

Формирование биполярного импульса на коаксиальных линиях с использованием лавинных S-диодов на GaAs

В.В. Бармин^{}, И.В. Романченко*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**valery@barmin.club*

Аннотация. Представлен теоретический расчет коаксиальной волноводной геометрии камеры для формирования биполярного импульса и экспериментальные результаты, полученные с камерой. Теоретический расчет включал в себя расчет геометрии камеры в среде CST microwave studio для разряда заряженных коаксиальных линий лавинным S-диодом на основе GaAs. Для учета временной характеристики коммутаций диода были взяты характеристики проводимости, полученные в более ранней работе. Практические результаты показали возможность формирования наносекундного биполярного сигнала с импульсной мощностью (0.1–8.5) кВт при импедансе системы 50 Ом и амплитудой более 100 В, что качественно совпадает с результатами теоретического расчета.

Ключевые слова: коаксиальная линия, биполярный импульс, лавинный диод, GaAs

1. Введение

Использование наносекундного биполярного импульса в радиолокации, связи и других областях техники требует новых решений для получения мощных импульсов с малым джиттером. Методов преобразования в наносекундном диапазоне монополярного импульса в биполярный достаточно много, из них можно выделить основной принцип использования короткозамкнутых волновых линий [1, 2] для получения части импульса с обратной полярностью, что приводит к большим потерям и требует понижения импеданса линий для компенсации выходной амплитуды [1]. Период биполярного импульса можно корректировать разностью во времени поступления сигналов разных полярностей на входах сумматора. Использование схемы с триаксиальной линией и одним разрядником позволяет формировать биполярные импульсы мегаваттного диапазона [3, 4]. В данной работе была использована схема с заменой триаксиальной линии и разрядника на две коаксиальные линии и лавинный диод с лазерным управлением. Предварительно был проведен расчет камеры для инверсии полярности импульса с последующим сравнением теоретических и практических результатов.

2. Моделирование

Временной расчет был проведен в среде «CST studio microwave» для камеры, являющейся волновым несогласованным тройником со стандартными разъемами N-типа, способными выдерживать СВЧ сигнал максимальной амплитудой до 1 кВ. Конструкция тройника, используемая для расчета представлена на Рис 1.

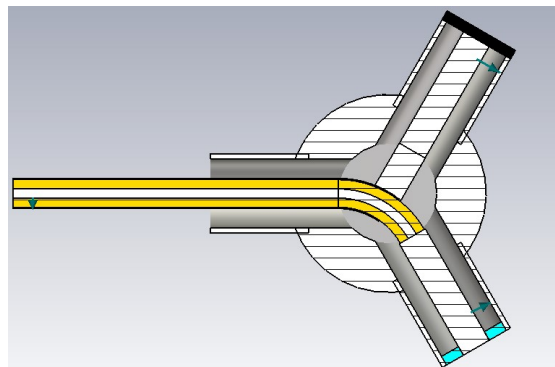


Рис. 1. Конструкция камеры для инверсий полярности импульса.

На первом выходе тройника заменена центральная жила отрезком коаксиального кабеля марки РК50-4-11, оплетка которого соединена с центральным проводником второго выхода тройника, где установлен эквивалент сопротивления в 50 Ом, обозначенный на Рис. 1 черным цветом. Центральная жила коаксиала закорочена с центральной жилой третьего разъёма, где установлен эквивалент S-диода, выделенный синим цветом. Эквивалент диода является материалом с временной нелинейной проводимостью, соответствующей лавинному диоду в работе [5]. Монитор напряжения “voltage 1” установлен в начале коаксиальной линии, монитор “voltage 2” – перед эквивалентом диода, а монитор “voltage 3” – перед эквивалентом сопротивления. В расчете подавался импульс положительной полярности через порт, установленный на вход коаксиального кабеля (Рис. 2). Подобная конфигурация позволяет получить импульс обратной полярности в момент, когда замкнут диод согласно расчетным осциллограммам на Рис. 3. Осциллограммы получены с трех мониторов напряжения, где красным обозначен входной сигнал с монитора, установленного в коаксиальной линии, зеленым обозначена сигнал с монитора рядом с эквивалентом диода, а синим сигналом с монитора рядом с нагрузкой.

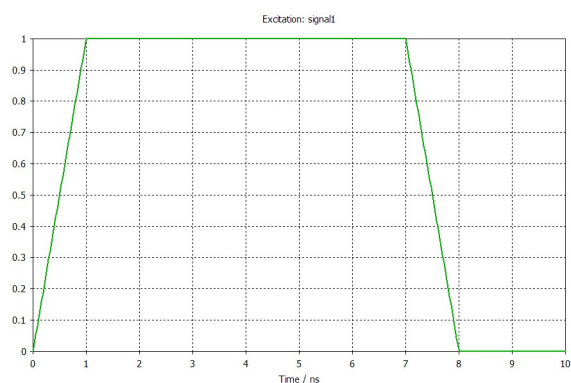


Рис. 2. Тестовый импульс, формируемый на порте.

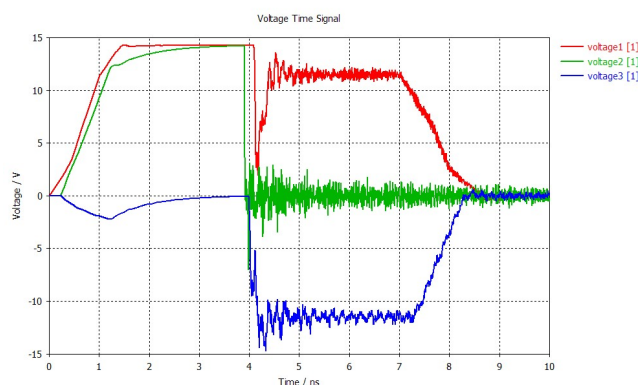


Рис. 3. Входные сигналы с мониторов напряжения.

Дополнительно проведено моделирование распределения электрической напряжённости по геометрии в зависимости от времени. В начальный момент времени происходит зарядка отрезка коаксиальной линии со вторым выходом тройника, что видно на Рис. 4 и 5.

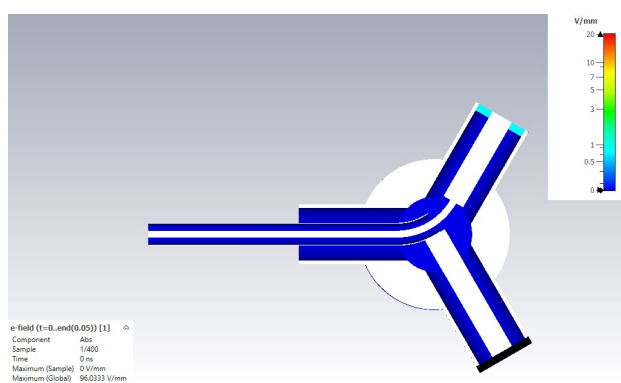


Рис. 4. Начальный момент моделирования напряженности электрических полей.

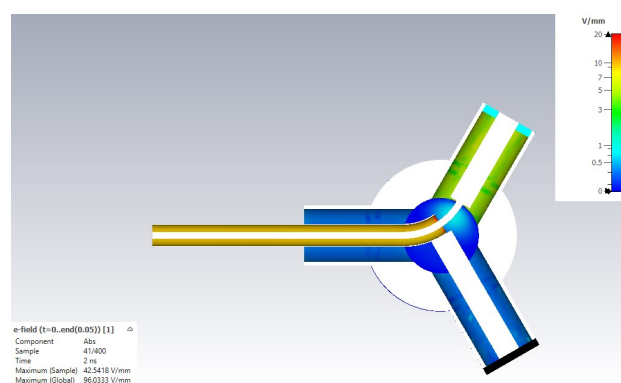


Рис. 5. Распределение напряженности электрических полей после 2 нс.

После полной зарядки в течении 3 нс, на 4 нс, происходит резкое увеличение проводимости в течении 600 пс (Рис. 6), что приводит к замыканию центрального и

внешнего проводника во 2 канале тройника и переходу накопленной энергий в 3 канал с нагрузкой к 6 нс (Рис. 7).

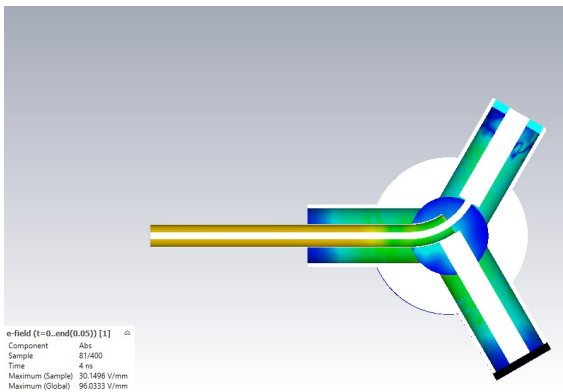


Рис. 6. Распределение напряженности электрических полей после 4 нс.

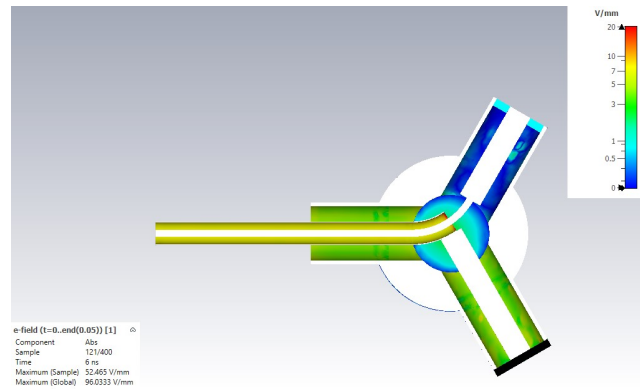


Рис. 7. Распределение напряженности электрических полей после 6 нс.

В процессе дальнейшего моделирования напряженность электрического поля на 3 канале и оплетке коаксиального кабеля падает, формируя выходного импульс с обратной полярностью.

3. Практическая проверка результатов моделирования

Схема для проверки результатов (Рис. 8) была собрана из тиратронного источника прямоугольных наносекундных импульсов (1), применённого в работе [5], подключен отрезок коаксиального кабеля, на конце у которого был установлен тройник (3) с подключением проводников согласно расчетной конструкции. В качестве нагрузки подключен набор аттенюаторов суммарным ослаблением 59 дБ, а вместо модели использована камера с малым S-диодом (5) из работ [5, 6] с короткозамкнутым выходом. Сам диод облучался лазером DTL-375QT с шагом задержки управляющего импульса в 5 нс (4). Параллельно подключён коаксиальный кабель с аттенюаторами с общим ослаблением 42 дБ, выходы аттенюаторов подключены к двум каналам осциллографа DSO9254A с предельной частотой дискретизаций 2.5 ГГц для регистраций исходного импульса с генератора и после инверсий полярности в тройнике. Внешний вид экспериментальной схемы представлен на Рис. 9.

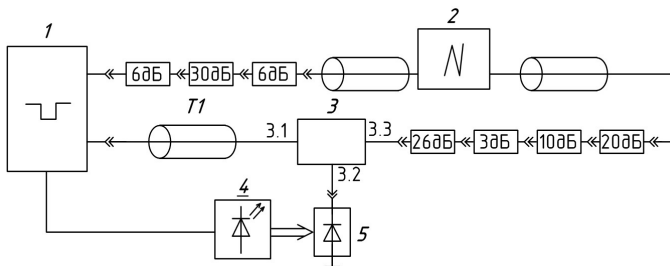


Рис. 8. Схема экспериментальной проверки расчетной модели.



Рис. 9. Внешний вид схемы для проверки.

В ходе проверки инверсий полярности сигнала были получены осциллограммы коммутаций выходного импульса генератора с длительностью по полувысоте 38 нс и выходные сигналы с третьего порта тройника. Полученные осциллограммы представлены на

Рис. 10, где сигналы с отрицательной полярностью являются выходными сигналами с генератора при разрядке, формирующей линий, а сигналы с положительной полярностью – это выходной сигнал с третьего порта тройника, обозначенный 3.3 на Рис. 8.

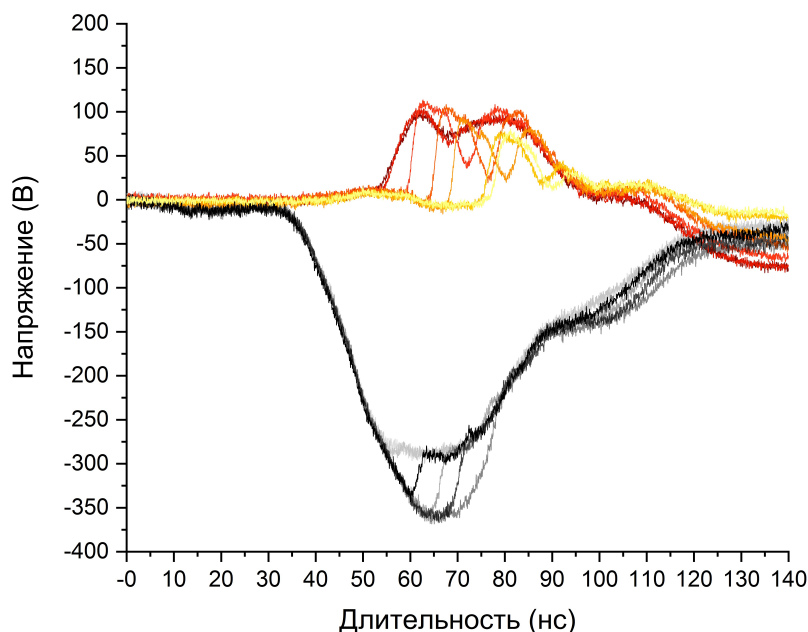


Рис. 10. Выходные сигналы с генератора, имеющие отрицательную полярность, и выходные сигналы с инвертора, имеющие положительную полярность.

Из результатов экспериментальной инверсии полярности сигнала с временной коммутацией лазером можно сделать следующие выводы. Получен сигнал с обратной полярностью с максимальной амплитудой в 2.4 раза меньшей, чем у исходного импульса. Задержка срабатывания по времени S–диода определяет длительность сигнала, однако только первые три сигнала соответствуют прямоугольный импульсу. Дальнейшее увеличение задержки более 10 нс приводит к искажению выходного сигнала, формируя колебания, что может быть связано с процессами формирования плазменного шнура в S–диоде в момент коммутаций. Стоит отметить, что в момент коммутации амплитуда исходного импульса резко снижается практически до нуля в расчете. При анализе экспериментальных осциллограмм видно, что снижение амплитуды вследствие коммутации диодом линий на землю составляет от 100 до 175 В, что соответствует амплитуде выходного сигнала, как и в моделировании, и указывает на предельные параметры ВАХ диода в таком режиме работы. Таким образом показано, что реакции схемы на замыкание диода в моделировании и эксперименте совпадают на качественном уровне.

4. Формирования биполярного импульса

Используемая схема формирования биполярного импульса с одним S–диодом в данном исследовании аналогична схеме с одним разрядником в работах [3, 4] и представлена на Рис. 11. Диоды, применённые в этом исследовании, были двух типов с разной площадью поперечного сечения: 31.4 мм^2 и 7.3 мм^2 [5], далее большой диод и малый диод, соответственно. Эксперименты по коммутации проведены для 2 типов диодов: с управляемым пробоем и в режиме лавинного пробоя. Отличием от предыдущего эксперимента (Рис. 8) является наличие дополнительной коаксиальной линии обозначенной T2 на Рис. 11.

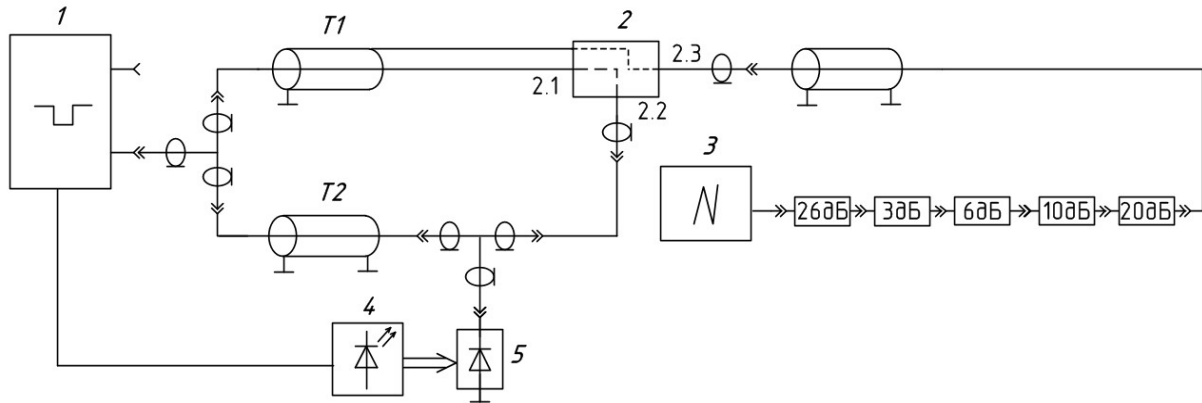


Рис. 11. Выходные сигналы с генератора, имеющие отрицательную полярность и выходные сигналы с инвертора, имеющие положительную полярность.

4.1. Формирование биполярного импульса большим диодом

При использовании схемы эксперимента с малым диодом были зарегистрированы биполярные сигналы до и после работы в течение 1.5 минут для исключения увеличения амплитуды выходного импульса более 37 В и увеличения задержки срабатывания на 19 нс, что связано с прогревом тиратрона. Измерения в данном режиме будут называться «горячим стартом». Полученные осциллограммы с выхода схемы при коммутации лазером диода с шагом задержки 5 нс и импульсом генератора, усредненного по 100 импульсам, представлены на Рис. 12. Выходные сигналы в режиме лавинного пробоя с импульсом от генератора и усреднённым выходным сигналом показаны на Рис. 13.

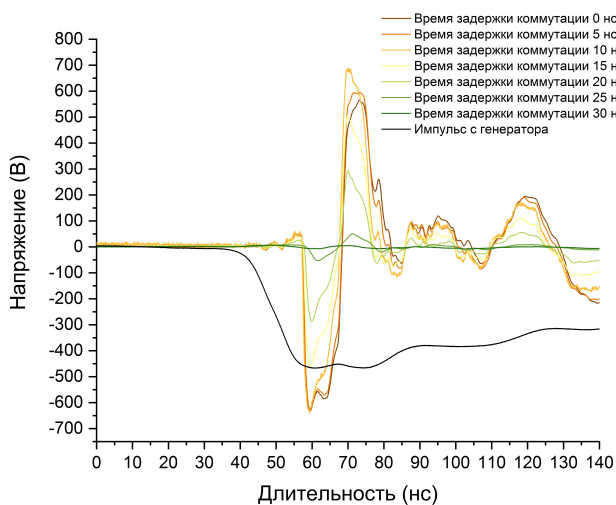


Рис. 12. Экспериментальные осциллограммы при коммутации лазером большого диода. Черным обозначен усреднённый по 100 импульсам сигнал от генератора импульсов, цветным обозначены выходные сигналы с шагом задержки управляющего импульса 5 нс с усреднением по 100 импульсам.

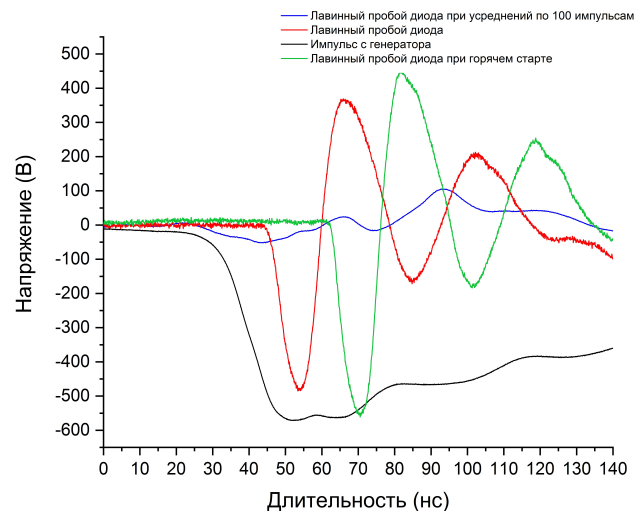


Рис. 13. Экспериментальные осциллограммы при лавинном пробое большого диода. Черным обозначен усреднённый по 100 импульсам сигнал от генератора импульсов, красным – сигнал со схемы биполярного импульса с лавинным пробоем диода, синим – сигнал, усредненный за 100 импульсов, зелёным – сигнал при лавинном пробое диода в режиме горячего старта.

Полученные результаты позволяют утверждать, что амплитуда выходного сигнала в случае лазерной коммутации из-за рассогласования превышает исходную амплитуду импульса генератора. В случае лавинного пробоя амплитуда выходного сигнала примерно

равна амплитуде исходного импульса. Нестабильность задержки срабатывания тиратрона в источнике ниже при более высоких напряжениях, что позволяет уменьшить джиттер выходного импульса до 1 нс, исходя из измерений по 100 импульсам.

4.2 Формирование биполярного импульса малым диодом

Для малого диода были проведены аналогичные измерения, однако форма выходного сигнала соответствовала биполярному. Для формирования на генераторе более выраженной формы импульса параллельно выходу генератора и искусственной формирующей линии был установлен резистор МОУ мощностью 5 Вт. Данная мера позволила получить выходные сигналы, более приближенные к биполярной форме. Результат при коммутации лазером диода и выходной импульс генератора с усреднением представлены на Рис. 14. В случае больших диодов при установке резистора выходной сигнал не менял форму, а только уменьшался на 20% по амплитуде. Выходные сигналы в режиме лавинного пробоя, усредненный импульс от генератора и выходные сигналы при «холодном» и «горячем старте» представлены на Рис. 15. Усреднение проводилось по 100 импульсам.

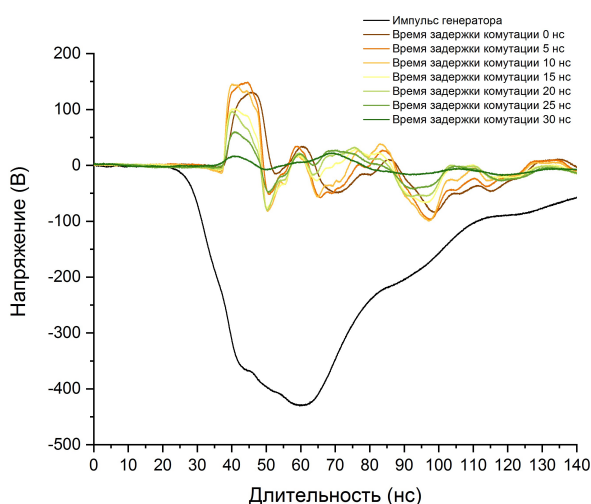


Рис. 14. Экспериментальные осциллограммы при коммутации лазером малого диода. Черным обозначен усреднённый по 100 импульсам сигнал от генератора импульсов, цветным обозначены выходные сигналы с шагом задержки управляющего импульса 5 нс с усреднением по 100 импульсам.

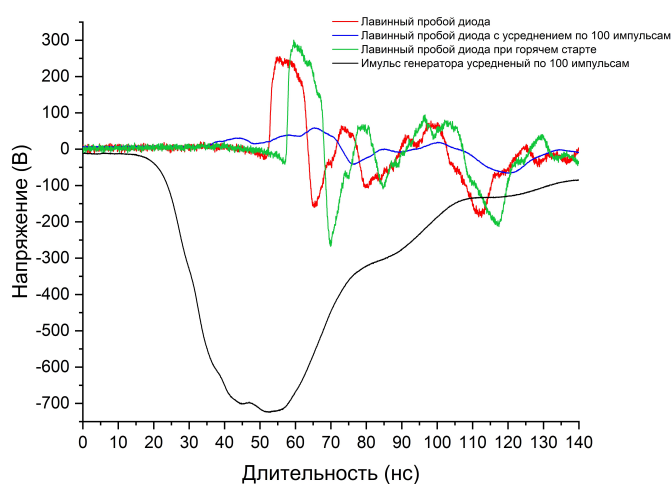


Рис. 15. Экспериментальные осциллограммы при лавинном пробое малого диода. Черным обозначен усреднённый по 100 импульсам сигнал от генератора импульсов, красным — сигнал со схемы биполярного импульса с лавинным пробоем диода, синим — сигнал, усредненный за 100 импульсов, зеленым — сигнал при лавинном пробое диода в режиме горячего старта.

При включении диода в начальный момент времени происходит формирование сигнала с положительной полярностью с последующим переходом к отрицательной полярности сигнала, а не на оборот, как в случае с большим диодом. Здесь сказывается влияние установленного резистора на параметры схемы. Максимальная амплитуда выходного сигнала в 3 раза меньше исходного импульса и меняется в зависимости от момента коммутаций лазером. Например, максимальная амплитуда достигается при коммутации с задержкой в 10 нс, однако наилучшая форма сигнала, соответствующая биполярному сигналу, будет при задержке 20 нс. Последующее продолжение биполярного сигнала с отрицательной полярностью возможно объяснить отражением исходного сигнала в схеме. При управляемой коммутации с помощью лазера в режиме горячего старта джиттер выходного сигнала со схемы не превышает 2 нс. В случае неуправляемого лавинного пробоя из-за изменчивости параметров выходного импульса от генератора джиттер может достигать

14 нс. Учитывая, что у данного типа диодов минимальный джиттер может составлять 30 пс [7] и 1.4 нс [8], решением является использование твердотельного источника, способного обеспечить минимальный джиттер диода. На осциллограммах после биполярного сигнала присутствует колебание (≈ 40 нс), у которого отрицательная составляющая по амплитуде превышает отрицательную составляющую исходного импульса. Это соответствует длительности импульса с формирующей линии генератора, что может являться сложением отраженных волн.

5. Заключение

В ходе исследований был получен биполярный сигнал при коммутации большого и малого диода с амплитудами 650 и 300 В, соответственно. В случае большого диода при управляемом запуске достигнуто приемлемое значение джиттера в 1 нс с формированием биполярного сигнала при задержке управляемого импульса для лазера, не превышающего 20 нс. Наибольшая амплитуда выходного биполярного импульса достигнута при управляемой коммутации (650 В) по сравнению с лавинным пробоем (в среднем 500 В), что возможно объясняется более равномерным распределением носителей заряда по большей площади в диоде от воздействия лазерного излучения. Также при коммутации большого диода происходит более выраженное формирование импульса в отличие от малого диода, что может являться влиянием барьерной емкости диода или его ВАХ.

В эксперименте с малым диодом не удалось сформировать биполярный импульс с равной амплитудой полувольт даже при более высоком уровне амплитуды выходного импульса с генератора (730 В). Амплитуда положительной полувольты равна 290 В, а отрицательной – 260 В. Максимальная амплитуда биполярного сигнала меньше в 2.4 раза по отношению к исходной амплитуде импульса с генератора, что объясняется большим внутренним сопротивлением диода. В лавинном режиме для малого диода амплитуда выходного сигнала выше, чем в случае управляемого пробоя, тем самым исключается влияние момента коммутаций на максимальные амплитудные характеристики, которые получены в эксперименте с большим диодом. Стоит отметить, что используемые диоды обладают уменьшенным ресурсом, поскольку они уже применялись ранее в экспериментах [5, 6].

Благодарность

Выражаем благодарность заведующему лабораторией неравновесных процессов в полупроводниковой электронике Томского государственного университета к.ф.-м.н. Прудяеву Илье Анатольевичу за предоставленное оборудование и содержательные обсуждения результатов данной работы.

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FWRM-2022-0002).

6. Список литературы

- [1] Л.П. Лысых, Е.В. Балзовский, Формирование биполярного СШП импульса путем совмещения монополярных импульсов отдельных генераторов, *9-я Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы радиофизики*, Томск, Россия, Окт. 2021.
- [2] Г.А. Месяц, М. И. Яландин, Пикосекундная электроника больших мощностей, *Успехи физических наук*, том 175, 52, Март 2005; doi: 10.1070/PU2005v048n03ABEH002113

- [3] А.М. Ефремов, Б.М. Ковальчук, Ю.Д. Королев, Эффект кратковременного прерывания тока при его переходе через нуль в субнаносекундных газовых разрядниках высокого давления, *Журнал технической физики*, том **82**, 4, 2012.
- [4] А.М. Ефремов, В.И. Кошелев, Б.М. Ковальчук, В.В. Плиско, Четырехканальный источник мощных импульсов сверхширокополосного излучения, *Электроника и радиотехника*, 3, 61, 2013; doi: 10.7868/S0032816213030038
- [5] V. Konev, V. Barmin, P. Pripitnev, I. Romanchenko, S. Maltsev, I. Prudaev, Switching characteristics of avalanche GaAs S-diodes when exposed to voltage pulses with a subnanosecond front, in *Proceeding of SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*, Russia, 2019; doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958151
- [6] V. Konev, V. Barmin, P. Pripitnev, I. Romanchenko, S. Maltsev, I. Prudaev, Study of the switching characteristics of Gas S-diodes, *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, Russia, Sep. 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241948
- [7] В.Н. Илюшенко, Б.И. Авдоченко, В.Ю. Баранов, В.С. Липин, В.П. Чураков, *Пикосекундная импульсная техника*. Москва: Энергоатомиздат, 1993.
- [8] V.V. Kopyev, T.E. Smirnova, V.L. Oleinik and I.A. Prudaev, The influence of the deep level type on a switching time delay of GaAs avalanche S-diodes, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **1124**, 071013, 2018; doi: 10.1088/1742-6596/1124/7/071013