

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Si, ЛЕГИРОВАННОГО Ni И Co

С.З. Зайнабидинов¹, Н.А. Тургунов², Ш.К. Акбаров¹

¹*Андижанский государственный университет*

²*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана*

Аннотация. В данной работе приведены результаты исследований влияния нейтронного облучения электрофизические свойства образцов кремния, легированных никелем и кобальтом, полученные с помощью методов электронно-зондовой микроскопии и эффекта Холла. Изучены структурные состояния примесных микровключений никеля и кобальта в кремнии до и после облучения. Выявлено, что под влиянием облучения в образцах Si<Co> появляется дополнительный энергетический уровень $E_c-0,57$ эВ. Установлено, что при определенных дозах облучения происходит распад примесных микровключений никеля и кобальта, последовательность которой зависит от их формы и размера.

Ключевые слова: кремний, никель, кобальт, легирование, микровключения, электронно-зондовой микроанализ, облучение, распад.

Ni VA Co BILAN LEGIRLANGAN Si ELEKTROFIZIK XUSUSIYATLARIGA NEYTRON NURLANTIRISHNING TA'SIRI

S.Z. Zainabidinov¹, N.A. Turgunov², Sh.K. Akbarov¹

¹*Andijon davlat universiteti*

²*O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti*

Annotatsiya. Ushbu maqolada elektron-zondli mikroskopiyasi va Xoll effekti usullari yordamida olingan nikel va kobalt bilan legirlangan kremniy namunalarining elektrofizik xususiyatlariga neytron nurlanishining ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan. Nurlanishdan oldin va keyin kremniy tarkibidagi nikel va kobalt kirishma mikrobirikmalarining strukturaviy holatlari o'rganildi. Nurlanish ta'sirida Si<Co> namunalarida $E_c-0,57$ eV qo'shimcha energiya sathi paydo bo'lishi aniqlandi. Nurlanishning ma'lum dozalarida nikel va kobaltning kirishma mikrobirikmalari parchalanishi, ularning ketma-ketligi ularning shakli va hajmiga bog'liqligi aniqlandi.

Kalit so'zlar: kremniy, nikel, kobalt, legirlash, mikrobirikmalar, elektron-zondli mikrotahlil, nurlanish, parchalanish.

INFLUENCE OF NEUTRON IRRADIATION ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF Si DOPED WITH Ni AND Co

S.Z. Zainabidinov¹, N.A. Turgunov², Sh.K. Akbarov¹

¹*Andijan State University*

²*Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the
National University of Uzbekistan*

Annotation. This paper presents the results of studies of the influence of neutron irradiation on the electrical properties of silicon samples doped with nickel and cobalt, obtained using electron probe microscopy and the Hall effect. The structural states of impurity microinclusions of nickel and cobalt in silicon before and after irradiation were studied. It was revealed that under the influence of irradiation an additional energy level of $E_c-0.57$ eV appears in Si<Co> samples. It has been established that at certain doses of radiation, impurity microinclusions of nickel and cobalt decompose, the sequence of which depends on their shape and size.

Key words: silicon, nickel, cobalt, doping, microinclusions, electron probe microanalysis, irradiation, decay.

Введение

Электрофизические свойства монокристаллического кремния, легированного никелем, по сравнению с другими легирующими элементами 3d-переходной группы отличаются тем, что такие материалы являются более стабильным к радиационным воздействиям. Изучение физических процессов, происходящих в объеме монокристаллов кремния, с участием примесных атомов и радиационных дефектов, возникающих под влиянием облучения имеет особое значение. 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 [1-5]. Этот процесс можно рассматривать как первый этап распада пересыщенного раствора легирующей примеси в полупроводнике. Обычно под влиянием

внешних воздействий, в частности под воздействием облучения примесные скопления, которые имеют нано– и микро размеры распадаются, вследствие чего примесные атомы переходят в электрически активные состояния и начинают эффективно взаимодействовать с радиационными или структурными дефектами кристалла полупроводника [6-8].

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, посвящённых определению механизмов взаимодействия радиационных дефектов с атомами легирующих примесей [9,10], 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.

Методика эксперимента

Исследования состояний примесных микровключений проводили методом электронно-зондовой микроскопии. Электрические параметры образцов измерялись с помощью эффекта Холла. Исследования осуществляли на модельных образцах $\text{Si} \langle \text{Ni} \rangle$ и $\text{Si} \langle \text{Co} \rangle$ n- и p-типа до и после нейтронного облучения. Проведенный электронно-микроскопический анализ фазовых превращений микровключений позволил идентифицировать последовательность процессов их распада, а также выявить кинетику данного процесса.

Для исследований были изготовлены образцы кремния, легированные примесями никеля и кобальта методом диффузии. При легировании никелем в качестве исходного материала были использованы кремний марки КЭФ с

удельным сопротивлением $\rho=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а при легировании кобальта использовали кремний марки КЭФ с $\rho=40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Образцы, с различной степенью компенсации, были получены путем выбора температуры и времени диффузионного отжига. После диффузионного отжига образцы подвергались к закалке со скоростью $v_{\text{охл}}=200 \text{ град/с}$. Образцы помещались в кварцевые ампулы, откаченные до $\sim 1,3 \text{ Па}$. С помощью проточной воды, температура образцов поддерживалась постоянной и составляла $\sim 343 \text{ К}$. Нейтронное облучение образцов в интервале $\Phi=10^{13} \div 5 \cdot 10^{17} \text{ н/см}^2$ проводилось в реакторе типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор). После каждого этапа облучения исследовались основные электрофизические параметры образцов.

Результаты и их обсуждения

Результаты исследований по определению влияния нейтронного облучения на удельное сопротивление исходных образцов кремния и образцов кремния, легированных никелем и кобальтом показали, что примесные атомы существенно влияют на процессы радиационного дефектообразования в кремнии. Наблюдаемые изменения значений ρ исходных образцов от дозы облучения сильно отличаются от образцов кремния, легированных никелем и кобальтом.

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

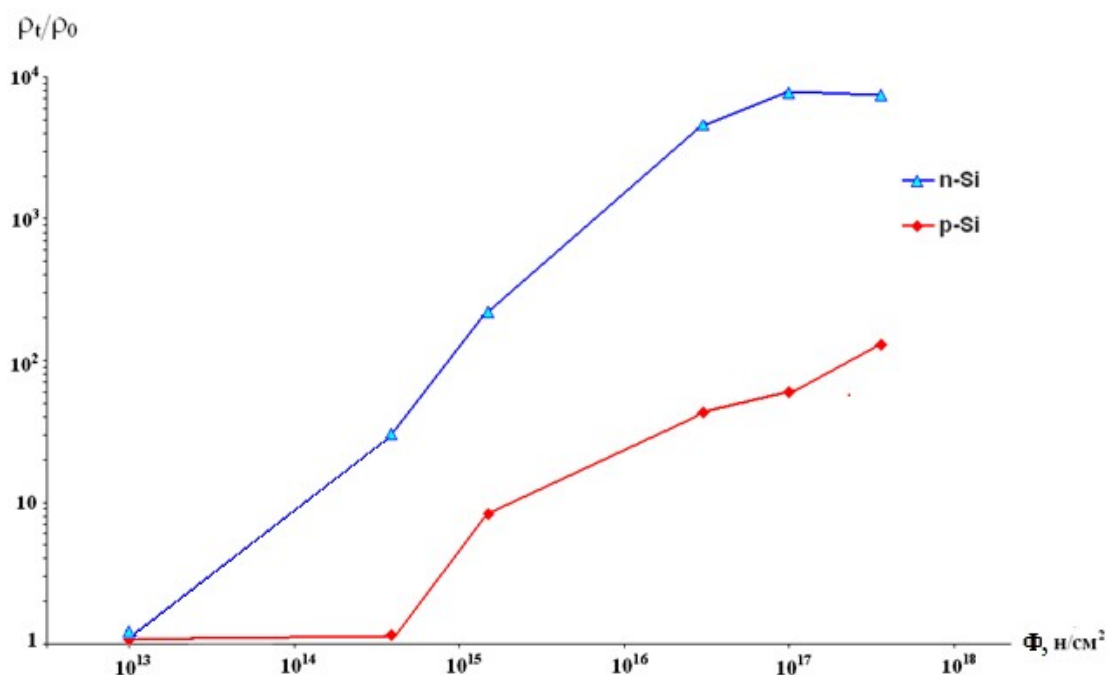


Рис. 1. Зависимость ρ_t/ρ_0 от интегральной дозы облучения в исходных образцах: n-Si и p-Si.

В образцах n-Si<Ni>, с $\rho=5 \cdot 10^3$ Ом·см, характер зависимости относительного изменения ρ от интегральной дозы облучения, значительно отличается от исходных образцов. Значение ρ в образцах n-Si<Ni>, при дозах облучения в интервале $10^{13} \div 2 \cdot 10^{15}$ н/см² остается почти неизменным. При дальнейшем увеличении дозы облучения она начинает постепенно увеличиваться и при $\Phi=5 \cdot 10^{16}$ н/см² ее рост составляет ~60%. Изменение значения ρ/ρ_0 образцов, в зависимости от дозы облучения в интервале $\Phi=5 \cdot 10^{16} \div 10^{17}$ н/см² имеет особый характер, т.е. в этом промежутке наблюдается резкое увеличение значения удельного сопротивления образцов приблизительно в 45 раз (рис. 2). При дозе облучения $\Phi=5 \cdot 10^{17}$ н/см² она достигает своего максимального значения и будет составлять $4,2 \cdot 10^5$ Ом·см.

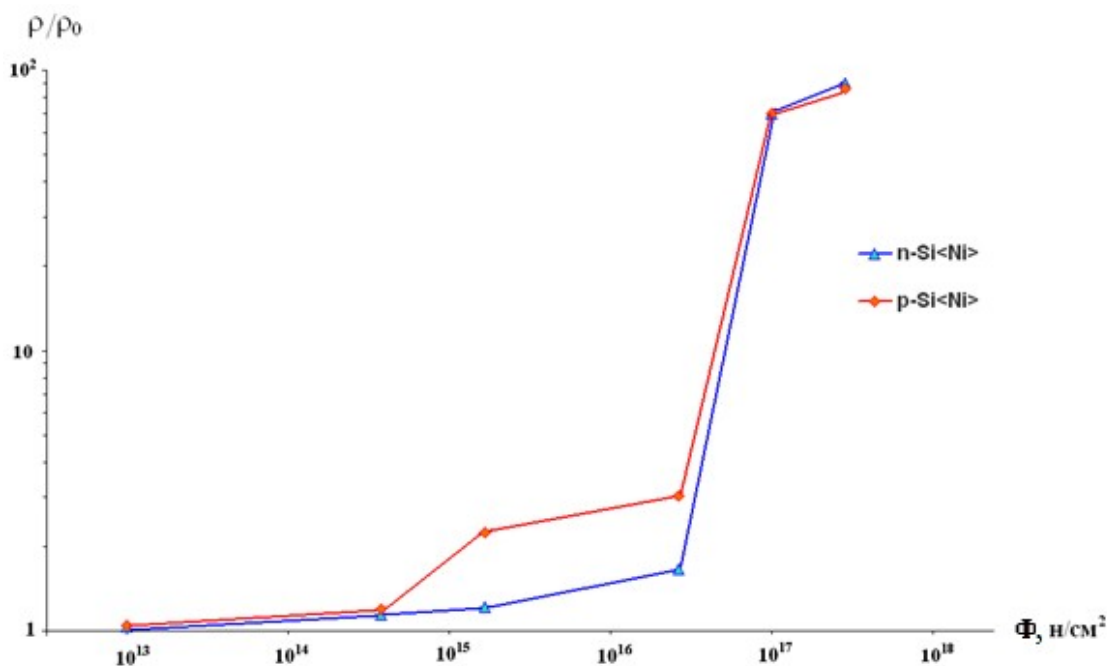


Рис. 2. Зависимость ρ/ρ_0 от интегральной дозы облучения в образцах n-Si<Ni> и p-Si<Ni>.

В образцах p-Si<Ni> зависимость значения ρ от интегральной дозы облучения в интервале $10^{13} \div 5 \cdot 10^{16}$ н/см² является относительно стабильным. При дальнейшем увеличении дозы облучения до $\Phi = 10^{17}$ н/см² значение ρ образцов резко возрастает и увеличивается почти на 2 порядка (рис. 2). В последующем значении дозы облучения при $\Phi = 5 \cdot 10^{17}$ н/см² существенных изменений в значении ρ образцов не наблюдается.

Результаты исследований зависимости ρ/ρ_0 от интегральной дозы облучения в образцах n-Si<Co> показали, при дозах облучения в интервале $10^{13} \div 2 \cdot 10^{15}$ н/см² наблюдается незначительный рост, которое составляет ~5% (рис. 3). В образцах p-Si<Co>, при таком же интервале дозы облучения рост в значении ρ составляет ~33% (рис. 3). При дозах облучения в интервале $\Phi = 2 \cdot 10^{15} \div 5 \cdot 10^{16}$ н/см², 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 (рис. 3). Дальнейшее увеличение дозы облучения приводит к незначительному росту удельного сопротивления образцов.

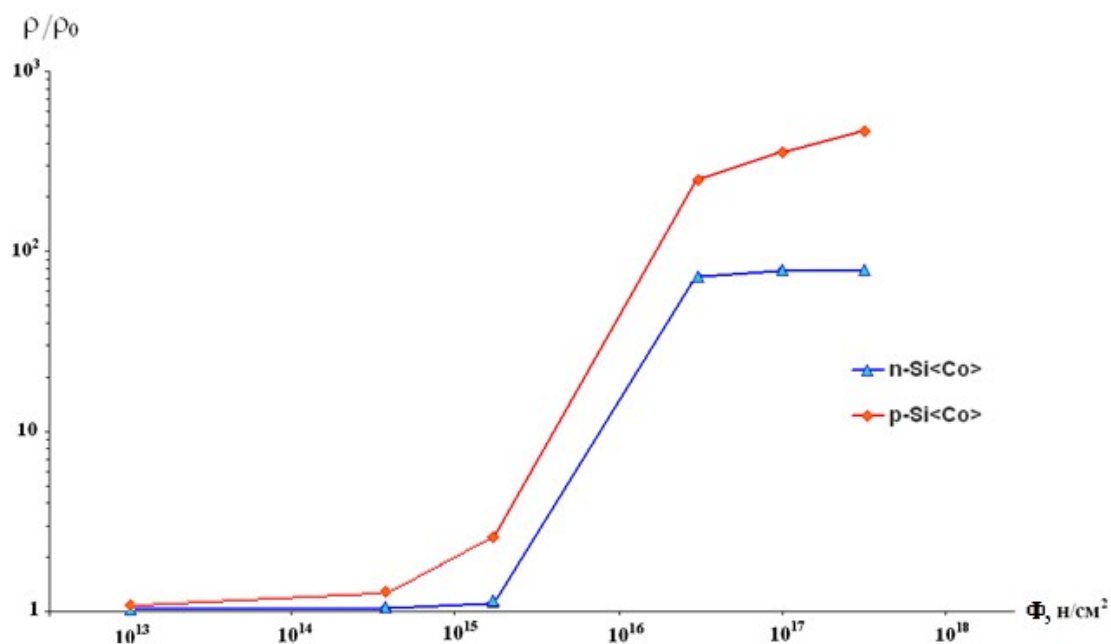


Рис. 3. Зависимость ρ/ρ_0 от интегральной дозы облучения в образцах n-Si<Co> и p-Si<Co>.

Для выяснения причины такого изменения удельных сопротивлений образцов Si, легированных Ni и Co, нами проводились комплексные исследования структуры образцов до и после облучения. Полученные структурные анализы образцов n-Si<Ni> показали, что до облучения в их объеме существуют примесные микровключения размерами до 2 мкм, которые имеют различные формы (рис. 4 (а)). При облучении нейтронами в интервале $\Phi=10^{13} \div 5 \cdot 10^{16}$ н/см² плотность микровключений в объеме этих образцов остается почти неизменным. В образцах, подвергнутых к облучению в интервале $\Phi=5 \cdot 10^{16} \div 10^{17}$ н/см², наблюдается заметное уменьшение плотности мелких микровключений, размером до 0,7 мкм, т.е. происходит распад подобных микровключений. При дозе облучения $\Phi=10^{17}$ н/см², мелкие микровключения полностью исчезают и наблюдаются расщепление поверхностных силицидных слоев более крупных микровключений (рис. 4 (b)).

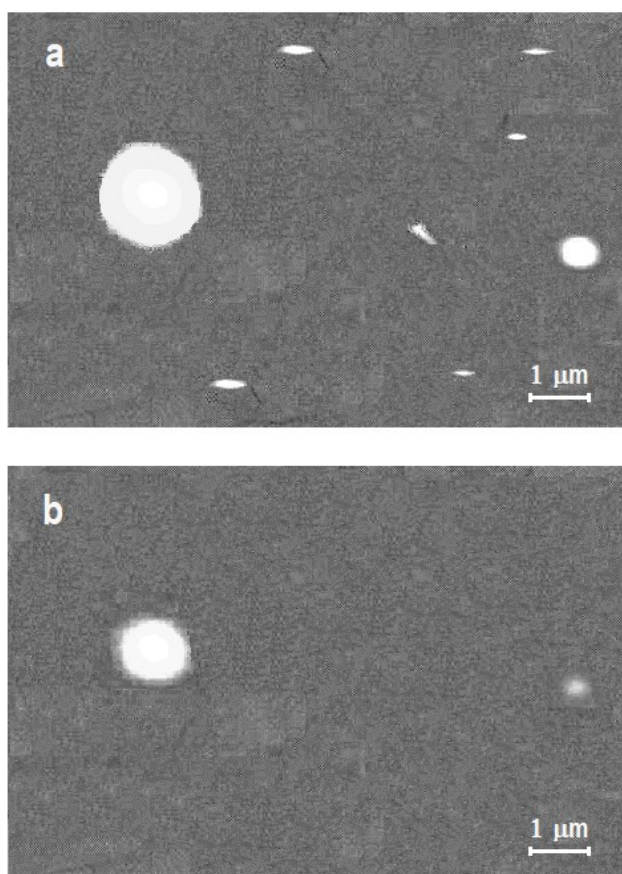


Рис 4. Микроснимки примесных микровключений никеля в кремнии до (a) и после (b) влияния нейтронного облучения при $\Phi=10^{17}$ н/см².

Проведенные структурные анализы с образцами p-Si<Co> показали, что до облучения в их объеме наблюдаются примесные микровключения с размерами до 0,7 мкм (рис. 5 (a)). В начальных стадиях облучения скопления примесных атомов являются стабильными. При значениях дозы облучений $\Phi > 5 \cdot 10^{16}$ н/см² наблюдается заметные изменения плотности и формы примесных микровключений, т.е. под влиянием нейтронного облучения, в определенных ее 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 к 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. 5 (b)). Относительно

крупные микровключения ($>0,5$ мкм) со сферической формой являются более устойчивыми к облучению.

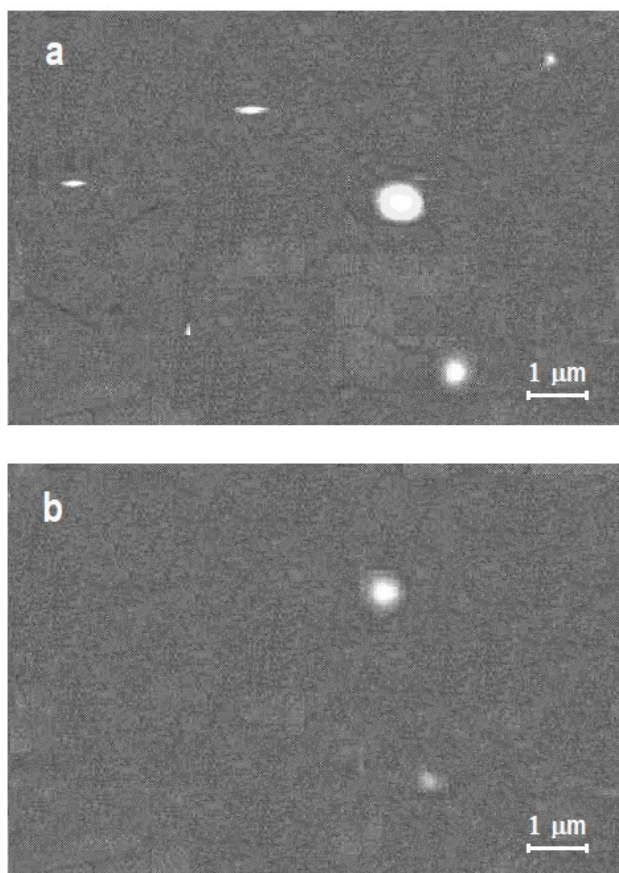


Рис 5. Микроснимки примесных микровключений кобальта в кремнии до (а) и после (б) влияния нейтронного облучения при $\Phi = 5 \cdot 10^{16}$ н/см².

Исследование температурных зависимостей электропроводности $\sigma(T)$ и постоянной Холла $R(T)$ исходных и компенсированных образцов $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$, в интервале 80 ÷ 300 К, после облучения различными дозами ($\Phi < 2 \cdot 10^{15}$ н/см²) показали, что в таких образцах после облучения, появление дополнительных энергетических уровней, связанные с радиационными дефектами не наблюдаются. Выявленные энергетические уровни $E_c - 0,4$ эВ и $E_v + 0,22$ эВ, соответственно в образцах $\text{n-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ и $\text{p-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, 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, в последствии которого наблюдается скачкообразный рост в зависимости ρ/ρ_0 образцов.

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 появление данного уровня связано с образованием новых электрически активных комплексов примесных атомов кобальта с радиационными дефектами.

Заключение

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных выявлено, что при облучении в изменении электрических свойств образцов кремния, легированных никелем и кобальтом основную роль играют взаимодействия радиационных дефектов с атомами легирующих примесей, находящихся до этого в электрически нейтральных состояниях, в виде скоплений или микровключений. В процессе облучения образцов Si<Ni> и Si<Co>, при определенных дозах облучения происходит распад примесных скоплений, в результате которого атомы примесей переходят в электроактивные состояния и начинают активно взаимодействовать с радиационными дефектами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Варенцов М.Д., Гайдар Г.П., Долголенко А.П., Литовченко П.Г. Влияние облучения и отжига на термическую стабильность радиационных дефектов в кремнии // Журн: Вопросы атомной науки и техники. Сер: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2010. №5. С. 27-35.
2. Абасов Ф.П., Наджафов Б.А. Влияние гамма-облучения на электрофизические и фотоэлектрические параметры двухбарьерной структуры на основе кремния // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 10-3. – С. 454-456;
3. Щербачев К.Д., Бублик В.Т., Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Особенности образования радиационных дефектов в слое кремния структур “кремний на изоляторе” // ФТП. 2011. том 45. вып. 6. С. 754-758.

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. А.П. Долголенко, М.Д. Варенцов, Г.П. Гайдар, П.Г. Литовченко. Термический отжиг кластеров и точечных дефектов в n-Si (Cz), облученном быстрыми нейтронами реактора // Ядерная физика и атомная энергетика. 2008. № 2 (24), с. 73–80.

6. 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.

7. 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.

8. Саакян В.А., Ерицян Г.Н. Влияние облучения на электрофизические свойства монокристаллов кремния. Радиационная компенсация проводимости // Известия НАН Армении, Физика, 2006. т. 41, №2, с.140-147.

9. Зайнабидинов С.З., Курбанов А.О. Влияние γ -радиации на рекомбинационные и фотоэлектрические свойства кремния, легированного никелем // Uzbek Journal of Physics. 2018. Vol.20(№2). PP.105-111.

10. Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Коваленко А.И., Коваленко М.С., Колоколов Ф.А., Лунин Л.С. Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами при температуре 83 К, на характеристики кремниевых фотоэлектрических структур // ФТП. 2020. том 54. Вып. 2. С. 144–148.