

УДК 537.8

ГЕНЕРАЦИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ПИКΟΣЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ НАРАСТАНИЯ

© 2023 г. Член-корреспондент РАН С. В. Гарнов¹, В. В. Булгакова^{1,*},
Т. В. Долматов¹, А. А. Ушаков¹, В. В. Букин¹

Поступило 25.09.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принято к публикации 25.10.2023 г.

Предложен и исследован способ генерации сверхширокополосных электромагнитных импульсов наносекундной длительности с пикосекундным фронтом нарастания. В качестве излучателя использована рупорная антенна с фотопроводящим ключом, переключаемым пикосекундными лазерными импульсами. Показано, что длительность сверхширокополосных электромагнитных импульсов определяется длиной антенны и полупроводниковым материалом, а фронт нарастания — длительностью лазерных импульсов, используемых для инициации фотопроводящего ключа. В работе представлены характерные длительности импульсов ~1 нс с фронтом нарастания до ~34 пс.

Ключевые слова: сверхширокополосное излучение, рупорная антенна, фотопроводящий ключ, пикосекундные лазерные импульсы

DOI: 10.31857/S2686740023060159, **EDN:** GEFVUF

Создание излучателей сверхширокополосных (СШП) электромагнитных импульсов (ЭМИ) нано- и пикосекундного диапазона длительностей является актуальной проблемой [1–10]. Такие импульсы находят свое применение при решении широкого класса прикладных и фундаментальных задач, таких как визуализация объектов, защищенная радиосвязь, зондирование поверхности Земли, атмосферы и ионосферы [10], силовое воздействие на электронику и сверхширокополосная радиолокация [11]. В то же время СШП спектр излучения и короткие длительности ЭМИ могут позволить измерять переходные характеристики детекторов, что важно для задач метрологии. При этом для решения метрологических задач встает важный вопрос о возможности создания квазипрямоугольных ЭМИ, которые позволяли бы напрямую измерять переходные процессы в детекторах и определять их аппаратную функцию. Для генерации подобных импульсов обычно предлагается следующее техническое решение: антенна-излучатель подключается посредством коаксиально-волноводного перехода к генератору импульсного напряжения (ГИН). Для подобных излучателей длительность ЭМИ определяет-

ся как конструкцией антенны, так и импульсом напряжения, подаваемого с ГИН. Существующие наиболее быстродействующие ГИН позволяют сформировать импульсы длительностью порядка 100 пикосекунд, что ограничивает возможность получения более коротких длительностей сверхширокополосных электромагнитных импульсов в излучателях подобного типа.

В настоящей работе предлагается новая конструкция антенного излучателя СШП ЭМИ, в котором ГИН и коаксиально-волноводный переход заменяются на полупроводниковый коммутатор, оптически переключаемый короткими лазерными импульсами пикосекундной длительности. Подобная замена позволяет генерировать ЭМИ с существенно более короткими временами нарастания, которые определяются в первую очередь свойствами материала полупроводника и длительностью лазерных импульсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Модель генератора электромагнитных импульсов наносекундной длительности с пикосекундными фронтами нарастания (полеобразующая система) представлена на рис. 1. Фотопроводящий полупроводниковый элемент располагается в вершине полеобразующей системы в промежутке между металлическими пластинами, на которые подается импульсное напряжение от внешнего ис-

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vbulgakova573@gmail.com

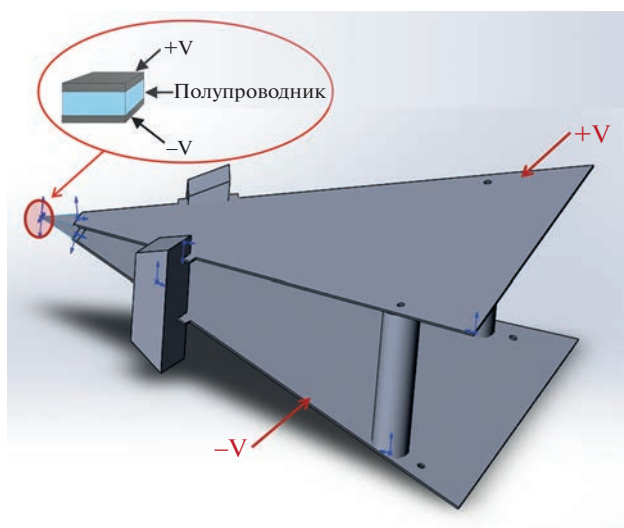


Рис. 1. Модель излучателя сверхширокополосных электромагнитных импульсов.

точника. Под действием лазерного излучения в полупроводниковом материале создаются носители заряда, которые, двигаясь в приложенном внешнем поле смещения, вызывают в полеобразующей системе фототок с фронтом нарастания, определяемым длительностью лазерного импульса.

После возникновения фототока происходит разрядка напряжения, приложенного к металлическим пластинам, и генерация бегущей электромагнитной волны. Длительность основной части

генерируемого импульса соответствует времени распространения электромагнитной волны по линии, образованной металлическими пластинами. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

При проведении экспериментов по генерации СШП ЭМИ в качестве источника возбуждения фотопроводящего полупроводникового ключа был использован фемтосекундный волоконный лазер с центральной длиной волны $\lambda = 1030$ нм, длительностью импульсов 2 пс и частотой следования импульсов 100 Гц. В качестве фотопроводящих ключей использовались: высокоомный арсенид галлия с удельным сопротивлением $\rho = 10^7$ Ом · см; кремний с удельным сопротивлением $\rho = 10^4$ Ом · см; алмаз, выращенный методом НРНТ (термобарический метод, основанный на кристаллизации алмаза из расплава углерода при высокой температуре и при высоком давлении) с концентрацией азотистой примеси 100 ppm. При использовании в качестве фотопроводящего ключа алмаза его фотовозбуждение осуществлялось второй гармоникой лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 515$ нм. Для регистрации временной формы генерируемых СШП ЭМИ внутри полеобразующей системы располагался широкополосный измеритель магнитного поля с чувствительностью 53 мВ/(А/м) и временем нарастания переходной характеристики 35 пс. Амплитуда приложенного к пластинам антенны импульсного напряжения смещения составляла 1 кВ, при длительности импульса ~ 10 нс.

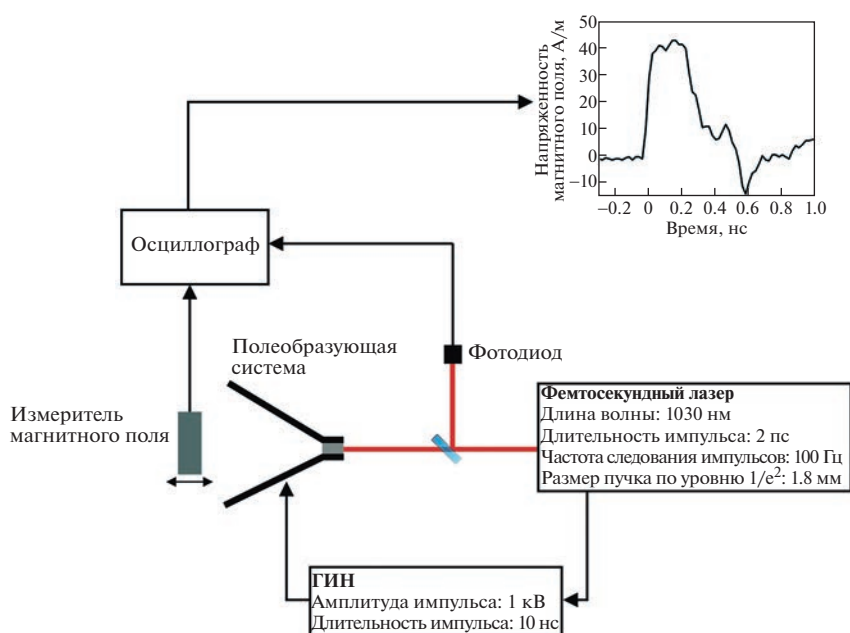


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по генерации и детектированию прямоугольных ЭМИ наносекундной длительности с пикосекундными фронтами нарастания.

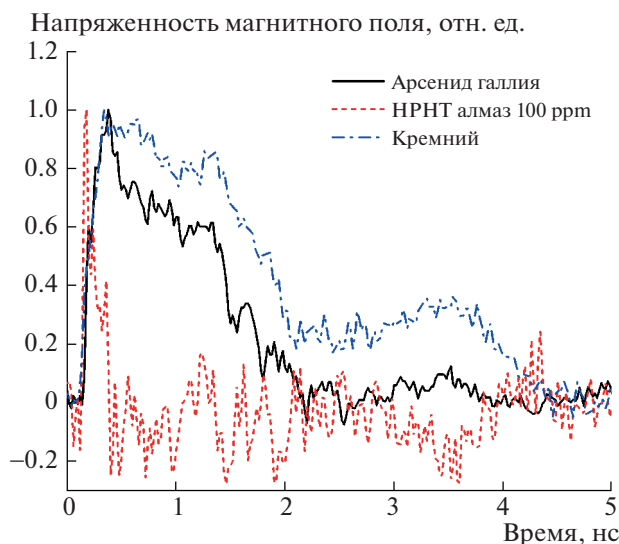


Рис. 3. Осциллограммы напряженности магнитного поля (нормировано) внутри полеобразующей системы (на расстоянии 250 мм от полупроводникового ключа) при использовании различных фотопроводящих ключей.

На рис. 3 представлены зарегистрированные осциллограммы напряженности магнитного поля (нормированные на единицу) при генерации электромагнитного излучения с использованием различных фотопроводящих ключей. Длина полеобразующей системы в описываемой серии экспериментов составляла 500 мм. Измеритель магнитного поля располагался на одинаковом расстоянии от фотопроводящего материала в экспериментах с различными фотопроводящими ключами. Из рис. 3 следует, что длительность генерируемого электромагнитного импульса различна для разных фотопроводящих материалов и явно зависит от времени жизни фотоиндуцированных носителей заряда [12]. В стандартной схеме оптической накачки — терагерцового зондирования [13] были измерены времена жизни фотоиндуцированных носителей заряда для образцов, используемых в качестве фотопроводящих ключей в полеобразующей системе. Так, для арсенида галлия время жизни носителей заряда составило $\tau = 620 \pm 100$ пс (при фотовозбуждении лазерным излучением с длиной волны 800 нм); для НРНТ алмаза $\tau = 10 \pm 1$ пс (при фотовозбуждении лазерным излучением с длиной волны 400 нм). Время жизни носителей заряда в кремнии составляет более 10 нс. При этом измеренные времена нарастания ЭМИ (34 пс) для всех исследованных полупроводниковых материалов совпадают с собственным временем нарастания (35 пс) использованного измерителя магнитного поля. Последнее дает основание сделать вывод о том, что в действительности фронт генерируемого в экспери-

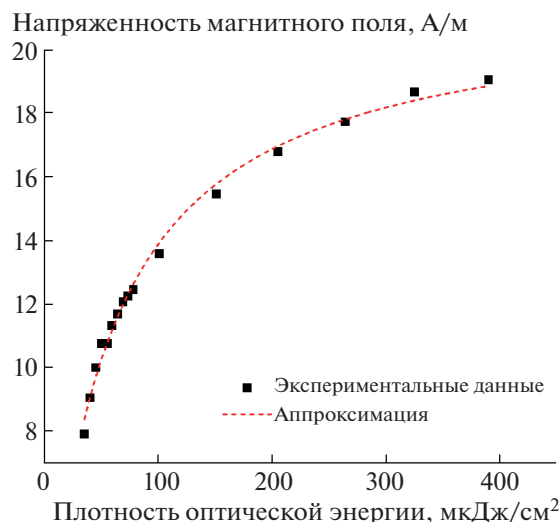


Рис. 4. Зависимость амплитуды напряженности магнитного поля электромагнитного излучения, генерируемого полеобразующей системой на основе арсенида галлия от плотности оптической энергии, коммутирующей фотопроводящий ключ.

ментах СШП ЭМИ оказывается существенно меньше 30 пс и зависит главным образом от длительности возбуждающих фотопроводник лазерных импульсов.

В работе проведены эксперименты по измерению зависимости напряженности магнитного поля от оптической энергии переключения фотопроводящего коммутатора на основе арсенида галлия (рис. 4). Экспериментальные данные были аппроксимированы зависимостью (1) [14], учитывающей эффект насыщения напряженности генерируемого поля:

$$H \approx \beta \left(\frac{F}{F + F_{\text{нас}}} \right), \quad (1)$$

$$F_{\text{нас}} = \frac{h\nu(1 + \sqrt{\epsilon})}{e\mu Z_0(1 - R)}, \quad (2)$$

где H — напряженность магнитного поля; β — константа, характеризующая амплитуду излучаемого поля, которая зависит от приложенного поля смещения; F — плотность энергии оптического излучения падающего на полупроводниковый элемент; $F_{\text{нас}}$ — плотность оптической энергии насыщения (2) ($h\nu$ — энергия кванта возбуждающего излучения, e — заряд электрона и ϵ , μ , R — диэлектрическая проницаемость, подвижность, коэффициент отражения полупроводника на длине волны излучения накачки, Z_0 — импеданс свободного пространства).

Из аппроксимации экспериментальной зависимости, приведенной на рис. 4, было получено значение плотности оптической энергии насы-

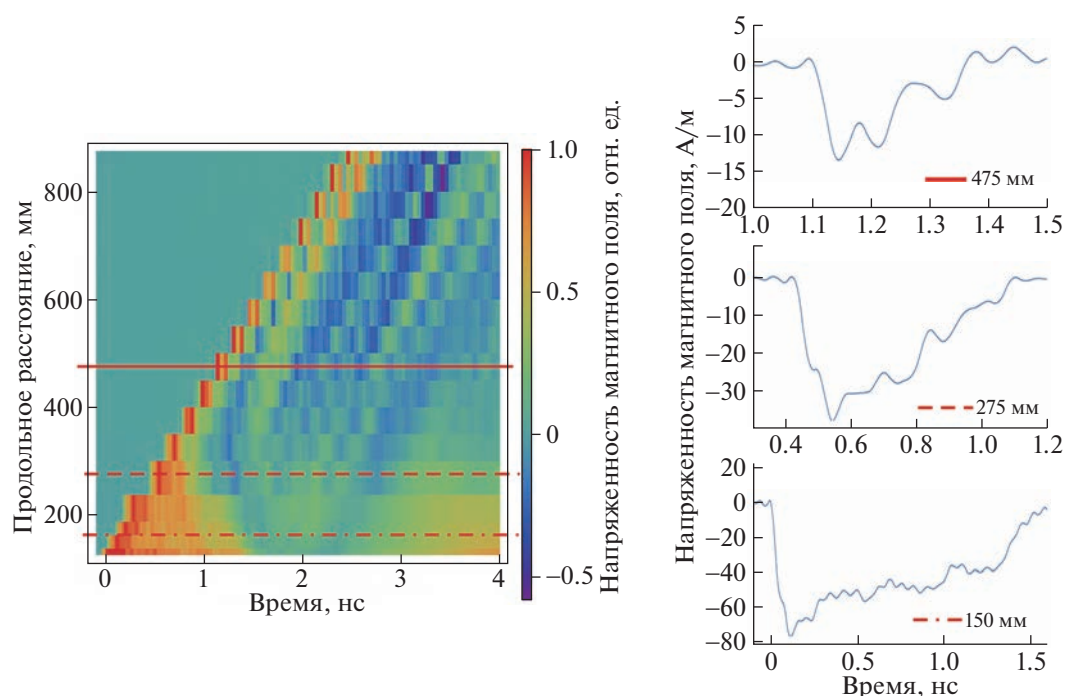


Рис. 5. Нормированная трехмерная зависимость временного распределения напряженности магнитного поля от положения измерителя магнитного поля. За начало отсчета принято расположение фотопроводящего ключа (арсенида галлия). На вставке приведены временные зависимости напряженности магнитного поля, измеренные на расстоянии: 150 мм, 275 мм и 475 мм.

щения, равное 55 мкДж/см^2 при напряженности электрического поля смещения 16 кВ/см , что согласуется со значением, полученным в работе [15] (40 мкДж/см^2 на длине волны излучения накачки 770 нм и напряженности электрического поля смещения 11 кВ/см). Константа, характеризующая амплитуду излучаемого поля β , при этом составила 22 А/м .

Было исследовано изменение формы ЭМИ по мере распространения вдоль полеобразующей линии, а также при выходе в свободное пространство. Для этого измеритель магнитного поля перемещался вдоль направления распространения ЭМИ с одновременной регистрацией осциллограмм напряженности магнитного поля. На рис. 5 представлена трехмерная зависимость временного распределения напряженности магнитного поля от расстояния, отсчитанного относительно расположения фотопроводящего ключа (арсенид галлия). Длина полеобразующей системы в описываемой серии экспериментов составляла 300 мм . Из рис. 5 видно, что в точке, примерно равной длине рупора $\sim 275 \text{ мм}$, происходит изменение временной формы напряженности магнитного поля, а в точке 475 мм излучение переходит в дальнюю зону, поскольку импульс перестает изменять форму, уменьшаясь только по амплитуде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана и создана полеобразующая система на основе рупорной антенны с фотопроводящим ключом для генерации электромагнитных импульсов наносекундной длительности с пикосекундными фронтами нарастания. Продемонстрирована генерация электромагнитных импульсов в указанной полеобразующей системе с использованием различных полупроводниковых фотопроводящих ключей: арсенида галлия, кремния и НРНТ-алмаза. Исследовано изменение формы генерируемых СШП ЭМИ по мере их распространения внутри полеобразующей системы и в свободном пространстве. Установлено, что длительность генерируемых электромагнитных импульсов определяется длиной полеобразующей системы и временем жизни фотоиндуцированных носителей заряда в полупроводнике, а их фронт оказывается существенно меньше 30 пс и зависит главным образом от длительности возбуждающих фотопроводник пикосекундных лазерных импульсов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В.В. Кононенко за предоставление образца НРНТ алмаза.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-790.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yalandin M.I., Luybutin S.K., Rukin S.N. et al. Formation of nano- and subnanosecond width high-PRF powerful voltage pulses by using a hybrid modulator schemes // Proc. of 13th Intern. Symp. on High Current Electronics – Tomsk, Russia. 25–29 July 2004. P. 153.
2. Koshelev V.I., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al. High-Power ultrawideband radiation source with multielement array antenna // Proc. of 13th Intern. Symp. on High Current Electronics – Tomsk, Russia. 25–29 July 2004. P. 258.
3. Efanov V.M. Gigawatt all solid state nano- and picosecond pulse generators for radar applications // Proc. on 14th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Dallas, TX. June 2003. P. 100.
4. Prather W.D., Baum C.E., Torres R.J. et al. Survey of worldwide high-power wideband capabilities // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. V. 46. No. 3. August 2004. P. 335–344.
5. Mesyats G.A., Rukin S.N., Shpak V.G., Yalandin M.I. Generation of high-power sub-nanosecond pulses // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4 / Ed. by E. Heyman, B. Mandelbaum, and J. Shiloh. N.Y.: Plenum, 1999.
6. Efanov V.M., Fedorov V.M., Grekhov I.V. et al. Multiunit UWB Radiator of Electro-Magnetic Waves with Controlled Directional Pattern // Proc. of 13th Intern. Symp. on High Current Electronics – Tomsk, Russia. 25–29 July 2004. P. 262.
7. Сахаров К.Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: Московский гос. ин-т электроники и мат., 2006. 159 с.
8. Fedorov V.M., Efanov M.V., Ostashev V.Ye. et al. Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // Electronics. 2021. V. 10. № 9. P. 1011. <https://doi.org/10.3390/electronics10091011>
9. Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Ульянов А.В. и др. Излучательно-измерительный комплекс для исследования прохождения сверхширокополосных сигналов в атмосфере и ионосфере земли // Теплофиз. выс. темп. 2021. Т. 59. № 6. С. 877–884. <https://doi.org/10.31857/S0040364421060028>
10. Гарнов С.В., Селемир В.Д., Букин В.В., Долматов Т.В., Горбенко Д.А., Жданов В.С., Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Остафьев В.Е., Семенов В.А., Ульянов А.В., Федоро В.М., Шурупов М.А. Прямой эксперимент по прохождению сверхширокополосных импульсов субнаносекундной длительности в атмосфере Земли // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 509. № 1. С. 9–14. <https://doi.org/10.31857/S2686740023020062>
11. Кондратьев А.А. Угловое и спектральное распределение сверхширокополосного излучения фотоэмиссионного источника // Журн. техн. физики. 2018. Т. 88. № 3. С. 434–437. <https://doi.org/10.1134/S1063784218030106>
12. Пат. US20160197215A1BAE, US14/588,467. Generation of Flexible High Power Pulsed Waveforms / Alexander Kozyrev, John McGeehan, Yannick Morel; заявитель и патентообладатель Systems Information and Electronic Systems Integration Inc; опубл. 02.01.2015.
13. Němec H., Kadlec F., Kužel P. Methodology of an optical pump-terahertz probe experiment: An analytical frequency-domain approach // The Journal of chemical physics. – 2002. Т. 117. № 18. С. 8454–8466.
14. Ropagnol X. et al. Toward high-power terahertz emitters using large aperture ZnSe photoconductive antennas // IEEE Photonics Journal. 2011. V. 3. № 2. P. 174–186.
15. You D. et al. Generation of high-power sub-single-cycle 500-fs electromagnetic pulses // Optics letters. 1993. V. 18. № 4. P. 290–292.

GENERATION OF RECTANGULAR NANOSECOND ELECTROMAGNETIC PULSES WITH A PICOSECONDS RISE FRONT

Corresponding Member of the RAS S. V. Garnov^a, V. V. Bulgakova^a,
T. V. Dolmatov^a, A. A. Ushakov^a, and V. V. Bukin^a

^aProkhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A method for generation of ultra-wideband electromagnetic pulses with a nanosecond duration and a picosecond rise time has been studied. The emitter is a horn antenna with a photoconductive switch irradiated by laser pulses. It has been shown that the duration of ultra-wideband electromagnetic pulses is determined by the length of the antenna and the semiconductor material, and the rising front is determined by the front of the laser pulses used to initiate the photoconductive switch. The work shows typical pulse durations of ~1 ns with a rising edge of up to ~34 ps.

Keywords: ultra-wideband radiation, horn antenna, photoconductive switch, picosecond laser pulses