

**Влияние режимов диффузионных процессов на время жизни неосновных носителей заряда в кремнии, выращенном методом Чохральского***М. Н. Вильдяева, Е. А. Климанов, М. А. Нури, П. С. Скрбнева*

*Исследована зависимость значений ( $\tau$ ) и однородности распределения времени жизни ( $\Delta\tau/\tau$ ) неосновных носителей заряда (ННЗ) в кремнии *n*-типа от поверхностного сопротивления диффузионного слоя фосфора и показано отсутствие такой зависимости при диффузии бора. Показано, что увеличение концентрации фосфора приводит к увеличению времени жизни  $\tau$  ННЗ и его неоднородности  $\Delta\tau/\tau$  и сопровождается изменениями в размерах и плотности микродефектов. Гомогенизирующая термическая обработка в кислороде при 1100 °С (*tabula rasa*) была использована для уменьшения неравномерности в распределении времени жизни  $\Delta\tau/\tau$  ННЗ при последующих диффузионных процессах при сохранении достаточно высоких значений  $\tau$ . Обсуждаются механизмы генерации микродефектов при диффузионных процессах.*

*Ключевые слова:* время жизни неосновных носителей заряда, кислородные преципитаты, диффузия бора и фосфора, микродефекты.

**Ссылка:** Вильдяева М. Н., Климанов Е. А., Нури М. А., Скрбнева П. С. // Прикладная физика. 2019. Т. 7. № 2. С. 46.

**Reference:** M. N. Vil'dyaeva, E. A. Klimanov, M. A. Nuri, and P. S. Skrebneva, Prikl. Fiz., No. 2, 46 (2019).

**Введение**

Известно, что в кремнии с высоким содержанием кислорода, выращенном по методу Чохральского (Cz-Si) в результате проведения термических процессов при изготовлении приборов наблюдается снижение среднего значения времени жизни  $\tau$  неосновных носителей заряда (ННЗ), а также неоднородности в

его распределении по площади пластин  $\Delta\tau/\tau$ , наиболее часто имеющие вид кольцевых областей [1–3].

Оба эффекта негативно влияют на параметры солнечных элементов [1–4] и фотодиодов [5] и объясняются рекомбинацией ННЗ на неоднородно распределенных преципитатах кислорода (ПК) и связанных с ними микродефектах (МД), а именно, дислокациях и дефектах упаковки [4, 6]. Неоднородности в распределении указанных дефектов вызываются неоднородностями в распределении точечных дефектов (вакансий, межузельных атомов) и кислорода, возникающих из-за изменения параметров процесса выращивания слитков кремния [4].

Для уменьшения влияния ПК и МД в работах [7–9] предложен процесс предварительной гомогенизирующей термообработки (*tabula rasa*), приводящий к распаду зародышей кислородных преципитатов и уменьшению неоднородностей  $\Delta\tau/\tau$  при последующих термообработках (ТО) кремния.

Вильдяева Мария Николаевна<sup>1</sup>, инженер.  
Климанов Евгений Алексеевич<sup>1,2</sup>, гл.н.с., профессор,  
д.т.н.

Нури Марина Александровна, н.с.  
Скрбнева Полина Станиславовна<sup>1</sup>, инженер.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2019 г.

© Вильдяева М. Н., Климанов Е. А., Нури М. А., Скрбнева П. С., 2019

В ряде работ рассмотрено влияние температурных режимов ТО [10–12], включая диффузию фосфора [13], на  $\tau$ ,  $\Delta\tau/\tau$  и образование МД. Однако в приведенных работах практически не рассматривается влияние типа и концентрации примесей при диффузионных процессах.

Целью настоящей работы является определение влияния указанных параметров термических процессов, используемых при изготовлении фотодиодов, включая диффузию фосфора и бора, на  $\tau$ ,  $\Delta\tau/\tau$  и распределение МД в монокристаллическом кремнии *n*-типа.

### Эксперимент

Пластины монокристаллического кремния Cz-Si *n*-типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом см и ориентацией (100) химически обрабатывались и окислялись в парах воды при температуре 950 °С. С помощью фотолитографии в окисле формировались квадратные окна 2,4×2,4 мм. Пластины делились на 4 части, в которые проводилась диффузия фосфора или бора при различных температурах (925°–1060 °С) с последующим медленным охлаждением с печью до температуры около 400 °С (скорость охлаждения  $\leq 3$  К/мин.). Изменением режимов диффузии варьировалось поверхностное сопротивление диффузионных слоев  $R_s$ .

На аналогичных образцах проводилась имплантация в окна ионов аргона ( $Ar^+$ ), бора ( $B^+$ ) и фосфора ( $P^+$ ) с дозой (флюенсом)  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> с последующим отжигом в азоте и кислороде при 1000 или 1050 °С в течение 60 минут с тем же режимом охлаждения.

На части образцов перед процессами

диффузии или отжига проводилась предварительная термообработка (*tabula rasa*) при 1100 °С в течение 60 минут для проверки влияния этого процесса на  $\tau$ ,  $\Delta\tau/\tau$  при последующих ТО.

На изготовленных образцах измерялось распределение времени жизни  $\Delta\tau/\tau$  ННЗ методом спада фотопроводимости  $\mu$ -PCD на установке Semilab Model WT-2000 с использованием излучения с длиной волны 0,9 мкм и 1,06 мкм.

Для выявления распределения МД после удаления термического окисла проводилось травление пластин в полирующем растворе HF: HNO<sub>3</sub>: CH<sub>3</sub>COOH на глубину ~10 мкм для удаления диффузионного слоя и последующее селективное травление в растворе Secco [14].

### Результаты

#### Диффузия фосфора.

Влияние диффузии фосфора на распределение значений  $\tau$  по площади пластины и концентрацию МД ( $N_{MD}$ ) было рассмотрено в предыдущих работах [12, 13], где наблюдалось увеличение разброса времени жизни  $\Delta\tau/\tau$  ННЗ и увеличение размеров МД при диффузии фосфора с высокой концентрацией.

Приведенные на рис. 1 (*а, б, в*) и табл. 1 сравнительные данные при различных поверхностных сопротивлениях фосфора  $R_s$  указывают на определяющее влияние этого параметра на  $\tau$ ,  $\Delta\tau/\tau$  и процесс формирования МД: увеличение концентрации (уменьшение  $R_s$ ) приводит к увеличению значений  $\tau$ , разброса значений  $\Delta\tau/\tau$  и увеличению плотности МД ( $N_{MD}$ ).

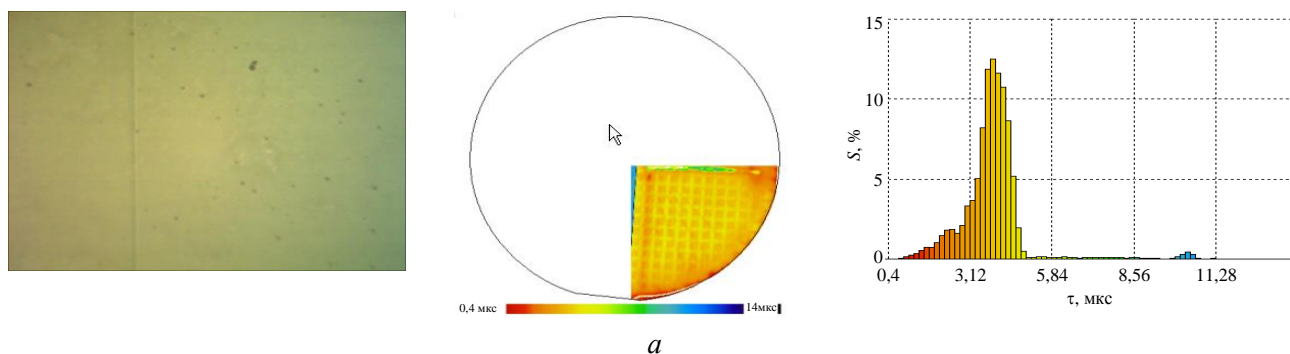


Рис. 1. Экспериментальные результаты. Ямки травления МД на границах диффузионных областей, распределения  $\tau$  по площади образцов  $S$ , гистограммы распределения  $\tau$ : а – фосфор  $R_s = 16$ –17 Ом.

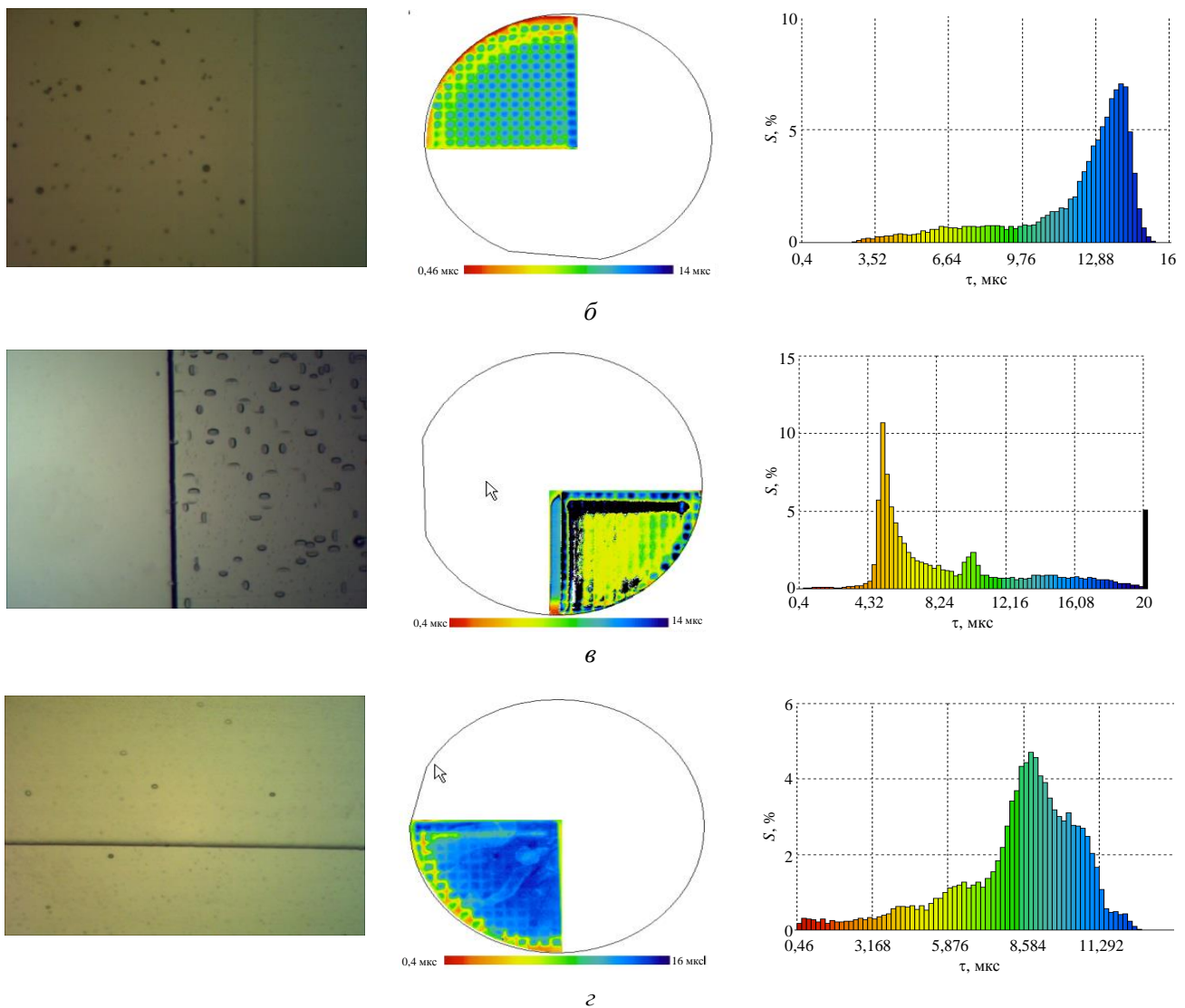


Рис. 1. Окончание. б – фосфор  $R_s = 10\text{--}10,5$  Ом, в – фосфор  $R_s = 1,7\text{--}2$  Ом, г – бор  $R_s = 6\text{--}7$  Ом.

### Диффузия бора.

В случае диффузии бора подобные зависимости  $\tau$ ,  $\Delta\tau/\tau$  и  $N_{\text{мд}}$  от  $R_s$  практически отсутствуют (см. рис. 1, г, табл. 1). При значительных изменениях режимов диффузии (от  $T = 1000$  °С,  $R_s = 25\text{--}30$  Ом/□ до  $T = 1060$  °С,  $R_s = 6\text{--}7$  Ом/□) существенного увеличения плотности МД и неоднородности в распределении  $\tau$  не наблюдается.

### Отжиг имплантированных слоев.

При отжиге имплантированных слоев аргона, бора и фосфора при температурах 1000 и 1050 °С наблюдаются зависимости от вида примеси, аналогичные диффузионным процессам: максимальные значения  $\tau$  достигаются для примеси фосфора, но при этом наблюдаются и максимальные значения раз-

броса  $\Delta\tau/\tau$ . Следует также отметить значительно меньшие плотности выявляемых селективным травлением МД в сравнении с диффузионными процессами, а также зависимость от атмосферы: при отжиге в азоте  $N_{\text{мд}}$  заметно меньше в сравнении с кислородом.

### Предварительное геттерирование.

Процесс предварительного геттерирования (создание геттерирующего слоя перед проведением ТО) нарушенным слоем, создаваемым имплантацией ионов аргона  $\text{Ag}^+$ , приводит к увеличению  $\tau$  (на ~30 %) при последующей ТО (950 °С, влажный кислород) в части образца, подвергнутой имплантации, но не влияет на пространственное распределение  $\tau$  и концентрацию МД (см. рис. 2, табл. 2).

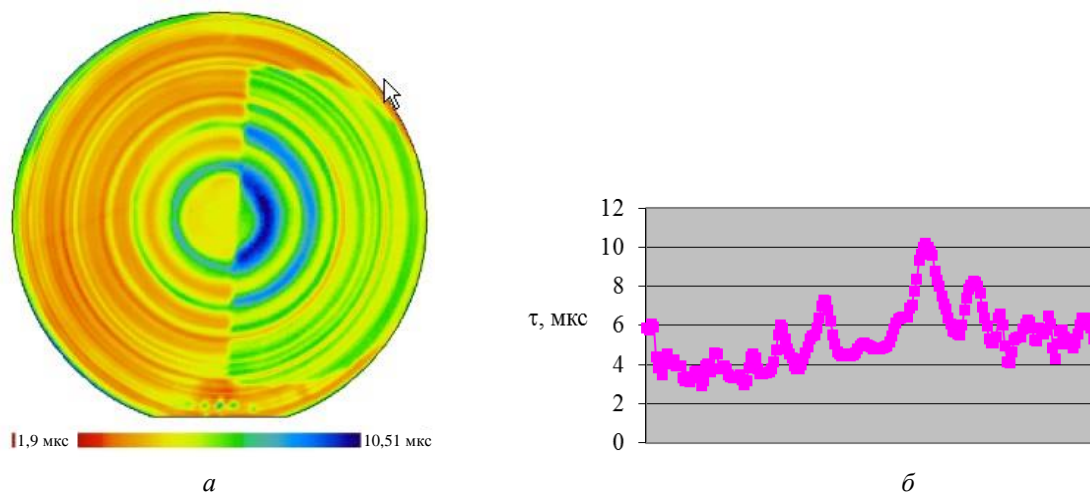


Рис. 2. Влияние имплантации аргона на время жизни при последующей ТО при 950 °С: а – распределение  $\tau$  по площади образца, б – распределение  $\tau$  по диаметру.

Таблица 1

Влияние диффузии фосфора и бора

Процесс	$T, ^\circ\text{C}$	$R_s, \text{Ом}/\square$	$\tau, \text{мкс}$	$\tau_{\text{max}}, \text{мкс}$	$\Delta\tau/\tau, \%$	$N_{\text{мл}}, \text{см}^{-2}$
диффуз. фосфора	950	16–17	3,9	16,7	32,3	$8,4 \times 10^4$
диффуз. фосфора	950	10–10,5	8,4	22,5	27,3	$1,9 \times 10^5$
диффуз. фосфора	1050	1,7–2,0	10,2	119,5	85,0	$2,2 \times 10^5$
диффуз. бора	1060	6–7	12,0	16,1	22,7	$2,4 \times 10^4$

Таблица 2

Влияние предварительного геттерирования

Процесс	$T, ^\circ\text{C}$	Доза, $\text{см}^{-2}$	$\tau, \text{мкс}$	$\tau_{\text{max}}, \text{мкс}$	$\Delta\tau/\tau, \%$	$N_{\text{мл}}, \text{см}^{-2}$
Ион.легир. $\text{Ag}^+$	1050, $\text{N}_2$	$10^{15}$	10,4	14,7	32,7	$0,43 \times 10^4$
	1050, $\text{O}_2$	– « –	9,4	18,6	28,4	$1,8 \times 10^4$
	1000, $\text{N}_2$	– « –	10,09	15,9	25,6	$0,95 \times 10^4$
Ион.легир. $\text{B}^+$	1050, $\text{N}_2$	– « –	12,1	25,0	38,6	$0,73 \times 10^4$
	1050, $\text{O}_2$	– « –	14,6	26,1	33,2	$2,0 \times 10^4$
	1000, $\text{N}_2$	– « –	11,3	22,0	35,15	$1,0 \times 10^4$
Ион.легир. $\text{P}^+$	1050, $\text{O}_2$	– « –	11,0	27,5	37,6	$3,8 \times 10^4$
	1050, $\text{N}_2$	– « –	13,6	38,1	42,4	$1,0 \times 10^4$
	1000, $\text{N}_2$	– « –	13,1	> 100	91,65	$1,6 \times 10^4$

**Предварительная термообработка (tabula rasa).**

Предварительная термообработка при  $T = 1100 ^\circ\text{C}$  в кислороде приводит к увеличению  $\tau$  и заметному снижению разброса в ее величине при последующих процессах диффузии (табл. 3).

Однако, полученные результаты также показывают, что предварительная термообработка при высоких температурах (*tabula rasa*) в нашем случае не удаляет полностью центров зарождения кислородных преципитатов. Последующая термообработка при  $650 ^\circ\text{C}$  приводит к значительному увеличению  $\tau$  и неоднородности в распределении  $\Delta\tau/\tau$  (табл. 3).

Таблица 3

## Влияние предварительной термообработки

Параметр	Исходный образец	ТО 1100 °С	ТО 650 °С	Диф. бора, 1000 °С	Диф. фосфора, 1050 °С
$\tau$ , мкс	№ 1 13,8	9,2	28,2	12,8	10,5
	№ 2 18,5	10,1	32,4	16,0	22,5
$\Delta\tau/\tau$ , %	№ 1 6,0	14,7	24,7	31,5	42,0
	№ 2 7,3	20,2	42,3	32,7	41,2

## Обсуждение результатов

Полученные результаты сводятся к следующим основным факторам.

1. Данные, полученные для диффузионных процессов (рис. 1, *a–в*, табл. 1), указывают на существование концентрационной зависимости при диффузии фосфора для значений  $\tau$ ,  $\Delta\tau/\tau$ , а именно, их рост с увеличением дозы фосфора в  $n^+$ -слое. При этом существует пороговое значение поверхностного сопротивления  $R_s \sim 10 \text{ Ом}/\square$ , ниже которого эффект наблюдается, а при больших значениях  $R_s$  выражен слабо. При диффузии бора подобной зависимости от  $R_s$  не наблюдается. Следовательно, существует значительное различие во влиянии донорной и акцепторной примеси на  $\tau$  и  $\Delta\tau/\tau$ .

2. Увеличение дозы фосфора при диффузии сопровождается также увеличением плотности МД (до  $N_{\text{мд}} \sim 2 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$  при  $R_s \sim 2 \text{ Ом}/\square$ ) и изменением их типа (рис. 1, *a–в*): при  $R_s > 10 \text{ Ом}/\square$  наблюдаются почти круглые ямки травления (дефекты первого типа), а при  $R_s < 10 \text{ Ом}/\square$  – в виде полуэллипсов, соответствующие объемным и поверхностным дефектам упаковки (ДУ) соответственно [19].

Наименьшая плотность МД  $N_{\text{мд}} \sim 6,8 \times 10^3 \text{ см}^{-2}$  при максимальной дозе фосфора  $R_s \sim 2 \text{ Ом}/\square$  наблюдалась на кремнии  $p$ -типа с низкой концентрацией кислорода ( $< 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), выращенного методом зонной плавки (FZ-Si). Резкое отличие в плотностях МД для Cz-Si и Fz-Si при близких значениях  $R_s$  свидетельствует о том, что высокая концентрация фосфора является недостаточным условием для образования ДУ.

Диффузия бора при сравнимых значениях дозы (концентрации) приводит к значительно

меньшим плотностям МД с круглыми ямками травления (дефекты первого типа).

3. При отжиге имплантированных слоев выявляются МД только первого типа, причем их плотность больше при отжиге в кислороде, но значительно меньше, чем при диффузии фосфора при той же температуре. Следовательно, один процесс окисления при диффузии или отжиге в кислороде не приводит к высокой плотности ДУ. Очевидно, выявляемые ДУ связаны с существованием КП или их зародышей в Cz-Si.

Полученные результаты могут быть объяснены с помощью модели, предложенной в работе [16], по которой высокая концентрация легирующей примеси при выращивании слитков ведет к увеличению концентрации вакансий в случае донорной примеси и межузельных атомов в случае акцепторов. Выводы работы подтверждены при выращивании сильнолегированных образцов кремния [17–20].

В соответствии с моделью, увеличение концентрации донорной примеси (фосфора) в диффузионном слое должно приводить к увеличению концентрации вакансий в объеме, что приводит к росту КП [17] и последующему их превращению в ДУ [18]. Поскольку зародыши и мелкие КП в исходных образцах распределены неравномерно, то их усиленный рост в областях воздействия диффузионного слоя приводит к увеличению неравномерности в их распределении. Одновременно происходит геттерирование быстро диффундирующих примесей  $n^+$ -слоем и КП (внутреннее геттерирование), что приводит к увеличению средних значений  $\tau$ , но одновременно и к увеличению  $\Delta\tau/\tau$ . При диффузии бора увеличивается концентрация межузельных атомов и уменьшается рост КП, что приводит к меньшей неравномерности  $\Delta\tau/\tau$ .

Предварительный отжиг при 1100 °С (*tabula rasa*) значительно снижает неравномерность в распределении времени жизни  $\Delta\tau/\tau$  ННЗ при последующих диффузионных процессах при сохранении достаточно высоких значений  $\tau$  (см. табл. 3), что согласуется с выводами работ [7–9] о снижении концентрации центров зарождения преципитатов кислорода в результате отжига.

### Заключение

Показано, что на величину времени жизни  $\tau$  неосновных носителей заряда (ННЗ), неравномерности  $\Delta\tau/\tau$ , концентрации и типа МД при диффузионных процессах влияют не только температура, но и вид примеси и ее концентрация. Приведенные результаты показывают сильное влияние концентрации фосфора при значениях больше  $(2-4) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (соответственно  $R_s < 10 \text{ Ом}/\square$ ) на концентрацию и размеры КП и более слабое влияние в случае диффузии бора.

Существует пороговая величина дозы фосфора ( $R_s \sim 10 \text{ Ом}/\square$ ), соответствующая поверхностной концентрации  $(2-4) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , при которой наблюдается резкое увеличение значений  $\tau$ ,  $\Delta\tau/\tau$  и концентрации ДУ.

Полученные результаты можно объяснить одновременным влиянием увеличения концентрации вакансий на размеры и плотность кислородных преципитатов и геттерирования металлических примесей диффузионными областями с высокой концентрацией фосфора ( $R_s < 10 \text{ Ом}/\square$ ), что согласуется с результатами работ по выращиванию слитков с высоким уровнем легирования бором, фосфором и мышьяком.

Предварительный отжиг при 1100 °С значительно снижает неравномерность в распределении времени жизни  $\Delta\tau/\tau$  ННЗ при последующих диффузионных процессах при сохранении достаточно высоких значений  $\tau$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chun-lan Zhou, Wen-Jing Wang, Hai-Ling Li, Lei Zhao, Hong-Wei Diao, LI-Xu-Dong // Chinese Physical Letters. 2008. Vol. 25. No. 06. P. 3005.
2. Haunschild J., Reis I. T., Geilker J., Rein S. // Physica Status Solidi RRL. 2011. No. 5–6. P. 199.
3. Le Donne A., Binetti S., Folegatti V., Coletti G. // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 109. P. 033907.
4. Murphy J. D., McGuire R. E., Bothe K., Voronkov V. V., Falster R. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2014. Vol. 120. P. 402.
5. Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Фокина А. С. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 3. С. 282.
6. Murphy J. D., Al-Amin M., Bothe K., Olmo M., Voronkov V. V., Falster R. J. // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118. No. 21. P. 215706.
7. Falster R. J., Cornara M., Gombaro D., Ohno M. // Solid State Phenom. 1997. Vol. 57–58. P. 123.
8. Basnet R., Rougieux F. E., Sun C., Phang S. P., Samundsett C., Einhaus R., Degoulange J., Macdonald D. // IEEE journal of photovoltaics. 2018. Vol. 8. No. 4. P. 990.
9. LaSalvia V., Yossef A., Jensen M. A., Looney E. E., Nemeth W., Page M., Nam W., Buonassisi T., Stradins P. Tabula Rasa for n-Cz silicon-based photovoltaics / Proc. Photovolt. Res. Appl., 2018. P. 1–8.
10. Hasebe M., Takeoka Y., Shinoyama S., Naito S. // Japanese Journal of Applied Physics. 1989. Vol. 28. P. L1999–L2002.
11. Marsden K., Sadamitsu S., Yamamoto T., Shigematsu T. // Japanese Journal of Applied Physics. 1995. Vol. 34. P. 2974.
12. Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Фокина А. С. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 54.
13. Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Скрёбнева П. С. // Прикладная физика. 2018. № 3. С. 33.
14. Secco d'Aragona F. // J. Electrochemical Society. 1972. Vol. 119. No. 7. P. 948.
15. SEMI MF1809-0704, Guide for selection and use of etching solution to delineate structural defects in silicon.
16. Voronkov V. V., Falster R. J. // J. Applied Physics. 2000. Vol. 87. No. 9-1. P. 4126.
17. Porrini M., Voronkov V. V., Giannattasio A. // ECS Transaction. 2018. No. 7. P. 73.
18. Mahajan S., Rozgonyi G. A., Brasen D. // Applied Physics Letters. 1977. Vol. 30. No. 2. P. 73.
19. Sugimura W., Ono T., Umeno S., Hourai M., Sueoka K. // ECS Transaction. 2006. Vol. 2. No. 2. P. 95.
20. Haringer S., Gambaro D., Porrini M. // Journal of Crystal Growth. 2017. Vol. 457. P. 325.

## The influence of diffusion processes on the lifetime of minority charge carriers in silicon grown by the Czochralski method

M. N. Vil'dyaeva<sup>1</sup>, E. A. Klimanov<sup>1,2</sup>, M. A. Nuri<sup>1</sup>, and P. S. Skrebneva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)  
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

Received April 25, 2019

*The effect of sheet resistance on an lifetime ( $\tau$ ) and microdefect concentration in the n-doped Czochralsky (Cz-Si) silicon after diffusion phosphorus and born at high temperatures has been investigated. It was indicated that increase in an phosphorus concentration promote increase in lifetime, inhomogeneous in lifetime and microdefect density. The increase in ring-like patterns size after phosphorus diffusion was observed. This ring patterns are weaker for boron diffusion. A high temperature step (tabula rasa) at 1100 °C in oxygen was used for mitigate inhomogeneous in the lifetime and microdefect density during subsequent diffusion treatments. The mechanisms for promoting generation of induced defects during diffusion treatments are discussed.*

*Keywords:* carrier lifetime, oxygen precipitates, diffusion of boron and phosphorus, microdefects.

### REFERENCES

1. Zhou Chun-lan, Wang Wen-Jing, Li Hai-Ling, Zhao Lei, Diao Hong-Wei, and Li-Xu-Dong, Chinese Physical Letters **25** (06), 3005 (2008).
2. J. Haunschild, I. T. Reis, J. Geilker, and S. Rein, Physica Status Solidi RRL, No. 5–6, 199 (2011).
3. A. Le Donne, S. Binetti, V. Folegatti, and G. Coletti, Applied Physics Letters **109**, 033907 (2016).
4. J. D. Murphy, R. E. McGuire, K. Bothe, V. V. Voronkov, and R. Falster, Solar Energy Materials and Solar Cells **120**, 402 (2014).
5. M. N. Vil'dyaeva, S. S. Demidov, E. A. Klimanov, A. V. Lyalikov, and A. S. Fokina, Usp. Prikl. Fiz. **5** (3), 282 (2017).
6. J. D. Murphy, M. Al-Amin, K. Bothe, M. Olmo, V. V. Voronkov, and R. J. Falster, Journal of Applied Physics **118**, 215706 (2015).
7. R. J. Falster, M. Cornara, D. Gombaro, and M. Ohno, Solid State Phenom. **57–58**, 123 (1997).
8. R. Basnet, F. E. Rougieux, C. Sun, S.P. Phang, C. Samundsett, R. Einhaus, J. Degoulange, and D. Macdonald, IEEE journal of fotovoltaics **8** (4), 990 (2018).
9. V. LaSalvia, A. Yossef, M. A. Jensen, E. E. Looney, W. Nemeth, M. Page, W. Nam, T. Buonassisi, and P. Stradins, in *Proc. Photovolt. Res. Appl.*, (2018), p.1-8.
10. M. Hasebe, Y. Takeoka, S. Shinoyama, and S. Naito, Japanese Journal of Applied Physics **28**, L1999-L2002 (1989).
11. K. Marsden, S. Sadamitsu, T. Yamamoto, and T. Shigematsu, Japanese Journal of Applied Physics **34**, 2974 (1995).
12. M. N. Vil'dyaeva, S. S. Demidov, E. A. Klimanov, A. V. Lyalikov, and A. S. Fokina, Prikl. Fiz., No. 6, 54 (2017).
13. M. N. Vil'dyaeva, E. A. Klimanov, A. V. Lyalikov, and P. S. Skrebneva, Prikl. Fiz., No. 3, 33 (2018).
14. F. Secco d'Aragona, J. Electrochemical Society **119** (7), 948 (1972).
15. SEMI MF1809-0704, *Guide for selection and use of etching solution to delineate structural defects in silicon*.
16. V. V. Voronkov and R. J. Falster, J. Applied Physics **87** (9-1), 4126 (2000).
17. M. Porrini, V. V. Voronkov, and A. Giannattasio, ECS Transaction, No. 7, 73 (2018).
18. S. Mahajan, G. A. Rozgonyi, and D. Brasen, Applied Physics Letters **30** (2), 73 (1977).
19. W. Sugimura, T. Ono, S. Umeno, M. Hourai, and K. Sueoka, ECS Transaction **2** (2), 95 (2006).
20. S. Haringer, D. Gambaro, and M. Porrini, Journal of Crystal Growth **457**, 325 (2017).