

УДК 621.383.52:546.682

## О причинах изменения ВАХ $pin$ -фотодиодов на кремнии при протонной обработке

В. П. Астахов, Д. А. Гиндин, В. В. Карпов, Н. В. Кузнецов,  
И. Г. Сахарова, И. С. Смирнов, Г. Г. Соловьев, К. В. Сорокин  
ОАО «Московский завод «Сапфир»», Москва, Россия

*Представлены результаты комплексного изучения влияния протонного облучения в двух режимах и температуры последующего отжига на обратную ветвь ВАХ  $pin$ -фотодиодов на основе высокоомного  $p$ -Si (облучалась периферия планарных  $n^+ - p$ -переходов), а также на профили распределения удельного сопротивления, толщину дефектного слоя и среднюю относительную деформацию кристаллической решетки вблизи поверхности кристаллов. Обнаружено формирование дефектного слоя с компенсированной проводимостью в области пробега протонов непосредственно после облучения, а также после отжига при температурах до 200 °С включительно. После отжига при температуре 250–300 °С удельное сопротивление этого слоя падает ниже исходного значения, а под ним образуется компенсированная область. Отжиг при более высоких температурах восстанавливает свойства исходного кристалла. На основе этих данных расширена интерпретация результатов работы.*

Важнейшей проблемой при производстве  $pin$ -фотодиодов (ФД) на основе высокоомного кремния является устранение поверхностных токов, увеличивающих темновой ток фоточувствительных площадок (ФЧП). Наличие таких токов, обусловленных либо инверсионными поверхностными каналами, либо повышенной скоростью поверхностной рекомбинации, либо обоими этими факторами, ухудшает пороговые характеристики  $pin$ -ФД. Традиционно применяемый для снижения уровня темновых токов ФЧП топологический прием — охранный кольцо (ОК), которое представляет собой дополнительный обратносмещенный  $p-n$ -переход, расположенный вокруг ФЧП, часто не позволяет разрешить данную проблему.

Снижения уровня поверхностных токов можно добиться путем введения компенсирующих дефектов в приповерхностную область периферии планарных  $p-n$ -переходов либо имплантацией ионов  $Ag^+$ ,  $N^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O^+$ ,  $O_2^+$  [1–3], либо протонной обработкой [4–7]. Наиболее перспективна именно протонная обработка за счет большей глубины их проникновения, что позволяет формировать дефектные слои в кристалле при наличии поверхностной защитной пленки. Таким образом, могут быть уменьшены поверхностные токи в полностью изготовленных приборных структурах, не соответствующих требованию по уровню темнового тока.

Эта возможность продемонстрирована в работе [7], где на основе измерения удельного сопротивления облученных слоев было сделано заключение о том, что снижение темнового тока  $pin$ -ФД при протонном облучении вызвано повышением удельного сопротивления исходного кремния. Однако наибольший положительный эффект наблюдался в структурах, отожженных при температурах 250–300 °С [7] (этот факт не нашел объяснения в этой работе из-за недостатка экспериментальных данных).

Для восполнения этого пробела в данной работе поставлен комплексный эксперимент по изучению влияния протонного облучения и температуры последующего отжига на темновой ток ФЧП и ОК диффузионных планарных *pin*-ФД на основе *p*-Si ( $\rho \sim 20$  кОм·см) при облучении периферий *p-n*-переходов, а также на профиль удельного сопротивления (на образцах *p*-Si) и эффективную толщину ( $L_{эф}$ ) и величину средней относительной деформации кристаллической решетки дефектного слоя ( $\Delta d/d$ ) на пластинах-спутниках *n* ( $\rho \sim 100$  Ом·см) — и *p* ( $\rho \sim 1$  кОм·см) — типа проводимости (здесь  $d$  — постоянная решетки). Методики облучения, отжига и измерения темновых токов при обратном напряжении ( $U_{обр} = 200$  В) соответствуют данным работы [7]. При этом использовались *pin*-ФД, имеющие уровень темновых токов, на порядок величины превышающий допустимое значение (2,5 мкА при  $U_{обр} = 200$  В), заданное ТЗ на ОКР "Кремний-РФ". Профили распределения удельного сопротивления измерялись однозондовым методом на поверхности косого шлифа по методике [8]. Величины  $L_{эф}$  и  $\Delta d/d$  рассчитывались по методу интегральных характеристик [9] из кривых дифракционного отражения (КДО), снятых на двукристалльном рентгеновском спектрометре [10] с использованием отражения третьего порядка от кристаллографической плоскости (111) Cu  $k(\alpha_1)$  ( $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$ ). Режимы облучения выбраны следующими:

1 — энергия протонов (E) 300 кэВ, доза ( $\Phi$ )  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  (режим наибольшего положительного эффекта, по данным работы [7]);

2 — последовательное увеличение энергии протонов:  $E_1 = 100$ ,  $E_2 = 200$ ,  $E_3 = 300$  кэВ с дозой при каждой энергии  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  (режим выбран на основе результатов работы [11]).

Отжиг проводили постадийно при температурах от 200 до 500 °С через 50 °С в течение 2 ч на каждой стадии.

### Экспериментальные результаты

Значения темнового тока ФЧП и ОК при  $U_{обр} = 200$  В до и после облучения, а также его зависимость от температуры  $T$  последующего отжига для обоих режимов облучения представлены на рис. 1. Эти данные свидетельствуют о том, что облучение в обоих режимах резко и в одинаковой мере

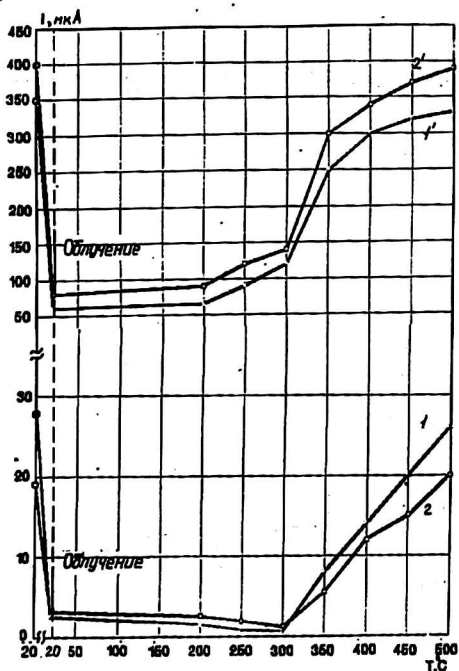


Рис. 1. Влияние облучения и температуры последующего отжига на темновой ток ФЧП (1, 2) и ОК (1', 2'): 1, 1' — режим облучения 1; 2, 2' — режим облучения 2

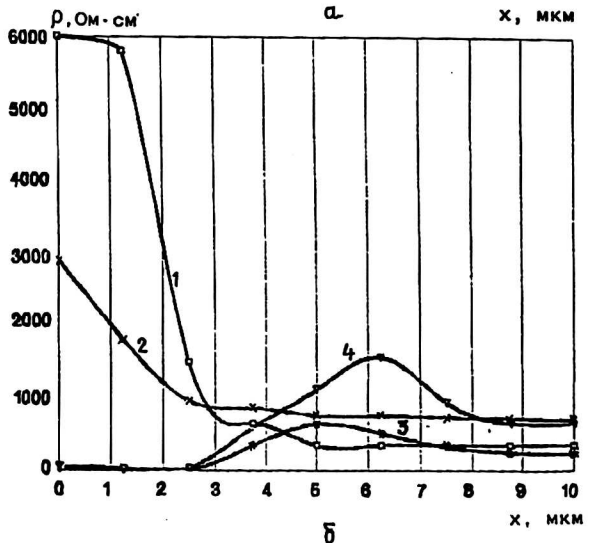
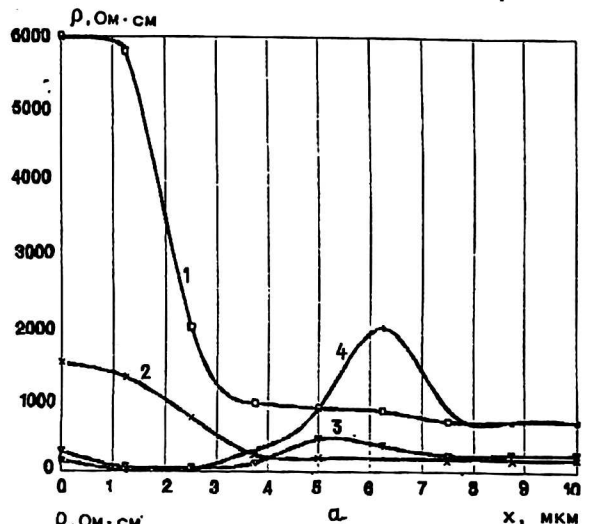
(почти на порядок величины) снижает темновой ток и ФЧП и ОК. Для результатов отжига также характерно наличие двух участков температур независимо от режима облучения:  $T \leq 300$  °С и  $T > 300$  °С. На участке 1 изменение темнового тока при повышении температуры незначительно, но противоположно для ФЧП и ОК: ток ФЧП плавно уменьшается, а ток ОК плавно увеличивается, причем при  $T \geq 200$  °С крутизна роста тока ОК заметно повышается. На участке 2 ток и ФЧП и ОК возрастают и достигают исходных значений при  $T = 500$  °С, причем ток ОК резко возрастает на участке 300—350 °С, затем увеличивается плавно с насыщением, в отличие от ФЧП, где ток растет линейно с увеличением температуры отжига.

Расчет обратной ветви темновой вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФЧП в соответствии с аппроксимационной зависимостью  $I \sim U^n$  показал, что величина  $n$  уменьшается от 1,2 для исходных образцов до 0,68 после облучения и 0,53 — после облучения и отжига при  $T = 250$ —300 °С. Для ОК значение  $n$  изменяется соответственно от 1,1 до 0,73 и 0,98. Отмеченные закономерности и в качественном, и в количественном отношении аналогичны для обоих режимов облучения.

На рис. 2 представлены профили распределения удельного сопротивления кристалла после облучения в обоих режимах и отжига при выбранных температурах. Как видно из рис. 2, вид профиля не зависит от режима

Рис. 2. Профили удельного сопротивления кристалла после облучения и отжига:

- а — режим облучения 1;  
 б — режим облучения 2; 1 — после облучения; 2 — после облучения и отжига при  $T = 200$  °С (2 ч);  
 3 — после облучения и отжига при  $T_1 = 200$  °С (2 ч) +  $T_2 = 250$  °С (2 ч); 4 — после облучения и отжига при  $T_1 = 200$  °С (2 ч) +  $T_2 = 250$  °С (2 ч) +  $T_3 = 300$  °С (2 ч)



облучения, а определяется температурой последующего отжига. Характерно, что облучение приводит к образованию поверхностного слоя с удельным сопротивлением, повышенным в  $\sim 6$  раз по сравнению с исходным кристаллом, и толщина этого слоя составляет  $\sim 3$  мкм, что соответствует пробегу протонов с энергией 300 кэВ в кремнии.

Особенностью являются наблюдаемое в результате отжига при температуре 250—300 °С падение удельного сопротивления этого слоя значительно ниже исходного уровня (в  $\sim 50$ —100 раз) и формирование заглубленного слоя на глубине 3—8 мкм, значительно превышающей пробег протонов, с повышенным удельным сопротивлением, постепенно отжигающегося при температурах выше 300 °С. Формирование заглубленного слоя наблюдалось также в работе [12], однако в ней не замечено понижения удельного сопротивления поверхностного слоя ниже исходного значения, что связано, скорее всего, с использованием исходных кристаллов с уровнем легирования, в  $\sim 100$  раз более высоким, чем в нашем случае.

Величины эффективной толщины и средней относительной деформации нарушенного слоя в зависимости от режима облучения и температуры отжига представлены на рис. 3. Из этих данных следует, что при облучении кристалла кремния с энергией 300 кэВ и дозой  $10^{16}$  см $^{-2}$  (режим облучения 1)  $L_{эф}$  соответствует пробегу протонов и составляет  $\sim 3,2$  мкм. При комбинации энергии протонов 100 + 200 + 300 кэВ и утроенной дозе облучения  $L_{эф}$  возрастает до  $\sim 4,5$  мкм. При отжиге увеличение его температуры до 200 °С приводит к линейному уменьшению  $L_{эф}$  для обоих режимов облучения, а достижение  $T = 250$  °С — к значительному возрастанию  $L_{эф}$ . Дальнейшее повышение температуры до 400 °С изменяет значение  $L_{эф}$  индивидуально для каждого режима облучения. При этом для всего диапазона температур характерны симбатность зависимостей величин  $L_{эф}$  и  $\Delta d/d$  от температуры отжига для своего режима облучения и отличие этих зависимостей для режимов облучения 1 и 2. В первом случае пик температурной зависимости (при  $T = 250$ —350 °С) существенно ниже и шире, чем во втором случае, и он сдвинут в сторону высоких температур (300 °С по сравнению с узким пиком при  $T = 250$  °С во втором случае).

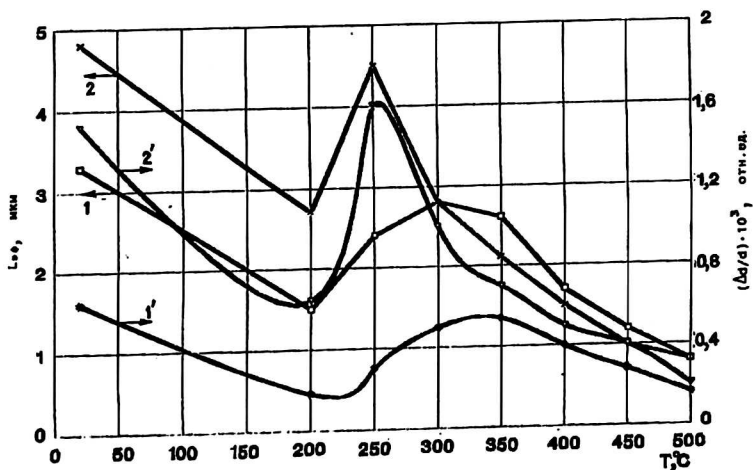


Рис. 3. Зависимость эффективной толщины  $L_{эф}$  (1, 2) и средней относительной деформации  $\Delta d/d$  (1', 2') от температуры отжига:

1, 1' — режим облучения 1;  
2, 2' — режим облучения 2

Отметим, что особенности дополнительной рассеянной интенсивности КДО образцов после облучения и отжига свидетельствуют о том, что в нарушенном слое всех образцов параметр кристаллической решетки увеличен и, следовательно, в деформацию решетки основной вклад вносят дефекты межузельного типа, "распирающие" ее и создающие напряжения сжатия.

### Обсуждение результатов

Данные рис. 2 и 3 свидетельствуют о том, что облучение кремния протонами приводит к накоплению дефектов межузельного типа в пределах пробега протонов, при этом толщина дефектного слоя увеличивается от 3,2 до 4,5 мкм при переходе от режима 1 к режиму 2. В обоих случаях образуется поверхностный слой одинаковой толщины (~ 3 мкм) с повышенным в ~ 6 раз удельным сопротивлением относительно исходного значения. Это свидетельствует о том, что дефекты, обладающие способностью компенсировать проводимость, образуются только в области сильных нарушений, каковой является область пробегов протонов. В результате отжига при  $T = 200$  °С дефекты в поверхностном слое частично отжигаются и его удельное сопротивление снижается, оставаясь все же выше исходного значения. При  $T = 250$  °С поверхностные дефекты отжигаются в наибольшей мере, однако при этом образуются "мелкие" центры, обладающие легирующими свойствами, в результате чего поверхностное удельное сопротивление падает в ~ 50—100 раз по сравнению с исходным уровнем, а в глубине кристалла, за границей пробега протонов, формируется слой шириной ~ 3 мкм, насыщенный дефектами межузельного типа, "перекаченными" от поверхности.

Эти дефекты обладают компенсирующими свойствами, как и дефекты, инициированные облучением, поэтому дефектный заглабленный слой имеет также повышенное удельное сопротивление по сравнению с удельным сопротивлением исходного кристалла. Наибольшее удельное сопротивление заглабленный слой приобретает в результате отжига при  $T = 300$  °С. При более высоких температурах компенсирующие дефекты этого слоя, а также "легирующие" дефекты поверхностного слоя постепенно отжигаются, и свойства кристалла восстанавливаются.

Исходя из изложенного, данные рис. 1 и результаты работы [7] находят следующее объяснение. Обратные ветви ВАХ исходных структур определяются поверхностной генерацией, поскольку  $n > 1$ . Облучение, приводящее к формированию поверхностного компенсированного дефектного слоя, уменьшает влияние поверхностной генерации, поскольку при этом сужается поверхностная область пространственного заряда (ОПЗ) из-за экранирования его электрического поля дефектами. При этом темновой ток резко уменьшается, а ВАХ становится определяемой в основном токами генерации в ОПЗ металлургической границы  $p$ - $n$ -перехода ( $n \sim 0,7$ ), причем в большей мере при включении ОК, которое "оттягивает" на себя часть носителей заряда, генерированных на поверхности. Такая ситуация сохраняется и после отжига при  $T \leq 200$  °С. Отжиг при  $T = 250$ — $300$  °С приводит к формированию тонкого (~ 3 мкм) поверхностного слоя с пониженным и, по видимому, оптимальным сопротивлением (1—3 МОм) (этот слой изолирован от объема заглабленным слоем с повышенным удельным сопротивлением), по которому, в соответствии с данными работы [13], часть тока ФЧП перетекает в ОК. В результате темновой ток становится еще меньше, а ВАХ ФЧП

в еще большей мере становится определяемой генерацией в ОПЗ металлургической границы  $p-n$ -перехода ( $n \sim 0,5$ ).

После отжига при температурах выше 300 °С дефекты, определяющие существование поверхностного и заглупленного слоев, исчезают, свойства кристалла восстанавливаются и темновой ток и ВАХ ФЧП и ОК возвращаются к исходному (до облучения) состоянию, определяемому поверхностной генерацией.

Как видно из представленных результатов, использование протонного облучения для практических целей имеет под собой реальную основу. Это либо только облучение периферии планарных  $p-n$ -переходов с защитной диэлектрической пленкой в оптимальных режимах, либо облучение в сочетании с последующим отжигом. Для каждого случая конкретного применения режимы облучения и отжига должны подбираться индивидуально. При этом необходимо подтвердить стабильность наблюдавшихся эффектов, что не сделано ни в работе [7], ни в данной работе, и является задачей на будущее для авторов этих работ. Однако при этом следует отметить, что, исходя из общих физических представлений, можно гарантировать стабильность эффектов, наблюдавшихся после отжига при температурах 250–300 °С и с большой вероятностью — для имевших место после отжига при температуре 200 °С, если рабочая температура приборов не будет превышать 70–80 °С, а длительные прогревы при температурах выше 100–150 °С будут исключены.

### Выводы

1. Протонное облучение периферии планарных  $p-n$ -переходов в режимах, включающих дозу  $10^{16}$  см<sup>-2</sup> с энергией 300 кэВ, уменьшает их темновой ток за счет формирования поверхностного дефектного слоя с компенсированной проводимостью, наличие которого уменьшает ток поверхностной генерации. Этот эффект сохраняется при отжигах вплоть до  $T = 200$  °С.

2. Отжиг облученных структур при температурах 250–300 °С формирует поверхностный слой толщиной  $\sim 3$  мкм, сопротивление которого является оптимальным (1–3 МОм) для перетекания части тока ФЧП в ОК. Этот слой отделен от объема кристалла заглупленным слоем толщиной  $\sim 3$ –4 мкм с компенсированной проводимостью, образующимся только в указанном диапазоне температур.

3. Поверхностный и заглупленный дефектные слои насыщены междоузлиями, "распирающими" кристаллическую решетку и создающими сжимающие напряжения в соответствующих областях кристалла.

### Л и т е р а т у р а

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. 52–55.
2. А. с. 485682 от 29.05.75. Карашев Т. Б., Астахов В. П., Аранович Р. М. Ионно-лучевой способ изготовления планарного электронно-дырочного перехода.
3. А. с. 705921 от 28.08.79. Астахов В. П., Аранович Р. М., Бромберг Б. В., Дудник В. Я. Способ создания планарного мелкозалегающего  $p-n$ -перехода.
4. Маркович М. И., Вологдин Э. Н. Протонное облучение в технологии полупроводниковых приборов//Электронная техника. Сер. 2. 1978. Вып. 5(150). С. 136–150.

5. Александров О. В., Шевченко В. Н. Влияние радиационных дефектов, введенных ионной имплантацией, на обратные токи кремниевых  $p-n$ -переходов//ФТП. 1992. Т. 26. Вып. 5. С. 1142—1153.
6. Вербицкая Е. М. Особенности генерационного тока в облученных  $p-n$ -переходах из высокоомного кремния//Там же. 1993. Т. 27. Вып. 1. С. 27—33.
7. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Кузнецов Н. В., Соловьев Г. Г., Сорокин К. В. Результаты протонной обработки периферии планарных  $p-n$ -переходов  $pin$ -фотодиодов на кремнии//Вопросы оборонной техники. Сер. 11. 1998. Вып. 1(154)—2(155). С. 29—32.
8. Булгаков Ю. В., Яценко Л. А. Исследование профиля радиационно-нарушенных слоев в кремнии методом растекания тока зонда//Микроэлектроника. 1980. Т. 9. Вып. 4. С. 542—548.
9. Афанасьев А. М., Александров П. А., Имамов Р. М. Рентгенодифракционная диагностика субмикронных слоев. — М.: Наука, 1989. — 152 с.
10. Пинскер З. Г. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. — М.: Наука. 1989. — 368 с.
11. Астахов В. П., Рубцов В. А., Аранович Р. М., Павлов П. В. Эффекты изменения энергии ионов, воздействующих на мишень при имплантации//ФТП. 1980. Т. 15. Вып. 6. С. 1140—1144.
12. Bulgakov Yu. V.//Phys. stat. sol. 1980. V. 61. P. 2517—2519.
13. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Сорокин К. В. О влиянии сопротивления поверхностного канала на темновой ток квадрантных  $pin$ -фотодиодов на кремнии//Прикладная физика, 1999. № 1—2. С. 79—86.

## About reasons of silicon $pin$ -photodiodes VAC changing at proton bombardment

V. P. Astakhov, D. A. Gindin, V. V. Karpov, N. V. Kuznetsov,  
I. G. Sakharova, I. S. Smirnov, G. G. Solovjov, K. V. Sorokin  
Joint Stoc Company «Moskovsky Zavod "Sapfir"», Moscow, Russia

*There are presented complex investigation results of proton bombardment influence in two regions und followimgannealing temperature to  $pin$ -photodiodes reverse volt-amppear characteristic (at planar  $n^+-p$ -junctions periferia bombardment), and alsow to specific resistance profile and thickness and average relative deformation of crystal lattice near test crystals surfase. It is discovered the compensated defect layer in run proton region directly after bombardment, and after annealing at temperatures including 200 °C. After annealing at temperatures 250—300 °C this layer specific resistance fall lower than initial significance, and under this layer compensate region is form. More high temperatures annealing restore initial crystal properties. On this dates ground there is wided work [7] resultes interpretation.*