

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОНЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ НИКЕЛЯ НА РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЯ

Б. К. Исмаилов¹, В. Б. Оджаев², Н. Ф. Зикриллаев¹, К. А. Исмаилов³,
З. Т. Кенжаев¹, Г. Х. Мавлонов¹

¹⁾ *Ташкентский государственный технический университет, Университетская 2, 100095,
г. Ташкент, Узбекистан, e-mail: i.bairam@bk.ru*

²⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: odzaev@bsu.by*

³⁾ *Каракалпакский государственный университет, Ч. Абдилов 1, 230112, КАР,
г. Нукус, Узбекистан, e-mail: kanatbay.ismailov@gmail.com*

Показано, что при наличии электронейтральных атомов никеля можно практически полностью подавлять генерацию термодоноров, которые появляются в диапазоне температур $T = 450\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$. Экспериментально было показано, что дополнительное легирование кремния никелем при $T = 1100\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$, позволяет обеспечить достаточно высокую термостабильность его электрических параметров в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: никель; время жизни; диффузия; рекомбинационные центры; термостабильность; электрические параметры.

EFFECT OF ELECTRONEUTRAL NICKEL ATOMS ON THE RECOMBINATION PARAMETERS OF SILICON

B. K. Ismaylov¹, V. B. Odzhaev², N. F. Zikrillaev¹, K. A. Ismailov³,
Z. T. Kenzhaev¹, G. Kh. Mavlonov¹

¹⁾ *Tashkent State Technical University, University 2, 100095, Tashkent, Uzbekistan,*

²⁾ *Belarusian State University, Independence Ave., 4, 220030 Minsk, Belarus,*

³⁾ *Karakalpak State University, Ch. Abdirov 1, 230112, KAR, Nukus, Uzbekistan,
Corresponding author: B. K. Ismaylov (kanatbay.ismailov@gmail.com)*

It is shown that in the presence of electrically neutral nickel atoms, it is possible to almost completely suppress the generation of thermal donors, which appears in the temperature range $T = 450\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$. It has been experimentally shown that with additional alloying of silicon with nickel at $T = 1100\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$, it makes it possible to provide a sufficiently high thermal stability of its electrical parameters in a wide temperature range.

Key words: nickel; lifetime; diffusion; recombination centers; thermal stability; electrical parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Атомы никеля, в отличие от других элементов переходных групп в кремнии, имеют не только самый большой коэффициент диффузии, но и высокую растворимость (порядка 10^{18} см^{-3}) [1]. Однако максимальная концентрация электроактивных атомов составляет менее чем 0,1 % от общей растворимости атомов при данной температуре, то есть основная часть атомов Ni находится в электронейтральном состоянии. Как было показано в работе [2, 3], эта часть атомов находясь в междоузлиях

может образовывать примесные кластеры в решетке кремния. Структура, размер и распределение таких кластеров в основном определяются условиями легирования и скоростью охлаждения после диффузионного отжига, а также температурой и временем дополнительного термоотжига.

Поэтому представляет интерес проведение исследований по определению влияния формирования электронейтральных кластеров атомов никеля в решетке кремния на электрофизические параметры материала с точки зрения получения кремния со стабильными параметрами, который подвергается различным температурным воздействиям в процессе изготовления электронных полупроводниковых приборов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения исследований в качестве исходного материала был выбран монокристаллический кремний, полученный методом Чохральского, как *n*- так и *p*-типа проводимости с концентрацией бора и фосфора $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ – $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Концентрация кислорода в образцах составляла $(6\text{--}7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, плотность дислокаций 10^3 см^{-2} . Диффузия проводилась в диффузионной печи из напыленной в вакууме металлической пленки никеля как на воздухе, так и в вакуумированных до $P \sim 10^{-6}$ атм кварцевых ампулах при температуре $T = 1000\text{--}1200$ °С. Время диффузии выбиралось таким образом, чтобы обеспечивалось равномерное распределение атомов никеля в объёме образцов. Размер образцов составлял 0,8 мм×4 мм×8 мм.

В отдельных ампулах в аналогичных условиях отжигались контрольные образцы кремния не содержащие атомы никеля, чтобы оценить влияние диффузионного отжига на электрофизические параметры образцов. Механическая и химическая обработка всех образцов проводилась в идентичных условиях. Электрические параметры образцов измерялись методом эффекта Холла, время жизни неосновных носителей заряда измерялось методом модуляции проводимости в точечном контакте.

В таб. 1 приведены электрические параметры и время жизни неосновных носителей заряда в образцах до и после диффузии атомов никеля при различных температурах и времени отжига (Ni – образцы легированные никелем, К – не легированные контрольные образцы). При этом выбирались образцы, где концентрация исходной примеси (бор, фосфор) была всегда больше концентрации электроактивных атомов никеля при данной температуре диффузии, чтобы исключить влияние наличия электроактивных атомов никеля на электрофизические параметры исходного кремния. Как видно из представленных результатов, при диффузии атомов никеля при температуре $T = 1200$ °С в образцах *p*-типа с $\rho = 10$ Ом·см ($N_B = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), исходные электрические параметры и время жизни практически сохраняют свои первоначальные значения. В тоже время удельное сопротивление контрольных образцов увеличивается почти в 30 раз ($\rho = 289$ Ом·см), а время жизни уменьшилось в 5–6 раз.

Эти данные показывают, что при таких температурах отжига генерируется достаточная концентрация термодоноров ($N > 1,9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). В тоже время в образцах легированных никелем, не только не генерируется термодоноры, но так же и рекомбинационные центры. Чтобы убедиться в этом, нами была проведена диффузия никеля при более низких температурах $T = 1100\text{--}1150$ °С, при тех же температурах и условиях как и контрольные образцы подвергались термоотжигу без никеля.

Как видно из таб. 1 с понижением температуры отжига удельное сопротивление контрольных образцов существенно увеличивается на 3 и 4 порядка и достигает $9 \cdot 10^4$ и $2,9 \cdot 10^5$ Ом·см, а время жизни неосновных носителей заряда уменьшается в 10–30 раз. В тоже время в образцах легированных никелем их исходные электрические и рекомбинационные параметры полностью сохраняются. Эти данные свиде-

тельствуют о том, что действительно наличие атомов никеля в кремнии практически полностью подавляет генерацию термонодоров [4–6].

Параметры легированных никелем и контрольных образцов при температуре отжига $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ существенно не отличаются. Это может быть связано с тем, что концентрация термонодоров при таких температурах отжига, меньше чем концентрация дырок в исходных образцах. В связи с этим нами на следующем этапе в качестве исходного материала был использован p -Si с удельным сопротивлением $\rho \sim 40\text{ Ом}\cdot\text{см}$ ($p \approx 5 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$).

Как показали результаты исследования (таб. 1) контрольные образцы меняют тип проводимости, то есть становятся n -типом с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^3\text{ Ом}\cdot\text{см}$, а время жизни становится $\tau < 1\text{ мкс}$. Образцы, легированные Ni, практически сохраняют свои исходные параметры и время жизни неосновных носителей заряда. Аналогичные результаты были получены при легировании кремния n -типа с $\rho = 10\text{--}60\text{ Ом}\cdot\text{см}$.

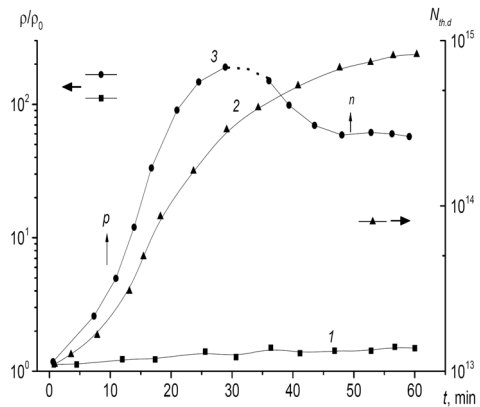
Как известно, термонодоры более активно генерируются в кремнии при $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому представляет интерес проведение исследования влияния термоотжига при $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $t = 10\text{--}40$ мин на удельное сопротивление образцов легированных никелем при $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и контрольных образцов без никеля p – типа проводимости с $\rho = 10\text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Изменение электрических параметров и времени жизни неосновных носителей заряда контрольных и легированных никелем образцов при различных температурах диффузии

№	До отжига			Условия отжига			После отжига		
	Тип	ρ	τ	$T^{\circ}\text{C}$	t		Тип	ρ	τ
		Ом·см	мкс		Час	П К		Ом·см	мкс
К-1	p	9,7	(25–40)	1200	2	Ni	p	10,7	
	p	10,1	–	–	–	Ni	p	11,5	(15–20)
	p	11,2	–	–	–	K	n	289	(2–4)
К-2	p	9,7	–	1150	2	Ni	p	10,7	
	p	11,3	–	–	–	Ni	p	10,5	(20–30)
	p	10,6	–	–	–	K	n	$7,9 \cdot 10^4$	4
К-3	p	11	–	1100	2	Ni	p	11,4	
	p	11,3	–	–	–	Ni	p	10,5	(15–20)
	p	11,4	–	–	–	K	i	$2,7 \cdot 10^5$	1
К-4	p	11,2	–	1050	2	Ni	p	10,5	
	p	12,2	–	–	–	Ni	p	12,2	(20–35)
	p	7,2	–	–	–	K	p	13,6	(15–40)
К-5	p	41	–	1150	2	Ni	p	42,5	(10–30)
	p	40	–	–	–	K	n	$1,2 \cdot 10^3$	$\tau < 1$
	n	11,9	(40–50)	1150	2	Ni	n	11,3	(50–70)
К-6	n	10,2	–	–	–	K	n	12,7	(15–30)
	n	43	–	1100	2	Ni	n	42,3	
	n	41	–	–	–	K	n	41,5	

На рис. представлено относительное изменение удельного сопротивления образцов, предварительно легированных никелем при $T = 1150^\circ\text{C}$, и контрольных образцов p -типа с $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ от времени термоотжига при $T = 450^\circ\text{C}$.

Как видно из рисунка электрические параметры образцов предварительно легированных никелем практически существенно не меняются. В тоже время удельное сопротивление контрольных образцов с увеличением времени термоотжига увеличивается и достигает своего максимального значения при $t = 30\text{--}40$ мин, затем меняется тип проводимости. Эти результаты еще раз подтверждают, что наличие примесных атомов никеля (то есть их электронейтральная часть) полностью подавляет генерацию термодоноров в широком интервале температур $T = 450\text{--}1200^\circ\text{C}$.



Изменение проводимости и концентрации термодоноров в образцах Si (Ni) и в контрольных образцах в зависимости от времени ТО при $T = 450^\circ\text{C}$: 1 – образцы Si (Ni); 2, 3 – контрольные образцы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать следующие утверждения: а) электронейтральные атомы никеля в решетке кремния находятся преимущественно в электронейтральных кластерах; б) кластеры атомов никеля – это микро- и нано- области кремния, обогащенные атомами никеля и кислорода; в) кластеры атомов никеля могут действовать как активные центры, гетерирующие кислород и другие неконтролируемые примесные атомы в решетке кремния, в результате этого генерация термодоноров и других рекомбинационных центров существенно подавляется; г) диффузию никеля можно проводить на воздухе из напыленных металлических слоев никеля на кремниевые пластины различного диаметра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Abdurahmanov B.A., Bakhadyrkhanov M.K., Ismailov K.A., Ismaylov B.K., Saparniyazova Z.M. "Functional possibilities of silicon with clusters of impurity atoms" // Science and Education in Karakalpakstan 2019, V.9. №1. pp. 43–47.
2. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., К. С. Аюпов, Б.А. Абдурахмонов, П.Ю. Кривенко, Р.Л. Холмухамедов "Самоорганизация примесных атомов никеля в кремнии" // "Неорганические материалы" Молдова 2011 г, Т 4, № 9, с 1062.
3. M.K Bakhadyrkhanov., Z.M Saparniyazova., Kh.M Iliev., K.A Ismailov., // Interaction of multiply charged manganese nanoclusters with selenium and tellurium atoms in silicon // Inorganic materials, Moscow 2015, Vol. 51, No. 8, pp. 767.
4. V.B. Neymash, E.A. Puzenko, A.N. Kabaldin, A.N. Kraichinsky, N.N. Krasko. On the nature of nuclei for the formation of thermal donors in silicon (or another variant of accelerated diffusion of oxygen) // Physicotechnical Semiconductors 1999, T 33, vol. 12. P. 1423-1427.
5. P.A. Selishchev. Kinetics of the formation of oxygen-containing thermodonors in silicon and the formation of their inhomogeneous distribution: analogous solutions // Physicotechnical Semiconductors, 2001, T 35, vol. 1. P. 11-14.
6. V.V. Voronkov, G.I. Voronkova, A.V. Batunina, V.N. Golovina, M.G. Milvidsky, A.S. Gulyaev, N.B. Tyurina, L.V. Arapkina. The generation of thermal donors in silicon: the influence of intrinsic interstitial atoms // Solid State Physics, 2000, Vol. 42, No. 11. P. 1965-1975.