ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ γ - РАДИАЦИИ НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ТЕРМО-ОБРАБОТАННОГО КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ

С. З. Зайнабидинов, А.О. Курбанов

Кремнийда радиациявий нуқсонларнинг ҳосил бўлиши ва унинг параметрлари радиациявий барқарорлашувига никель атомларининг таъсири ўрганилди. Никель атомлари билан легирланган кремний заряд ташувчиларининг яшаш вақти никель атомлари концентрацияси ортиши билан радиациявий нурланишга барқарорлашуви кўрсатилди.

***Калит сўзлар**: кремний, никель, нуқсон, А-марказ, яшаш вақти, заряд ташувчилар.*

Исследовалось влияние атомов никеля на эффективность образования радиационных центров и радиационной стабильности параметров кремния. Показано, что с ростом концентрации атомов никеля, улучшается радиационная стабильность, время жизни неосновных носителей заряда в легированном кремнии.

***Ключевые слова**: кремний, никель, дефект, А-центр, время жизни, носитель заряда.*

This article studies the influence of nickel atoms on the efficiency of radiation centers and radiation stability of silicon parameters. It has been depicted that with increasing concentrations of nickel atoms radiating stability lifetime of minority carriers in doped silicon improved.

***Keywords**: silicon, nickel, defect, A-center, lifetime, charge carrier.*

Введение

Исследование физических явлений, происходящих в легированном кремнии под влиянием внешних воздействий необходимо для выяснения механизмов получения кремния с высокими термо- и радиационно-стабильными электрофизическими и рекомбинационными свойствами. Решение этой задачи является одним из актуальных направлений физики твердого тела. Исследованию влияния внешних воздействий на свойства кремния посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных работ [1-4]. В большей части из них показано, что время жизни неосновных носителей заряда ($\tau\tau$) уменьшается с ростом концентрации дефектных центров, а в других работах – увеличивается. Таким образом, в данное время отсутствует единое понимание вопроса о поведении неосновных носителей заряда в легированном кремнии с глубокими энергетическими уровнями. Для выяснения поведения неосновных носителей заряда наиболее удобным является кремний, легированный атомами никеля, что обусловлено следующими соображениями [1,4,5]: во-первых, примесь никеля в кремнии имеет большой коэффициент диффузии (~$8\cdot10^{-6}$ см^2/с при 1000°С) по сравнению с другими примесями; во-вторых, большинство атомов никеля в кремнии находятся в электрически неактивном состоянии; в-третьих, наличие никеля приводит к термической стабильности электрофизических свойств кремния; в-четвертых, в электронной технике никель используется в качестве омических контактов для изготовления полупроводниковых приборов.

Несмотря на это, влияние атомов никеля на эффективность образования радиационных центров и термо- и радиационной стабильности параметров кремния относительно слабо изучено по сравнению с другими примесями. Неизученным остается так же изменение t в зависимости от скорости последиффузионного охлаждения и от концентрации центров никеля (N_{Ni}), .

Целью работы является установление влияния примеси никеля на термо- и радиационную стабильность электрофизических и рекомбинационных свойств кремния n- и p-типа в широком интервале температур.

1. Методика эксперимента

В работе использовались методы измерения удельного сопротивления, коэффициента Холла и t методом стационарной фотопроводимости. Для измерения параметров глубоких уровней использовался метод нестационарной емкостной спектроскопии - DLTS на диодах Шоттки.

В качестве исходного материала использовался кремний n- и p - типа с исходным удельным сопротивлением 3¸10 Ом×см. Легирование осуществлялось методом термодиффузии в открытом объеме (на воздухе) из нанесенного слоя Ni в интервале температур 1050¸1300^{0}C в течение 5 часов с последующим охлаждением со скоростью 30 град/мин (I тип) и со скоростью 250 град/мин (II тип). Параллельно исследовались образцы n-Si<P> и p-Si<B>, проходившие аналогичную термообработку, но без примеси никеля – (контрольный кремний). Радиационная обработка кремниевых образцов проводилась g- лучами с интенсивностью 200 Р×с$^{-1}$ в интервале 10^7¸10^9 Р. При облучении температура не превышала 50 ^{o}C.

Омические контакты на n-Si осуществлялись припаиванием сплава Sn+In (50%+50%) при температуре ~120 ^{0}C. Изготовление диодов Шоттки осуществлялось путем напыления Au и Sb на поверхность кремния.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

2.1. Исследование концентрации энергетических уровней в быстро и медленно охлажденном Si<Ni>

В спектре DLTS быстроохлажденных образцов n-Si<P,Ni> наблюдаются два максимума E_c – (0.22±0.02) эВ ($\sigma_n = 5\cdot 10^{-15}$ см^2) и E_c –(0.42±0.02) эВ ($\sigma_n = 8\cdot 10^{-16}$ см^2) после термодиффузии при 1170 ^{0}C. Причем обнаруженные энергетические уровни зависят от температуры диффузии и скорости последиффузионного охлаждения и наблюдаются нерегулярно (рис. 1).

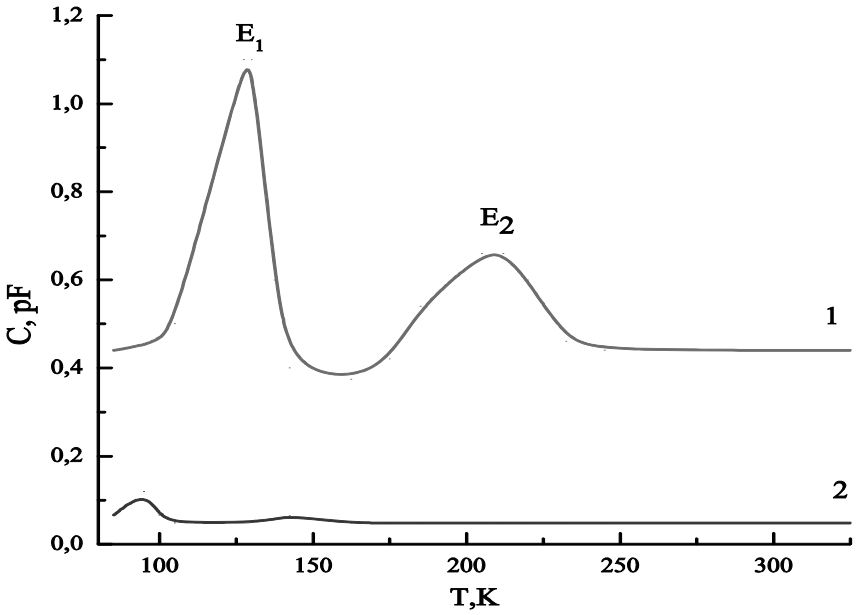

Рис. 1. Спектр DLTS n-Si<P,Ni> II типа (1) и контрольного кремния II типа (2) ($T_{диф.}$=1170°C): $E_1 = E_c$ –(0.22 ±0.02) эВ, $E_2 = E_c$ –(0.40±0.02) эВ

Концентрация этих уровней не больше~3×10^{13} см$^{-3}$ при температуре диффузии 1280 ^{0}C. Указанные энергетические уровни обнаружены и в контрольных образцах, хотя и в меньших концентрациях, которые обусловлены образованием комплекса донорного характера типа “никель + неконтролируемая примесь” [6,7].

В быстроохлажденных образцах p-Si<B,Ni> (рис. 2) наблюдаются энергетические уровни E_v+(0.24 ± ± 0.02) эВ (s_p=1.5·10^{-12} см$^{-2}$) и E_v+(0.32±0.02) эВ (s_p=3.9·10^{-15} см$^{-2}$), в медленноохлажденных образцах - E_v +(0.32±0.02) эВ (s_p= 2.6·10^{-14} см$^{-2}$).

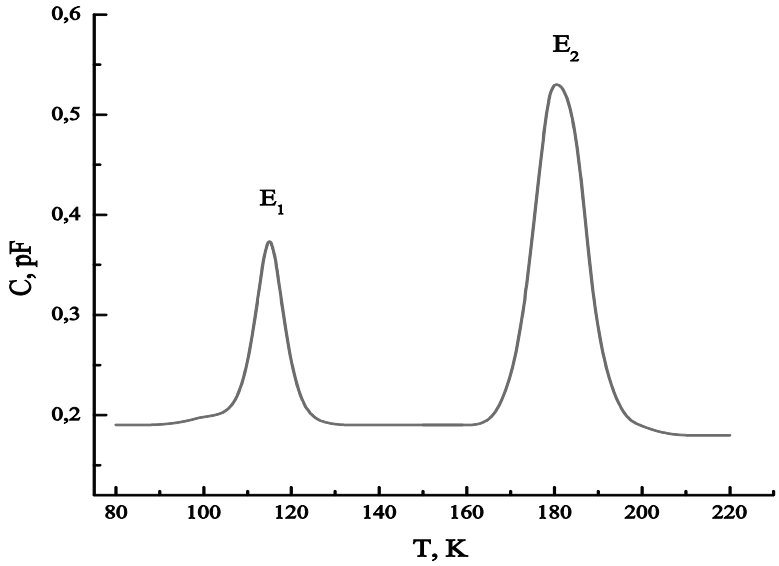

Рис. 2. Спектр DLTS p-Si<B,Ni > II типа ($T_{диф.}$=1275 °C); E_1=E_v + (0.24 ±0.02) эВ, E_2=E_v + 0.32±0.02 эВ

В p-Si<P,Ni> образцах наблюдается энергетический уровень E_v+(0.35±0.02) эВ акцепторного характера, при этом с ростом температуры диффузии концентрация этого центра растет и зависит от скорости последиффузионного охлаждения. Эффективность образования уровня E_v + (0.35 ±0.02) эВ в образцах II типа в 2 раза ниже, чем в образцах I типа [6, 7].

Анализ результатов исследования температурной зависимости концентрации акцепторных центров Ni в перекомпенсированном кремнии показало, что в образцах I типа концентрация электрически активных центров Ni в 2,3 раза больше по сравнению со II типом, которые описываются соотношениями для [8]:

$$\text{I тип} \quad C_{Ni} = 2.5\cdot10^{23}\exp(-60894/RT) \ (RT \text{ в кал.}) \qquad (1)$$

$$\text{II тип} \quad C_{Ni} = 1.7\cdot10^{25}\exp(-76750/RT) \ (RT \text{ в кал.})$$

Такое отличие объясняется тем, что, если скорость охлаждения велика, то часть диффундирующих атомов Ni в объеме кристалла замораживается, т.е. они не успевают уйти на структурные стоки и образуют электрически неактивные (вторая фаза) и активные скопления (области). При медленном охлаждении аналогичные скопления образуются вокруг структурных дефектов (в периферийной части), размеры которых заметно увеличиваются [8-10]. Известно, что при образовании скоплений примесных дефектов происходит сильная деформация матрицы, из-за чего образуются вакансии, компенсирующие ее упругое напряжение. Эти вакансии взаимодействуют с атомами Ni по реакции: $Ni_i+V\rightarrow Ni_s$ – (атом замещения), т.е. часть атомов никеля захватывается этими вакансиями, что приводит к увеличению концентрации электрически активных атомов примесей [9].

2.2. Исследование влияния примеси никеля на время жизни носителей заряда в быстро и медленно охлажденном Si<Ni>

Далее исследовалось влияние концентрации наблюдаемых центров на время жизни неосновных носителей заряда I и II типа образцов кремния [6, 7]. Как видно из табл. 1, легированный образец I типа и контрольный кремний n-типа отличаются несущественно, т.е. зависимость t от концентрации центров никеля не наблюдалась.

Таблица 1

Время жизни неосновных носителей заряда (τ, с) в легированном и контрольном кремнии в зависимости от скорости охлаждения

Тип образцов	$T_{диф}$=1070°C		$T_{диф}$=1120°C		$T_{диф}$=1170°C	
	I тип	II тип	I тип	II тип	I тип	II тип
n-Si<P>	$9\cdot10^{-7}$	$7.4\cdot10^{-6}$	$8\cdot10^{-7}$	$5.4\cdot10^{-7}$	$7\cdot10^{-7}$	$4.3\cdot10^{-7}$
n-Si<P,Ni> ($r_и$=3 Ом·см)	$8\cdot10^{-7}$	$6\cdot10^{-7}$	$6.8\cdot10^{-7}$	$4\cdot10^{-7}$	$5.6\cdot10^{-7}$	$1.46\cdot10^{-7}$
p-Si<B>	$4.7\cdot10^{-7}$	$8.8\cdot10^{-7}$	$1.18\cdot10^{-6}$	$1.3\cdot10^{-6}$	$1\cdot10^{-6}$	$1.6\cdot10^{-6}$
p-Si<B,Ni> ($r_{и.}$=10 Ом·см)	$2.6\cdot10^{-6}$	$2.2\cdot10^{-6}$	$3\cdot10^{-6}$	$2.1\cdot10^{-6}$	$4.8\cdot10^{-6}$	$4.7\cdot10^{-6}$

Незначительное снижение t с ростом температуры диффузии объясняется увеличением концентрации центров типа “никель + неконтролируемая примесь” (микропреципитатов). Отличие t легированного образца I типа по сравнению со II, объясняется уменьшением концентрации энергетических уровней E_1 и E_2. В кремнии p-Si<B,Ni> значения t больше по сравнению с контрольным кремнием (табл.1), а также с ростом концентрации атомов никеля t незначительно возрастает (концентрация акцепторных центров в этих образцах изменяется от $1.5.10^{14}$ до $3.5.10^{14}$ $см^{-3}$). Для выяснения механизма увеличения t проводился расчет по формуле [11]:

$$\tau \le \tau_{\max} \approx (\vartheta \sigma_{\min} \Delta p)^{-1} \approx 2c, \quad (2)$$

где s_{min} ³(10^{-22}-10^{-23}) $см^2$–минимальное сечение захвата носителей на локальный уровень; Dp<5.10^{14} $см^{-3}$; x~10^7 см/с–тепловая скорость дырок. Исследовалась кинетика релаксации фотопроводимости (при 77 К) в легированном кремнии, которая хорошо описывается зависимостью: $I_ф=I_o\times\exp(t/t)$, где I_o-темневой ток $I_o=1.3\times10^{-6}$ А, t-время наблюдения, t-время релаксации.

Анализ результатов показывает, что в исследованных образцах время релаксации t=0.5 с < t_{max} » 2 с. В данном случае поведение t объясняется захватом носителей заряда на уровень прилипания [6, 7, 11].

2.3. Исследование влияния γ-радиации на время жизни носителей заряда в быстро и медленно охлажденном Si<Ni>

На рис. 3 приведена зависимость времени жизни носителей заряда от дозы γ - облучения в образцах p-Si<Ni>.

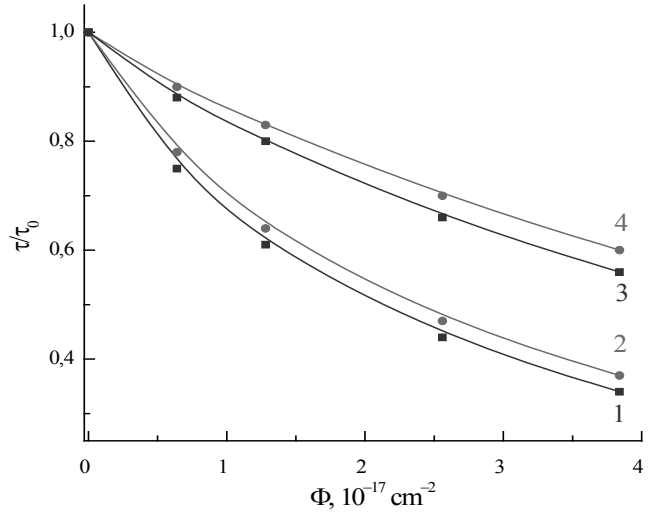

Рис. 3. Зависимость τ / τ $_o$ от дозы γ –облучения в p-Si<B> (1,2) и p-Si<B,Ni> (3,4) в быстро (2,4) и медленно (1,3) охлажденных образцах, $T_{диф}$= 1275 °C

Как видно из рисунка, относительное снижение времени жизни носителей заряда (τ / τ_o) в кремнии, легированном никелем, медленнее, чем в контрольном кремнии.

Затем определялся коэффициент радиационного изменения времени жизни носителей заряда в легированном и контрольном кремнии (рис. 4). В эксперименте величина K_t определяется наклоном участков дозовых зависимостей [D(1/t)]/DФ. На начальном этапе облучения до дозы $4 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ изменение времени жизни носителей заряда в легированном и контрольном кремнии

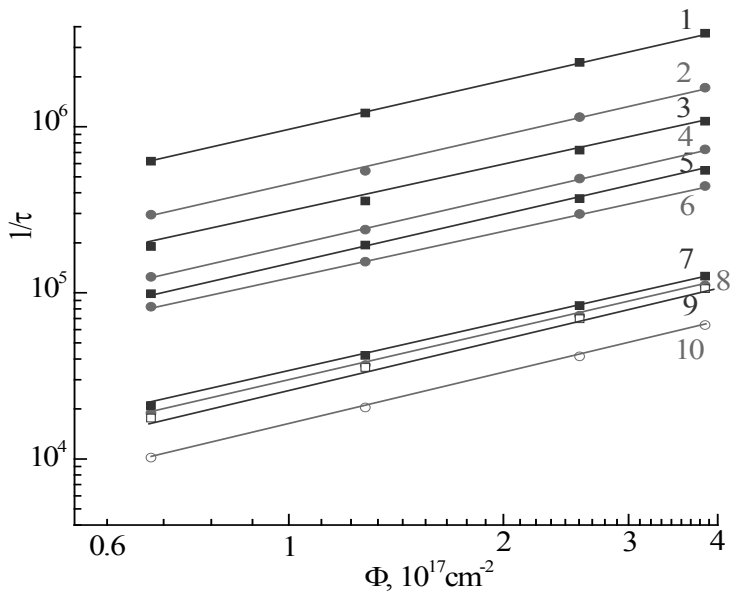

Рис. 4. Зависимость величины $\Delta(1/\tau)$ в p-Si<B> (1,2) и p-Si<B,Ni> (3:8), а также в p-Si<P,Ni> (9,10) в быстро (2,4,6,8,10) и медленно (1,3,5,7,9) охлажденных образцах от дозы γ –облучения при различных температурах диффузии: 1-, 2-, 3-, 4-1075 °C; 5-, 6-1175 °C; 7-, 8-1275 °C; 9-, 10-1285 °C

удовлетворительно описывается следующими выражениями (рис.4):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau \Phi, \text{ т.е. } \tau = \frac{\tau_0}{1+\tau_0 K_\tau \Phi} , \qquad (3)$$

где t_o, t- время жизни носителей заряда до и после облучения соответственно, Ф- флюенс g-радиации, K_t-коэффициент радиационного изменения времени жизни носителей заряда, значения которого приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, во-первых, с ростом концентрации никеля в легированном кремнии K_t снижается; во-вторых, значение K_t в легированном кремнии меньше, чем в контрольном кремнии. Эти факты объясняются следующим образом.

Таблица 2

Параметры легированного и контрольного кремния p – типа до и после g-облучения

Тип образцов	ρ, Ом·см	$T_{диф.}$, °C	Скорость охлаждения, град/мин	N_{Ni}, см$^{-3}$		τ_0, с	K_t, см^2/с
				$N_{обш.}$	$N_{акт.}$		
p-Si<B>	10.2	1075	250 (II- тип)	$3 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$4.5 \cdot 10^{-12}$
p-Si<B>	10		40 (I- тип)			$4.8 \cdot 10^{-7}$	$9.5 \cdot 10^{-12}$
p-Si<Ni>	9.7		250 (II- тип)			$1.2 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-12}$
p-Si<Ni>	9.6		40 (I- тип)		£10^{12}	$1 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-12}$
p-Si<B>	12	1175	250 (II- тип)	$7 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{13}$	$8.4 \cdot 10^{-7}$	$3.9 \cdot 10^{-12}$
p-Si<B>	10		40 (I- тип)			$4.8 \cdot 10^{-7}$	$9.1 \cdot 10^{-12}$
p-Si<Ni>	9.1		250 (II- тип)			$1.7 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-12}$
p-Si<Ni>	8		40 (I- тип)		£10^{12}	$1.05 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{-12}$

p-Si<B>	10.7		250 (II- тип)			$1.6\cdot10^{-6}$	$3.1\cdot10^{-12}$
p-Si<B>	11		40 (I- тип)			$9.7\cdot10^{-7}$	$4.5\cdot10^{-12}$
p-Si<Ni>	9.8	1275	250 (II- тип)	$1\cdot10^{18}$	$7\cdot10^{13}$	$6.9\cdot10^{-6}$	$2.9\cdot10^{-13}$
p-Si<Ni>	9.6		40 (I- тип)		$£10^{12}$	$5.8\cdot10^{-6}$	$3.3\cdot10^{-13}$
p-Si<P,Ni>	67		250 (II- тип)		$4\cdot10^{14}$	$1.8\cdot10^{-5}$	$1.5\cdot10^{-13}$
p-Si<P,Ni>	35	1285	40 (I- тип)	$1{,}4\cdot10^{18}$	$6\cdot10^{14}$	$7\cdot10^{-6}$	$2.7\cdot10^{-13}$

На основе анализа работ [6-14] предлагаем схему квазихимических реакций, протекающих под действием термического и радиационного воздействия в легированном кремнии (рис. 5).

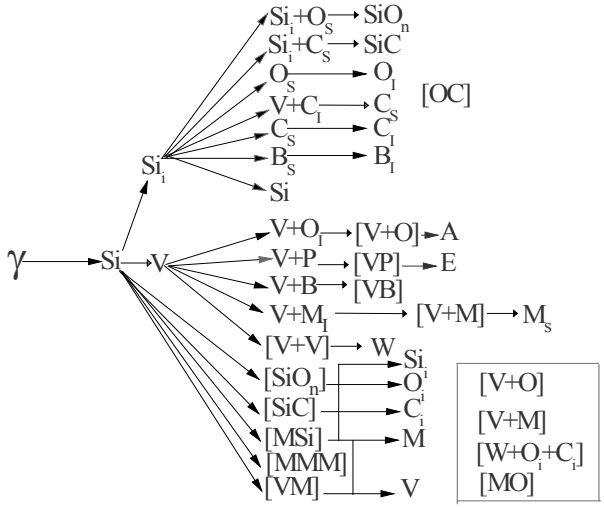

Рис. 5. Квазихимические реакции дефектообразования в легированном Si: X_s–, X_i–примесные атомы в узле и в междоузлии; MMM–кластеры; Si_i–атомы кремния в междоузлии; W–дивакансия; MSi–,SiC–силициды; M–примесь, создающая глубокие энергетические уровни; [W+O+C] – К-центры

Как показывают квазихимические реакции, в легированном и контрольном кремнии после воздействия проникающей радиации концентрация примесных [VM] и радиационных (типа А [VO]- и К [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 по сравнению с контрольными, поэтому в легированных образцах значения $K_\tau K_\tau$ меньше, чем в контрольных. В состав термодефектов входит от двух до четырех атомов кислорода. Взаимодействие этих дефектов с вакансиями увеличивает концентрацию А-центров при облучении. Это можно описать следующей схемой реакций:

$$Si_4 + V \rightarrow SiO_3 + A - \text{центр} \qquad (4)$$

$$SiO_3 + V \rightarrow Si_2 + A - \text{центр}$$

$$Si_2 + V \rightarrow X - \text{центр}$$

В процессе облучения дефекты в легированном кремнии (кластеры, силициды) переходят к более равномерному состоянию, 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. 5). Во - первых, эти электрически неактивные дефекты, в свою очередь, уменьшают концентрацию кислорода, который снижает эффективность образования А- и К-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 легиро-

ванном кремнии с никелем по сравнению с контрольными. При влиянии γ -радиации увеличивается микронеоднородность по проводимости и концентрация рекомбинационных центров. В общем случае время жизни носителей заряда ограничивается двумя каналами рекомбинации: обычным - через рекомбинационный центр (в данном случае это радиационные центры) и «барьерным» с вероятностью $1/\tau_{\gamma}^{РД}$ и $1/\tau^{b}$, соответственно; поэтому $1/t_{РЦ}$ =аФ, т.е. пропорционально дозе облучения (Ф). Но влияние рекомбинационных центров с ростом Ф не наблюдается до тех пор, пока не устанавливается равенство: $1/t_{РЦ}=1/t_{b}$. При $1/t_{РЦ}=1/t_{b}$ время жизни неосновных носителей заряда стабилизируется в определенном интервале дозы облучения (рис.4).

Заключение

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что в p-Si<B,Ni> значение $\tau\tau$ больше, чем в контрольном кремнии. Кроме того, с ростом концентрации атомов никеля значение $\tau\tau$ возрастает, что объясняется захватом носителей заряда на уровне прилипания.

2. Установлено, что до дозы ~$1\cdot10^{8}$ Р рекомбинационные свойства в p-Si<B,Ni> являются более радиационно стабильными, чем в контрольном кремнии, что связано с различной степенью микронеоднородности в легированном кремнии.

3. Показано, что с ростом концентрации атомов никеля радиационная стабильность t в легированном кремнии улучшается. Это объясняется увеличением количества примесных пар типа [никель-кислород].

Литература:

1. IstratovA.A, WeberE.R.Electrical properties and recombination activity of copper, nickel and cobalt in silicon.// App1. Phys. A 66. 1998. P. 123 – 136.

2. Талипов Ф.М.Влияние марганца на радиационную деградацию электрических и рекомбинационных параметров монокристалла кремния. // ФТП. 1997. 31. С. 515- 516.

3. Талипов Ф. М., Бахадырханов М. К.Исследование влияния облучения гамма-квантами на электрические и рекомбинационные свойства кремния, диффузионно легированного никелем // Спец. электроника. –Москва, 1986. -Вып.1. -С.67-69.

4. Бахадырханов М. К., Зайнабидинов С., Тешабаев А.Т., Ходжаев М.А.Влияние термообработки на взаимодействие атомов никеля с кислородом в кремнии. // ФТП. - 1976. - Т.10. - № 5. - С.1001-1004.

5. Бахадырханов М.К., Зайнабидинов С., Хамидов А. Некоторые особенности диффузии и электроперенос никеля в кремнии. // ФТП. 1980. 14. С. 412 – 415.

6. Каримов М., Курбанов А.О., Зайнабидинов С., Караходжаев А.К. К вопросу термостабильности электрофизических свойств p-Si<P,Ni> и p-Si<P,Cu>. // Известия вузов, Физика. – 2006. –Вып.2. – С.57-61.

7. Karimov M., Tursunov N.A., Kurbanov A. at all. Influence of thermal processing on life-time of charge carriers in silicon doped by nickel.//Solid state physics. Tes. Rep. 8-th international conference (August 23-26, 2004). - Almaty, 2004. -P.168

8. Каримов М., Курбанов А.О., Махмудов Ш.А. Растворимость Ni и Cu в кремнии. // Труды конференции посвященной 60-летию АН РУз и Физико-технического института «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (27-28 ноябрь 2003 г.). - Ташкент. 2003. -С. 225-228.

9. Махкамов Ш., Каримов М., Курбанов А. О. и др.Исследование влияния характера термообработки на время жизни носителей заряда в кремнии, легированном никелем. // Известия вузов. Физика. - 2005.- Вып.12.- С.80-82.

10. Махкамов Ш., Турсунов Н. А., Каримов М. и др.Исследование примесно-дефектных состояний в легированном кремнии.// Труды V международной научной конференции «Радиационной-термический эффект и процессы в неорганических материалах». Томск, 2006. С.244-248.

11. Махкамов Ш, Каримов М, Турсунов Н.А и др. Влияние g - квантов ^{60}Co на фоточувствительность компенсированного кремния. // Труды 5-ой международной конференции, III том. Радиационная экология. Ядерно-физические методы в медицине и промышленности «Ядерная и радиационная физика» (26-29 сентябрь 2005) - Алматы, 2006. - С. 368-375

12. Лошаченко А.С., Вывенко О.Ф., Шек Е.И. и др.Электрически активные центры в кремнии, имплантированном ионами кислорода.// ФТП. 2013. 47. 2. С. 251-254.

13. Лебедев А.А., Козловский В.В.О сравнении радиационной стойкости кремния и карбида кремния.// ФТП. 2014. 48. 10. С. 1329-1331.

14. Макаренко.Л.Ф., Коршунов Ф.П., Ластовский С.Б. и др.Образование и отжиг метастабильных комплексов межузельный кислород-межузельный углерод в кремнии n- и p-типа.// ФТП. 2014. 48. 11. С. 1492-1498.

Андижон давлат университети,
2016 йил 18 июлда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. Р.Алиев)