

07

Параметры прохождения СВЧ-сигнала субгигагерцевого диапазона через наносекундный фотопроводящий полупроводниковый ключ на основе GaAs

© В.В. Бармин, И.В. Романченко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия
E-mail: valery@barmin.club

Поступило в Редакцию 7 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2025 г.

Принято к публикации 5 декабря 2025 г.

Проведено экспериментальное исследование прохождения СВЧ-сигнала субгигагерцевого диапазона в режиме бегущей волны через фотопроводящий полупроводниковый ключ, находящийся в режиме нелинейного усиления. Установлено, что формирование доменов сильного поля в ключе не приводит к значительному обострению проходящего киловаттного СВЧ-сигнала (~ 172 MHz) при поглощении в согласованной и короткозамкнутой нагрузке с уменьшением амплитуды СВЧ-сигнала от 733 до 598 V и от 463 до 342.5 V соответственно. Использование короткозамкнутой нагрузки величиной $42\text{ m}\Omega$ приводит к искажению сигнала, но позволяет получить сигнал с переходом через ноль. Полученные результаты демонстрируют возможность использования фотопроводящего полупроводникового ключа для мощных импульсных СВЧ-устройств на высоких частотах.

Ключевые слова: фотопроводящий полупроводниковый ключ, арсенид галлия, СВЧ, коллапсирующие домены сильного поля.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62519.20563

Применение полупроводниковых ключей в мощных резонансных СВЧ-компрессорах позволяет создать высокостабильные устройства с большим ресурсом. Например, в работе [1] реализован вывод СВЧ-импульса на 12 $p-i-n$ -диодах с импульсной мощностью более киловатта. Использование фотопроводящих полупроводниковых коммутаторов (ФППК) (или photoconduction semiconductor switch, PCSS) с лазерным управлением позволит в перспективе поднять мощность коммутации до гигаваттного уровня при параллельном включении, что сопоставимо с мощностью решений на разрядниках. Важным преимуществом является возможность работы ФППК в нелинейном режиме с малой управляющей оптической энергией в десятки наноджоулей и залипанием проводимости после окончания управляющего импульса при превышении напряженностью электрического поля порогового значения. Этот режим наблюдается в арсениде галлия (GaAs) и объясняется механизмом коллапсирующих доменов сильного поля (collapsing field domain, CFD) [2]. Он основан на генерации с терагерцевой частотой узких доменов Ганна с полем более 600 kV/cm и отрицательной дифференциальной подвижностью, которые формируют лавинную генерацию неравновесной электронно-дырочной плазмы с плотностью филамента 10 MA/cm. Однако в литературе отсутствуют практические работы, посвященные влиянию CFD на прохождение СВЧ-сигнала большой мощности через замкнутый ФППК в нелинейном режиме. Поэтому целью настоящей работы является экспериментальная оценка возможности передачи СВЧ-сигнала субгигагерцевого

диапазона через высоковольтный наносекундный фотопроводящий ключ на основе GaAs.

В эксперименте использован образец с рабочим напряжением 32 kV на основе полуизолирующего GaAs, полученного акцепторным легированием (Cr). Его конструкция состоит из кристалла с $p-i-n$ -структурой, где у i -области удельное сопротивление составляет $10^9\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$, а p - и n -области образованы под контактами посредством диффузии кремния и цинка. Омические контакты кристалла AuGe приклеены к золотым контактам (пленкам) на поверхности из поликорда BK-100-1. Контакты располагаются на краях прямоугольного окна размером $8.5 \times 11\text{ mm}$, используемого для лазерного облучения межэлектродного зазора, равного 9.5 mm и соответствующего i -области. Ключ установлен в разрыв центрального проводника коаксиально-планарной волноводной камеры с импедансом, равным коаксиальному тракту ($50\text{ }\Omega$). Эксперимент с образцом требует одновременного воздействия для перехода ФППК в проводящее состояние и формирования тестового СВЧ-сигнала. Требуемая схема представлена на рис. 1. Она состоит из схемы формирования тестового биполярного СВЧ-сигнала, обозначенного пунктирной линией [3], на основе лавинных S -диодов, работающих по механизму CFD [4,5], и схемы коммутаций ФППК. Обе схемы синхронизируются управляющими сигналами от платы управления в модуляторе 3 путем изменения временной задержки с точностью 10 ns.

Запуск схемы обеспечивается зарядкой фидера NKRFA07800 (4 на рис. 1) длиной 4.5 m от высоковольт-

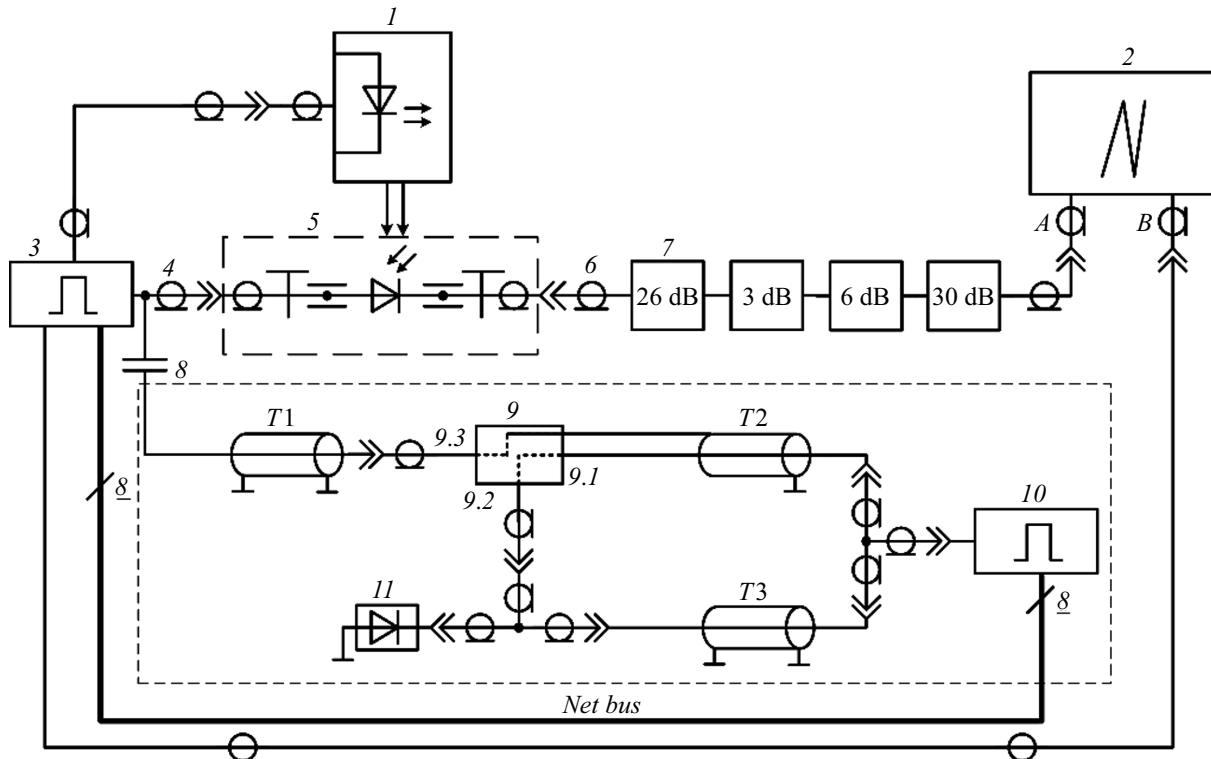


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — YAG-лазер DTL-375QT, 2 — осциллограф DSO9254A, 3 — высоковольтный источник импульсного зарядного напряжения, 4 и 6 — фидерные кабели RFA-7/8, 5 — волноводная камера ФППК, 7 — высоковольтный аттенюатор AT-20-4, 8 — высоковольтный конденсатор КВИ-2, 9 — коаксиальный тройник для формирования биполярного сигнала, 10 — высоковольтный генератор прямоугольных импульсов, 11 — коаксиальная волноводная камера с S-диодом, T1—T3 — коаксиальные кабели PK50-2-21.

нного модулятора 3 сигналом колоколообразной формы длительностью 250 ns и максимальной амплитудой порядка 16 kV. С обратной стороны фидера подключена волноводная камера с ФППК в закрытом состоянии. Момент открытия ключа определяется запуском лазера 1 по внешнему синхросигналу от управляющей платы модулятора 3 в момент наибольшего значения зарядного напряжения на фидере 4. Облучение ФППК в камере 5 происходит лазерным импульсом с длительностью 5 ns, оптической энергией 25 μ J, длиной волны 355 nm с продольно вытянутым профилем пучка шириной $\sim 300 \mu$ m и длиной 14 mm через диэлектрический гель ПЕНТА-312. Под действием лазера формируется филамент, что приводит к разряду заряженного фидера 4 на высоковольтный аттенюатор 7.

Параллельно формируется тестовый СВЧ-сигнал на выходе 9.3 тройника 9, который проходит через коаксиальный кабель T1 и конденсатор 8 ($C = 10 \text{ pF}$, $U = 10 \text{ kV}$) для сложения с зарядным сигналом от генератора 3 на входе коаксиального кабеля 4. В результате, когда ФППК замыкает фидер 4 на высоковольтный аттенюатор 7, образуется коаксиальный тракт с согласованной нагрузкой. По тракту в режиме бегущей волны проходит тестовый СВЧ-сигнал через ФППК с ослаблением на аттенюаторах и регистрацией на канале A в осциллографе 2 с полосой пропускания 2.5 GHz. Измере-

ние напряжения коаксиального кабеля от генератора 3 и исходного тестового СВЧ-сигнала происходит через канал B осциллографа 2 калиброванным высоковольтным емкостным делителем с полосой 250 MHz на соединении центрального проводника коаксиального кабеля 4 и вторичного витка высоковольтного трансформатора в генераторе 3.

Использование в эксперименте лазерного излучения с длиной волны 355 nm обусловлено его воздействием через прямой фотоэффект на малой глубине поглощения 32.05 nm [6] при $\alpha = 7.1843 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ с профилем, полностью перекрывающим межэлектродный зазор ФППК. Частота 200 MHz тестового СВЧ-сигнала выбрана из-за соответствия длительности перехода ключа в проводящее состояние образца (5 ns). Первым этапом исследования стала коммутация ФППК на согласованную нагрузку с тестовым СВЧ-сигналом (рис. 2, a).

Фронт выходного импульса $t_f = 4.3 \text{ ns}$ по уровню 0.1–0.9, длительность по полувысоте $t_d = 46.7 \text{ ns}$. В момент открытия ФППК зарядное напряжение $U_c = 11.6 \text{ kV}$, а среднее значение амплитуды выходного импульса $U_{out} = -2.96 \text{ kV}$. Тогда усредненное значение внутреннего сопротивления ФППК $R_i = 47.97 \Omega$ при токе $I_{out} = 59.2 \text{ A}$, что является достаточно большим внутренним сопротивлением по сравнению с другими экспериментами. Большое сопротивление, сопоставимое

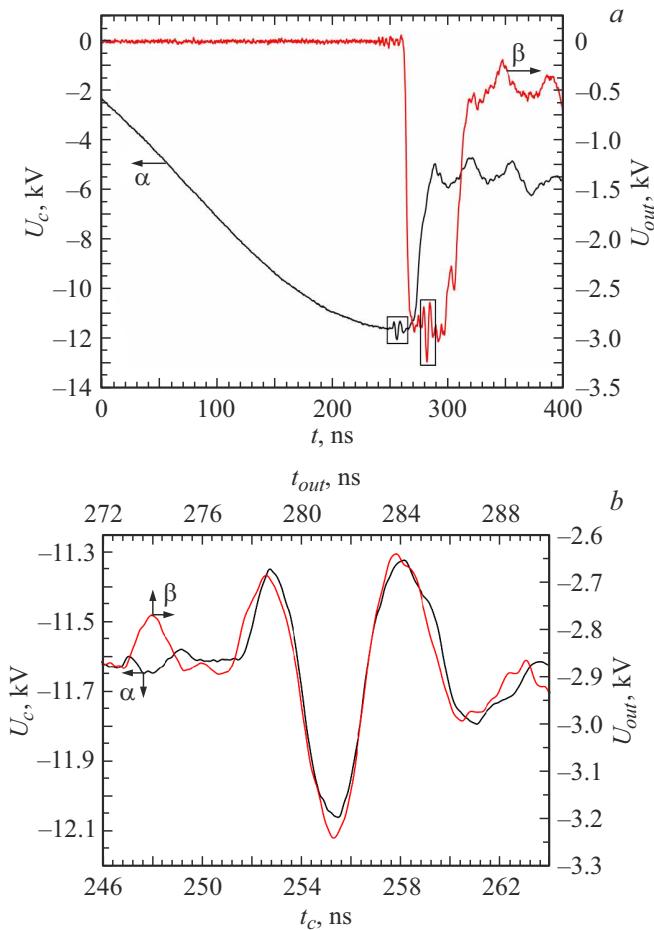


Рис. 2. Осциллографмы при коммутации на нагрузку 50Ω (а) и увеличенная область СВЧ-сигнала (б). α — осциллографма зарядного напряжения с емкостного делителя, β — выходной сигнал с аттенюатором.

с нагрузкой, возможно, является условием для увеличения амплитуды СВЧ-колебаний с периодом 3–4 ns от фронта выходного импульса, поскольку при работе на согласованную нагрузку с $R_i = 39.83\Omega$ в работе [7] данного возбуждения не обнаружено.

Увеличение и совмещение осциллографм тестового СВЧ-сигнала (рис. 2, б) демонстрируют изначальную амплитуду $U_{rf} = 733$ V при амплитуде выходного сигнала $U_{rf\ out} = 598$ V с частотой $f \approx 172.4$ MHz, тогда внутренний импеданс ФППК $Z_i = 11.3\Omega$. Сигнал при прохождении ФППК увеличивает длительность на 180 ps. Подобное изменение периода не связано с процессами, протекающими в ключе, поскольку сильное укорочение периода происходит в момент снижения воздействующего поля и не может быть условием для обострения. Подобные флюктуации длительности СВЧ-сигнала являются результатом влияния S-параметров камеры и средств измерения (емкостный делитель и полоса осциллографа).

Второй этап включал замену согласованной нагрузки на предельно малую для формирования условий работы

как в СВЧ-компрессоре. Следовательно, между высоковольтным аттенюатором 7 и коаксиальным кабелем 6 (рис. 1) установлен коаксиальный тройник с разъемами N-типа с закороченной коаксиальной нагрузкой, образующий суммарное сопротивление $R_{CS} = 42\ m\Omega$. В данном случае (рис. 3, а) выходной импульс дифференцируется [7]. Зарядное напряжение в момент коммутации $U_c = 11.6$ kV, а усредненное значение амплитуды выходного импульса $I_{out} = -21$ V; следовательно, $I_{out} = 488$ A. Внутреннее сопротивление не удается достоверно определить по параметрам выходного импульса из-за особенности схемы. Экстремумы выходного дифференциального сигнала равны $U_{out\ n} = -778$ V и $U_{out\ p} = 411$ V. Определение временных характеристик выходного импульса проведено после интегрирования выходного сигнала (рис. 3, б), тогда $t_d = 44.7$ ns, а $t_f = 5.4$ ns.

В случае работы на нагрузку $42\ m\Omega$ (рис. 3, а) амплитуда тестового СВЧ-сигнала уменьшается с $U_{rf} = 463$ V до $U_{rf\ out} = 342.5$ V при частоте, равной $f \approx 171.2$ MHz; следовательно, $Z_i = 14.8\ m\Omega$. При наложении сигналов (рис. 3, в) наблюдаются асимметрия отрицательного выброса и смещение нулевого значения выходного СВЧ-сигнала из-за сложения дифференциального сигнала и выходного СВЧ-сигнала по напряжению с -66 V на 3 V. Однако с учетом тренда смещения выходного сигнала биполярный сигнал преимущественно сохраняет свою форму и показывает возможность потенциального использования в области коммутаций СВЧ-сигналов большой мощности.

Частотное ограничение для воздействующего СВЧ-сигнала будет определяться не механизмом CFD, а временем распространения филамента до момента замыкания ФППК с последующим влиянием импеданса. Он определяется условиями распространения филамента в полупроводнике, имеющего фрактальную структуру (молний) с параметрами проводимости, определяемыми скрин-эффектом при концентрации плазмы $10^{19}\ cm^{-3}$. При превышении частоты 10 GHz открытие ФППК будет происходить без лазера из-за задержанного лавинного пробоя, если внешнее поле превышает вдвое поле стационарного лавинного пробоя [8].

В результате получено экспериментальное подтверждение возможности и проведено исследование характеристик передачи субгигагерцевого СВЧ-сигнала (~ 172 MHz) на согласованную нагрузку и нагрузку $42\ m\Omega$ через ФППК в нелинейном режиме работы при управляющем воздействии лазерного излучения. В случае согласованного режима работы тестовый СВЧ-сигнал испытывает увеличение длительности на 180 ps из-за S-параметров камеры и средств измерения, а также снижение амплитуды на 18.4 % (или 1.77 dB) из-за потерь ФППК. При работе на короткое замыкание ($42\ m\Omega$) на выходном СВЧ-сигнале наблюдаются асимметрия отрицательного выброса и смещение нулевого значения из-за сложения дифференциального сигнала и выходного СВЧ-сигнала по напряжению с -66 V на 3 V, но при этом он преимущественно сохраняет

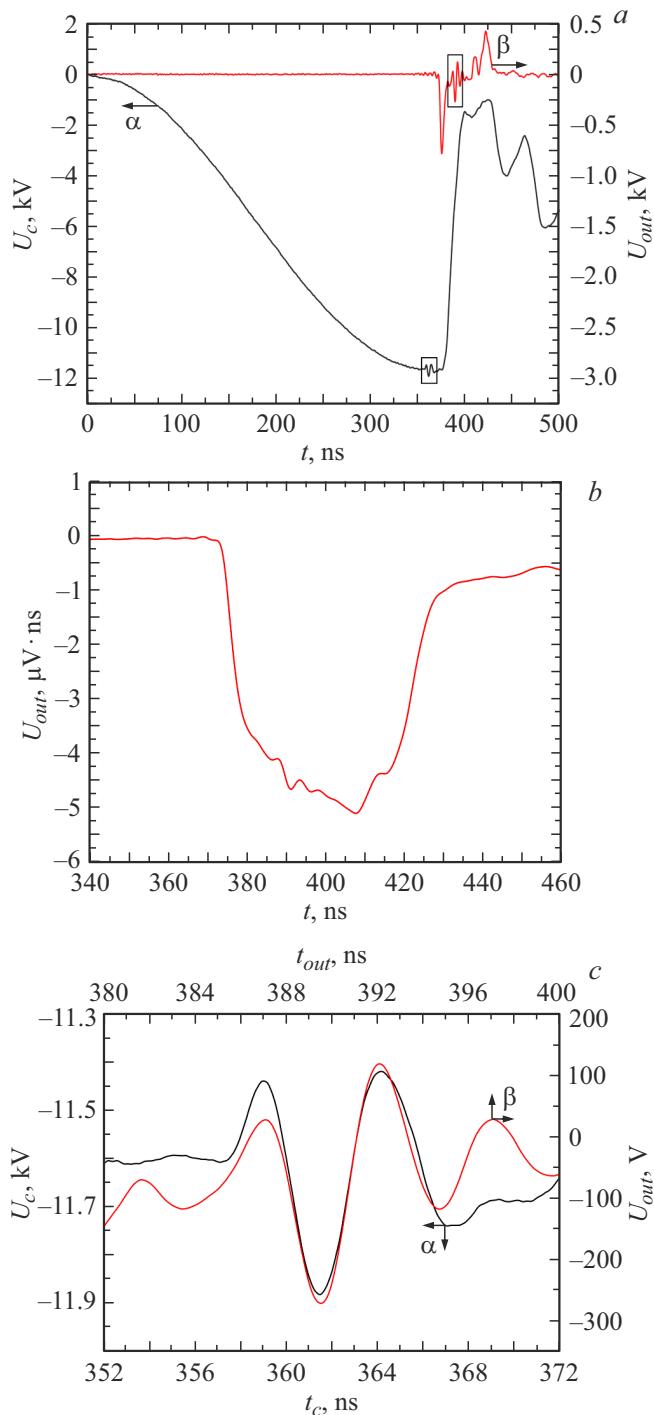


Рис. 3. а — осциллографмы при коммутации на нагрузку $42 \text{ m}\Omega$ (α — осциллографм зарядного напряжения с емкостного делителя, β — выходной сигнал на нагрузке $42 \text{ m}\Omega$); б — проинтегрированный выходной сигнал; в — увеличенные осциллографмы тестового СВЧ-сигнала при коммутации на нагрузку $42 \text{ m}\Omega$.

свою форму. В экспериментах на ФППК, работающем на механизме CFD, достигнуто внутреннее сопротивление в согласованном режиме $R_i = 47.97 \Omega$, а диапазон импеданса для тестового СВЧ-сигнала составляет

$Z_i = 11.3 \Omega$ и $14.8 \text{ m}\Omega$, что соответствует коэффициентам передачи в 1.77 и 2.62 dB для согласованного режима и короткого замыкания соответственно. Основным частотным ограничением для СВЧ-сигнала является не сам механизм CFD, а время формирования филамента и импеданса, а также величины и скорости воздействующего внешнего поля. Актуальность полученных результатов состоит в возможности их широкого применения в СВЧ-смесителях и управляющих схемах мегаваттного уровня наносекундной СВЧ-техники.

Благодарности

Авторы благодарят П.Ю. Чумерина (ТПУ) и И.А. Прудеева (ТГУ) за предоставленное оборудование и плодотворные обсуждения.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания (FWRM-2025-0002).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Nikiforov, P. Chumerin, in *2020 Proc. 7th Int. Congress on energy fluxes and radiation effects (EFRE)* (IEEE, 2020), p. 264–266. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242019
- [2] S.N. Vainshtein, J.T. Kostamovaara, V.S. Yuferev, W. Knap, A.E. Fatimy, N. Diakonova, Phys. Rev. Lett., **99** (17), 176601 (2007). DOI: 10.1103/PHYSREVLETT.99.176601
- [3] В.В. Бармин, И.В. Романченко, in *9th Int. Congress on energy fluxes and radiation effects*, ed. by D. Sorokin, A. Grishkov (TPU Publishing House, Tomsk, 2024), p. 282–289. DOI: 10.56761/EFRE2024.S3-O-061202
- [4] И.А. Прудеев, В.В. Копьев, В.Л. Олейник, М.С. Скаунов, А.С. Сотникова, С.М. Гущин, В.Е. Земляков, Письма в ЖТФ, **51** (4), 23 (2025). [I.A. Prudaev, V.V. Kopyev, V.L. Oleinik, M.S. Skakunov, A.S. Sotnikova, S.M. Guschin, V.E. Zemlyakov, Tech. Phys. Lett., **51** (2), 77 (2025)]. DOI: 10.61011/TPL.2025.02.60638.20128].
- [5] S. Vainshtein, I.A. Prudaev, G. Duan, T. Rahkonen, Solid State Commun., **365**, 115111 (2023). DOI: 10.1016/j.ssc.2023.115111
- [6] K. Papatryfonos, T. Angelova, A. Brumont, B. Reid, S. Guldin, P.R. Smith, M. Tang, K. Li, A.J. Seeds, H. Liu, D.R. Selvian, AIP Adv., **11** (2), 025327 (2021). DOI: 10.1063/5.0039631
- [7] V.V. Barmin, I.V. Romanchenko, Russ. Phys. J., **68** (1), 157 (2025). DOI: 10.1007/s11182-025-03414-2
- [8] А.В. Рожков, М.С. Иванов, П.Б. Родин, Письма в ЖТФ, **48** (16), 25 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.16.53203.19271 [A.V. Rozhkov, M.S. Ivanov, P.B. Rodin, Tech. Phys. Lett., **48** (8), 61 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.08.55065.19271].