

УДК 621.384.3

Результаты ионных обработок поверхности при изготовлении *pin*-фотодиодов на кремнии

В. П. Астахов, И. А. Болесов, Е. Ф. Карпенко, В. В. Карпов,
П. И. Лапин, К. В. Сорокин, Н. В. Филипенко
ОАО «Московский завод "Сапфир"», Москва, Россия

*Исследовано влияние имплантационной обработки периферии n^+ - p -переходов на обратные ветви ВАХ квадрантных δ -площадочных *pin*-фотодиодов (ФД) с охранным кольцом ионами азота после удаления пленки SiO_2 , имплантационного подлегирования бором и мезатравления. Показано, что наилучший результат соответствует случаю обработки ионами азота после подлегирования поверхности p -областей.*

Одной из главных задач при производстве кремниевых *pin*-ФД является минимизация величины темнового тока при рабочем напряжении. Величина темнового тока *pin*-ФД на основе высокоомного кремния p -типа проводимости определяется поверхностной утечкой, степень влияния которой на фотоэлектрические параметры ФД решающим образом зависит от свойств границы раздела $Si-SiO_2$.

Существующие методы защиты поверхности планарных p - n -переходов предусматривают проведение определенных технологических процессов в ходе изготовления приборных структур и не позволяют улучшить электрические параметры уже сформированных приборов.

Такую возможность предоставляет ионная имплантация, положительное влияние которой

на параметры полупроводниковых приборов описано в ряде работ, например для ионов N^+ и O^+ [1, 2], N_2^+ и Ar^+ [3–8] и H^+ [9]. В работах [7–10] показано, что положительный эффект от такой имплантации обусловлен образованием поверхностного изолирующего дефектного слоя вокруг p - n -переходов.

Большой практический интерес представляет также изучение эффективности имплантации дефектообразующих ионов в области кристаллов с различными уровнями легирования и особенностей взаимодействия легирующей примеси и дефектов, индуцированных имплантацией, а также сравнение результатов имплантации при использовании других методов изоляции p - n -переходов, например с помощью формирования мезаструктур.

В связи с этим в данной работе поставлена задача на приборных структурах с охранным кольцом (ОК), традиционно используемым в *pin*-ФД, определить возможность обеспечить стабильную защиту диффузионных планарных n^+ - p -переходов на основе высокоомного кремния с различным уровнем легирования поверхности за счет имплантации ионами N_2^+ периферии n^+ - p -переходов с захватом их планарной границы.

Методика эксперимента

Исследуемые образцы представляют собой диффузионные планарные структуры 8-площадочных *pin*-ФД на пластинах кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 10\ 800 - 13\ 400$ Ом·см. Подготовка поверхности пластин осуществлялась по следующей технологии: резка слитков, шлифовка корундовыми абразивами М14 и М10, а затем химико-механическая и химико-динамическая полировки. Окисление осуществлялось в стандартном режиме: при $T = 1150$ °С 30 мин (сухой O_2) — 60 мин (влажный O_2) — 30 мин (сухой O_2) до толщины 0,52 мкм. n^+ - p -переходы формировались диффузией фосфора из планарного источника (загонка и разгонка в окислительной атмосфере) толщина окисла после разгонки — 0,2 мкм, а геттерирование осуществлялось загонкой бора в тыльную сторону пластины.

Имплантации ионов N_2^+ подвергались поверхность всех p -областей, границы всех n^+ - p -переходов и прилегающие к границам n^+ -области шириной 20 мкм.

Импантируемая поверхность подготавливалась по трем вариантам:

1. Стравили слой SiO_2 .
2. После стравливания SiO_2 производилось подлегирование поверхности имплантацией ионов B^+ ($E = 100$ кэВ, $\Phi = 6 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$) и отжигом ($T_1 = 600$ °С, $t_1 = 30$ мин и $T_2 = 900$ °С, $t_2 = 60$ мин).
3. Проводилось мезатравление на глубину ~5 мкм.

Маской при имплантации ионов N_2^+ служила пленка алюминия толщиной ~1 мкм, нанесенная на SiO_2 (рис. 1).

Имплантация ионов N_2^+ проводилась двумя ступенями в одинаковых режимах: $E = 100$ кэВ, $\Phi = 6 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$.

После формирования исходных структур и каждой ступени имплантации ионов N_2^+ измерялись обратные ветви ВАХ n^+ - p -переходов как с подключением ОК, так и без него, а также ВАХ самих ОК.

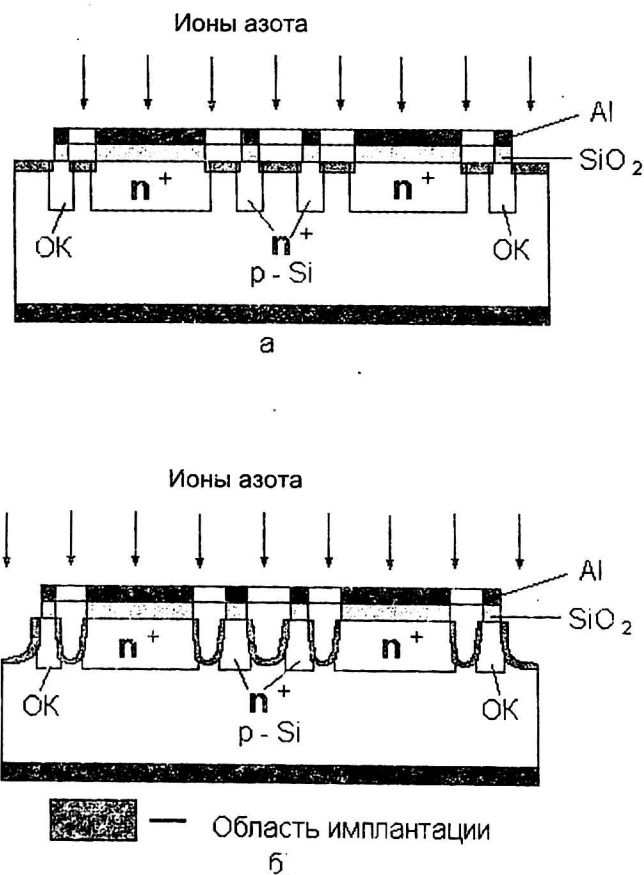


Рис. 1. Топология исследуемых образцов: а — имплантация ионов N_2^+ 1-го и 3-го вариантов образцов; б — имплантация ионов N_2^+ 3-го варианта образцов

Результаты эксперимента

Для исследуемых образцов всех трех вариантов подготовки поверхности после имплантации ионов N_2^+ наблюдается снижение темновых токов.

Для образцов варианта 1 уменьшение величин темновых токов, измеренных с ОК, при рабочем напряжении $U = 200$ В, находится в пределах от 5 раз до 2 порядков величины (таблица). Следует отметить, что этот результат достигается при первой имплантации ионов N_2^+ , в то время как повторная имплантация практически ничего не изменяет. При этом снижение темновых токов площадок, измеренных без ОК, не превышает двух раз, а тока самого ОК — не более чем на 15 % (рис. 2). Для примерно 40 % образцов данного типа имплантация ионов азота вообще не дала положительного результата.

Величины темновых токов исследуемых образцов, измеренных с ОК

| Параметр | I, мкА | | | | | | | | |
|--|---|-------|-------|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| | Вариант 1 (Имплантация ионов азота после травливания SiO ₂) | | | | | | | | |
| Стадия | Исходная | | | 1-я имплантация | | | 2-я имплантация | | |
| U _{обр.} , В | 50 | 100 | 200 | 50 | 100 | 200 | 50 | 100 | 200 |
| Б. п. | 3,8 | 8,9 | 24,0 | 0,07 | 0,1 | 0,35 | 0,07 | 0,1 | 0,25 |
| М. п. | 3,71 | 8,97 | 27,0 | 0,05 | 0,07 | 0,22 | 0,05 | 0,07 | 0,25 |
| ОК | 116,8 | 236,5 | 479,0 | 116,5 | 233,8 | 468,0 | 95,5 | 201,2 | 428,0 |
| Вариант 2 (Имплантация ионов азота после подлегирования) | | | | | | | | | |
| Стадия | Исходная | | | 1-я имплантация | | | 2-я имплантация | | |
| U _{обр.} , В | 50 | 100 | 200 | 50 | 100 | 200 | 50 | 100 | 200 |
| Б. п. | 4,8 | 18,2 | 68,0 | 0,17 | 0,35 | 0,75 | 0,07 | 0,19 | 0,35 |
| М. п. | 3,5 | 12,0 | 40,0 | 0,014 | 0,025 | 0,1 | 0,013 | 0,023 | 0,075 |
| ОК | 39,3 | 127 | 336,0 | 41,8 | 106,5 | 301,8 | 63,2 | 131,5 | 288,5 |
| Вариант 3 (Имплантация ионов азота после мезатравления) | | | | | | | | | |
| Стадия | Исходная | | | Мезатравление | | | Имплантация | | |
| U _{обр.} , В | 50 | 100 | 200 | 50 | 100 | 200 | 50 | 100 | 200 |
| Б. п. | 1,03 | 3,8 | 7,0 | 0,39 | 0,69 | 1,17 | 0,088 | 0,26 | 0,54 |
| М. п. | 1,28 | 3,72 | 8,3 | 0,12 | 0,19 | 0,28 | 0,058 | 0,071 | 0,17 |
| ОК | 48,1 | 97,5 | 196,6 | 42,3 | 86,6 | 173,2 | 118,0 | 238,0 | 478,0 |

Примечание: Б. п. — большие площадки; М. п. — малые площадки.

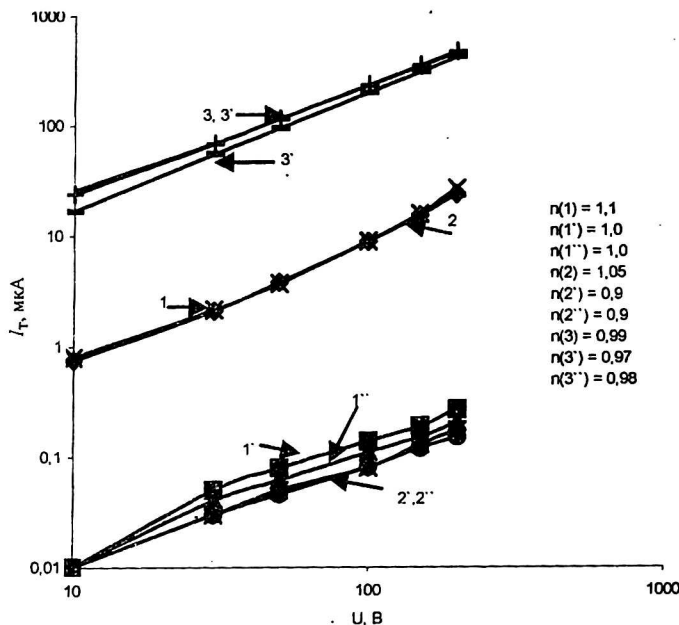


Рис. 2. ВАХ образцов, обработанных по варианту 1: 1, 1', 1'' — большие площадки, измерения с ОК; 2, 2', 2'' — малые площадки, измерения с ОК; 3, 3', 3'' — охранный кольцо; 1, 2, 3 — исходные образцы; 1', 2', 3' — после первой имплантации N₂⁺; 1'', 2'', 3'' — после второй имплантации N₂⁺

Для образцов варианта 2 характерно значительное снижение (до 2 порядков величины) темновых токов площадок, измеренных с ОК, в результате первой имплантации ионов N₂⁺. Повторная имплантация не приводит к значительному положительному результату для малых площадок, но приблизительно вдвое уменьшает ток больших площадок (см. таблицу). Следует отметить также наличие более полного разделения больших и малых площадок, т. е. более значительную разницу между характерными для них величинами темновых токов, измеренных с

ОК, по сравнению с образцами варианта 1. При этом наблюдается также снижение величин темнового тока площадок, измеренных без ОК и самого ОК (рис. 3).

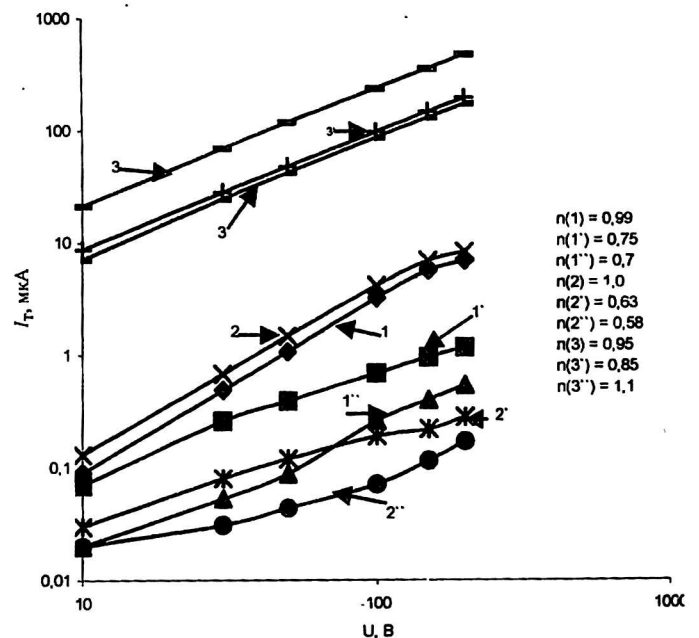


Рис. 3. ВАХ образцов, обработанных по варианту 2: 1, 1', 1'' — большие площадки, измерения с ОК; 2, 2', 2'' — малые площадки, измерения с ОК; 3, 3', 3'' — охранный кольцо; 1, 2, 3 — исходные образцы; 1', 2', 3' — после первой имплантации N₂⁺; 1'', 2'', 3'' — после повторной имплантации N₂⁺

Кроме того, после имплантации ионов N₂⁺ наблюдается увеличение пробивного напряжения по сравнению с величиной, характерной для этих образцов после подлегирования поверхности p-области.

В результате формирования мезаструктуры (вариант 3) наблюдается снижение темновых

токов площадок, измеренных с ОК и без ОК, а также самого ОК с одновременным разделением малых и больших площадок. Для больших площадок величины темновых токов, измеренных с ОК, снизились в 7 раз, а для малых площадок — более чем на порядок величины (рис. 4). Имплантация ионов N_2^+ по поверхности мезоструктуры приводит к дальнейшему снижению темновых токов, измеренных с ОК, при одновременном увеличении темновых токов, измеренных без ОК и самого ОК (см. таблицу).

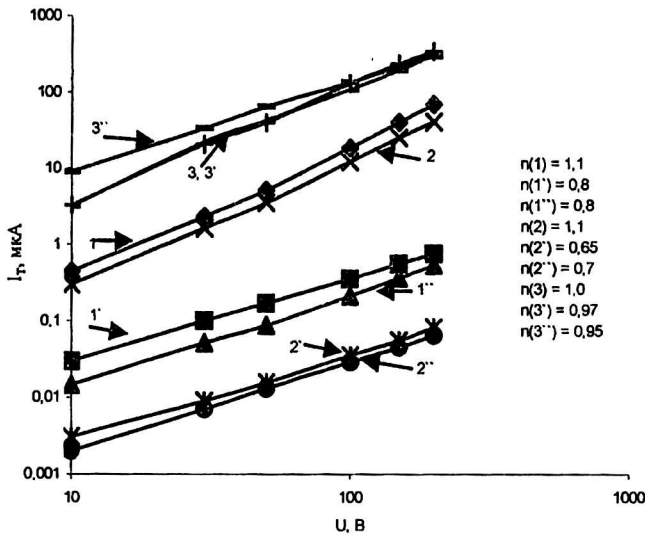


Рис. 4. ВАХ образцов, обработанных по варианту 3: 1, 1', 1'' — большие площадки, измерения с ОК; 2, 2', 2'' — малые площадки, измерения с ОК; 3, 3', 3'' — охранный кольцо; 1, 2, 3 — исходные образцы; 1', 2', 3' — после мезатравления; 1'', 2'', 3'' — после имплантации N_2^+

Сравнение данных, полученных для всех трех вариантов поверхности, показывает, что минимальные величины плотностей темновых токов, измеренных с ОК, достигнуты при имплантации ионов N_2^+ образцов варианта 2. Величины плотностей темновых токов образцов, обработанных по первому и третьему вариантам практически не отличаются (рис. 5). При этом для всех 3 вариантов обработки плотности токов больших площадок заметно ниже, чем для малых площадок. Наименьшая разница в плотностях тока больших и малых площадок имеет место в случае варианта 2.

Обсуждение результатов

Представленные на рис. 2—5 и в таблице результаты свидетельствуют о том, что ионная обработка периферии n^+ - p -переходов приборных структур pin -ФД в 5—100 раз может уменьшить обратные токи, измеренные с ОК, и при этом токи самого ОК, как и токи площадок,

измеренных без ОК, уменьшаются незначительно — на 15—50 %. Для всех трех вариантов обработки характерно также, что в большей мере уменьшаются токи малых площадок, чем больших. Это свидетельствует о том, что в результате обработок уменьшается именно поверхностная составляющая обратных токов, т. е. уменьшаются токи поверхностной утечки, поскольку для малых площадок отношение площади к периметру существенно меньше, чем для больших площадок. Положительное влияние ионной обработки на поверхностные утечки подтверждается их соответствием результатам мезатравления (см. данные рис. 2 и 4).

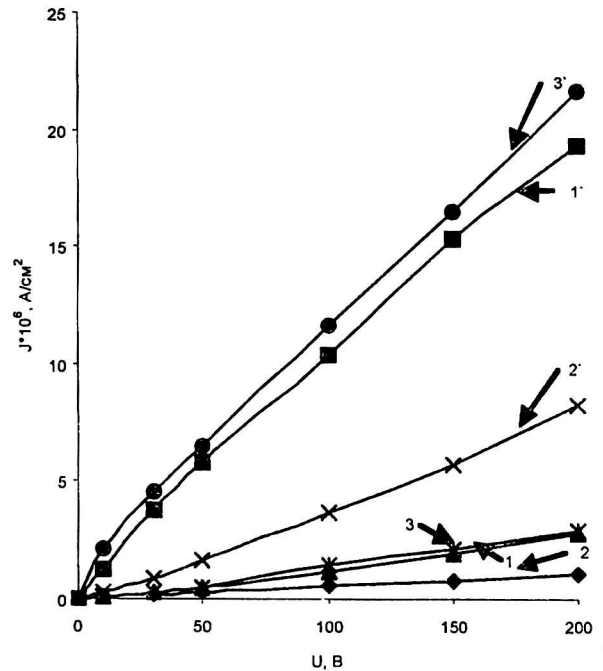


Рис. 5. Результирующие ВАХ исследуемых образцов, приведенные к единице площади n^+ - p -переходов, для трех вариантов обработки поверхности: 1, 2, 3 — большие площадки; 1', 2', 3' — малые площадки; 1, 1' — вариант 1; 2, 2' — вариант 2; 3, 3' — вариант 3

Данные рис. 5 свидетельствуют о том, что все проведенные поверхностные обработки не полностью устраняют поверхностные утечки, поскольку плотности обратных токов малых площадок заметно превышают плотности обратных токов больших площадок.

Следует подчеркнуть, что наилучшие результаты имплантационной обработки — наименьшие значения токов площадок и наибольшее соответствие плотностей токов больших и малых площадок — получено при предварительном имплантационном подлегировании бором поверхностного слоя толщиной $\sim 0,8$ мкм до концентрации около 10^{18} см $^{-3}$.

Из данных рис. 2—4 следует, что все полученные ВАХ аппроксимируются степенной зависимостью вида $I \sim U^n$, причем величина n исходных образцов составляет ~ 1 , что характерно для преобладания поверхностной утечки. При обработке по варианту 1 величина n снижается незначительно только для малых площадок (до 0,9), не изменяясь для больших площадок. Для вариантов 2 и 3 в результате ионной обработки и мезатравления значения n уменьшаются более заметно, однако остается та же закономерность: для малых площадок уменьшение более значительное (до 0,58—0,65), чем для больших (до 0,7—0,8).

Следует отметить, что для ОК величина n в случае варианта 1 не становится меньше 1 в результате ионной обработки, в то время как у вариантов 2 и 3 они достигают значений 0,95 и 0,85, соответственно.

Таким образом, данные по величинам n также подтверждают уменьшение поверхностной составляющей тока в результате мезатравления или ионной обработки.

Характерными чертами ионной обработки также являются:

слабое влияние повторной имплантации;

уменьшение тока мезаструктур, измеренных с ОК и сопутствующее этому увеличение тока самого ОК (см. таблицу).

Последний факт не поддается объяснению, а остальные экспериментальные данные находятся в соответствии со следующей интерпретацией. При имплантации ионов N_2^+ с выбранной энергией и дозой приповерхностный слой насыщается дефектами, повышающими удельное сопротивление этого слоя и увеличивающими сопротивление поверхностного канала. В результате уменьшаются темновые токи и ОК и площадок, измеренных с ОК.

Повторная имплантация фактически не изменяет свойства дефектного слоя и его толщину. По-видимому, эффективность дефектообразования и толщина дефектного слоя в большей мере зависят от уровня легирования приповерхностной области и они возрастают по мере увеличения уровня легирования. Этим и объясняется наибольшая эффективность ионной обработки в случае предварительного имплантационного подлегирования.

Этот результат находится в соответствии с ранее выясненным фактом необходимости соответствия толщины дефектного защитного слоя и глубины залегания p - n -перехода и он свидетельствует о необходимости поиска путей обеспечения более глубокого проникновения

дефектов при имплантационной поверхностной обработке.

Выводы

1. Обработка периферии диффузионных планарных n^+ - p -переходов квадрантных 8-площадочных pin -фотодиодов с охранным кольцом с помощью имплантации ионов N_2^+ с энергией 100 кэВ и дозой 10^4 мкКл/см² позволяет в существенной мере (в 5—100 раз) снизить обратные токи легированных площадок, измеренных с ОК, за счет формирования поверхностного дефектного слоя, уменьшающего поверхностную составляющую обратного тока площадок.

2. Эффективность выбранной поверхностной обработки повышается при предварительном имплантационном подлегировании поверхности кристалла бором.

3. Используемые режимы ионной обработки не позволяют полностью устранить поверхностную составляющую обратных токов. По-видимому, требуется поиск путей повышения глубины проникновения дефектов при ионной имплантации до уровня глубины залегания n^+ - p -перехода.

Литература

1. Астахов В. П., Дроздов Ю. Н., Карашев Т. Б., Рубцов В. А., Стоянова И. Г. Свойства pin -диодов, изготовленных внедрением ионов с изменяющейся энергией// Электронная техника. 1980. Сер. 7. Вып. 3 (150).
2. Спинелли П. Измерение профилей распределенного сопротивления заглубленных изолирующих слоев, синтезированных с помощью высокодозовой имплантации ионов азота или кислорода// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1985. V. B10/11. № 1. P. 501—505.
3. Морго-Комтеро А. Локальное управление временем жизни при имплантации аргона в кремний// Defects of Silicon Symposium, San Francisco. 1983. P. 595—603.
4. Буржест П., Дупарт М. Внедрение азота большими дозами в монокристаллический кремний// Revue de physique appliquee. 1980. № 15. P. 647—652.
5. Чу Т. У., Олдгам В. Г. Низкоэнергетическая имплантация азота и аммиака в кремний// International Conference of Ion Implantation: Equipment and Technology. 1983. Berlin. P. 465—472.
6. Аброян И. А., Никулина Л. М. Молекулярный эффект имплантации легких ионов в полупроводники// Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. Вып. 10. С. 1164—1167.
7. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карнов В. В., Сорокин К. В. О возможности применения ионной имплантации при производстве pin -фотодиодов на кремнии// Прикладная физика. 1999. № 6. С. 94—104.
8. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпенко Е. Ф., Карнов В. В., Сорокин К. В. Ионно-легированные диодные структуры на основе n -кремния, изготовленные в условиях серийного производства// Там же. 2000. № 3. С. 115—122.

9. Астахов В. П., Карпов В. В., Кузнецов Н. В., Сорокин К. В. О причинах изменения ВАХ *pin*-фотодиодов на кремнии при протонной обработке// Прикладная физика. 2000. № 1. С. 30—36.

10. Струков Ф. В., Астахов В. П., Борискина Л. В. Геттерирующая активность дефектов имплантационного происхождения в кремнии// Поверхность. Физика, Химия, Механика. 1989. № 6. С. 92—99.

Results of surface ion processing in production of silicon *pin*-photodiodes

V. P. Astakhov, I. A. Bolesov, E. F. Karpenko, V. V. Karpov, P. I. Lapin,
K. V. Sorokin, N. V. Filippenko
Joint Stock Company «Moscow Plant "Sapphire"», Moscow, Russia

*In this work the n^+ - p -junctions periphery treatment influence of nitrogen molecular ions implantant on δ -quadrant *pin*-photodiodes with a guard ring volt-current characteristics is investigated. The implantant treatment carried out after removal of a film SiO_2 or boron doping by implantation, or mesa-etching. It is shown, that the best reverse volt-current characteristics corresponds to the case of treatment by nitrogen ions after p -areas surface doping.*

* * *