

Пространственная неоднородность процесса пикосекундного переключения мощных полупроводниковых приборов

С.Н. Цыранов*

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*serg@iep.uran.ru

Аннотация. Проведены модельные исследования процесса пикосекундного переключения силовых кремниевых приборов импульсом напряжения, нарастающим со скоростью $dU/dt = 1\text{--}10$ кВ/нс. Показано, что экспериментальные результаты можно объяснить только учетом пространственной неоднородности процесса переключения. Независимо от удельного сопротивления, структуры прибора (тиристор или диод) и величины предварительно приложенного напряжения смещения было установлено следующее. Расчетные и экспериментальные осциллограммы напряжения имеют количественное согласие только в том случае, когда величина активной площади структуры, через которую проходит ток переключения, с увеличением dU/dt растет, приближаясь к полной площади прибора при $dU/dt > 10$ кВ/нс и стремится к нулю при $dU/dt < 1$ кВ/нс. Неоднородное распределение тока вдоль площади прибора возникает на этапе формирования ударно ионизационного фронта. Найдена зависимость величины активной площади от интенсивности процессов ионизации на этом этапе, единая для рассмотренных экспериментов.

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

1. Введение

В 1979 году было обнаружено что при скорости нарастания обратного напряжения $dU/dt > 1$ кВ/нс переключения полупроводникового диода в проводящее состояние происходит в пикосекундном диапазоне [1]. В дальнейших исследованиях полагалось, что быстрое изменение сопротивления прибора может быть вызвано заполнением полупроводниковой структуры плазмой, образующейся после прохождения ударно-ионизационных TRAPATT волн [2]. Скорость движения таких волн в несколько раз превышает насыщенную скорость движения носителей (в кремнии $V_s = 10^7$ см/с) и ограничена только скоростью света в полупроводнике. Однако детального согласия расчета и эксперимента получено не было. Оптические наблюдения показали, что в процессе переключения в GaAs диодах ток протекает через отдельные светящиеся каналы, составляющих активную площадь прибора S_a [3]. В приборах, построенных на основе не прямозонных полупроводников, таких как Si, визуальная оценка активной площади невозможна. Здесь используются косвенные методы оценки, например, путем сравнения экспериментальной и полученных при разных S_a расчетных осциллограмм. При этом выбирается наиболее близкая к экспериментальной расчетная осциллограмма, а по ней оценивается величина активной площади, участвующей в процессе переключения. Учет неоднородного распределения тока по площади прибора позволяет получить хорошее согласие с накопленными экспериментальными данными [4–8].

2. Модель

В работе использованы результаты экспериментов (I–V) по переключению кремниевых приборов под действием импульса напряжения с $dU/dt = 1\text{--}10$ кВ/нс. Тиристоры с предварительно приложенным напряжением смещения $U_0 = 2.2$ кВ, имеющих структуру типа $p^+p\text{--}n\text{--}p\text{--}n^+$, толщиной 520 мкм, диаметром 40 мм с удельным сопротивлением $\rho = 80\text{--}85$ Ом·см (II) и диаметром 32 мм с $\rho = 105\text{--}110$ Ом·см (III) [4]. Тиристоры с такой же структурой диаметром 32 мм и $\rho = 80\text{--}85$ Ом·см при $U_0 = 2.2$ кВ (IV) и при $U_0 = 0$ кВ (V) [6]. Диодов со структурой $p^+p\text{--}n\text{--}n^+$ -типа толщиной 350 мкм и диаметром 6 мм с

$\rho = 20\text{--}45 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $U_0 = 0 \text{ кВ}$ (I) [7]. Расчеты проводились с помощью модели, 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 [6]. Для характеристики интенсивности процессов ионизации был введен интегральный коэффициент IF , равный числу электронно-дырочных пар, возникающих за счет процессов лавинного умножения при прохождении одиночного носителя через область электрического поля:

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

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

3. Результаты расчетов

В расчетах предполагалось, что площадь устройства разделена на активную часть S_a , в которой происходят процессы ионизации, и пассивную часть, где их нет. Проведены расчеты и найдены значения активной площади S_a , обеспечивающие наилучшее согласие расчетных и экспериментальных осциллограмм. Вводится параметр $K = S/S_a$ равный отношению полной и активной площади. На Рис. 1 показаны наиболее близкие к эксперименту расчетные зависимости напряжения и интегрального фактора IF от времени.

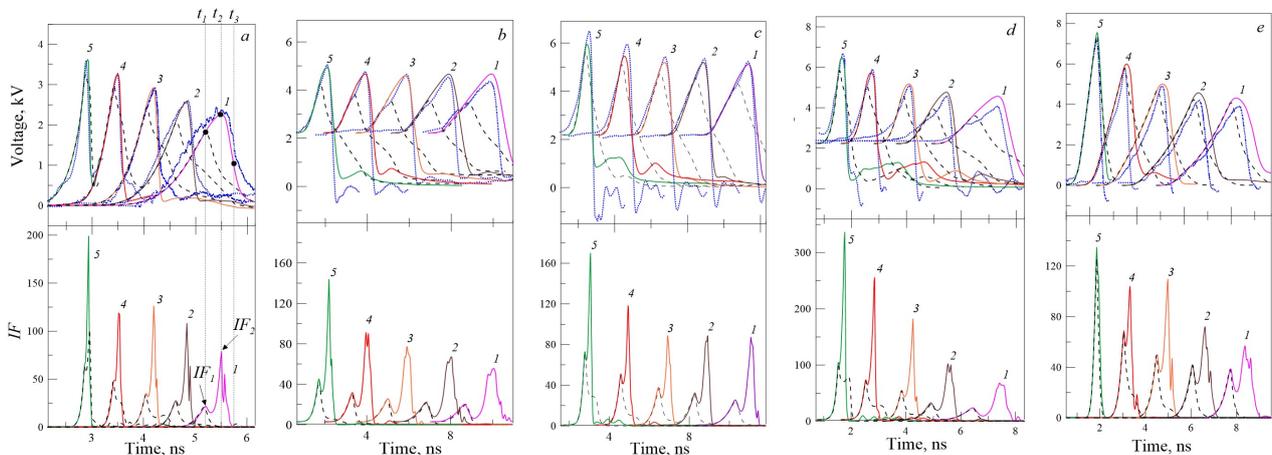


Рис. 1. Сравнение экспериментальных (точечные кривые) и расчетных (сплошные кривые) зависимостей напряжения и интегрального фактора IF от времени в процессе переключения приборов (кривые 1–5): а) диода (I) диаметром 6 мм с $\rho = 32 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $U_0 = 0 \text{ кВ}$ и $K = 30, 12, 8, 4$ и 2.7 ; б) тиристора (II) диаметром 40 мм с $\rho = 80 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $U_0 = 2.2 \text{ кВ}$ и $K = 22, 20, 18, 12$ и 7 ; в) тиристора (III) диаметром 32 мм с $\rho = 105 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $U_0 = 2.2 \text{ кВ}$ и $K = 30, 18, 11, 7, 5$ и 3.5 ; д) тиристора (IV) диаметром 32 мм с $\rho = 80 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $U_0 = 2.2 \text{ кВ}$ и $K = 2.7, 4, 4.65, 10$ и 15 ; е) тиристора (V) диаметром 32 мм с $\rho = 80 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $U_0 = 0 \text{ кВ}$ и $K = 1.9, 3.5, 4.8, 7$ и 10 . Штриховыми кривыми показаны расчетные зависимости при $K = 1.01$.

Для сравнения приведены экспериментальные зависимости (точечные кривые) и результаты расчетов практически однородного переключения при $K = 1.01$ (штриховые кривые). Видно, что учет неоднородности переключения позволяет получить хорошее

согласие с экспериментом. Также можно заметить, что с увеличением скорости нарастания воздействующего напряжения результаты расчета однородного переключения приближаются к эксперименту, то есть степень однородности процесса переключения растет (см. кривые 1–5). На зависимостях интенсивности процесса ионизации от времени, представленных в виде интегрального фактора IF на Рис. 1, присутствуют два характерных максимума (IF_1 и IF_2 в обозначениях на Рис. 1а), связанных с процессами формирования ударно ионизационного фронта и заполнения структуры плазмой. При увеличении dU/dt первый максимум сдвигается ко второму пока не сливается с ним (см. кривая 5 на Рис. 1а и 1е). В этом случае момент запуска ударно ионизационного фронта и начала процесса переключения совпадают, а сам процесс переключения становится практически однородным. В процессе однородного переключения, представленного в виде штриховых кривых на Рис. 1, максимум IF всегда только один и совпадает с максимумом IF_1 неоднородного переключения. Поскольку полученная при этом зависимость напряжения от времени существенно отличается от экспериментальной, можно предположить, что пространственная неоднородность должна существовать уже в момент запуска ударно ионизационного фронта.

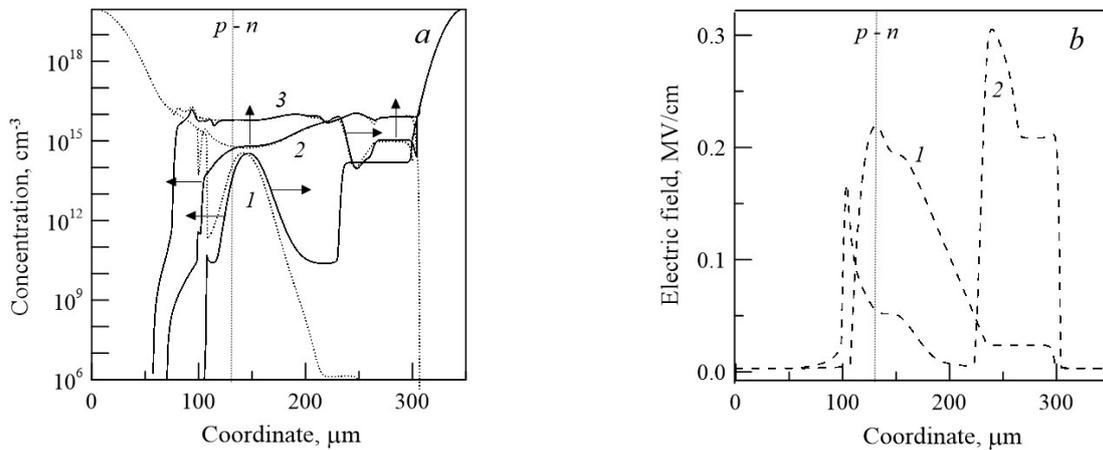


Рис. 2. Профили распределения концентрации дырок (точечные кривые), электронов (сплошные кривые) и напряженности электрического поля (штриховые кривые) в активной части структуры диода, соответствующие моментам времени t_1, t_2, t_3 на Рис. 1а. $K = 30$.

Рассмотрим на Рис. 2 процесс переключения диода, показанный кривыми 1 на Рис. 1а. При подаче импульса напряжения электроны и дырки смещаются в противоположные стороны от плоскости $p-n$ -перехода, формируя область объемного заряда (ООЗ), где электрическое поле определяется зарядом неподвижных ионов донорной и акцепторной примеси (кривая 1 на Рис. 2b). Напряжение и амплитуда поля в структуре растут, пока не произойдет запуск процессов лавинного размножения за счет чего структура прибора начинает заполняться носителями. В этот момент времени в расчете прибор разделяется на активную и пассивную части, в которых уравнения динамики носителей и поля решаются отдельно для каждой части. Концентрация носителей растет пока не достигнет уровня легирования базы, а величина интегрального фактора максимума IF_1 (кривые 1 на Рис. 2). Далее начинается движение ударно-ионизационного фронта, в ходе которого область сильного поля за счет процессов ионизации заполняется электронами и дырками, которые, сдвигаясь друг относительно друга, компенсируют поле. Область сильного поля смещается и далее процесс повторяется. Скорость движения ударно-ионизационного фронта равна скорости движения области сильного поля и обязательно превышает насыщенную скорость носителей V_s и ограничена только скоростью света в полупроводнике. К моменту времени,

когда фронт пересекает границу ООЗ (кривые 2 на Рис. 2) величина интегрального фактора достигает максимума IF_2 (кривые 1 на Рис. 1a). Вследствие роста плотности электронно-дырочной плазмы сопротивление и напряжение активной части диода начинают снижаться. Это приводит к разряду емкости пассивной части диода и росту тока через активную часть. Протекание тока ускоряет процессы ионизации и заполнения плазмой активной части, что снижает длительность процесса переключения прибора. Заполнение структуры плазмой происходит однородным образом за счет процессов ионизации в каждой точке базы (кривые 2 и 3 на Рис. 2). Амплитуда плотности тока, протекающего через активную часть прибора, из-за малости ее площади ($K=30$ или 3% от полной площади) достигает 18 кА/см^2 .

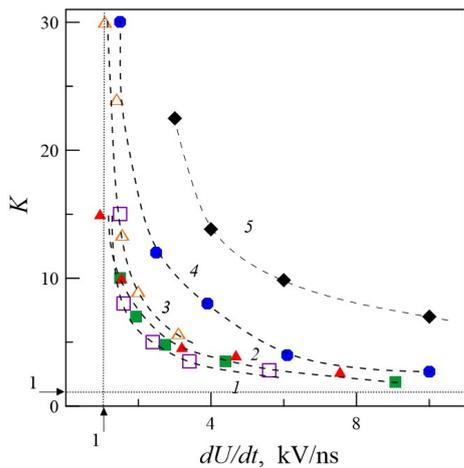


Рис. 3. Зависимость коэффициента $K = S/S_a$ от скорости роста напряжения переключения, полученные из анализа экспериментов (I–V). Ромбы – GaAs диод (10 Ом·см) [3]; круги – I (32 Ом·см); светлые и темные треугольники – II и V (80 Ом·см); темные квадраты – IV (80 Ом·см); светлые квадраты – III (105 Ом·см).

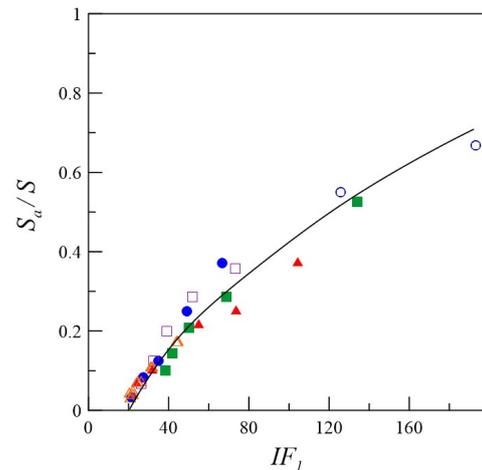


Рис. 4. Зависимость отношения активной и полной площади от амплитуды максимума интегрального фактора IF_1 . Символы описаны на Рис. 3, светлые круги смотри пояснения в тексте.

По результатам, показанным на Рис. 1, можно построить зависимости величины $K = S/S_a$ от dU/dt (Рис. 3). Зависимость, показанная ромбами получена из оценки площади светящихся каналов, возникающих в процессе переключения GaAs диода диаметром 0.3 мм с $\rho \sim 10 \text{ Ом·см}$ при $U_0 = 0 \text{ кВ}$ [3]. Как видно из Рис. 3 зависимости в кремнии и GaAs имеют похожий вид. Видно, что при уменьшении dU/dt величина K быстро нарастает, что соответствует уменьшению активной площади вплоть до ее исчезновения при $dU/dt < 1 \text{ кВ/нс}$. Это согласуется с экспериментальным фактом отсутствия эффекта быстрого переключения при $dU/dt < 0.5 \text{ кВ/нс}$ [4]. При увеличении dU/dt величина K стремится к 1, что эквивалентно стремлению активной площади к полной площади прибора. Увеличение удельного сопротивления материала прибора (от кривой 5 к 1 на Рис. 3 ρ меняется от 10 до 105 Ом·см) приводит к снижению величины K при фиксированном dU/dt . При повышении сопротивления материала полупроводника распределение электрического поля в структуре становится более однородным и объем области, занятой процессами лавинного размножения, растет. И, хотя амплитуда поля уменьшается суммарное количество мест, где возникают токовые каналы, составляющих активную площадь растет.

Выше было показано неоднородность распределения тока по площади прибора присутствует уже на стадии формирования ударно-ионизационного фронта поэтому можно предположить, что величина активной площади зависит от интенсивности процессов

ионизации во время этой стадии. Это находит подтверждение на Рис. 4, где полученные из анализа экспериментов ($I-V$) величины S_a и IF_I коррелируют друг с другом. Две дополнительных точки (светлые круги на рис. 4) получены с помощью расчетов процесса переключения диода при $dU/dt = 25$ и 17 кВ/нс, соответствующие им величины S_a оценены интерполяцией кривой 4 на Рис. 3. Как видно из Рис. 4, все точки лежат на одной кривой, и при изменении величины IF_I от 20 до 180 доля активной площади возрастает от 0 до 0.8 от полной площади прибора. При $IF_I < 20$ или $dU/dt < 1$ кВ/нс величина активной площади снижается до нуля и эффект пикосекундного переключения исчезает. При $IF_I > 180$ или $dU/dt > 10$ кВ/нс практически вся площадь прибора участвует в процессе переключения. Происхождение неоднородности тока вдоль площади прибора связано с неоднородностью электрических свойств материала полупроводника (дислокации и др.), неоднородностью распределения поля в базе и дискретностью процесса возникновения лавин ионизации.

4. Заключение

Пространственная неоднородность является свойством эффекта пикосекундного переключения при $dU/dt \sim 1-10$ кВ/нс. Учет неоднородности процесса переключения позволяет описать эксперимент, в ходе которого был открыт эффект быстрого переключения в 1979 [1], как пространственно-неоднородное переключение под действием ударно ионизационных волн. Без учета неоднородности длительность процесса переключения, оказывается завышенной в несколько раз относительно эксперимента (см. штриховые и сплошные кривые на Рис. 1).

5. Список литературы

- [1] И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев, *Письма ЖТФ*, том **5**, 950, 1979.
- [2] M. Levinshtein, J. Kostamovaara, and S. Vainshtein, *Breakdown Phenomena in Semiconductors and Semiconductor Devices*. London: World Scientific, 2005.
- [3] С.Н. Вайнштейн, Ю.В. Жилев, М.Е. Левинштейн, Визуализация процесса субнаносекундного переключения арсенидгаллиевых диодных структур, *Письма ЖТФ*, том **14**, 1526, 1988.
- [4] А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов, Переключение силовых тиристоров импульсом перенапряжения с наносекундным фронтом, *ФТП*, том **50**, 398, 2016.
- [5] А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов, Исследование процесса спада напряжения при ударно-ионизационном переключении силовых тиристоров, *ФТП*, том **51**, 680, 2017, doi: 10.21883/FTP.2017.05.44429.8367
- [6] A. Gusev, S. Lyubutin, S. Rukin, B. Slovikovsky, S. Tsyranov, O. Perminova, Spatial inhomogeneity of impact-ionization switching process in power Si diode, *Semicond. Sci. Technol.*, vol. **33**, 115012, 2018, doi: 10.61011/SC.2023.07.57429.4871
- [7] С.К. Любутин, В.Е. Патраков, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов, Пространственная неоднородность ударно-ионизационного переключения силового кремниевого диода, *ФТП*, том **57**, 594, 2023, doi: 10.61011/FTP.2023.07.56836.4871
- [8] С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов, Пространственная неоднородность ударно-ионизационного переключения силовых кремниевых тиристоров, *ЖТФ*, том **94**, 771, 2024, doi: 10.61011/JTF.2024.05.57816.308-23