

УДК 621.381

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВОГО ДИОДА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА

И. В. Грехов, Е. М. Гейфман, Л. С. Костина

Экспериментально исследованы зависимости переходных характеристик силовых диодов с накоплением заряда (ДНЗ) от их конструктивных параметров и режимов работы. Показано, что приборы на основе высокоомного кремния *n*-типа при достаточно большом обратном напряжении способны формировать импульсы большой длительности с крутым (< 1 нс) фронтом.

Диоды с накоплением заряда (ДНЗ), способные формировать сверхрезкие фронты спада тока, широко используются в слаботочной электронике [1, 2]. Наличие в базовой области таких диодов тормозящего электрического поля обусловленного неоднородным распределением легирующей примеси, позволяет в широких пределах регулировать форму импульса обратного тока [1, 2]. Однако ДНЗ с тормозящим электрическим полем являются принципиально мало мощными приборами, так как при высоких плотностях тока, когда концентрация плазмы в базе превышает концентрацию легирующей примеси, встроенное электрическое поле практически не влияет на процесс переключения; увеличение же концентрации примеси ведет к соответствующему снижению рабочего напряжения. В то же время для решения ряда проблем коммутации необходимо иметь ДНЗ большой мощности [3, 4]. Силовой ДНЗ, обладая способностью формировать импульсы тока с амплитудой в сотни ампер и крутым (сотни и даже десятки наносекунд) задним фронтом, должен блокировать большое (сотни и тысячи вольт) напряжение и обладать длительностью фазы высокой обратной проводимости $t_{\text{воп}}$, сравнимой по величине с временем выключения мощных быстродействующих приборов ключевого типа (10—50 нс) при амплитуде импульса обратного тока, примерно равной рабочему току этих приборов.

Целью настоящей работы являлось исследование переходных характеристик силовых ДНЗ в зависимости от конструктивных параметров и режимов работы.

Обычно процесс переключения диода в цепи, где последовательно с диодом имеется конечное по величине сопротивление нагрузки, разделяют на два этапа [1]: фазу высокой обратной проводимости (ВОП) и фазу восстановления обратного сопротивления (ВОС), или спада тока.

В соответствии с терминологией, принятой для диодов с накоплением заряда будем называть фазой ВОП $t_{\text{воп}}$ промежуток времени от момента прохождения тока через нуль до того момента, когда он уменьшается до 0.9 своего амплитудного значения I_a , а временем спада $t_{\text{вос}}$ — время, за которое ток уменьшает от 0.9 I_a до 0.1 I_a [5].

На первом этапе, длительность которого $t_{\text{воп}}$ определяется величиной накопленного при протекании прямого тока заряда $Q_{\text{нак}}$, обратное напряжение приложенное к диоду U_D , существенно меньше, чем напряжение во внешней цепи U_n , обратный ток велик и интенсивно выводит из базы диода заряд неравновесных носителей (ННЗ). В конце этапа у *p-n*-перехода образуется и быстро расширяется область объемного заряда (ООЗ). На этапе спада тока $U_D \sim U_n$

расширение ООЗ практически прекращается и уменьшение количества ННЗ происходит в основном путем диффузии к ООЗ, а также рекомбинации их в базовой области. Таким образом, очевидно, что увеличение ширины базы диода W_n и времени жизни ННЗ в ней, необходимое для обеспечения высокого значения $t_{\text{воп}}$, влечет за собой затягивание второго этапа — времени спада обратного тока.

На рис. 1 приведены зависимости $t_{\text{воп}}$ и $t_{\text{вос}}$ от W_n для диодных структур типа p^+pnl^+ , изготовленных по диффузионной технологии [6] на основе кремния n -типа проводимости с $\rho_p \sim 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Хорошо видно, что с уменьшением W_n уменьшается как $t_{\text{воп}}$, так и $t_{\text{вос}}$. Существует, однако, интервал значений W_n (на рис. 1 это участок от $W_n \sim 260 \text{ мкм}$ до $W_n \sim 160 \text{ мкм}$), в котором для $t_{\text{вос}}$ эта

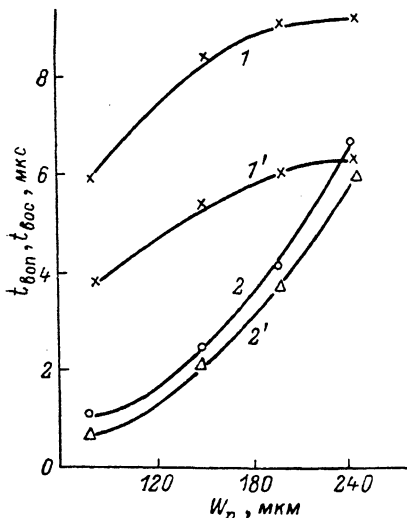


Рис. 1. Зависимости $t_{\text{воп}} = f(W_n)$ (1, 1') и $t_{\text{вос}} = f(W_n)$ (2, 2').

$\rho_p = 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $x_p \sim 115 \text{ мкм}$, $\tau_p \sim 30 \text{ нс}$, $x_{n+} = 35 \text{ мкм}$. Режимы измерений: $I_{\text{обр}} = I_{\text{пр}}$, $t_{\text{мин}} = 100 \text{ мкс}$. 1, 2 — $j_{\text{пр}} = 1 \text{ А/см}^2$; 1', 2' — 10 А/см^2 , $U_{\text{обр}} = 10 \text{ В}$.

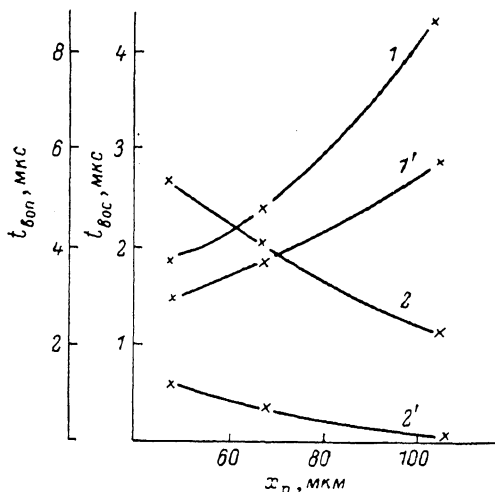


Рис. 2. Зависимость $t_{\text{воп}}$ и $t_{\text{вос}}$ от глубины pn -перехода.

1, 1' — $t_{\text{воп}} = f(x_p)$; 2, 2' — $t_{\text{вос}} = f(x_p)$. Параметры диодов: $\rho_p \sim 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $W_n \sim 100 \text{ мкм}$, $x_{n+} \sim 30 \text{ мкм}$, $\tau_p \sim 20 \text{ нс}$. Режимы измерений: $I_{\text{пр}} = I_{\text{обр}}$, $t_{\text{мин}} = 100 \text{ мкс}$. 1, 2 — $j_{\text{пр}} = 1 \text{ А/см}^2$; 1', 2' — 10 А/см^2 , $U_{\text{обр}} = 10 \text{ В}$.

зависимость существенно более резкая (при практически неизменном $t_{\text{воп}}$ значения $t_{\text{вос}}$ различаются почти вдвое). При дальнейшем уменьшении W_n наряду с продолжающимся резким снижением $t_{\text{вос}}$ начинается более резкий спад $t_{\text{воп}}$, который можно объяснить уменьшением величины $Q_{\text{нак}}$ вследствие увеличения доли тока рекомбинации в диффузионной n^+ -области по отношению к полному току. При достаточно протяженных базовых областях влияние рекомбинации в n^+ -слое практически не сказывается на характере распределения ННЗ вблизи pn -перехода. Снижение $t_{\text{вос}}$ с уменьшением W_n связано со снижением времени диффузионного пролета $t_{\text{пр}} = W_n^2 / 2D$ дырок через базовую n -область.

На рис. 2 представлены зависимости характеристик переключения $t_{\text{воп}}$ и $t_{\text{вос}}$ от глубины залегания p - n -перехода (толщины p -слоя x_p) диода. Для исследованных образцов, как видно из рис. 2, при увеличении x_p от 45 до 110 мкм длительность фазы ВОП увеличивалась более чем в 3 раза, а время спада $t_{\text{вос}}$ сократилось примерно вдвое. Такой характер зависимости определяется следующими обстоятельствами. Диффузионный p -слой состоит из двух областей: сильнолегированной ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) тонкой ($\sim 10 \text{ мкм}$) p^+ -области, созданной кратковременной диффузией бора, и довольно протяженной (35—90 мкм) p -области, созданной диффузией алюминия с поверхностной концентрацией $(5 \div 7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; p^+ -область является хорошим инжектором, а p -область при рабочей плотности тока «залита» электронно-дырочной плазмой. При переключении происходит быстрое уменьшение концентрации плазмы у p^+p -перехода, однако в отличие от ситуации с p^+n -переходом снижение концентрации до равновесного значения не приводит к образованию ООЗ и спаду обратного тока, поскольку в проведе-

нии тока участвуют основные носители p -слоя. Граница плазмы начинает перемещаться по p -слою в сторону p - n -перехода, и лишь при приближении к нему этой границы начнет образовываться ООЗ и уменьшаться обратный ток. Таким образом, увеличение x_p должно привести к увеличению $t_{\text{воп}}$ и соответственно уменьшению $t_{\text{вос}}$, поскольку к моменту образования ООЗ значительная часть заряда оказывается выведенной из диода. Такой характер процесса, как показал расчет, возможен только в том случае, если время жизни носителей в области p -слоя не слишком мало по сравнению с n -базой.

Приведенные выше зависимости позволяют определенным образом выбрать оптимальные параметры силового ДНЗ. Совершенно очевидно, однако, что требования одновременного получения высоких значений $Q_{\text{воп}}$ и малых $t_{\text{вос}}$ являются взаимно исключаящими при малых рабочих напряжениях ($W_{\text{ООЗ}} \ll W_n$),

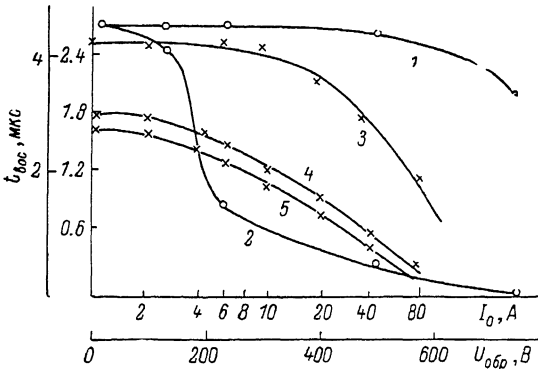


Рис. 3.

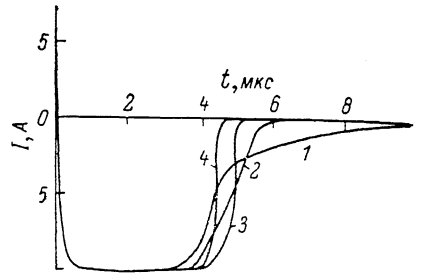


Рис. 4. Осциллограммы процесса переключения диодов с $\rho_p \sim 150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ $\times \text{см}$, $U_{\text{обр}} = 125$ (1), 250 (2), 500 (3) и 750 В (4).

поскольку увеличение W_n и τ_p приведет к увеличению $t_{\text{вос}}$. Исследование зависимости процесса переключения ДНЗ от режима переключения показало, что увеличение обратного напряжения на диоде может привести к существенному уменьшению длительности второго этапа. На рис. 3 приведены зависимости $t_{\text{вос}} = f(U_{\text{обр}})$ для диодов, изготовленных на основе n -Si с $\rho_p \sim 50$ (1) и $\rho_p \sim 150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (2), $W_n = 120 \text{ мкм}$, $x_{n+} \sim 35 \text{ мкм}$, $x_p \sim 95 \text{ мкм}$, $\tau_p = 20 \text{ мкс}$, $S \sim 1.3 \text{ см}^2$, $I_{\text{пр}} = 5 \text{ А}$, $I_{\text{обр}} = 10 \text{ А}$, $t_{\text{впл}} = 100 \text{ мкс}$. При одной и той же толщине базы диода ООЗ pn -перехода в более высокоомном материале занимает большую часть n -базы, и, следовательно, большая часть накопленного заряда оказывается выведенной на этапе ВОП; $t_{\text{вос}}$ при этом слабо зависит от τ_p , что позволяет сочетать в мощном диоде, работающем при достаточно большом напряжении, высокие значения $Q_{\text{нак}}$ (высокое τ_p) и малые значения $t_{\text{вос}}$. Осциллограммы процесса переключения (рис. 4) свидетельствуют о том, что при высоких значениях обратного напряжения, приложенного к ДНЗ, изготовленному на основе высокоомного материала, появляется возможность формирования резких фронтов спада тока ($< 1 \text{ мкс}$) при достаточно больших $t_{\text{воп}}$.

На рис. 3 представлены также зависимости $t_{\text{вос}} = f(I_{\text{обр}})$ при $U_{\text{обр}} = 125$ (3) 500 (4) и 800 В (5), $\rho_p = 150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. С увеличением $W_{\text{ООЗ}}$ (ростом $U_{\text{обр}}$) $t_{\text{вос}}$ падает, при этом увеличение $I_{\text{обр}}$ в начале этапа ВОС приводит также к резкому снижению $t_{\text{вос}}$, которое при полном перекрытии n -базы областью объемного заряда должно определяться лишь временем пролета носителей через ООЗ с насыщенной скоростью.

Исследование зависимости $t_{\text{воп}}$ и $Q_{\text{воп}}$ от значения обратного тока, протекающего через диод на этом этапе (рис. 5), как и следовало ожидать, показало, что с увеличением отношения $I_{\text{пр}}/I_{\text{обр}}$ $t_{\text{воп}}$ растет, однако с некоторого момента $t_{\text{воп}} \gg \tau_p$ начинает снижаться $Q_{\text{воп}}$, т. е. возрастает роль рекомбинационных процессов в базе диода.

На рис. 6 приведены зависимости $t_{\text{воп}}$ от длительности импульса прямого тока $t_{\text{имп}}$, протекавшего через диод перед переключением. С ростом $t_{\text{имп}}$ $t_{\text{воп}}$ тоже увеличивается до некоторого значения, практически не меняющегося при дальнейшем увеличении $t_{\text{имп}}$, причем чем больше плотность тока, тем меньше длительность импульса, начиная с которой $t_{\text{воп}}$ перестает расти. Таким образом, при большей плотности прямого тока квазистационарное распределение кон-

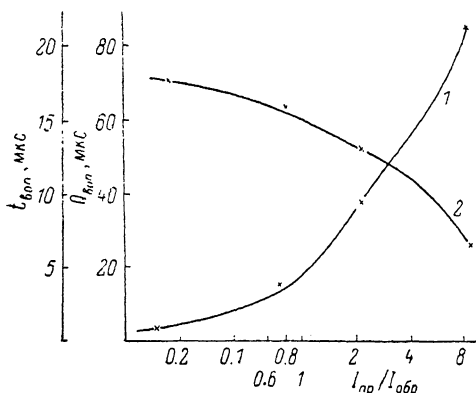


Рис. 5. Зависимость $t_{\text{воп}} = f(I_{\text{пр}}/I_{\text{обр}})$ (1) и $Q_{\text{воп}} = f(I_{\text{пр}}/I_{\text{обр}})$ (2).

Параметры диода: $\rho_n = 150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $x_p \sim 95 \text{ мкм}$, $x_{n+} = 35 \text{ мкм}$, $W_n = 120 \text{ мкм}$, $\tau_p \sim 30 \text{ мкс}$, $S = 1.3 \text{ см}^2$. Режим измерений: $I_{\text{пр}} = 10 \text{ А}$, $U_{\text{обр}} = 800 \text{ В}$, $t_{\text{имп}} = 100 \text{ мкс}$.

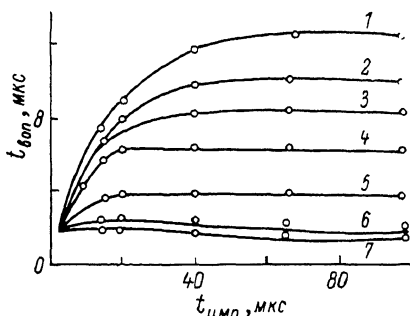


Рис. 6. Зависимость $t_{\text{воп}} = f(t_{\text{имп}})$ для различных плотностей тока.

1 — $j_{\text{пр}} = 1$, 2 — 2, 3 — 5, 4 — 10, 5 — 40, 6 — 50 $\text{А}/\text{см}^2$. Параметры диода: $\rho_n = 150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $x_p = 100 \text{ мкм}$, $x_{n+} = 35 \text{ мкм}$, $W_n = 150 \text{ мкм}$, $\tau_p \sim 70 \text{ мкс}$, $S \sim 6 \text{ см}^2$, $I_{\text{пр}} = I_{\text{обр}}$.

центрации устанавливается быстрее. Из рис. 6 следует также, что при $I_{\text{пр}}/I_{\text{обр}} = \text{const}$ с ростом плотности тока $j_{\text{пр}}$ $t_{\text{воп}}$ резко сокращается. Этот эффект связан с уменьшением коэффициента инжекции p — n -перехода при увеличении $j_{\text{пр}}$, причем в исследуемых структурах сокращение $t_{\text{воп}}$ начинает проявляться уже в области сравнительно малых плотностей: при $t_{\text{имп}} \sim 40 \text{ мкс}$ и более повышение $j_{\text{пр}}$ от 1 до 10 $\text{А}/\text{см}^2$ приводит к уменьшению $t_{\text{воп}}$ вдвое, что обусловливается спецификой конструкции ДНЗ — малое W_n и большое τ_p обеспечивают высокую плотность электронно-дырочной плазмы даже при довольно малом $j_{\text{пр}}$.

Приведенные результаты исследования процесса переключения диодных структур на основе высокоомного кремния позволяют сделать заключение о возможности создания промышленных образцов силовых ДНЗ, способных формировать импульсы большой длительности и амплитуды с крутым ($< 1 \text{ мкс}$) задним фронтом.

Литература

- [1] С. А. Еремин, О. К. Мокеев, Ю. Р. Носов. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение, 151. «Сов. радио», М. (1966).
- [2] Ю. Р. Носов. Физические основы работы полупроводникового диода в импульсном режиме. «Наука» (1968).
- [3] Л. В. Дюков, Л. В. Николаев. АС № 540379; БИ, № 47 (1976).
- [4] В. Л. Кузьмин. Автореф. канд. дис. ВЭИ им. В. И. Ленина, М. (1974).
- [5] Каталог СССР. Вентили ВЛ 10-500 А, 05.04.34-75.
- [6] И. В. Грезов и др. Электросвязь, № 10, 42 (1963).

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
13 мая 1982 г.