

УДК 621.282.2

DOI 10.36845/2073-8250-2020-259-4-25-30

ПЛОЩАДЬ P-N ПЕРЕХОДА С ТУННЕЛЬНЫМ ПРОБОЕМ КАК ФАКТОР КОНСТРУИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

С.П. Скорняков

АО «НЗПП с ОКБ», Россия, 630082, Новосибирск, Дачная, 60

Представлены результаты экспериментального исследования зависимости напряжения пробоя ($U_{\text{проб}}$) низковольтных p-n структур с лавинным, смешанным и туннельным механизмами пробоя от площади p-n переходов (S_{p-n}). Характер и ход экспериментальных кривых зависимости $U_{\text{проб}}(S_{p-n})$ полностью соответствуют известной картине распределения p-n переходов по форме электрического пробоя. Для значений $U_{\text{проб}} \geq 6,7$ В напряжение лавинного пробоя p-n-переходов остается неизменным в широком диапазоне значений S_{p-n} . Ниже $\sim 6,7$ В в области смешанного пробоя $\sim (6,7 \dots 4,7)$ В наблюдается уменьшение значений $U_{\text{проб}}$ с ростом S_{p-n} для фиксированных значений ρ_v . Причём, для $\rho_v (0,007 \div 0,001)$ Ом·см, в области преобладающего туннельного механизма пробоя ($U_{\text{проб}} \leq 4,7$ В), связь $U_{\text{проб}}(S_{p-n})$ носит нелинейный характер.

Эффект нелинейной зависимости $U_{\text{проб}}(S_{p-n,t})$ p-n переходов с туннельным пробоем использован в разработках низковольтных стабилитронов (НВ) и ограничителей напряжения с $U_{\text{ст}}/U_{\text{проб}}$ менее 5 В. Показано, что зависимость $U_{\text{проб,t}}(S_{p-n,t})$ для p-n структур с туннельным пробоем может быть использована также для конструирования оригинальных преобразователей напряжения с отрицательным сопротивлением. В частности, реализован экспериментальный образец конструкции преобразователя напряжения на основе двух p^+-n^+ переходов с напряжениями пробоя $\sim 4,3$ В и $\sim 2,3$ В, на основе кремния p-типа проводимости с удельным сопротивлением 20 Ом·см, управляемый МОП-системой.

Ключевые слова: низковольтный p-n переход, туннельные механизмы пробоя, лавинный механизм пробоя, смешанный механизм пробоя, стабилитрон, преобразователь напряжения, ограничитель напряжения

Сведения об авторах: Скорняков Станислав Петрович, к.т.н., skornyakov@nzpp.ru

AREA OF P-N JUNCTION WITH THE TUNNEL BREAKDOWN MECHANISM AS A FACTOR IN THE DESIGN OF SEMICONDUCTOR DEVICES

S. P. Skorniyakov

“NZPP s OKB” JSC, Russia, 630082, Novosibirsk, Dachnaya st., 60

This article presents the results of an experimental study on the influence of p-n junction area (S_{p-n}) on the breakdown voltage (U_{br}) of low-voltage p-n structures with avalanche, mixed and tunnel breakdown mechanisms. The nature and behaviour of the experimentally obtained $U_{br}(S_{p-n})$ curves fully correspond to the well-known distribution of p-n junction curves by the type of an electric breakdown. For $U_{br} \geq 6.7$ V, the avalanche breakdown voltage of p-n junctions remains unchanged over a wide range of S_{p-n} values. Below ~ 6.7 V, in the region of mixed breakdown $\sim (6.7 - 4.7)$ V, U_{br} decreases with an increase of S_{p-n} for fixed values of ρ_v . Moreover, for $\rho_v (0.007 \div 0.001)$ Ohms·cm, in the region of the tunnel breakdown mechanism ($U_{br} \leq 4.7$ V), $U_{br}(S_{p-n})$ curve shows non-linear behaviour.

The effect of non-linear dependence between U_{br} and ($S_{p-n,t}$) for p-n junctions with tunnel breakdown is used in the designs of low-voltage Zener diodes and voltage regulators with U_{st}/U_{br} less than 5 V. The dependence between $U_{br,t}$ and ($S_{p-n,t}$) for p-n structures with tunnel breakdown can be used in designing novel voltage converters with negative resistance. In particular, this article shows the implemented experimental design of a voltage converter based on two p^+-n^+ junctions with breakdown voltages of ~ 4.3 V and ~ 2.3 V, based on p-type silicon with a specific resistance of 20 Ohms·cm, controlled by a MOSFET system.

Keywords: low-voltage p-n junction, tunnel, avalanche, mixed breakdown mechanism, Zener diode, voltage converter, voltage regulator

Data on author: Skorniyakov Stanislav Petrovich, Ph.D., skorniyakov@nzpp.ru

Различают три вида электрического пробоя р-п переходов: лавинный, туннельный и смешанный. В кремниевых р-п переходах с $U_{\text{проб}} < 4E_g/q$ ($\sim 4,7$ В) (E_g – ширина запрещённой зоны р-п перехода, q – заряд электрона) реализуется туннельный механизм пробоя. В р-п переходах с $U_{\text{проб}} > 6E_g/q$ ($\sim 6,7$ В) пробой обусловлен в основном лавинным умножением носителей заряда. В области $4E_g/q > U_{\text{проб}} > 6E_g/q$ наблюдается смешанный (туннельно-лавинный) механизм пробоя.

На рис. 1 представлены результаты исследования зависимости напряжения пробоя ($U_{\text{проб}}$) от площади ($S_{\text{р-п.т}}$) р-п переходов, изготовленных высококонцентрационной диффузией мышьяка в вакуированном реакторе в кремний р-типа проводимости, легированный бором (КДБ) с удельным сопротивлением ($0,001 \div 0,06$) Ом·см.

Характер и ход экспериментальных кривых зависимости $U_{\text{проб}}(S_{\text{р-п.т}})$ на рис. 1

полностью соответствуют представленной выше картине распределения р-п-переходов по форме электрического пробоя: для значений $U_{\text{проб}} \geq 6,7$ В напряжение пробоя р-п переходов остается неизменным в широком диапазоне значений $S_{\text{р-п}}$, что хорошо согласуется с известными представлениями о насыщении эффективной площади лавинного пробоя [1]. Ниже $\sim 6,7$ В в области смешанного пробоя ($6,7 \dots 4,7$) В наблюдается уменьшение значений $U_{\text{проб}}$ с ростом $S_{\text{р-п}}$ для фиксированных значений ρ_v . Причём, для ρ_v ($0,007 \div 0,001$) Ом·см, в области преобладающего туннельного механизма пробоя, связь $U_{\text{проб}}(S_{\text{р-п}})$ носит регулярный нелинейный характер и может быть аппроксимирована в диапазоне значений $S_{\text{р-п}} = (3 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-3})$ см² функцией вида:

$$U_{\text{проб}} = U_{\text{проб.}j} - K \cdot \lg(S_{\text{р-п}}/S_{\text{р-п.}j}),$$

где $U_{\text{проб.}j}$ – напряжение пробоя р-п-перехода, характеризующегося некоторой площадью $S_{\text{р-п.}j}$; $U_{\text{проб}}$ – напряжение пробоя

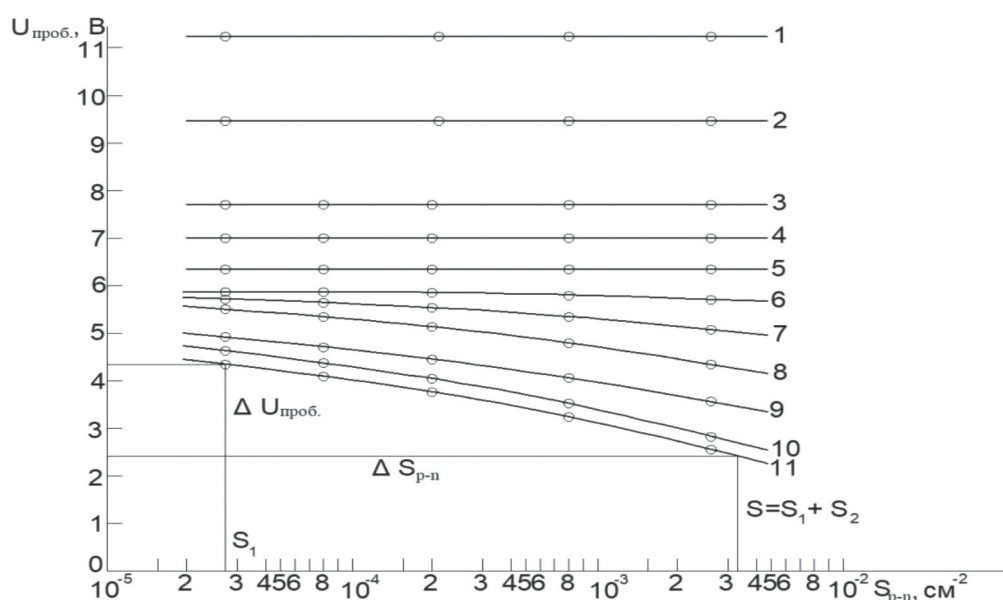


Рис. 1

Зависимость напряжения пробоя НВ р-п структур от площади р-п перехода: 1...11 → ρ_v соответственно 0,06; 0,04; 0,03; 0,025; 0,02; 0,01; 0,007; 0,0045; 0,003; 0,002; 0,001 Ом·см

р-п перехода, изготовленного на кремнии с идентичным удельным сопротивлением, но с большей по величине площадью $S_{p-n} > S_{p-n,j}$; K – тангенс угла наклона рассматриваемой кривой, определяемый физическими параметрами р-п перехода с туннельным пробоем.

Зависимость $U_{\text{проб}}(S_{p-n,t})_{pV}$ представляет значительный практический интерес. Впервые возможность управления напряжением пробоя р-п переходов с туннельным пробоем за счет параметра S_{p-n} показана в работе [2]. Позже возможность управления механизмом пробоя р-п-переходов с $U_{\text{проб}} \approx (4 \div 6)$ В за счет плотности тока, т.е. за счёт S_{p-n} , была отмечена в работах Фэира и Вивела [3]. Однако использование этого важного конструкционного параметра в указанной работе отражения не нашло.

Эффект нелинейной зависимости $U_{\text{проб}}(S_{p-n,t})$ р-п-переходов с туннельным пробоем использован в разработках НВ стабилитронов и ограничителей напряжения с $U_{\text{ст}} / U_{\text{проб}}$ менее 5 В [4-7] для полу-

чения различных номиналов приборов по $U_{\text{ст}} / U_{\text{проб}}$ на одних и тех же марках кремния, в одном и том же режиме, но для различных площадей р-п-переходов.

Эффект нелинейной зависимости $U_{\text{проб}}(S_{p-n,t})$ р-п переходов с туннельным пробоем может быть использован также, например, для создания преобразователей напряжения с отрицательным дифференциальным сопротивлением [8]. В области нелинейной зависимости $U_{\text{проб}}(S_{p-n})$ изменению площади р-п перехода с туннельным пробоем (ΔS_{p-n}) соответствует изменение (преобразование) напряжения пробоя на величину $\Delta U_{\text{проб}}$ с уровня $U_{\text{проб.1}}$ на более низкий уровень $U_{\text{проб.2}}$ (рис. 1).

На рис. 2 представлен пример конструкции экспериментального образца преобразователя напряжения с отрицательным дифференциальным сопротивлением, управляемого МОП-системой.

Получение p^+n^+ переходов 1, 2 с туннельными механизмами пробоя выполнено на основе высокоомного р-кремния марки

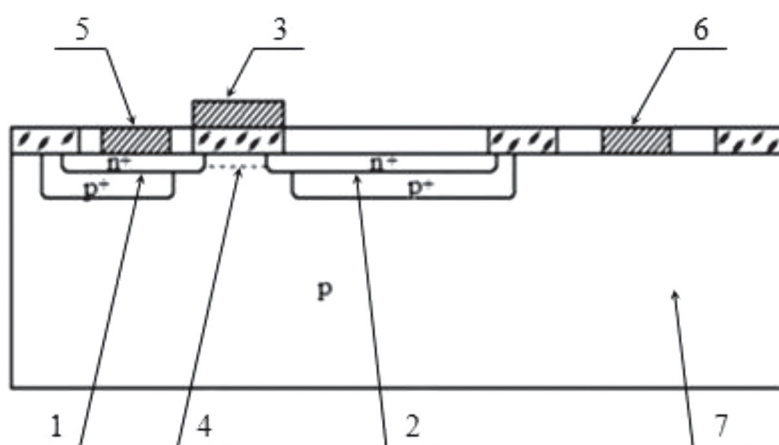


Рис.2

Преобразователь напряжения, управляемый МОП – системой:
1, 2 – р-п переходы с туннельным пробоем; 3 – МОП система; 4 – проводящий канал;
5, 6 – электроды к р-п переходу 1 и кремниевой подложке 7

КДБ20 (концентрация легирующей примеси – бора $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). В последнем диффузией бора в режиме 1150°C , 60 мин на глубине ~ 3 мкм предварительно формировали две p^+ -области с концентрацией бора $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Затем диффузией мышьяка в вакуированной ампуле в режиме 1150°C , 120 мин в p^+ -областях формировали n^+ -области с глубиной ~ 3 мкм и концентрацией $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Предусмотрено, чтобы n^+ -области несколько (на ~ 5 мкм) выходили из p^+ -областей в p -область исходного кремния, разделяющую указанные p^+ -области. В результате получали n^+-p^+ переходы 1, 2 с туннельными механизмами пробоя и замыкающие к ним краевые n^+-p переходы с лавинным пробоем.

В конструкции прибора (рис. 2) изменение площади $p-n$ перехода 1, достигается подключением к нему соседнего $p-n$ перехода 2, с помощью управляющей МОП-системы 3 на полевой электрод, который подаёт переменное напряжение с величиной и полярностью, необходимыми для образования проводящего канала 4 в слабо легированной (высокоомной) p -кремниевой подложке 7 между $p-n$ -переходами 1, 2 с туннельными механизмами пробоя.

В результате происходит трансформация $p-n$ перехода 1 в $p-n$ переход с интегральной площадью $S_{p-n} = S_{p-n.1} + S_{p-n.2}$ и соответствующее дискретное изменение напряжения на выходе прибора от значения $U_{\text{проб}}(S_{p-n.1})$ до значения $U_{\text{проб}}(S_{p-n.1} + S_{p-n.2})$.

Наблюдались обратные ВАХ (вольт-амперные характеристики), соответствующие переключению устройства рис. 2 из рабочего состояния, определяемого включением p^+-n^+ перехода 1 в рабочее состояние, определяемое включением результирующего p^+-n^+ перехода, составленного

из связанных проводящим каналом 4 p^+-n^+ переходов 1 и 2, рис. 3.

Первому и второму указанным рабочим состояниям устройства соответствовали напряжения на выходе $\sim 12,2$ и ~ 10 В p^+-n^+ переходов при обратном токе 3 мА. Величина полученной разницы напряжений ограничения ($\sim 2,2$ В) в первом и втором рабочих состояниях исследуемого устройства хорошо согласуется с предварительными экспериментальными данными для p^+-n^+ переходов с туннельным пробоем с площадями соответственно $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ и $5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, изготовленных на кремнии p -типа проводимости с концентрацией легирующей примеси $1,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

В то же время, p^+-n^+ переходам с туннельным пробоем и указанными площадями должны соответствовать напряжения пробоя $\sim 4,3$ В и $\sim 2,3$ В. Полученное расхождение между абсолютными значениями $U_{\text{проб}}$ p^+-n^+ переходов 1, 2 реализованного варианта конструкции устрой-

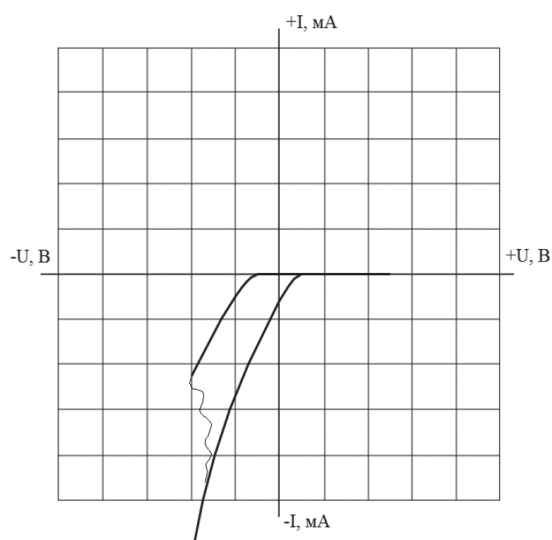


Рис. 3

ВАХ преобразователя напряжения (рис. 2) в момент переключения

ства (рисунок 2) и экспериментальных p^+-n^+ -переходов с туннельным пробоем и аналогичными площадями объясняется наличием дополнительной составляющей падения напряжения на чрезмерно высоком контактном сопротивлении между электродом 6 и высокоомной (20 Ом·см) исходной кремниевой подложкой, к подавлению которого, например, подлегированием контактной области, мер принято не было.

Отметим также, что наличие туннельного механизма пробоя у рабочих p^+-n^+ переходов 1, 2 подтверждается характерным плавным ходом соответствующих им обратных ВАХ (см. рис. 3).

Литература

1. Мельник В.Г. Некоторые электронные процессы при пробое кремниевых р-п переходов: автореф. дис. на соискание учёной степени к.ф.-м.н. № 049/ АН СССР. Сиб. отд-ние. Совет секций общей и прикладной физики Объед. Учёного совета по физ-мат. и техн. наукам., – Новосибирск, 1969. – 15 с.
2. Скорняков С.П. Планарные низковольтные стабилитроны / С.П. Скорняков, Ф.Н. Сапогова, Л.А. Топчилова // *Электронная техника. – Сер.2. Полупроводниковые приборы.* – 1976. – Вып.4. – С.75 – 76.
3. Fair R.B. Zener and Avalanche Breakdown in As implanted low voltage silicon p-n-junctions / R.B. Fair, H.W. Wivell // *IEEE Trans. on Electron. Dev.* – 1976. – V.ED – 23. – № 5. – P.512 - 518.
4. Скорняков С.П. Получение р-п переходов в сильнолегированном кремнии методом ампульной диффузии мышьяка / С.П. Скорняков // *Электронная техника. – Сер.2. – Полупроводниковые приборы. Технология приборов.* – 1979. – Вып. 4. – С.91 – 97.
5. Скорняков С.П. Низковольтные ограничители напряжения / А.С. Андреев, С.П. Скорняков //

Заключение

Таким образом, нелинейная зависимость напряжения пробоя р-п-переходов с туннельным пробоем от площади р-п перехода с туннельным пробоем $U_{\text{проб}}(S_{p-n.t.})$ может служить фактором управления напряжением стабилизации низковольтных стабилитронов. Также, приборы, использующие эффект нелинейной зависимости напряжения пробоя туннельных р-п-переходов от их площади, по-видимому, могут найти применение в микроэлектронных устройствах в качестве программируемых преобразователей напряжения или ограничителей напряжения с отрицательным сопротивлением, управляемых МОП-системой.

Электронная техника. – Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 1986. – Вып.2. – С.42 – 47.

6. Скорняков С.П. Физико-технологические аспекты создания низковольтных ограничителей напряжения на основе кремния / Скорняков С.П. [и др.] // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).* – 2010. – № 5 – 6. – С. 30 – 35.
7. Скорняков С.П. Малогабаритные бескорпусные полупроводниковые ограничители напряжения / Скорняков С.П. [и др.] // *Компоненты и технологии. Силовая электроника.* – 2011. – №9. – С.54 – 55.
8. Скорняков С.П. Полупроводниковый прибор // Патент РФ № 1031378, 1993. БИ № 34.

References

1. Melnik V. G. Nekotoryye elektronnyye protsessy pri proboye kremniyevykh p-n perekhodov [Some electronic processes in the breakdown of silicon p-n junctions]. Abstract of Ph.D. thesis. Novosibirsk, 1969, 169 p.
2. Skorniyakov S. P., Sapogova F. N., Topchilova L. A. Planarnyye nizkovol'tnyye stabilitrony [Planar low-voltage Zener diodes]. *Electronic Engineering.*

-
- Series 2. Semiconductor devices*, 1976, iss. 4, pp. 75-76.
3. Fair R. B. Zener and Avalanche Breakdown in As implanted low-voltage silicon p-n-junctions. *IEEE Trans. on Electron. Dev.*, 1976, V.ED 23, no. 5, pp. 512 – 518.
 4. Skorniyakov S. P. Polucheniye p-n perekhodov v sil'nolegirovannom kremnii metodom ampul'noy diffuzii mysh'yaka [Forming p-n junctions in heavily doped silicon by diffusion of As ampoule]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor devices. Device technology*. 1979, iss. 4, pp. 91-97.
 5. Andreev A. S., Skorniyakov S. P. Nizkovol'tnyye ogranichiteli napryazheniya [Low-voltage voltage regulators]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor devices*, 1986, iss. 2, pp. 42-47.
 6. Skorniyakov S. P. et al. Fiziko-tekhnologicheskiye aspekty sozdaniya nizkovol'tnykh ogranichiteley napryazheniya na osnove kremniya [Physical and technological aspects of the design of low-voltage regulators based on silicon]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2010, no. 5-6, pp. 30-35.
 7. Skorniyakov S. P. et al. Malogabaritnyye beskorpusnyye poluprovodnikovyye ogranichiteli napryazheniya [Small-sized bare-die semiconductor voltage regulators]. *Komponenty i tekhnologii. Silovaya Elektronika*. 2011, no. 9, pp. 54-55.
 8. Skorniyakov S. P., Poluprovodnikoviy pribor [Semiconductor device]. Patent, Russian Federation, no. 1031378, (1993).