Uzbek Journal of Physics

Vol.20(№2) 2018 PP.105-111

ВЛИЯНИЕ γ-РАДИАЦИИ НА РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ

С.З. Зайнабидинов, А.О. Курбанов

Андижанский государственный университет, Андижан, Узбекистан
(Получена 28.11.2017)

p-Si<B,Ni> намуналарнинг рекомбинациявий хусусиятлари нурланишни ~1×10^8 Р дозасигача, легирланмаган кремний намуналарга нисбатан, нурланишга барқарорлиги аниқланди. Бу ҳолат легирланган кремнийда микробиржинслимаслик даражасини турлича бўлиши билан боғлиқ бўлиши мумкин. Кремнийда никел киришма атомлари концентрациясининг ортиши билан заряд ташувчилар яшаш вақтини радиацияга барқарорлиги яхшиланиб бориши кўрсатилди. Бу никель-кислород туридаги киришмалар жуфтини миқдори ортиб кетиши билан тушинтирилди. Легирланган кремнийда киришма атомлари ва кристал панжарасидаги нуқсонлар орасида бўлиши мумкин бўлган квазикимёвий реакциялар схемаси таклиф этилди. *p*-Si<P,Ni> намуналарда γ-нурланишнинг бошланғич даврида (5×10^8 Р дозагача) фотосезгирлик ортиши, сўнгра нурланишнинг дозаси ортиши билан фотосезгирликнинг камайиши кузатилди. Солиштирма интеграл сезгирликнинг ортиши намунадаги кичик ва катта Омли қаршиликка эга бўлган соҳалар орасидаги тўсиқни ортиши билан, камайиши эса бундай соҳалар орасидаги тўсиқ баландлигини кичрайиши билан тушинтирилди.

Установлено, что до дозы ~1×10^8 Р рекомбинационные свойства в *p*-Si<B,Ni> являются более стабильными, чем в контрольном кремнии, что возможно связано с различной степенью микронеоднородности проводимости в легированном кремнии. Показано, что с ростом концентрации атомов никеля радиационная стабильность τ кремния улучшается. Это объясняется увеличением количества примесных пар типа никель-кислород. Предложена возможная схема квазихимических реакций примесных атомов и дефектов кристаллической решетки в легированном кремнии. Показано, что на начальном этапе γ-облучения (до дозы 5×10^8 Р) в перекомпенсированном *p*-Si<P,Ni> наблюдается увеличение, а в дальнейшем с ростом дозы снижение фоточувствительности. Увеличение удельной интегральной чувствительности связано с возрастанием, а снижение, наоборот, с уменьшением барьера между высокоомными и низкоомными областями, что приводит к увеличению роли рекомбинационных центров.

It was found that recombination properties of the *p*-Si<B,Ni> at the doses up to~1×10^8 R are more stable than in the control silicon. It is possible, this fact is connected with the different degree of the microinhomogeneity of conduction in the doped silicon. It is shown that with increasing concentration of nickel atoms radiation stability τ has improved in the doped silicon. This is due to the increase in the number of impurity pairs such as a nickel-oxygen. A possible scheme of quasi-chemical reactions of impurity atoms and lattice defects in the doped silicon has been presented. It is shown that in the initial phase of γ-radiation (up to 5×10^8 R) in overcompensated *p*-Si<P,Ni> the photosensitivity increases, and with further increase of dose it reduces. Increase of the specific integrated sensitivity is connected with growth of the barrier between the high-resistance and low-resistance areas, and, on the contrary, with reduction of that barrier. As a result, role of recombination centers increases.

Разработка методов повышения радиационной стойкости полупроводниковых материалов и приборов является одной из важных задач радиационной физики. Собственные междоузельные атомы (*I*), вакансии (*V*) и примеси с глубокими

уровнями в кремнии становятся существенными при высоких уровнях легирования кремния или больших дозах облучения и определяют электрофизические, фотоэлектрические и рекомбинационные свойства материала. Известно, что время жизни носителей заряда (τ) наиболее чувствительно к облучению и изменяется даже при столь малых дозах, когда другие электрофизические параметры облучаемого материала практически не меняются. Принято считать, что такого рода изменения происходят из-за образования в процессе облучения рекомбинационных радиационных дефектов [1].

В работе [2] наблюдаемое возрастание и последующий спад τ при наборе дозы (Ф) в *n*-Si объясняется уменьшением числа рекомбинационных центров (РЦ) химической природы (Au, Cu, Ni и др.) за счет перехода их в процессе облучения в межузельное положение, а также увеличением числа радиационно введенных РЦ и обратного растворения электрически активной части примеси в неравновесных вакансиях при больших Ф. Наблюдаемое увеличение τ от 20 до 70 мкс в кристаллах *p*-Si, полученных методом зонной плавки, при изменении Ф в интервале 2×10^{14}–8×10^{15} см$^{-2}$ авторы работы [3] объяснили уменьшением концентрации свободных носителей тока. В образцах *p*-Si, полученных методом Чохральского, восстановления τ не наблюдалось даже после облучения дозами, при которых концентрация носителей заряда снижалась до 10^{11} см$^{-3}$. В [4] показано, что τ уменьшается даже при Ф≈10^{10}–10^{13} см$^{-2}$, когда удельное сопротивление ρ практически не изменяется. Уменьшение τ от 90 до ~20 мкс объясняется непрерывным увеличением концентрации рекомбинационно-активных радиационных дефектов (РД).

В работе [5] исследованы образцы *p*-Si, облученные электронами с энергией 8 МэВ. На основе анализа зависимостей $\tau(T_{отж})$, $\rho(T_{отж})$, $p(T_{отж})$ и $\mu_H(T_{отж})$ высказано предположение, что многокомпонентные комплексы V_3+O или V_2+O_2 не являются рекомбинационными центрами. Глубокие доноры с энергетическими уровнями $\Delta E_i=E_v$+0.40 эВ, комплексы типа V_3+O_3 или V_3+O_2 заметно влияют на величины μ_H и τ.

В то же время влияние атомов никеля на эффективность образования радиационных центров, а также радиационной стабильности параметров кремния, изучено недостаточно, количественная оценка этих процессов могла бы расширить функциональные возможности легированного кремния и приборов на его основе.

В связи с этим нами исследовано влияние атомов никеля на механизмы и возникновение неосновных носителей заряда и радиационную стабильность рекомбинационных и фотоэлектрических свойств кремния *p*-типа в широком интервале температур.

В работе использованы методы измерения удельного сопротивления, коэффициента Холла, τ методом стационарной фотопроводимости. Для изучения влияния γ-радиации на τ в легированных и контрольных образцах в качестве исходного материала использовали кремний *p*-типа, полученный методом Чохральского, с удельным сопротивлением 10 Ом·см. Плотность дислокаций ~10^4 см$^{-2}$. При исследовании влияния γ-радиации на фоточувствительность компенсированного кремния в качестве исходного материала использовали кремний *n*-типа с исходным удельным сопротивлением 3000 Ом·см. При введении никеля произошла конверсия типа проводимости кремния из *n*- в *p*-тип. Легирование кремния никелем проводили в интервале температур 1075–1285°C в

течение 5 часов с последующим охлаждением со скоростью ~40 град/мин (I тип) и со скоростью ~250 град/мин (II тип). Паралельно исследованы образцы *p*-Si<B>, проходившие аналогичную термообработку, но без примеси никеля (контрольный кремний). Радиационную обработку кремниевых образцов проводили облучением γ-лучами с интенсивностью 200 $Р \cdot с^{-1}$ в интервале 10^7–10^9 Р. При облучении температура не превышала ~50°С.

На рис. 1 приведена зависимость времени жизни носителей заряда от дозы γ-облучения в образцах *p*-Si<Ni>. Как видно из рисунка, относительное снижение времени жизни носителей заряда (τ/τ_0) в кремнии, легированном никелем, медленнее, чем в контрольном кремнии, и заметно отличается в быстро охлажденных образцах от медленно охлажденных.

Затем мы определяли коэффициент радиационного изменения (K_τ) времени жизни носителей заряда в легированном и контрольном кремнии (рис. 2). В эксперименте величина K_τ определяется наклоном участков дозовых зависимостей.

На начальном этапе облучения (до дозы 4×10^{17} $см^{-2}$) изменение времени жизни носителей заряда в легированном и контрольном кремнии удовлетворительно описывается следующим выражением (рис. 2):

$$1/\tau = 1/\tau_0 + K_\tau \Phi, \qquad (1)$$

где τ_0, τ – времена жизни носителей заряда соответственно до и после облучения, Ф – флюенс γ-радиации, K_τ – коэффициент радиационного изменения времени жизни носителей заряда, значения которого приведены в таблице.

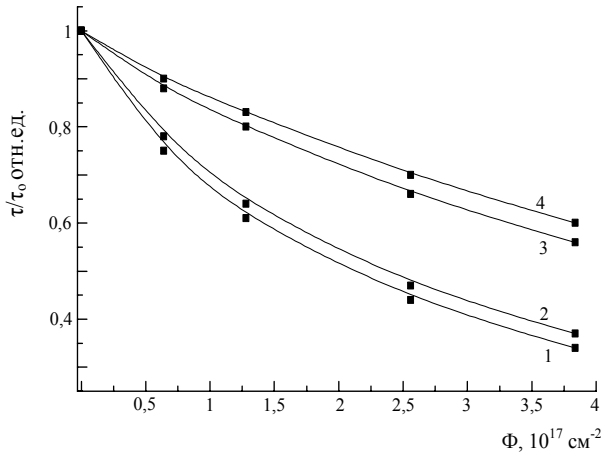


Рис. 1. Зависимость τ/τ_0 от дозы γ-облучения в *p*-Si<B> (*1*, *2*) и *p*-Si<B,Ni> (*3*, *4*) в быстро (*2*, *4*) и медленно (*1*, *3*) охлажденных образцах, $T_{диф}$= 1275°С.

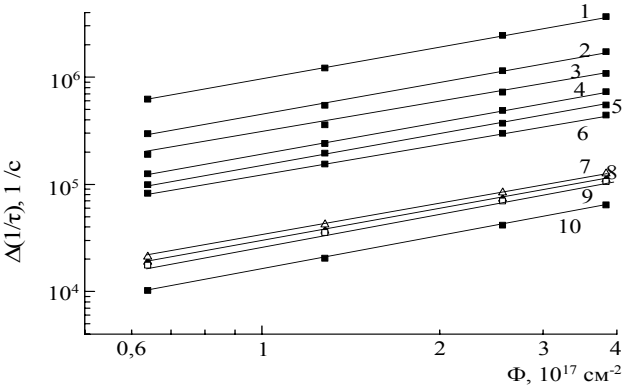


Рис. 2. Зависимость величины $\Delta(1/\tau)$ в *p*-Si<B> (*1*, *2*) и *p*-Si<B,Ni> (*3*–*8*), а также в *p*-Si<P,Ni> (*9*, *10*) в быстро (*2*, *4*, *6*, *8*, *10*) и медленно (*1*, *3*, *5*, *7*, *9*) охлажденных образцах от дозы γ-облучения при различных температурах диффузии: 1075°С (*1*, *2*, *3*, *4*); 1175°С (*5*, *6*); 1275°С (*7*, *8*); 1285°С (*9*, *10*).

Таблица. Параметры легированного и контрольного кремния *p*-типа до и после γ-облучения.

Тип образцов	ρ, Ом·см	$T_{диф}$, °C	Скорость охлаждения, град/мин	N_{Ni}, см$^{-3}$		τ_0, с	K_τ, см^2/с
				$N_{общ.}$	$N_{акт.}$		
p-Si<B>	10.2		250 (II тип)			6×10^{-7}	4.5×10^{-12}
p-Si<B>	10		40 (I тип)			4.8×10^{-7}	9.5×10^{-12}
p-Si<Ni>	9.7	1075	250 (II тип)	3×10^{17}	1×10^{13}	1.2×10^{-6}	1.4×10^{-12}
p-Si<Ni>	9.6		40 (I тип)		$\le10^{12}$	1×10^{-6}	2.8×10^{-12}
p-Si<B>	12		250 (II тип)			8.4×10^{-7}	3.9×10^{-12}
p-Si<B>	10		40 (I тип)			4.8×10^{-7}	9.1×10^{-12}
p-Si<Ni>	9.1	1175	250 (II тип)	7×10^{17}	4×10^{13}	1.7×10^{-6}	1.2×10^{-12}
p-Si<Ni>	8		40 (I тип)		$\le10^{12}$	1.05×10^{-6}	1.9×10^{-12}
p-Si<B>	10.7		250 (II тип)			1.6×10^{-6}	3.1×10^{-12}
p-Si<B>	11		40 (I тип)			9.7×10^{-7}	4.5×10^{-12}
p-Si<Ni>	9.8	1275	250 (II тип)	1×10^{18}	7×10^{13}	6.9×10^{-6}	2.9×10^{-13}
p-Si<Ni>	9.6		40 (I тип)		$\le10^{12}$	5.8×10^{-6}	3.3×10^{-13}
p-Si<P,Ni>	67		250 (II тип)		4×10^{14}	1.8×10^{-5}	1.5×10^{-13}
p-Si<P,Ni>	35	1285	40 (I тип)	1.4×10^{18}	6×10^{14}	7×10^{-6}	2.7×10^{-13}

Как видно из таблицы, во-первых, с ростом концентрации никеля в легированном кремнии K_τ снижается; во-вторых, значение K_τ в легированном кремнии меньше, чем в контрольном кремнии. Суть этих явлений, на наш взгляд, заключается в следующем. На основе анализа результатов работ [1, 6-11] схему квазихимических реакций, протекающих под действием термического и радиационного воздействия в легированном кремнии, можно представить в виде (рис. 3):

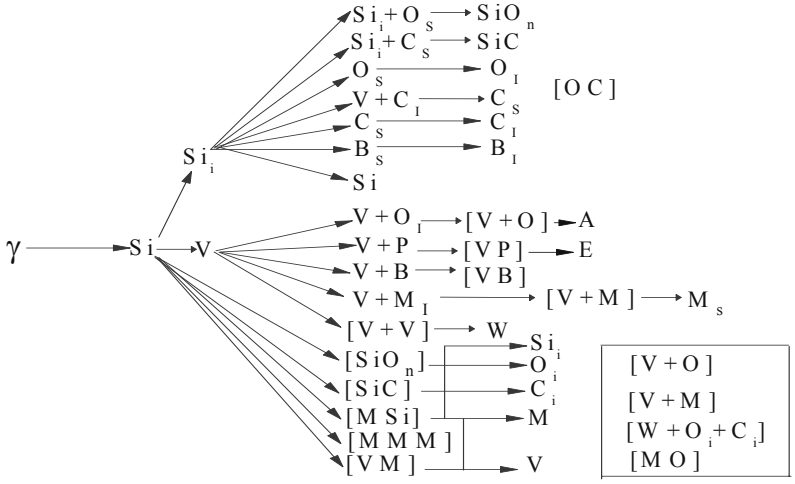


Рис. 3. Квазихимические реакции дефектообразования в легированном Si: X_s, X_i – примесные атомы в узле и междоузлии; MMM – кластеры; Si_i – атомы кремния в междоузлии; W – дивакансия; MSi, SiC – силициды; M – примесь, создающая глубокие энергетические уровни; [W+O+C] – *K*-центры.

Как показывают квазихимические реакции, в легированном и контрольном кремнии после воздействия проникающей радиации концентрация примесных [VM] и радиационных (типа *A* [VO] и *K* [WOC])-центров, а также соединений типа [MO] растет в результате радиационного распада кластеров [MMM], силицидов [IM] и соединений типа SiO_n, возникших в процессе высокотемпературной обработки. Это приводит к повышению степени микронеоднородности по проводимости в легированных образцах (рис. 4) по сравнению с контрольными, поэтому в легированных образцах значения K_τ меньше, чем в контрольных.

В состав термодефектов входит от двух до четырех атомов кислорода. Взаимодействие этих дефектов с вакансиями увеличивает концентрацию *A*-центров при облучении. Это можно описать следующей схемой реакций [12]:

$$\begin{aligned} &SiO_4 + V \rightarrow SiO_3 + A\text{-центр}, \\ &SiO_3 + V \rightarrow SiO_2 + A\text{-центр}, \\ &SiO_2 + V \rightarrow X\text{-центр}. \end{aligned} \qquad (2)$$

В процессе облучения дефекты в легированном кремнии (кластеры, силициды) переходят к более равномерному распределению, чему способствуют как радиационно-стимулированная диффузия примесей, так и образование большого количества вакансий и междоузельных атомов. В результате увеличивается вероятность образования примесных пар типа NiO_3, NiO_4 (рис. 3). Во-первых, эти электрически неактивные дефекты в свою очередь уменьшают концентрацию кислорода, в результате снижается эффективность образования *A*- и *K*-центров в легированном кремнии, по сравнению с контрольным. Во-вторых, с ростом концентрации атомов никеля исходная микронеоднородность по проводимости кремния повышается. В результате этих двух факторов значение K_τ эффективно снижается в легированном никелем кремнии по сравнению с контрольным. При облучении γ-радиацией увеличивается микронеоднородность по проводимости (рис. 4) и концентрация рекомбинационных центров.

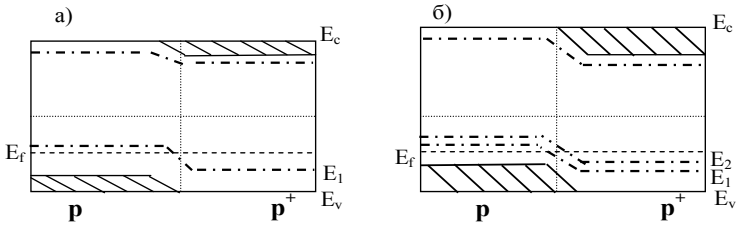


Рис. 4. Модели неоднородной p^+-*p*-структуры, образовавшейся в кремнии после легирования примесями с глубокими уровнями: *а*) до облучения, *б*) после облучения.

В общем случае время жизни носителей заряда ограничивается двумя каналами рекомбинации [13]: обычным через рекомбинационный центр (в данном случае это радиационные центры) и "барьерным" с вероятностью соответственно $1/\tau_\gamma^{ро}$ и $1/\tau_b$; поэтому $1/\tau_{рц} = \alpha\Phi$ [14], т.е. пропорциональна дозе облучения (Ф). Но влияния рекомбинационных центров с ростом Ф не наблюдается до тех пор, пока не установится равенство $1/\tau_{рц}=1/\tau_b$ [13],

Далее нами определен коэффициент радиационного изменения удельной интегральной токовой фоточувствительности изготовленных структур на основе легированного и контрольного кремния. Фотоэлектрические свойства образцов

контролировали путем измерения удельной интегральной токовой фоточувствительности изготовленных структур, которую вычисляли по формуле [15]

$$K = I_{\Phi} / ESV \,, \tag{3}$$

где $I_{\Phi}=(I_{св}–I_m)$ – фототок и I_m – темновой ток, (А); E – освещенность (200 люкс), S – эффективная площадь, см^2; V – напряжение, приложенное к образцу, (В).

На рис. 5 приведены кривые относительного изменения удельной интегральной фоточувствительности исследованных структур.

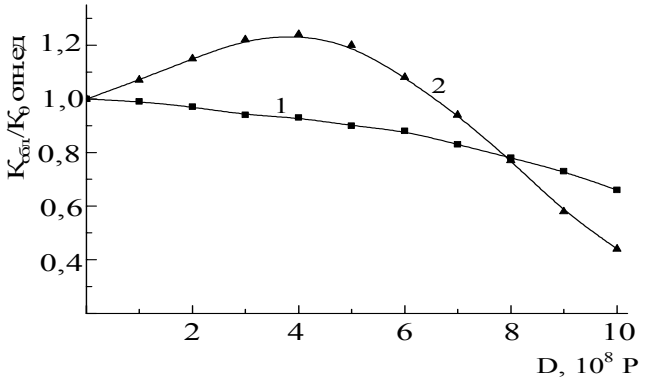


Рис. 5. Зависимость относительного изменения удельной интегральной фоточувствительности исследованных p^+-p-структур от дозы γ-облучения: *1* – p-Si<B>; *2* – p-Si<P,Ni>.

При этом абсолютное значение K_0 для p-Si<P,Ni> равно ~0.7 А/лм·В. Как видно из рисунка, до определенной дозы облучения K растет, а в дальнейшем, наоборот, уменьшается. Увеличение K объясняется следующим образом. При диффузии никеля в кремний одновременно вводятся рекомбинационные центры. С ростом концентрации атомов никеля исходная микронеоднородность по проводимости кремния повышается (рис. 4). γ-облучение увеличивает концентрацию рекомбинационных центров и повышает микронеоднородность по проводимости кремния. На начальном этапе облучения, когда уровень Ферми незначительно меняется в низкоомных областях, барьер между высокоомными и низкоомными областями влияет на рекомбинационные свойства материала. С дальнейшим ростом дозы облучения, когда уровень Ферми в низкоомных областях изменяется, т.е. барьерная рекомбинация уменьшается, основную роль играют рекомбинационные центры. При $1/\tau_b = 1/\tau_{рек}$, τ_p в p-Si<P,Ni> стабилизируется в определенном интервале дозы облучения.

Известно, что с ростом степени компенсации в легированном материале растет флуктуационный барьер из-за неравномерной компенсации проводимости по объему образца. Неравномерное распределение атомов примесей дополнительно усиливает разброс концентрации носителей заряда. Это, в конечном итоге, приводит к гофрированности границ зоны проводимости и валентной зоны. Дальше основную роль играет барьер (Δ) между p- и p^+-областями (рис. 4). В этой области фоточувствительность образцов кремния, легированных никелем, возрастает по сравнению с контрольным кремнием (рис. 5). В дальнейшем, с ростом времени облучения в образцах p-Si<P,Ni>, на наш взгляд, во-первых, благодаря большому коэффициенту диффузии и растворимости Ni, увеличивается концентрация

электрически активных центров примесей в легированном кремнии, во-вторых, в результате возрастания концентрации РД с ростом дозы облучения низкоомная область становится высокоомной, т.е. барьер между высокоомными и низкоомными областями понижается и роль рекомбинационных центров увеличивается. В результате фоточувствительность образцов снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.И. Болтакс, М.К. Бахадырханов, С.М. Городецкий, Г.С. Куликов. Компенсированный кремний (Ленинград, Наука, 1972).
2. В.В. Болотов, В.А. Коротченко, А.П. Мамонтов и др., ФТП **14**, 2257 (1980).
3. В.С. Гарнык, З.В. Башелейшвили, ФТП **24**, 1485 (1990).
4. G. Tsintsadze, Z. Bashaleishvili, T. Pagava et al., Bull. Georgian Acad. Sci. **162**, (1) (2000).
5. Т.А. Пагава, ФТП **38**, 665 (2004).
6. О.В. Феклисова, Д. Янг, Е.Б. Якимов, ФТП **47**, 195 (2013).
7. М. Каримов, А.О. Курбанов, С. Зайнабидинов, А.К. Караходжаев, Известия вузов. Физика **2**, 57 (2006).
8. Ш. Махкамов, М. Каримов, А.О. Курбанов и др., Известия вузов. Физика **12**, 80 (2005).
9. А.С. Лошаченко, О.Ф. Вывенко, Е.И. Шек, Н.А. Соболев, ФТП **47**, 251 (2013).
10. А.А. Лебедев, В.В. Козловский, ФТП **48**, 1329 (2014).
11. Л.Ф. Макаренко, Ф.П. Коршунов, С.Б. Ластовский, Л.И. Мурин, М. Молл, И. Пинтилие, ФТП **48**, 1492 (2014).
12. В.И. Панов, Л.С. Смирнов, Е.Г. Тишковский, ФТП **9**, 1580 (1975).
13. М. Каримов, А.К. Караходжаев, Известия вузов. Физика **7**, 3 (2000).
14. В.В. Болотов, А.В. Васильев, А.В. Двуреченский, Г.А. Качурин, Н.Б. Придачин, Л.С. Смирнов, В.Ф. Стась. Вопросы радиационной технологии полупроводников (Новосибирск, Наука, 1980).
15. А.Н. Марченко. Управляемые полупроводниковые резисторы (Москва, Энергия, 1978).