О динамических характеристиках неровновесных носителей заряда в кремниевых пластинах

Р. Алиев, А.О. Курбанов*, Х. Иззатиллаев

Андижанский государственный университет, Университетская, 129, 170100, Андижан, Узбекистан

Получена 08.01.2021.

* Corresponding author: e-mail qurbonov26@yahoo.com, Phone: +998 91 487 1188, Fax: (0374) 223 88 30

Статья посвящена представлению и обсуждению первичных результатов экспериментального исследования возможности применения современных «переходного метода» и «метода бесконтактной квазистационарной фотопроводимости» для более точного, ускоренного и неразрушающего определения времени жизни носителей заряда в кремниевых пластинах, предназначенных в качестве базового материала для изготовления быстродействующих *p*-*n*-приборов микроэлектроники и высокоэффективных солнечных элементов. Показано, что метод квазистационарной фотопроводимости основывается на следующих принципах: освещение объекта исследования длительным, медленно затухающим импульсом света; одновременное измерение поверхностной проводимости образца и интенсивности падающего света как функций времени; определение уровня генерации электронно-дырочных пар в полупроводниковом материале по измеренному значению интенсивности падающего света в каждый момент времени; определение квазиравновесной концентрации носителей заряда, исходя из измеренного значения поверхностной проводимости в каждый момент времени; расчет эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в приближении квазиравновесия.

Ключевые слова: кремний, время жизни неосновных носителей заряда, фотопроводимость, солнечный элемент, рекомбинация.

The article is devoted to the presentation and discussion of the primary results of an experimental study of the possibility of using the modern "transient photoconductance method" and "non-contact quasi-steady state photoconductivity method" for a more accurate, accelerated and non-destructive determination of the lifetime of charge carriers in silicon wafers, intended as a base material for the manufacture of high-speed *p*-*n*-microelectronic devices and high-performance solar cells. It is shown that the method of quasi-stationary photoconductivity is based on the following principles: illumination of the research object with a long, slowly decaying light pulse; simultaneous measurement of sample surface conductivity and incident light intensity as functions of time; determining the level of generation of electron-hole pairs in the semiconductor material from the measured value of the intensity of the incident light at each moment of time; determination of the quasi-equilibrium concentration of charge carriers, based on the measured value of the surface conductivity at each moment of time; calculation of the effective lifetime of minority charge carriers in the quasi-equilibrium approximation.

Keywords: silicon, lifetime of minority charge carriers, photoconductivity, solar cell, recombination

I. Введение

Около 3% производимого в мире кремния используется в виде чистого кристаллического полупроводникового материала для изготовления микроэлектронных приборов. Около 12% кремния используется для изготовления фотоэлектри-

ческих преобразователей энергии. Независимо от способа использования качество полупроводникового кремния определяется величиной времени жизни неосновных носителей заряда (НЗ) [1, 2]. Этот параметр материала более чувствителен к дефектам, чем его удельное электрическое сопротивление и подвижность НЗ [3-5]. Поэтому время жизни НЗ в кремнии – одна из важных характеристик, определяющих пределы его практической применимости как в микроэлектронике, так и в полупроводниковой фотовольтаике [6-9].

В нелегированных слитках кремния высокого качества время жизни НЗ составляет $\tau \geq 1$ мс, и если оно существенно меньше, то это свидетельствует о низком качестве исходного материала или о возможности допущенных нарушений технологии выращивания кристалла [1, 10]. Поэтому при выращивании слитков необходим достаточно простой и надежный метод определения времени жизни НЗ, без отрезания пластин и приготовления образцов с омическими контактами для измерения фотопроводимости. Традиционно в слитках кремния с удельным сопротивлением ρ = 0.5–500 Ом·см время жизни НЗ определяется методом модуляции проводимости в точечном контакте. При выполнении определенных требований, позволяющих не учитывать влияние поверхностной рекомбинации и диффузии НЗ, погрешность измерений не должна превышать 20% для $\tau \geq 2.8$ мкс в слитках *p*-Si и $\tau \geq 7.8$ мкс для слитков *n*-Si [1]. Присутствие рекомбинационных центров в объеме кремния оказывает существенное влияние на функциональные свойства микроэлектронных и оптоэлектронных полупроводниковых приборов [10-12].

Усовершенствование методики измерения времени жизни НЗ в кремниевых, и вообще в полупроводниковых материалах, является одним из актуальных объектов исследования в последние более трех десятков лет. В соответствии с интенсивным развитием микро- и наноэлектроники, а также фотоники и фотовольтаики требуется более точное, ускоренное и неразрушающее определение времени жизни НЗ в полупроводниковых материалах, предназначенных в качестве базового материала для изготовления быстродействующих оптоэлектронных приборов и эффективных солнечных элементов (СЭ) [13-14].

Данная работа посвящена представлению и обсуждению первичных результатов экспериментального исследования возможности применения современных «переходный метод» и «метод бесконтактной квазистационарной фотопроводимости» для определения времени жизни НЗ в кремниевых пластинах, используемых для изготовления быстродействующих *p*-*n*-приборов микроэлектроники и высоко-эффективных СЭ.

II. Описание объекта и методов исследования

Известны два основных метода определения времени жизни НЗ. Переходный (transient) метод предназначен для измерения эффективного времени жизни заряда путем инжекции в кремниевый материал избыточных НЗ от типичных внешних источников, таких как электрическое поле, оптические импульсы, гамма-излучение и другие [15, 16]. Такие источники будут генерировать избыточные носители, и тогда можно легко определить эффективное время жизни НЗ. Для метода квазистационарной фотопроводимости требуется только фиксированное значение генерации НЗ. В методе квазистационарной фотопроводимости концентрация НЗ находится в стационарном состоянии, в равновесии с процессами генерации и рекомбинации. При этом время жизни НЗ рассчитывается по формуле:

$$\tau = \Delta n / G \tag{1}$$

С другой стороны, в переходном случае генерация отсутствует, а концентрация НЗ не находится в стационарном состоянии. Тогда используется соответствующее выражение:

$$\tau = \frac{-\Delta n}{d\Delta n / dt}. \tag{2}$$

Обычно имеет место обобщенный случай, в котором выполняются как условия генерации, так и нестационарные условия. Тогда, как указано в работе [17], для времени жизни НЗ можно принять:

$$\tau = \frac{\Delta n}{G - (d\Delta n / dt)}. \tag{3}$$

Видно, что это выражение сводится к переходному выражению, когда $G = 0$, и к случаю квазистационарной фотопроводимости, когда $d\Delta n / dt = 0$.

Среди электрофизических методов исследований следует выделить, в первую очередь, метод квазистационарной фотопроводимости, основан-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

ный на бесконтактном измерении проводимости пластины при воздействии импульсного излучения, позволяющий проводить оценку величин эффективного времени жизни неосновных НЗ [18]. К достоинствам этого метода относятся его простота, высокая скорость измерений, а также немаловажен тот факт, что это бесконтактный метод. В данной работе для измерения времени жизни неравновесных НЗ и величины поверхностного сопротивления использовали стандартную измерительную установку Sinton WCT-120 Offline Wafer Lifetime Measurement.



Рисунок 1. Общий вид системы Sinton WCT-120 (Sinton Instruments, USA, 2019) для измерения времени жизни неосновных НЗ в полупроводниках.

На рис. 1 приведен общий вид системы Sinton WCT-120 для измерения времени жизни НЗ в полупроводниках. На рис. 2 приведена схема этого измерительного прибора. Метод измерения основан на использовании вихревых токов.

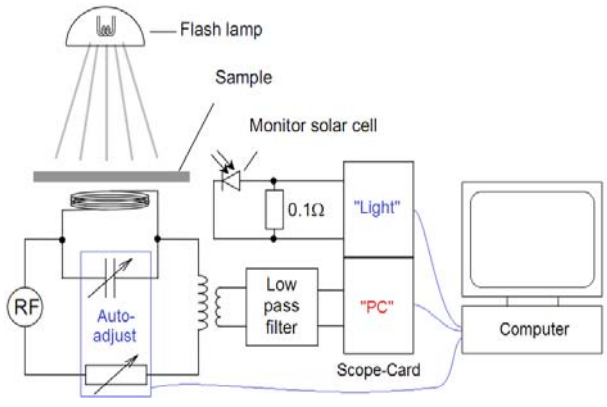


Рисунок 2. Схема прибора Sinton WCT-120 при измерении переходным методом и квазистационарной фотопроводимости.

Высокочастотная (RF или ВЧ) катушка встроена в столик WCT-120 (рис. 3). Чувствительные датчики устройства, вмонтированные под скамьи для исследуемых кристаллов, должны быть откалиброваны, исходя из геометрической формы и параметров пластины перед проведением измерений. Кремниевую пластину помещают на верхнюю часть катушки, которая направляет электромагнитные волны в пластину. Колебательное электромагнитное поле катушки, действуя на свободные НЗ в образце, генерирует вихревые токи, которые индуцируют ток противодействия в катушке.



Рисунок 3. Измерительный столик установки со светочувствительными датчиками и ВЧ катушкой.

Как видно из рисунка, образец, расположенный сверху на поверхности катушки, электрически изолированной от образца тонким пластиковым слоем, освещается фотографической вспышкой (flash lamp) с регулируемым временем затухания (≈0.25...12 мс). После того как свет в импульсном режиме падает на пластину, создаётся избыточное число НЗ, катушка определяет изменение проводимости пластины, и на основе этих данных вычисляется время жизни неосновных НЗ. Изменение проводимости в стационарных условиях дается формулой [18]:

$$\Delta\sigma = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p)W = q\Delta n(\mu_n + \mu_p)W\,, \quad (4)$$

где $\Delta n = \Delta p$ – это избыточная концентрация фотогенерированных НЗ, W – толщина пластины, μ_n, μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно.

В стационарных условиях скорость генерации электронно-дырочных пар находится в равновесии со скоростью рекомбинации:

$$U = G\,. \quad (5)$$

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

Общая скорость рекомбинации может быть выражена как эффективное время жизни носителей (τ_{eff})

$$U = \Delta n / \tau_{eff} . \quad (6)$$

Тогда

$$\tau_{eff} = \frac{\Delta\sigma}{q(\mu_n + \mu_p)WG} . \quad (7)$$

$(\mu_n+\mu_p)$ предполагается постоянным во всем диапазоне уровня легирования. Увеличение проводимости ($\Delta\sigma$) и скорости генерации (G) вычисляется из калибровки ВЧ катушки, скорость генерации (G) рассчитывается для калибровочного СЭ.

Метод квазистационарной фотопроводимости представляет собой метод без визуализации, так что он может измерить только время жизни в данном пятне на пластине [17, 18]. Измеренное эффективное время жизни неосновных НЗ – это среднее время жизни в области пластины, находящейся непосредственно на вершине катушки ВЧ, диаметр которой 3.8 см. Интенсивность света измеряется с помощью эталонного СЭ с высоким последовательным сопротивлением, подключенным к фиксирован-ной нагрузке 0.1 Ом, что дает сигнал напряжения с коэффициентом пропорциональности 5.80 мВ/солнце для установки в ISC Konstanz. Избыточная концентрация НЗ и эффективное время жизни вычисляются с помощью приведённых уравнений и заносятся в график и таблицу измерения (рис. 4).

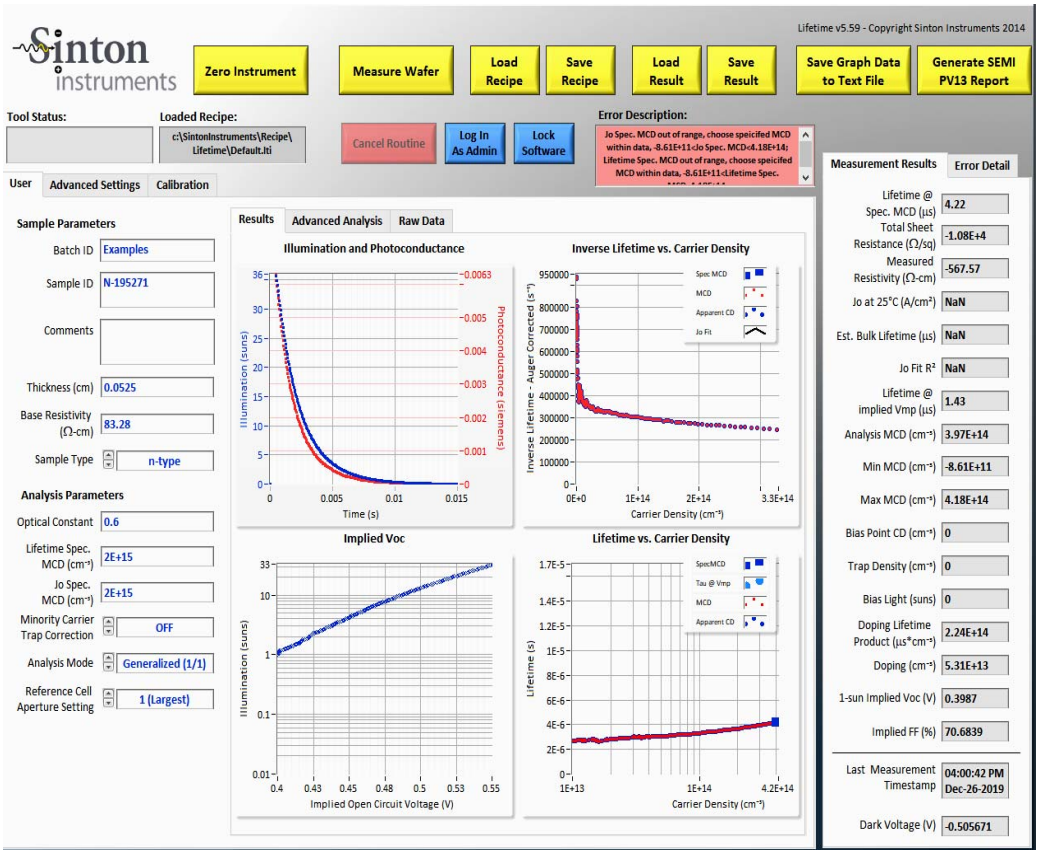


Рисунок 4. Динамические характеристики неравновесных НЗ в кремниевых пластинах.

III. Описание и анализ результатов

Исследовались (результаты приведены на рис. 4) пластины монокристаллического *n*-типа кремния с удельным сопротивлением ~83 Ом·см, плотностью дислокаций ~10^4 $см^{-2}$ и толщиной 0.0525 см. На рис. 5 приведен график зависимости интенсивности света (suns) и фотопроводимости (Simens) от времени. Они рассчитываются из исходных напряжений сенсора ВЧ и датчика

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

освещенности с использованием калибровочных констант в дополнительных параметрах. Для измерения методами квазистационарной фотопроводимости интенсивность света должна быть плавной, экспоненциально убывающей кривой после быстрого начального повышения.

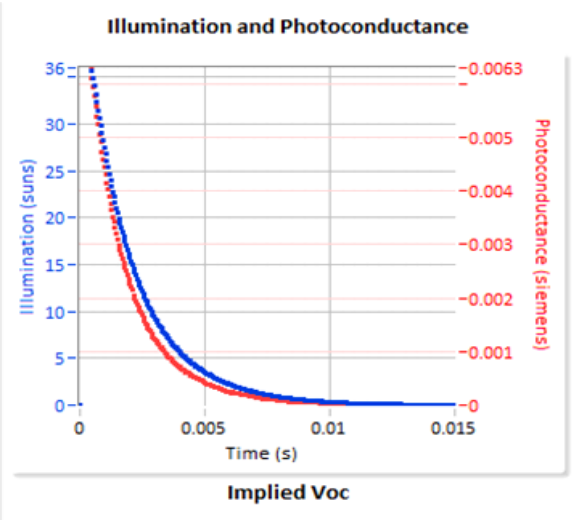


Рисунок 5. Зависимости интенсивности света и фотопроводимости от времени.

Необходимо отметить, что масштаб координаты времени (по горизонтали) должен быть достаточно большим, чтобы визуально фиксировать всю длительность вспышки, составляющую не менее 12 мс. При измерении переходным методом, синяя кривая (верхняя) интенсивность света имеет резкий пик в левой части графика. Для определения времени жизни НЗ детально анализируется красный след (нижняя кривая спада) (рис. 5).

На рис. 6 показано предполагаемое напряжение разомкнутой цепи подложки в зависимости от интенсивности света. Если кривые проходят через точку 1 (suns) по координатам освещенности, то величину V_{oc} можно легко определить непосредственно из этого графика. Это указывает на максимально достижимое V_{oc} для подложки в ее текущем состоянии. Надо учитывать, что время жизни НЗ может изменяться в процессе последующей обработки (например, диффузия эмиттера, нанесение контактного металлического электрода), что приведет к изменению V_{oc}.

V_{oc} рассчитывается по выражению:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{np}{n_i^2}\right), \qquad (8)$$

где n и p – общие концентрации электронов и дырок. Для кремния p-типа $p=N_A+\Delta n$, и $n=\Delta n$.

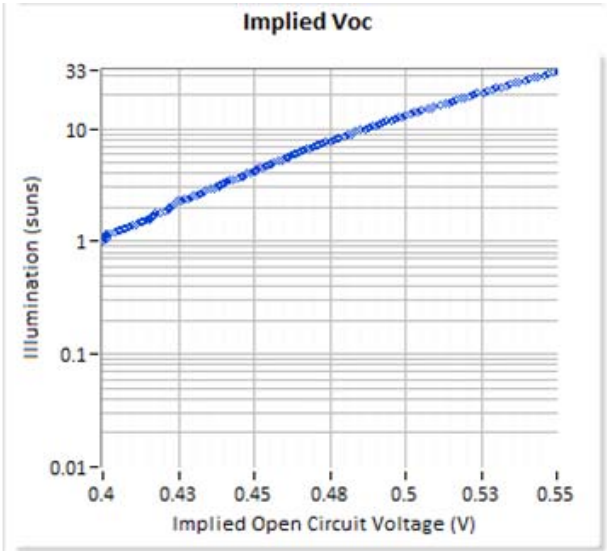


Рисунок. 6. Зависимости интенсивности света от $V_{oc.}$

Следовательно, расчет V_{oc} весьма чувствителен к удельному сопротивлению и типу пластины, определяемого пользователем. Данные также скорректированы для емкостных эффектов самой солнечной батареи. Для случаев с захватом или сильными эффектами модуляции области обеднения правильно выбранная величина смещения света может расширить диапазон действительных данных V_{oc} на порядок в диапазоне интенсивности слабого освещения.

На рис. 7 показано обратное время жизни с вычетом влияния Оже-рекомбинации как функции избыточной концентрации НЗ. Варьируя заданные диапазоны MCD и Fit, можно получить подходящее соответствие, которое проходит через линейную часть обратных значений времени жизни. Его основное предназначение – извлечение токов насыщения J_0. Образец с диффузными поверхностями, измеренными при высокой инжекции, должен давать прямую линию, наклон которой пропорционален J_0. График показывает две разные концентрации избыточных носителей – концентрацию основных НЗ и концентрацию неосновных НЗ. Концентрация основных НЗ представляет собой данные, вычисленные с нулевым смещением света. Введение ненулевого смещения приводит к

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

вычитанию избыточной проводимости, и это будет концентрация неосновных НЗ. Если на вход подается свет с ненулевым смещением, как это может происходить при наличии модуляции области захвата или истощения, вычитание избыточной проводимости из-за этих эффектов приводит к пересчитанной плотности носителей, называемой затем плотностью неосновных носителей. Это более точный параметр при вводе индикатора смещения. Если не вводится индикатор смещения, оба набора данных совпадают.

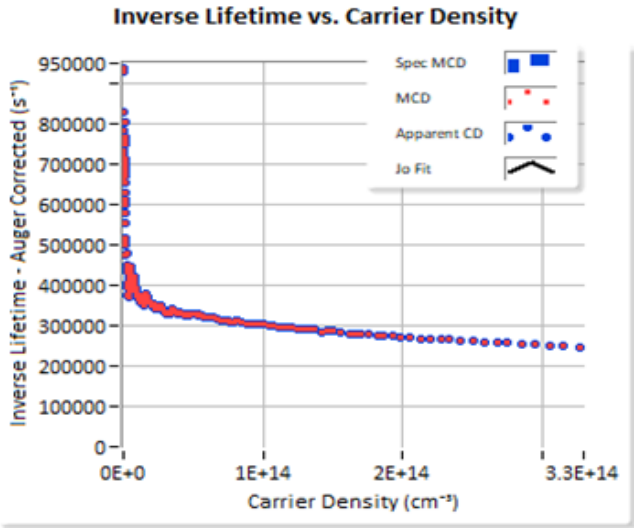


Рисунок 7. Зависимость обратного значения времени жизни от концентрации НЗ.

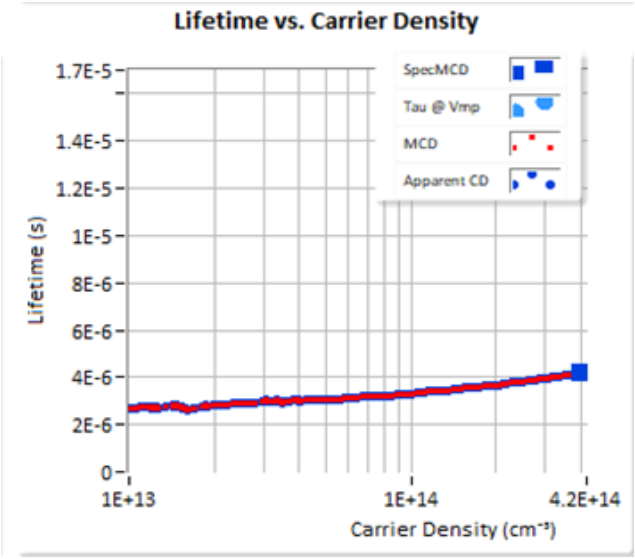


Рисунок 8. Зависимость времени жизни неосновных носителей от концентрации.

На рис. 8 приведен график, отображающий время жизни (в отличие от его обратного) как функцию избыточной концентрации НЗ. В этом случае нет необходимости вычитания Оже-рекомбинации и еще раз показаны как концентрация основных, так и неосновных НЗ.

IV. Заключение

Измерительная установка Sinton WCT-120 рассчитана на измерение эффективного времени жизни, в то время как промышленность требует измерения объемного времени жизни НЗ. Указанные физические величины существенно различаются друг от друга. Если измерения проводят на непассивированных полупроводниковых образцах, более четко выявляется их различие по форме релаксационной кривой в зависимости от точки локализации фоточувствительных датчиков по плоскости образцов [19]. В настоящее время наиболее совершенным материалом с минимальным содержанием неконтролируемых примесей является монокристаллический кремний для микроэлектроники. Поэтому эталон и стандартные образцы объемного времени жизни неосновных НЗ должны быть изготовлены из этого материала и ориентированы на объемное время жизни неосновных НЗ как важнейшего параметра качества непрямозонных полупроводников [20]. Стандартные образцы с известным временем жизни и размерами, рекомендованными в международном стандарте [21], могут быть оптимальными при использования их для калибровки и поверки как контактных, так и бесконтактных средств измерения этого параметра. Но при этом необходимо четко регламентировать процедуру расчета эффективного времени жизни, пересчета его в объемное, или условия измерения, при которых эти параметры совпадают [22-25].

Метаданные

On dynamic characteristics of nonequilibrium charge carriers in silicon wafers

R. Aliev, A.O. Kurbanov, Kh. Izzatillaev

Andijan State University, University str. 129, 170100, Andijan, Uzbekistan

The article is devoted to the presentation and discussion of the primary results of an experimental study of the possibility of using the modern "transient

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

photoconductance method" and "non-contact quasi steady state photoconductivity method" for a more accurate, accelerated and non-destructive determination of the lifetime of charge carriers in silicon wafers, intended as a base material for the manufacture of high-speed *p-n*-microelectronic devices and high-performance solar cells. It is shown that the method of quasi-stationary photoconductivity is based on the following principles: illumination of the research object with a long, slowly decaying light pulse; simultaneous measurement of sample surface conductivity and incident light intensity as functions of time; determining the level of generation of electron-hole pairs in the semiconductor material from the measured value of the intensity of the incident light at each moment of time; determination of the quasi-equilibrium concentration of charge carriers, based on the measured value of the surface conductivity at each moment of time; calculation of the effective lifetime of minority charge carriers in the quasi-equilibrium approximation.

Keywords: silicon, lifetime of minority charge carriers, photoconductivity, solar cell, recombination.

Литература (References)

[1] P.A. Borodovskiy, A.F. Buldigin, A.S. Tokarev. Fizika i tekhnika poluprovodnikov **38**, No.9, 1043 (2004).
[2] S. Zaynobidinov, A.O. Kurbanov. Nauchniy vestnik Buharskogo gosuniversiteta **69**, №1.2 (2018).
[3] S.Zaynobidinov, A.O. Kurbanov. Scientific-technical journal FerPI 24, I.5, 90 (2020).
[4] M.J. Kerr, A. Cuevas. Semicond. Sci. Technol **17**, No.1, 35 (2002).
[5] A. Richter et al. Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys. **86**, 16 (2012).
[6] S. Zaynobidinov, A.O. Kurbanov. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser: Yestestvenniye nauki **2**, No.2, 81 (2019).
[7] Maksym Plakhotnyuk, Rasmus Schmidt Davidsen, Radu Malureanu, Eugen Stamate. Lifetime nano-structured black silicon. Photovolt. Appl. 1 (2016).
[8] J. Benick et al. IEEE J. Photovoltaics **7**, No 5, 1171 (2017).
[9] J. Hirsch et al. Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V. **374**, 252 (2016).
[10] T. Pagava. Fizika i tekhnika poluprovodnikov **38**, No.6, 665 (2004).
[11] Ussama A.I. Elani. Journal of King Saud University **22**, 9 (2010).
[12] S. Zaynobidinov, A.O. Kurbanov. Uzbek Journal of Physics **20**, No.2, 105 (2018).
[13] Y. Wan et al. Appl. Phys. Lett. **107**, 23 (2015).
[14] C.E. Kendrick, J.M. Redwing. Semiconductors and Semimetals **94**, 185 (2016).
[15] D. Macdonald, R.A. Sinton, and A. Cuevas. Journal of Applied Physics **89**, 2772 (2001).
[16] S. Zaynobidinov, A.O. Kurbanov. Petersburg Journal of Electronics **92**, No.3, 11 (2018).
[17] H. Nagel, C. Berge, and A.G. Aberle. Journal of Applied Physics **86**, 6218 (1999).
[18] R. Sinton, A. Cuevas. Appl. Phys. Lett. **69**, 2510 (1996).
[19] S.P. Kobeleva, I.M. Anfimov, I.V. Shemerov, L.P. Xolodniy, I.V. Borzix, V.V. Ptashinskiy. Standartniye obraztsi No.1, 16 (2015).
[20] S.P. Kobeleva, P.B. Lagov, I.V. Shemerov. Standartniye obraztsi No.3, 10 (2013).
[21] SEMI M F1535-94 «Stantard Test Methods for Carrier Recombination Lifetime in Silicon Wafers by Noncontact Measurement of Photoconductivity Decay by Microwave Reflectance» (Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1994).
[22] I.M. Anfimov, S.P. Kobeleva, M.D. Malinkovich, I.V. Shchemerov, O.V. Toporova, Y.N. Parkhomenko. Russian Microelectronics **42**, Issue 8, 448 (2013).
[23] V.K. Khanna. Progress in Quantum Electronics **29**, 59 (2005).
[24] D.K. Schroder. ECS Transactions **3**, Issue 4, 321 (2006).
[25] D.A. Kudryashov, A.S. Gudovskikh, A.I. Baranov, I.A. Morozov, A.O. Monastyrenko. Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science **4**, 217 (2020).

Кремний пластинасидаги номувозанатий заряд ташувчиларнинг динамик характеристикаси ҳақида

Р. Алиев, А.О. Курбанов, Х. Иззатиллаев

Андижон давлат университети, Университет кўч., 129, 170100, Андижон, Ўзбекистон

Ушбу мақола тезкор *p-n* ўтишли асбоблар ва юқори самарадорликка эга бўлган қуёш батареяларини тайёрлашда асосий материал бўлган кремний пластинасидаги заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқроқ, тез ва бузилишларсиз ўлчашнинг замонавий усуллари "Ўтиш усули" ва "Контактсиз квазистационар фотоўтказувчанлик усули" дан фойдаланиш имкониятларини экспериментал ўрганишнинг дастлабки натижаларини тақдим этиш ва мухокама қилишга бағишланган. Квазистационар фотоўтказувчанлик усули қуйидаги принципларга асосланганлиги кўрсатилган: тадқиқот объектини узоқ ва секин сўнувчи импулсли ёруғлик билан ёритиш; бир вақтнинг ўзида намунанинг сиртий ўтказувчанлигини ва тушган ёруғлик интенсивлигини вақтнинг функцияси сифатида ўлчаш; яримўтказгич моддадаги электрон-ковак жуфтларининг хосил бўлиш даражасини хар бир вақт моментидаги тушаётган ёруғлик интенсивлигининг ўлчанган қийматида аниқлаш; хар бир вақт моментида ўлчанган сиртий ўтказувчанликка асосланиб заряд ташувчиларнинг квазимувозанат концентрацияларини аниқлаш; квазимувозанат яқинлашув асосида асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтини хисоблаш.

Калит сўзлар: кремний, асосий бўлмаган заряд нашувчилар яшаш вақти, фотоўтказувчанлик, қуёш элементи, рекомбинация.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.