

УДК 621.315.5

PACS: 85.30.-z, 85.60.-q

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-511-514

EDN: JDQKGM



## Влияние кислородных преципитатов на темновой ток кремниевых фотодиодов

М. Н. Вильдяева, С. С. Демидов, Ю. С. Демидова, Е. А. Климанов,  
П. С. Скрёбнева, У. Д. Хлызова

*Проведено сравнение распределений темновых токов, времени жизни неосновных носителей заряда и микродефектов, выявляемых селективным травлением. Показано, что основной причиной повышенных темновых токов и пониженной фоточувствительности в кремниевых фотодиодах, изготовленных на кремнии  $n$ -типа, изготовленным методом Чохральского, являются генерационно-рекомбинационные процессы на мелких окисных преципитатах.*

*Ключевые слова:* темновой ток, время жизни носителей заряда, фигуры травления, окисные преципитаты, дефекты упаковки.

### Введение

В приборах, изготавливаемых на кремнии, выращенным методом Чохральского, существует проблема влияния кислородных (окисных) преципитатов (ОП) и связанных с ними микродефектов (ОМД) на вольтамперные характеристики (ВАХ)  $p$ - $n$ -переходов [1–3]. В фоточувствительных приборах (фотодиоды, солнечные элементы) ОП также снижают фотосигнал из-за уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда ( $\tau$ ) и, соответственно, диффузионной длины [4].

Несмотря на большое количество работ по данной тематике, существуют различные мнения о типах ОМД, ответственных за эти эффекты, включая: окисные преципитаты (ОП) [1–5], дефекты упаковки (ДУ) [6], комплексы окисный преципитат-дислокация [1].

В настоящей работе оценивается влияние ОМД на ВАХ кремниевых фотодиодов, изготовленных на кремнии  $n$ -типа с высоким содержанием кислорода.

### Эксперимент

На пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si)  $n$ -типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом·см и ориентацией (100) изготавливались фоточувствительные элементы (ФЧЭ) с размером фоточувствительных площадок 1,4×1,4 мм<sup>2</sup>. Технологический цикл изготовления включал высокотемпературные операции окисления, диффузии бора и фосфора (950–1050 °С) с последующим медленным охлаждением с печью до температуры около 400 °С (скорость охлаждения ≤ 3 К/мин).

На изготовленных образцах фоточувствительных элементов (ФЧЭ) измерялось распределение темновых токов ( $I_d$ ) по площади пла-

Вильдяева Мария Николаевна<sup>1</sup>, инженер 1 кат.

Демидов Станислав Стефанович<sup>1</sup>, с.н.с.

Демидова Юлия Станиславовна<sup>1</sup>, инженер 2 кат.

Климанов Евгений Алексеевич<sup>1</sup>, гл.н.с., профессор, д.т.н.

E-mail: klimanov3@mail.ru

Скрёбнева Полина Станиславовна<sup>1</sup>, инженер 2 кат.

Хлызова Ульяна Дмитриевна<sup>1,2</sup>, студентка, инженер.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

<sup>2</sup> НИТУ «МИСиС»

Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 9.11.2023

Принята к публикации 28.11.2023

© Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Демидова Ю. С.,  
Климанов Е. А., Скрёбнева П. С., Хлызова У. Д., 2023

стин при рабочих напряжениях 0,01 В и 1,0 В. Измеренные ФЧЭ делились на три группы в соответствии со значениями темновых токов при указанных напряжениях (таблица).

Таблица

Группа	Темновой ток при 0,01 В, пА	Темновой ток при 1 В, пА
А	< 5	< 100
Б	< 5	> 100
В	> 10	> 100

После удаления термического окисла проводилось селективное травление пластин в растворе Secco [8] для выявления плотности распределения ОМД (рис. 1б). Время травления составляло 10 минут, что соответствовало толщине стравленного слоя 15 микрон.

На изготовленных пластинах измерялось распределение времени жизни неосновных носителей заряда н.н.з. ( $\tau$ , н.н.з) методом спада фотопроводимости  $\mu$ -PCD на установке Semilab Model WT-2000 с использованием излучения с длиной волны 0,9 мкм, а также в отдельных точках на длине волны 1,06 мкм для сравнения полученных результатов.

### Результаты и обсуждение

Проведенное сравнение полученных распределений токов  $I_d$  (рис. 1а) и плотности микродефектов  $N_{\text{омд}}$  (рис. 1б) по массиву из приблизительно 450 ФЧЭ показывает корреляцию между этими распределениями: для 97,2 % ФД наблюдается совпадение больших значений  $I_d$  с высокой плотностью дефектов на их площади  $N_{\text{омд}} \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ , то есть практически все ФЧЭ групп Б и В имеют области с большой плотностью дефектов. При этом 15 % ФЧЭ с низкими токами (группа А) имеют дефектные области, но у 95 % из них дефектные области занимают только часть площади. Следовательно, не все области большой плотности дефектов вызывают увеличение токов.

Наблюдается также корреляция в пространственных распределениях  $N_{\text{омд}}$ ,  $I_d$  и времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau$  (рис. 1 и 2).



а)



б)

Рис. 1. а) – распределение темновых токов:

□ – диоды группы А; ■ – диоды группы Б; ■ – диоды группы В;

б) – распределение плотности дефектов:

□ – малая плотность дефектов (КП);

■ – дефекты (КП) занимают всю площадь ФЧЭ;

■ – дефекты (КП) занимают часть площади ФЧЭ

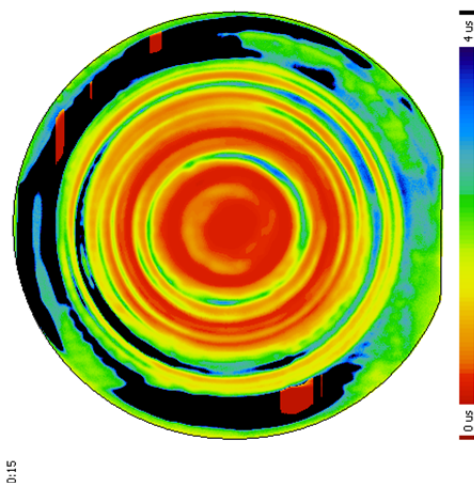
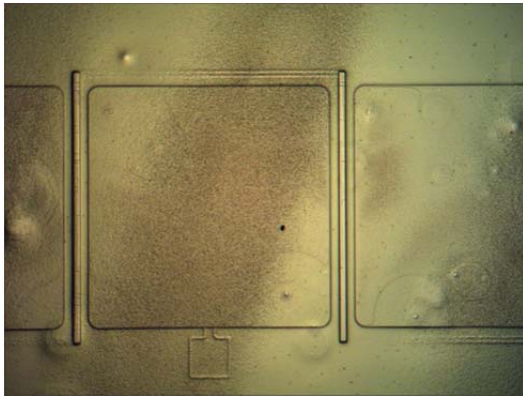
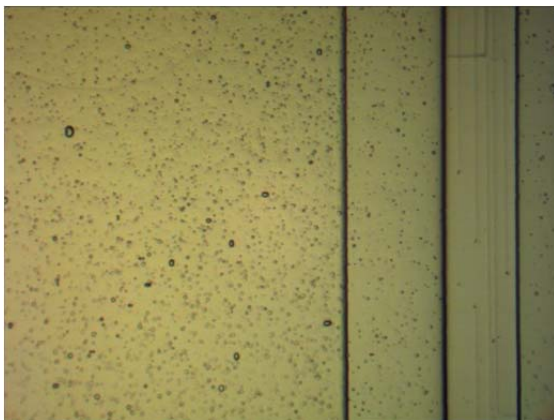


Рис. 2. Пространственное распределение времени жизни неосновных носителей заряда по пластине

На картинах селективного травления (рис. 3а) наблюдаются два типа ямок травления: относительно крупные фигуры травления, соответствующие дефектам упаковки (ДУ), и мелкие ( $\leq 1$  мкм). На рис. 3б показан вид ямок травления в области их большой плотности, из которого следует, что большинство из них соответствует кислородным преципитатам (КП) небольшого размера [9]. Концентрация ямок травления  $N_{\text{омд}}$  в областях высокой плотности достигает  $10^9$  см<sup>-3</sup> и практически равна нулю в бездефектных областях, в то время как плотность ДУ даже в дефектных областях в 10–15 раз ниже и изменяется по площади пластины только в несколько раз. При этом на ФЧЭ с низкими уровнями токов (группа А) наблюдаются только ямки травления, соответствующие ДУ.



а)



б)

Рис. 3. Распределение фигур травления микродефектов по площади дефектного ФЧЭ: а) – общий вид; б) – увеличенное изображение

Приведенные данные позволяют предположить, что основной причиной увеличения

темновых токов и уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда являются процессы генерации-рекомбинации носителей заряда на небольших кислородных преципитатах (КП). Дополнительным свидетельством слабого влияния ДУ на  $I_d$  и  $\tau$  служат данные об относительно высоких значениях  $\tau$  в  $n^+$ -областях с высокой концентрацией фосфора, где наблюдается высокая плотность ДУ [10].

Плотность темнового тока в ФЧЭ группы Б, имеющих низкие токи при 0,01 В, резко возрастает с увеличением рабочего напряжения (1 В), что приводит к резкому увеличению числа дефектных ФЧЭ и может объясняться увеличением количества преципитатов в области пространственного заряда (ОПЗ)  $p$ - $n$ -перехода при увеличении ее ширины с ростом напряжения.

В работе [10] была установлена корреляция между пространственными распределениями темновых токов, фоточувствительности и времени жизни неосновных носителей заряда, а также качественная корреляция между распределениями этих величин и распределением фигур травления ОМД. Результаты настоящей работы указывают на прямую связь большой плотности темновых токов  $I_d$  и низких значений времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau$  с высокой концентрацией преципитатов  $N_{\text{омд}}$ . Данный результат свидетельствует об основной роли мелких окисных преципитатов в увеличении темновых токов и снижении фоточувствительности в ФЧЭ, изготовленных на CZ-Si, что согласуется с выводами работ [1, 2].

## Выводы

С помощью сравнения пространственных распределений темновых токов, времени жизни неосновных носителей заряда и микродефектов, выявляемых селективным травлением, показано, что основной причиной повышенных темновых токов и пониженной фоточувствительности в кремниевых фотодиодах, изготовленных на кремнии  $n$ -типа, выращенного методом Чохральского, являются процессы генерации-рекомбинации на мелких окисных преципитатах, декорированных металлическими примесями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vanhellefont J., Simoen E., Kaniava A., Lbezny M., Claeys C. / Journal of Applied Physics. 1995. Vol. 77. № 11. P. 5669.
2. Murakami Y., Satoh Y., Furuya H., Shingyouji T. / Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 84. № 6. P. 3175.
3. Sopori B., Basnyat P., Devayajamam S. / IEEE Journal of photovoltaics. 2017. Vol. 7. № 1. P. 97.
4. Hwang J. M., Schroder D. K. / Journal of Applied Physics. 1986. Vol. 59. № 7. P. 2476.
5. Murphy J. D., Al-Amin M., Bothe K., Olmo M., Voronkov V. V., Falster R. J. / Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118. P. 215706.
6. Zhou Chun-lan, Wang Wen-Jing, Li Hai-Ling, Zhao Lei, Diao Hong-Wei, Li-Xu-Dong / Chinese Physical Letters. 2008. Vol. 25. № 8. P. 3005–3008.
7. Le Donne A., Binetti S., Folegatti V., Coletti G. / Applied Physics Letters. 2016. Vol. 109. P. 033907.
8. Secco d'Aragona F. / J. Electrochemical society. 1972. Vol. 119. № 7. P. 948.
9. SEMI MF 1809-0704. Guide for selection and use of etching solution to delineate structural defects in silicon.
10. Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Фокина А. С. / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 3. С. 282–287.

PACS: 85.30.-z, 85.60.-q

**Influence of oxygen precipitates on photodiodes dark current**

*M. N. Vil'dyaeva<sup>1</sup>, S. S. Demidov<sup>1</sup>, Yu. S. Demidova<sup>1</sup>, E. A. Klimanov<sup>1</sup>,  
P. S. Skrebneva<sup>1</sup> and U. D. Khlyzova<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Orion R&P Association, JSC

9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

E-mail: klimanov3@mail.ru

<sup>2</sup>National University of Science and Technology MISiS

Bd. 1, 4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia

Received 9.11.2023; accepted 28.11.2023

***Strong correlation was observed between ring-like patterns in distributions silicon photodiodes dark current, carrier lifetime and microdefect etching pits. From our results It can be reasonably deduced that ring-like patterns in distribution silicon photodiodes dark current and carrier lifetime are related to oxide precipitates.***

***Keywords:*** dark current, lifetime of charge carriers, etching patterns, oxide precipitates, packaging defects.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-511-514

## REFERENCES

1. Vanhellefont J., Simoen E., Kaniava A., Lbezny M. and Claeys C., Journal of Applied Physics **77** (11), 5669 (1995).
2. Murakami Y., Satoh Y., Furuya H. and Shingyouji T., Journal of Applied Physics **84** (6), 3175 (1998).
3. Sopori B., Basnyat P. and Devayajamam S., IEEE Journal of photovoltaics **7** (1), 97 (2017).
4. Hwang J. M. and Schroder D. K., Journal of Applied Physics **59** (7), 2476 (1986).
5. Murphy J. D., Al-Amin M., Bothe K., Olmo M., Voronkov V. V. and Falster R. J., Journal of Applied Physics **118**, 215706 (2015).
6. Zhou Chun-lan, Wang Wen-Jing, Li Hai-Ling, Zhao Lei, Diao Hong-Wei and Li-Xu-Dong, Chinese Physical Letters **25** (8), 3005–3008 (2008).
7. Le Donne A., Binetti S., Folegatti V. and Coletti G., Applied Physics Letters **109**, 033907 (2016).
8. Secco d'Aragona F., J. Electrochemical society **119** (7), 948 (1972).
9. SEMI MF 1809-0704. Guide for selection and use of etching solution to delineate structural defects in silicon.
10. Vil'dyaeva M. N., Demidov S. S., Klimanov E. A., Lyalikov A. V. and Fokina A. S., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **5** (3), 282–287 (2017) [in Russian].