

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПЛАНТАЦИИ ПРОТОНОВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОДИОДОВ

И.Г. Дьячкова¹⁾, В.Е. Асадчиков¹⁾, Д.А. Золотов¹⁾, Л.М. Сорокин²⁾

¹⁾ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Ленинский пр. 59, 119333 Москва, Россия,
dyachkova.i@crys.ras.ru, asad@crys.ras.ru, zolotovden1985@gmail.com

²⁾Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

ул. Политехническая 26, 194021 Санкт-Петербург, Россия, lev.sorokin@mail.ioffe.ru

В работе проведены исследования возможности использования имплантации дефектообразующих ионов, как способа модификации свойств поверхностных слоев кремниевых фотодиодов для улучшения их параметров и увеличения выхода годных приборов методами трехкристальной рентгеновской дифрактометрии (ТРД) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в сочетании с измерениями электрофизических параметров. Объектом исследования являлся четырехплощадочный pin-фотодиод (pin-ФД), сформированный на пластине высокоомного кремния р-типа проводимости, на которой диффузией образованы области фоточувствительных площадок (ФЧП) и охранного кольца (ОК). Исследованы структурные особенности образования радиационных дефектов в имплантированных протонами слоях кремниевых пластин в процессе их термической обработки. Экспериментально установлена эффективность облучения протонами периферии n^+ -р-переходов для защиты поверхности pin-фотодиодов на основе высокоомного кремния. Определены режимы облучения протонами и последующего термического отжига, при которых происходит формирование поверхностного слоя с оптимальными для достижения минимальных темновых токов ФЧП и ОК характеристиками: $E = 100+200+300$ кэВ, $D = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻², $T = 300^\circ\text{C}$, ($t = 2$ ч). Применение этих режимов к серийным pin-фотодиодам с глубиной залегания n^+ -р-переходов ~ 3 мкм позволило снизить темновой ток на порядок величины и повысить выход годных приборов.

Ключевые слова: фотодиоды; имплантация протонов; термический отжиг; радиационные дефекты; темновой ток.

THE POSSIBILITY OF USING PROTON IMPLANTATION TO CORRECT THE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTODIODES

Irina Dyachkova¹⁾, Victor Asadchikov¹⁾, Denis Zolotov¹⁾, Lev Sorokin²⁾

¹⁾Federal Research Center «Crystallography and Photonics», Russian Academy of Sciences,
59 Leninskiy Ave., 119333 Moscow, Russia,

dyachkova.i@crys.ras.ru, asad@crys.ras.ru, zolotovden1985@gmail.com

²⁾Ioffe Institute, 26 Politekhnicheskaya Str., St. Petersburg 194021, Russia,
lev.sorokin@mail.ioffe.ru

The measured electrical parameters of silicon pin photodiodes (PD) subjected to the implantation of defect-forming ions and subsequent heat treatment are analyzed, which reveal a new way of reducing the dark current and enhancing the device yield. The data of the electrical measurements are compared with the results of the structural study. It was experimentally demonstrated that, to reduce the dark currents of silicon pin photodiodes with a guard ring (GR) based on diffusion planar n^+ -p junctions with a depth of ~ 3 μm , it is necessary to perform the local implantation of hydrogen ions with an energy of $100+200+300$ keV at a dose of $2 \cdot 10^{16}$ cm⁻² in the region between the main n^+ -p junctions and the GR with the capture of n^+ regions. In addition, post-implantation annealing in vacuum at 300°C for 2 h is needed. It was established that proton irradiation of the periphery of the planar n^+ -p junctions in this mode reduces their dark current due to the formation of a defect surface layer with compensated conductivity. Such a layer weakens the negative effect of the surface on the dark currents. Annealing of the irradiated structures at a temperature of 300°C leads to the formation of a surface layer with a thickness of ~ 3 μm with a resistance optimal for the flowing of a part of the photosensitive area current to the GR. This layer is isolated from the bulk of the crystal by a buried layer with a thickness of 3-8 μm and the compensated conductivity, which only forms at the specified temperature. Thus, the experimentally determined mode of processing the periphery of a pin PD based on high-

resistance silicon made it possible to improve the parameters of the finished photodiode structures and increase the device yield.

Keywords: photodiodes; proton implantation; thermal annealing; radiation-induced defects; dark current.

Введение

Одной из главных задач при производстве кремниевых импульсных рпн-ФД является достижение максимальной величины пороговой чувствительности. Одним из отбраковочных параметров является темновой ток ФЧП при рабочем напряжении [1]. Традиционно применяемые для снижения темновых токов ФЧП приемы (сверхчистая обработка поверхности, ОК [2]) не всегда позволяют разрешить данную проблему.

В работе ставилась задача без особых требований к чистоте обработки поверхности и режимам окисления оптимизировать поверхностное сопротивление для обеспечения оптимального перетекание тока из ФЧП в ОК и, следовательно, минимизации темновых токов ФЧП. Наиболее целесообразно и технологически удобно добиться снижения уровня поверхностных токов утечки в полностью изготовленных приборных структурах, не соответствующих требованию по уровню темнового тока, введением компенсирующих дефектов в приповерхностную область периферии планарных р-п-переходов с помощью имплантации ионов водорода.

Для решения поставленной задачи в работе проведен комплексный эксперимент по изучению влияния протонного облучения и температуры последующего отжига на темновой ток ФЧП и ОК диффузионных планарных рпн-ФД, при облучении периферии р-п-переходов, а также на профиль удельного сопротивления и структурное состояние ионноимплантированного слоя в образцах р-Si (111) ($\rho \sim 1$ кОм·см). Режим обработки следующий: последовательное увеличение энергии протонов $E=100+200+300$ кэВ (для создания однородного по величине удельного сопротивления нарушенного слоя на глубинах, соизмеримых с глубиной залегания

р-п перехода в реальных заводских структурах) с общей дозой $D=2 \cdot 10^{16}$ см⁻² (для получения слоя с максимальным количеством нарушений, без разрушения кристаллов кремния при последующей термообработке [3]), с последующим отжигом в вакууме при температурах от 200 до 1100°C с шагом 100°C в течение двух часов на каждой стадии (для стабилизации свойств заглабленного слоя с повышенным удельным сопротивлением, изолирующего слой с оптимальным сопротивлением от объема кристалла).

Изучение процессов формирования и релаксации радиационных дефектов, возникающих при имплантации кремния ионами водорода, осуществлялось методами трехкристальной рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии в сочетании с измерениями электрофизических параметров.

Результаты и их обсуждение

Рентгенодифракционные измерения проводились с помощью трехкристального рентгеновского спектрометра ТРС УАР ПП-80-001 с использованием характеристического $\text{Cu K}\alpha_1$ излучения при различных отворотах образца от максимума брэгговского отражения. По полученным данным были определены толщины слоев с положительной и отрицательной деформацией. Для образца, подвергнутого последовательной имплантации протонами с энергией $E=100+200+300$ кэВ толщина слоя с положительным значением деформации составила 2.4 мкм, с отрицательным – 1 мкм. То есть такая многоступенчатая имплантация позволяет формировать толстые нарушенные слои с достаточно однородным распределением деформации. Изучено распределение интенсивности диффузного рассеяния вдоль направления $q_z \parallel \{111\}$ и $q_x \parallel \{121\}$ в окрестности узла $[[333]]$, для облученного кри-

сталла Si при разных режимах термической обработки, на основании которого производился качественный анализ изменения геометрии присутствующих в образцах кластеров радиационных дефектов, а также определялись количественные характеристики микродефектов, такие как мощность, размер и концентрация [4]. Более детальное исследование радиационных микродефектов проводилось с использованием метода ПЭМ на электронном микроскопе JEM-7 [4].

По данным структурных исследований было установлено, что ионноимплантированный слой кристалла кремния при температурах отжига выше 500°C имеет в целом сильно разупорядоченную структуру, насыщенную крупными кластерами радиационных дефектов и дислокациями, что не позволяет использовать его в технологии создания и коррекции характеристик pin-фотодиодов. Поэтому при дальнейших исследованиях электрофизических параметров режимы отжига pin-фотодиодов выбраны в интервале температур от 200 до 500°C.

Было исследовано влияние протонного облучения и температуры последующего отжига на темновой ток (I_T) ФЧП и ОК, на вольтамперные характеристики (ВАХ) pin-ФД, а также на профили распределения удельного сопротивления кристаллов кремния. Установлено, что облучение почти на порядок величины снижает темновой ток и ФЧП и ОК. По результатам отжига характерно наличие двух участков температур: $T < 300^\circ\text{C}$, когда ток ФЧП плавно уменьшается, а ток ОК плавно увеличивается, причем при $T > 200^\circ\text{C}$ крутизна роста тока ОК заметно повышается; $T > 300^\circ\text{C}$, когда токи как ФЧП, так и ОК возрастают и достигают исходных значений при $T = 500^\circ\text{C}$. Исходя из этих данных, исследовались профили распределения удельного сопротивления кристалла кремния после облучения и отжига при температурах 200 и 300°C (рис. 1).

Облучение приводит к образованию поверхностного слоя протяженностью 2-

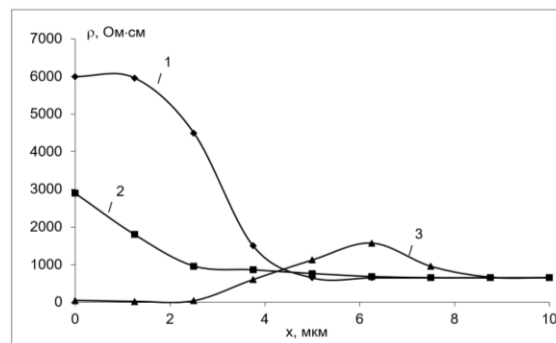


Рис. 1. Профили удельного сопротивления кристалла кремния после облучения протонами с $E = 100+200+300$ кэВ, $D = 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ (1) и отжига при $T = 200^\circ\text{C}$, 2 ч (2), при $T = 300^\circ\text{C}$, 2 ч (3)

Fig. 1. Profiles of resistivity ρ of crystalline silicon after irradiation with protons with $E = 100+200+300$ keV and $D = 2 \cdot 10^{16}$ cm $^{-2}$ (1), after irradiation and annealing at $T = 200^\circ\text{C}$ for 2 h (2) and after irradiation and annealing at $T = 300^\circ\text{C}$ for 2 h (3)

4 мкм с удельным сопротивлением, повышенным в 6 раз по сравнению с исходным кристаллом (рис. 1, кривая 1). Сопоставление данных электрофизических измерений с данными исследований методами ТРД и ПЭМ дало основание полагать, что облучение кремния протонами приводит к накоплению радиационных дефектов, обладающих способностью компенсировать проводимость только в области сильных нарушений, каковой и является область пробегов протонов.

В результате отжига при температурах 200°C (рис. 1, кривая 2) и 300°C (рис. 1, кривая 3) наблюдается падение удельного сопротивления поверхностного слоя. При этом отжиг при температуре 300°C приводит к уменьшению удельного сопротивления этого слоя до величины значительно ниже исходного уровня (в 50-100 раз), а на глубинах от 3 до 8 мкм, заметно превышающих пробег протонов, к формированию заглубленного слоя с повышенным удельным сопротивлением (рис. 1, кривая 3). По-видимому, при температуре 200°C начинают отжигаться поверхностные дефекты, компенсирующие проводимость, которые при температуре 300°C отжигаются в наибольшей мере. При этом вблизи поверхности начинают образовываться "мелкие" водородные

центры, обладающие донорными свойствами. В следствие этого поверхностное удельное сопротивление падает по сравнению с исходным значением (рис. 1, кривая 3). В глубине кристалла за границей пробега протонов формируется слой, насыщенный микродефектами (ТРД, ПЭМ), "перекаченными" от поверхности (эффект дальнего действия [5]). Эти дефекты обладают компенсирующими свойствами, как и дефекты, инициированные облучением (рис. 1, кривая 1). Именно поэтому дефектный заглабленный слой имеет повышенное удельное сопротивление по сравнению с исходным кристаллом.

Наибольшее удельное сопротивление заглабленный слой приобретает в результате отжига при $T = 300^{\circ}\text{C}$ (рис. 1, кривая 3). При более высоких температурах компенсирующие дефекты этого слоя, а также "донорные" дефекты поверхностного слоя постепенно отжигаются, что и приводит к росту темнового тока ФЧП и ОК.

Из анализа ВАХ изучаемых структур (рис. 2) при допустимом значении темнового тока I_T не больше 2.5 мкА при $U_{\text{обр}} = 200$ В можно предложить следующий механизм изменения величины обратного тока pin-ФД в результате облучения их периферии протонами и отжига. Обратная ветвь ВАХ исходной структуры (рис. 2, семейство кривых 1) определяется поверхностной генерацией. Снижение величины темнового тока непосредственно после облучения (рис. 2, семейство кривых 2) объясняется формированием поверхностного компенсированного дефектного слоя, приводящим к уменьшению влияния поверхностной генерации, а ВАХ становится определяемой, в основном, токами генерации в ОПЗ металлургической границы p-n-перехода, причем в большей мере при включении ОК, которое "оттягивает" на себя часть носителей заряда, генерированных на поверхности. Отжиг при температуре 300°C приводит к формированию тонкого (~ 3 мкм) поверхностного слоя с пониженным и, по-видимому, оптимальным сопротивлением (этот слой

изолирован от объема заглабленным слоем с повышенным удельным сопротивлением), по которому 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 (рис. 2, семейство кривых 3).

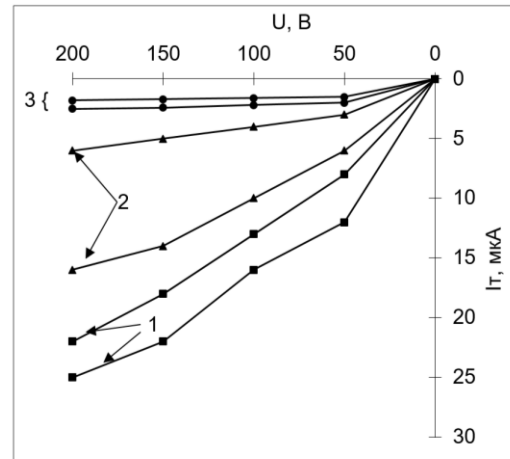


Рис. 2. Изменение ВАХ pin-ФД (1 - семейство исходных ВАХ) после протонного облучения с $E = 100+200+300$ кэВ, $D = 2 \cdot 10^{16}$ см^{-2} (2) и отжига при $T = 300^{\circ}\text{C}$, 2 часа (3)

Fig. 2. Change in the I-V characteristics of pin PDs (1- series of the initial I-V characteristics), after proton irradiation with $E = 100+200+300$ keV at a dose of $D = 2 \cdot 10^{16}$ cm^{-2} (2) and annealing at $T = 300^{\circ}\text{C}$ for 2 h (3)

После отжига при температурах выше 300°C дефекты, определяющие существование поверхностного и заглабленного слоев, исчезают и темновой ток ФЧП и ОК возвращаются к исходному (до облучения) состоянию, определяемому поверхностной генерацией и инверсионным каналом.

Закключение

С помощью методов ТРД и ПЭМ в сочетании с измерениями электрофизических характеристик отработан конкретный технологический режим для коррекции характеристик pin-фотодиодов с целью увеличения выхода годных приборов. Экспериментально показано, что для снижения темновых токов pin-фотодиодов с

ОК на основе диффузионных планарных p+-р-переходов глубиной ~ 3 мкм следует проводить имплантацию ионов водорода с энергией 100+200+300 кэВ и дозой $2 \cdot 10^{16}$ см⁻² локально в области между основными p+-р-переходами и ОК с захватом p+-областей и постимплантационный отжиг в вакууме при температуре 300°C в течение 2 ч. Установлено, что протонное облучение периферии планарных p+-р-переходов в указанном режиме уменьшает их темновой ток благодаря формированию поверхностного дефектного слоя с компенсированной проводимостью, наличие которого уменьшает негативное влияние поверхности на темновые токи. Отжиг облученных структур при температуре 300°C формирует поверхностный слой толщиной около 3 мкм с оптимальным для перетекания части тока ФЧП в ОК сопротивлением. Этот слой отделен от объема кристалла заглубленным слоем толщиной 4-5 мкм с компенсированной проводимостью, образующимся только при указанной температуре.

Отметим, что для каждого случая конкретного практического применения режимы ионной имплантации и отжига должны подбираться индивидуально.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Библиографические ссылки

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Энергия; 1984. 580 с.
2. Demidov S.S., Klimanov E.A. Influence of parameters of the semiconductor-dielectric interface on the current of the guard ring of silicon photodiodes. *Journal of Communications Technology and Electronics* 2016; 61: 328-332.

3. Александров П.А., Баранова Е.К., Баранова И.В., Бударагин В.В., Литвинов В.Л. Влияние температуры отжига на выход имплантированного водорода из блистеров в кремнии. В кн.: Бондаренко Г.Г., редактор. Труды XII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». (1-6 июля 2002 года), г. Севастополь. Москва: НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); 2002. С. 149-160.
4. Asadchikov V.E., Dyachkova I.G., Zolotov D.A., Chukhovskii F.N., Sorokin L.M. Microstructure of Si crystals subjected to irradiation with high-energy H⁺ ions and heat treatment by high-resolution three-crystal X-ray diffraction and transmission electron microscopy. *Physics of the Solid State* 2019; 61(10): 1707-1715.
5. Козловский В.В. Модифицирование полупроводников пучками протонов. СПб: Наука; 2003. 268 с.

References

1. Zi S. Физика полупроводниковых приборов [Physics of semiconductor devices]. Moscow: Energiya; 1984. 580 p. (In Russian).
2. Demidov S.S., Klimanov E.A. Influence of parameters of the semiconductor-dielectric interface on the current of the guard ring of silicon photodiodes. *Journal of Communications Technology and Electronics* 2016; 61: 328-332.
3. Alexandrov P.A., Baranova E.K., Baranova I.V., Budaragin V.V., Litvinov V.L. Vliyanie temperaturi otziga na vihod implantirovannogo vodoroda iz blisterov v kremniy. [Influence of annealing temperature on the yield of implanted hydrogen from blisters in silicon]. V kn.: Bondarenko G.G., redactor. *Trudy XII Mezdunarodnogo soveshaniya "Radiacionnaya fizika tverdogo tela"*. (1-6 July 2002), Sevastopol. Moscow: NII PMT MGIEM (TU); 2002; P. 149-160. (In Russian).
4. Asadchikov V.E., Dyachkova I.G., Zolotov D.A., Chukhovskii F.N., Sorokin L.M. Microstructure of Si crystals subjected to irradiation with high-energy H⁺ ions and heat treatment by high-resolution three-crystal X-ray diffraction and transmission electron microscopy. *Physics of the Solid State* 2019; 61(10): 1707-1715.
5. Kozlovskii V.V. Modificirovanie poluprovodnikov puchkami protonov [Semiconductor modification with proton beams]. St. Petersburg: Nauka; 2003. 268 p.