

Импульсный фотоактивируемый ключ на основе полупроводникового лазера и высоковольтного фотодиода AlGaAs/GaAs

© А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, А.Е. Ризаев, Д.Н. Николаев, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: podoskin@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 23 октября 2024 г.
В окончательной редакции 7 ноября 2024 г.
Принята к публикации 17 декабря 2024 г.

Предложен подход для генерации коротких электрических импульсов в цепи с полезной нагрузкой, в качестве которой могут выступать полупроводниковые лазерные диоды. В рамках предложенного подхода для генерации электрических импульсов использовался ключ на основе высоковольтного фотодиода AlGaAs/GaAs, а для его фотоактивации с субнаносекундными временами переходных процессов — мощный полупроводниковый лазер, работающий в режиме модуляции усиления. Исследования динамических характеристик фотоактивируемых ключей показали возможность генерации импульсов напряжения на эквивалентной нагрузке 50 Ом с пиковой амплитудой 19 В, длительностью 300 пс и передним фронтом 80 пс при фотоактивации оптическим импульсом полупроводникового лазера с пиковой мощностью 9.5 Вт, передним фронтом 35 пс и длительностью 100 пс.

Ключевые слова: импульсный токовый ключ, фотоактивация, полупроводниковый лазер.

DOI: 10.61011/FTR.2024.12.59831.7240

1. Введение

Генерация последовательностей мощных оптических импульсов с частотами повторения в ГГц диапазоне полупроводниковыми лазерными диодами актуальна для ряда практических задач. К ним относятся задачи в области информационных технологий, связанные с передачей информации в свободном пространстве [1–3], или задачи радиофотоники для передачи СВЧ энергии с помощью мощных оптических импульсов [4]. Использование именно полупроводниковых лазеров обусловлено их доступностью, компактностью и возможностью широкого выбора спектральных характеристик. Однако возникает задача, связанная с разработкой источников мощных лазерных импульсов субнаносекундной длительности, при этом чем короче будет длительность импульсов, тем более высокие частоты могут быть реализованы, что позволит поднять информационную емкость канала. Доступные решения, основанные на информационных лазерах, не могут быть использованы, так как не позволяют получать требуемый уровень оптической мощности. Кроме этого, наличие постоянной составляющей оптической мощности не позволяет использовать подобные источники в разработанных радиофотонных трактах [4]. Наиболее простой способ генерации мощных оптических импульсов субнаносекундной длительности полупроводниковыми лазерами основан на реализации режима модуляции усиления. В работе [5] было показано, что форма импульса тока накачки (амплитуда, длительность) оказывает существенное влияние на характеристики лазерных импульсов. При этом в режиме модуляции усиления возможность снижения длительности оптического импульса и

повышения пиковой мощности обусловлена не только выбором дизайна лазерной гетероструктуры и лазерного кристалла, но также формой импульса тока накачки. В общем случае для повышения пиковой мощности и сокращения длительности лазерного импульса требуется как сокращать длину резонатора, увеличивать фактор оптического ограничения и объем активной области, так и снижать длительность импульса тока накачки до субнаносекундных значений. Это позволит реализовать условия для генерации мощных оптических импульсов длительностью в несколько десятков пикосекунд. В случае мощных полупроводниковых лазеров, когда пиковая мощность превышает уровень единицы ватт, амплитуда тока накачки также может превышать уровень единиц ампер при длительности в субнаносекундном диапазоне. Разработка генераторов тока, обеспечивающих подобные характеристики, является сложной задачей, особенно если частоты повторения находятся в ГГц диапазоне. Таким образом, возникает необходимость разработки новых подходов для генерации высокочастотной последовательности мощных лазерных импульсов. В рамках данной работы исследован подход, который можно рассматривать как основу для решения задачи накачки последовательных сборок мощных полупроводниковых лазеров короткими импульсами тока для реализации различных режимов генерации. Основные принципы данного подхода представлены на рис. 1. В общем случае контур может быть построен на основе последовательно включенных быстродействующего токового ключа, емкостного накопителя и ряда лазерных диодов (рис. 1). Обычно роль быстродействующего токового ключа выполняют полевые транзисторы, однако их включение требует использования таких же быстродействующих

драйверов, что ограничивает возможность получения сильнооточных субнаносекундных импульсов с высокими частотами повторения. В рамках предлагаемой работы для генерации последовательности импульсов тока с требуемыми характеристиками предлагается использовать контур, в котором функцию быстродействующего сильнооточного ключа выполняет высоковольтный фотоактивируемый ключ (ФАК) на основе фотодиода. В этом случае механизм генерации импульсов тока будет заключаться в переводе ФАК в проводящее состояние за счет внешнего лазерного импульса, тогда амплитуда и длительность генерируемых импульсов тока будут определяться напряжением, которое может блокировать ФАК в закрытом состоянии, внешним емкостным накопителем (конденсатор на рис. 1), а также эквивалентной нагрузкой в виде набора последовательно включенных лазерных диодов и быстродействием ФАК. Также важно отметить, что использование именно высоковольтного ФАК позволит увеличить количество последовательно включенных лазеров и таким образом обеспечить гибкость в реализации условий для повышения частоты или пиковой мощности за счет использования соответствующих волоконных сумматоров. Фотоактивация ФАК требует использования компактного и эффективного источника коротких лазерных импульсов субнаносекундной длительности. Как было отмечено выше, решение данной задачи может быть основано на полупроводниковых лазерах, работающих в режиме модуляции усиления (gain switching). При этом за счет эффекта компрессии длительности в режиме модуляции усиления для генерации оптических импульсов длительностью сотни пикосекунд, чего достаточно для фотоактивации, могут использоваться относительно простые генераторы тока, обеспечивающие импульсы тока накачки длительностью в наносекундном диапазоне. Примеры оптимальных конструкций таких лазерных структур и экспериментальная реализация были рассмотрены в работах [5–7] а их отличительные особенности связаны с использованием объемной активной области с низким фактором оптического ограничения и достаточно протяженным резонатором длиной единицы миллиметров. Для лазерного диода, работающего в режиме модуляции усиления, должны быть реализованы условия токовой накачки, при которых генерация происходит только для первого релаксационного пика. При этом генерируемые лазерные импульсы субнаносекундной длительности обеспечивают фотоактивацию быстродействующего высоковольтного ФАК и позволяют реализовать условия для накачки ряда последовательно включенных лазеров уже импульсами тока субнаносекундной длительности, что, как отмечалось выше, позволит решить задачу повышения пиковой мощности лазерных импульсов и сокращения их длительности. В предлагаемой конструкции контура обеспечивается высокая относительная стабильность оптических импульсов генерируемых набором лазеров, так как накачка осуществляется от одного токового ключа на основе ФАК. Использование волоконного сумматора

позволит преобразовать генерируемую последовательность лазерных импульсов либо для решения задачи кратного повышения пиковой мощности, если сведение лазерных импульсов будет осуществляться через каналы волоконного сумматора, компенсирующие задержку, либо для генерации высокочастотной последовательности импульсов, если каналы волоконного сумматора будут вносить соответствующую задержку друг относительно друга, как это показано на рис. 1. Для случая радиотонных приложений последовательность лазерных импульсов из волоконного сумматора, который формирует необходимые задержки, может подаваться на фотодетектор, включенный, например, с нагрузкой в виде антенной решетки (рис. 1).

Из приведенного описания видно, что ключевая задача связана с необходимостью разработки пары быстродействующий высоковольтный ФАК–субнаносекундный лазерный диод фотоактивации (ФАК-ЛДФА). Цель предлагаемой работы связана с представлением результатов экспериментальных исследований пары ФАК-ЛДФА.

2. Экспериментальные образцы и результаты

Для создания ФАК была предложена базовая конструкция диодной структуры, включающая легированные эмиттеры $p\text{-AlGaAs}$, и $n\text{-AlGaAs}$ с нелегированным слоем GaAs , расположенным между ними толщиной 4 мкм. Схематическая зонная диаграмма показана на рис. 1, *b*. Структура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии. Из предложенной конструкции гетероструктуры были изготовлены образцы ФАК с круглым приемным окном диаметром 210 мкм, анодный электрод имел габаритные размеры 360–510 мкм. Использование конструкции ФАК, в которой область объемного заряда расположена в GaAs -слое, накладывает требования на спектральный диапазон источников лазерного излучения. В этом случае спектр ЛДФА должен перекрываться со спектром поглощения области GaAs . В рамках данной работы был использован излучатель на основе разработанной конструкции гетероструктуры [6], с шириной излучающей апертуры 100 мкм, обеспечивающий рабочую пиковую оптическую мощность 9.5 Вт при длительности первой осцилляции ~ 100 пс с длиной волны лазерной генерации 860 нм. Форма и пиковая мощность лазерных импульсов, используемых для фотоактивации, были получены с помощью разработанной нами методики измерения интегральной динамики генерации мощных многомодовых полупроводниковых лазеров, изложенной в работе [8]. Для этого с помощью оптической системы строилось увеличенное изображение выходного торца лазерного излучателя, вдоль которого происходило сканирование и последовательное измерение быстродействующим фотодетектором. Это позволяет получать корректные формы коротких лазерных импульсов, измеряемые быстродействующими фо-

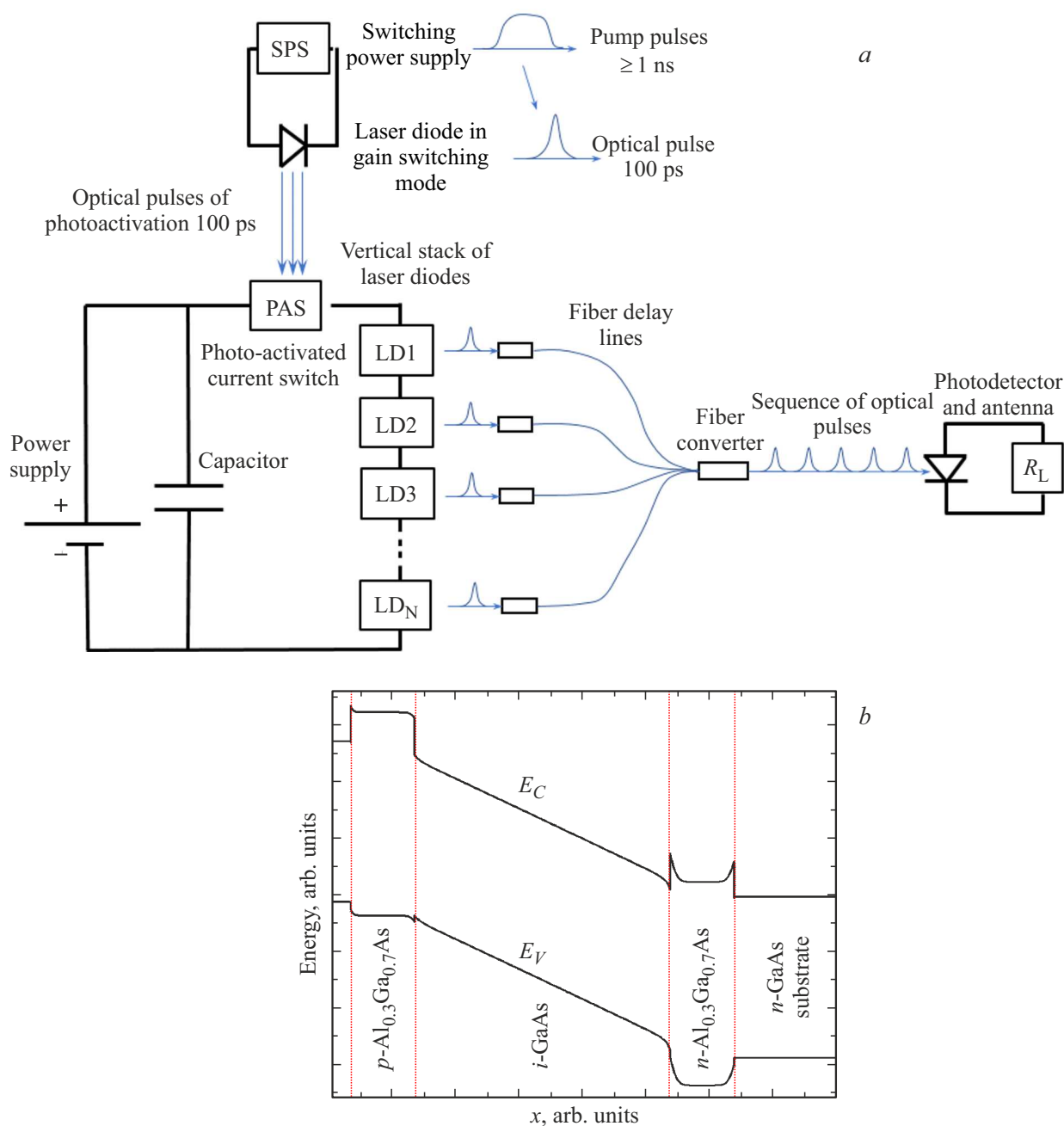


Рис. 1. *a* — Принципиальная схема генерации высокочастотной последовательности импульсов на антенной нагрузке. PAS — фотоактивируемый токовый ключ, LD — лазерный диод, SPS — импульсный источник питания, RL — антенная нагрузка. *b* — схематическое изображение зонной диаграммы без смещения.

тодетекторами, размер активной площадки для которых заметно меньше излучающей апертуры полупроводникового лазера. В разработанном стенде использовался быстродействующий фотодетектор NewFocus 1444-50 (20 ГГц), импульсы с фотодетектора регистрировались с помощью стробоскопического осциллографа Agilent 86117A (50 ГГц). Для расчета пиковой оптической мощности предварительно измерялась с помощью датчика OPHIR 3A-P-FS-12 средняя оптическая мощность последовательности импульсов.

Исследуемый образец ФАК согласованно монтировался на ВЧ полосковую линию, подача напряжения смещения и снятие сигнала фотоответа осуществлялись через вспомогательную цепь BiasTee Tektronix PSPL5580 с частотной полосой 18 ГГц. Сигнал фотоответа регистрировался на нагрузке 50 Ом с помощью осциллографа Agilent 54855A (6 ГГц) и ВЧ ослабителей, подобранных в соответствии с регистрируемой амплитудой сигнала. Для фотоактивации высоковольтного ФАК излучение от ЛДФА подводилось с помощью оптического волокна

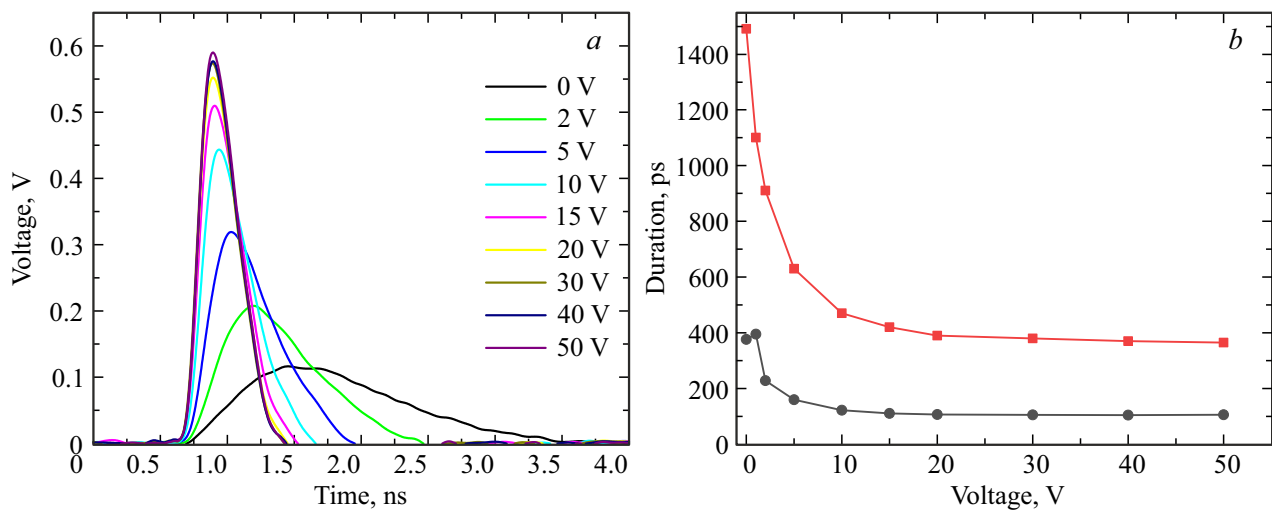


Рис. 2. *a* — импульсы напряжения на нагрузке 50 Ом для различных напряжений обратного смещения ФАК; *b* — зависимости длительности переднего фронта для уровней 20–80 % (круги) и длительности импульса напряжения на полувывоте (квадраты) на нагрузке 50 Ом от напряжения обратного смещения ФАК. Фотоактивация ФАК производилась лазерным импульсом длительностью 100 пс с передним фронтом 55 пс и пиковой мощностью 280 мВт.

с диаметром ядра 50 мкм. Далее излучение фокусировалось на приемной площадке ФАК с помощью пары асферических линз. Требуемый размер пятна засветки обеспечивался юстировкой детектора относительно фокальной плоскости с помощью высокоточных механических линейных трансляторов.

На первом этапе измерения выходных характеристик ФАК проводились при низкой пиковой мощности ЛДФА. На рис. 2 представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие динамику импульса напряжения на нагрузке при различных напряжениях смещения ФАК и засветке оптическим импульсом, полученным от ЛДФА с формой одиночной первой осцилляции, передним фронтом 35 пс (по уровню 20–80 %), длительностью 80 пс (на уровне половины амплитуды) и пиковой мощностью 280 мВт.

Видно, что длительность переднего фронта импульса напряжения на полезной нагрузке снижается с 400 до 100 пс при увеличении напряжения смещения ФАК от 0 до ~20 В. Длительность переднего фронта коррелирует с зависимостью полной длительности импульса напряжения на полезной нагрузке, которая также снижается с 1.5 до 350 пс в указанном диапазоне обратных напряжений ФАК. Для фиксированной пиковой мощности ЛДФА дальнейшее увеличение напряжения смещения ФАК до 50 В не дает заметного увеличения скорости включения и напряжения на полезной нагрузке. На рис. 3 показаны зависимости, полученные для двух значений пиковой мощности Р1 и Р2. Видно, что увеличение пиковой мощности ЛДФА в целом сохраняет наблюдаемую качественную зависимость (рис. 3), однако для напряжений > 20 В имеет место пусть и существенно более слабый, но все-таки рост амплитуды напряжения на полезной нагрузке, что может свидетельствовать

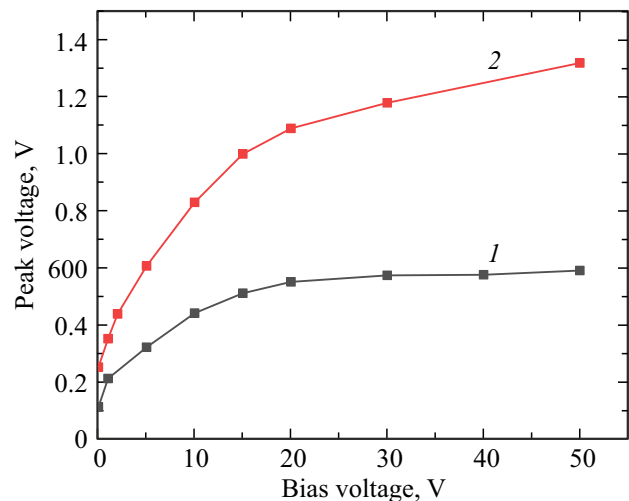


Рис. 3. Зависимости амплитуды импульса напряжения на нагрузке 50 Ом от напряжения смещения ФАК при фотоактивации лазерным импульсом в виде одиночной первой осцилляции с передним фронтом 35 пс и пиковой мощностью 280 (1) и 600 мВт (2).

о включении каналов ударной ионизации при более высоком пиковом токе.

Как было показано выше, достигаемая величина пикового напряжения на полезной нагрузке напрямую зависит от пиковой мощности импульса ЛДФА. По этой причине на заключительном этапе проводились исследования формы и амплитуды импульса напряжения, генерируемого в цепи ФАК, в зависимости от пиковой мощности импульса засветки. Для экспериментов использовался лазерный импульс, генерируемый ЛДФА, имеющий как одиночную первую осцилляцию с перед-

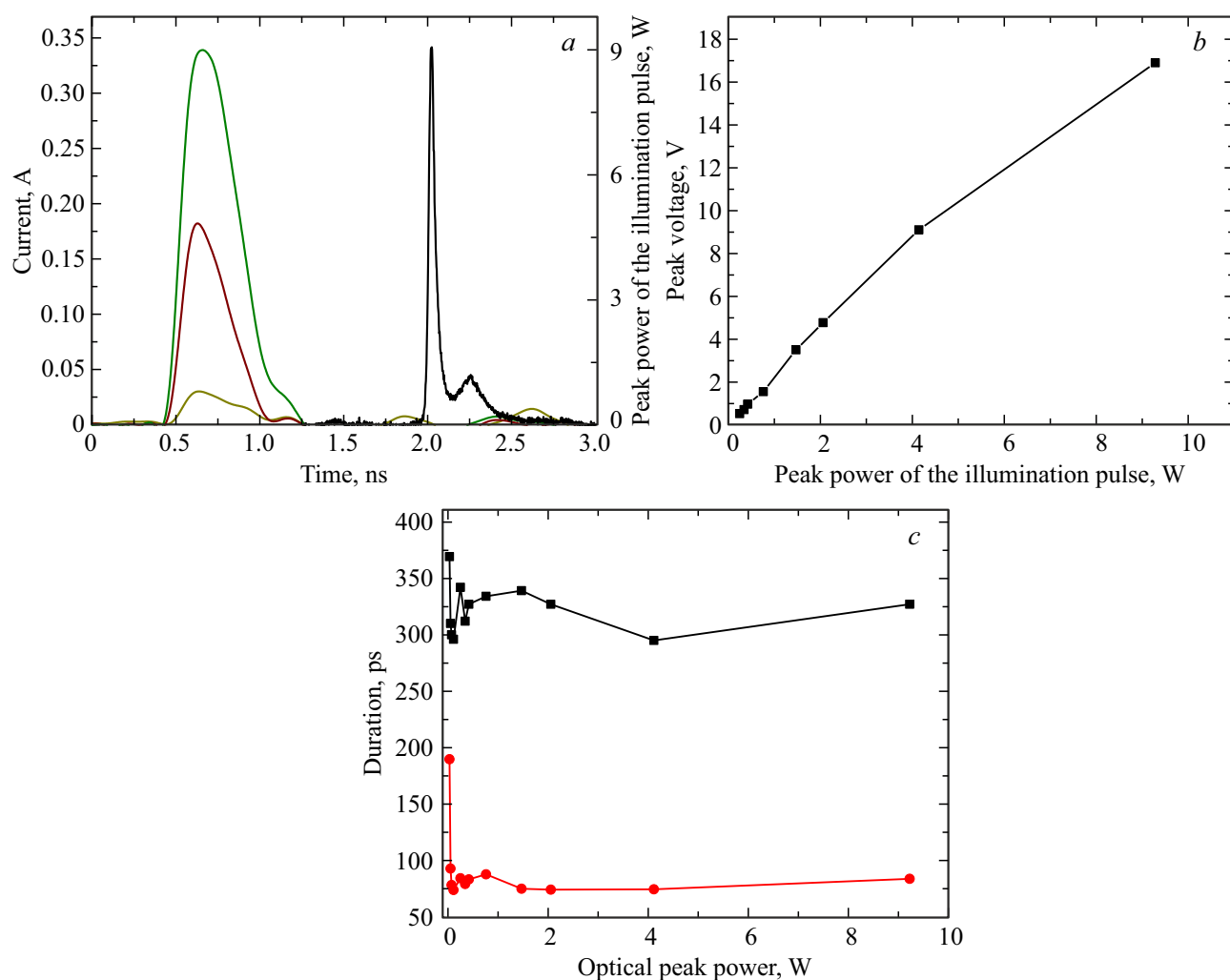


Рис. 4. *a* — импульсы тока для различных значений пиковой мощности лазерных импульсов фотоактивации, при напряжении обратного смещения ФАК 50 В и форма лазерного импульса фотоактивации с максимальной пиковой мощностью; *b* — зависимость пикового напряжения на полезной нагрузке 50 Ом от пиковой мощности лазерного импульса фотоактивации; *c* — зависимости длительности переднего фронта для уровней 20–80 % (круги) и длительности импульса напряжения на полувывоте (квадраты) на нагрузке 50 Ом от пиковой мощности лазерного импульса для напряжения обратного смещения ФАК 50 В.

ним фронтом 35 пс и длительностью 80 пс, так и медленную часть, интенсивность которой была в ~ 10 раз ниже (рис. 4, *a*). В эксперименте пиковая мощность, излучаемая ЛДФА, оставалась неизменной и составляла 9.5 Вт. Снижение мощности, подаваемой на приемную площадку ФАК, обеспечивалось набором оптических фильтров, что позволяло получать лазерные импульсы для фотоактивации одинаковой формы, при этом минимальная пиковая мощность в эксперименте достигала 250 мВт. Для исследований напряжение обратного смещения ФАК оставалось неизменным и составляло 50 В. Из рис. 4 видно, что зависимость амплитуды фотоответа от мощности импульса фотоактивации линейна до напряжений 9 В. Однако при дальнейшем повышении мощности фотоактивации наблюдается некоторое насыщение, и максимальная амплитуда фотоответа достигает 19 В при пиковой мощности фотоактивации 9.5 Вт. Для

всего исследуемого диапазона мощностей фотоактивации динамические характеристики импульсов напряжения, генерируемых в цепи ФАК, были достаточно близки (рис. 4). Достижимая длительность фронта импульсов напряжения составляла от 80 до 90 пс, а длительность импульса на полувывоте составляла от 300 до 340 пс. Таким образом, разработанные ключи на основе ФАК позволяют генерировать импульсы тока амплитудой до 380 мА и длительностью до 300 пс в цепи с нагрузкой 50 Ом. В дальнейшем для повышения амплитуды тока нагрузка в цепи может быть снижена.

3. Заключение

В заключение можно сказать, что использование пары быстродействующий высоковольтный ФАК—субнаносекундный лазерный диод фотоактивации позволяет ре-

шать задачу генерации субнаносекундных электрических импульсов. При этом изменения параметров генерируемых импульсов могут быть реализованы как за счет оптимизации нагрузки, так и конструкции сборок ФАК, в качестве которых может использоваться набор из последовательно включенных элементов. Однако дальнейшая оптимизация должна проводиться в экспериментах, с полезной нагрузкой в виде сборок последовательно включенных полупроводниковых лазеров, чтобы оценить требования к форме и амплитуде генерируемых электрических импульсов накачки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Khalighi, M. Uysal. IEEE Commun. Surveys Tutorials, **16** (4), 2231 (2014). DOI: 10.1109/COMST.2014.2329501
- [2] A. Jahid, M.H. Alsharif, T.J. Hall. J. Network Comput. Appl., **200**, 103311 (2022). DOI: 10.1016/J.JNCA.2021.103311
- [3] A.A. Bazil Raj, P. Krishnan, U. Darusalam, G. Kaddoum, Z. Ghassemloooy, M.M. Abadi, A.K. Majumdar, M. Ijaz. Electronics, **12** (8), 1922 (2023). DOI: 10.3390/ELECTRONICS12081922
- [4] D.F. Zaitsev, V.M. Andreev, I.A. Bilenko, A.A. Berezovsky, P.Y. Vladislavsky, Y.B. Gurfinkel, L.I. Tsvetkova, V.S. Kalinovskiy, N.M. Kondratiev, V.N. Kosolobov, V.F. Kurochkin, S.O. Slipchenko, N.V. Smirnov, B.V. Yakovlev. Radio Eng., **85** (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/J00338486-202104-17
- [5] V.S. Golovin, S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, A.E. Kazakova, N.A. Pikhtin. J. Light. Technol., **40** (13), 4321 (2022). DOI: 10.1109/JLT.2022.3159574
- [6] A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, V.V. Shamakhov, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.A. Klimov, S.V. Zazulin, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin. Quant. Electron., **53** (1), 1 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623170104
- [7] J.M. Huikari, E.A. Avrutin, B.S. Ryvkin, J.J. Nissinen, J.T. Kostamovaara. IEEE J. Select. Top. Quant. Electron., **21** (6), 189 (2015). DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2416342
- [8] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, M.G. Rastegaeva, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.E. Grishin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. Chin. Optics Lett., **22** (7), 072501 (2024). DOI: 10.3788/COL202422.072501

Редактор А.Н. Смирнов

A pulsed photoactivatable switch based on a semiconductor laser and an AlGaAs/GaAs high-voltage photodiode

A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, A.E. Rizaev, D.N. Nikolaev, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract An approach is proposed for generating short electrical pulses in a circuit with a payload, which can be semiconductor laser diodes. Within the framework of the proposed approach, a switch based on a high-voltage AlGaAs/GaAs photodiode was used to generate electrical pulses, and a high-power semiconductor laser operating in gain switching mode was used for its photoactivation with sub-ns transient times. Studies of the dynamics of photoactivated switches have shown their capability to produce voltage pulses, under an equivalent load of 50 ohms, with a peak amplitude of 19 V, a pulse width of 300 ps and a leading edge of 80 ps, which was observed when photoactivated by an optical pulse of a semiconductor laser with a peak power of 9.5 W, a leading edge of 35 ps and a pulse width of 100 ps.