

Свойства легированного золотом кремния в присутствии вольфрама*С. И. Расмагин, И. К. Новиков*

Проведено исследование влияние атомов вольфрама на электрофизические и фотоэлектрические свойства кремния n-типа проводимости, легированного золотом. В результате легирования кремния золотом в присутствии вольфрама были обнаружены следующие энергетические уровни: уровень прилипания $E = E_c - (0,23 \pm 0,02)$ [эВ], связанный с вольфрамом, и уровень прилипания $E = E_c - (0,13 \pm 0,01)$ [эВ], связанный с комплексом вольфрам+вакансия. В серии образцов кремния, легированном золотом, в отсутствие вольфрама были найден уровень прилипания $E = E_c - (0,16 \pm 0,02)$ [эВ], связанный с комплексом кислород+вакансия. В образцах кремния после диффузии золота без вольфрама величина удельного сопротивления выросла на 2 порядка благодаря созданию центров компенсации золота, а в присутствии вольфрама удельное сопротивление увеличилось на 3 порядка, что свидетельствует о создании дополнительных энергетических центров, связанных как с золотом, так и с вольфрамом. Соответственно времена нестационарной релаксации фотопроводимости значительно уменьшились до величин 0,1–10 мкс из-за создания дополнительных центров рекомбинации и уровней прилипания.

Ключевые слова: высокоомный кремний, кремний легированный золотом и вольфрамом, релаксации фотопроводимости, удельное сопротивление.

Введение

Создание и широкое применение полупроводников в микро- и нанoeлектронике стимулирует дальнейшее исследование электрофизических и фотоэлектрических свойств полупроводников. Электрофизические и фотоэлектрические свойства полупроводников определяются различными элементами, а именно: межзельными атомами основного полупроводникового вещества, комплексами примесных атомов с вакансиями и дефектами, примесными атомами, как искусственно введенными, так и оставшимися в процессе изготовления.

Влияние примесей на электрофизические и фотоэлектрические свойства проявляются наиболее существенно в случае возникновения энергетических уровней в запрещенной зоне полупро-

водника [1]. Эти уровни энергии оказывают сильное влияние на время жизни носителей заряда и на величину удельного сопротивления полупроводника. С целью улучшения и получения новых технологических свойств полупроводников зачастую вводят не один примесный элемент, а сразу два или более [2, 3]. Поэтому в настоящее время более глубоко изучается взаимовлияние примесей в полупроводниках. Например, изучалось поведение золота, вольфрама, серы в кремнии и их взаимодействие с механическими напряжениями или термодонорами [3–5].

Целью данной работы было изучение взаимовлияния в кремнии двух примесей – золота и вольфрама. Интерес к такой постановке работы связан с тем, что вольфрам может образовывать дефектные состояния в кремнии, которые могут влиять на диффузию золота и на состояния золота с этими дефектами. Поэтому одной из важнейших задач работы являлось исследование влияния атомов вольфрама на электрофизические и фотоэлектрические свойства кремния, легированного золотом.

Экспериментальная часть

В качестве исходного кремния использовали кремний марки КЭФ-7, выращенный по методу Чохральского, который имел электронный тип

Расмагин Сергей Иосифович¹, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
Новиков Игорь Кимович², старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.
Тел. +7(499) 503-87-22. E-mail: rasmus123@yandex.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

Статья поступила в редакцию 19 октября 2017 г.

© Расмагин С. И., Новиков И. К., 2017

проводимости. Концентрация фосфора составляла порядка 10^{15} см^{-3} , концентрация кислорода – 10^{17} см^{-3} . Для создания исследуемых образцов проводили диффузию золота в исходный кремний КЭФ-7 в термопечи в кварцевой трубке с низким вакуумом (10^{-3} мм рт. ст.) в течение 5 часов при высоких температурах. В результате диффузии золота были получены две группы образцов высокоомного кремния. Первая группа характеризовалась диффузией золота в исходный кремний со свободной поверхностью при температурах нагрева 950, 1000, 1100 °С (образцы Si<Au>). Вторая группа получалась при диффузии золота в кремний с предварительно напыленным слоем вольфрама при температурах нагрева 950, 1000, 1100 °С (образцы Si<Au W>). После диффузии золота образцы кремния охлаждались в печи на

воздухе в течение 24 часов (режим медленного охлаждения). Перед измерением электрофизических и фотоэлектрических свойств у всех образцов стравливался поверхностный слой толщиной 2 мкм.

Результаты и их обсуждение

Все образцы кремния (включая исходный) после приготовления имели электронный тип проводимости, который был измерен методом термозонда.

У всех полученных образцов кремния было также измерено удельное сопротивление четырехзондовым методом. Результаты представлены в таблице. Величина удельного сопротивления исходного кремния составила $\rho = (7 \pm 2)$ Ом·см.

Таблица

Удельное сопротивление ρ для полученных образцов кремния

Температура диффузии золота	$t = 950 \text{ °C}$	$t = 1000 \text{ °C}$	$t = 1100 \text{ °C}$
Удельное сопротивление			
Группа 1 Si<Au> ρ (Ом·см)	3×10^3	2×10^3	1×10^3
Группа 2 Si<Au, W> ρ (Ом·см)	1×10^4	5×10^3	3×10^3

И, наконец, у всех исследуемых образцов кремния были измерены времена релаксации нестационарной фотопроводимости при разных температурах измерения. Времена релаксации фотопроводимости (ВРФ) измерялись из кривых релаксации, которые получали бесконтактным неразрушающим методом с использованием зондирующей СВЧ-волны и возбуждающим импульсным лазерным излучением. В качестве источника возбуждающего лазерного света использовали Ga-As-лазер с длиной волны излучения $\lambda = 0,9$ мкм и энергией импульса $E_{\text{имп.}} = 800$ нДж. В качестве зондирующего излучения использовалась СВЧ-волна с длиной волны $\lambda = 3$ см и мощностью $P = 2$ мВт. Так как СВЧ-метод является бесконтактным, то он позволяет, во-первых, исключить неоднородные области, возникающие при физических контактах «полупроводник–металл», во-вторых, не подвергать дополнительной термообработке при изготовлении омических контактов, что может приводить к изменению энергетических состояний в запрещенной зоне кремния.

Анализируя представленную таблицу, видим следующие изменения по сравнению с исходным кремнием.

1. После диффузии золота при высоких температурах происходит сильное увеличение удельного сопротивления, а именно, практически на два порядка для первой (Si<Au>) и на три порядка для второй (Si<Au W>) групп образцов. Отметим важ-

ный технологический факт – наибольшее значение удельного сопротивления 3×10^3 Ом·см для образца первой группы и 1×10^4 Ом·см для образца второй группы достигается при температуре диффузии $t = 950 \text{ °C}$. Видно также для этой температуры диффузии, что удельное сопротивление образца Si<Au W> больше в 3 раза, чем удельное сопротивление образца Si<A>. Отсюда можно сделать заключение, что вольфрам способствует созданию дополнительных центров компенсации, которые увеличивают удельное сопротивление. Другими словами, легирование золотом кремния в присутствии вольфрама обеспечивает более высокое удельное сопротивление, чем легирование золотом кремния без вольфрама.

2. Максимальное значение удельного сопротивления 1×10^4 Ом·см получили при диффузии золота в присутствии вольфрама. Эти экспериментальные данные объясняются созданием в запрещенной зоне кремния акцепторных центров золота, которые компенсируют атомы фосфора ($N_p \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Понятно, что температура $t = 950 \text{ °C}$ является оптимальной для создания максимальной концентрации акцепторных центров золота как в присутствии вольфрама, так и при его отсутствии. Влияние вольфрама (именно с ним получено максимальное удельное сопротивление $\rho = 1 \times 10^4$ Ом·см) состоит в том, что атомы вольфрама способствуют созданию дополнительных комплексов с акцепторным золотом, которые компенсируют атомы фосфора.

Для всех образцов были получены зависимости времени релаксации фотопроводимости быстрой составляющей τ_b и медленной составляющей τ_m от обратной температуры (см. рис. 1 и рис. 2). Для обеих групп образцов релаксация фотопроводимости характеризуется двумя процессами: один процесс условно назовем быстрым, а другой более медленным. Процессы происходят с двумя разными постоянными времени по закону $U = U_b \exp(-\tau/\tau_b) + U_m \exp(-\tau/\tau_m)$, где τ_b – постоянная времени быстрого процесса, τ_m – постоянная времени медленного процесса релаксации фотопроводимости (РФ), U_b – максимальное значение напряжения быстрого процесса, U_m – максимальное значение напряжения медленного процесса. Образцы группы <Au>, легированных золотом со свободной поверхностью, имели времена быстрой и медленной релаксации фотопроводимости при $t = 950^\circ\text{C}$, равные $\tau_b = 0,25 \pm 0,05$ мкс, $\tau_m = 2 \pm 0,2$ мкс; при $t = 1000^\circ\text{C}$ – $\tau_b = 0,2 \pm 0,05$ мкс, $\tau_m = 0,5 \pm 0,05$ мкс; при $t = 1100^\circ\text{C}$ – $\tau_b = 0,1 \pm 0,05$ мкс, $\tau_m = 0,6 \pm 0,05$ мкс. Все эти данные получены при температуре измерения $T = 300$ К. Образцы группы <Au W>, легированных золотом в присутствии вольфрама, имели времена быстрой и медленной релаксации фотопроводимости при $t = 950^\circ\text{C}$, равные $\tau_b = 0,18 \pm 0,05$ мкс, $\tau_m = 0,5 \pm 0,05$ мкс; при $t = 1000^\circ\text{C}$ – $\tau_b = 0,18 \pm 0,05$ мкс, $\tau_m = 0,4 \pm 0,05$ мкс; при $t = 1100^\circ\text{C}$ – $\tau_b = 0,3 \pm 0,05$ мкс, $\tau_m = 1,5 \pm 0,05$ мкс. Все это также при температуре измерения $T = 300$ К. Величина времени релаксации фотопроводимости исходного кремния КЭФ-7 имела одну составляющую, равную 200 мкс при температуре измерения $T = 300$ К.

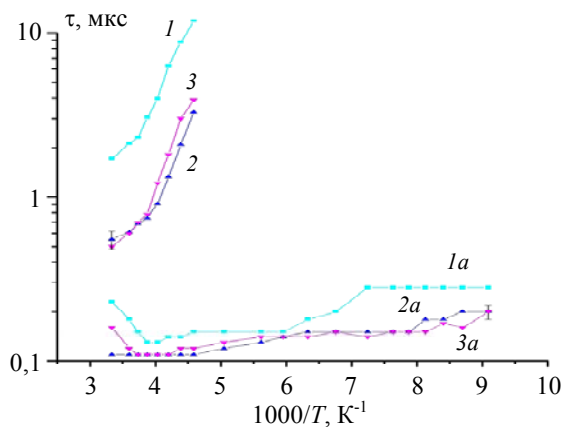


Рис. 1. Зависимости постоянных времени быстрого и медленного процессов РФ от величины обратной температуры образца. Диффузия <Au> в исходный кремний в течение 5 часов. Для температур диффузии $T = 950^\circ\text{C}$ и $T = 1000^\circ\text{C}$, $T = 1100^\circ\text{C}$ обозначения 1, 2, 3 соответствуют постоянной времени медленного процесса РФ, 1a, 2a, 3a – соответствуют постоянной времени быстрого процесса РФ. Наклоны медленных процессов РФ соответствуют энергиям ионизации: 1 – $E = 0,16 \pm 0,02$ эВ, 2 – $E = 0,16 \pm 0,02$ эВ, 3 – $E = 0,16 \pm 0,02$ эВ.

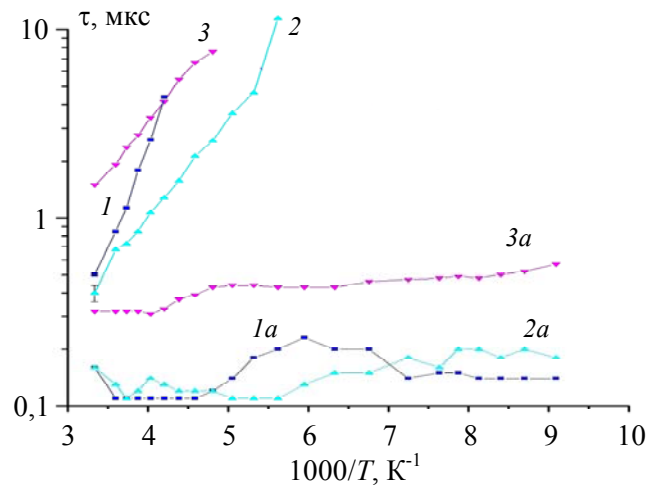


Рис. 2. Зависимости постоянных времени быстрого и медленного процессов РФ от величины обратной температуры образца ($T = 100\text{--}300$ К). Диффузия <Au> в исходный кремний при наличии на поверхности слоя <W> в течение 5 часов. Для температур диффузии $T = 950^\circ\text{C}$, $T = 1000^\circ\text{C}$, $T = 1100^\circ\text{C}$ обозначения 1, 2, 3 соответствуют постоянной времени медленного процесса РФ, 1a, 2a, 3a соответствуют постоянной времени быстрого процесса РФ. Наклоны медленного процесса РФ соответствуют энергиям ионизации примеси: 1 – $E = 0,23 \pm 0,02$ эВ, 2 – $E = 0,13 \pm 0,01$ эВ, 3 – $E = 0,13 \pm 0,01$ эВ.

Стоит заметить, что время релаксации фотопроводимости быстрой составляющей τ_b характеризует центры рекомбинации, связанные с «глубоким» акцепторным уровнем золота или его комплексами, а время релаксации фотопроводимости медленной составляющей τ_m характеризует уровни прилипания, связанные в нашем случае с атомами кислорода и вольфрама. Видно, что время релаксации τ_b , характеризующее центры рекомбинации, связанные с акцепторным уровнем золота, для группы образцов <Au> и <Au W> уменьшилось на три порядка по сравнению со временем релаксации исходного кремния.

Измеряя температурные зависимости величин ВРФ при различных температурах процесса, можно определить различные параметры для энергетически «глубоких» примесных атомов и энергетических уровней прилипания. Заметим, что электромагнитное СВЧ-поле взаимодействует как с электронами, так и с дырками. Общее взаимодействие СВЧ-волны определяется проводимостью материала $\sigma = (e\mu_n n_0 + e\mu_p p_0)$, а динамическое изменение – общим изменением неравновесной проводимости $\Delta\sigma = (e\mu_n \Delta n + e\mu_p \Delta p)$, возникающим после воздействия внешнего излучения. Соотношения между равновесными концентрациями n_0 и p_0 , а также неравновесными Δn и Δp могут быть различными в зависимости от наличия примесных центров и величины их концентрации. Различие в

величинах проводимостей электронов μ_n и дырок μ_p в кремнии сравнительно невелики. Для электронов $\mu_n = 1450 \pm 107 \text{ см}^2/(\text{В с})$, а для дырок $\mu_p = 500 \pm 5 \text{ см}^2/(\text{В с})$. При времени жизни дырок, много меньше времени жизни электронов, т. е. при $\tau_p \ll \tau_n$, в стационарном случае в неравновесной проводимости $\Delta\sigma$ можно учитывать только вклад электронов. При импульсном лазерном возбуждении неравновесных носителей, когда $t \ll \{\tau_n, \tau_p\}$, быстрая постоянная времени релаксации фотопроводимости будет связана с дырками, а медленная постоянная времени релаксации фотопроводимости – с электронами. При создании неравновесных электронов и дырок на отрицательно заряженный акцепторный уровень золота захватываются дырки, а на уровне прилипания захватываются электроны. Механизм захвата дырок на центры акцепторного золота описывается каскадным механизмом захвата дырок (модель Лэкса). При этом величины дырочной и электронной составляющей избыточной проводимости в течение времени $t \leq t_{\text{имп}}$ будут относиться как μ_n/μ_p . В такой же мере изменение сигнала отражения СВЧ-волны в это время будет определяться в кремнии электронами. Наличие уровней прилипания для электронов и дырок может приводить к увеличению наблюдаемого ВРФ во много раз по сравнению с τ_n и τ_p [6].

Из рис. 1 и рис. 2 видно, величина постоянной времени быстрого процесса РФ мало изменяется в интервале температур 100–300 К. Из данных в работе [5] следует, что для большого числа образцов кремния электронного типа проводимости, легированного золотом, время захвата электронов на нейтральные центры акцепторного золота практически не зависит от температуры в диапазоне 80–300 К. Поэтому можно предположить, что в наших образцах кремния (электронного типа проводимости), легированных золотом, также происходит захват электронов на нейтральные центры акцепторного золота, а дырки захватываются на отрицательно заряженные уровни акцепторного золота.

Из анализа полученных температурных зависимостей τ_m можно определить энергии ионизации различных примесей. Анализ температурных зависимостей τ_m основывался на модели об уровнях прилипания [5, 6]. Для уровня прилипания α -типа релаксация неравновесных носителей изменяется по экспоненциальному закону с постоянной времени

$$\tau = \tau_n (1 + M / N_{mc}). \quad (1)$$

Здесь τ_n – время релаксации электронов на глубоких акцепторных центрах золота, заполнение которых слабо изменяется при возбуждении, M –

концентрация уровней прилипания. Предполагается также, что $\tau_n \gg \tau_p$ (где τ_p – время захвата дырок). В наших экспериментах τ_n в 7–10 раз больше, чем τ_p . Когда концентрация $M \gg N_{mc}$, где $N_{mc} = N_c \exp(-E_m / kT)$ (здесь E_m – энергия ионизации уровня прилипания), релаксация неравновесных носителей происходит с временами большими, чем время релаксации электронов τ_n . С ростом температуры N_{mc} увеличивается, соответственно, время релаксации электронов τ_n , согласно (1), уменьшается. Если время релаксации мало изменяется с температурой (см. зависимости 1а, 2а на рис. 1 и рис. 2), то убывание будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \tau &\approx \tau_n (M / N_{mc}) \exp(E_m / kT) \approx \\ &\approx T^{-1,5} \exp(E_m / kT). \end{aligned} \quad (2)$$

Полученные зависимости постоянной времени медленного процесса РФ от обратной температуры хорошо совпадают с соотношением (2). Из этих зависимостей были определены энергии ионизации примесей. Для образцов кремния Si<Au>, легированных золотом со свободной поверхностью при $t = 950 \text{ }^\circ\text{C}$, $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, величина энергии ионизации примеси составила $E = E_c - (0,16 \pm 0,02)$ [эВ]. Для образцов Si<Au W> величина энергии ионизации составила $E = E_c - (0,23 \pm 0,02)$ [эВ] при $t = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ и $E = E_c - (0,13 \pm 0,02)$ [эВ] при $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ и $1100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Образцы кремния Si<Au>, легированные золотом, готовились из кремния, выращенного по методу Чохральского, концентрация кислорода в котором составляет 10^{17} см^{-3} . Разумно предположить, что энергия ионизации $E = E_c - (0,16 \pm 0,02)$ [эВ] соответствует комплексу кислород+вакансия. Это предположение соответствует данным других работ. Так, например, комплекс кислород+вакансия имеет энергию ионизации $E^{O+V} = 0,18 \text{ эВ}$ в работе [7] и $E^{O+V} = E_c - 0,17$ [эВ] в работе [8]. В образцах кремния со свободной поверхностью, легированных золотом, энергию ионизации $E = E_c - (0,23 \pm 0,02)$ [эВ] и энергию $E = E_c - (0,13 \pm 0,01)$ [эВ] определить не удалось. В образцах же кремния Si<Au W> в присутствии вольфрама была определена энергия ионизации равная $E = E_c - (0,23 \pm 0,02)$ [эВ], также был определен уровень с энергией ионизации $E = E_c - (0,13 \pm 0,01)$ [эВ]. Поэтому можно сделать предположение, что энергия ионизации $E = E_c - (0,23 \pm 0,02)$ [эВ] соответствует уровням прилипания, связанными с вольфрамом, а энергия $E = E_c - (0,13 \pm 0,01)$ [эВ] соответствует уровню прилипания комплекса вольфрам+вакансия [9].

После термообработки кремния со слоем вольфрама концентрация вольфрама в кремнии незначительна ($< 10^{12} \text{ см}^{-3}$) [10, 11]. Поэтому метод термостимулированного тока, спектральный и емкостной методы не способны (практически не определяют) определить уровень энергии ионизации, связанный с атомами или комплексами вольфрама. Однако, методом релаксации фотопроводимости в СВЧ-поле удалось обнаружить уровень $E = E_c - (0,13 \pm 0,01)$ [эВ], который не был обнаружен в кремнии, легированном золотом в отсутствие вольфрама. Из этого было сделано предположение, что данный уровень связан с комплексом вольфрама (вольфрам+вакансия), так как при высоких температурах диффузии выше 1000°C образуется большое число вакансий. Спектральным методом удалось обнаружить только акцепторный уровень золота $E = E_c - (0,54 \pm 0,02)$ [эВ], что продемонстрировано на рис. 3.

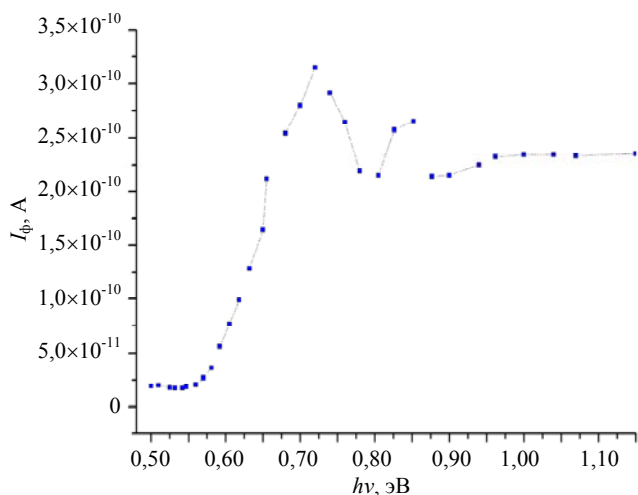


Рис. 3. Зависимость силы фототока I_ϕ от энергии кванта $h\nu$. Уровень энергии акцепторного золота $E = E_c - (0,54 \pm 0,02)$ [эВ] для образца кремния легированного золотом и вольфрамом при температуре $T = 950^\circ\text{C}$.

В работах [2, 6] получили энергию ионизации $E = 0,22-0,23$ эВ, которую также связали с атомами вольфрама в кремнии. Важно отметить, что удельное сопротивление и время релаксации фотопроводимости сложнолегированного <Au W>-кремния проявляют свойство термостабильности при нагреве до 1100°C .

Исследуемые образцы сложнолегированного кремния имеют, помимо научного интереса, также и практическое применение. На их основе были созданы опытные термостабильные $p-i-n$ -диоды. Дополнительная термообработка при температуре $T = 1100^\circ\text{C}$ кремния, предварительно легированного золотом и вольфрамом, не изменила величину удельного сопротивления и времени релаксации фотопроводимости, связанным с ним временем жизни носителей заряда. Другими словами,

проявляется термостабильность по удельному сопротивлению и времени жизни носителей в кремнии, легированном золотом и вольфрамом. Это очень важно для изготовления $p-i-n$ -структур. Известно, что p - и n -области создаются при достаточно высокой температуре ($T = 1100^\circ\text{C}$) в течение 1–2 часов. Термостабильность по удельному сопротивлению и времени жизни носителей в кремнии, легированном только золотом, получить не удалось. Откуда можно заключить, что именно атомы вольфрама ответственны за термостабильность по удельному сопротивлению и времени жизни носителей.

Заключение

В результате сравнительного анализа фотоэлектрических и электрических свойств высокоомного компенсированного кремния можно сделать следующие заключения.

Атомы вольфрама способствует созданию дополнительных центров рекомбинации, которые уменьшают постоянную времени быстрого процесса релаксации фотопроводимости на три порядка.

Атомы вольфрама способствует созданию уровней прилипания, которые уменьшают постоянную времени медленного процесса релаксации фотопроводимости на два порядка.

В кремнии, легированном золотом в присутствии вольфрама, были определены уровень прилипания $E = E_c - (0,23 \pm 0,02)$ [эВ], связанный с вольфрамом, и уровень прилипания $E = E_c - (0,13 \pm 0,01)$ [эВ], связанный с комплексом вольфрам+вакансия.

В кремнии со свободной поверхностью, легированном золотом, определили энергию ионизации $E = E_c - (0,16 \pm 0,02)$ [эВ], которая соответствует комплексу кислород+вакансия.

В сложнолегированном кремнии <Au W> проявляется термостабильность по удельному сопротивлению и времени релаксации фотопроводимости.

Вольфрамовое покрытие создает условия для образования дополнительных центров компенсации акцепторного золота и комплексов золота, которые увеличивают удельное сопротивление кремния соответственно на два и три порядка величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. – М.: Мир, 1977.
2. Расмагин С. И. // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 11. С. 1.
3. Кирюхин А. Д., Григорьев В. В., Зуев А. В., Зуев В. В., Королев Н. А. // ФТП. 2007. Т. 41. № 3. С. 269.

4. Кирюхин А. Д., Григорьев В. В., Зувев А. В., Зувев В. В. // ФТП. 2008. Т. 42. № 3. С. 271.
 5. Bykovskij Yu. A., Zuev V. V., Kiryukhin A. D., Kolosov K. V., Rasmagin S. I. // Materials science. 2000. Vol. 36 (8). P. 903.
 6. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М.: ГФМЛ, 1963.
 7. Антонова И. В., Мисюк А., Попов В. П. // ФТП. 1997. Т. 31. № 38. С. 998.

8. Коршунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. – М.: Наука и техника, 1986.
 9. Fujisaki, Ando T., Rozuka Y., Takamo Y. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63. No. 7. P. 2304.
 10. Воронкова Г. М., Зувев В. В., Кирюхин А. Д. и др. // Неорганические материалы. 1997. Т. 6. № 11. С. 1285.
 11. Быковский Ю. А., Зувев В. В., Кирюхин А. Д. и др. // ФТП. 1972. Т. 6. № 12. С. 2332.

PACS: 71.55.Cn

Properties of gold-doped silicon in the presence of tungsten

S. I. Rasmagin¹ and I. K. Novikov²

¹ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
 38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
 E-mail: rasmus123@yandex.ru

² National Research Nuclear University, MEPHI
 31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received October 19, 2017

The influence of tungsten atoms on the electrophysical and photoelectric properties of silicon n of conductivity type doped with gold is investigated. As a result of doping of silicon with gold in the presence of tungsten, the following energy levels were found: the trap level $E = E_c - (0.23 \pm 0.02)$ [eV] associated with tungsten and the trap level $E = E_c - (0.13 \pm 0.01)$ [eV] associated with the tungsten complex+vacancy. In a series of silicon samples doped with gold, in the absence of tungsten, the trap level $E = E_c - (0.16 \pm 0.02)$ [eV], associated with the oxygen+vacancy complex, was found. In silicon samples after diffusion of gold without tungsten, the resistivity increased by 2 orders of magnitude due to the creation of gold compensation centers, and in the presence of tungsten the resistivity increased by 3 orders of magnitude, which indicates the creation of additional energy centers connected both with gold and with tungsten. Accordingly, the times of nonstationary relaxation of the photoconductivity have significantly decreased to values of 0.1–10 μ s due to the creation of additional recombination centers and trap levels.

Keywords: high-resistance silicon, silicon doped with gold and tungsten, photoconductivity relaxation, resistivity.

REFERENCES

1. A. G. Milnes, *Deer impurities in semiconductors* (New York; Mir, Moscow, 1977).
2. S. I. Rasmagin, *Inorganic Materials* **50** (11), 1075 (2014).
3. A. D. Kiryukhin, V. V. Grigoriev, A. V. Zuev, V. V. Zuev, and N. A. Korolev, *Semiconductors* **41** (3), 269 (2007).
4. A. D. Kiryukhin, V. V. GrigorEv, A. V. Zuev, and V. V. Zuev, *Semiconductors* **42** (3), 266 (2008).
5. Yu. A. Bykovskij, V. V. Zuev, A. D. Kiryukhin, K. V. Kolosov, and S. I., *Materials Science* **36** (8), 903 (2000).
6. S. M. Ryvkin, *Photoelectric phenomena in semiconductors* (GFML, Moscow, 1963) [in Russian].
7. I. V. Antonova, A. Misjuk, and V. P. Popov, *Semiconductors* **31** (38), 998 (1997).
8. F. P. Korshunov, Ju. V. Bogatyrev, and V. A. Vavilov, *Influence of Radiation on Microcircuits* (Nauka i Tekhnika, Moscow, 1986) [in Russian].
9. Fujisaki, T. Ando, Y. Rozuka, and Y. Takamo, *J. Appl. Phys.* **63** (7), 2304 (1988).
10. G. M. Voronkova, V. V. Zuev, A. D. Kiryukhin, K. V. Yakubovskii, V. I. Chmyrev, V. M. Skorikov, T. D. Dudkina, and S. A. Shcherbakov, *Inorganic Materials* **33** (11), 1087 (1997).
11. Yu. A. Bykovskii, V. V. Zuev, A. D. Kiryukhin, and V. A. Chufarov, *Semiconductors* **6** (12), 2332 (1972).