

УДК 621.383

Ионно-легированные диодные структуры на основе *n*-кремния, изготовленные в условиях серийного производства

В. П. Астахов, Д. А. Гиндин, Е. Ф. Карпенко, В. В. Карпов,
Т. М. Соколова, К. В. Сорокин

ОАО «Московский завод "Сапфир"», Москва, Россия

*Представлены результаты исследований прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик (ВАХ) планарных ионно-легированных p^+np^+ -структур на основе кремния *n*-типа проводимости с различным уровнем удельного сопротивления. Показано, что для таких структур определяющее влияние на ВАХ оказывает качество обработки поверхности исходных пластин, а имплантация периферии планарных p^+n -переходов ионами N_2^+ с энергией 100 кэВ и дозами выше 10^{16} см⁻² является эффективным средством устранения влияния поверхности на их ВАХ, приближая и прямую, и обратную ветви к "идеальным". При этом ВАХ ионно-легированных структур становятся соответствующими ВАХ диффузионных аналогов, изготавливаемых в условиях производства ОАО «Московский завод "Сапфир"».*

В литературе имеются сообщения о получении планарных ионно-легированных (ИЛ) диодных структур n^+pp^+ -типа на высокоомном *p*-кремнии с ВАХ, близкими к ВАХ диффузионных аналогов [1, 2]. При этом показано, что улучшение и прямых, и обратных ветвей ВАХ достигается при устранении поверхностных токов в результате имплантации больших доз ($3 \cdot 10^{16}$ см⁻² и более) ионов диффектообразующих элементов (аргона, азота) в поверхность кольца, охватывающего планарную границу n^+ -*p*-перехода. Дан-

ные по аналогичным исследованиям ИЛ диодных структур p^+np^+ -типа на n -кремнии отсутствуют.

Известны результаты по имплантации ионов BF_2^+ в n -кремний [3], согласно которым электрическая активация атомов бора именно в этом случае происходит более эффективно, чем при имплантации ионов B^+ . Поэтому целью данной работы является сравнительное изучение ВАХ p^+-n^+ -переходов, полученных на пластинах n -кремния имплантацией ионов BF_2^+ и B^+ при различных обработках их периферии. При этом рассмотрено также влияние на ВАХ удельного сопротивления исходных кристаллов.

Эксперименты проведены в условиях серийного производства фотодиодов на основе n -кремния, при котором используют традиционное диффузионное легирование, и имеют целью определить возможность замены диффузионной технологии на имплантационную.

Методика эксперимента

Объектом исследования являются p^+np^+ -диодные структуры на пластинах кремния n -типа проводимости (рис. 1, а) с удельным сопротивлением 20 и 130 Ом·см, диаметром 25—30 мм, ориентацией (111) и толщиной 0,4 мм, прошедшие двухстороннюю шлифовку на корундовых микропорошках, а затем химико-механическую (ХМП) и химико-динамическую (ХДП) полировки со съемом с каждой стороны пластин при ХДП по 50 мкм; p^+-n -переходы создавались имплантацией в двух режимах:

режим 1: ионы BF_2^+ с энергией $E = 100$ кэВ и дозой $\Phi = 10^{15}$ см $^{-2}$;

режим 2: режим 1, а затем ионы B^+ (также $E = 100$ кэВ и $\Phi = 10^{15}$ см $^{-2}$) с последующим двухстадийным отжигом, температура (T) и длительность (t) каждой стадии которого составляют, соответственно, $T_1 = 600$ °С, $t_1 = 0,5$ ч и $T_2 = 900$ °С, $t_2 = 0,5$ ч. Имплантация производилась через маску из никелевой фольги с отверстием диаметром 14 мм в центре пластины. Последующее формирование омического контакта n^+n -типа на тыльной стороне пластины производилось имплантацией ионов P^+ ($E = 60$ кэВ, $\Phi = 6 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$) и последующим отжигом при $T = 900$ °С и $t = 0,5$ ч. При этих режимах ионной имплантации (ИИ) и отжига происходит также эффективное геттерирование объема кристалла.

После изготовления p^+np^+ -структур последовательно производились следующие обработки периферии p^+-n -переходов:

П1: имплантация ионов N_2^+ ($E = 100$ кэВ, $\Phi = 10^{16}$ см $^{-2}$, см. рис. 1, б);

П2: меза-травление в буферном травителе на глубину 20—30 мкм с защитой центральной части p^+ -слоя пленкой ХСП (см. рис. 1, в);

П3: имплантация ионов Ag^+ ($E = 100$ кэВ, $\Phi = 10^{16}$ см $^{-2}$, см. рис. 1, г);

П4: имплантация ионов N_2^+ ($E = 100$ кэВ, $\Phi = 6 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$, см. рис. 1, д).

При имплантации в режимах обработок П1, П3 и П4 маской, защищающей центральную часть площади p^+-n -перехода, была приклеена никелевая фольга толщиной 0,2 мм. При этом обрабатываемая поверхность включает кольцевую область p^+ -типа шириной 1 мм, примыкающую к планарной границе p^+-n -переходов, и всю n -область, вплоть до краев пластины. Имплантация производилась на установке "Везувий-5", причем в случае формирования p^+-n -переходов образцы находились на вращающемся барабане (квазиимпульсный режим имплантации), а при обработках периферии барабан был неподвижен.

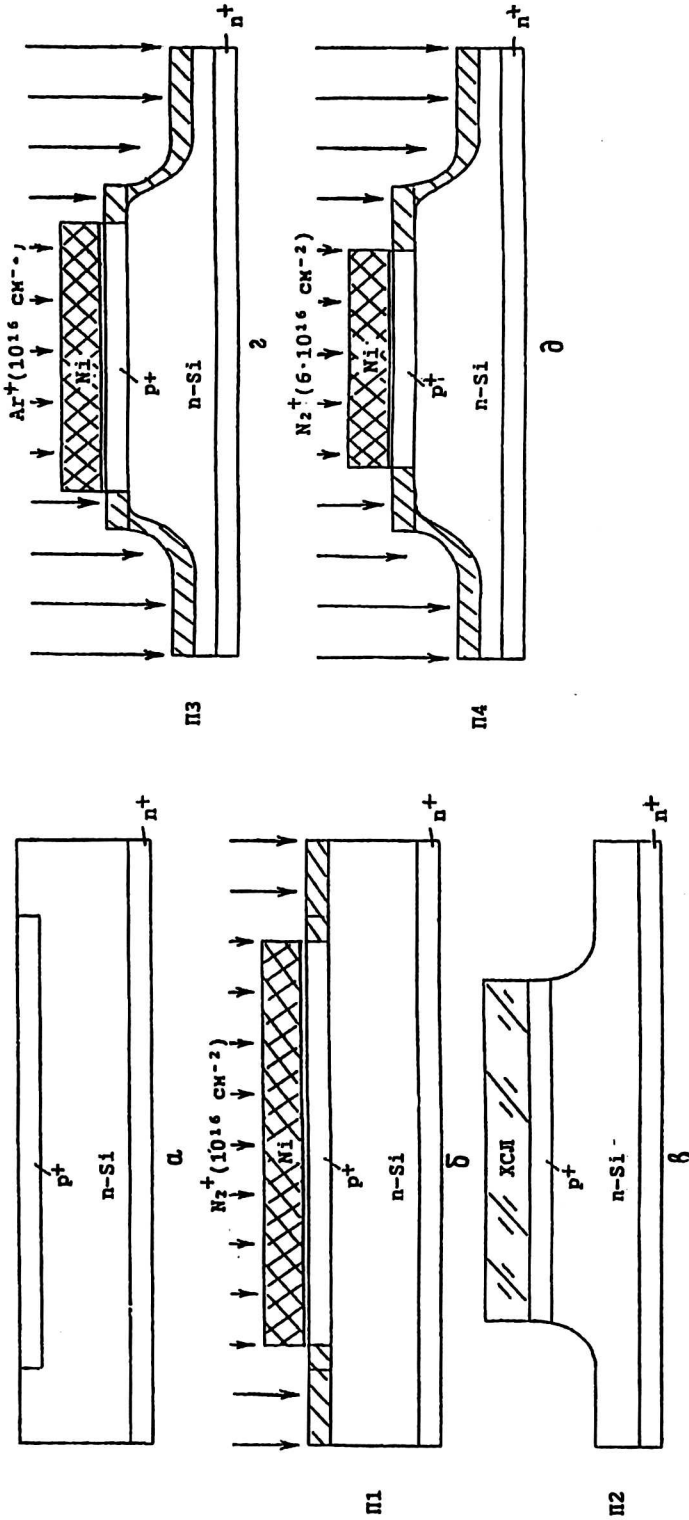


Рис. 1. Исходные p⁺ и последовательные обработки периферии p⁺-n-перехода (б-д)

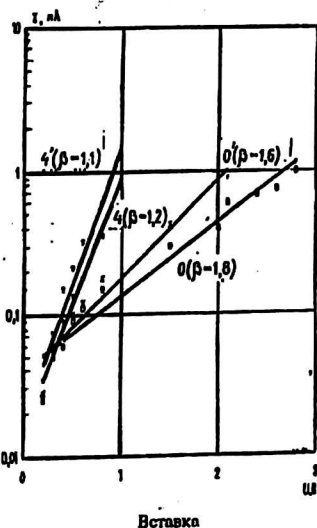
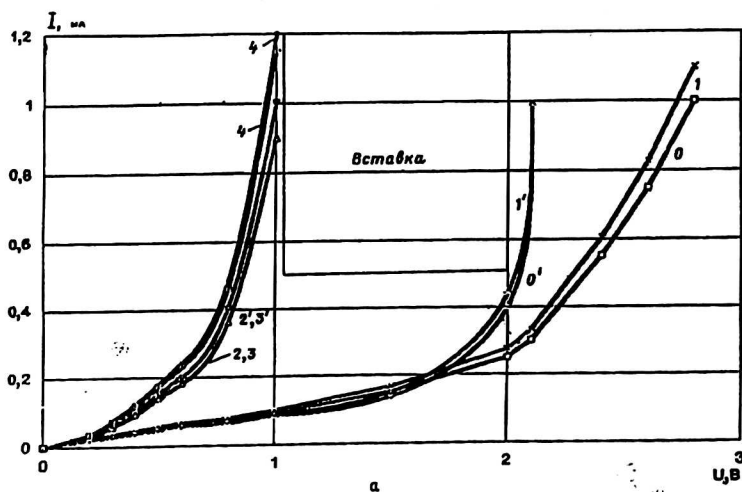
Изготовление исходных приборных структур и обработка периферии $p^+ - n$ -переходов сопровождалась измерением темновых прямых и обратных ветвей ВАХ, а также времени жизни неосновных носителей заряда в базе по переходным характеристикам диодов [4].

В качестве контрольных образцов использовались планарные диффузионные диоды также со структурой p^+nn^+ -типа, с диаметром фоточувствительных площадок (ФЧП) 9,35 мм, получаемые в условиях производства ОАО «Московский завод «Сапфир»».

Экспериментальные результаты

Анализ всего набора полученных ВАХ для обоих режимов имплантации при формировании $p^+ - n$ -переходов показал, что для режима 1 (имплантация только ионов BF_2^+ с энергией 100 кэВ) характерны существенно худшие как прямые, так и обратные ВАХ исходных p^+nn^+ -структур, чем для режима 2.

Обработка периферии таких структур фактически не приводила к улучшению их ВАХ, обратные токи которых почти на порядок величины превышали токи исходных структур, полученных в режиме 2. Учитывая это, далее представлены ВАХ только структур, изготовленных в режиме 2. Прямые и обратные ветви ВАХ таких структур до и после всех обработок периферии для обеих величин удельного сопротивления кристаллов представлены на рис. 2. Из данных рис. 2 следует, что исходные ВАХ- и прямые ветви и обратные существенно отличаются от ВАХ, определяемых теорией Шокли-Нойса-Саа [5]: прямая ветвь имеет существенно завышенные напряжения отсечки (~ 2 В) и коэффициент неидеальности $\beta \sim (1,6 - 1,8)$ в зависимости от вида $j = j_0 \exp(eU/\beta kT)$, а обратная ветвь аппроксимируется зависимостью $I \sim U^n$, где $n = 1,3$.



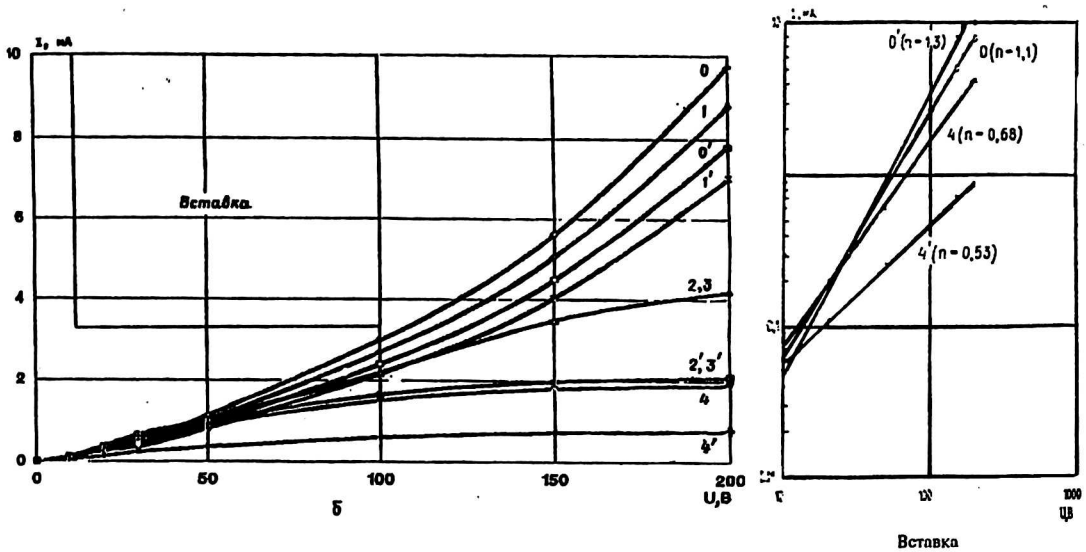


Рис. 2. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ ионно-легированных p^+np^+ -структур до и после обработки периферии:

0, 1, 2, 3, 4 — $\rho_{\text{исх}} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; 0', 1', 2', 3', 4' — $\rho_{\text{исх}} = 130 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; 0, 0' — исходные; 1, 1' — новые обработки П1; 2, 2' — после обработки П2; 3, 3' — после обработки П3; 4, 4' — после обработки П4

Первая обработка периферии p^+n -перехода (ионы N_2^+ с дозой 10^{16} см^{-2}) приводит лишь к незначительному улучшению обеих ветвей ВАХ (напряжение отсечки $\sim 1,8\text{--}1,9 \text{ В}$; $\beta \sim 1,5\text{--}1,6$; $n \sim 1,15$). Последующее меза-травление (обработка П2) имеет результатом качественное улучшение прямой ветви (напряжение отсечки составляет $\sim 0,7 \text{ В}$, а $\beta \sim 1,3$), двухкратное уменьшение величин обратных токов при $U_{\text{обр}} = 200 \text{ В}$ и уменьшение величины n до 0,78. Обработка поверхности меза-структуры ионами Ag^+ ($\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$) не приводит к заметным изменениям обеих ветвей ВАХ, а последующая обработка поверхности ионами N_2^+ с повышенной дозой имплантации ($6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) сдвигает обе ветви ВАХ дальше в сторону "идеальных": напряжение отсечки уменьшается до $\sim 0,65 \text{ В}$, β — до $\sim 1,12$, а обратные токи при $U_{\text{обр}} = 200 \text{ В}$ уменьшаются еще более чем в два раза, и при этом величина n (0,53) становится почти равной теоретической. Следует подчеркнуть, что в тексте мы указали значения характерных параметров ВАХ для случая применения исходного кремния с удельным сопротивлением $\rho = 130 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Для более низкоомного кремния значения всех параметров были несколько худшими, что следует из данных рис. 2, б, из которого, в частности, видно, что величина темновых токов в этом случае вдвое больше.

На рис. 3 для выборки из пяти партий по десять диодных ИЛ и диффузионных p^+np^+ -структур представлены семейства обратных ветвей ВАХ, приведенные к единой площади. Из этих данных следует, что лучшие ИЛ p^+np^+ -структуры уступают лучшим диффузионным структурам по уровню

темновых токов, причем преимущество диффузионных структур возрастает при увеличении напряжения. Характерные значения превышения величин темновых токов ИЛ-структур относительно лучших диффузионных возрастают от двух- до пятикратного при увеличении напряжения от 50 до 200 В. При напряжении в пределах 25 В (наибольшее обратное напряжение, в пределах которого лимитированы обратные токи для всех серийно выпускаемых фотодиодов) отличие является незначительным (20—50 %). При этом следует отметить, что разброс значений темновых токов во всех партиях ниже в случае ИЛ-структур. Время жизни неосновных носителей заряда (дырок) в базе диффузионных структур составляет ~ 6—8 мкс, а в ИЛ-структурах ~ 1—2 мкс и ~ 15—20 мкс — для $\rho_{исх} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и $\rho_{исх} = 130 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, соответственно.

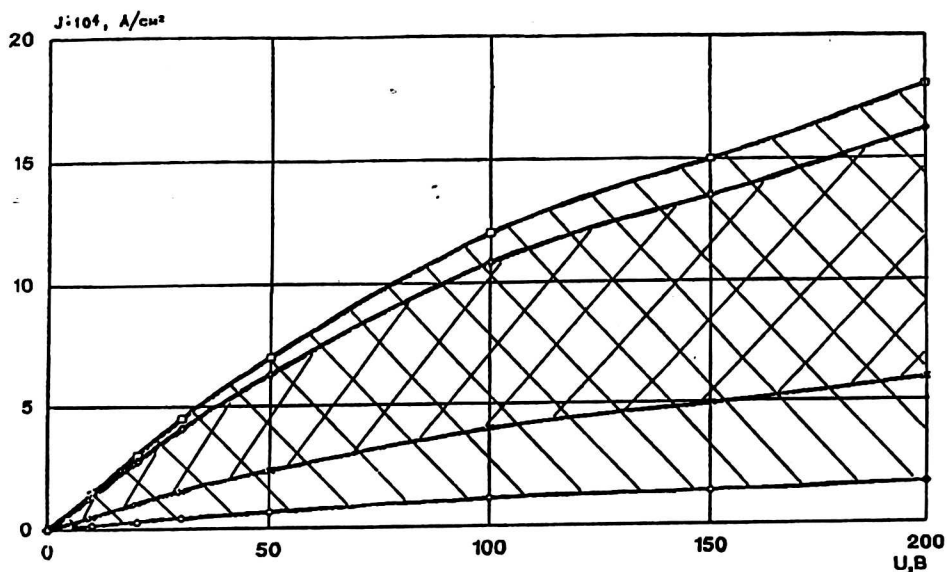


Рис. 3. Семейства обратных ветвей ВАХ ионно-легированных и диффузионных p^+np^+ -структур:
 ▨ — ИЛ-структуры; ▩ — диффузионные структуры

Обсуждение результатов

Совокупность представленных данных позволяет предложить следующее их объяснение.

Применявшаяся обработка поверхности исходных пластин (ХМП и ХДП на глубину 50 мкм) имеет следствием высокую скорость поверхностной рекомбинации (генерации). Поэтому в случае более мелких p^+n -переходов (0,2 мкм), получаемых имплантацией только ионов BF_2^+ с энергией 100 кэВ, когда ионы B^+ имеют энергию только 20 кэВ (режим 1), поверхность достаточно эффективно влияет на металлургическую границу p^+n -перехода, увеличивая и прямое падение, и обратные токи. Заглубление p^+n -перехода до 0,6 мкм при переходе к режиму 2, когда энергия ионов бора составляет 100 кэВ, позволяет в значительной мере уменьшить это влияние, оставляя его только в области планарной границы p^+ -области. Поэтому p^+np^+ -структуры, полученные в режиме 1, существенно уступают структурам, полученным в режиме 2.

Та же причина — повышенная скорость поверхностной рекомбинации (генерации) — не позволяет с помощью имплантации ионов N_2^+ с дозой 10^{16} см^{-2} произвести качественное улучшение ВАХ за счет уменьшения влия-

ния поверхности вблизи планарной границы p^+ -области. Это достигается лишь применением меза-травления на глубину ~ 20 мкм, когда стравливаются остатки поверхностного слоя, нарушенного при обработках пластин. К дальнейшему улучшению ВАХ и приведению их почти в соответствие с теорией приводит последующая имплантация повышенной дозы ($6 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$) ионов N_2^+ . По-видимому, в этом случае формируется поверхностный слой, насыщенный дефектами в такой мере, что они почти полностью экранируют влияние поверхности на периферии $p^+ - n$ -перехода.

Проведенное обсуждение результатов работы приводит к выводу о необходимости усовершенствования обработки поверхности исходных пластин для того, чтобы обеспечить наилучшие ВАХ при применении ионной имплантации. К таким усовершенствованиям могут относиться отказ от ХМП перед ХДП в соответствии с результатами работы [6], а также увеличение съема при ХДП от 50 до 70–80 мкм с каждой или, возможно, только с той стороны пластины, на которой будет формироваться $p^+ - n$ -переход. Улучшение качества обработки поверхности позволит отказаться от меза-травления и за счет этого более эффективно и при меньших дозах имплантации устранять влияние поверхности на периферии p^+ -области, чем в нашем случае обработки П-4, когда ионы внедрялись “под углом” к поверхности мезы, и глубина их проникновения существенно меньше, чем при внедрении “по нормали”, когда меза отсутствует.

Разница в результатах, полученных на кремнии с $\rho = 20$ Ом-см и $\rho = 130$ Ом-см, соответствует многим опубликованным результатам и объясняется более активным дефектообразованием при большей концентрации исходной примеси в кристалле, что находится в соответствии со значениями времени жизни носителей заряда в базе диодных структур, полученными в нашей работе.

Выводы

1. Полученные результаты свидетельствуют об определяющем влиянии качества обработки поверхности исходных пластин кремния на ВАХ планарных диодных ионно-легированных p^+nn^+ -структур.

2. Лучшие ВАХ ионно-легированных p^+nn^+ -структур и более высокие значения времени жизни носителей заряда в базе этих структур получены при использовании более высокоомных исходных кристаллов.

3. При оптимальных глубине залегания $p^+ - n$ -перехода и качестве обработки поверхности исходных пластин имплантация периферии планарного $p^+ - n$ -перехода ионами N_2^+ с энергией 100 кэВ и дозой выше 10^{16} см $^{-2}$ является эффективным средством устранения влияния поверхности на ВАХ p^+nn^+ -структур.

Литература

1. Астахов В. П., Дроздов Ю. Н., Карашев Т. Б., Рубцов В. А., Стоянова И. Г. Свойства pn -диодов, изготовленных внедрением ионов с изменяющейся энергией//Электронная техника. Сер. 7. 1980. Вып. 3(150). С. 52–54.
2. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Сорокин К. В. О возможности применения ионной имплантации при производстве pin -фотодиодов на кремнии//Прикладная физика. 1999. № 6. С. 94.
3. Бобилева И. Г. и др. Особенности легирования кремния ионами B^+ и BF_2^+ //Электронная техника. Сер. 2. 1981. Вып. 2(145).
4. Носов Ю. Р. Физические основы работы полупроводникового диода в импульсном режиме. — М.: Наука, 1968. — 254 с.

5. Шокли В., Нойс Р., Саа К. Проблемы кремниевых $p-n$ -переходов//Успехи физических наук. 1962. Т. 77. Вып. 3. С. 327—341.

6. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Перевоицков В. А. О влиянии обработки поверхности исходных пластин кремния на характеристики ионно-легированных слоев и $p-n$ -переходов//Вестник Нижегородского ун-та. Сер. Физика твердого тела. 1998. Вып. 2. С. 10—16.

Ion-doped diode structures on n-silicon, produced in serial manufacture conditions

*V. P. Astakhov, D. A. Gindin, E. F. Karpenko, V. V. Karpov,
T. M. Sokolova, K. V. Sorokin*

Joint-Stoc Company «Moscovsky Zavod "Sapfir"», Russia

There is presented investigation results of planar ion-doped p^+nn^+ -structures on n-silicon with different doped level forward and reverse volt-ampere characteristics (VAC). It is showed, that for such structures definite influence to VAC render quality initial slace surface cultivation, and implantation of planar p^+-n junctions periphery N_2^+ ions is the effective means for removal of the surfase influence to VAC, approaching and forward and reverse branches to "ideal". By it ion-doped structures VAC becomes according to VAC of diffusion analogs, producing in conditions of JSC «Moscovsky Zavod "Sapfir"» manufacture.