

УДК 621.317.3

## МЕХАНИЗМЫ ЛАВИННОЙ ИНЖЕКЦИИ В ДИОДНЫХ ОБОСТРИТЕЛЯХ СУБНАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

<sup>1</sup>М.Б.Тагаев – профессор. <sup>1</sup>А.А.Абдреймов – стажёр преподаватель.

<sup>1</sup>А.А. Арзиева – магистрант. <sup>1</sup>У.Д. Калбаева – магистрант

1.Каракалпакский государственный университет им. Бердаха, г.Нукус, ул.

Ч.Абдиров №1, 742012, Узбекистан E-mail: [prof.tagaev@mail.ru](mailto:prof.tagaev@mail.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

При задержанном лавинном пробое в мощных высоковольтных  $p^+n-n^+$  структурах при быстром росте обратного напряжения (менее 100пс) происходит ударная ионизация, создающая в базе диода плотную электронно-дырочную плазму. Напряжение при этом может превышать обычное лавинное напряжение почти в два раза. После пробоя диод становится проводящим, но это состояние не само поддерживается, так как электронно-дырочную плазму существует в обратно смещённой области. Раньше полагали, что ток прекращается, когда плазма «рассасывается» за счёт дрейфа носителей (аналогично силовым диодам). Однако показано, что в субнаносекундном режиме это не так - дрейфовое рассасывание не успевает произойти. Вместо этого поведение диода после пробоя определяется: Двойной лавинной инжекцией - лавинное умножение носителей продолжается с обеих сторон перехода. Изотермическим шнурованием тока - ток концентрируется в узких областях (шнурах), что определяет форму и длительность импульса [1-3]. Таким образом, ограничение длительности проводящего состояния задаётся не дрейфовыми процессами, а внутренними лавинно-инжекционными и тепловыми эффектами.

### Основная часть

Для анализа работы кремниевого диодного обострителя была использована диффузионно-дрейфовая модель, включающая численное решение уравнений непрерывности для электронов и дырок, уравнения Пуассона и уравнений Кирхгофа для внешней цепи. Моделирование проводилось для кремниевого  $p^+n-n^+$  диода, с указанием толщины  $n$ -базы, концентрации легирующей примеси и напряжения лавинного пробоя, характерных для Si-структур. Расчёты проводились в TCAD SILVACO, что позволило моделировать как процессы в  $p^+n-n^+$  структуре, так и влияние подключённой нагрузки (50 Ом). Моделируемая структура имела параметры: площадь  $S = 1 \text{ мм}^2$ , толщина  $n$ -базы  $d = 100 \text{ мкм}$ , концентрация легирующей примеси  $N_d = 1.7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , напряжение лавинного пробоя  $U_n \approx 1 \text{ кВ}$ . К диоду прикладывался импульс напряжения  $V(t)$  с наносекундным фронтом и плато субмикросекундной длительности. Амплитуда импульса изменялась от 800В до 3.5 кВ, что позволило воспроизвести условия задержанного ударно-ионизационного пробоя, наблюдавшегося в экспериментах.

15-May, 2026-yil

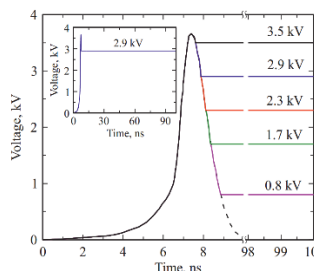


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения  $V(t)$ , приложенных к диоду и последовательной нагрузке  $R=50 \text{ Ом}$ . На начальном участке импульсы совпадают, а различие наблюдается на плато, где амплитуда изменяется в диапазоне  $V_d = 800\text{--}3500 \text{ В}$ . На вставке приведён пример субмикросекундного импульса при  $V_d = 2900 \text{ В}$ .

Анализ пространственного распределения электрического поля и концентраций носителей заряда в диодной структуре показывает, что процесс рассасывания электронно-дырочной плазмы начинается уже на стадии распространения фронта ударной ионизации. Данный процесс продолжается порядка 10нс после окончания сверхбыстрого лавинного переключения, что приводит к постепенному снижению концентрации неравновесных носителей в базе. В расчётах использовался импульс напряжения с полушириной 1,5 нс и амплитудой 3,7кВ, инициирующий задержанный ударно-ионизационный пробой, а также плато субмикросекундной длительности с амплитудой  $V_d = 0,8\text{--}3,5\text{кВ}$ , что соответствует условиям экспериментов [4–5]. Основное отличие процессов в диодных обострителях от процессов в низкочастотных силовых диодах связано с тем, что при коммутации используется обратное напряжение, значительно превышающее напряжение стационарного лавинного пробоя ( $U_{п}$ ). Для срабатывания обострителя требуется импульс, амплитуда которого как минимум в два раза выше  $U_{п}$ , поэтому после переключения на диод и нагрузку подаётся напряжение, существенно большее порога лавинного пробоя. В таких условиях дрейфовое рассасывание электронно-дырочной плазмы не может играть решающей роли, поскольку ток не прекращается, а наоборот — поддерживается за счёт ударно-ионизационных процессов, в первую очередь двойной лавинной инжекции. Это означает, что восстановление запирающей способности р–n-перехода при столь высоком обратном напряжении невозможно, так как его реализация потребовала бы полного прекращения тока и, соответственно, роста напряжения на диоде выше  $U_{п}$ , что физически неосуществимо в данном режиме.

### Заключение

Численное моделирование показало, что при коммутации высоковольтных квазипрямоугольных импульсов большой длительности диодный обостритель переходит в режим двойной лавинной инжекции, которая поддерживает проводящее состояние структуры. Переход в этот режим происходит примерно за 10 нс после лавинного переключения. В режиме двойной инжекции структура обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением, что приводит к развитию изотермического шнурования тока (локальной концентрации тока в отдельных областях). Шнурование возникает через несколько десятков наносекунд после переключения и становится главным фактором, ограничивающим длительность проводящего состояния и, соответственно, максимальную длительность коммутируемого импульса. Таким образом, ограничение работы диодного

15-May, 2026-yil

обострителя определяется не дрейфовым рассасыванием плазмы, а ростом плотности тока из-за шнурования.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices, 3rd Ed., Wiley, 2006.
2. Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф. *Письма в ЖТФ*, 1979, т.5, в.15, с.950–953.
3. Tagaev M., Abdreymov A. Modern state of physics in the research of microplasma breakdown in silicon p-n junctions and diodes and schottky. 2023 EPRA.IJRD|Journal.DOI:<https://doi.org/10.36713/epra.2016>.
4. Гусев А.И., Ляпутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Цыранов С.Н. *ФТП.*, 2014, т.48, в.8, с.1095–1106.
5. Karo - Sysoev A.F. Ultra-Wideband Radar Technology, Ed. J.D. Taylor, CRC Press, 2001.

Global  
Science  
Publication