

# СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

Кобелева С.П., Анфимов И.М., Щемеров И.В., Холодный Л.П., Борзых И.В.,  
Пташинский В.В.

*Проведено сравнение результатов измерения эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда на непассивированных пластинах высокоомного монокристаллического кремния в интервале эффективного времени жизни 10–1500 мкс и толщины 0,4–10 мм (СОП «ГИРЕДМЕТ») бесконтактными ВЧ- и СВЧ-методами. Проведены оценки времени жизни в объеме материала по зависимости обратного эффективного времени жизни от квадрата обратной толщины в интервале толщины 1–4 мм. Показано, что приведенная в паспорте СОП погрешность результатов измерения ВЧ-методом в 10 % характеризует случайную погрешность измерения, величина которой одного порядка со случайной погрешностью измерения СВЧ-методом на установке с кольцевым зазором. Показано, что ВЧ- и СВЧ-методы имеют систематическую погрешность одного порядка.*

**Ключевые слова:** монокристаллический кремний, бесконтактный СВЧ-метод, бесконтактный ВЧ-метод, время жизни неравновесных носителей заряда, спад фотопроводимости.

✓ **Ссылка при цитировании:** Стандартные образцы времени жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллическом кремнии / С.П. Кобелева [и др.] // Стандартные образцы. 2015. № 1. С. 16–22.

## Авторы:

### КОБЕЛЕВА С.П.

Доцент кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), канд. физ.-мат. наук  
Российская Федерация, 119049, г. Москва,  
Ленинский пр-т, 4  
Тел.: 8 (495) 955-01-50  
E-mail: kob@misis.ru

### АНФИМОВ И.М.

Инженер исследовательской лаборатории «Монокристаллы и заготовки» ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») Российская Федерация, 119049, г. Москва,  
Ленинский пр-т, 4  
Тел.: 8 (495) 955-01-50  
E-mail: ilan@astelecom.ru

### ЩЕМЕРОВ И.В.

Инженер кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») Российская Федерация, 119049, г. Москва,  
Ленинский пр-т, 4  
Тел.: 8 (495) 955-01-50  
E-mail: isvd-i@mail.ru

### ХОЛОДНЫЙ Л.П.

Начальник лаборатории стандартизации ОАО «Гиредмет», канд. техн. наук  
Российская Федерация, 119049, г. Москва,  
Большой Третьяковский пер., 5  
Тел.: 8 (495) 981-30-10  
E-mail: pyn@giredmet.ru

**БОРЗЫХ И.В.**

Ст. преподаватель кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)  
Российская Федерация, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4  
Тел.: 8 (495) 638-44-57  
E-mail: borzih\_irina@mail.ru

**ПТАШИНСКИЙ В.В.**

Профессор кафедры физики ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), канд. физ.-мат. наук  
Российская Федерация, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4  
Тел.: 8 (495) 955-01-28  
E-mail: kaputkin@phs.misis.ru

**Применяемые сокращения:**

ННЗ – неравновесный носитель заряда  
ШРХ – рекомбинация Шокли-Рида-Холла  
РЦ – рекомбинационные центры  
ВЧ – высокочастотная (электромагнитная волна)

УЭС – удельное электросопротивление  
ФП – спад фотопроводимости  
СВЧ – сверхвысокие частоты (электромагнитной волны)  
СОП – стандартные образцы предприятия

**Введение**

Время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) ( $\tau_V$ ) – величина, обратная вероятности рекомбинации неравновесного свободного электрона (дырки) в единицу времени в объеме материала. Оно определяется тремя основными механизмами рекомбинации – межзонной, Оже и примесной, или рекомбинацией Шокли-Рида-Холла (ШРХ).

В непрямозонных полупроводниках, таких как кремний и германий, времена межзонной и Оже-рекомбинации при среднем и низком уровне легирования достигают десятков и сотен миллисекунд, в то время как рекомбинация по механизму ШРХ – от единиц до тысяч микросекунд. Поэтому основным механизмом рекомбинации является рекомбинация через глубокие центры, которые в элементарных полупроводниках чаще всего представляют из себя остаточные примеси металлов, таких как железо или медь. Рекомбинационные центры могут заметно повлиять на характеристики создаваемых приборов, особенно в структурах субмикронных и нанометровых размеров, поэтому определение концентрации и, желательнее, типа РЦ важно для характеристики качества этих материалов. Ge и Si, используемые в микроэлектронике, содержат остаточные металлические примеси на уровне  $10^{11}$ – $10^9$  см<sup>-3</sup>, что ниже пределов чувствительности существующих методов анализа. В то же время измерение соответствующих этим концентрациям переходных процессов в микросекундном и тем более миллисекундном диапазоне не представляет принципиальных технических сложностей. В кремнии с удельным электросопротивлением (УЭС) в пределах от 1 до 1000 Ом·см  $\tau_V$  обратно пропор-

ционально концентрации остаточной примеси [1–5] и потому считается важнейшим параметром качества этого полупроводникового материала.

Одним из основных методов определения  $\tau_V$  в объемных материалах является измерение спада фотопроводимости (ФП). Среди различных вариантов этого метода в настоящее время наиболее предпочтительным для производства является СВЧ-метод в силу его неразрушающего характера и высокой скорости измерения [2–5].

На релаксационную кривую в СВЧ-методе сильно влияют как аппаратные причины, так и состояние поверхности образца, на которой идет дополнительная к объемной рекомбинация. Поэтому оборудование для СВЧ-метода требует калибровки по стандартным образцам с известным эффективным временем жизни ( $\tau_{eff}$ ). В СССР на предприятии «Гиредмет» (г. Москва) совместно с ФГУП «УНИИМ» (г. Екатеринбург) была разработана образцовая установка (аттестована как образцовое средство измерения низшего разряда в 1983 г.) и созданы стандартные образцы предприятия (СОП) постоянной времени релаксации фотопроводимости (кремний монокристаллический). В [6] отмечено, что результаты измерений СОП на СВЧ-оборудовании в ряде диапазонов отличаются от паспортных данных комплекта. Целью данной работы является анализ результатов измерений комплекта СОП ВЧ- и СВЧ-методом.

**Экспериментальная часть**

Измеряли комплект СОП 48-0572-260(1-9)–2009 «Стандартные образцы постоянной времени релаксации фотопроводимости (кремний монокристаллический)». Образцы для СОП были изготовлены из высокоомного

Таблица 1

Результаты измерения  $\tau_{\text{eff}}$  ВЧ- и СВЧ-методом комплекта СОП «Гиредмет» 48-0572-260(1-9)–2009

«Стандартные образцы постоянной времени релаксации фотопроводимости (кремний монокристаллический)»

| Номер образца                                   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8   | 9   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| $d$ , мкм                                       | 9850 | 4850 | 3150 | 2500 | 2000 | 1550 | 1100 | 800 | 350 |
| $\tau_{\text{eff}}$ измеренное ВЧ-методом, мкс  | 1590 | 650  | 470  | 300  | 170  | 106  | 73   | 45  | 17  |
| $\tau_{\text{eff}}$ измеренное СВЧ-методом, мкс | 1050 | 800  | 470  | 350  | 230  | 160  | 80   | 44  | 11  |

материала с одинаковым объемным временем жизни. Поверхность образцов шлифованная, неpassивированная, с большой скоростью поверхностной рекомбинации ( $S$ ). Разное эффективное время жизни получено за счет разной толщины пластин. Паспортное значение  $\tau_{\text{eff}}$  стандартных образцов было получено при измерении ВЧ-методом, в котором образец помещали между обкладками конденсатора и измеряли затухание сигнала в ВЧ-контуре на частоте 35 МГц при засветке светодиодом ( $\lambda = 1,06$  мкм). Определение эффективного времени жизни проводили путем совмещения на экране осциллографа экспериментальной кривой и экспоненты с известным параметром спада. Погрешность определения эффективного времени жизни согласно паспортным данным составляет 10 %. Этот метод был выбран, потому что имелась возможность аттестации образцовой установки по измерению релаксационной кривой стандартных емкостей. Измерение СВЧ-методом проводили на автоматизированной установке АПК-Тауметр с СВЧ-детектором с кольцевым зазором [5]. Определение эффективного времени жизни проводили по второй половине релаксационной кривой в соответствии с рекомендациями [7–8]. Результаты измерений представлены в табл. 1. Случайная погрешность измерений не превышает 8 %.

### Обсуждение результатов

Влияние рекомбинации на поверхности на эффективное время спада релаксационной кривой ФП проявляется в появлении «быстрых» экспонент, которые оказывают влияние в большей степени на начальные участки спада ФП [1–7]. В результате измеряемое эффективное время жизни зависит от соотношения трех характерных длин – диффузионной длины ННЗ  $L_D$ , толщины образца  $d$  (размер вдоль направления освещения поверхности), обратного коэффициента поглощения света, а также скорости поверхностной рекомбинации  $S$  [2–5]. Это в общем случае делает неоднозначным расчет объемного времени жизни по измеренному эффективному.

Международный стандарт [8] рекомендует для расчетов  $\tau_V$  определять эффективное время спада на второй половине релаксационной кривой. Предполагается, что к рекомендуемому началу участка для оценки (45 % от начала спада ФП) «быстрые» экспоненты исчезают. Рекомендуется использовать формулу:

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_V} + \frac{1}{\tau_S}, \text{ где } \tau_S = \frac{d}{2S} + \frac{d^2}{\pi^2 D}, \quad (1)$$

где  $\tau_S$  – так называемое поверхностное рекомбинационное время;

$S$  – скорость поверхностной рекомбинации;

$D$  – коэффициент диффузии неосновных носителей заряда.

Очевидно, что на тонких (толщина образца меньше  $0,1 L_D$ ) неpassивированных образцах, у которых  $S$  порядка 20 000–40 000 см/с, в формировании  $\tau_S$  доминирует первый член, в толстых образцах – второй. Это позволило предложить в качестве метода определения  $\tau_V$  и  $S$  анализ зависимости обратного эффективного времени жизни от квадрата обратной толщины пластины на толстых образцах [1–2]. При этом не было определено понятие «толстый образец», для которого в приближении бесконечной скорости рекомбинации справедливо выражение:

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_V} + \frac{\pi^2 D}{d^2}. \quad (2)$$

Вместе с тем толщины образцов для подобного анализа должны зависеть от величин как времени жизни в объеме, так и скорости поверхностной рекомбинации. В [9–11] было показано, что интервал толщин для использования формулы (2) ограничен не только снизу, но и сверху. Последнее обстоятельство связано с увеличением вклада «быстрых» (связанных с рекомбинацией на поверхности) экспонент при увеличении толщины образца. Это приводит к тому, что на реально детектируемой части релаксационной кривой (до 5 % от максимального сигнала) мгновенное время жизни не достигает своего максимального значения и эффектив-

Таблица 2  
Расчет эффективного времени жизни

| Толщина образца | ВЖ согласно формуле (2), мкс | Результат моделирования ВЖ «на просвет», мкс | Результат моделирования ВЖ для установки с кольцевым зазором, мкс | Отклонение результатов моделирования «на просвет» от формулы (2), % | Отклонение результатов моделирования для установки с кольцевым зазором от формулы (2), % |
|-----------------|------------------------------|--|---|---|--|
| 100             | 0,84                         | 1,3  | 1,3   | 52  | 57   |
| 141             | 1,7                          | 2,3  | 2,3   | 37  | 39   |
| 200             | 3,4                          | 4,2  | 4,2   | 25  | 26   |
| 282             | 6,7                          | 7,9  | 8,0   | 17  | 28   |
| 400             | 13                           | 15   | 15  | 12  | 12   |
| 566             | 27                           | 29   | 29  | 8,8   | 8,8  |
| 800             | 52                           | 55   | 55  | 5,9   | 5,9  |
| 1131            | 100                          | 105  | 105   | 4,6   | 4,6  |
| 1600            | 190                          | 190  | 190   | 2,8   | 2,8  |
| 2262            | 340                          | 340  | 350   | 1,9   | 3,2  |
| 3200            | 550                          | 550  | 560   | 1,0   | 1,7  |
| 4525            | 800                          | 810  | 780   | 1,0   | -2,7   |
| 6400            | 1050                         | 1030   | 890   | -0,3  | -15  |
| 9051            | 1230                         | 1190   | 900   | -3,8  | -27  |

ное время жизни становится меньше, чем ожидается по формуле (2). Оптимальный интервал толщин для использования формулы (2) составляет  $(1-5)L_D$  [11]. Расчеты релаксационных кривых в [9–11] проведены на основе решения уравнения непрерывности в одномерном случае численным методом с использованием программы ЭВМ (С.Ю. Юрчук, С.П. Кобелева [12]). При анализе комплекта СОП можно ожидать, что  $\tau_v$  в этих образцах порядка или больше 1500 мкс (табл. 1). Одним из возможных способов оценки достоверности экспериментальных результатов можно считать анализ данных по формуле (2), так как мы знаем, что в образцах с электронным типом электропроводности  $D = 12 \text{ см}^2/\text{с}$  [13]. Расчеты эффективного

времени жизни для  $\tau_v = 1500 \text{ мкс}$  и  $S = 20\,000 \text{ см}^2/\text{с}$  численным методом проведены для установок, в которых СВЧ-волна проходит через весь образец («на просвет») и для установки с кольцевым зазором 3 мм (АПК-Тауметр), в которой СВЧ проникает на глубину порядка радиуса кольцевого зазора, и по формуле (2). Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Как видно из рис. 1, значение эффективного времени жизни, рассчитанное по формуле (2), хорошо сходится с результатами численного моделирования в интервале от 400 до 4000 мкм. Это говорит о том, что в данном интервале формула (2) может быть использована. На рис. 2 представлена зависимость  $1/\tau_{\text{eff}}$  от  $1/d^2$ ,

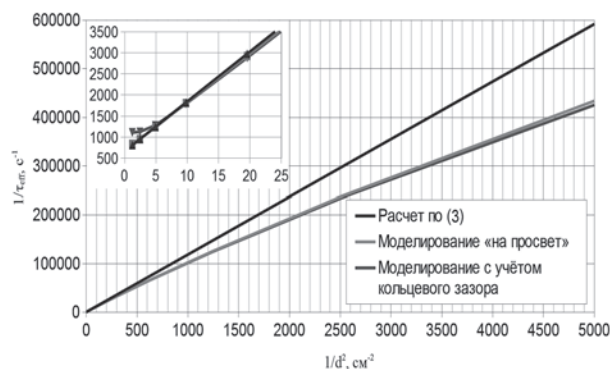


Рис. 1. Зависимость рассчитанного обратного эффективного времени жизни от обратного квадрата толщины пластины

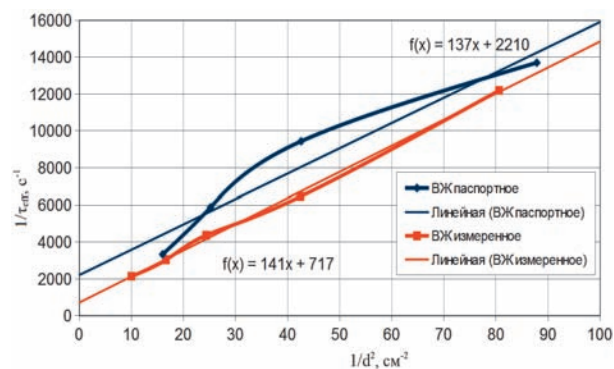


Рис. 2. Сравнение результатов измерения и паспортных значений

Таблица 3

Сравнение  $\tau_{\text{eff}}$ , полученного при численном моделировании с учетом рассчитанных данных для СВЧ-метода ( $\tau_V = 1300$  мкс) и измеренного на АПК-Тауметр

| Номер образца                            | 1    | 2    | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9   |
|--|------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|
| Численные расчеты, мкс                   | 1050 | 780  | 510 | 370  | 280  | 170  | 98   | 56   | 12  |
| Отклонение от измеренного СВЧ-методом, % | 0,4  | -1,7 | 9,7 | 11,1 | 20,1 | 12,1 | 19,5 | 27,5 | 4,5 |

Таблица 4

Сравнение  $\tau_{\text{eff}}$ , полученного при численном моделировании с учетом рассчитанных данных для ВЧ-метода ( $\tau_V = 600$  мкс) и измеренного ВЧ-методом

| Номер образца                           | 1   | 2     | 3   | 4    | 5   | 6   | 7    | 8    | 9     |
|---|-----|-------|-----|------|-----|-----|------|------|-------|
| Численные расчеты, мкс                  | 510 | 510   | 510 | 280  | 221 | 150 | 90   | 53   | 13    |
| Отклонение от измеренного ВЧ-методом, % | -67 | -21,5 | 8,5 | -6,5 | 30  | 42  | 23,8 | 18,4 | -22,5 |

для образцов № 3–7, толщина которых находится в указанном интервале. На рис. 2 приведено сравнение зависимостей для паспортных значений, измеренных ВЧ-методом, и значений, измеренных СВЧ-методом.

Хорошая линеаризация и, как следствие, меньшая погрешность в значениях параметров наблюдаются для результатов СВЧ-метода. Для ВЧ-метода в данном интервале значений  $\tau_V = 600 \pm 200$  мкс и  $D_p = 15 \pm 3$  см<sup>2</sup>/с, для СВЧ –  $\tau_V = 1300 \pm 100$  мкс и  $D_p = 13 \pm 1$  см<sup>2</sup>/с. В стандарте [13] указывается, что в районе 1–2 кОм·см коэффициент диффузии дырок изменяется в пределах от 11,5 до 12,5 см<sup>2</sup>/с, таким образом, рассчитанные значения  $D_p$  достаточно точно соответствуют данным стандарта для монокристаллического кремния. Вместе с тем результаты измерения ВЧ-методом дают неправдоподобную величину объемного ВЖ: так как стандартные образцы были получены из одного слитка, то эффективное ВЖ образцов с большими толщинами (№ 1–2) не может превышать объемное, рассчитанное по образцам со средними толщинами. Чтобы проверить достоверность полученных СВЧ-методом значений  $\tau_V$  для всех образцов, было проведено численное моделирование эффективного времени жизни исходя из полученных значений времени жизни в объеме (табл. 3, 4).

Из табл. 3 и 4 видно, что численные расчеты ожидаемой величины эффективного времени жизни при

измерении серии образцов СВЧ-методом хорошо совпадают с измеренными значениями этих величин, в то время как данные, полученные на основе аппроксимации результатов измерений ВЧ-методом, очень сильно отличаются от измеренных значений, что может указывать на большую погрешность ВЧ-измерений. Большая погрешность ВЧ-метода может быть связана с тем, что для определения параметров релаксационной кривой использовали визуальное сравнение экспериментальных результатов с экспонентой на экране осциллографа, что повышает погрешность метода, в то время как в АПК-Тауметр используются современные компьютерные методы регистрации и обработки сигнала.

### Выводы

Анализ результатов измерения постоянной времени релаксации ФП в высокоомном монокристаллическом кремнии (СОП «Гиредмет») ВЧ- и СВЧ-методом показывает, что приведенная в паспорте погрешность характеризует случайную погрешность измерения ВЧ-методом, величина которой (10 %) одного порядка со случайной погрешностью измерения СВЧ-методом на установке с кольцевым зазором. Вместе с тем систематическая погрешность СВЧ-метода не превышает 30 %, в то время как систематическая погрешность ВЧ-метода может лежать в интервале 40–60 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985.
2. Ruyuan W. R., Shaffner T. J. Semiconductor Measurements & Instrumentation. New York: McGraw-Hill, 1997.
3. Кобелева С.П. Методы измерения электрофизических параметров монокристаллического кремния // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. № 1. С. 60–67.
4. Кобелева С.П. Методы измерения электрофизических параметров монокристаллического кремния. Ч. 2 // Комментарии к стандартам. 2013. № 8. С. 15–26.
5. Установка для измерения времени жизни неосновных носителей заряда монокристаллического кремния / С. П. Кобелева [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70. № 5. С. 27–30.
6. Кобелева С.П., Лагов П.Б., Щемеров И.В. О возможности разработки ГСО времени жизни неравновесных носителей заряда монокристаллического кремния // Стандартные образцы. 2013. № 3. С. 10–15.
7. SEMI MF28. Test Methods for the Minority-Carrier Lifetime in Bulk Germanium and Silicon by Measurement of Photoconductivity Decay. San Jose. 2010.
8. SEMI MF1535. Test method for carrier recombination lifetime in silicon wafers by non-contact measurement of photoconductivity decay by microwave reflectance. San Jose. 2010.
9. Определение объемного времени жизни неосновных носителей заряда на непассивированных поверхностях монокристаллического кремния / С.П. Кобелева [и др.] // Заводская лаборатория. 2004. Т. 20. № 6. С. 23–28.
10. Влияние поверхностной рекомбинации на измерение времени жизни в слитках монокристаллического кремния / С.П. Кобелева [и др.] // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. 2006. № 4. С. 17–20.
11. Анфимов И.М., Кобелева С.П., Щемеров И.В. Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллическом кремнии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. № 1. Т. 80. С. 41–45.
12. Расчет профилей распределения фотогенерированных носителей заряда в полупроводнике и фотопроводимости: свидетельство о гос. регистрации программы ЭВМ № 2013612971; опубл. 19.03.2013.
13. SEMI MF723. Practice for conversion between resistivity and dopant or carrier density for boron-doped, phosphorus-doped, and arsenic-doped silicon. San Jose. 2010.

## REFERENCE SAMPLES OF THE SILICON SINGLE CRYSTALLS FREE CARRIER RECOMBINATION LIFETIME

S.P. Kobeleva\*, I.M. Anfimov\*\*, I.V. Schemerov\*, L.P. Kholodny\*\*, I.V. Borzikh\*, V.V. Ptashinsty\*

\* National University of Science and Technology "MISiS"  
Leninskii prospekt 4, Moscow, 119049, Russian Federation  
E-mail: kob@misis.ru

\*\* JSC "GIREDMET"  
Bolshoi Tolmashevskii pereulok, 5, Moscow, 119017, Russian Federation  
E-mail: pyn@giredmet.ru

*A comparison of two methods for measurement of the free carrier recombination lifetime in the unpassivated samples of high resistivity n-type silicon single crystalls (reference samples of "GIREDMET") was made. The methods were based on the photoconductivity decay measurements (High frequency and  $\mu$ -PCD). Effective recombination lifetime value in the range 1–1500  $\mu$ s were achieved by changes of the sample thickness from 0,4 to 10 mm. Bulk recombination lifetime was calculated using the relation between the effective recombination lifetime and the sample thickness. It was shown that random and systematic errors for two methods are of the same order.*

**Key words:** single crystal silicon, contactless  $\mu$ -PCD method, contactless high frequency method, carrier recombination lifetime, photoconductivity decay.

- ✓ **When quoting reference:** Kobeleva S.P., Anfimov I.M., Schemerov I.V., Kholodny L.P., Borzikh I.V., Ptashinsty V.V. Standartnye obraztsy vremeni zhizni neravnovesnykh nositelei zariada v monokristallicheskom kremnii [Reference samples of the silicon single crystals free carrier recombination lifetime]. Standartnye obraztsy – Reference materials, 2015, no. 1, pp. 16–22 (In Russian).

## REFERENCES:

1. Batavin V.V., Kontsevoi Iu. A., Fedorovich Iu.V. *Izmerenie parametrov poluprovodnikovyykh materialov i struktur* [Measurement of characteristics of semiconductor materials and structures]. Moscow: Radio i sviaz', 1985. (In Russian).
2. Runyan W. R., Shaffner T. J. *Semiconductor Measurements & Instrumentation*. New York: McGraw-Hill, 1997.
3. Kobeleva S.P. Metody izmereniia elektrofizicheskikh parametrov monokristallicheskogo kremniia [Methods for measuring the electrophysical parameters of monocrystalline silicon]. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov – Plant Laboratory. Diagnosis materials*, 2007, no. 1, pp. 60–67. (In Russian).
4. Kobeleva S.P. Metody izmereniia elektrofizicheskikh parametrov monokristallicheskogo kremniia. Chast' 2 [Methods for measuring the electrophysical parameters of monocrystalline silicon. Part 2]. *Kommentarii k standartam – Comments to the standards*, 2013, no. 8, pp. 15–26. (In Russian).
5. Goriunov N. N., Kobeleva S. P., Charykov N. A., Lukashov N. V., Slesarev V. N. Ustanovka dlia izmereniia vremeni zhizni neosnovnykh nositelei zariada monokristallicheskogo kremniia [System for the lifetime measuring of minority charge carriers of monocrystalline silicon]. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov – Plant Laboratory. Diagnosis materials*, 2004, no. 5, pp. 27–30. (In Russian).
6. Kobeleva S.P., Lagov P.B., Shchemerov I.V. O vozmozhnosti razrabotki GSO vremeni zhizni neravnovesnykh nositelei zariada monokristallicheskogo kremniia [On the possibility of the CRM development for lifetime of nonequilibrium charge carriers of monocrystalline silicon]. *Standartnye obraztsy – Reference materials*, 2013, no. 3, pp. 10–15. (In Russian).
7. SEMI MF28. Test Methods for the Minority-Carrier Lifetime in Bulk Germanium and Silicon by Measurement of Photoconductivity Decay. San Jose. 2010.
8. SEMI MF1535. Test method for carrier recombination lifetime in silicon wafers by non-contact measurement of photoconductivity decay by microwave reflectance. San Jose. 2010.
9. Goriunov N. N., Kobeleva S. P., Kalinin V. V., Iurchuk S. Iu., Slesarev A. N., Chiiakin A. N. Opređenje ob'emnogo vremeni zhizni neosnovnykh nositelei zariada na nepassivirovannykh poverkhnostiakh monokristallicheskogo kremniia [Determination of bulk lifetime of minority charge carriers on the unpassivated surfaces of single-crystal silicon]. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov – Plant Laboratory. Diagnosis materials*, 2004, no. 6, pp. 23–28. (In Russian).
10. Kobeleva S.P. Vliianie poverkhnostnoi rekombinatsii na izmerenie vremeni zhizni v slitkakh monokristallicheskogo kremniia [Effect of surface recombination on the measurement of the lifetime of monocrystalline silicon ingots]. *Izvestiia VUZov. Materialy elektronnoi tekhniki – Proceedings of the universities. Materials of Electronic Technology*, 2006, no. 4, pp. 17–20. (In Russian).
11. Anfimov I.M., Kobeleva S.P., Shchemerov I.V. Izmerenie vremeni zhizni neravnovesnykh nositelei zariada v monokristallicheskom kremnii [Measurement of the lifetime of nonequilibrium charge carriers in single-crystal silicon]. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov – Plant Laboratory. Diagnosis materials*, 2014, no. 1, pp. 41–45. (In Russian).
12. *Calculation of profiles of distribution of photogenerated charge carriers in a semiconductor and photoconductivity*: State Registration Certificate of computer software no. 2013612971; publ. 19.03.2013. (In Russian).
13. SEMI MF723. Practice for conversion between resistivity and dopant or carrier density for boron-doped, phosphorus-doped, and arsenic-doped silicon. San Jose. 2010.