Uzbek Journal of Physics
Vol.20(№3) 2018 PP.153-157

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ

С.З. Зайнабидинов[1], Н.А. Тургунов[2]

[1]Андижанский государственный университет, Андижан, Узбекистан
[2]Академия МВД РУз, Ташкент, Узбекистан
(Получена 28.03.2018)

Никель билан легирланган кремний монокристаллининг электр ўтказувчанлигига термик ишловнинг таъсири ўрганилди. Шунингдек, термик ишлов таъсири остида кириндили микрокиришмаларнинг морфологик тузилиши электрон-зондли микроанализ усулида таҳлил қилинди.

Исследовано влияние термической обработки на электропроводность монокристаллов кремния, легированного никелем. Также, методом электронно-зондового микроанализа проведен анализ морфологии примесных микровключений под влиянием термической обработки.

The influence of a thermal annealing on electric conduction of silicon monocrystals doped by nickel has been studied. Also, an analysis of the morphology of impurity microinclusions under the influence of heat treatment was carried out by the method of electron probe microanalysis.

Как известно [1-4], примесные скопления существенно влияют на электрофизические свойства монокристаллов кремния. Особое внимание привлекает поведение примесных скоплений под влиянием внешних воздействий. Изучение природы микровключений атомов переходных металлов, находящихся в объеме монокристаллов кремния, при термической обработке (ТО) представляет большой интерес с точки зрения управления электрофизическими свойствами монокристаллов кремния. В работах [5, 6] исследованы процессы самоорганизации микрочастиц примесных атомов никеля в кремнии при определенных термодинамических условиях диффузионного легирования. Установлено, что концентрация и распределение примесных микрочастиц в основном определяется температурой и временем диффузии. Контролируя температуру отжига, можно изменять размеры образующихся микрочастиц в широком диапазоне d = 0.2–5 мкм и их распределение по объему. Обнаружено, что под влиянием термоотжига при T=700°C наблюдается упорядочивание примесных микрочастиц.

В работе [7] исследовано влияние термоотжига на электропроводность монокристаллов кремния, легированного кобальтом, при температурах 373–1273 К в интервале времени 5–60 мин. Методом электронно-зондового микроанализа проведен анализ последовательности распада примесных микровключений под влиянием термоотжига. На основании полученных экспериментальных результатов выделены две стадии в кинетике изменения электрических свойств кремния с примесными микровключениями. На первой стадии ТО атомы примеси, находящиеся в узлах решетки, переходят в междоузлия. На второй стадии происходит распад примесных микровключений, вследствие чего выделяющиеся

атомы примеси переходят в свободные узлы решетки, т.е. в электроактивное состояние, которое приводит к резкому снижению значения удельного сопротивления.

В данной работе исследовано влияние ТО на электропроводность кремния, легированного никелем, а также изменения морфологии примесных микровключений под воздействием ТО.

Исследования проводили на модельных образцах Si<Ni> *n*- и *p*-типа. Образцы были получены на основе исходного монокристаллического кремния электронной проводимости марки КЭФ с удельным сопротивлением ρ=10 Ом·см. Диффузия никеля в кремний осуществлялась при *T*=1523 К. Температуру в печи измеряли с помощью термопары платина-платина-родий. Для получения образцов *n*-Si<Ni> диффузию проводили в течение 1 часа. Образцы *p*-Si<Ni> были получены путем диффузионного отжига продолжительностью 2 часа. После диффузионного отжига образцы Si<Ni> как *n*-, так и *p*-типа охлаждали со скоростью $\upsilon_{охл}$=1 град/с. Размеры всех образцов составляли 8×4×2 мм в форме параллелепипеда. Образцы подвергали изотермической обработке при температурах 573–1173 К в течение 5–120 минут с последующей резкой закалкой. После каждого этапа отжига исследовали электрические свойства образцов. В целях выяснения влияния термообработки на морфологию примесных микровключений структурные состояния микровключений исследовали до и после воздействия ТО. Структурный анализ примесных микровключений проводили с помощью электронно-зондового микроанализатора Superprobe JXA-8800R.

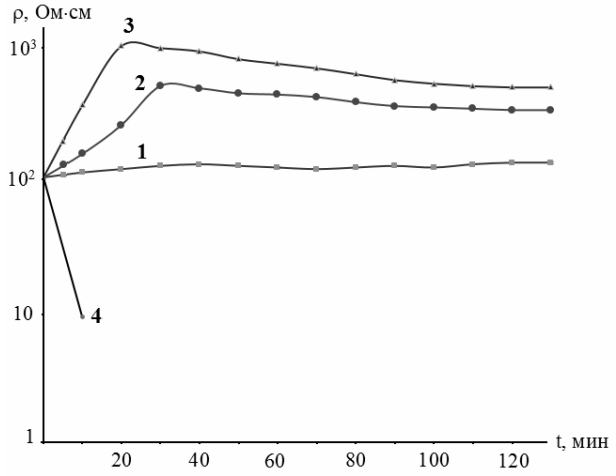


Рис. 1. Зависимости значения ρ от времени отжига в образцах *n*-Si<Ni> при ТО: *1* – 673 К; *2* – 873 К; *3* – 1073 К; *4* – 1173 К.

Результаты исследований зависимости удельного сопротивления ρ от времени отжига в образцах *n*-Si<Ni> с $\rho_0 = 10^2$ Ом·см показали, что в процессе ТО при температуре 673 К в интервале времени 5–120 минут существенных изменений не происходит (кривая *1*, рис. 1). Термообработка образцов при *T*=873 К в течение 30 минут приводит к увеличению значения ρ почти в 6 раз (кривая *2*, рис. 1). При дальнейшем увеличении времени отжига до 120 минут ρ уменьшается на ~15%.

При последующей ТО при T=1073 К в интервале времени 20–25 минут в образцах n-Si<Ni> наблюдается более существенное увеличение значения ρ примерно на один порядок (кривая *3*, рис. 1). С увеличением времени отжига кривые проходят через максимум, затем происходит уменьшение значения ρ образцов на ~10%. В зависимостях удельного сопротивления от времени отжига в образцах n-Si<Ni> наблюдается определенный характер, согласно которому с ростом температуры ТО расхождение в значениях ρ и ρ_0 увеличивается.

На начальной стадии ТО при T=1173 К в течение 8–10 минут наблюдается резкое уменьшение ρ до значения для исходного образца (кривая *4*, рис. 1). Такой характер зависимостей ρ от времени ТО в образцах n-Si<Ni> объясняется тем, что в процессе термоотжига при T≥873 К примесные атомы никеля, находящиеся в узлах решетки, переходят в междоузлия, оставляя вакансии. С увеличением температуры и времени ТО подобный переход атомов примеси увеличивается, в результате которого происходит рост значения удельного сопротивления образцов. В последующем при температуре ТО T=1173 К в течение ~10 минут происходит распад примесных микровключений, вследствие чего выделяющиеся атомы примеси переходят в свободные узлы решетки, т.е. в электрически активное состояние, которое приводит к резкому уменьшению значения ρ образцов.

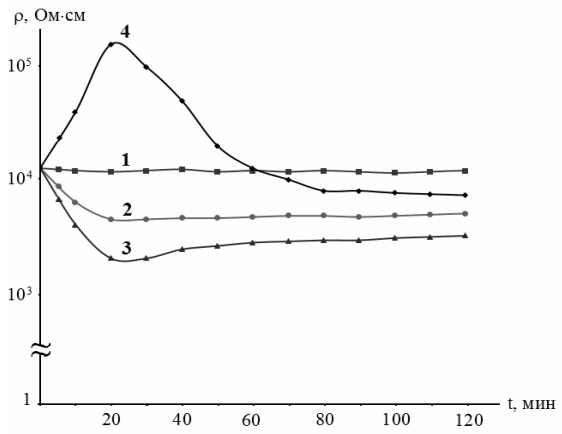


Рис. 2. Зависимости значения ρ от времени отжига в образцах p-Si<Ni> при ТО: *1* – 673 К; *2* – 873 К; *3* – 1073 К; *4* – 1173 К.

Результаты аналогичных исследований зависимости ρ от времени отжига в образцах p-Si<Ni> с $\rho_0=1.8\times10^4$ Ом·см показали, что в ТО при температуре T=673 К в интервале времени 5–120 мин к существенным изменения не приводит (кривая 1, рис. 2). Заметное снижение значений ρ наблюдается в процессе ТО при T=873 в течение 20 минут, ~40% (кривая *2*, рис. 2). Дальнейшее увеличение времени ТО к заметным изменениям в значении ρ не приводит. При ТО при температуре 1073 К в интервале времени 10–20 минут в образцах p-Si<Ni> наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления до $\rho=3\times10^3$ Ом·см (кривая *3*, рис. 2). С увеличением времени отжига до 30 минут кривая проходит через минимум, затем наблюдается рост значения ρ образцов на ~20%. В образцах p-Si<Ni> зависимость ρ от времени отжига также имеет определенный характер, согласно которому

с ростом температуры ТО минимум наступает раньше и скорость роста кривых увеличивается.

В процессе ТО при T=1173 К в течение 15 минут наблюдается резкое увеличение значения ρ образцов p-Si<Ni> приблизительно в 12 раз, и в последующие 5 минут оно достигает максимума, после которого наблюдается резкое уменьшение значения ρ (кривая *4*, рис. 2). В дальнейшем при увеличении времени ТО сопротивление продолжает уменьшаться и при t=80 минут достигает минимального значения $\rho=8.5\times10^3$ Ом·см. Наблюдаемое уменьшение в зависимостях ρ от времени ТО при $T\geq873$ К в образцах p-Si<Ni> объясняется увеличением концентрации электроактивных примесных атомов никеля в узлах кристаллической решетки, которые до этого находились в электрически нейтральном состоянии в виде комплексов NiSi и $NiSi_2$ [8]. Резкое увеличение значения ρ образцов p-Si<Ni> в процессе ТО при T=1173 К в течение 20 минут происходит за счет распада примесных микровключений никеля в кремнии. Предполагается, что уменьшение значения ρ при дальнейшем увеличении времени ТО происходит за счет образования новых электрически активных примесных центров.

Для выяснения природы подобного изменения электропроводности образцов Si<Ni> n- и p-типа под влиянием ТО были проведены микроструктурные анализы примесных микровключений с помощью электронно-зондового микроанализатора до и после ТО. Результаты структурных исследований образцов n-Si<Ni> показали, что в их объеме образуются микровключения размерами до ~6 мкм, а в образцах p-Si<Ni> наблюдаются микровключения с максимальными размерами ~2–3 мкм. Выявлено, что эти микровключения имеют различную морфологию. На рис. 3 представлены изображения примесных микровключений в образцах p-Si<Ni> до и после ТО при T=1173 К в режиме вторичных электронов. Как видно из рис. 3, примесные микровключения с относительно мелкими размерами (до 1 мкм), имеющие иглообразную, дискообразную и линзообразную формы, под воздействием ТО распадаются. Более крупные микровключения подвергаются частичному распаду, т.е. после воздействия ТО наблюдается расщепление поверхностных слоев подобных микровключений.

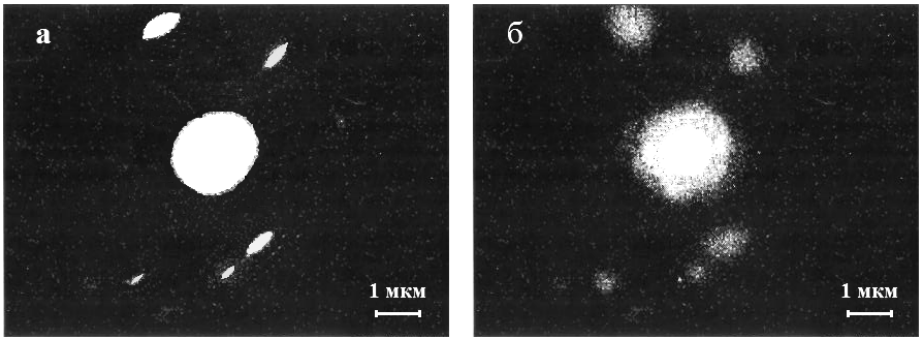


Рис. 3. Примесные микровключения никеля в образцах p-Si<Ni> до (*а*) и после (*б*) ТО при T=1173 К.

Таким образом, полученные результаты показывают, что под воздействием ТО при T<873 К электрические свойства образцов Si<Ni> n- и p-типа остаются без

существенных изменений. ТО образцов *n*-Si<Ni> при температурах 873–1073 К в течение 5–30 минут приводит к увеличению значения ρ, которое объясняется переходом примесных атомов никеля из узлов решетки в междоузлия, оставляя вакансии. С ростом температуры ТО подобный переход атомов примеси увеличивается, в результате которого происходит рост значения удельного сопротивления образцов. В образцах *p*-Si<Ni> ТО при температурах 873–1073 К в течение 5–20 минут приводит к уменьшению значения ρ, которое обусловлено увеличением концентрации электроактивных примесных атомов никеля за счет перехода из электрически нейтральных состояний в виде комплексов NiSi и $NiSi_2$. ТО при *T*=1173 К для образцов *n*-Si<Ni> в течение 8–10 минут, а для образцов *p*-Si<Ni> в течение 20 минут приводит к распаду примесных микровключений, что подтверждается результатами электронно-зондовых микроанализов.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.В. Булярский, В.И. Фистуль. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках (Москва, Наука, 1997).
2. Q.Y. Hao et al., Advanced Materials Research **415-417**, 1323 (2012).
3. В.И. Фистуль. Распад пересыщенных полупроводниковых твердых растворов (Москва, Металлургия, 1977).
4. Л.Ф. Макаренко, Ф.П. Коршунов, С.Б. Ластовский, Л.И. Мурин, М.Молл, И. Пинтилие, ФТП **48**, №11, 1492 (2014).
5. М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, Б.А. Абдурахмонов, П.Ю. Кривенко, Р.Л. Холмухамедов, Неорганические материалы **47**, №9, 1062 (2011).
6. B.A. Abdurakhmanov, M.K. Bakhadirkhanov, K.S. Ayupov, H.M. Iliyev, E.B. Saitov, A. Mavlyanov, H.U. Kamalov, Nanoscience and Nanotechnology **4**(2)Ю, 23 (2014).
7. Н.А. Тургунов, Узбек. физич. журн. **l5**, №5-6, 289 (2013).
8. O. Nakatsuka, M. Hasegawa, K. Kato, N. Taoka, Sh. Zaima, Japanese Journal of Applied Physics **53**, 5S2, 05GA12 (2014).