

07

## Влияние условий формирования геттера в высокоомном кремнии на характеристики PIN-фотодиодов

© И.Б. Чистохин, К.Б. Фрицлер

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
E-mail: ichist1@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2020 г.

В окончательной редакции 20 июля 2020 г.

Принято к публикации 23 июля 2020 г.

Изучено влияние условий геттерирования в высокоомном кремнии при изготовлении PIN-фотодиодов на обратные темновые токи. Показано, что геттерирование путем использования комбинации ионного легирования фосфором и нанесения поликремниевой пленки с последующим легированием фосфором при температурах менее  $900^{\circ}\text{C}$  обратной стороны подложки приводит к пониженным значениям обратного темнового тока и увеличению времени жизни неравновесных носителей.

**Ключевые слова:** геттерирование, PIN-фотодиод, высокоомный кремний, темновые токи.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.21.50188.18455

PIN-фотодиоды на основе высокоомного кремния ( $> 3\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ), выращенного методом бестигельной зонной плавки (БЗП), используются для широкого ряда приложений, в том числе для детектирования ионизирующих излучений. В частности, такие детекторы, стыкованные со скинтиллятором, применяются в системах распознавания изображения объектов при облучении гамма-квантами или рентгеновским излучением для контроля безопасности, в промышленной томографии, медицине и научных исследованиях [1,2]. Одной из основных проблем при изготовлении PIN-фотодиода является минимизация величины темнового тока, задающего уровень шума и определяющего динамический диапазон входных усилителей. Нижний предел темнового тока обратносмещенного кремниевого PIN-фотодиода определяется генерационным током, который имеет обратно пропорциональную зависимость от величины времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$ , чувствительной к присутствию в кристалле примесей, создающих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кристалла [3]. Несмотря на высокое значение времени жизни в исходных подложках БЗП-кремния (до 10 ms), в процессе изготовления по планарной технологии (главным образом при применении высокотемпературных обработок выше  $1000^{\circ}\text{C}$ )  $\tau$  может уменьшиться на два-три порядка из-за неконтролируемой фоновой диффузии в кремниевую подложку атомов переходных металлов (Fe, Cu и др.) из кварцевой трубы [4]. Кроме того, из-за низкого содержания кислорода в БЗП-кремнии (менее  $10^{16}\text{ cm}^{-3}$ ) при высокотемпературных обработках возможно образование дислокаций, что также уменьшает  $\tau$  [5]. В результате необходимо минимизировать высокотемпературные операции.

Для достижения минимальных темновых токов вследствие увеличения времени жизни  $\tau$  в активной об-

ласти PIN-фотодиода в работе [6] было предложено геттерирование обратной стороны кремниевой пластины в процессе изготовления путем осаждения поликристаллического кремния с одновременным легированием фосфором обратной стороны пластины при относительно низкой температуре  $650^{\circ}\text{C}$ . В результате обратные темновые токи фотодиода были на три порядка меньше, чем в отсутствие геттерирования. Полученный эффект объяснялся наличием механических напряжений и высокой концентрацией активного фосфора в слое поликристаллического кремния, взаимодействующего с диффундирующими из подложки примесями.

Следует заметить, что при таком способе геттерирования, обеспечивающем процесс осаждения поликремния с одновременным легированием фосфором при пониженных температурах, применяется нестандартное оборудование, использующее добавление в парогазовую смесь фосфина. Такие установки дорогостоящие и требуют повышенных мер безопасности. Стандартным и наиболее распространенным для диффузии фосфора является использование оксихлорида фосфора из жидкого источника [7]. Однако диффузионное легирование фосфором поликремния в этом случае происходит после его осаждения. При этом для достижения высокой концентрации фосфора в поликремнии необходимо применять повышенные температуры, что ослабляет эффект геттерирования. Известно, что эффективность геттерирования возрастает с ростом концентрации фосфора и падает с увеличением температуры [8]. В работах [9,10] вместо осаждения поликремния, легированного фосфором, было опробовано ионное легирование фосфором обратной стороны подложки кремния дозой  $5 \cdot 10^{15}$  [9] или  $10^{16}\text{ cm}^{-2}$  [10] с последующим отжигом при температуре  $975^{\circ}\text{C}$  в течение 150 min. Однако полученный

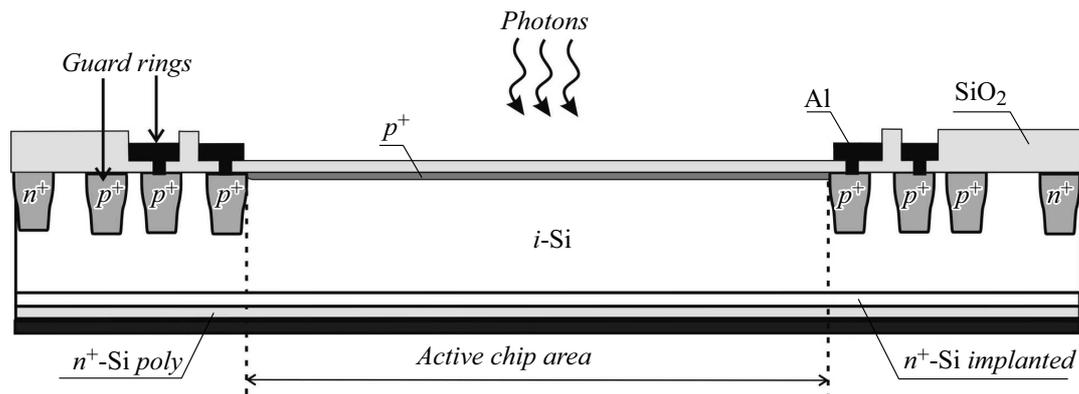


Рис. 1. Поперечный разрез PIN-диода.

уровень темновых токов фотодиодов был на два порядка выше, чем в работе [6].

Целью настоящей работы является модификация процесса геттерирования при изготовлении PIN-фотодиода на основе БЗП-кремния с использованием дополнительного ионного легирования фосфором и стандартного технологического процесса при температурах не более  $900^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 1 представлено поперечное сечение исследуемого PIN-фотодиода размером  $5 \times 5 \text{ mm}$ . Диод состоит из подложки высокочистого кремния  $n$ -типа ориентации  $\langle 100 \rangle$  толщиной  $360 \mu\text{m}$  с удельным сопротивлением  $3\text{--}5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  (область  $i\text{-Si}$ ), локальных областей  $n^+$  и  $p^+$ , создаваемых диффузионной загонкой фосфора и ионным легированием бором соответственно, пассивирующих диэлектрических слоев  $\text{SiO}_2$  и алюминиевой металлизации. Для достижения минимальных значений темновых токов обратносмещенного фотодиода имеются контакт к охранному кольцу и область геттерирования на обратной стороне подложки. Из-за высокого значения коэффициента поглощения сцинтилляционных фотонов (более  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ ) с длиной волны  $480 \text{ nm}$  и необходимости получения максимальных значений квантовой эффективности была выбрана толщина в активной области детектора (active chip area)  $p^+$  около  $100 \text{ nm}$ .

Технологическая схема формирования геттерирующего слоя реализовалась в двух вариантах и включала следующие этапы.

1. На поверхность подложки кремния осуществлялось пиролитическое осаждение  $\text{SiO}_2$  посредством окисления моносилана кислородом при температуре  $450^{\circ}\text{C}$ .

2. Удалялся  $\text{SiO}_2$  с тыльной стороны подложки.

3. Далее в первом варианте на тыльную сторону осаждался поликремний толщиной  $150 \text{ nm}$  с последующей стандартной диффузионной загонкой фосфора из жидкого источника при  $875^{\circ}\text{C}$ , во втором варианте перед осаждением поликремния проводилась ионная имплантация фосфора на тыльную сторону подложки (энергия  $80 \text{ keV}$ , доза  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ), затем проводились те же технологические операции, что и в первом варианте.

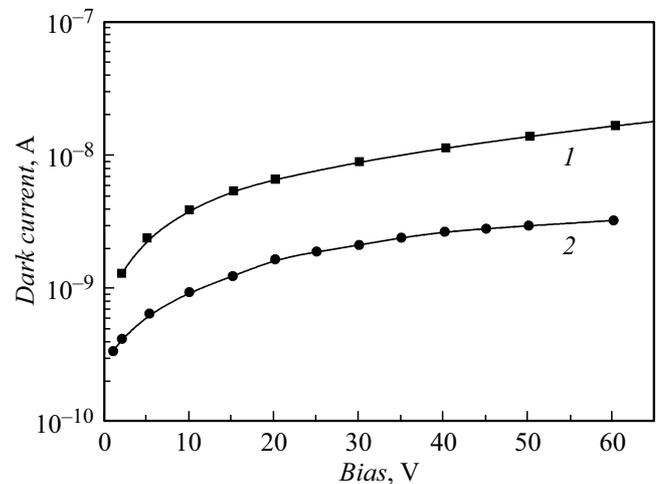


Рис. 2. Темновые обратные вольт-амперные характеристики PIN-фотодиодов, изготовленных в двух вариантах геттерирования обратной стороны подложки: 1 — осаждение поликремния и последующая диффузия фосфора, 2 — ионная имплантация фосфора с последующим осаждением поликремния и диффузией фосфора.

После формирования геттерирующего слоя выполнялись стандартные технологические операции по изготовлению PIN-фотодиода в соответствии с конструкцией при температуре, не превышающей  $900^{\circ}\text{C}$ .

На изготовленных в двух вариантах PIN-фотодиодах были измерены темновые обратные вольт-амперные характеристики (рис. 2). Из представленных данных видно, что уровень темновых токов диодов, изготовленных с применением второго варианта с дополнительной ионной имплантацией, примерно на порядок меньше, чем в первом варианте, и составляет  $6 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ . При этом в случае использования высокотемпературных операций (более  $1000^{\circ}\text{C}$ ) технологического маршрута изготовления PIN-диода в обоих вариантах происходит повышение обратных темновых токов более чем на порядок.

Для понимания механизма понижения темновых токов и качественной оценки эффективности геттерирования на изготовленных PIN-фотодиодах были также измерены времена жизни  $\tau$  неравновесных носителей заряда. Измерения проводились бесконтактным СВЧ-методом [11]. Генерация неравновесных носителей заряда осуществлялась при воздействии на образцы импульсного лазерного излучения с длиной волны 1.06  $\mu\text{m}$ . Измерения  $\tau$  проводились по спаду фотопроводимости при детектировании изменения отраженного СВЧ-излучения. Величины  $\tau$  составили 300 и 1500  $\mu\text{s}$  для первого и второго варианта геттерирования соответственно.

Полученные данные и анализ литературы свидетельствуют о том, что уровень темновых токов фотодиодов обусловлен наличием генерационно-рекомбинационных центров, а закономерности процесса геттерирования описываются механизмом сегрегации, включающим образование ионных пар металлическая примесь (железо)–фосфор в  $n^+$ -слое [8,9,12]. В процессе геттерирования происходит высвобождение металлической примеси, ее диффузия к геттерной области с последующим захватом примеси и образованием комплекса с фосфором.

Кроме того, наличие легированного фосфором поликристаллического слоя и возникновение в результате его нанесения упругих деформаций обеспечивают движущую силу для диффузии, а межзеренные границы служат эффективным стоком для примесей, что еще больше усиливает эффект геттерирования [6].

Критически важным фактором в применяемом нами подходе является достижение максимального уровня легирования фосфором, а также минимизация температурного бюджета. В ходе всего технологического процесса изготовления фотодиода температура при тепловых обработках, проводимых после создания геттерного слоя, не превышала 900°C.

Таким образом, предложен модифицированный способ формирования геттера в высокоомных (БЗП) кремниевых пластинах, позволяющий использовать стандартное технологическое оборудование и дающий возможность реализовать PIN-диоды с пониженными обратными темновыми токами.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Moser H.-G. // *Progr. Particle Nucl. Phys.* 2009. V. 63. P. 186–237. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2008.12.002
- [2] Lee S.C., Jeon H.B., Kang K.H., Kim B.B., Park H. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A.* 2018. V. 912. P. 350–353. DOI: 10.1016/j.nima.2017.12.043
- [3] Sze S.M. *Physics of semiconductor devices*. 2nd ed. Wiley, 1981. P. 21.
- [4] Istratov A.A., Hieslmair H., Weber E.R. // *Appl. Phys. A.* 2000. V. 70. P. 489–534.
- [5] Han D.J., Batignani G., Guerra A.Del. // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83. P. 1450–1452. DOI: 10.1063/1.1602166
- [6] Holland S. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A.* 1989. V. 275. P. 537–541. DOI: 10.1016/0168-9002(89)90741-9
- [7] Курносков А.И., Юдин В.В. *Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем*. М.: Высш. шк., 1986. 367 с.
- [8] Климанов Е.А. // *Успехи прикладной физики*. 2015. Т. 3. № 2. С. 121–125.
- [9] Dalla Betta G.F., Boscardin M., Pignatelli G.U., Verzellese G., Bosio L., Ferrario L., Zen M., Soncini G. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A.* 1998. V. 409. P. 346–350. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)01296-5
- [10] Seo J., Kim J., Lim H., Park J. // *J. Korean Phys. Soc.* 2010. V. 57. P. 44–50. DOI: 10.3938/jkps.57.44
- [11] Владимиров В.М., Марков В.В., Сергей М.Е., Шеннов В.Н. // *Приборы и техника эксперимента*. 2011. №2. С. 166–167.
- [12] Liu A., Yan D., Wong-Leung J., Li L., Phang S.P., Cuevas A., Macdonald D. // 2018 IEEE 7th World Conf. on photovoltaic energy conversion (WCPEC). IEEE, 2018. P. 1667–1671. DOI: 10.1109/PVSC.2018.8547431