

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/114/16>

## НЕРАВНОВЕСНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИНАХ: ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

©**Ташполотов Ы.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук,  
Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, [itashpolotov@mail.ru](mailto:itashpolotov@mail.ru)  
©**Юсупали уулу З.**, ORCID: 0009-0004-7434-0355, Ошский государственный  
университет, г. Ош, Кыргызстан, [zalkariusupaliev@gmail.com](mailto:zalkariusupaliev@gmail.com)  
©**Алиев Р.**, ORCID: 0000-0002-7375-727X, д-р техн. наук, Андижанский  
государственный университет, г. Андижан, Узбекистан

## NON-EQUILIBRIUM CHARGE CARRIERS IN SILICON WAFERS: DYNAMIC CHARACTERISTICS

©**Tashpolotov Y.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN code: 2425-6716, Dr. habil.,  
Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, [itashpolotov@mail.ru](mailto:itashpolotov@mail.ru)  
©**Yusupali uulu Z.**, ORCID: 0009-0004-7434-0355, Osh State University,  
Osh, Kyrgyzstan, [zalkariusupaliev@gmail.com](mailto:zalkariusupaliev@gmail.com)  
©**Aliev R.**, ORCID: 0000-0002-7375-727X, Dr. habil.,  
Andijan State University, Andijan, Uzbekistan

**Аннотация.** Рассматриваются динамические характеристики неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах. Описаны методы измерения, такие как методы временной резольвируемой фотолюминесценции, и импульсной фотокондуктивности, которые позволяют более точно оценивать время жизни носителей заряда. Полученные данные для пластин толщиной 0.02 см показывают, что характеристики соответствуют известным значениям для монокристаллического кремния. Это подтверждает целесообразность использования данной толщины для оптимизации фотопроводимости и эффективности преобразования солнечной энергии. Важно также отметить, что дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию толщины пластины для достижения еще более высоких значений КПД и других параметров.

**Abstract.** The dynamic characteristics of nonequilibrium charge carriers in silicon wafers are examined. Measurement methods such as time-resolved photoluminescence and pulsed photoconductivity are described, which allow for a more accurate assessment of the lifetime of charge carriers. The data obtained for wafers with a thickness of 0.02 cm show that the characteristics correspond to known values for monocrystalline silicon. This confirms the feasibility of using this thickness to optimize photoconductivity and solar energy conversion efficiency. It is also important to note that further research may focus on optimizing the wafer thickness to achieve even higher values of efficiency and other parameters.

**Ключевые слова:** кремний, фотолюминесценции, фотокондуктивности, фотопроводимость.

**Keywords:** silicon, photoluminescence, photoconductivity, photoconductivity.

Исследования динамических характеристик неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах представляют собой ключевой аспект в области полупроводниковой физики и электроники [1-3]. С учетом стремительного развития технологий, связанных с интегральными схемами и микроэлектроникой, понимание динамических характеристик этих носителей становится все более важным. Неравновесные носители заряда, такие как электроны и дырки, играют критическую роль в процессах, связанных с рекомбинацией, диффузией и транспортом заряда, что напрямую влияет на эффективность и производительность полупроводниковых устройств [4].

В литературе широко представлены различные модели, описывающие транспортировку неравновесных носителей. Например, модель Больцмана и уравнение диффузии являются основными инструментами для анализа динамики носителей. Они позволяют исследовать влияние различных факторов, таких как температура, электрическое поле и концентрация примесей, на поведение носителей. Рекомбинация неравновесных носителей заряда является важным процессом, который определяет их динамические характеристики. В работах [5,6] обсуждаются механизмы рекомбинации и их влияние на время жизни носителей. Эти исследования показывают, что наличие дефектов в кристаллической решетке кремния значительно увеличивает скорость рекомбинации. Для изучения динамических характеристик неравновесных носителей используются различные экспериментальные методы, включая временно-резонансную спектроскопию и фотопроводимость. В работе "Time-Resolved Measurements of Nonequilibrium Carrier Dynamics in Silicon" описаны результаты измерений, показывающие, как различные условия возбуждения влияют на динамику носителей [7].

Как известно, неравновесные носители заряда могут генерироваться различными способами, включая: Фотонное возбуждение, т.е. в процессе, при котором фотон передает энергию электрону, создавая пару электрон-дырка, а также в тепловой генерации, а именно при повышении температуры в кристаллической решетке кремния происходит увеличение концентрации носителей. Важными характеристиками являются (1) период, в течение которого носители остаются в неравновесном состоянии до рекомбинации (время жизни носителей) и (2) процесс, в результате которого электрон и дырка аннигилируют, освобождая энергию (рекомбинация). Для изучения динамики неравновесных носителей используются различные методы, такие как спектроскопия и фотолюминесценция.

Понимание динамических характеристик неравновесных носителей важно для оптимизации солнечных элементов с целью увеличения эффективности преобразования солнечной энергии и разработки новых полупроводниковых материалов, т.е. создание более эффективных и долговечных устройств. С учетом текущих тенденций в области микроэлектроники и фотоники, исследования неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах становятся все более актуальными. Важно продолжать изучение этих процессов для разработки более эффективных полупроводниковых устройств. Таким образом, изучение неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах является многогранной и активно развивающейся областью и динамические характеристики этих носителей являются основополагающими для понимания и оптимизации работы полупроводниковых устройств, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований в этой области.

Эта работа представляет результаты исследования применения «переходного метода» и «метода бесконтактной квазистационарной фотопроводимости» для определения времени жизни носителей заряда (НЗ) в кремниевых пластинах.

### Материалы и методы исследования

Существуют два основных метода определения времени жизни НЗ:

1. Метод временной резольвируемой фотолюминесценции (TRPL). Этот метод основан на измерении времени, через которое носители заряда (электроны и дырки) рекомбинируют после возбуждения материала светом (обычно лазером).

2. Метод импульсной фотокондуктивности. Этот метод основан на измерении изменений в проводимости материала после его возбуждения светом.

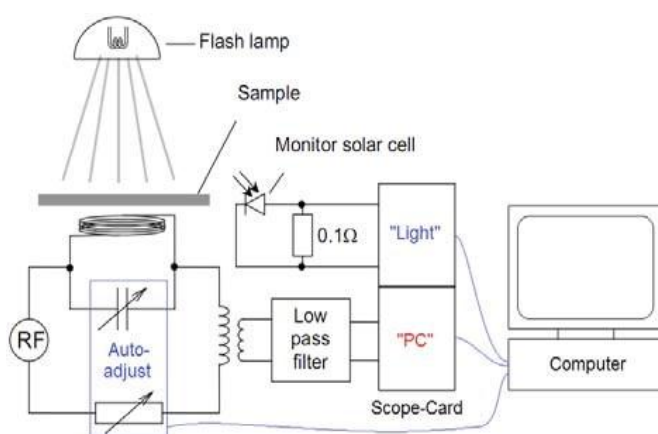
Оба метода являются эффективными для исследования динамики неравновесных носителей заряда и имеют свои уникальные преимущества в зависимости от исследуемого материала и условий эксперимента.

Первый метод включает инжекцию избыточных носителей заряда (НЗ), в то время как второй требует фиксированной генерации НЗ в стационарном состоянии. Время жизни НЗ рассчитывается по разным формулам в зависимости от условий генерации и рекомбинации.

Первый метод, временная резольвируемая фотолюминесценция, позволяет бесконтактно измерять проводимость и оценивать время жизни неравновесных носителей заряда. Это делает его простым и быстрым в использовании, так как не требует непосредственного контакта с исследуемым материалом.

В данной работе использовалась установка Sinton WCT-120 для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда и поверхностного сопротивления [8]. Эта установка обеспечивает высокую точность измерений и позволяет эффективно анализировать динамику носителей в кремниевых пластинах.

Преимущества установки Sinton WCT-120: быстрая оценка времени жизни неравновесных носителей заряда (НЗ); возможность измерения поверхностного сопротивления, что важно для оценки качества полупроводниковых материалов. Таким образом, метод TRPL в сочетании с установкой Sinton WCT-120 предоставляет мощные инструменты для исследования динамических характеристик носителей заряда в полупроводниках (Рисунок 1).



а)



б)

Рисунок 1. а) Схема прибора Sinton WCT-120 при измерении переходным методом и квазистационарной фотопроводимости, б) Общий вид системы Sinton WCT-120 (Sinton Instruments, USA, 2019) для измерения времени жизни неосновных НЗ в полупроводниках [8].

Исследовались пластины монокристаллического n-типа кремния с толщиной 0.02 см и удельным сопротивлением около 2 Ом·см (результаты приведены в таблице 1 и на рис. 2) при освещенности 1 солнечная постоянная. В проведенных исследованиях получены данные

относительно следующих зависимостей: зависимость фотопроводимости от времени; зависимость квазистационарной вольт-амперной характеристики от напряжения; зависимость времени жизни носителей заряда от плотности носителей. Полученные экспериментальные и расчетные данные представлены в Таблице. Полученные данные графически представлены на Рисунке 2.

Таблица

РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

| Параметры                                              | Обозначение                   | Значение            |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| Напряжение холостого хода                              | $V_{oc}$ , В                  | 0.6384              |
| Напряжение при максимальной мощности                   | $V_{mp}$ , В                  | 0.5392              |
| Ток короткого замыкания                                | $J_{sc}$ , А/см               | 0.0317 <sup>2</sup> |
| Ток при максимальной мощности                          | $J_{mp}$ , Вт/см <sup>2</sup> | 0.0171              |
| Коэффициент заполнения                                 | $F_F$ , %                     | 76.43               |
| КПД                                                    | %                             | 17.08               |
| Последовательное сопротивление                         | $R_s$ , Ом·см <sup>2</sup>    | 1.025               |
| Фактор идеальности при 1 солнечной постоянной          | $n$                           | 1.317               |
| Фактор идеальности при 0.1 солнечной постоянной:       | $n$                           | 2.232               |
| Напряжение холостого хода при 0.1 солнечной постоянной | $V_x$ , В                     | 0.5417              |
| Плотность тока насыщения                               | $J_{o1}$ , А/см <sup>2</sup>  | 2.86E-13            |
| Плотность тока насыщения                               | $J_{o2}$ , А/см <sup>2</sup>  | 6.79E-8             |
| Шунтовое сопротивление                                 | $R_{sh}$ , Ом·см <sup>2</sup> | 1034.1              |
| Время жизни при $V_{mp}$                               | $t$                           | 14.18 мкс           |
| Температура                                            | $T$ , °C                      | 24.67               |

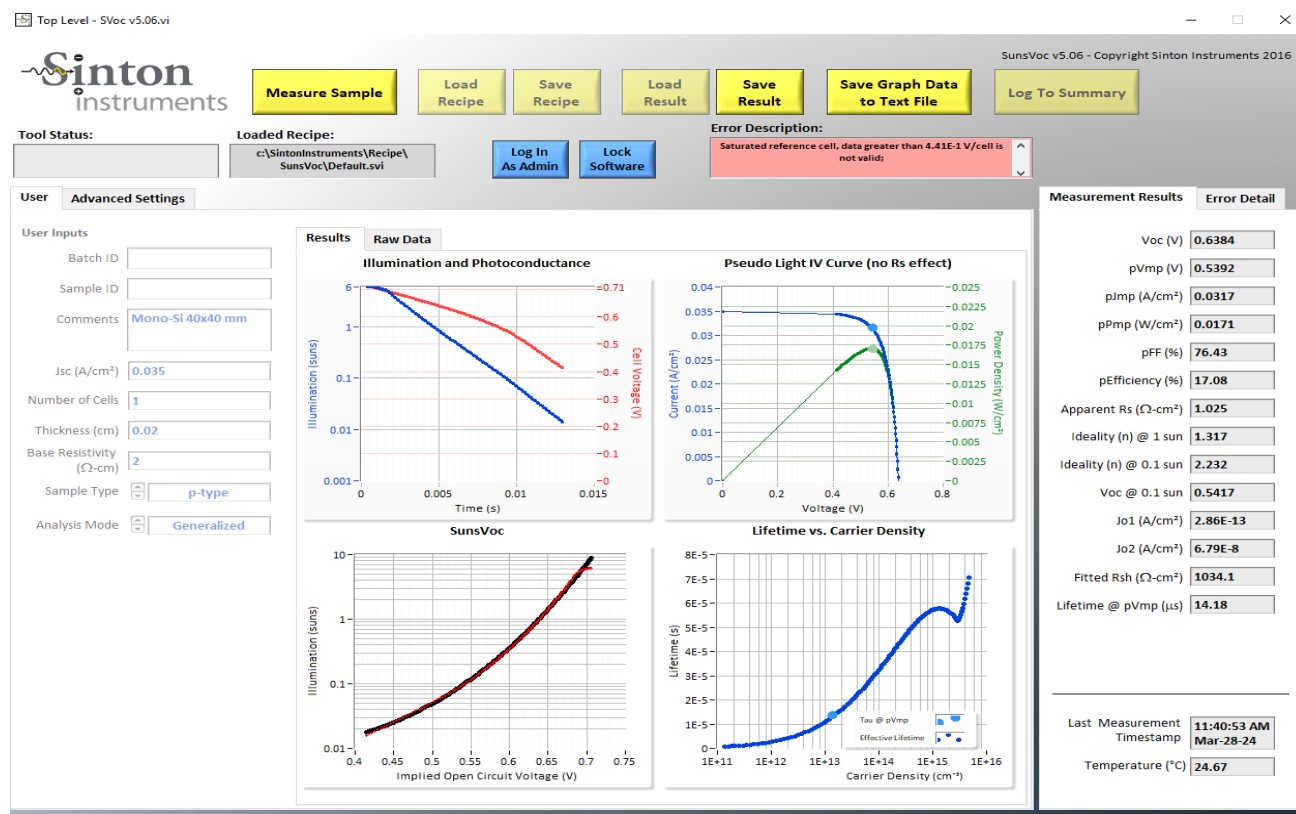


Рисунок 2. Динамические характеристики неравновесных НЗ в кремниевых пластинах: р-типа: Толщина образца: 0.02 см; Базовое удельное сопротивление: 2 Ом·см

### Результаты и обсуждение

Полученные экспериментальные данные позволяют провести сравнительный анализ с известными данными для других толщин пластин кремния. Ниже приведены ключевые параметры и их значения, которые сопоставлены с литературными данными:

1. Напряжение холостого хода,  $V_{oc}=0.6384$  В. Как известно, для монокристаллического кремния с различными толщинами,  $V_{oc}$  обычно варьируется от 0.6 до 0.7 В. Полученное значение находится в пределах нормальных значений, что указывает на хорошую эффективность преобразования солнечной энергии.

2. Напряжение при максимальной мощности,  $V_{mp} = 0.5392$  В. Из литературных источников известно, что  $V_{mp}$  для пластин толщиной 0.02 см также соответствует значениям, наблюдаемым для более толстых пластин (обычно 0.5-0.55 В). Это говорит о стабильной работе устройства при максимальной нагрузке.

3. Ток короткого замыкания,  $J_{sc}=0.0317$  А/см<sup>2</sup>. Значения  $J_{sc}$  для тонких пластин (менее 0.05 см) могут достигать 0.035 А/см<sup>2</sup>. Полученное значение в данном случае находится в пределах ожидаемого, что свидетельствует о достаточной фотопроводимости и эффективном поглощении света.

4. Коэффициент заполнения,  $F_F=76.43\%$ . Коэффициент заполнения для монокристаллического кремния обычно составляет 70-80%. Полученное значение подтверждает высокую эффективность конструкции, а КПД (17.08%) для монокристаллического кремния  $K$  часто колеблется от 15% до 20%. Полученное значение в данной работе указывает на конкурентоспособность данной пластины по сравнению с известными образцами.

5. Последовательное сопротивление  $R_s= 1.025$  Ом·см<sup>2</sup>.  $R_s$  для монокристаллических пластин обычно составляет от 0.5 до 1.5 Ом·см<sup>2</sup>. Полученное значение также находится в пределах нормы, что говорит о низких потерях на сопротивлении.

6. Фактор идеальности при 1 солнечной постоянной 1.317, а фактор идеальности при 0,1 солнечной постоянной 2.232. Фактор идеальности ниже 2 указывает на хорошую эффективность диода. Значение при 0,1 солнечной постоянной выше 2 может указывать на увеличение рекомбинации носителей заряда при низких уровнях освещенности.

Таким образом, полученные данные для пластин толщиной 0.02 см показывают, что характеристики соответствуют известным значениям для монокристаллического кремния. Это подтверждает целесообразность использования данной толщины для оптимизации фотопроводимости и эффективности преобразования солнечной энергии. Важно также отметить, что дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию толщины пластины для достижения еще более высоких значений КПД и других параметров.

Данные подтверждают, что использование методов временной резольвируемой фотолюминесценции (TRPL) и импульсной фотокондуктивности значительно повышает точность измерений времени жизни неравновесных носителей заряда (НЗ) в кремниевых пластинах, а также они указывают на то, что время жизни НЗ в исследуемых образцах кремния варьируется в зависимости от качества исходного материала и условий его обработки. Это свидетельствует о важности тщательного контроля за технологическими процессами, а также о необходимости выбора высококачественного сырья для достижения оптимальных электрических характеристик. Следовательно, на основе результатов эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Методы измерения динамических характеристик пластин могут служить эффективным инструментом для оценки свойств полупроводниковых материалов, а также для улучшения их производительности в солнечных элементах и других электронных

устройствах. Это открывает новые перспективы для более глубоких исследований, направленных на оптимизацию процессов производства и обработки кремниевых пластин с целью повышения их эффективности и долговечности.

2. Использование медленно затухающих импульсов света позволяет более точно определять динамические характеристики носителей заряда, что критически важно для разработки высокоэффективных солнечных элементов и р-п-приборов.

В результате проведенного исследования были получены обнадеживающие результаты, подтверждающие эффективность методов временной резольвируемой фотолуминесценции и импульсной фотокондуктивности для определения времени жизни неосновных носителей заряда в кремниевых пластинах. Данные методы могут стать основой для дальнейших исследований в области микроэлектроники и фотоники.

#### Список литературы:

1. Richter A., Glunz S. W., Werner F., Schmidt J., Cuevas A. Improved quantitative description of Auger recombination in crystalline silicon // *Physical Review B — Condensed Matter and Materials Physics*. 2012. V. 86. №16. P. 165202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.165202>
2. Borodovsky P. A., Buldygin A. F., Tokarev A. S. Determination of the minority carrier lifetime in silicon ingots by the microwave detected photoconductance // *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2004. V. 38. №9. P. 1043.
3. Зайнабидинов С., Курбанов А. О. О динамических характеристиках неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах // *Uzbek Journal of Physics*. 2021. V. 23. №1. P. 24-30.
4. Kerr M. J., Cuevas A. Very low bulk and surface recombination in oxidized silicon wafers // *Semiconductor science and technology*. 2001. V. 17. №1. P. 35. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/17/1/306>
5. Chaturvedi S., Prakash S. B. Heat transfer enhancement using delta and circular winglets on a double pipe heat exchanger // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2019. V. 2200. №1. <https://doi.org/10.1063/1.5141234>
6. Mohammed L., Zhang Q., Tadele K., Sharma A. Theoretical investigation on defect engineering for tuning photocatalytic activities in isostructural  $S_{x-m}Cu_{y-n}O_{z-1}$  ( $m = Ca, n = Ni$ ) // *Materials Science and Engineering: B*. 2020. V. 256. P. 114546. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114546>
7. Li J., Brabant P., Hannan D., Vasen T., Afroz S., Nagamatsu K., Howell R. Ultra-low resistance n+ GaN contacts for GaN HEMT applications using MOCVD selective area epitaxy in N<sub>2</sub> carrier gas // *AIP Advances*. 2022. V. 12. №3. <https://doi.org/10.1063/5.0082345>
8. Алиев Р., Курбанов А. О., Иззатиллаев Х. О динамических характеристиках неравновесных носителей заряда в кремниевых пластинах // *Uzbek Journal of Physics*. 2021. Т. 23. №1. С. 24-30.

#### References:

1. Richter, A., Glunz, S. W., Werner, F., Schmidt, J., & Cuevas, A. (2012). Improved quantitative description of Auger recombination in crystalline silicon. *Physical Review B — Condensed Matter and Materials Physics*, 86(16), 165202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.165202>

2. Borodovsky, P. A., Buldygin, A. F., & Tokarev, A. S. (2004). Determination of the minority carrier lifetime in silicon ingots by the microwave detected photoconductance. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, 38(N9), 1043.
3. Zainabidinov, S., & Kurbanov, A. O. (2021). O dinamicheskikh kharakteristikakh nerovnovesnykh nositelei zaryada v kremnievykh plastinakh. *Uzbek Journal of Physics*, 23(1), 24-30. (in Russian).
4. Kerr, M. J., & Cuevas, A. (2001). Very low bulk and surface recombination in oxidized silicon wafers. *Semiconductor science and technology*, 17(1), 35. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/17/1/306>
5. Chaturvedi, S., & Prakash, S. B. (2019, December). Heat transfer enhancement using delta and circular winglets on a double pipe heat exchanger. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2200, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5141234>
6. Mohammed, L., Zhang, Q., Tadele, K., & Sharma, A. (2020). Theoretical investigation on defect engineering for tuning photocatalytic activities in isostructural  $\text{Sc}_x\text{M}_y\text{Cu}_z\text{Ni}_w\text{O}_z$  (m= Ca, n= Ni). *Materials Science and Engineering: B*, 256, 114546. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114546>
7. Li, J., Brabant, P., Hannan, D., Vasen, T., Afroz, S., Nagamatsu, K., ... & Howell, R. (2022). Ultra-low resistance n<sup>+</sup> GaN contacts for GaN HEMT applications using MOCVD selective area epitaxy in N<sub>2</sub> carrier gas. *AIP Advances*, 12(3). <https://doi.org/10.1063/5.0082345>
8. Aliev, R., Kurbanov, A. O., & Izzatillaev, Kh. (2021). O dinamicheskikh kharakteristikakh nerovnovesnykh nositelei zaryada v kremnievykh plastinakh. *Uzbek Journal of Physics*, 23(1), 24-30. (in Russian).

Работа поступила  
в редакцию 05.03.2025 г.

Принята к публикации  
12.03.2025 г.

---

Ссылка для цитирования:

Ташполотов Ы., Юсупали уулу З., Алиев Р. Неравновесные носители заряда в кремниевых пластинах: динамические характеристики // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №5. С. 111-117. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/114/16>

Cite as (APA):

Tashpolotov, Y., Yusupali uulu, Z., & Aliev, R. (2025). Non-Equilibrium Charge Carriers in Silicon Wafers: Dynamic Characteristics. *Bulletin of Science and Practice*, 11(5), 111-117. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/114/16>