

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ ДРЕЙФОВЫХ ДИОДОВ С РЕЗКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ

© 2021 г. А. В. Рожков*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

*e-mail: rozh@hv.ioffe.rssi.ru

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.

После доработки 03.03.2021 г.

Принята к публикации 16.03.2021 г.

Показана перспектива использования высоковольтных дрейфовых GaAs-диодов с резким восстановлением для формирования импульсов субнаносекундной длительности. Приводится электрическая схема генератора, обеспечивающего при общей эффективности $\geq 25\%$ получение на нагрузке 50 Ом импульсов амплитудой до 550 В с временем нарастания напряжения 0.43 нс, длительностью на полувысоте амплитуды 0.73 нс и частотой следования до 200 кГц.

DOI: 10.31857/S003281622104025X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для генерации наносекундных высоковольтных импульсов в широком диапазоне коммутируемой мощности используются дрейфовые Si-диоды с резким восстановлением (д.д.р.в.). Наносекундное восстановление блокирующей способности полупроводниковой структуры д.д.р.в. обеспечивается как конструктивными особенностями самой структуры, так и параметрами режима модуляции [1]. В реализованных высоковольтных генераторах на основе сборки из нескольких последовательно включенных Si-д.д.р.в. при амплитуде импульсов ≥ 2 кВ время нарастания напряжения составляет ≥ 1.5 нс, а длительность на полувысоте амплитуды (FWHM — full width at half maximum) достигает 2–3 нс [2, 3]. На основе эпитаксиальных Si-д.д.р.в. изготовлены генераторы высоковольтных импульсов амплитудой ~ 500 В, временем нарастания напряжения 0.5–0.7 нс и FWHM = (1.5–1.7) нс [4, 5].

Результаты первых экспериментальных исследований GaAs-д.д.р.в. [6] показали ряд фундаментальных и конструктивных преимуществ структур, выполненных на основе полупроводниковых материалов, обладающих большей по сравнению с Si шириной запрещенной зоны и большей подвижностью носителей заряда. Цель настоящей работы — экспериментальное подтверждение перспективы использования GaAs-д.д.р.в. для генерации субнаносекундных высоковольтных импульсов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования были выполнены с использованием GaAs- $p^+ - p - i - n - n^+$ -структур, изготовленных методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного объема раствора-расплава арсенида галлия в галлии. Диодные структуры имели характерный для д.д.р.в. профиль распределения концентрации примесей в p -, i -, n -областях. Градиент концентрации в базовых областях достигал двух порядков при: концентрации остаточной примеси $\leq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в i -области и концентрации акцепторной и донорной примесей на уровне $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на границе $p - p^+$ -области и $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ на границе $n - n^+$ -области. Толщина W_p -, i -, n -областей диодных структур изменялась в зависимости от технологических режимов и находилась в интервале значений: $W_p = (20 - 30)$ мкм, $W_i + W_n = (30 - 40)$ мкм. Площадь диодов составляла $\sim 0.8 \text{ мм}^2$ и ограничивалась диаметром мезаструктур, изготавливаемых с помощью химического травления. Измеренные методом Лэкса времена жизни неравновесных носителей заряда в n -базе (τ_p) не превышали 100 нс. Максимальное блокирующее напряжение диодов $U_b \sim 500$ В было сопоставимо с U_b д.д.р.в., выполненных на основе Si с удельным сопротивлением $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ [2]. Емкость GaAs-д.д.р.в. составляла 7–4 пФ при обратных напряжениях в интервале 200–500 В.

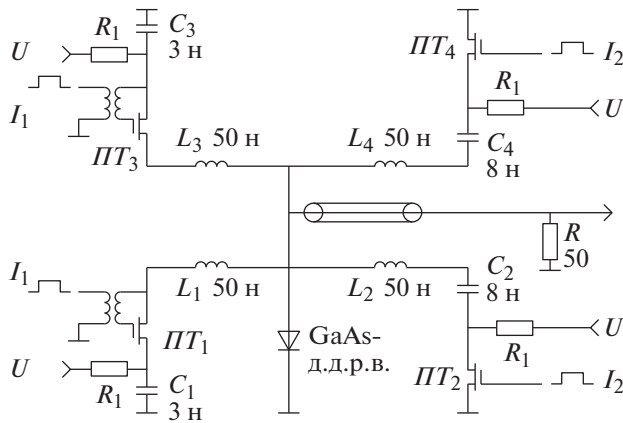


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема двухтактного генератора высоковольтных субнаносекундных импульсов с двумя встречно-параллельными L - C -контурами. $ПТ_1$ – $ПТ_4$ – полевые транзисторы IRLML0040.

При разработке конструкции генератора для обеспечения предельно высокой рабочей частоты использовалось схемотехническое решение, позволявшее минимизировать тепловыделение на единичном активном элементе схемы. На рис. 1 приведена схема двухтактного генератора, в котором длительность и амплитуда импульсов прямого (J_p) и обратного (J_r) токов формировались с использованием двух встречно-параллельных L - C -контуров. Логические микросхемы TTL и драйверы IXDD404SIA использовались при формировании управляющих сигналов I_1 , I_2 .

Схема работает следующим образом. При подаче импульса управления I_1 на затвор полевых транзисторов $ПТ_1$, $ПТ_3$ в течение первого полупериода колебаний симметричных L_1 - C_1 и L_3 - C_3 контуров через д.д.р.в. проходит ток накачки $J_f = 2J_{\max 1}$. В момент смены направления тока при подаче импульса управления I_2 на затвор полевых транзисторов $ПТ_2$, $ПТ_4$ включаются контуры L_2 - C_2 и L_4 - C_4 обратного тока $J_r = 2J_{\max 2}$. Токи $J_{\max 1}$ и $J_{\max 2}$ ограничены волновым сопротивлением контуров $\rho_1 = (L_1/C_1)^{1/2} = (L_3/C_3)^{1/2}$, $\rho_2 = (L_2/C_2)^{1/2} = (L_4/C_4)^{1/2}$, сопротивлением базовой области д.д.р.в. и сопротивлением транзисторов $ПТ_1$ – $ПТ_4$. Минимальное время нарастания прямого и обратного тока составляло $t^* = 7$ нс и ограничено временем срабатывания полевых транзисторов.

В ходе исследований были установлены условия быстрого восстановления блокирующей способности д.д.р.в., когда при выбранной скорости и длительности накопления и рассасывания неравновесных носителей заряда, в соответствии с [1, 6], наблюдалась необходимая синхронность момента истощения плазменного заряда в базе

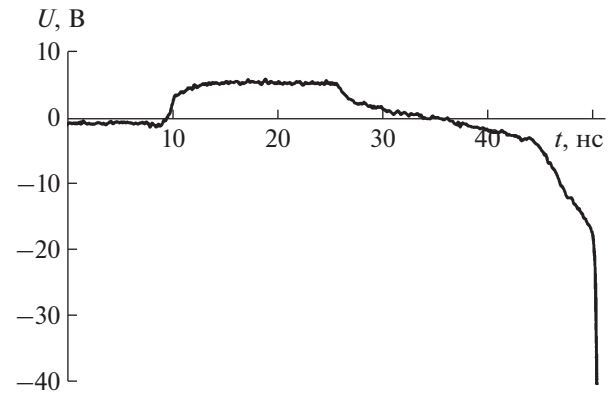


Рис. 2. Осциллограмма напряжения при переключении GaAs-д.д.р.в. до момента резкого восстановления. Напряжение питания $U = 30$ В.

диода и момента формирования области объемного заряда p - n -перехода. Осциллограф DS06102A Agilent Technologies обеспечивал регистрацию переходных характеристик с временным разрешением ~ 200 пс. В измерительном тракте были использованы два 20 дБ аттенюатора. Для сохранения и дальнейшей обработки числовых данных использованы файлы текстового CSV-формата.

На рис. 2 приведена осциллограмма процесса переключения диода до момента резкого нарастания напряжения. В режиме формирования субнаносекундных импульсов длительность прямого тока t_f составляла ≤ 20 нс. При напряжении $U = 40$ В максимальная величина накопленного в базе диода заряда достигала 120 нКл. При указанных длительностях прямого тока диффузионная модуляция слаболегированной базы диода отсутствовала.

Толщина диффузионного плазменного слоя $L_D = (Dt_f)^{1/2}$ при характерных для GaAs значениях коэффициента диффузии $D = 20$ см²/с не превышала 6 мкм. Остаточное сопротивление составляло ~ 1 Ом. Время задержки сигнала управления I_2 относительно I_1 было подобрано таким образом, чтобы обрыв обратного тока происходил в максимуме его амплитуды J_r . В результате обрыва тока в д.д.р.в. энергия, накопленная в индуктивностях L_2 , L_4 контуров обратного тока, перебрасывалась за время $\sim L_2/(2\rho)$ в согласованную линию передачи с волновым сопротивлением $\rho = R$ и затем в нагрузку $R = 50$ Ом. При этом амплитуда импульса на нагрузке достигала значений $U_m = 2J_{\max 2}\rho$.

Приведенная на рис. 3 осциллограмма выходного импульса генератора свидетельствует о достигнутых рекордно малых для дрейфовых диодов временах нарастания t_n и спада t_c напряжения: $t_n = 0.43$ нс, $t_c = 0.53$ нс – при длительности импульса на полувысоте FWHM, равной 0.72 нс.

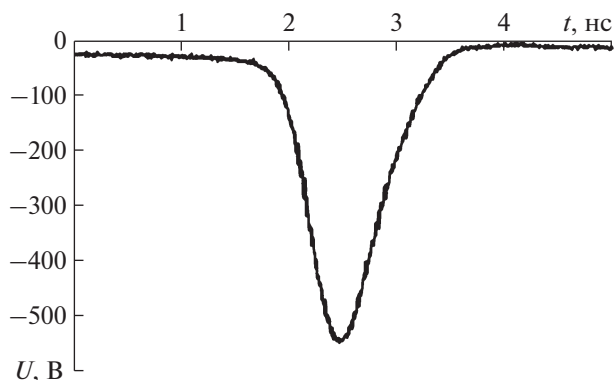


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на нагрузке $R = 50$ Ом. Напряжение питания $U = 39$ В.

Разброс длительности задержки формирования выходного импульса относительно момента включения импульса управления I_2 не превышал значения, задаваемого стабильностью синхронизации измерительной схемы (~ 30 пс). Используемая электрическая схема генератора и динамические характеристики полевых транзисторов обеспечивали генерирование высоковольтных субнаносекундных импульсов на частотах вплоть до 200 кГц (период следования импульсов $T = 5$ мкс). При этом амплитуда напряжения, формируемого на нагрузке, в 14 раз превышала напряжение питания схемы генератора.

В отсутствие радиаторов и воздушной вентиляции активных элементов схемы общий объем, занимаемый элементами схемы двухтактного генератора с двумя встречно-параллельными $L-C$ -контурами, ограничивался размерами $30 \times 30 \times 50$ мм. Оценки показывают, что основное тепловыделение происходило на этапе нарастания и спада напряжения на активных элементах схемы. При сопоставимости суммарных динамических потерь на транзисторах $ПТ_1-ПТ_4$ и единичном GaAs-д.д.р.в. рабочая частота генератора ограничивалась возможностями транзисторных ключей и величиной рассеиваемой мощности в диодной структуре, плотность тока в которой достигала 1.5 кА/см².

Для анализа уровня достигнутых частотно-импульсных характеристик и оценки эффективности модуляции при повышенных частотах в табл. 1 приведены основные импульсные параметры ге-

Таблица 1. Основные импульсные параметры генератора в зависимости от рабочей частоты

U_m , В	t_n , нс	FWHM, нс	f , кГц	U , В	i_n , мА	η , %
300	0.43	0.76	400	19	110	27
400	0.43	0.75	250	26	85	27
500	0.42	0.73	200	34	84	25

нератора в зависимости от рабочей частоты. Здесь также указаны значения напряжения U , среднего тока i_n источника питания и полного коэффициента полезного действия η генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально показана эффективность использования GaAs-д.д.р.в. для генерации субнаносекундных высоковольтных импульсов на частотах в несколько сотен кГц. Установлено, что коэффициент полезного действия генератора во всем диапазоне частот был не ниже 25%. По ряду параметров подтверждено преимущество GaAs-структур, обладающих большей по сравнению с Si шириной запрещенной зоны и большей подвижностью носителей заряда. Так, плотность тока GaAs-д.д.р.в. более чем в 10 раз превосходит оптимальную плотность тока Si-д.д.р.в. Время нарастания напряжения и длительность импульсов на полувывсоте амплитуды для GaAs-д.д.р.в. существенно меньше значений соответствующих параметров для Si-д.д.р.в. Последнее дает определенные преимущества при использовании GaAs-д.д.р.в. в короткоимпульсных модуляторах в системах сверхширокополосной электроники, так как снижение длительности строб-импульсов приводит к повышению общей помехозащищенности. Существующий интерес к разработкам такого рода устройств определяет необходимость дальнейших исследований, направленных на повышение амплитуды выходного импульса в генераторах на основе сборок из нескольких последовательно включенных GaAs-д.д.р.в.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грехов И.В., Месяц Г.А. // УФН. 2005. Т. 175. № 7. С. 735.
2. Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Степанянц А.Л. // ПТЭ. 2007. № 3. С. 75.
3. Merensky L.M., Kardo-Sysoev A.F., Shmilovitch D., Kesar A.S. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. № 11. P. 3138. <https://doi.org/10.1049/el.2013.2129>
4. Merensky L.M., Kesar A.S., Kardo-Sysoev A.F. // IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2013). Tel Aviv, Israel, 21-23 October 2013. 978-1-4673-5756-2/13.
5. Kesar A.S., Sharabani Y., Shafir I., Zoran Sh. and Sher A. // IEEE Trans. Plasma Science. 2016. V. 44. № 10. P. 2424. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2605744>
6. Рожков А.В., Козлов В.А. // ФТП. 2003. Т. 37. № 12. С. 1477.