

Пикосекундные высоковольтные дрейфовые диоды на основе арсенида галлия

© А.В. Рожков[†], В.А. Козлов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 8 июля 2003 г. Принята к печати 14 июля 2003 г.)

Представлены экспериментальные результаты исследования динамики восстановления диодов на основе слабо легированных эпитаксиальных слоев. Изученные диоды принадлежат к классу дрейфовых диодов с резким восстановлением и предназначены для работы в схемах формирования и генерирования пикосекундных импульсов. Полученные значения скорости восстановления обратного напряжения ($dU/dt \approx 2000$ В/нс) значительно превосходят предельные скорости восстановления известных нам пикосекундных диодов с накоплением заряда и являются рекордными для дрейфовых диодов с резким восстановлением.

Возможность использования быстрого дрейфового механизма восстановления блокирующего напряжения впервые была показана при исследовании кремниевых высоковольтных диодов [1]. В настоящее время кремниевые дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ) хорошо известны как ключевые элементы генераторных схем, формирующих нано- и субнаносекундные киловольтные импульсы напряжения [2,3]. Большие перспективы связаны, на наш взгляд, с использованием других полупроводниковых материалов, обладающих большей по сравнению с Si шириной запрещенной зоны и большей подвижностью неравновесных носителей заряда, а значит, и большей дрейфовой скоростью при сопоставимых значениях напряженности электрического поля. В последние годы получены первые результаты экспериментального исследования ДДРВ на основе арсенида галлия [4] и карбида кремния [5]. Лучшие из опубликованных ранее результатов по времени восстановления блокирующего напряжения ДДРВ лежат в пределах субнаносекундного диапазона, а пикосекундный диапазон до последнего времени оставался доступным лишь диодам с накоплением заряда и новому поколению кремниевых ДДРВ [6].

Жидкофазная эпитаксия из ограниченного раствора—расплава арсенида галлия в галлии была использована как базовая технология выращивания исследованных нами диодных $p^+ - p^0 - n^0 - n^+$ -структур. Основные усилия при использовании этой технологии были направлены на создание достаточно узких базовых p - и n -областей (шириной 1–10 мкм) с предельно низкими уровнями концентрации на границе слоя объемного заряда. В процессе изготовления диодных структур особое внимание уделялось изучению влияния условий химической обработки подложки и температурного отжига раствора—расплава на основные электрофизические параметры p - n -перехода и его положение относительно границы подложка—(эпитаксиальный слой). Предельные электрофизические параметры диодных структур соответствовали следующим значениям: максимальные блокирующие напряжения $U_{p-n} = 220$ В, типичные зна-

чения токов при обратном смещении p - n -перехода в интервале от 0 до $0.9U_{p-n} \lesssim 1$ мкА при комнатной температуре и $\lesssim 10$ мкА при 200°C ; времена жизни дырок в n -базе $\tau_p \approx 20$ –60 нс; концентрации остаточных примесей в области p - n -перехода $\lesssim 10^{14}$ см⁻³ и на границе n - n^+ -областей $\lesssim 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³; толщина p^0 - и n^0 -областей соответственно $W_p \approx 3$ –5 мкм и $W_n \approx 5$ –12 мкм; емкость p - n -перехода площадью $S \approx 3 \cdot 10^{-4}$ см² $C_{p-n} \leq 2$ пФ. Диоды имели достаточно низкие дифференциальные сопротивления в прямом направлении, а падения напряжения при плотности прямого тока ~ 100 А/см² составляли $\lesssim 1.4$ В.

Динамические параметры были измерены в типичном для дрейфовых диодов режиме импульсного питания прямым и обратным токами. Были использованы два из известных варианта питания прямым током. В первом варианте измерительная схема была выполнена таким образом, что время спада прямого тока строго совпадало с временем нарастания обратного. Для этого варианта схемы включения ДДРВ использовалась возможность регулирования как длительности прямого тока — в интервале от 2 до 10 нс, так и его амплитуды — в интервале нескольких сотен мА. В другом варианте измерительной схемы обеспечивалась регулируемая задержка между временем нарастания обратного тока и временем спада прямого тока. Характерные значения времени задержки лежали в интервале 2–7 нс, а значения амплитуды и длительности прямого тока составляли соответственно $I_f = 0.1$ А и $T_f = 1.0$ нс. В обоих вариантах измерительных схем включения ДДРВ величина накопленного при протекании прямого тока заряда Q к моменту начала нарастания обратного тока составляла 0.1–5 нКл.

На втором этапе при переключении диодной структуры обратным током начинается рассасывание накопленного в базе заряда. Величина тока дырок через p - n -переход задавалась скоростью нарастания импульса обратного напряжения. В наших экспериментах минимальное время нарастания обратного напряжения (T_r) составляло ~ 500 пс (рисунок), что существенно меньше времени жизни дырок (τ_p) в базе. Поскольку в

[†] E-mail: rozh@hv.ioffe.rssi.ru

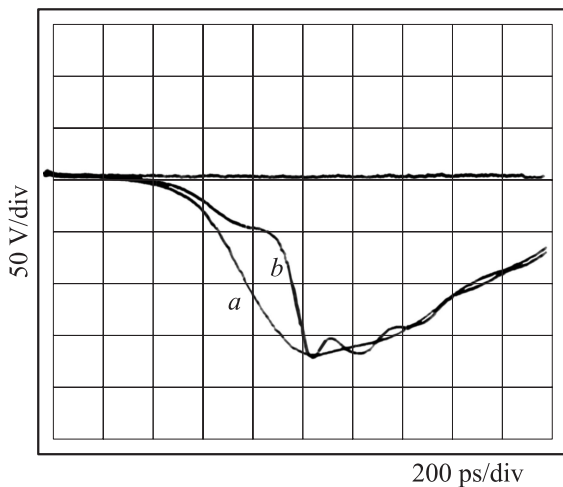
Параметры экспериментальных GaAs- и Si-ДДРВ (DSRD) и диодов с накоплением заряда (step recovery diodes, SRD) с указанием названия фирм — изготовителей

Изготовитель	Тип диода	U_{p-n}^{br} , В	τ_p , нс	t_r , пс	Q , нКл	dU/dt , В/нс
Hewlett Packard	SRD	25	25	75	0.3	330
Hewlett Packard	SRD	60	100	250	1.5	240
Alpha	SRD	45	25	200	0.8	225
Alpha	SRD	75	200	400	1.4	190
MACom	SRD	30	8	70	0.2	430
MACom	SRD	50	15	150	0.7	330
Ioffe Institute	GaAs DSRD	500	200	200	100	2500
Ioffe Institute	GaAs DSRD	220	40	100	2.5	2000
Ioffe Institute	Si DSRD	500	20000	500	800	1000
Ioffe Institute	Si DSRD	200	5000	200	9.0	1000

Примечание. U_{p-n}^{br} — напряжение пробоя.

наших ДДРВ заряд, перенесенный обратным током I_r , практически равен заряду Q , то значение амплитуды обратного тока к моменту спада концентрации дырок до нулевого значения (T_0) строго контролируется амплитудой и длительностью прямого тока или задержкой между временем нарастания обратного тока и временем спада прямого тока. С момента T_0 начинается процесс восстановления напряжения на появившейся области пространственного заряда. Интервал времени спада обратного тока соответствует длительности фронта нарастания t_r импульса напряжения, формируемого на нагрузке.

На рисунке приведены осциллограммы исходного переключающего импульса, а также импульса напряжения, формируемого на нагрузке 50 Ом. Приведенные осциллограммы свидетельствуют о значительных скоростях переключения ДДРВ и достижении рекордно малых для дрейфовых диодов времен нарастания напряжения. Впрочем, эти времена соответствуют дрейфовой скорости носителей в базе v_n , максимальные



Осциллограммы напряжения: *a* — исходный переключающий импульс; *b* — импульс, формируемый на нагрузке 50 Ом при переключении GaAs-ДДРВ.

значения которой ограничиваются скоростью насыщения $v_s = 10^7$ см/с. Для проведения анализа уровня достигнутых результатов приводим таблицу основных технических параметров экспериментальных GaAs-ДДРВ и диодов с накоплением заряда (step recovery diodes) с указанием фирм — изготовителей.

Следует отметить, что по абсолютным значениям времени переключения t_r GaAs-ДДРВ сопоставимы с лучшими диодами с накоплением заряда известных фирм — изготовителей, а по таким параметрам, как рабочее напряжение и скорость нарастания напряжения dU/dt , намного превосходят их. Последнее наиболее важно при использовании такого рода ключей — размыкателей в схемах короткоимпульсных модуляторов для сверхширокополосной короткоимпульсной электроники (ultra wide band — в англоязычной терминологии) [2]. Следует также упомянуть о более высоких по сравнению с Si рабочих температурах приборных структур на основе арсенида галлия. Это позволяет надеяться на достижение значительных частот повторения импульсов при сохранении достаточной эффективности генерации сверхкоротких импульсов. В настоящее время в качестве первых результатов можно привести выходные параметры изготовленных на основе GaAs-ДДРВ импульсных генераторов с импульсными амплитудами до 600 В, длительностями импульсов $\lesssim 0.5$ нс и частотой следования до 1 МГц. Более детальное исследование эффективности и надежности GaAs-ДДРВ на больших частотах повторения импульсов, в том числе при их последовательном соединении, а также возможности их практического использования, будет являться задачей дальнейших работ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 02-02-08028) и ЗАО „Импульсные технологии“.

Авторы выражают благодарность С.В. Зазулину и А.Ф. Кардо-Сысоеву за помощь в проведении экспериментов и полезные замечания при обсуждении полученных результатов.

Список литературы

- [1] И.В. Грехов, В.М. Ефанов, А.Ф. Кардо-Сысоев, С.В. Шендере-рей. Письма ЖТФ, **9** (7), 435 (1983).
- [2] A.F. Kardo-Sysoev. In: *Ultra wide Band Rada Technology*, ed. by D. Taylor (Boca Raton, London, N.-Y., Washington, D.C. CRC Press, 2001) ch. 9.
- [3] V.A. Kozlov, I.A. Smirnova, S.A. Moryakova, A.F. Kardo-Sysoev. *Proc. 25th Int. Power Modulator Conference PMC 2002* (Hollywood, CA, 2002) p. 441.
- [4] В.И. Корольков, А.В. Рожков, Л.А. Петропавловская. Письма ЖТФ, **27** (17), 46 (2001).
- [5] И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.О. Константинов, Т.П. Самсонова. Письма ЖТФ, **28** (13), 24 (2002).
- [6] V.A. Kozlov, I.A. Smirnova, S.A. Moryakova, A.F. Kardo-Sysoev. *Book of abstracts of the 13th Int. Conf. CrimMiCo 2003* (Sevastopol, 2003).

Редактор Л.В. Шаронова

Picosecond high-voltage drift diodes on gallium arsenide base

A.V. Rozhkov, V.A. Kozlov

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Presented are experimental results on the recovery dynamics study of gallium arsenide diodes based on low-doped layers that were grown by the liquid-phase epitaxy (drift step recovery diodes, DSRDs).