

Влияние вольфрама на скорость поверхностной рекомбинации в кремнии*Н. В. Цвигун, Г. П. Копица, Т. В. Власова, В. И. Крыштоб, С. И. Расмагин*

Проведено исследование влияния вольфрама на время релаксации фотопроводимости в кремнии. Была выяснена роль вольфрама на скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда в кремнии после термообработки. Определены скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда в кремнии после термообработки в присутствии вольфрама и без него. Получено аномальное уменьшение скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда в кремнии в присутствии вольфрама. Дано возможное объяснение этого явления.

Ключевые слова: релаксация фотопроводимости, термообработка кремния с вольфрамом, скорость поверхностной рекомбинации.

Введение

Полупроводниковые материалы, используемые в микроэлектронике, проходят тщательный контроль электрических и фотоэлектрических параметров. Эти параметры определяются различными дефектами: атомами примесей, межузельными атомами основного вещества, комплексами примесных атомов с вакансиями, комплексами примесных атомов.

Дефекты влияют на данные параметры особенно сильно, когда возникают энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника. Энергетические уровни оказывают существенное влияние на величину времени жизни носителей заряда и на величину удельного сопротивления [1]. Изменение энергетических уровней дефектов, и соответственно электрических и фотоэлектрических параметров материала, может происходить

при термическом воздействии, которое сопровождается технологическими процессами создания полупроводниковых структур [2]. Изменение электрических и фотоэлектрических параметров происходит также во время изготовления электрических контактов. Чтобы исключить такие влияния, контроль параметров материала стремятся осуществлять «бесконтактными» неразрушающими методами измерения. Широко используются «бесконтактные» неразрушающие методы, основанные на взаимодействии микроволнового поля с неравновесными носителями заряда, созданные в полупроводнике [3, 4]. При возбуждении импульсом лазерного излучения неравновесных носителей заряда в полупроводнике происходит их релаксация в поле СВЧ. Спад релаксации фотопроводимости происходит с определенным временем релаксации, которое при определенных условиях можно отождествить со временем жизни носителей заряда [5].

В предыдущих наших работах в основном рассматривали свойства, связанные с объемом. Заметим, что изменение энергетических уровней дефектов происходит как в объеме, так и на поверхности полупроводника. Целью данной работы являлось выяснение роли поверхности низкоомного кремния со слоем вольфрама на скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда. Исследование вольфрама на скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда в кремнии представляет практический интерес с точки зрения обеспечения термостабильности удельного сопротивления и времени жизни носителей заряда. Например, полученный кремний может использоваться в качестве термостабильных подложек для эпитаксиальных слоев карбида кремния, который в настоящее время является перспективным мате-

Цвигун Наталья Викторовна¹, инженер.

Копица Геннадий Петрович^{2,3}, зам. заведующего отделом.

Власова Татьяна Викторовна⁴, научный сотрудник, к.х.н.

Крыштоб Виталий Ильич⁴, старший научный сотрудник, к.х.н.

Расмагин Сергей Иосифович⁴, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

¹ ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Россия, 119333, Москва, Ленинский пр., 59.

² НИЦ КИ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова.

Россия, 188300, Ленинградская обл., Гатчина, Орлова роща, 1.

³ Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН.

Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2.

⁴ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8(499) 503-87-22. E-mail: rasmus123@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2018 г.

© Цвигун Н. В., Копица Г. П., Власова Т. В., Крыштоб В. И., Расмагин С. И., 2018

риалом в микроэлектронике.

Экспериментальная часть

В качестве исходного кремния использовали кремний электронного типа проводимости марки КЭФ-5, выращенный по методу Чохральского. В образце исходного кремния определили концентрацию фосфора порядка 10^{15} см^{-3} и концентрация кислорода – 10^{17} см^{-3} . Были созданы две группы образцов кремния. В первую группу вошли образцы кремния, прошедшие термообработку со свободной поверхностью. Во вторую группу вошли образцы кремния, прошедшие термообработку, с нанесенным на поверхность слоем вольфрама. Процессы термообработки (ТО) проходили при разных температурах 750 °С, 850 °С, 900 °С и 1000 °С в термической печи в кварцевой трубке с низким вакуумом (10^{-3} мм.рт.ст.) в течение 5 часов. В результате термообработки были получены две группы образцов кремния условно обозначим их

ТО и ТО<W>. После термообработки созданные образцы кремния охлаждались в печи на воздухе в течение 24 часов. Проводили медленное охлаждение с целью уменьшения дефектов закалки. Перед измерением свойств у всех образцов шлифовался, а затем стравливался поверхностный слой толщиной 2 мкм.

Результаты и их обсуждение

У всех опытных образцов были измерены удельные сопротивления (см. табл. 1) и тип проводимости по методам описанных в работе [6]. У исходного кремния КЭФ-5 тип проводимости был электронный, а удельное сопротивление $\rho = 5 \pm 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Тип проводимости после ТО остался электронным, т.е. основными носителями заряда по-прежнему являются электроны.

Таблица 1

Зависимость удельного сопротивления ρ образцов кремния от температуры термообработки t

Температуры t (°С) термообработки	750	850	900	1000
ТО ρ (Ом см)	6 ± 2	7 ± 2	7 ± 2	6 ± 2
ТО<W> ρ (Ом см)	3 ± 1	7 ± 2	8 ± 2	9 ± 3

Из таблицы 1 видно, что величина удельного сопротивления для обеих групп образцов практически не изменилась и колеблется в среднем $7 \pm 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, т. е. в пределах погрешности. Только образец кремния после термообработки с вольфрамом при температуре $t = 1000 \text{ °С}$ имеет ρ приблизительно в 2 раза больше. Можно предположить, что удельное сопротивление кремния с вольфрамом будет расти с увеличением температуры термообработки свыше 1200 °С вплоть до температуры плавления кремния порядка $T = 1400 \text{ °С}$. В рассматриваемом же диапазоне температур (750–1000 °С) термообработка образцов со свободной поверхностью и со слоем вольфрама на поверхности не создает дополнительных центров компенсации, которые бы сильно увеличили удельное сопротивление. Т. е. созданные концентрации дефектов термообработки и центров компенсации, созданные вольфрамом (или его соединениями) намного меньше концентрации фосфора $N_{\text{ph}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и по нашим оценкам составляет 10^{12} см^{-3} [5, 7]. Отметим, что энергии ионизации примесей в кремнии с такими концентрациями практически определить не удастся. Поэтому, информацию о примесях удастся получить из измерения удельного сопротивления

и времени релаксации фотопроводимости (постоянная время). Но, как видели раньше, удельное сопротивление тоже слабо меняется после термообработки при температурах (750–1000 °С). Поэтому, основным параметром, который дает информацию о свойствах примесей будет время жизни носителей заряда, которое при малом уровне возбуждения неравновесных носителей совпадает с временем релаксации фотопроводимости [8]. Одним из лучших бесконтактных методов измерения постоянной времени является метод релаксации нестационарной фотопроводимости в СВЧ-поле после лазерного возбуждения. Данный метод имеет два существенных достоинства: бесконтактность и хорошая чувствительность [9]. В этом методе величина постоянной времени измерялась при возбуждении неравновесных носителей заряда импульсным лазерным излучением с двумя длинами волн $\lambda_1 = 1,06 \text{ мкм}$ и $\lambda_2 = 0,9 \text{ мкм}$ и СВЧ-волной мощностью $P = 5 \text{ мВт}$ и частотой $\nu = 10^{10} \text{ Гц}$ в качестве зондирующего излучения в волноводном тройнике. Для всех термообработанных образцов кремния со свободной поверхностью релаксация нестационарной фотопроводимости происходила по экспоненциальному закону и характеризовалась одной постоянной времени, которая

определялась методом наименьших квадратов. Это значительно упрощало определение времени релаксации в отличие от релаксации фотопроводимости с двумя или более экспонентами, которые требуют более сложный метод определения [10]. Энергия кванта лазерного возбуждающего излучения, соответствующего длине волны $\lambda_1 = 1,06$ мкм, равна $E_{1,06} = 1,17$ эВ, а коэффициент поглощения излучения в кремнии на данной длине волны равен $\alpha_{1,06} = 10 \text{ см}^{-1}$ [11]. Глубина проникновения излучения в кремний, на которой интенсивность падает в «е», равняется $d_{1,06} = (1/\alpha) = (1/10) = 0,1$ см. Толщина исследованных образцов кремния была в пределах $\theta = 0,1-0,15$ см. Из этого видно, что генерация неравновесных носителей при облучении лазерным излучением с длиной волны $\lambda_1 = 1,06$ мкм происходит однородно во всем объеме образцов кремния. Энергия кванта возбуждающего лазерного излучения равна $E_{0,9} = 1,37$ эВ длине волны $\lambda_2 = 0,9$ мкм, тогда коэффициент поглощения излучения в кремнии на данной длине волны равен $\alpha_{0,9} = 300 \text{ см}^{-1}$ [11]. Соответственно, характерная глубина проникновения излучения в кремний равняется $d_{0,9} = (1/\alpha) = 30$ мкм, что значительно меньше, чем толщина образцов кремния, т. е. $d_{0,9} = 30 \text{ мкм} \ll \theta = (1000-1500) \text{ мкм}$.

В общем виде уменьшение концентрации неравновесных носителей заряда в полупроводнике определяется тремя процессами: 1) объемной рекомбинацией; 2) поверхностной рекомбинацией; 3) диффузией носителей заряда. Так, например, для исходного КЭФ-5 величина постоянной времени составила $\tau_{1,06} = 180 \pm 18$ мкс при длине волны возбуждающего излучения $\lambda_1 = 1,06$ мкм при температуре измерения $T = 300$ К. А при длине волны излучения $\lambda_2 = 0,9$ мкм при температуре измерения $T = 300$ К величина постоянной времени составила $\tau_{0,9} = 6,0 \pm 0,6$ мкс. Из сопоставления этих данных величин постоянной времени с учетом величин коэффициентов поглощения можно заключить, что при облучении исходного кремния импульсным лазерным излучением с длиной волны $\lambda_1 = 1,06$ мкм уменьшение неравновесных носителей заряда в основном определяется объемной рекомбинацией. А при облучении импульсным лазерным излучением с длиной волны $\lambda_2 = 0,9$ мкм уменьшение неравновесных носителей заряда определяется процессами объемной рекомбинации, поверхностной рекомбинации и диффузией носителей заряда. Влияние поверхности на кинетику электронных процессов характеризуется скоростью поверхностной рекомбинации [12]. Рекомбинация через поверхностные энергетические уров-

ни термодиффектов и примесей происходит в два этапа: через быстрой захват дырок и затем более медленный захват электронов. В наших образцах кремния электронного типа проводимости электроны являются основными носителями заряда, концентрация которых много больше концентрации дырок.

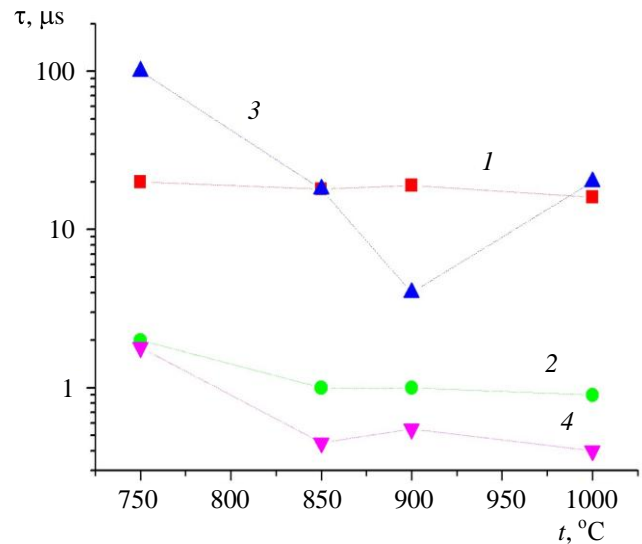


Рис. 1. Зависимость времени релаксации фотопроводимости от температуры термообработки (ТО). 1 – ТО без W длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм; 2 – ТО без W длина волны излучения $\lambda = 0,9$ мкм; 3 – ТО+W длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм; 4 – ТО+W длина волны излучения $\lambda = 0,9$ мкм.

На рис. 1 показаны зависимости постоянной времени фотопроводимости от температуры термообработки для групп образцов ТО и ТО+W. Известно, что время релаксации дырок порядка $\leq 0,1$ мкс [12], а электронов порядка 1–10 мкс (см. рис. 1). Поэтому, в нашем случае на поверхностные энергетические уровни наблюдали именно захват электронов, который и определяет темп рекомбинации носителей заряда. Скорость поверхностной рекомбинации может быть найдена следующим образом. Найдем закон уменьшения носителей заряда предположив, что в момент $t = 0$ генерация носителей заряда выключается. Тогда уравнение непрерывности в отсутствие внешнего электрического поля имеет вид

$$d\Delta n / dt = D \, d^2\Delta n / dx^2 - \Delta n / \tau_{06} \quad (1.1)$$

где D – коэффициент диффузии носителей заряда, τ_{06} – время релаксации фотопроводимости в объеме кремния, Δn – изменение концентрации электронов, x – направления в котором распространяется падающее излучение. Граничные условия при

$x = \pm d$ и $g_s = 0$ выражаются соотношением:

$$g_s = 1/e j_n 0 + s_n \Delta n 0 , \quad (1.2)$$

где d – толщина образца кремния, g_s – темп поверхностной рекомбинации, j_n – плотность электронного тока у поверхности, s_n – скорость поверхностной рекомбинации электронов. Общее решение уравнения (1.1) можно записать в виде

$$\Delta n t, x = \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m e^{-t/\tau_m} \cos max , \quad (1.3)$$

где m – целые числа, α_m, τ_m, a – постоянные. Подставляя выражение (1.3) в уравнение (1.1), находим, что уравнение удовлетворяется при условии, что между « a » и τ_m выполняется соотношение

$$1/\tau_m = 1/\tau_{06} + Da^2 m^2. \quad (1.4)$$

Считая $t = 0$ в выражении (1.3), видим, что постоянные α_m являются коэффициентами разложения в ряд Фурье начального распределения электронов. Из выражения видно, что уменьшение Δn определяется суммой экспонент, следовательно, сложным неэкспоненциальным законом. Однако, как показывает формула (1.4), времена τ_m быстро убывают с увеличением номера m . Поэтому, если исключить начальный период затухания, приближенно можно пользоваться асимптотическим решением, оставив в формуле (1.3) только один член с $m = 1$. Тогда выражение (1.3) примет вид

$$\Delta n t, x = \alpha e^{-t/\tau} \cos ax , \quad (1.5)$$

$$1/\tau = 1/\tau_{06} + 1/\tau_s , \quad 1/\tau_s = Da^2. \quad (1.6)$$

Слагаемое $(1/\tau_s)$ выражает влияние поверхностной рекомбинации на величину постоянной времени, а время τ_s является поверхностной постоянной времени. Постоянную a можно найти из граничных условий. Подставляя решение (1.5) в соотношение (1.2) при $g_s = 0$, получим для « a » трансцендентное уравнение

$$s = aD \operatorname{tg} ad , \quad (1.7)$$

где d – глубина проникновения излучения в образец кремния при данной длине волны.

Для исходного кремния, измерив времена $\tau_{06} = 180$ мкс при длине волны излучения $\lambda_2 = 1,06$ мкм и $\tau = 6$ мкс при $\lambda_1 = 0,9$ мкм, из соотношения (1.6) нашли время $\tau_s = 6,2$ мкс. Используя коэффициент диффузии электронов $D = 13$ см²/с в кремнии при $T = 300$ К, из уравнения (1.7) находим скорость поверхностной рекомбинации $s = 445$ см/с.

Для образцов кремния, прошедших ТО при разных температурах, скорости поверхностной рекомбинации приведены в табл. 2. Скорости поверхностной рекомбинации определялись из решения уравнения (1.7) с использованием соотношения (1.6). Из табл. 2 видно, для кремния, прошедшего ТО при температурах от $t = 750$ °С до $T = 1000$ °С в течение 5 часов, скорость поверхностной рекомбинации s лежит в пределах =1510–4210 см/с. Итак, видно, что термообработка приводит к увеличению скорости поверхностной рекомбинации электронов по сравнению с исходным кремнием в 3–10 раз. Другими словами, в приповерхностной области кремния создаются дополнительные центры рекомбинации, связанные с термомодефектами (например, вакансии), которые и увеличивают скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда. Отметим, что скорость поверхностной рекомбинации (СПР) увеличивается нелинейно с увеличением температуры ТО. Так при температурах $t = 850$ °С и $t = 900$ °С скорости поверхностной рекомбинации практически равны, т. е. рост термомодефектов на поверхности кремния с увеличением температуры прекращается.

Для образцов кремния, прошедших термообработку (ТО) в присутствии вольфрама при разных температурах, скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда приведены в табл. 2. Из табл. 2 видно, для кремния, прошедшего ТО в присутствии W при температурах от $t = 750$ °С до $t = 1000$ °С в течение 5 часов, скорость поверхностной рекомбинации s лежит в пределах =430–7700 см/с.

Таблица 2

Зависимость скорости поверхностной рекомбинации S от температуры термообработки T для образцов кремния со свободной поверхностью и в присутствии вольфрама

Температура термообработки T , °С образцов кремния	Скорость поверхностной рекомбинации S (см/с) для группы ТО	Скорость поверхностной рекомбинации S (см/с) для группы ТО<W>
750	1510	430
850	3640	1755

900	3640	7700
1000	4210	7345

Отметим два интересных факта. Термообработка в присутствии W при более низких температурах $t = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшает в 2–3 раза скорость поверхностной рекомбинации по сравнению с образцами без W . Термообработка образцов в присутствии W при температурах $t = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивает 1,5–2 раза скорость поверхностной рекомбинации по сравнению с образцами без W . Данное anomalous уменьшение скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда в низкотемпературном диапазоне $750\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно объяснить созданием комплексов «вольфрам+вакансия» (W -центров), которые являются более слабыми центрами рекомбинации, чем вакансии, созданные в результате термообработки [13]. А увеличение скорости поверхностной рекомбинации носителей заряд в высокотемпературном диапазоне $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно объяснить геттерированием термодфектов (вакансий) из объема к поверхности, а также сильным ростом количества силицидов вольфрама WSi_2 . Силициды вольфрама могут являться дополнительными центрами рекомбинации носителей заряда. Так, например, показано, что незначительное количество силицидов вольфрама WSi_2 образуются уже начиная с температуры $t = 700\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]. И особенно ярко начинают проявлять себя при температуре ТО $t = 870\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2), достигая своего максимального влияния на рекомбинацию носителей в температурном диапазоне $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

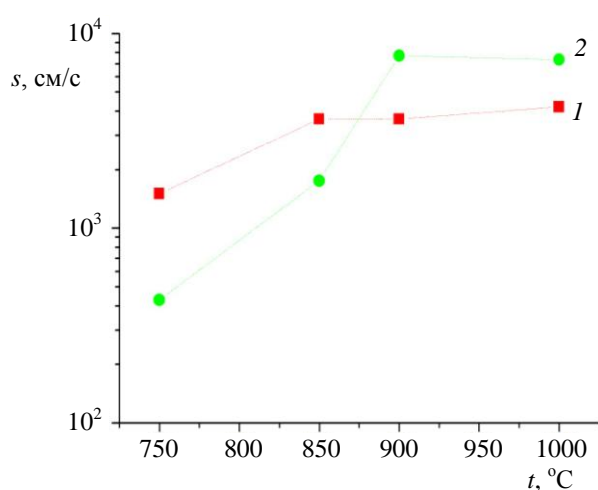


Рис. 2. Зависимость скорости поверхностной рекомбинации s от температуры термообработки t . 1 – ТО без W ; 2 – ТО+ W .

Заключение

Таким образом, в результате проведенного анализа образцов кремния после термообработки с вольфрамом и без вольфрама пришли к следующим основным заключениям.

1) Термообработка кремния без вольфрама увеличивает скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда в 3–10 раз по сравнению с СПР исходного кремния.

2) Скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда в кремнии без вольфрама практически не зависит от температуры термообработки начиная с $t = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Другими словами, рост вакансий в приповерхностной области после термообработки прекращается или вакансии рассасываются вглубь объема кремния.

3) Термообработка кремния в присутствии вольфрама увеличивает скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда в 4–17 раз по сравнению с СПР исходного кремния. Влияние вольфрама состоит в усиливающем эффекте на скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда по сравнению с СПР исходного кремния начиная с температуры $t = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4) Получено anomalous уменьшение скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда в 2–3 раза после термообработки с W по сравнению с ТО без W в температурном диапазоне $t = 750\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5) Термообработка образцов в присутствии W в температурном диапазоне $t = 900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивает 1,5–2 раза скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда по сравнению с ТО без W .

ЛИТЕРАТУРА

1. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. – М.: Мир, 1977.
2. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микроэлектроники. – М.: Мир, 1985.
3. Bykovskij Yu. A., Voronkova G. M., Grigor'ev V. V., Zuev V. V., Kiryukhin A. D., Kramer-Ageev E. A., Petrovskii A. N., Rasmagin S. I., Troshin V. S., Yakubovskii K. V. // Inorganic Materials. 1999. Vol. 35. No. 7. P. 649.
4. Аношин Ю. А., Базин В. М., Даревский А. С. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 6. С. 165.
5. Расмагин С. И. // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 11. С. 1.
6. Bykovskij Yu. A., Zuev V. V., Kiryukhin A. D., Kolosov K. V., Rasmagin S. I. // Materials science. 2000. Vol. 36. No. 8. P. 903.
7. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М.: ГФМЛ, 1963.
8. Расмагин С. И. Воздействие вольфрамового покры-

тия на свойства высокоомного компенсированного кремния. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва, 2000.

9. Расмагин С. И., Крыштоб В. И. // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 11.

10. Быковский Ю. А., Колосов К. В., Зув В. В., Кирюхин А. Д., Расмагин С. И. // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. № 4. С. 54.

11. Справочник. Физические величины. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

12. Бонч-Бруевич В. Л., Калашиников С. Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990.

13. Rasmagin S. I., Krasovskii V. I., Feofanov I. N., Ivashkin P. I. The effect of tungsten on the properties of gold-doped

silicon В книге: Pulsed Lasers and Laser Applications – "AMPL-2017" Abstracts of XIII International Conference. 2017. С. 100–101.

14. Плющева С. В., Михайлов Г. М., Шабельников Л. Г., Шаповал С. Ю. // Неорганические материалы. 2009. Т. 45. № 2. С. 176.

PACS: 71.55.Cn

Effect of tungsten on the rate of surface recombination in silicon

*N. V. Tsvigun*¹, *G. P. Kopitsa*^{2,3}, *T. V. Vlasova*⁴, *V. I. Krysh Tob*⁴, and *S. I. Rasmagin*⁴

¹Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences
59 Leninsky pr., Moscow, 119333, Russia

²Petersburg Nuclear Physics Institute
1 Orlova Roshcha, Gatchina, Leningrad District, 188300, Russia

³Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences
2 Adm. Makarova emb., St. Petersburg, 199155, Russia

⁴Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: rasmus123@yandex.ru

Received February 22, 2018

A study was made the influence of tungsten on the time relaxation photoconductivity in silicon. The role of tungsten on the rate surface recombination charge carriers in silicon after heat treatment was determined. The rates surface recombination of charge carriers in silicon after heat treatment in the presence of tungsten and without it have been determined. An anomalous decrease in the rate surface recombination of charge carriers in silicon in the presence of tungsten was obtained. A possible explanation of this phenomenon is given.

Keywords: relaxation of photoconductivity, heat treatment of silicon with tungsten, rate of surface recombination.

REFERENCES

1. A. G. Milnes, *Deep impurities in semiconductors* (New York; Moscow, Mir, 1977).
2. I. Broudaj and Dzh. Merej, *Physical Foundations of Microtechnology* (Moscow, Mir, 1985) [in Russian].
3. Yu. A. Bykovskii, G. M. Voronkova, V. V. Grigor'ev, V. V. Zuev, A. D. Kiryukhin, E. A. Kramer-Ageev, A. N. Petrovskii, S. I. Rasmagin, V. S. Troshin, and K. V. Yakubovskii, *Inorganic Materials* **35** (7), 649 (1999).
4. Ju. A. Anoshin, V. M. Bazin, and A. S. Darevskij, *Technical Physics* **59** (6), 165 (1989).
5. S. I. Rasmagin, *Inorganic Materials* **50** (11), 1075 (2014).
6. Yu. A. Bykovskij, V. V. Zuev, A. D. Kiryukhin, K. V. Kolosov, and S. I. Rasmagin, *Materials Science* **36** (8), 903 (2000).

7. S. M. Ryvkin, *Photoelectric Phenomena in Semiconductors* (Moscow, GFML, 1963) [in Russian].
8. S. I. Rasmagin, *Effect of tungsten coating on the properties of high-resistance compensated silicon*. (Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, Moscow, 2000)
9. S. I. Rasmagin and V. I. Kryshob, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 11 (2017).
10. Yu. A. Bykovskii, K. V. Kolosov, V. V. Zuev, A. D. Kiryukhin, and S. I. Rasmagin, *Technical Physics* **44** (4), 399 (1999).
11. *Handbook. Physical Values* (Moscow, Energoatomizdat, 1991) [in Russian].
12. V. L. Bonch-Bruevich and S. G. Kalashnikov, *Physics of Semiconductors* (Moscow, Nauka, 1990) [in Russian].
13. S. I. Rasmagin, V. I. Krasovskii, I. N. Feofanov, and P. I. Ivashkin, in *Book: Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2017, Abstracts of XIII International Conference, 2017)*. P. 100–101.
14. S. V. Plyushcheva, G. M. Mikhailov, L. G. Shabel'nikov, and S. Yu. Shapoval, *Inorganic Materials* **45** (2), 140 (2009).