

УДК 621.383:621.315.5

## Эффективность методов геттерирования высокоомного кремния для фотодиодов

А. К. Будтолаев, И. А. Евлентьев, Г. В. Либерова, С. Д. Сиваченко, В. Е. Степанюк

*Проведено сравнение методов геттерирования при изготовлении фотодиодов на основе высокоомного кремния ( $p-i-n$ -фотодиодов). Эффективность геттерирования оценивалась по величине обратных токов фотодиодов при рабочем напряжении 200 В. Лучшие результаты получены на образцах с геттерированием методом диффузионного легирования фосфором нерабочей стороны пластины. Плотность обратных токов составила  $(2,3-3,4) \times 10^{-9}$  А/мм<sup>2</sup>.*

PACS: 85.60.Dw

*Ключевые слова:* кремний, геттерирование, диффузия, фосфор, ионная имплантация, аргон, хлор.

### Введение

В качестве исходного материала для изготовления  $p-i-n$ -фотодиодов используется высокочистый кремний, выращенный методом бестигельной зонной плавки. Величина времени жизни неосновных носителей заряда, которая является основным параметром, определяющим характеристики фотодиодов, в этом материале составляет 300—800 мкс. Однако известно, что в ходе процесса изготовления полупроводниковых приборов происходит постоянное увеличение концентрации дефектов: вакансий, примесных атомов тяжелых металлов (меди, железа, золота и др.) и их кластеров [1]. Эти дефекты создают генерационно-рекомбинационные центры в запрещенной зоне кремния [2, 3], которые приводят к снижению времени жизни неосновных носителей заряда и возрастанию обратных токов фотодиодов. Для исключения нежелательного влияния таких микродефектов широко используются различные методы геттерирования [4].

В данной работе проводилась сравнительная оценка методов геттерирования нарушенными слоями, созданными диффузией фосфора и ионной имплантацией аргона и хлора на нерабочей стороне пластин.

### Эксперимент

Фотодиоды изготавливались на кремниевых пластинах  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением 7000—10000 Ом·см и толщиной  $650 \pm 30$  мкм. Все пластины до операции геттерирования проводились одновременно по единому производственному маршруту, включавшему в себя высокотемпературные операции термического окисления, загонки и разгонки фосфора для формирования  $n^+p$ -перехода. После этого пластины разделялись на группы. В первой проводилась диффузия фосфора в нерабочую сторону пластины. Поверхностное сопротивление при этом составило  $R_s = 4,5$  Ом/кв. Во второй и третьей группах нерабочая сторона пластин легировалась аргоном с энергией  $E = 100$  кэВ и дозами  $D = 2 \times 10^{15}$  и  $1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> соответственно, в четвертой — хлором с  $E = 100$  кэВ и  $D = 2 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. После имплантации проводился термический отжиг в атмосфере азота при температуре 1000 °С в течение 30 минут пластин первой, второй и третьей групп, и в течение часа — четвертой. Далее пластины всех групп опять одновременно подвергались одинаковым обработкам. После создания металлизации проводилось измерение темновых токов фоточувствительных элементов при напряжении 200 В. Результаты измерений представлены в таблице.

Будтолаев Андрей Константинович, ведущий инженер-технолог.

Евлентьев Иван Александрович, инженер.

Либерова Галина Владимировна, главный специалист.

Сиваченко Сергей Дмитриевич, ведущий инженер-электронщик.

Степанюк Владимир Евгеньевич, начальник участка. АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (499) 374-94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2015 г.

© Будтолаев А. К., Евлентьев И. А., Либерова Г. В., Сиваченко С. Д., Степанюк В. Е., 2015

Таблица

Метод геттерирования, режимы	№ группы	Плотность темнового тока, нА/мм <sup>2</sup> U = 200 В
Диффузия фосфора в обратную сторону пластины. T = 1000 °C, R <sub>S</sub> = 4,5 Ом/квадрат, t = 30 минут	I	2,3—3,4
Ионная имплантация аргона, E = 100 кэВ, D = 2×10 <sup>15</sup> см <sup>-2</sup> , отжиг T = 1000 °C, N <sub>2</sub> , t = 30 минут	II	7,9—9,6
Ионная имплантация аргона, E = 100 кэВ, D = 1×10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup> , отжиг T = 1000 °C, N <sub>2</sub> , t = 30 минут	III	16,9—47,8
Ионная имплантация хлора, E = 100 кэВ, D = 2×10 <sup>15</sup> см <sup>-2</sup> , отжиг T = 1000 °C, N <sub>2</sub> , t = 60 минут	IV	11,3—19,7

Полученные данные показывают, что величина плотности темновых токов минимальна у образцов с геттерированием диффузией фосфора.

### Результаты и обсуждение

Известно [1], что диффузионное легирование фосфором с высокой поверхностной концентрацией эффективно не только за счет образования дислокационной сетки несоответствия, но и благодаря повышенной растворимости примесей, например, таких как Fe, Cu, и Au, в n<sup>+</sup>-слое кремния. Механизм геттерирования диффузией фосфора детально рассмотрен в работе [5]. Кроме того, при загонке фосфора на поверхности кремния образуется фосфоро-силикатное стекло, которое также обладает геттерирующими свойствами [1]. Вероятно, именно этими факторами обусловлены полученные данные по группе I.

Результаты по группам II и III подтверждают выводы, представленные в работе [6], о немотонности дозовой зависимости эффективности процесса геттерирования ионноимплантированными слоями. Повышенные значения плотности темновых токов у образцов групп II и III по сравнению с образцами группы I можно объяснить частичным отжигом самих нарушенных слоев в процессе геттерирования. Кроме того, следует отметить большой разброс по величине плотности темновых токов у образцов группы III. Тем не менее, метод геттерирования группы II может быть эффективен в том случае, когда диффузия фосфора не совместима с другими технологическими операциями изготовления приборов.

Известно, что имплантация ионов хлора в термическую пленку SiO<sub>2</sub> с последующим низкотемпературным отжигом при температуре порядка 800 °C значительно снижает плотность поверхностных состояний на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub>, что объясняется химическим геттерированием быстро

диффундирующих примесей и снижением концентрации дефектов упаковки [6].

Данные по группе IV свидетельствуют о геттерирующем воздействии ионов хлора не только на границу раздела, но и на объем кремния. Более высокие значения темновых токов образцов группы IV по сравнению с образцами группы II, вероятно, связаны с тем, что объем нарушенной кристаллической структуры кремния в случае имплантации ионов хлора меньше, чем при имплантации ионов аргона.

### Заключение

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Показано, что при изготовлении p-i-n-фотодиодов наиболее эффективен метод геттерирования диффузией фосфора в нерабочую сторону пластины.
2. В тех случаях, когда диффузия фосфора не совместима с другими технологическими операциями, приемлем метод имплантации ионов аргона с энергией E = 100 кэВ и дозой D = 2×10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>.
3. Ионы хлора обладают геттерирующим воздействием, но уступают ионам аргона.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. — М.: Мир, 1984.
2. Kang I. S., Schrocker D. K. // J. Applied Physics. 1989. V. 65. P. 2974.
3. Климанов Е. А., Кулыманов А. В., Лисейкин В. П. Способ изготовления p-i-n-фотодиода. А.с. № 680358 от 29.02.1976.
4. Немцев Г. З., Пекарев А. И., Чистяков Ю. Д., Бурмистров А. Н. // Зарубежная электронная техника. 1981. № 11. С. 3.
5. Климанов Е. А. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 133.
6. Струков Ф. А., Стоянова И. Г., Астахов В. П. // Прикладная физика. 1997. № 6. С. 98.

## The efficiency of the methods of the photodiodes gettering on the basis of the high-resistivity silicon

*A. K. Budtolaev, I. A. Evlent'ev, G. V. Liberova, S. D. Sivachenko, and V. E. Stepanyuk*

Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*Received November 27, 2015*

*Consideration is given to a comparison of methods for gettering in the manufacture of photodiodes on the basis of high-resistivity silicon (p-i-n-photodiodes). Efficacy of gettering was evaluated on the reverse currents of photodiodes at an operating voltage of 200 V. The best results were obtained for samples with gettering by diffusion doping with phosphorus trailing side of the plate. The density of the reverse currents was  $(2.3\text{--}3.4)\times 10^{-9}$  A/mm<sup>2</sup>.*

PACS: 85.60.Dw

*Keywords:* silicon, gettering, diffusion, phosphorus ion implantation, argon, chlorine.

### REFERENCES

1. K. Ravy, *Defects and Impurities in Semiconductor Silicon* (Mir, Moscow, 1984) [in Russian].
2. I. S. Kang and D. K. Schrocker, *J. Applied Physics* **65**, 2974 (1989).
3. E. A. Klimanov, A. V. Kulymanov, and V.P. Liseikin, USSR Invention Certificate No. 680358. February 29, 1976.
4. G. E. Nemtsev, A. I. Pekarev, Yu. D. Chustyakov, and A. N. Burmistrov, *Zarub. Elektron. Tekhnika*, No. 11, 3 (1981).
5. E. A. Klimanov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 133 (2011).
6. F. A. Strukov, I. G. Stoyanova, and V. P. Astakhov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 98 (1997).

\* \* \*