

07

## Мощный полупроводниковый обостритель импульсов с субнаносекундным быстродействием

© И.В. Грехов, А.Г. Люблинский, Ш.А. Юсупова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194012 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: grekhov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 13 июля 2016 г.)

Сверхбыстрое — субнаносекундное переключение высоковольтного диодного обострителя импульсов из блокирующего в проводящее состояние производится путем приложения к нему импульса перенапряжения со скоростью нарастания  $\sim 10^{12}$  V/s в блокирующем направлении. Образующийся при этом ударно-ионизационный фронт производит заполнение электронно-дырочной плазмой базовой области диода, переводя его в проводящее состояние. При этом принципиально важно предотвратить возможность пробоя по поверхности диодной структуры при перенапряжении. В работе представлены первые результаты исследования принципиально новой конструкции диодного обострителя импульсов, позволяющей полностью исключить деградацию краевого контура при импульсном перенапряжении. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность этой конструкции и перспективность работ по выяснению ее предельных возможностей.

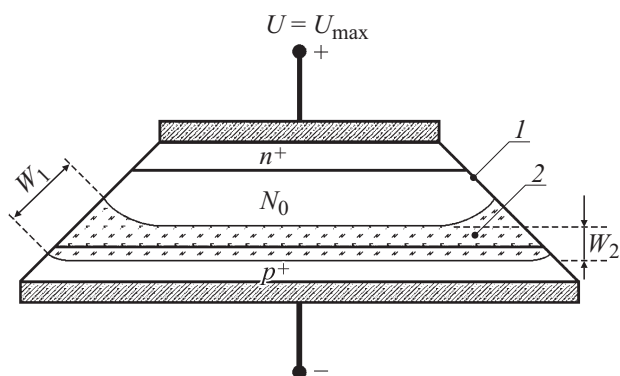
DOI: 10.21883/JTF.2017.05.44459.1993

Возможность сверхбыстрого — субнаносекундного переключения из блокирующего в проводящее состояние высоковольтной кремниевой диодной  $p^+N_0n^+$ -структуры была показана в [1,2], а затем подтверждена в [3]. После этого был проведен большой комплекс исследований, в результате которых диодный лавинный переключатель — обостритель высоковольтных импульсов стал широко используемым прибором мощной импульсной техники субнаносекундного диапазона.

Процесс субнаносекундного переключения в диодном обострителе импульсов, согласно [4], происходит следующим образом. К диодной структуре  $p^+N_0n^+$ -типа, полученной, например, путем диффузий бора и фосфора с противоположных сторон кремниевой пластины  $N_0$ -типа проводимости и имеющей напряжение статического пробоя в запиорном направлении порядка 1–2 kV, прикладывается в запиорном направлении импульс напряжения, нарастающий со скоростью порядка  $10^{12}$  V/s. При такой скорости подъема напряженности поля  $E$  в расширяющейся области объемного заряда (ООЗ)  $p^+N_0$ -перехода быстро достигает критической величины  $E_b \approx 2 \cdot 10^5$  V/cm, при которой в квазистатических условиях развивается лавинный пробой. Однако при столь быстром подъеме напряжения того количества свободных носителей, которое создается термогенерацией в ООЗ, оказывается недостаточным для инициирования объемного пробоя. Когда поле нарастает до величины  $\sim 5 \cdot 10^5$  V/cm, при которой начинается термополевая ионизация глубоких ловушек в кремнии, то образующиеся при этом электроны оказываются в области сверхсильного поля и производят быструю ионизацию атомов кремния, образуя электронно-дырочную плазму с высокой концентрацией. Поле в плазме падает, но нарастает в прилегающей ООЗ и т.д. Образующийся

таким образом ионизационный фронт быстро перемещается в ООЗ к  $N_0n^+$ -переходу, оставляя за собой область, заполненную электронно-дырочной плазмой с высокой концентрацией. Когда фронт достигает  $N_0n^+$ -перехода, вся ООЗ оказывается заполненной электронно-дырочной плазмой, и диод переходит в проводящее состояние. Поскольку скорость движения фронта может на несколько порядков превышать насыщенную скорость движения электронов, переключение диода со статическим напряжением пробоя 1–2 kV происходит за время, меньшее 100 ps. Это самый быстрый из известных высоковольтных полупроводниковых переключателей — обострителей импульса.

Для надежной работы такого прибора необходимо обеспечить защиту от пробоя  $p^+N_0$ -перехода по поверхности при импульсном напряжении, значительно превышающем напряжение объемного пробоя в статических условиях. В силовой полупроводниковой электронике обычно используется конструкция краевого контура  $p^+N_0$ -перехода, позволяющая получить напряжение пробоя на поверхности большее, чем в объеме, впервые описанная в работе [5]. В этой конструкции диода, показанной на рис. 1, краевой контур ( $I$ ) кремниевой пластины выполнен в виде кольцевой фаски таким образом, что площадь поперечного сечения уменьшается в направлении от высоколегированной  $p^+$ -области к слаболегированной  $N_0$ -области. В такой конструкции ширина ООЗ на поверхности краевого контура  $W_1$  значительно больше, чем в объеме  $W_2$ ; это позволяет уменьшить напряженность электрического поля на поверхности и предотвратить поверхностный пробой. Однако значительное увеличение ширины ООЗ на поверхности по сравнению с объемом в диодной структуре возможно только тогда, когда ширина ООЗ в объеме  $W_2$



**Рис. 1.** Стандартная конструкция высоковольтного диода: 1 — краевой контур, 2 — область объемного заряда (ООЗ).

меньше, чем толщина  $N_0$ -базовой области. Это обычно и осуществляется при работе диодов в статических режимах, когда рабочее напряжение  $U = U_{\max}$  меньше напряжения пробоя  $p^+N_0$ -перехода. Однако при работе в режиме обострителя импульсов, когда прикладываемое импульсное напряжение  $U = U_{\max}$  в разы больше напряжения пробоя, ООЗ в объеме диода занимает всю  $N_0$ -базу и ширина ООЗ в объеме и на поверхности различается незначительно. Существенное увеличение толщины  $N_0$ -базы невозможно, поскольку оно приводит к уменьшению быстродействия и возрастанию остаточного напряжения во включенном состоянии. Кроме того, возможность быстрого формирования широкой ООЗ на поверхности ограничивается насыщением скорости движения носителей в сильных полях. Эти факторы приводят к тому, что вероятность пробоя по поверхности при перенапряжении резко возрастает и значительно снижается надежность работы лавинных обострителей.

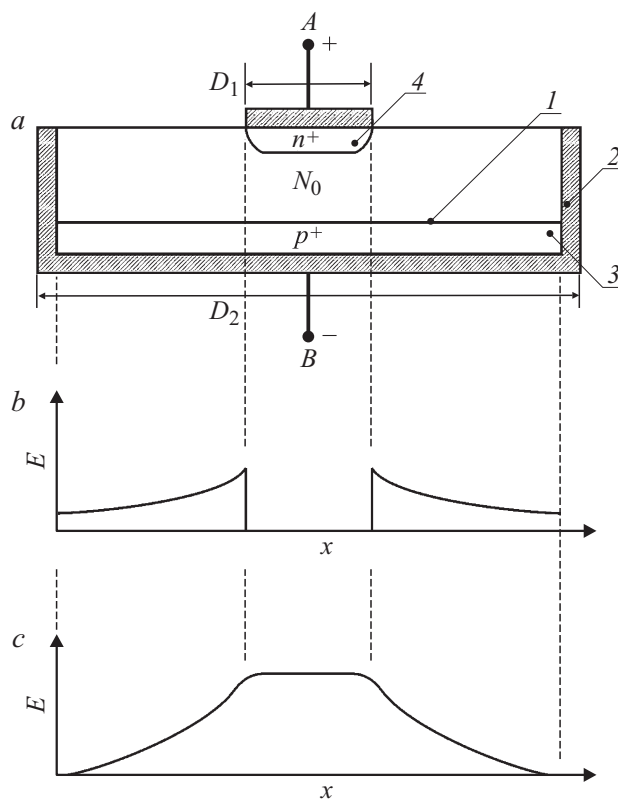
Однако то обстоятельство, что при работе в режиме обострителя импульсов большое обратное напряжение прикладывается к диоду только на единицы наносекунд, дает возможность принципиально по-новому решать задачу защиты от пробоя по поверхности в диодной  $p^+N_0n^+$ -структуре, конструкция которой показана на рис. 2, *a* [6]. В этой структуре краевой контур блокирующего  $p^+N_0$ -перехода 1 замкнут накоротко металлизацией 2 с  $p^+$ -слоем 3, а противоположный ему  $n^+$ -слой 4 имеет внешний диаметр  $D_1$  значительно меньший, чем внешний диаметр  $p^+$ -слоя  $D_2$ . Таким образом,  $n^+$ -слой окружен кольцом исходного кремния с удельным сопротивлением, обычно лежащим в пределах  $50\text{--}100\ \Omega \cdot \text{cm}$ .

Сопротивление  $R$  кольца базовой области структуры в радиальном направлении равно  $R = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{D_2}{D_1}$ , где  $\rho$  — удельное сопротивление исходного кремния,  $h$  — толщина базового слоя,  $D_1$  и  $D_2$  — диаметры верхнего и нижнего контактов соответственно.

Обостряемый импульс напряжения прикладывается к контактам  $AB$  с отрицательной полярностью на  $p^+$ -слое. Протекающий при этом по кольцу исходного кремния ток создает на нем падение напряжения, которое сме-

щает  $p^+N_0$ -переход в запорном направлении. Напряженные смещения изменяется от нуля на краевом контуре  $p^+N_0$ -перехода до максимума в его центре. Примерная форма распределения напряженности электрического поля на поверхности кольца показана на рис. 2, *b*, а в поперечном сечении  $p^+N_0$ -перехода — на рис. 2, *c*. Когда при быстром подъеме напряжения поле в центре нарастает до величины  $\sim 5 \cdot 10^5\ \text{V/cm}$ , то начинается термополевая ионизация ловушек и формируется ударно-ионизационный фронт, приводящий к сверхбыстрому переключению центральной части  $p^+N_0n^+$ -диода в проводящее состояние. Таким образом, формирование ударно-ионизационного фронта происходит в объеме материала, и возможность деградации диода вследствие поверхностного пробоя практически устраняется, поскольку ширина кольца значительно превышает толщину  $N_0$ -базовой области, и напряженность поля на поверхности кольца мала. При этом, конечно, обработка поверхности кольца и ее защита должны соответствовать обычным требованиям к защите поверхности краевого контура.

Опытные образцы диодов со структурой, приведенной на рис. 2, *a*, были изготовлены из  $n$ -кремния с удельным сопротивлением  $\rho = 100\ \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $p^+N_0$ -переход с глубиной  $65\ \mu\text{m}$  создавался диффузией бора



**Рис. 2.** *a* — исследуемая конструкция диодной  $p^+N_0n^+$ -структуры: 1 — блокирующий  $p^+N_0$ -переход, 2 — замыкающая металлизация, 3 —  $p^+$ -слой, 4 —  $n^+$ -слой; *b* — форма распределения напряженности поля по поверхности  $N_0$  кольца; *c* — форма распределения напряженности поля на  $p^+N_0$ -переходе.

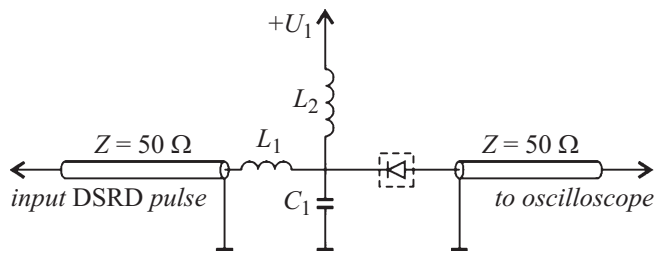


Рис. 3. Схема тестового модуля.

с поверхностной концентрацией  $N_s \approx 1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , а  $n^+N_0$ -переход с глубиной  $5 \mu\text{m}$  создавался диффузией фосфора с  $N_s \approx 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Внешний диаметр  $n^+$ -слоя  $D_1 \approx 1 \text{ mm}$ ,  $p^+$ -слоя  $D_2 \approx 2 \text{ mm}$ , толщина центральной („рабочей“) части  $N_0$ -слоя  $\sim 100\text{--}110 \mu\text{m}$ , контакты к  $n^+$ - и  $p^+$ -слоям создавались путем химического никелирования и вжигания. Расчетное и измеренное в слабotoчном режиме сопротивление кольца составляет около  $1000 \Omega$ .

Схема тестового модуля для исследования процесса переключения обострителей приведена на рис. 3. На вход модуля по коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением  $50 \Omega$  подается высоковольтный импульс наносекундной длительности, формируемый генератором на основе дрейфовых диодов с режимом восстановления (ДДРВ). В наших экспериментах амплитуда входного импульса регулировалась в диапазоне от 1 до 2 kV, фронт импульса составлял  $\sim 0.6 \text{ ns}$ , а ширина импульса на полувысоте —  $1.5 \text{ ns}$ . Обостряющий конденсатор  $C_1$  заряжается входным высоковольтным импульсом через индуктивность  $L_1$ , при этом максимальное напряжение заряда конденсатора  $C_1$  может быть выше, чем амплитуда входного импульса. Амплитуда и скорость нарастания входного импульса, а также параметры  $C_1$  и  $L_1$  подбираются таким образом, чтобы пробой обострителя происходил в момент, когда напряжение входного импульса близко к максимуму. Конденсатор  $C_1$  обеспечивает постоянный уровень напряжения на обострителе в течение процесса пробоя, пока плазменный фронт перемещается по базовой области, а последующий разряд через обостритель и нагрузку  $50 \Omega$  обеспечивает формирование субнаносекундного импульса тока при переключении обострителя в проводящее состояние. Постоянное напряжение от источника  $U_1$  подается на обостритель через индуктивность  $L_2$  и смещает  $p^+N_0$ -переход обострителя в обратном направлении для уменьшения его емкости, что позволяет повысить скорость нарастания напряжения на обострителе и уменьшает долю входного наносекундного импульса, проходящую в нагрузку через емкость перехода до момента пробоя.

На рис. 4 показаны осциллограммы напряжения обостряемого импульса от ДДРВ-генератора на входе тестового модуля и выходного импульса после обострения. Участок медленного нарастания выходного импульса —

„пьедестал“ — формируется емкостным током через обратную смещенную структуру диода и омическим током через кольцо  $N_0$ -слоя, а быстрый участок длительностью  $\sim 100 \text{ ps}$  формируется ударно-ионизационным фронтом, заполняющим электронно-дырочной плазмой с высокой концентрацией центральную часть  $N_0$ -базового слоя структуры, показанной на рис. 2, а.

Хорошо видно, что с ростом напряжения обостряемого импульса растет напряжение выходного импульса и существенно увеличивается скорость его нарастания. Предварительные эксперименты показали также, что диоды надежно работают в частотном режиме.

Таким образом, в настоящей работе представлены первые результаты исследования принципиально новой конструкции диодного субнаносекундного обострителя мощных импульсов, позволяющей полностью исключить деградацию краевого контура  $p^+N_0$ -перехода при сверхвысоких импульсных перенапряжениях. Эти эксперименты подтвердили работоспособность предложенной конструкции и перспективность работ по выяснению ее предельных возможностей с целью повышения основных характеристик субнаносекундных диодных обострителей мощных импульсов.

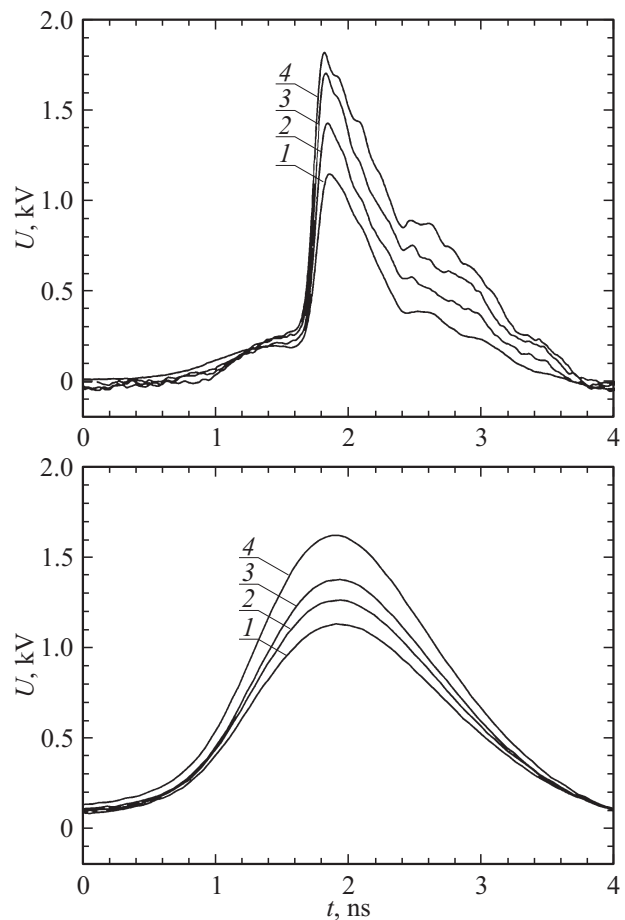


Рис. 4. Осциллограммы выходного импульса для нескольких значений пикового напряжения обостряемого импульса  $U_0$ : 1 — 1.15 kV, 2 — 1.25 kV, 3 — 1.38 kV, 4 — 1.62 kV.

Работа выполнена за счет поддержки гранта Российского Научного фонда (проект № 14-29-00094).

## Список литературы

- [1] *Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф.* Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 15. С. 950–953.
- [2] *Grekhov I.V., Karido-Sysoev A.F., Kostina L.S., Shendererey S.V.* // *Electron. Lett.*, 1981. Vol. 17. N 12. P. 422–423.
- [3] *Benzel D., Pocha M.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1985 Vol. 56. N 7. P. 1456–1458.
- [4] *Rodin P., Rodina A., Grekhov I.* // *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 98. N 9. P. 094506(1-11).
- [5] *Davies R.L., Gentry F.E.* // *IEEE Tr. Electron Dev.* 1964. Vol. 11. N 7. P. 313–323.
- [6] Пат. РФ № 2016101357/08 (001875). Полупроводниковый диодный субнаносекундный обостритель импульсов / И.В. Грехов, А.Г. Люблинский. 2016. БИ № 19.