

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук



Иванов Михаил Сергеевич

**Пространственно-временная динамика
электронно-дырочной плазмы в лавинных
импульсных приборах субнаносекундного
диапазона**

Специальность 1.3.11 —
«Физика полупроводников»

Научный доклад

Санкт-Петербург — 2023

Научный руководитель:

ведущий научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук

Родин Павел Борисович

Рецензент:

главный научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук

Левинштейн Михаил Ефимович

Рецензент:

доцент, кандидат физико-математических наук

Прудаев Илья Анатольевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Открытие в ФТИ им. Иоффе явления задержанного ударно-ионизационного пробоя высоковольтных $p - n$ -переходов более 40 лет назад [1] положило начало субнаносекундной импульсной полупроводниковой электронике большой мощности. Это научно-техническое направление продолжает развиваться по сей день на практике и в теории.

Формирование киловольтных субнаносекундных перепадов напряжения актуально для применения в таких областях как сверхширокополосная радиолокация, ускорительная техника, радиоэлектронное противодействие, системы очистки промышленных газов, радиолокация через препятствия и накачка лазеров [2; 3]. Важнейшим и исторически первым полупроводниковым прибором, разработанным для формирования стопикосекундного переднего фронта коротких импульсов, является диодный обостритель импульсов (ДО). Его функционирование основано на явлении задержанного лавинного пробоя в сильных электрических полях (около 300 кВ/см), значительно превосходящих эффективный порог ударной ионизации в кремнии (примерно 200 кВ/см).

Задержанный лавинный пробой происходит при приложении к диодной $p^+ - n - n^+$ структуре киловольтного импульса обратного напряжения с настолько большой скоростью нарастания (более 1 кВ/нс), что инициированный тепловыми носителями стационарный пробой не успевает развиваться [1]. При быстром увеличении обратного напряжения достигается двукратное перенапряжение прибора, после которого он за время около ста пикосекунд переключается в проводящее состояние с низким остаточным напряжением, на порядок меньше пробойного. Таким образом, задержанный пробой представляет собой особый динамический режим лавинного пробоя высоковольтного $p-n$ -перехода.

Задержанный ударно-ионизационный пробой был обнаружен в кремнии [1] и арсениде галлия [4]. Недавно появилось сообщение о реализации этого режима пробоя в карбиде кремния [5]. В работе исследуются диодные обострители на основе Si и GaAs. В последнем обнаружен целый класс новых ударно-ионизационных явлений, связанных с отрицательной дифференциальной подвижностью электронов и ионизирующими биполярными

доменами Ганна [6]. Эти явления, невозможные в кремнии, делают арсенид галлия уникальным материалом для изготовления приборов импульсной сильноточной электроники.

Динамика сверхбыстрого возникновения электронно-дырочной плазмы (ЭДП), обеспечивающей проводящее состояние диодного обострителя, и дальнейшая эволюция ЭДП после переключения, до сих пор недостаточно изучены. Это отражает в целом недостаточное понимание механизма задержанного ударно-ионизационного пробоя. Так, уже первая работа по численному моделированию [7] указала на необходимость пересмотра предложенного И.В. Греховым и А.Ф. Кардо-Сысоевым механизма переключения, основанного на возбуждении плоского фронта ионизации TRAPATT-типа [8]. Остается также открытым теоретически и практически важный вопрос об однородности распределения ЭДП по площади поперечного сечения прибора как на этапе переключения, так и на этапе пропускания тока.

Быстротечность процесса (около 100 пс) не позволяет экспериментально исследовать внутреннюю динамику переключения в кремниевых приборах и затрудняет такие исследования в приборах на основе арсенида галлия. Сочетание высоких напряжений с малыми временами делает даже точные измерения переходных характеристик сложной задачей [9]. В этом состоит одна из причин неудовлетворительного понимания физики переключения. Сильная нелинейность и неоднородность процессов в обострителе ограничивают возможность развить аналитическую теорию. В силу этого, в согласии с общей тенденцией современной физики распределенных активных сред, на первый план выходит имитационное численное моделирование, проводимое в тесном контакте с экспериментом. Недавние экспериментальные работы по кремниевым [9] и арсенидгаллиевым [10],[A1] диодным обострителям предоставили новые важные данные для анализа процесса переключения ДО и сравнения с моделированием. В работе [9] и предшествующих работах [10; 11] В.И. Брылевский впервые с высоким временным разрешением независимо и одновременно измерил как ток, так и напряжение на высоковольтном кремниевом обострителе при 100-пикосекундном переключении. Это позволило провести сравнение с экспериментом на качественно новом уровне. В работе [A1] А.В. Рожков обнаружил новое физическое явление – длительное (до 100 нс) самоудержание («залипание»,

или lock-on) обратно-смещенного арсенидгаллиевого обострителя в проводящем состоянии после переключения. Объяснение залипания в рамках имеющихся представлений о лавинном пробое невозможно. Эксперименты [9; 10],[A1] в значительной степени стимулировали настоящую диссертационную работу.

Значительная часть открытых вопросов относится к динамике созданной в обострителе ЭДП после переключения — «постпробойной» динамике. Традиционно диодный обостритель рассматривается в контексте обострения переднего фронта коротких наносекундных импульсов. Для коммутации более длинных импульсов обычно применяются четырехслойные тиристорные структуры, уступающие по скорости переключения диодам [12]. Возможность коммутации обострителем импульсов длиннее нескольких наносекунд, а тем более имеющих субмикросекундную длительность ранее не изучалась. Считалось, что максимальная длительность протекающего через ДО тока ограничивается дрейфовым рассасыванием ЭДП из базы диода [2; 13] и поэтому не превышает единиц наносекунд. Вопрос о возможности поддержания проводящего состояния диодных обострителей при коммутации квазипрямоугольных импульсов субмикросекундной длительности за счет явлений двойной лавинной инжекции и, в случае арсенида галлия, ударной ионизации в биполярных доменах Ганна оставался открытым.

Целью данной работы является исследование нелинейной динамики неравновесной электронно-дырочной плазмы в высоковольтных кремниевых и арсенидгаллиевых диодах, переключаемых в проводящее состояние быстронарастающим импульсом обратного напряжения. Задачей исследования является численное моделирование процесса переключения и постпробойной динамики, сравнение с экспериментом и определение физических механизмов субнаносекундного переключения и поддержания проводящего состояния.

Научная новизна:

1. На основании сравнения результатов численного моделирования и эксперимента установлен механизм переключения кремниевых и арсенидгаллиевых диодных обострителей. Изучена однородность процесса переключения по площади диода.

2. Впервые показана возможность удержания проводящего состояния обратносмещенного диодного обострителя за счет ударной ионизации. Исследованы механизмы поддержания проводимости в кремниевых и арсенидгаллиевых диодных структурах.
3. Сопоставление полученных численным моделированием результатов с экспериментом позволило сделать вывод о неоднородности процесса переключения по площади диода и о ее определяющей роли как в быстродействии прибора, так и в явлении удержания проводящего состояния после переключения.
4. Дано последовательное самосогласованное описание процессов переключения диодного обострителя и волновых процессов в коаксиальном тракте, содержащим обостритель. Такое описание сделало возможным количественное сравнение моделирования и эксперимента.
5. Установлена определяющая роль ионизирующих биполярных домена Ганна в субнаносекундном переключении и длительном удержании высокопроводящего состояния обострительных диодов на основе арсенида галлия.

Методология и методы исследования. Основным методом исследования, применявшимся в диссертационной работе, является численное моделирование физических процессов в приборе путем совместного решения уравнений диффузионно-дрейфовой модели, уравнения Пуассона и уравнений для внешней цепи. Для моделирования применялось как программное обеспечение, разработанное В. Хундсдорфером (CWI, Amsterdam), так и коммерческий программный пакет TCAD Silvaco. Полученные результаты сопоставлялись с экспериментальными результатами, полученными соавторами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Стопикосекундное время переключения высоковольтного кремниевого диода в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя достижимо только при переключении малой части площади и определяется не временем заполнения проводящих каналов неравновесными носителями, как это считалось ранее, а временем разряда пассивной части структуры через уже сформированные проводящие

- каналы вследствие протекания циркуляционного тока. Этот разряд сопровождается дополнительной ионизацией в проводящем канале.
2. В арсенидгаллиевых диодных обострителях стопикосекундное переключение обусловлено генерацией электронно-дырочной плазмы в коллапсирующих доменах Ганна. Доменный механизм переключения качественно отличается от механизма переключения кремниевых приборов и объясняет экспериментально наблюдаемое переключение GaAs структур с аномально большой (несколько наносекунд) задержкой.
 3. При коммутации квазипрямоугольного импульса субмикросекундной длительности проводящее состояние кремниевого диодного обострителя после переключения поддерживается двойной лавинной инжекцией при остаточном напряжении, близком к напряжению стационарного лавинного пробоя. Время поддержания этого состояния ограничено эффектами шнурования тока и достигает сотни наносекунд.
 4. Генерация неравновесных носителей в коллапсирующих доменах Ганна способна поддерживать проводящее состояние обратносмещенного арсенидгаллиевого диода при низком остаточном напряжении в течение длительного (100 нс) времени, ограниченного только джоулевым саморазогревом.
 5. При стопикосекундном переключении диодного обострителя, помещенного в разрыв центральной жилы коаксиального тракта, сумма напряжения на аноде обострителя и напряжения на согласованной омической нагрузке равна удвоенному импульсу запускающего генератора.

Достоверность полученных результатов обеспечивается достигнутым количественным согласием с имеющимися экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференциях: Международная конференция Физика.СПб 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.; 3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures; IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM); XVIII, XIX, XXII, XXIV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике;

Международная зимняя школа по физике полупроводников; XV Российская конференция по физике полупроводников.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 10 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 8 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели и задачи, а также основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет обзор литературы, посвященной субнаносекундному переключению диодных обострителей на основе Si и GaAs. Приводятся основные численные методы и модели, использованные в диссертации.

Во **второй главе** в соответствии с результатами работы [A2] описано взаимодействие диодного обострителя с внешней цепью с распределенными параметрами — коаксиальным трактом — на этапе субнаносекундного переключения. Времени переключения 100 пс отвечает электромагнитная длина 3 см, меньшая характерных размеров внешней цепи. В силу этого динамика обострителя не может быть корректно описано в рамках схемы с сосредоточенными элементами. Точные измерения переходных процессов требуют применения согласованного коаксиального тракта с подключением ДО в разрыв центральной жилы (рис. 1а). При таком подключении обостритель представляет собой нестационарную неоднородность тракта, проводимость которой быстро меняется при переключении ДО из блокирующего состояния в проводящее. Таким образом, необходимо самосогласованное описание внутренней динамики обострителя и волновых процессов в тракте.

Предшествующие работы по численному моделированию диодных обострителей [7; 14—16] (за исключением диодныхборок [17]) проводились без учета уравнений, описывающих коаксиальный тракт. Такой подход не позволяет провести количественное сравнение с экспериментом.

В данной главе дано самосогласованное описание динамики обострителя и волновых процессов в тракте. Описан эффект удвоения напряжения

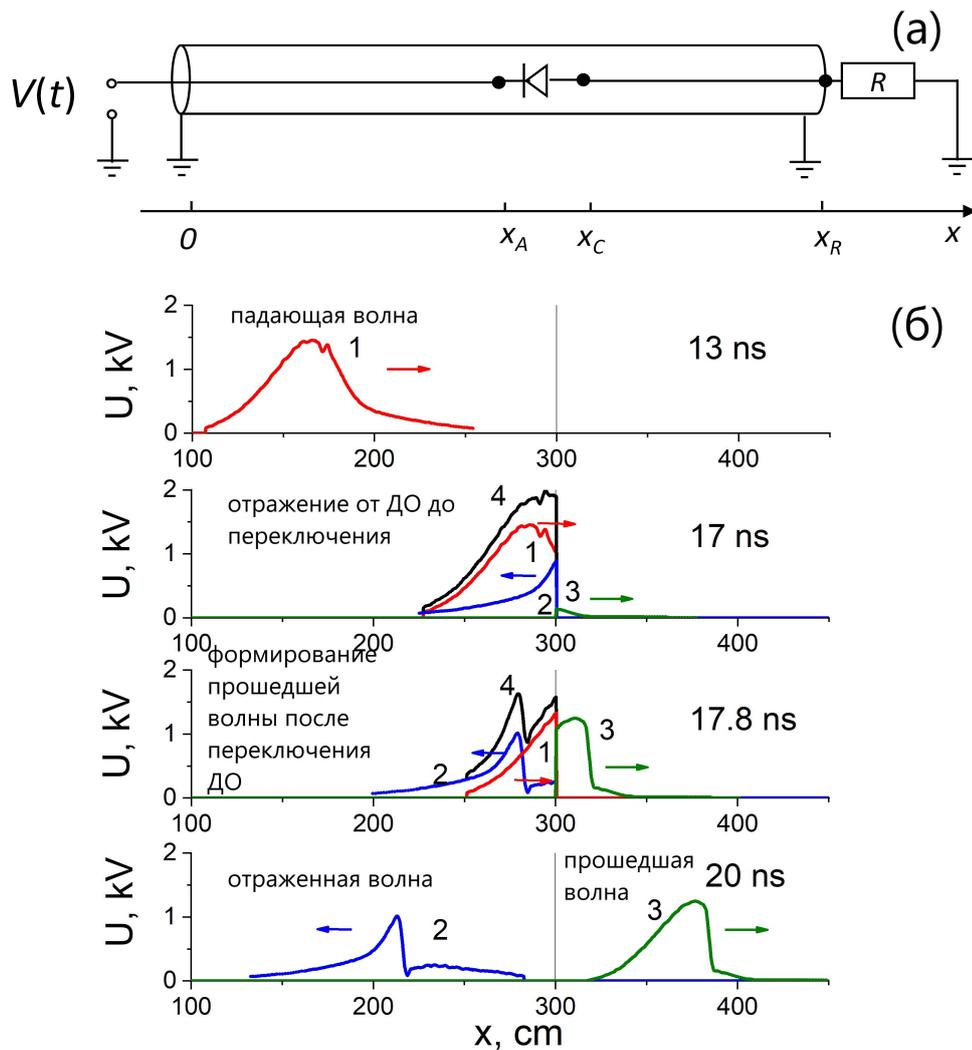


Рис. 1 — Схема включения диодного обострителя (а) и распределения напряжения в коаксиальном тракте (б). Диод помещен в разрыв центральной жилы нагруженного на согласованное сопротивление 50Ω кабеля между точками с координатами x_A и x_C . Падающая $U_i(t,x)$ (1), отраженная $U_r(t,x)$ (2) и прошедшая $U_t(t,x)$ (3) волны, а также мгновенная сумма $U(t,x)$ падающей и отраженной волн (4) реконструированы по данным эксперимента [9].

на аноде обострителя перед переключением, обусловленный наложением падающей волны от генератора и отраженной волны от диодного обострителя как от сложной неоднородности центральной жилы кабеля. Установлены соотношения между амплитудами падающей, отраженной и прошедшей волн и измеряемыми в эксперименте напряжениями. Также выведены соотношения между измеряемыми в эксперименте напряжениями: напряжением

на аноде ДО U_A , (представляющим собой суммарное напряжение на диоде и нагрузке), напряжением на нагрузке U_R и формой импульса генератора $V(t)$. Разность первых двух позволяет вычислить напряжение на диоде, недоступное для прямого измерения. Получено соотношение, которое можно использовать, чтобы восстановить одну из этих трех величин по двум другим: полусумма импульса на нагрузке и напряжения на аноде представляет собой импульс запускающего генератора:

$$U_A + U_R = 2V(t). \quad (1)$$

На основе полученных аналитических формул и экспериментальных данных определена временная зависимость коэффициента отражения обострителя и картина распределения падающей, отраженной и прошедшей волны в коаксиальном кабеле. Реконструированные волновые процессы в тракте при переключении ДО показаны на рис. 1b.

Третья глава посвящена анализу возможных сценариев сверхбыстрого переключения кремниевых диодных обострителей и основана на результатах работ [A3; A4]. Показано, что за внешне схожими переходными процессами (рис. 2a) может стоять качественно различная внутренняя динамика электронно-дырочной плазмы в приборе. Проведено численное моделирование возможных пространственно-временных мод процесса переключения кремниевого диодного обострителя. Две из них являются волновыми — TRAPATT-фронт ударной ионизации [8] (кривые 1) и волна колмогоровского типа [18; 19] (кривые 2). Также описана новая неволновая мода — квазиоднородный пробой (кривые 3). Четвертая мода, которая будет подробно описана в следующей главе — пробой на части площади в режиме «back-stroke». Решающим фактором, определяющим то, какая мода задержанного ударно-ионизационного пробоя реализуется, является степень легирования базы диода. Именно она определяет степень однородности распределения электрического поля по длине базы (рис. 2b). В данной главе показано, что переход между этими пространственно-временными модами переключения происходит при изменении только одного параметра — концентрации легирующей примеси в базе кремниевого диода в интервале от 10^{14} до 10^{12} см⁻³.

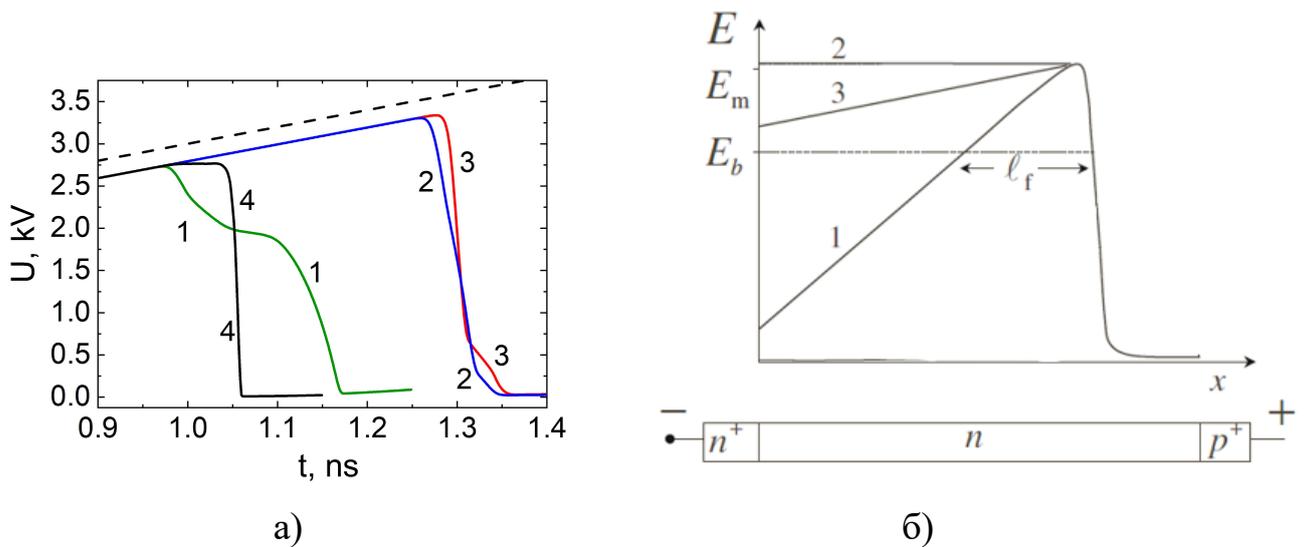


Рис. 2 — (а) Зависимости напряжения на структуре от времени. (б) Схематическое изображение профиля электрического поля в различных пространственно-временных модах. Представлены кривые, соответствующие: 1 — TRAPATT-волне ($N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$), 2 — колмогоровской волне ($N_d = 10^{13} \text{ см}^{-3}$), 3 — квазиоднородному пробоя ($N_d = 10^{12} \text{ см}^{-3}$), 4 — неоднородному по площади переключению в режиме back-stroke.

Модель сверхбыстрой волны ударной ионизации TRAPATT-типа была предложена в качестве механизма задержанного пробоя сразу после открытия этого явления [8] и стала наиболее известной. При распространении TRAPATT-волны размер зоны ударной ионизации существенно меньше толщины структуры. Это возможно только при достаточно высоком уровне легирования базы $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и только на начальной фазе распространения волны. Однако, как видно из рис. 2а, время переключения диода в таком режиме превышает 200 пс. Как было впервые показано в [7], это находится в количественном противоречии с результатами экспериментов, предсказывающими 100-пс переключение. Это расхождение требует искать альтернативные механизмы переключения диодного обострителя.

Волна колмогоровского типа [18; 19] может возникать в структурах с более низким уровнем легирования $N_d = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [20]. В такой волне электрическое поле превышает порог ударной ионизации на всей длине базы прибора. На первый взгляд, это должно разрушить волновой характер ударно-ионизационного пробоя. Однако в определенных условиях, соответствующим т.н. *нелокальной предиионизации* (плавный спад концентрации затравочных носителей в глубину обедненной базы), возбуждается волна

ударной ионизации, скорость которой существенно превосходит скорость TRAPATT-волны. Необходимый профиль концентрации затравочных носителей обеспечивается полевой ионизацией глубоких электронных ловушек [20]. Отличительной особенностью лавинного переключения за счет колмогоровской волны является высокая скорость переключения, составляющая десятки пикосекунд.

При еще более низком уровне легирования базы ($N_d = 10^{12} \text{ см}^{-3}$) волновая мода пробоя сменяется квазиоднородной по длине базы ударной ионизацией. Лавинное переключение $p-i-n$ -структур со слаболегированной базой описано в диссертации впервые. Ранее аналогичная мода была предсказана для туннельно-ударного пробоя в сверхсильных ($\sim 1 \text{ МВ/см}$) полях [21]. Недавно задержанный ударно-ионизационный пробой $p-i-n$ -диодов был продемонстрирован экспериментально [16]. Расчетное время переключения в режиме квазиоднородного пробоя также составляет десятки пикосекунд (рис. 2а)

Описанные выше три моды задержанного лавинного пробоя реализуются при наличии ударной ионизации на всей площади диодного обострителя. Однако в рамках предположения об однородности переключения по площади не удается объяснить главный эффект — стопикосекундное переключение диодного обострителя с типичным уровнем легирования базы $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Объяснение этому возможно в предположении о неоднородном по площади диода переключении. Такому переключению посвящена следующая глава.

В четвертой главе по результатам работы [A5] проведено количественное сравнение экспериментальных данных, полученных соавторами [9], с результатами численного моделирования. Учет неоднородности процесса переключения по площади диода, а также процессов распространения и отражения волн в коаксиальном тракте впервые сделал возможным количественное сравнение с экспериментальными данными. Результаты этого сравнения потребовали пересмотра считавшегося классическим механизма переключения диодного обострителя за счет распространения TRAPATT-фронта. Предложена качественно новая физическая картина сверхбыстрого лавинного переключения высоковольтной диодной структуры. На основании достигнутого согласия моделирования и эксперимента сделаны выводы

о неоднородности переключения по площади диода и роли циркуляционных токов в процессе переключения.

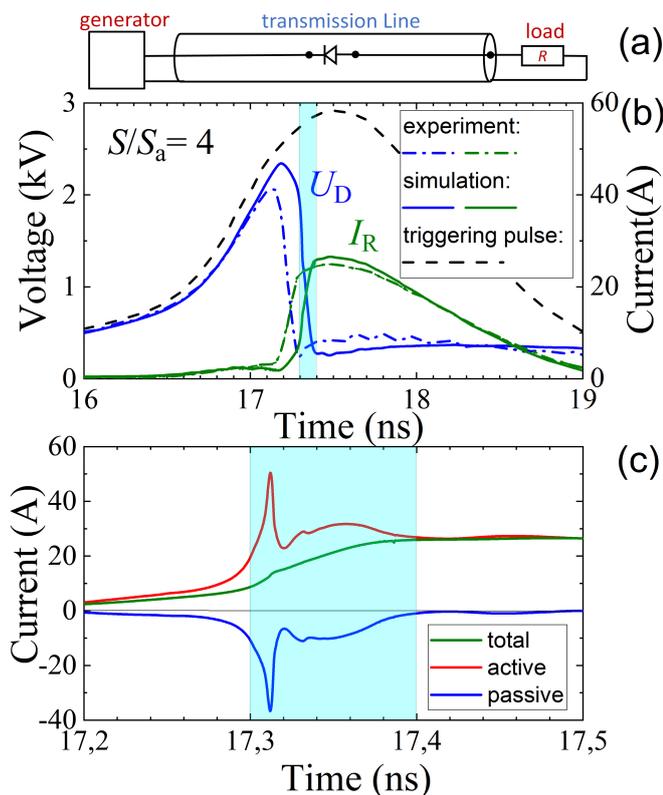


Рис. 3 — Диод в коаксиальном тракте (a). Напряжение на диоде и ток в нагрузке (b). Ток в проводящем канале и пассивной части диода (c).

Диодный обостритель, переключающийся на части площади, моделировался разбиением прибора на два параллельно подсоединенных диода, в одном из которых искусственно выключена ударная ионизация. Таким образом, пассивная часть играет роль параллельной нелинейной емкости. Соотношение площадей «активной» и «пассивной» части $K = S/S_a$ служило подгоночным параметром.

Хорошее согласие между расчетом и экспериментом (рис. 3b) достигнуто в предположении, что переключение происходит на малой части площади диода S_a : $K = S/S_a \approx 4$. Качественное согласие сохраняется в интервале значений $K = 3 \dots 10$.

Сценарий 100-пс переключения оказывается следующим. Проводящий канал формируется пробегом сверхбыстрого фронта ударной ионизации в соответствии с традиционным представлением о механизме переключения [8]. Однако рост тока и падение напряжения на диоде начинаются уже после формирования проводящего канала и обусловлены разрядкой «пассивной» части

площади диода через активную часть (проводящий канал). Главную роль на этапе переключения играет внутренний циркуляционный ток, который имеет разное направление в проводящем канале и пассивной части структуры (рис. 3с). Этот ток течет внутри структуры и не поступает во внешнюю цепь. Нарастание тока в нагрузке отвечает именно стадии протекания циркуляционного тока, которая сопровождается дополнительной интенсивной ударной ионизацией в проводящем канале (т.н. back-stroke).

Таким образом, сверхбыстрое переключение диода в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя существенно неоднородно по площади. 100-пс время переключения обусловлено не высокой скоростью фронта ионизации, формирующего проводящий канал (как это считалось ранее), а малым временем разряда емкости пассивной части структуры через уже созданный канал. Это модифицированное «внутреннее RC-время» может быть приближенно оценено как

$$\Delta t \approx \frac{\epsilon \epsilon_0 E_m S}{2q N_{pl} v_s S_a}, \quad (2)$$

где E_m — напряженность поля перед переключением, N_{pl} — концентрация плазмы в проводящем канале. Процесс переключения диода оказывается отчасти схожим с двухстадийным развитием разряда молнии — back-stroke, который включает в себя, во-первых, распространение ступенчатого лидера и, во-вторых, мощный разряд через сформированный лидером проводящий канал [22].

Пятая глава основана на результатах работ [A6; A7] и посвящена постпробойной динамике электронно-дырочной плазмы в обратносмещенном кремниевом диодном обострителе. Рассмотрен процесс коммутации субмикросекундных квазипрямоугольных импульсов. В данной главе показано, что из-за большой величины обратного напряжения классическая теория дрейфового рассасывания ЭДП [23] не применима к ДО при коммутации высоковольтного импульса субмикросекундной длительности. Проведенное численное моделирование и теоретический анализ предсказывают переход ДО в режим двойной лавинной инжекции [24; 25]. При этом ДО сохраняет значительную проводимость, а восстановления блокирующей способности p-n перехода не происходит. Двойная лавинная инжекция поддерживает ДО в проводящем состоянии. Дальнейшая динамика определяется шнурованием

тока, вызванным отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) в режиме двойной лавинной инжекции.

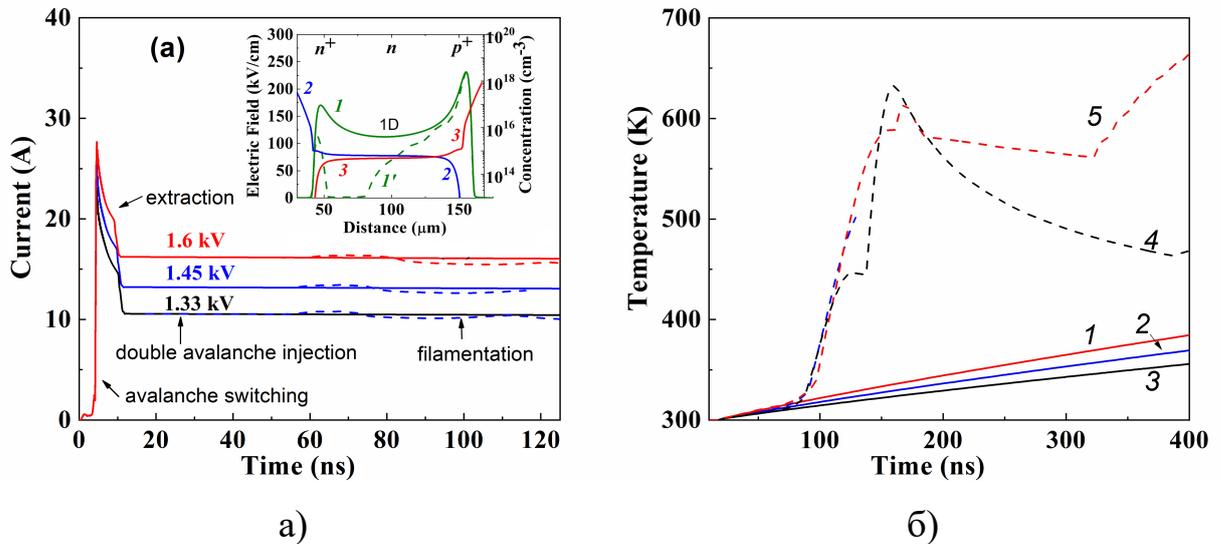


Рис. 4 — (а) Ток через Si диод. Сплошные линии — результат одномерного моделирования, штриховые — двумерного. (б) Зависимости максимальной температуры в приборе от времени. Кривые 1, 2 и 3 получены в рамках одномерного моделирования и соответствуют амплитудам внешнего импульса 1.6, 1.45 и 1.33 кВ, кривые 4 и 5 соответствуют двумерному моделированию и амплитудам импульса 1.33 и 1.6 кВ

Из рис. 4 видно, что при приложении квазипрямоугольного импульса к диодному обострителю за сверхбыстрым переключением следует понижение тока приблизительно в два раза. Это является результатом уменьшения концентрации ЭДП. При этом напряжение на диоде восстанавливается до пробойного. Прибор переходит в квазистационарное состояние с поддержанием проводимости двойной лавинной инжекцией (вставка на рис. 4а). Квазистационарное состояние достигается в течение примерно 10 ns после 100-пс ударно-ионизационного переключения. Дифференциальное сопротивление диода в режиме лавинной инжекции отрицательно. Неоднородное численное моделирование обнаруживает шнурование тока. На рис. 4 начало процесса шнурования соответствует отклонению штриховых линий (2D моделирование) от сплошных (1D моделирование).

Таким образом, максимальная длительность импульса, который способен пропустить ДО, определяется эффектами шнурования тока, связанными с двойной лавинной инжекцией носителей и способными вызвать перегрев

прибора и выход его из строя. Важным явлением, предотвращающим тепловую аварию, является перемещение шнура из горячей области в холодную. Это явление связано с уменьшением интенсивности ударной ионизации при росте температуры. Вследствие перемещения шнура максимальная температура в диоде начинает уменьшаться (рис. 4б).

В шестой главе, основанной на работах [A1; A8—A10], проведено моделирование и дано объяснение нового явления — «залипания» в проводящем состоянии высоковольтного GaAs диода после субнаносекундного переключения. Это явление было экспериментально обнаружено соавтором диссертанта А.В. Рожковым в 2022 году [A1; A8—A10]. Длительное поддержание стационарного проводящего состояния наблюдалось при обратных напряжениях, многократно меньших напряжения стационарного лавинного пробоя U_b . Время самоподдержания на порядок превосходило время дрейфовой экстракции и рекомбинации неравновесных носителей.

Как следует из результатов предыдущих глав, кремниевые диодные обострители переключаются на низкое остаточное напряжение, но при коммутации длинного импульса напряжение восстанавливается до пробойных величин (~ 1 кВ). Ток в них поддерживается на уровне примерно половины максимального тока, достигаемого сразу после переключения. Таким образом, приложенное напряжение источника разделено между нагрузкой и ключом примерно поровну. Как показано в данной главе, в арсенидгаллиевых диодах реализуется значительно более благоприятный для приложений режим поддержания проводимости. После переключения они «залипают» при низких остаточных напряжениях, проводя такой же по величине ток, что и непосредственно после переключения. Физический механизм этого явления объяснен в шестой главе диссертации. Этот механизм связан с отрицательной дифференциальной подвижностью электронов в GaAs, то есть с эффектом Ганна.

Лавинное переключение высоковольтной ($U_b = 400$ В) арсенидгаллиевой $p^+ - p^0 - i - n^0 - n^+$ структуры из блокирующего в проводящее состояние инициировалось быстрос нарастающим импульсом перенапряжения обратной полярности в режиме субнаносекундного задержанного ударно-ионизационного пробоя. Остаточное напряжение составило около 100 В и не

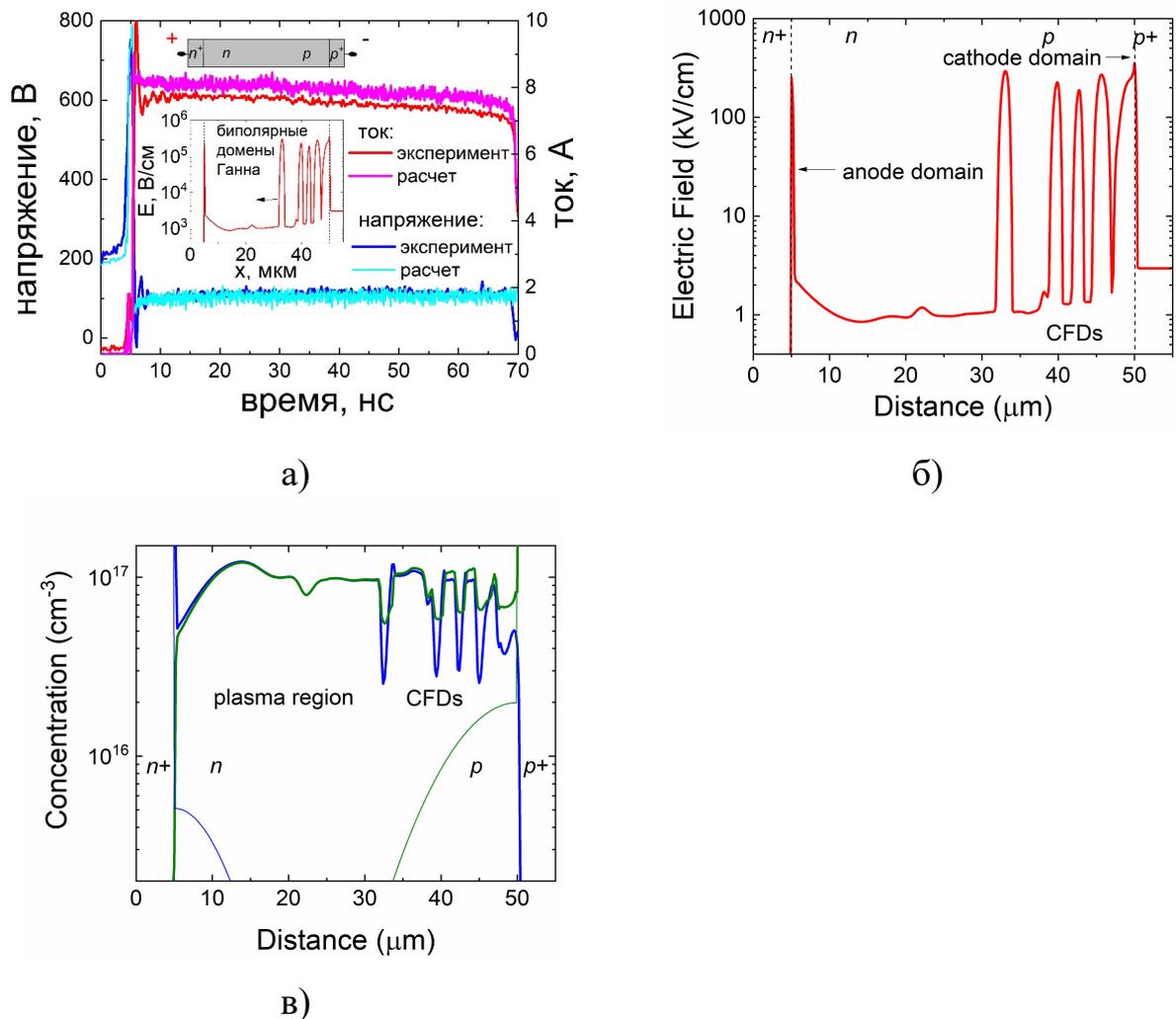


Рис. 5 — Ток через GaAs-диод и напряжение на нем (а). Распределение электрического поля в диоде (б). Концентрации электронов и дырок в базе диода (в)

менялось в течение 60 нс после переключения (рис. 5). При таком напряжении среднее поле в базе недостаточно для поддержания проводимости за счет механизма двойной лавинной инжекции.

В режиме залипания ток определялся в основном последовательной 50-омной нагрузкой, а уменьшение тока со временем обусловлено только уменьшением амплитуды приложенного импульса напряжения. Рекомбинационное излучение указывает на протекание тока в узких поверхностных проводящих каналах [A1]. Выполненное численное моделирование показывает, что поддержание проводимости связано с формированием в неравновесной электронно-дырочной плазме, созданной при быстром лавинном переключении, узких (~ 1 мкм) доменов Ганна — так называемых коллапсирующих доменов (CFDs, рис. 5 б,в). Причиной их возникновения является

биполярный эффект Ганна [6]. Этот эффект связан с неустойчивостью, вызванной отрицательной дифференциальной подвижностью электронов при электрических полях $E > 3.5$ кВ/см и приводит к формированию узких ионизирующих доменов, поле в которых составляет 300 кВ/см и более.

Электрическое поле в коллапсирующих доменах имеет большую амплитуду (300 кВ/см и более), достаточную для интенсивной лавинной генерации электронно-дырочной плазмы. Ударная ионизация в коллапсирующих доменах и стационарных доменах на краях структуры поддерживает концентрацию плазмы около 10^{17} см⁻³. Отметим, что биполярные ионизирующие домены такого типа, впервые обнаруженные в лавинных GaAs-транзисторах [6], являются также причиной lock-on эффекта в ключах с оптическим запуском на основе полуизолирующего GaAs [26; 27]. Иррегулярная динамика формирования и исчезновения (коллапса) коллапсирующих доменов является источником субтерагерцового излучения [28]

Седьмая глава посвящена субнаносекундному переключению арсенидгаллиевых высоковольтных диодов, инициированному быстронарастающим импульсом обратного напряжения. Такое переключение хорошо известно [4; 29], но, по сравнению с Si диодами, менее изучено. В этой главе показано, что переключение диодного обострителя на основе арсенида галлия имеет качественно иной механизм в сравнении с кремнием и также связано со спонтанным возникновением в структуре коллапсирующих доменов Ганна. Таким образом, коллапсирующие домены ответственны не только за поддержание проводимости диода на длинном импульсе, но также играют роль в сверхбыстром переключении.

Возникновение коллапсирующих доменов Ганна вносит некоторые исключительные особенности в процесс переключения. В данной главе показано, что вследствие этого механизма генерации плазмы в GaAs диоде имеется возможность снизить амплитуду запускающего импульса с типичных для Si диодов величин, превышающих удвоенное напряжение U_b , до величин, лишь незначительно больших U_b . Субнаносекундное время переключения при этом сохраняется, однако появляется аномально длительная (несколько наносекунд) задержка переключения (см. рис. 6). Во время задержки напряжение на GaAs диоде постоянно и больше U_b , а ток на два порядка меньше тока в проводящем состоянии. Переключение с аномальной

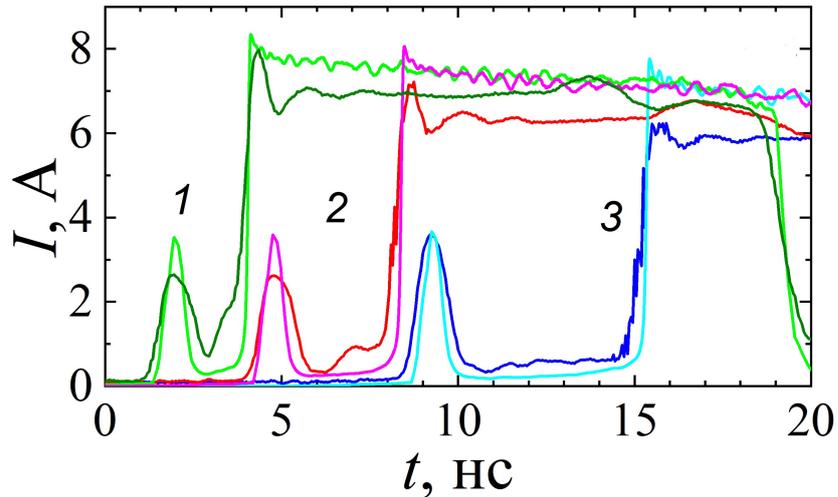


Рис. 6 — Экспериментальные (зеленая, красная и синяя кривые) и расчетные (светло-зеленая, розовая и голубая кривые) зависимости тока через GaAs-диод при различных величинах накладываемого на импульс обратного напряжения U_2 постоянного смещения U_1 : кривые 1-3 соответствуют напряжению $U_1 = 100, 75$ и 50 В.

задержкой впервые наблюдалось уже в пионерской работе [4], но до сих пор не получило объяснения.

Из экспериментально зарегистрированного рекомбинационного излучения следует, что арсенидгаллиевый лавинный диод переключается на малой части площади, порядка $1/100$ полной площади диода. Это обеспечивает высокую плотность тока ~ 1 MA/cm², необходимую для формирования коллапсирующих доменов в плотной электронно-дырочной плазме. Условие на величину плотности тока накладывается за счет двух требований. Во-первых, необходимости превышения средним электрическим полем в базе величины 3.5 кВ/см, отвечающей порогу отрицательной дифференциальной подвижности. Во-вторых — присутствия в канале биполярной электронно-дырочной плазмы большой концентрации.

Рассмотрим подробнее механизм переключения GaAs диода с аномальной задержкой. Сразу после подъема напряжения выше U_b ударная ионизация в проводящих каналах создает концентрацию неравновесных носителей $n \sim 10^{16}$ см⁻³. Эта концентрация недостаточна для переключения, поскольку максимальный ток в канале ограничен величиной $2qnv_s S_a < 1$ А. Затем на стадии задержки в электронно-дырочной плазме возникают множественные домены ионизирующего электрического поля, которые генерируют электронно-дырочную плазму. Количество и амплитуда этих доменов растут

вместе с концентрацией неравновесных носителей, достигающей $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в конце процесса переключения. При такой концентрации ЭДП в канале начинается разрядка барьерной емкости диода, т.е. протекание циркуляционного тока, аналогичного циркуляционному току в Si диодном обострителе. Время переключения составляет около 200 пс. Таким образом, обычный ударно-ионизационный пробой представляет лишь первую стадию лавинного переключения GaAs диода. Переключение прибора в проводящее состояние с низким остаточным напряжением обеспечивается генерацией носителей в коллапсирующих доменах Ганна.

Отметим, что коллапсирующие домены играют также определяющую роль в субнаносекундном переключении лавинных S-диодов с глубокими центрами [30; 31].

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Осуществлено самосогласованное моделирование субнаносекундного ударно-ионизационного переключения кремниевого диодного обострителя и процессов отражения и прохождения импульсов в коаксиальном тракте, содержащем диод, с учетом неоднородности переключения диода. Самосогласованное описание обеспечило возможность количественного сравнения расчета с экспериментом.
2. С помощью численного моделирования и сравнения с экспериментом показано, что 100-пс переключение кремниевого диодного обострителя неоднородно по площади и происходит в режиме «back-stroke»: увеличение тока происходит не на стадии формирования проводящего канала, а на стадии разряда пассивной части структуры через проводящий канал. Этот разряд связан с протеканием внутреннего циркуляционного тока и сопровождается дополнительной ударной ионизацией в уже сформированном канале — вторичным пробоем проводящего канала.
3. При переключении структуры на малой части площади раннее появление начальных носителей не препятствует дальнейшему росту напряжения и переключению диода в режиме задержанного лавинного пробоя. Это обстоятельство снижает требования по пороговому полю к источнику затравочных носителей, инициирующих пробой.

4. Исследована зависимость степени неоднородности переключения от технологической неоднородности структуры.
5. Предсказана возможность субнаносекундного лавинного переключения $p-i-n$ диода в результате однородного пробоя всего объема базы. Проанализировано изменение механизма переключения (переход от волнового к неволновому механизму) в зависимости от легирования базы диода.
6. Моделирование постпробойной динамики кремниевого диодного обострителя показало, что при коммутации прямоугольных импульсов субмикросекундной длительности проводящее состояние диода поддерживается вследствие двойной лавинной инжекции, которая приводит к шнурованию тока. Предельная длительность коммутируемого импульса ограничена тепловыми эффектами в узком токовом шнуре. Обнаружен эффект миграции токового шнура вследствие Джоулева саморазгрева.
7. Показано, что эффект залипания в высокопроводящем состоянии обратносмещенных лавинных GaAs диодов может быть объяснен возникновением в электронно-дырочной плазме узких ионизирующих доменов Ганна – так называемых коллапсирующих доменов.
8. Показано, что генерация плазмы коллапсирующими доменами Ганна ответственна за субнаносекундное переключение GaAs диодов, инициируемое быстронарастающим импульсом обратного напряжения. Данный механизм позволяет объяснить субнаносекундное переключение, происходящее с аномально большой задержкой в несколько наносекунд.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Рожков, А. В. Эффект самоподдержания проводящего состояния в обратносмещенных GaAs-диодах, переключаемых в режиме задержанного лавинного пробоя [Текст] / А. В. Рожков, М. С. Иванов, П. Б. Родин // Письма в Журнал технической физики. — 2022. — Т. 48, № 16. — С. 25—29.

- A2. *Иванов, М. С.* Волновые эффекты в коаксиальном тракте при субнаносекундном переключении высоковольтного диода в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя [Текст] / М. С. Иванов, В. И. Брылевский, П. Б. Родин // Письма в Журнал технической физики. — 2021. — Т. 47, № 13. — С. 32—35.
- A3. *Rodin, P.* Spatiotemporal modes of fast avalanche switching of high-voltage layered semiconductor structures: From subnano to picosecond range [Text] / P. Rodin, M. Ivanov // Journal of Applied Physics. — 2020. — Vol. 127, no. 4. — P. 044504.
- A4. *Ivanov, M. S.* Quasi-streamer mode of delayed avalanche breakdown initiated by technological imperfections [Text] / M. S. Ivanov, N. I. Podolska, P. B. Rodin // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 816, no. 1. — P. 044504.
- A5. Picosecond-range switching of high voltage Si diode due to the delayed impact ionization breakdown: Experiments vs simulations [Text] / M. Ivanov [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2022. — Vol. 131. — P. 014502.
- A6. *Иванов, М. С.* Двойная лавинная инжекция в диодных лавинных обострителях [Текст] / М. С. Иванов, Н. И. Подольская, П. Б. Родин // Физика и техника полупроводников. — 2020. — Т. 54, № 3. — С. 275.
- A7. *Ivanov, M.* High-Voltage Picosecond Range Sharpening Diode Commutating “Long” Pulses: Double Avalanche Injection vs. Plasma Extraction [Text] / M. Ivanov, P. Rodin // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). — 2021. — P. 42—45.
- A8. *Rozhkov, A.* The lock-on effect and collapsing bipolar Gunn domains in high-voltage GaAs avalanche p-n junction diode [Text] / A. Rozhkov, M. Ivanov, P. Rodin // Solid State Communications. — 2022. — Vol. 354. — P. 114895.
- A9. *Иванов, М. С.* Коллапсирующие домены Ганна как механизм самоподдержания проводящего состояния в обратносмещенных высоковольтных GaAs-диодах [Текст] / М. С. Иванов, А. В. Рожков, П. Б. Родин // Письма в Журнал технической физики. — 2022. — Т. 48, № 20. — С. 31—34.

- A10. *Рожков, А. В.* Самоподдержание проводящего состояния и биполярные ионизирующие домены Ганна в импульсных лавинных арсенид-галлиевых диодах [Текст] / А. В. Рожков, М. С. Иванов, П. Б. Родин // Известия РАН. Серия физическая. — 2023. — Т. 87, № 6. — С. 873—878.

Список литературы

1. *Грехов, И. В.* Формирование субнаносекундных перепадов тока при задержке пробоя кремниевых рп-переходов [Текст] / И. В. Грехов, А. Ф. Кардо-Сысоев // Письма в Журнал технической физики. — 1979. — Т. 5, № 15. — С. 950—953.
2. *Kardo-Sysoev, A. F.* New power semiconductor devices for generation of nano- and subnanosecond pulses [Text] / A. F. Kardo-Sysoev // Ultra-Wideband Radar Technology. — Boca Raton : CRC Press, 2001. — Chap. 9. P. 205—290. — Ed. by James D. Taylor.
3. *Grekhov, I. V.* Pulse power generation in nano- and subnanosecond range by means of ionizing fronts in semiconductors: the state of the art and future prospects [Text] / I. V. Grekhov // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2010. — Vol. 38, no. 5. — P. 1118.
4. Формирование высоковольтных перепадов напряжения пикосекундного диапазона на арсенидгаллиевых диодах [Текст] / Ж. И. Алфёров [и др.] // Письма в Журнал технической физики. — 1987. — Т. 13, № 18. — С. 1089—1093.
5. Demonstration of Picosecond 4H-SiC Diode Avalanche Shaper With Voltage Rise Rate of 11.14 kV/ns and Peak Power Density of 62 MW/cm² [Text] / Y. Zhou [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2022. — Vol. 37, no. 4. — P. 3724—3727.
6. *Vainshtein, S. N.* Ultrahigh field multiple Gunn domains as the physical reason for superfast (picosecond range) switching of a bipolar GaAs transistor [Text] / S. N. Vainshtein, V. S. Yuferev, J. T. Kostamovaara // Journal of Applied Physics. — 2005. — Vol. 97, no. 2. — P. 024502.

7. *Биленко, Ю. Д.* Исследование процесса переключения обратно смещенного р-п-перехода в высокопроводящее состояние с помощью моделирования на ЭВМ [Текст] / Ю. Д. Биленко, М. Е. Левинштейн, В. С. Юферев // Физика и техника полупроводников. — 1983. — Т. 17, № 10. — С. 1812—1816.
8. *Грехов, И. В.* Запаздывание пробоя и возбуждение волн ионизации в р-п-переходах [Текст] / И. В. Грехов, А. Ф. Кардо-Сысоев, Л. С. Костина // Письма в Журнал технической физики. — 1979. — Т. 5, № 16. — С. 961—965.
9. Delayed avalanche breakdown of high-voltage silicon diodes: Various structures exhibit different picosecond-range switching behavior [Text] / V. Brylevskiy [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2017. — Vol. 122. — P. 185701.
10. Picosecond-range avalanche switching of high-voltage diodes: Si versus GaAs structures [Text] / V. Brylevskiy [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2016. — Vol. 44, no. 10. — P. 1941—1946.
11. Субнаносекундное лавинное переключение высоковольтных кремниевых диодов с резкими и плавными рп-переходами [Текст] / В. И. Брылевский [и др.] // Письма в Журнал технической физики. — 2014. — Т. 40, № 8. — С. 80—87.
12. *Grekhov, I. V.* Novel closing switches based on propagation of fast ionization fronts in semiconductors [Text] / I. V. Grekhov, S. V. Korotkov, P. B. Rodin // IEEE transactions on plasma science. — 2008. — Vol. 36, no. 2. — P. 378—382.
13. *Тучкевич, В. М.* Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами [Текст] / В. М. Тучкевич, И. В. Грехов. — Л. : Наука, 1988. — 115 с.
14. *Кардо-Сысоев, А. Ф.* Моделирование быстрых ионизационных волн при пробое в кремниевых р-п-переходах [Текст] / А. Ф. Кардо-Сысоев, М. В. Попова // Физика и техника полупроводников. — 1996. — Т. 30, № 5. — С. 803.

15. *Родин, П. Б.* Численное моделирование пространственно неоднородного переключения кремниевых диодных обострителей [Текст] / П. Б. Родин, А. М. Минарский, И. В. Грехов // Письма в Журнал технической физики. — 2012. — Т. 38, № 11. — С. 78—87.
16. A fast avalanche Si diode with a 517 um low-doped region [Text] / A. S. Kesar [et al.] // Applied Physics Letters. — 2020. — Vol. 117, no. 1. — P. 013501.
17. Пикосекундное переключение тока высокой плотности (60 кА/см²) кремниевым коммутатором на основе сверхбыстрого фронта ионизации [Текст] / А. И. Гусев [и др.] // Физика и техника полупроводников. — 2014. — Т. 48, № 8. — С. 1095—1106.
18. *Колмогоров, А. Н.* Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием количества вещества, и его применение к одной биологической проблеме [Текст] / А. Н. Колмогоров, И. Г. Петровский, Н. С. Пискунов // Бюлл. МГУ. Сер. А. Математика и механика. — 1937. — Т. 1, № 6. — С. 333—358.
19. *Saarloos, W. van.* Front propagation into unstable states [Text] / W. van Saarloos // Physics reports. — 2003. — Vol. 386, no. 2—6. — P. 29—222.
20. *Rodin, P.* Impact ionization fronts in semiconductors: Superfast propagation due to nonlocalized preionization [Text] / P. Rodin, A. Minarsky, I. Grekhov // Applied Physics Letters. — 2008. — Vol. 93, no. 1. — P. 013503.
21. *Tsyranov, S. N.* / S. N. Tsyranov, S. N. Rukin // Proc. 15th Int. Symp. High Current Electronics. — (Tomsk, Russia), 2008. — P. 288.
22. *Райзер, Ю. П.* Физика газового разряда [Текст] / Ю. П. Райзер. — Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 511 с.
23. *Benda, H.* Reverse recovery processes in silicon power rectifiers [Text] / H. Benda, E. Spenke // Proceedings of the IEEE. — 1967. — Vol. 55, no. 8. — P. 1331—1354.
24. *Bowers, H. C.* Space-charge-induced negative resistance in avalanche diodes [Text] / H. C. Bowers // IEEE transactions on electron devices. — 1968. — Vol. 15, no. 6. — P. 343—350.

25. *Levinshtein, M. E.* Breakdown phenomena in semiconductors and semiconductor devices [Text]. Vol. 36 / M. E. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein. — World Scientific, 2005.
26. Investigation on properties of ultrafast switching in a bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switch [Text] / L. Hu [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2014. — Vol. 115, no. 9. — P. 094503.
27. Lock-on physics in semi-insulating GaAs: Combination of trap-to-band impact ionization, moving electric fields and photon recycling [Text] / A. R. Chowdhury [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2018. — Vol. 123, no. 8. — P. 085703.
28. Terahertz emission from collapsing field domains during switching of a gallium arsenide bipolar transistor [Text] / S. Vainshtein [et al.] // Physical review letters. — 2007. — Vol. 99, no. 17. — P. 176601.
29. *Грехов, И. В.* О возможности быстрой генерации плотной электронно-дырочной плазмы большого объема в арсениде галлия [Текст] / И. В. Грехов, В. М. Ефанов // Письма в Журнал технической физики. — 1988. — Т. 14, № 23. — С. 2121—2124.
30. The Mechanism of Superfast Switching of Avalanche S-Diodes Based on GaAs Doped With Cr and Fe [Text] / I. A. Prudaev [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2018. — Vol. 65, no. 8. — P. 3339—3344.
31. The physical mechanism underpinning superfast switching of GaAs S-diode [Text] / S. Vainshtein [et al.] // Solid State Communications. — 2023. — Vol. 365. — P. 115111.