ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ SI<NI> И SI<CO>

С.З.Зайнабидинов, Н.А.Тургунов

Электрик ва электрон – зонд микроскопия усуллари билан диффузия ёрдамида легирланган Si<N> ва Si<Co> намуналарига нейтрон нурланишларининг таъсирлари тадқиқ этилди. Никель ва кобальт киришма атомлари микробирикмаларининг нурланишдан олдинги ва кейинги ҳолатлари ўрганилди. Киришмавий микробирикмаларнинг шакли ва ўлчамларига қараб нурланишнинг маълум бир қийматларида емирилиши аниқланди.

Калит сўзлар: *кремний, никель, диффузион легирлаш, киришмавий микробирикмалар, электрон-зонд микротаҳлил, нейтрон нурлантириш, микробирикмаларнинг емирилиши.*

Методами электрических измерений и электронно-зондовой микроскопии исследовано влияние нейтронного облучения на электрофизические свойства образцов Si<Ni> и Si<Co>, полученных путем диффузионного легирования. Изучено состояние примесных микровключений никеля и кобальта до и после облучения. Установлено, что при определенных дозах облучения происходит распад примесных микровключений, последовательность которого зависит от их формы и размера.

Ключевые слова: *кремний, никель, кобальт, диффузионное легирование, примесное микровключение, электронно-зондовый микроанализ, нейтронное облучение, распад микровключений.*

The effects of neutron irradiation on the electrophysical properties of Si <Ni> and Si <Co> samples obtained by diffusion doping have been studied by electric measurement and electron probe microscopy methods. The states of impurity microinclusions of cobalt and nickel before and after irradiation have been studied. It has been established that at certain doses of irradiation decay of impurity microinclusions occurs, the sequence of which depends on their shape and size.

Key words: *silicon, nickel, cobalt, diffusion alloying, impurity microinclusions, electron probe microanalysis, neutron irradiation, decay of microinclusions.*

Наряду с образованием неравновесных радиационных дефектов, облучение способствует приближению неравновесного кристалла к состоянию термодинамического равновесия. В частности, если концентрация атомов примеси выше предела растворимости для данной температуры, то возможно удаление примеси из узлов при облучении с последующим образованием ассоциированных комплексов [1-4]. Этот процесс можно рассматривать как первый этап распада пересыщенного твердого раствора легируюшей примеси в полупроводнике. Обычно, при облучении микровключения или преципитата часть примесных атомов становятся электрически активными и эффективно взаимодействуют с радиационными или структурными дефектами кристалла полупроводника [5,6].

Изучение влияния радиационного облучения на свойства компенсированного полупроводникового кремния обычно преследует следующие цели: определение радиационной стойкости параметров исследуемых материалов, а также механизмов взаимодействия и миграции примесных атомов со структурными и радиационными дефектами кристаллической решетки. Несмотря на многочисленные исследования, посвящённые определению механизмов взаимодействия радиационных дефектов с атомами легирующих примесей, особенно с глубокими уровнями, по данному направлению до сих пор имеются различные точки зрения, которые иногда отрицают друг друга. В связи с этим, нами были проведены исследования влияния облучения реакторными нейтронами на электрофизические свойства кремния, компенсированного никелем и кобальтом.

Изучение состояний примесных микровключений проводили методами электрических измерений и электронно-зондовой микроскопии. Исследования осуществляли на модельных образцах Si<Ni> иSi<Co> до и после нейтронного облучения. Проведенный электронно-микроскопический анализ фазовых превращений микровключений позволил идентифицировать последовательность процессов распада, а также выявить кинетику их протекания.

Для исследования были изготовлены образцы кремния, легированные примесями никеля и кобальта методом диффузии. В качестве исходного материала был использован кремний n- и p-типа, полученный

путем легирования фосфором и бором соответственно. Образцы, с различной степенью компенсации, были получены путем выбора температуры и времени диффузионного отжига. После диффузионного отжига образцы подвергались закалке со скоростью $\upsilon_{охл}$=200 град/с. Образцы помещались в откаченные до ~1,33 Па кварцевые ампулы. С помощью проточной воды температура образцов поддерживалась постоянно и составляла ~343 К. Нейтронное облучение образцов проводилось в реакторе типа ВВР. После каждого этапа облучения исследовались основные электрофизические параметры образцов.

Исследования влияния нейтронного облучения на удельные сопротивления легированных и исходных образцов показали, что они существенно отличаются друг от друга. Результаты измерений удельных сопротивлений исследуемых образцов после нейтронного облучения приведены в таблице 1. Как видно из этой таблицы, изменение значений r исходных образцов от дозы облучения намного значительнее по сравнению с образцами Si<Ni> иSi<Co>.

Таблица 1

Образцы	ρ_0, Ом·см	Доза облучения, н/см^2					
		10^{13}	$6\cdot10^{14}$	$2\cdot10^{15}$	$5\cdot10^{16}$	10^{17}	$5\cdot10^{17}$
n-Si	$1{,}8\cdot10^2$	$4{,}2\cdot10^2$	$5{,}5\cdot10^3$	$3{,}8\cdot10^4$	$8{,}6\cdot10^5$	$1{,}4\cdot10^6$	$1{,}3\cdot10^6$
p-Si	$1{,}2\cdot10^4$	$1{,}3\cdot10^4$	$1{,}4\cdot10^4$	$9{,}6\cdot10^4$	$5{,}4\cdot10^5$	$7{,}2\cdot10^5$	$1{,}5\cdot10^6$
n-Si<Ni>	$5\cdot10^3$	$5{,}2\cdot10^3$	$5{,}5\cdot10^3$	$6{,}1\cdot10^3$	$7{,}8\cdot10^3$	$3{,}5\cdot10^5$	$4{,}2\cdot10^5$
p-Si<Ni>	$2\cdot10^4$	$2{,}1\cdot10^4$	$2{,}3\cdot10^4$	$4{,}5\cdot10^4$	$5{,}7\cdot10^4$	$1{,}4\cdot10^6$	$1{,}6\cdot10^6$
n-Si<Co>	$9\cdot10^3$	$9{,}2\cdot10^3$	$9{,}3\cdot10^3$	$9{,}5\cdot10^3$	$6{,}4\cdot10^5$	$7{,}1\cdot10^5$	$7{,}3\cdot10^5$
p-Si<Co>	$3\cdot10^3$	$3{,}4\cdot10^3$	$3{,}7\cdot10^3$	$4\cdot10^3$	$5{,}2\cdot10^5$	$8{,}3\cdot10^5$	$1{,}2\cdot10^6$

Результаты исследований показали, что при нейтронном облучении исходные образцы n-типа проявляют высокую чувствительность. При дозах облучения нейтронами $\Phi=10^{13}\div5\cdot10^{17}$ н/см^2 значение r этих образцов, независимо от плотности дислокации, увеличивается почти на ~4 порядка (кривая 1, рис. 1). В отличие от них исходные образцы p-типа проявляют более низкую чувствительность к облучению, особенно в интервале дозы облучения $\Phi=10^{13}\div6\cdot10^{14}$ н/см^2. Существенный рост значения r исходных образцов p-типа наблюдается при дозах облучения $\Phi>6\cdot10^{14}$ н/см^2. С увеличением дозы облучения до $\Phi=5\cdot10^{17}$ н/см^2 значение r образцов увеличивается более чем на 2 порядка (кривая 2, рис. 1).

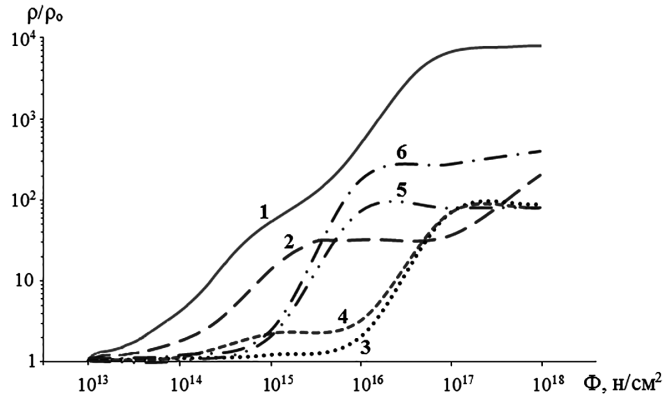

Рис. 1. *Зависимость r_t/r_0 от интегральной дозы облучения в образцах: 1– n-Si,2– p-Si,3– n-Si<Ni>,4– p-Si<Ni>, 5– n-Si<Co>,6– p-Si<Co>.*

В образцах n-Si<Ni>, с $\rho=5\cdot10^3$ Ом×см, характер зависимости относительного изменения r от интегральной дозы облучения значительно отличается от исходных образцов. Значение r в образцах n-Si<Ni> при дозах облучения в интервале $10^{13}\div2\cdot10^{15}$ н/см^2 остается почти неизменным. При дальнейшем увеличении дозы облучения она начинает постепенно увеличиваться и при $\Phi=5\cdot10^{16}$ н/см^{2}ее рост составляет ~60%. Изменение значения ρ/ρ_0 образцов в зависимости от дозы облучения в интервале $\Phi=5\cdot10^{16}\div10^{17}$ н/см^2 имеет особый характер, т.е. в этом промежутке наблюдается резкое увеличение значения удельного сопротивления образцов приблизительно в 45 раз (кривая 3, рис. 1). При дозе облучения $\Phi=5\cdot10^{17}$ н/см^2 она достигает своего максимального значения и будет составлять $4{,}2\cdot10^5$ Ом·см.

В образцах p-Si<Ni> зависимость значения ρ от интегральной дозы облучения в интервале $10^{13}\div5\cdot10^{16}$ н/см^2 является относительно стабильной. При дальнейшем увеличении дозы облучения

до Ф=10^{17} н/см^2 значение ρ образцов резко возрастает и увеличивается почти на 2 порядка (кривая 4, рис. 1). В последующем значении дозы облучения при Ф=$5\cdot10^{17}$н/см^2 существенных изменений в значении ρ образцов не наблюдается.

Результаты исследований зависимости ρ/ρ_0 от интегральной дозы облучения в образцахn-Si<Co>показали, при дозах облучения в интервале $10^{13} \div 2\cdot10^{15}$ н/см^2 наблюдается незначительный рост, который составляет ~5% (кривая 5, рис. 1). В образцах p-Si<Co> при таком же интервале дозы облучения рост в значении r составляет ~33% (кривая 6, рис. 1). При дозах облучения в интервале Ф=$2\cdot10^{15} \div 5\cdot10^{16}$ н/см^2 наблюдается характерный рост для образцов Si<Co> как для n-типа, так и для p-типа. В данном интервале дозы облучения удельное сопротивление образцов увеличивается приблизительно на 2 порядка. Дальнейшее увеличение дозы облучения приводит к незначительному росту удельного сопротивления образцов.

Исследование температурных зависимостей электропроводности σ(T) и постоянной Холла R(T) исходных и компенсированных образцов Si<Ni> в интервале 80 ÷ 300 К после облучения различными дозами (Ф<$2\cdot10^{15}$ н/см^2) показало, что в таких образцах после облучения не наблюдается появления дополнительных энергетических уровней,связанных с радиационными дефектами.Выявленные энергетические уровни E_c-0,4 эВ и E_v+0,22 эВ, соответственно в образцах n-Si<Ni> и p-Si<Ni>, принадлежат к основным уровням атомов никеля в кремнии. Следовательно, выясняется, что под влиянием облучения, за счет распада примесных скоплений,концентрация электроактивных атомов никеля резко увеличивается, вследствие чего наблюдается скачкообразный рост в зависимости ρ/ρ_0 образцов.

Для выяснения причины такого изменения удельного сопротивления образцов Si, легированных Ni и Co, нами проводились комплексные исследования структуры образцов до и после облучения. Структурный анализ образцов p-Si<Co> показал, что до облучения в их объеме существуют примесные микровключения размером до 0,7 мкм (рис. 2. (а)). В начальных стадиях облучения скопления примесных атомов являются стабильными. При значениях дозы облучения Ф>$5\cdot10^{16}$ н/см^2 наблюдаются заметные изменения плотности и формы примесных микровключений, т.е. под влиянием нейтронного облучения в определенных его дозах происходит распад микровключений кобальта. Выявлено, что этот процесс имеет поэтапный характер, т.е. последовательность процессов распада микровключений происходит в зависимости от их размеров и формы. Первоначально распаду подвергаются относительно мелкие микровключения (<0,4 мкм), которые имеют иглообразные, пластинчатые и дискообразные формы. Далее с увеличением дозы облучения происходит распад мелких микровключений с линзообразными и сферическими формами (рис. 2 (б)). Относительно крупные микровключения (>0,5 мкм) со сферической формой являются более устойчивыми к облучению.

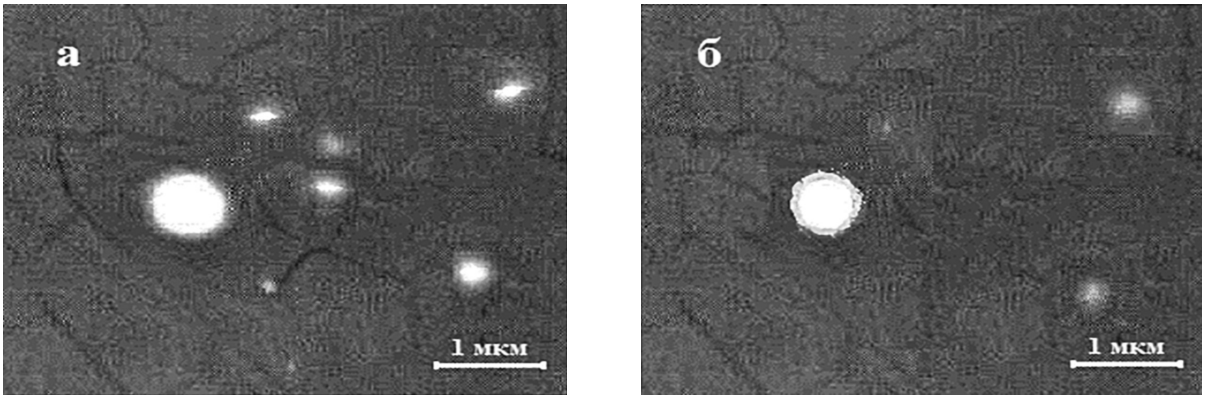

Рис 2. *Микроснимки примесных микровключений кобальта в кремнии до (а) и после (б) влияния нейтронного облучения при Ф=$5\cdot10^{16}$ н/см^2.*

Проведенный структурный анализ образцов n-Si<Ni> показал, что до облучения в их объеме наблюдаются примесные микровключения размером до 2 мкм, которые имеют различные формы. При облучении нейтронами в интервале Ф=$10^{13} \div 5\cdot10^{16}$ н/см^2 плотность микровключений в объеме этих образцов остается почти неизменной. В образцах, подвергнутых облучению в интервале Ф=$5\cdot10^{16} \div 10^{17}$ н/см^2, наблюдается заметное уменьшение плотности мелких микровключений размером до 0,7 мкм, т.е. происходит распад подобных микровключений. В полученных микроснимках структуры образцов до и после облучения наблюдается такая же картина как и в образцах p-Si<Co>.

Аналогичные исследования в образцах Si<Co> показали, что после облучения в таких образцах наблюдается появление дополнительного энергетического уровня E_c-0,57 эВ. Предполагается, что это связано с образованием новых электрически активных комплексов примесных атомов кобальта с радиационными дефектами.

На основе приведенных экспериментальных данных можно предположить, что при облучении в формировании электрических свойств легированных образцов кремния основную роль играет взаимодействие радиационных дефектов и атомов легирующей примеси, находящихся до этого в электрически нейтральных состояниях в составе скоплений или микровключений. В процессе облучения образцов Si<Ni> и Si<Co>при определенных дозах облучения происходит распад примесных скоплений, в результате которого часть атомов примеси переходят в электроактивное состояние и начинают активно взаимодействовать с радиационными дефектами.

Литература:

1. Физические процессы в облученных полупроводниках. / Под ред. Л.С.Смирнова.- Новосибирск, 1997.- 256 с.

2. Зайнабидинов С.З., Рубинова Э.Э. Нейтронно-трансмутационное легирование кремния**.-** Т.: Фан, 1983.- 96 с.

3. Смирнов Л.С., Болотов В.В., Васильев А.В. Роль неравновесности кристаллов полупроводников при радиационных обработках // ФТП, Вып. 13, 1979.-С.1443-1447.

4. Карпов Ю.А., Петров В.В., Просолович В.С. Фотопроводимость и электрические свойства Si/Er/, облученного γ квантами ^{60}Co // ФТП, - 1982. - т. 16. - Вып. 9. - С.1676-1678.

5. Болотов В.В., Камаев Г.Н., Смирнов Л.С. Изменение состояния атомов фосфора в решетке кремния при взаимодействии с радиационными дефектами// ФТП, 36, Вып. 4, 2002.-С. 385-389.

6. Матяш И.Е., Минайлова И.А., Сердега Б.К., Хируненко Л.И. Остаточные напряжения в кремнии и их эволюция при температурной обработке и облучении // ФТП,Вып. 9,2017. с. 1155-1160.

Андижон давлат университети
2018 йил 12 февралда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. И.Каримов)