Соминский М.С. // Основы физики и техники полупроводников// Академия наук СССР. 1974. С.291.
2. Дирнли Дж., Нортроп Д.// Полупроводниковые счетчики ядерных излучений // под ред. В.С. Вавилова. Мир. 1966. С.360
3. Федосеева О.П., Гаценко Л.С., Захарчук О.В. [и др.]. Кремниевые детекторы ионизирующих излучений// Энергоатомиздат. 1983. С.160.
4. Александров А.А., Кушнирук В.Ф., Пятков Ю.В. [и др.]// Методы экспериментальной ядерной физики в исследованиях процессов и продуктов деления// Энергоатомиздат, 1983. С.33–38.
5. Buttar C.M. GaAs detectors-A review // Nuclear Instrum. & Meth. in Phys. Res. 1997. С.1–8
6. Хлудков С.С., Толбанов О.П., Вилисова М.Д., Прудаев И.А. // Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами// Томский государственный университет. 2016. С.20,78,124.
7. Попов Б.П., Соболевский В.К., Апушкинский Е.Г., Савельев В.П. // ФТП. – 2005. – Т. 39. – № 5. – С. 521.
8. Хлудков С.С. // Вестник Томского государственного университета. Сер. Физика. – 2005. – Т. 285. – С. 84.
9. Hirose S., Yamaura M., Haneda S., et al. // Thin Solid Films. – 2000. – V. 371. – P. 272.
10. Haneda S., Munekata H., Takatani Y., et al. // J. Appl. Phys. – 2000. – V. 87. – P. 6445.
11. Омеляновский Э.М., Фистуль В.И. Примеси переходных металлов в полупроводниках. – М.: Металлургия, 1983. С.192 .
12. Электрические свойства GaAs легированного железом //С.С. Хлудков, И.А. Прудаев, В.А. Новиков, Д.Л. Будницкий, К.С. Лопатецкая //Известия высших учебных заведений, 2013,Т. 56, № 12, С. 103–105
13. Переключающие лавинные S-диоды на основе GaAs многослойных структур // И. А. Прудаев, С. С. Хлудков, М. С. Скакунов, О. П. Толбанов// приборы и техника эксперимента, 2010, № 4, С. 68–73

14. Прудаев И.А. // Автогенератор на лавинном s-диоде// Методические указания. Томск. 2010. С.3-8
15. Кузьмин В.А., Кюрегян А.С. // Радиотехника и электроника// 1975. Т.20. №7. С.1449.
16. Гаман В.И. // Физика полупроводниковых приборов // Учебное пособие для вузов. Томск. 2000. С.426.
17. Белобородов П.Ю., Толбанов О.П., Хлудков С.С. // Влияние процессов перезарядки глубоких центров на задержку пробоя арсенид-галлиевых π - v - n -структур, компенсированных железом // ФТП Томск. 1988. Т.22. С.755-757.
18. Prudaev I. A. and Khludkov S. S. Diffusion and solubility of electrically active iron atoms in gallium arsenide // Russ. Phys. J. – 2008. – V. 51. – P. 1157.
19. Ardyshev M. V., Prudaev I. A., Tolbanov O. P. and Khludkov S. S. Chromium diffusion in GaAs in an open system // Inorganic Materials. – 2008. – V. 44. – P. 918.
20. Kopyev V. V., Prudaev I. A., Romanov I. S. Comparative analysis of efficiency droop in InGaN/GaN light- emitting diodes for electrical and optical pumping conditions // J. Phys.: Conf. Ser. – 2014. – V. 541. – P. 012055.
21. Zutavern F J, Loubriel G M, McLaughlin D L, O'Malley M W, Helgeson W D, and Denison G J 1993 Proc. SPIE 1873 50
22. Gaudet J A, Skipper M C, Abdalla M D, Ahern S M, Romero S P, Mar A, Zutavem F J, Loubriel G M, O'Malley M W, and Helgeson W D 2000 Proc. SPIE 4031 121
23. Shi W, Zhang L, Gui H, Hou L, Xu M, and Qu G 2013 Appl. Phys. Lett. 102 154106
24. Gui H, Shi W, Ma C, Fan L, Zhang L, Zhang S, and Xu Y 2015 IEEE Photon. Tech. Lett. 27 2001

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: gal4enko158@gmail.com / ID: 6374159

Проверяющий: (gal4enko158@gmail.com) / ID: 6374159)

Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»- <http://users.antiplagiat.ru>

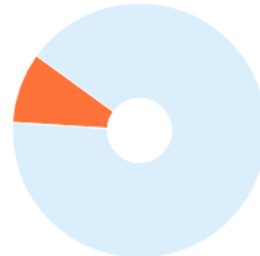
ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 3
Начало загрузки: 23.06.2019 16:26:02
Длительность загрузки: 00:00:02
Имя исходного файла: Гальченко Р.А.
ДИПЛОМ (1 после проверки)¹
Размер текста: 1155 кБ
Символов в тексте: 32664
Слов в тексте: 4106
Число предложений: 339

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 23.06.2019 16:26:05
Длительность проверки: 00:00:01
Комментарии: не указано
Модули поиска: Модуль поиска Интернет

ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
8,94% 	0% 	91,06% 



Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска
[01]	4,43%	Скачать PDF	http://openbooks.ifmo.ru	21 Мар 2018	Модуль поиска Интернет
[02]	1,19%	[IEEE 2015 International Siberian Conference on Control and Communicatio...	https://doi.org	31 Авг 2018	Модуль поиска Интернет
[03]	0%	Сборник трудов IV Всероссийского конгресса молодых ученых (27/28)	http://research.ifmo.ru	21 Сен 2016	Модуль поиска Интернет

Еще источников: 10

Еще заимствований: 3,31%