ВЛИЯНИЕ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ С КЛАСТЕРАМИ АТОМОВ НИКЕЛЯ

А.О. Курбанов

Тадқиқот иши кремнийда радиациявий нуқсонларнинг никель атомлари кластерлари билан ўзаро таъсирлашувини ўрганишга бағишланган. *p-Si*<B,*Ni*>, *p-Si*<B,*P,Ni*> намуналарда заряд ташувчилар концентрациясининг нисбий ўзгариши p-Si<B,P> ва p-Si<B> намуналардагидан кўра анча кам эканлиги аниқланди, бу тез нейтронлар таъсирида бир вақтнинг ўзида радиациявий нуқсонларнинг пайдо бўлиши ва электрфаол бўлмаган Ni киришмаси атомларининг электр фаол ҳолатга ўтиши билан боғлиқ.

Калит сўзлар*: кремний, киришма, радиациявий нурланиш, солиштирма қаршилик, концентрация, нуқсон.*

Работа посвящена изучению взаимодействия радиационных дефектов с кластерами атомов никеля в кремнии. *Обнаружено, что относи*тельное изменение концентрации носителей заряда в образцах *p-Si*<B,*Ni*>, *p- Si*<B,*P,Ni* > медленнее, чем в *p-Si<B,P> и p-Si<B>, это связано* с одновременным

возникновением радиационных дефектов и переходом электрически неактивных атомов примеси *Ni* в электрически активное состояние в результате взаимодействия с быстрыми нейтронами.

Ключевые слова*: кремний, примесь, радиация, удельное сопротивление, концентрация, дефект.*

The work is devoted to the study of the interaction of radiation defects with clusters of nickel atomsin silicon. It was found that a relative change in the concentration of charge carriers in samples is p-Si<B,Ni>, p-Si<B,P,Ni> is slower than in p-Si<B,P> and p-Si<B>, this is due to the simultaneous occurrence of radiation defects and the transition of electrically inactive Ni impurity atoms to an electrically active state as a result of interaction with fast neutrons.

Keywords*: silicon, impurity, radiation, specific resistance, concentration, defect.*

Введение

В настоящее время известно, что наличие некоторых примесей, создающих глубокие энергетические уровни (ГЭУ) в запрещённой зоне кремния, приводит к таким полезным эффектам, как повышение фоточувствительности, магниточувствительности, термочувствительности, быстродействия приборов. Поэтому изучение взаимодействия примесных атомов, создающих ГЭУ, с радиационными дефектами (РД) в кремнии является актуальным, поскольку в приборостроении уже применяются полупроводниковые материалы, легированные такими примесями. В связи с этим в последние годы интенсивно изучаются процессы взаимодействия глубокоуровневых примесных атомов с РД в кремнии. К сегодняшнему дню в кремнии изучено взаимодействие РД с более чем десятью элементами, в основном I, II, VI, VII, и VIII групп таблицы Менделеева.

Электрофизические свойства монокристаллического кремния, легированного никелем, по сравнению с другими легирующими элементами 3d-переходной группы, отличаются еще и с тем что такие материалы являются более стабильным (стойким) к радиационным воздействиям [1]. А это вызывает большой интерес к изучению физических процессов, происходящих в объеме монокристаллов кремния, между примесными атомами Ni и радиационными дефектами (V-O, V-П, V-V), возникающих во время облучения. Согласно [2,3] радиационные дефекты, образующиеся при облучении монокристалла кремния, могут сильно изменять его электрофизические свойства. Изучение влияния радиационного облучения на свойства компенсированного полупроводникового кремния преследует следующие цели: определение радиационной стойкости исследуемых материалов, определение процессов миграции и взаимодействия примесных атомов с структурными и радиационными дефектами кристаллической решетки. В связи с этим, нами были проведены исследования влияния облучения реакторными нейтронами на электрофизические свойства кремния, компенсированного никелем.

Подготовка образцов и методика эксперимента

Для изучения влияния флюенса быстрых нейтронов на электрофизические свойства легированных и контрольных образцов в качестве исходного материала использовался кремний, полученный методом Чохральского, и нейтронно-легированный кремний (НЛК) из p – в n− тип (n-Si<B,P>) с удельным сопротивлением 3÷10 Ом·см.

Легирование кремния никеля проводилось при температуре 1200 ^{0}C. Радиационная обработка кремниевых образцов n-Si<P>, p-Si<B>, n-Si<B,P> и p-Si<P,B> проводилась в вертикальном канале реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУз с мощностью 8÷10 МВт и интенсивностью ~$6{,}3\cdot10^{13}$ см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$. Изменения электрофизических параметров образцов после облучения нейтронами приведены на рисунках 1, 2 и в таблицах 1, 2.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.1 и в табл. 1 приведены изменения электрофизических параметров образцов n-типа кремния. Как видно из рисунка и таблицы, относительное изменение концентрации носителей заряда в образцах n-Si<P,Ni> (прямая 4) быстрее, чем в других образцах. Этот эффект объясняется тем, что при воздействии быстрых нейтронов в образцах n-Si<P,Ni> возникают

Таблица 1

Параметры легированного и контрольного кремния n-типа

Параметры	Si<B,P> (НЛК)	Si<B,P,Ni> (НЛК)	Si<P>	Si<P,Ni>
ρ, Ом.см n, $см^{-3}$ μ, $см^2/В·с$ Δ, мэВ (высота потенциалного барьера)	6.5 $1.23\ 10^{15}$ 780 62	6.7 $1.2\ 10^{15}$ 810 120	3.1 $1.5\ 10^{15}$ 1348 5,2	4.7 $1.18\ 10^{15}$ 1150 6,7
После облучения флюенсом быстрых нейтронов 10^{14} $см^{-2}$				
ρ, Ом.см n, $см^{-3}$ μ, $см^2/В·с$ Δ, мэВ	12.7 $6.26\ 10^{14}$ 785 160	7.6 $1.04\ 10^{15}$ 792 610	9.32 $5.06\ 10^{14}$ 1325 16	29.4 $1.88\ 10^{14}$ 1135 62

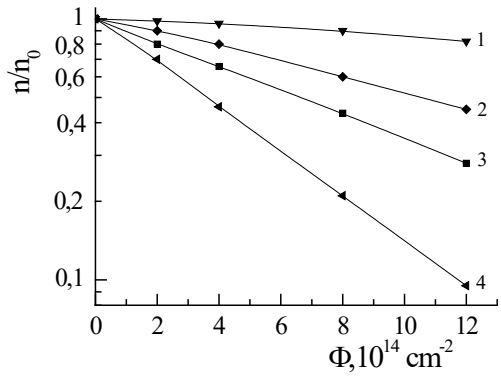

Рис. 1. Зависимость относительной концентрации основных носителей заряда в кремнии от флюенса быстрых нейтронов (E>0,1 МэВ): 1− n-Si<B,P,Ni>; 2 − n-Si<B,P>; 3 − n-Si<P>; 4 − n-Si<P,Ni> .

компенсирующие радиационные дефекты и одновременно часть электрически неактивных атомов примеси никеля переходит в электрически активное состояние в результате взаимодействия с вакансиями [Ni+V].

Радиационная стойкость электрофизических свойств у образцов n-Si<B,P,Ni> выше, чем у других образцов (прямая 1). Эффект объясняется барьерным механизмом [4], так как в этом образце существенно отличается высота потенциального барьера, т.е. степень микронеоднородности (табл. 1).

Отличие контрольного НЛК (n-Si<B,P>) и n-Si<P> обсуждено в [4], и наблюдаемый эффект объясняется следующим образом. Известно, что при выращивании кристаллов кремния n-типа из-за неравномерного распределения основных примесей – фосфора, технологических примесей кислорода и углерода в объеме кристалла образуются низкоомные (n^{max})- и высокоомные (n^{min})- области проводимости [5]. Наличие контактов между этими областями приводит к возникновению незначительного потенциального барьера D_o для носителей заряда в n-Si<P> по сравнению с n-Si<B,P> (табл. 3.3). При этом энергетическое положение уровня Ферми (E_f) для n^{max} - и n^{min} - областей остается единым, причем его положение определяет n^{max} - область [6]. Существенное отличие этих образцов заключается в том, что n-Si<P> является однородным по проводимости, а n-Si<B,P> - неоднородным (при этом электрофизические параметры практически одинаковы) (табл. 1, рис. 2).

Далее образцы облучались быстрыми нейтронами. Известно, что в образцах кремния n-типа, облученных нейтронами, образуются в основном дефекты типа A [V+O] с энергией ионизации $E_1 = E_c$-0,18 эВ, а также E [V+P] с энергией ионизации $E_3 = E_c$-0,4 эВ и дивакансии [W] с энергией ионизации $E_2 = E_c$-0,34 эВ [7]. В исследованных образцах уровень Ферми $E_f \geq E_c$+0,2 эВ, поэтому можно счи-

тать, что наблюдаемые акцепторные уровни РД E_1 полностью ионизованы в образцах n-Si<B> и n-Si<B,P>; в удалении носителей − электронов−из зоны проводимости участвуют E_2 и E_3 -центры.

На рис.2 приведены модели, объясняющие удаление носителей электронов из зоны проводимости в образцах n-Si<B> и n-Si<B,P>.

На начальных этапах нейтронного облучения в кристалле n-Si<P> концентрация носителей −электронов $n^{max} \approx n^{min}$, т.е. практически сравнима, и радиационный акцепторный центр захватывает электроны из зоны проводимости быстрее, чем в образцах n-Si<B,P> (рис.1). А в образцах n-Si<B,P> из-за наличия барьера в n^{min} -области уровень Ферми расположен ниже E_2 и E_3, поэтому они также не участвуют в удалении электронов из зоны проводимости. В связи с этим радиационная стойкость по проводимости в n-Si<B,P> выше, чем в n- Si<P>.

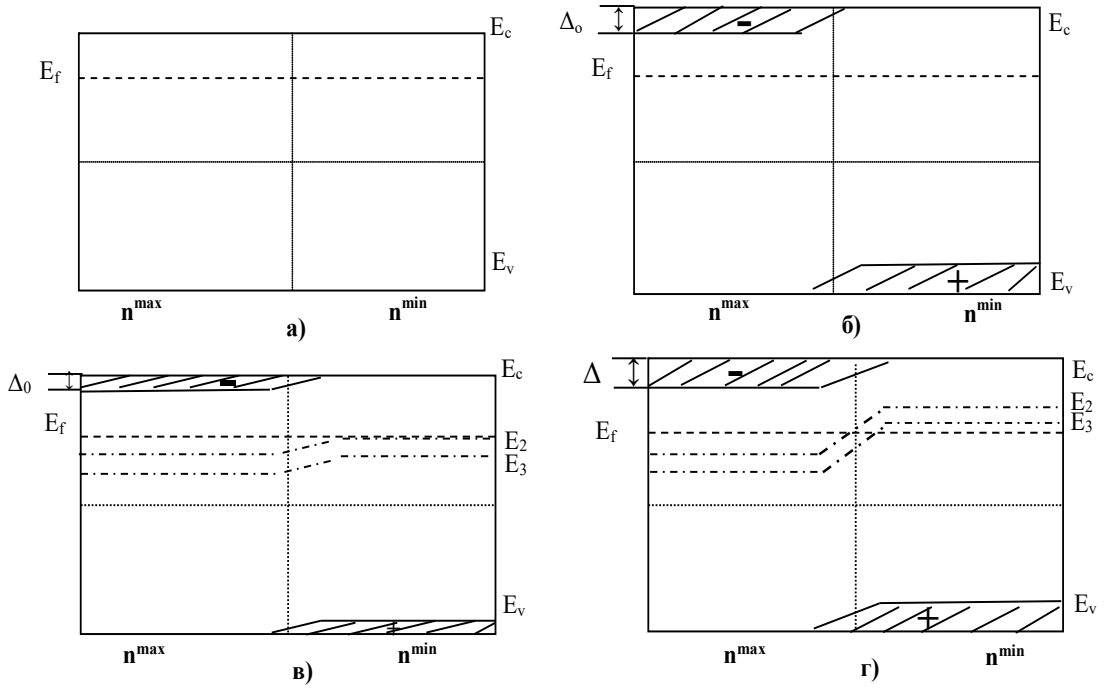

Рис.2. Модели неоднородных n^{max}– и n^{min}– областей до облучения в n-Si<P> (а) и n-Si<B,P> (б) и после нейтронного облучения в n-Si<P> (в) и n-Si<B,P> (г) : $E_2=E_c-0,34$ эВ и $E_3=E_c-0,40$ эВ.

На рис. 3 и в табл.2 приведены изменения электрофизических параметров образцов кремния р-типа. Видно (рис.3), что относительное изменение концентрации носителей заряда в легированных образцах медленнее, чем в p-Si<B,P> и p-Si<B>.

Таблица 2

Параметры легированного и контрольного кремния р-типа

Параметры	Si<B,P> (НЛК)	Si<B,P,Ni> (НЛК)	Si<B>	Si<B,Ni>
ρ, Ом.см	18,1	15.07	14.5	13.1
p, $см^{-3}$	$1.23\ 10^{15}$	$1.34\ 10^{15}$	$1.21\ 10^{15}$	$1.31\ 10^{15}$
μ, $см^2/В{\cdot}с$	280	310	355	365
Δ, мэВ	14	7,96	4,5	4,15
После облучения флюенсом быстрых нейтронов 10^{14} $см^{-2}$				
ρ, Ом.см	35.4	20.72	22.3	14.8
p, $см^{-3}$	$6.8\ 10^{14}$	$1\ 10^{15}$	$8.1\ 10^{14}$	$1.2\ 10^{15}$
μ, $см^2/В{\cdot}с$	260	301	345	352
Δ, мэВ	30	9,4	6,75	4,5

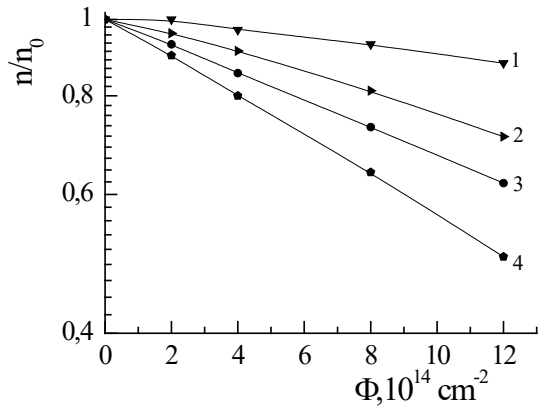

Рис. 3. Зависимость относительной концентрации основных носителей заряда в кремнии от флюенса быстрых нейтронов (E > 0,1 МэВ): 1−p-Si<B,Ni>; 2− p-Si<B,P,Ni>; 3− p-Si<B> 4− p-Si<B,P> .

Этот эффект объясняется одновременным возникновением радиационных дефектов и переходом электрически неактивных атомов примеси Ni в электрически активное состояние в результате взаимодействия с быстрыми нейтронами, т.к. атомы Ni взаимодействуют с большей частью вакансий, возникающих при облучении, образуя комплексы [V+Ni].

Заключение

Полученные экспериментальные данные позволяют предложить радиационностойкие по проводимости материалы и приборы на основе p-Si<B,Ni> и n-Si<B,P,Ni>, а на кремнии n-Si<P,Ni> можно создать запоминающие дозиметры для определения потока быстрых нейтронов.

Литература

1. Зайнабидинов С. Физические основы образования глубоких уровней в кремнии. - Ташкент: Фан, 1984, -160 с.

2. Karimov, M., Makhkamov, S., Tursunov, N.A.,Makhmudov, S.A., Sulaimonov, A.A.The effect of fast neutrons on th e electrophysical properties of nuclear-doped p-silicon. // Russian Physics Journal. – 2011, -V. 54, -Issue 5, -P.589-593.

3. Yang, J., Li, X., Liu, C., Fleetwood, D.M. The effect of ionization and displacement damage on minority carrier lifetime // Microelectronics Reliability. – 2018, -V.82, -P.124-129.

4. Ермолов П., Карманов Д., Лефлат А., Мананков В., Меркин М., Шабалина Е. Нейтронно-наведенные эффекты в зонном кремнии, обусловленные дивакансионными кластерами с тетраваканcионным ядром // ФТП. -Санкт-Петербург, – 2002, -Т.36, -№ 10, -С. 1194-1201.

5. Талипов Ф.М. Влияние марганца на радиационную деградацию электрических и рекомбинационных параметров монокристалла кремния. // ФТП. -Санкт–Петербург, 1997, - Т.31, – Вып.5, - С.515-516.

6. Ke, J., Ke, H.,Odette, G.R., Morgan, D. Cluster dynamics modeling of Mn-Ni-Si precipitates in ferritic-martensitic steel under irradiation //Journal of Nuclear Materials. – 2018, -V. 498, -P. 83-88.

7. Шейнкман М. К., Шик А. Я. Долговременная релаксация и остаточная проводимость в полупроводниках // ФТП. - Санкт-Петербург, 1976, -Т.10, -№ 2, -С.209.

Андижон давлат университети,
2018 йил 10 декабрда қабул қилинган
(Тақризчи: акад. С.Зайнобидинов)