

## Механизмы переключения полупроводниковых приборов под воздействием импульса напряжения, нарастающего со скоростью до 10 кВ/нс.

С.Н. Цыранов<sup>1,\*</sup>, О.Е. Перминова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт Электрофизики РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

\*ganimed323@mail.ru

**Аннотация.** Проведены модельные исследования процесса переключения силовых кремниевых диодов импульсом напряжения, нарастающим со скоростью  $dU/dt = 1-10$  кВ/нс. Установлено, что при переключении импульсом напряжения с  $dU/dt = 10$  кВ/нс рост удельного сопротивления прибора  $\rho$  от 15 до 3000 Ом·см приводит к увеличению напряжения переключения от 3 до 5.5 кВ и сокращению длительности процесса переключения от 150 пс до 50 пс. Показано, что при увеличении удельного сопротивления меняется способ заполнения структуры прибора плазмой: волновой (15–40 Ом·см), гибридный (40–300 Ом·см) и однородный ( $> 300$  Ом·см). При  $\rho < 15$  Ом·см эффект быстрого (пикосекундного) переключения отсутствует. Особенностью данной работы является ее привязка к реальному эксперименту и учет неоднородности распределения тока по площади устройства. Показано, что доля площади, через которую протекает ток в процессе переключения, с увеличением удельного сопротивления от 15 до 3000 Ом·см возрастает от 0.15 до 0.7 при  $dU/dt = 10$  кВ/нс и от 0.03 до 0.3 при  $dU/dt = 3$  кВ/нс. Учет неоднородности распределения тока приводит к появлению при  $\rho = 50-100$  Ом·см минимума на зависимости времени переключения от удельного сопротивления прибора.

**Ключевые слова:** пространственная неоднородность тока в полупроводниках, пикосекундное переключение полупроводниковых приборов.

### 1. Введение

В 1979 году было обнаружено что под действием импульса напряжения, нарастающего со скоростью  $dU/dt > 1$  кВ/нс переключение полупроводникового диода в проводящее состояние, происходит в диапазоне 100–200 пс [1]. Электрон, двигающийся с насыщенной скоростью (в кремнии  $V_s = 10^7$  см/с) пересекает базу диода размером  $\sim 100$  мкм за  $\sim 1$  нс. Поэтому было предположено, что быстрое (пикосекундное) изменение сопротивления прибора вызвано заполнением полупроводниковой структуры плазмой, образующейся после прохождения ударно-ионизационных TRAPATT волн [2]. Скорость движения таких волн определяется скоростью движения фронта электромагнитной волны в структуре прибора, в несколько раз превышает величину  $V_s$  и ограничена только скоростью света в полупроводнике. Однако количественного согласия расчетных и экспериментальных осциллограмм получено не было. Оптические наблюдения показали, что в процессе переключения в GaAs диодах ток может протекать через отдельные светящиеся каналы, составляющих активную площадь прибора  $S_a$  [3]. Предположение, что в процессе переключения ток по площади прибора распределен неоднородно также и в кремниевых приборах позволило получить хорошее количественное согласие с данными экспериментов [4–6]. В процессе переключения пассивная часть прибора разряжается, что приводит к значительному росту тока через активную часть, увеличивает интенсивность процессов ионизации в ней и сокращает время переключения  $t_s$ . В [7] было показано, что с ростом удельного сопротивления  $\rho$  кремниевого диода напряжение переключения растет, а длительность процесса переключения снижается. Также было установлено, что при  $\rho > 300$  Ом·см переключение диода происходит однородным образом, когда заполнение плазмой прибора происходит за счет одновременно протекающих процессов ионизации в каждой точке базы прибора. Была предложена структура диода p<sup>+</sup>-n-p<sup>+</sup>-типа с  $\rho = 300$  Ом·см которая под действием импульса напряжения с  $dU/dt = 10$  кВ/нс переключается за единицы пс. В [8]

также было показано, что при  $dU/dt > 2$  кВ/нс с увеличением  $\rho$  происходит смена механизмов переключения кремниевого диода, а при  $\rho > 3000$  Ом·см переключение протекает однородным образом. Там же предложено различать волновой, квазиоднородный и пространственно неоднородный режимы. В настоящей работе исследуется влияние величины удельного сопротивления на процесс переключения диода с учетом неоднородности распределения тока по площади прибора.

## 2. Модель

В работе использованы результаты моделирования экспериментов по переключению кремниевого диода импульсом напряжения, нарастающего со скоростью  $dU/dt = 1-10$  кВ/нс [5]. Диод имел структуру  $p^+p-n-n^+$ -типа с глубиной залегания  $p-n$  перехода 136 мкм, толщиной 350 мкм и диаметром 6 мм с  $\rho = 30$  Ом·см. Расчеты проводились с помощью модели [5], заключающейся в совместном решении уравнений, описывающих работу экспериментальной электрической схемы, включающей в себя полупроводниковый прибор, и уравнений, описывающих динамику электронов, дырок, электрического поля и температуры в структуре прибора. Для динамики электронов и дырок использовались уравнения непрерывности, электрического поля – уравнение Пуассона. В расчетах применялись зависимости скорости носителей от электрического поля, температуры, рассеяния на примесях и электрон-дырочного рассеяния. Учитывались процессы лавинного размножения, туннельной генерации носителей, ионизации глубоких примесей.

Для характеристики интенсивности процессов ионизации был введен интегральный фактор  $IF$ , равный числу электронно-дырочных пар, возникающих за счет процессов ионизации при прохождении одиночного носителя через область электрического поля:

$$IF = \int_0^W \alpha(E(x)) \cdot dx \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ионизации,  $E(x)$  – напряженность поля в точке  $x$ ,  $W$  – размер структуры.

Как было показано в [5, 6] при переключении кремниевых приборов интегральный коэффициент имеет максимумы  $IF_1$  и  $IF_2$ , связанные с формированием ударно ионизационного фронта и процессами ионизации на стадии переключения, соответственно. Используя данные из [5] в [6] была установлена зависимость величины активной площади  $S_a$  от  $IF_1$ , которая использовалась для вычисления  $S_a$  в настоящей работе. В расчётах величина удельного сопротивления диода  $\rho$  менялась от 15 до 3000 Ом·см. Для изменения скорости нарастания импульса напряжения в линии последовательно с диодом размещались сопротивления  $RL = 1800, 880$  и  $0$  Ом, обеспечивающие  $dU/dt = 1.8-3.6, 4-8$  и  $6-11$  кВ/нс, соответственно (показаны значения  $dU/dt$  при  $\rho = 15$  и  $3000$  Ом·см).

## 3. Результаты расчетов

В расчетах предполагалось, что площадь прибора разделена на активную часть  $S_a$ , в которой происходят процессы ионизации, и пассивную часть, где их нет. Вводился параметр  $K = S/S_a$  равный отношению полной и активной площади. В результате предварительного расчета определялась величина  $IF_1$  по которой из [6] находилась величина  $S_a$  и проводился основной расчет. Результаты расчетов показаны на рис. 1. С увеличением удельного сопротивления электрическое поле в структуре прибора распределяется более однородно, что приводит к росту напряжения переключения и снижению длительности процесса переключения. Это сопровождается сменой механизма заполнения структуры прибора плазмой от волнового, когда формируется ионизационный фронт при движении которого структура заполняется плотной плазмой ( $\rho = 15-40$  Ом·см), до однородного, когда

заполнение структуры плазмой происходит за счет протекающих одновременно процессов ионизации в каждой точке базы ( $\rho > 300 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ). Как видно на рис. 2 доля площади, через которую протекает ток в процессе переключения, с увеличением  $\rho$  от 15 до 3000  $\text{Ом}\cdot\text{см}$  возрастает от 0.03 до 0.3 при  $dU/dt = 3 \text{ кВ/нс}$  (сплошная кривая 1) и от 0.15 до 0.7 при  $dU/dt = 10 \text{ кВ/нс}$  (сплошная кривая 3). На рис. 1 и 2 показаны области удельного сопротивления II, III и IV отвечающие волновому, гибриднему и однородному режимам. В области I при  $\rho < 15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  эффект быстрого (пикосекундного) переключения отсутствует. Вследствие повышения уровня легирования базы область сильного поля в окрестности p-n перехода значительно сжимается и ее заполнение плазмой при пробое компенсируется выносом заряда за пределы области. Пробой в области сильного поля оказывают незначительное влияние на процесс переключения диода и его длительность значительно возрастает (кривая 1 на рис. 3).

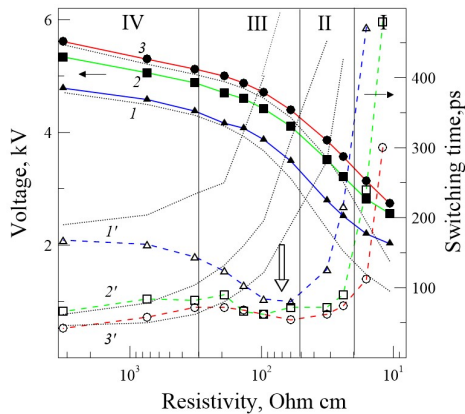


Рис. 1. Расчетные зависимости напряжения (сплошные линии) и времени переключения диода (штриховые линии), взятого по уровню 0.2–0.8 от максимума напряжения, от удельного сопротивления. Точечными кривыми показаны зависимости при  $K = 1$ .

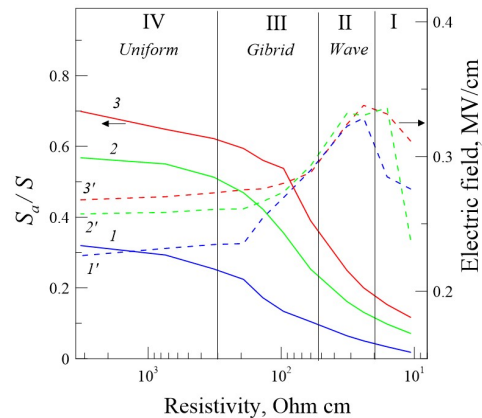


Рис. 2. Расчетные зависимости отношения активной и полной площади (сплошные линии) и амплитуды электрического поля в структуре в момент максимума напряжения (штриховые линии) от удельного сопротивления диода.  
1, 1' –  $RL = 1800 \text{ Ом}$ ; 2, 2' –  $RL = 880 \text{ Ом}$ ;  
3, 3' –  $RL = 0 \text{ Ом}$ .

Распределение поля в структуре прибора в максимуме напряжения (штриховые линии на рис. 2) существенно зависит от режима: при волновом режиме амплитуда поля максимальна, при однородном минимальна. Это связано с тем, что в волновом режиме амплитуда поля непрерывно растет перед движущимся ионизационным фронтом, а в однородном режиме мало меняется вдоль базы прибора. На рис. 1 штриховыми линиями показаны результаты расчетов без учета неоднородности распределения тока вдоль площади ( $K = 1$ ). Видно, что с ростом удельного сопротивления разница результатов пространственно однородных ( $K = 1$ ) и неоднородных ( $K > 1$ ) расчетов снижается. Учет пространственной неоднородности приводит к появлению минимума на зависимости времени переключения от удельного сопротивления (светлая стрелка на рис. 1). С одной стороны, с ростом  $\rho$  напряжение и среднее поле в структуре прибора увеличиваются, соответственно время переключения снижается. С другой стороны, с ростом  $\rho$  величина активной площади увеличивается, а пассивной площади уменьшается, что снижает ток разряда пассивной части прибора в процессе переключения и увеличивает время переключения. Совместное действие этих факторов приводит к возникновению при  $\rho = 50\text{--}100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  минимума.

На кривых 1–4 на рис. 3 показано как меняются временные зависимости напряжения и интегрального фактора при поступлении импульса напряжения на диод с удельным сопротивлением, лежащим в областях I–IV. При увеличении  $\rho$  первый максимум  $IF_1$  растет,

сдвигается ко второму максимуму  $IF_2$  пока не сливается с ним (точечные кривые 1–4 на рис. 3). Величина активной площади пропорциональная  $IF_1$  растет, а момент запуска ионизационного фронта сдвигается к моменту старта процесса переключения. При этом меняется механизм заполнения структуры плазмой от волнового к однородному.

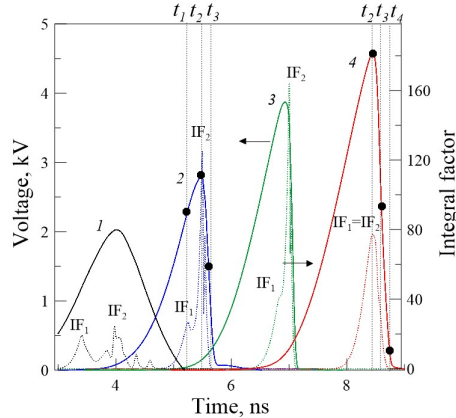


Рис. 3. Расчетные зависимости напряжения (сплошные кривые) и интегрального фактора (точечные кривые) от времени в процессе переключения диода. Расчеты проводились при  $RL = 1800 \text{ Ом}$ ;  
 1 –  $\rho = 11 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $K = 30$ ,  $t_s = 670 \text{ пс}$ ; 2 –  $\rho = 32 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $K = 17$ ,  $t_s = 120 \text{ пс}$ ;  
 3 –  $\rho = 96 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $K = 6.5$ ,  $t_s = 80 \text{ пс}$ ; 4 –  $\rho = 740 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $K = 3.1$ ,  $t_s = 160 \text{ пс}$ .

На рис. 4 показано изменение распределения концентрации носителей и поля в процессе переключения для волнового и однородного режимов. В волновом режиме ионизационный фронт пересекает область сильного поля заполняя ее плазмой (кривые 1–2 на рис. 4а), в однородном режиме заполнение плазмой происходит не волновым образом за счет процессов ионизации в каждой точке базы. Распределение поля в момент максимума напряжения в однородном режиме равномерное, в волновом – имеет экстремальный вид (кривые 2 на рис. 4). Далее за счет процессов ионизации структура прибора заполняется плазмой, что компенсирует поле и вызывает снижение напряжения. Происходящий одновременно разряд пассивной части прибора повышает ток и интенсивность процессов ионизации в активной части прибора, снижая тем самым время переключения. Время переключения близко к времени компенсации поля в плазме, которое равно времени релаксации Максвелла:

$$t_m \sim \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{n \cdot \mu_n \cdot e}, \quad (2)$$

где  $n$ ,  $\mu_n$ ,  $e$  – концентрация, подвижность и заряд электронов;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  – электрическая и диэлектрическая постоянные кремния. Время переключения при  $n \sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (кривые 2 – 3 на рис. 4а и 4а') по (2) можно оценить  $t_m \sim 50 \text{ пс}$ . При увеличении амплитуды поля до 1 МВ концентрация носителей возрастает до  $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что приводит к снижению времени переключения до единиц пс [7].

Отметим, что независимо от величины  $\rho$  при  $dU/dt < 10 \text{ кВ/нс}$  пространственная неоднородность распределения тока вдоль площади прибора оказывает существенное влияние на процесс переключения. Высокая степень неоднородности распределения тока вдоль площади прибора сохраняется и в однородном режиме переключения (область IV на рис. 2). Это коррелирует с [6], где было показано, что пространственная неоднородность существует уже на этапе, предшествующем запуску ударно ионизационного фронта. По-видимому, это связано с развитием поперечной неустойчивости и расслоением тока в области занятой процессами лавинного размножения [9]. Возникновение такой

неустойчивости может быть вызвано процессами генерации-рекомбинации, взаимодействием токов лавин, нарушениями кристаллической решетки и нуждается в дальнейшем исследовании. Заметим, что традиционно пространственная неоднородность распределения тока связывается исключительно с неустойчивостью ударно ионизационного фронта при его движении в базе прибора [2]. В случае переключения без возникновения ударно ионизационного фронта полагается, что ток по площади распределён однородно.

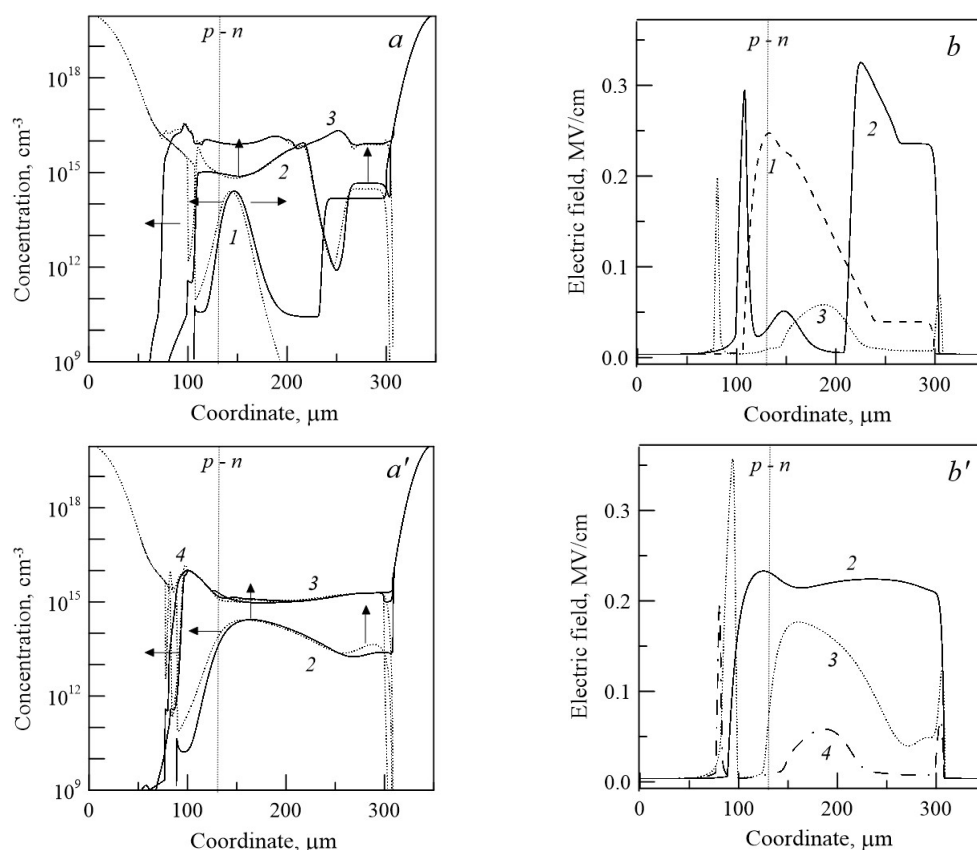


Рис. 4. Профили распределения концентрации дырок (точечные кривые), электронов (сплошные кривые) и напряженности электрического поля в активной части структуры диода в процессе переключения при волновом (а, б) и однородном (а', б') режимах.

а), б) в моменты времени  $t_1, t_2, t_3$  на кривой 2 рис. 3,  $\rho = 32 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;  
а'), б') в моменты времени  $t_2, t_3, t_4$  на кривой 4 рис. 3,  $\rho = 740 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Расчеты показали, что уменьшение ширины р-области в структуре  $p^+p-n-n^+$ -типа вплоть до ее исчезновения приводит к росту напряжения переключения и снижению времени переключения. Условие перехода к однородному режиму  $\rho > 300 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  сохраняется и в структуре  $p^+p-n-n^+$  типа и при  $dU/dt > 10 \text{ кВ/нс}$ .

#### 4. Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования процессов переключения силовых кремниевых диодов импульсом напряжения, нарастающим со скоростью до 10 кВ/нс. Показано, что рост удельного сопротивления  $\rho$  приводит к увеличению напряжения переключения от 3 до 5.5 кВ и сокращению длительности процесса переключения от 150 пс до 50 пс, при этом меняется способ заполнения структуры прибора: от волнового ( $\rho = 15\text{--}40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) до однородного ( $\rho > 300 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ). Установлено, что в однородном режиме полупроводниковая структура имеет более высокое напряжение переключения и низкое

время переключения, чем в волновом режиме. В практическом плане можно рекомендовать использовать полупроводниковые структуры  $p^+-n-p^+$ -типа с  $\rho = 50-100$  или  $\rho > 300$  Ом·см при создании мощных пикосекундных ключей и обострителей.

## 5. Литература

- [1] I.V. Grekhov, A.F. Kardo-Sysoev, Formation of subnanosecond current drops when the breakdown of silicon p-n junctions is delayed, *Sov. Tech. Phys. Lett.*, **5**, 395, 1979.
- [2] M. Levinshtein, J. Kostamovaara, and S. Vainshtein, *Breakdown Phenomena in Semiconductors and Semiconductor Devices*. London: World Scientific, 2005.
- [3] S.N. Vainshtein, Yu.V. Zhilyaev, M.E. Levinshtein, Visualization of subnanosecond switching of gallium arsenide diode structures, *Sov. Tech. Phys. Lett.*, **14**, 8, 664, 1988.
- [4] A.I. Gusev, S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, S.N. Tsyranov, Study of the voltage drop process for the case of high-power thyristors switched in the impact-ionization mode. *Semiconductors* **51**, 649, 2017, doi: 10.1134/S1063782617050098
- [5] S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, S.N. Tsyranov, V.E. Patrakov, B.G. Slovikovsky, Spatial inhomogeneity of impact-ionization switching process in power Si-diode, *Semiconductors*, **57**, 7, 2023, doi: 10.61011/SC.2023.07.57429.4871
- [6] С.К. Любу́тин, С.Н. Рукин, Б.Г. Слови́ковский, С.Н. Цыра́нов, Пространственная неоднородность ударно-ионизационного переключения силовых кремниевых тиристоров, *ЖТФ*, **94**(5), 771, 2024, doi: 10.61011/JTF.2024.05.57816.308-23
- [7] S.N. Tsyranov, S.N. Rukin. High-Power Subnanosecond Switching Processes in SOS-Diodes, *Proc. 15th Int. Symp. High Current Electronics*, Tomsk, Russia, 2008, [https://conferences-2008.hcei.tsc.ru/cat/proc\\_2008/shce/288-291.pdf](https://conferences-2008.hcei.tsc.ru/cat/proc_2008/shce/288-291.pdf)
- [8] P.B. Rodin, M.S. Ivanov. Spatiotemporal modes of fast avalanche switching of high-voltage layered semiconductor structures: From subnano to picosecond range, *J. Appl. Phys.*, **127**, 044504, 2020, doi: 10.1063/1.5097831
- [9] Э. Шёлль, *Самоорганизация в полупроводниках*. Москва: Мир, 1991.