

Влияние термической обработки кремния, легированного никелем, на его электрические свойства

Н. А. Тургунов, Э. Х. Беркинов, Д. Х. Мамажонов

В работе рассмотрено влияние термической обработки, при температурах $T = 573\text{--}1073\text{ К}$, на электрические свойства монокристаллов кремния, содержащих микровключения примесных атомов никеля. Изучено влияние термической обработки на удельное сопротивление монокристаллов кремния, легированного никелем. С помощью электронно-зондового микроанализа получены изображения примесных микровключений никеля до и после воздействия термической обработки.

Ключевые слова: монокристаллический кремний, никель, диффузия, термический отжиг, скорость охлаждения, микровключения никеля, электронно-зондовый микроанализ.

Ссылка: Тургунов Н. А., Беркинов Э. Х., Мамажонов Д. Х. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 40.
Reference: N. A. Turgunov, E. H. Berkinov, and D. X. Mamazhonova, Appl. Phys., No. 3, 40 (2020).

Введение

Исследования механизмов образования скоплений примесных атомов при диффузионном легировании полупроводников, а также кинетики их распада под влиянием внешних воздействий, представляют особый интерес с точки зрения управления электрофизическими свойствами полупроводниковых материалов. Авторами работ [1–5] было выявлено, что микровключения примесных атомов, образующиеся в объеме монокристаллов кремния в зависимости от параметров и условий диффузии, имеют различные морфологические

строения. В работах [6, 7] исследованы процессы самоорганизации микрочастиц примесных атомов никеля в кремнии при определенных термодинамических условиях диффузионного легирования. Выявлено, что концентрация и распределение примесных микрочастиц, в основном, определяется температурой и временем диффузии. Установлено, что контролируя температуру отжига, можно изменять размеры образующихся микрочастиц в широком диапазоне $d = (0,2\div 5)\times 10^{-6}$ м и их распределение по объему. Обнаружено, что под влиянием термоотжига при $T = 700\text{ °C}$ наблюдается упорядочивание примесных микрочастиц.

С помощью экспериментальных исследований авторами работ [8, 9] выявлено, что в объемах примесных дефектов в Si наблюдаются разнообразные соединения атомов примесей, как Fe, Al, Cu, Cr и других, которые имеют высокие коэффициенты диффузии. Анализы результатов термообработок в диапазоне температур $400\text{--}1150\text{ °C}$ показали, что в процессе образования скоплений основную роль играют примесные атомы междоузельного состояния.

В ранее проведенных нами исследованиях [10] было изучено влияние термоотжига на электропроводность монокристаллов крем-

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович¹, ученый секретарь, д.ф.-м.н.

Беркинов Элмурод Хошимжонович¹, докторант.

Мамажонova Дилнозахон Хаётулло кизи², студент.

¹ Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана.

Республика Узбекистан, 100057, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20.

E-mail: tna_1975@mail.ru

² Национальный университет Узбекистана.

Республика Узбекистан, 100174, г. Ташкент, ул. Университетская, 4.

Статья поступила в редакцию 01 июня 2020 г.

ния, легированного кобальтом, при температурах 373–1273 К, в интервале времени 5–60 минут. На основе полученных экспериментальных результатов выявлены последовательности распада примесных микровключений под влиянием термоотжига.

В связи с этим, в настоящей работе исследовано влияние термической обработки (ТО) на удельное сопротивление монокристаллов кремния, легированного никелем, а также изменения морфологий примесных микровключений под воздействием ТО.

Методика эксперимента

Для проведения исследований были подготовлены модельные образцы n -Si<Ni> и p -Si<Ni>. Для получения образцов n -Si<Ni> был применен исходный монокристаллический кремний марки КЭФ, с удельным сопротивлением 5 (Ом см). Диффузия никеля в кремнии проводилась при $T = 1523$ К в течение $t = 4$ часа. Температуру в печи измеряли с помощью термо-ЭДС термопары платина-платинародий. Образцы p -Si<Ni> были получены на основе исходного материала марки КЭФ, с удельным сопротивлением $\rho = 20$ (Ом см). Диффузионный отжиг проводился при $T = 1523$ К в течение $t = 2$ часа. Скорость охлаждения образцов после диффузионного отжига, как для образцов n -типа, так и для p -типа составлял $v_{\text{охл}} = 1$ К/с. Образцы были подготовлены в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $8 \times 4 \times 2$ мм. Образцы подвергались изотермической обработке при температурах $T = 573$ – 1073 К в интервале времени 10–100 минут. Удельные сопротивления образцов измерялись после каждого этапа отжига. С помощью электронно-зондового микроанализатора Superprobe JXA-8800R были проведены структурные анализы каждого образца. Для определения степени воздействия ТО на морфологические параметры примесных микровключений, анализы их состояния проводились до и после проведения ТО.

Результаты и обсуждение

Результаты структурных исследований образцов n -Si<Ni>, после диффузионного отжига показали, что в их объеме образуются

примесные микровключения размерами до ~ 6 мкм (рис. 1). Эти микровключения имеют различные геометрические формы и структурные строения. В отличие от них в объеме образцов p -Si<Ni> формируются относительно небольшие микровключения, которые также различаются своими формами и структурными строениями, а их размеры достигают ~ 2 – 3 мкм. Проведенные структурные анализы примесных микровключений никеля различных размеров и форм показали, что они имеют различные морфологические строения.



Рис. 1. Снимок примесных микровключений никеля в образцах n -Si<Ni>, с $v_{\text{охл}} = 1$ град/с.

На рис. 2, а приведены результаты исследований зависимости значения удельного сопротивления ρ образцов n -Si<Ni>, с $\rho_0 = 5 \times 10^3$ (Ом см), от времени отжига. Как видно, под влиянием ТО, при температуре 573 К, в интервале времени 10–100 минут, существенных изменений в значении ρ образцов не наблюдается (кривая 1). Кривая данной зависимости при температуре 673 К, в течение 40 минут показывает небольшой рост значения ρ образцов, которая составляет ~ 20 % (кривая 2). Дальнейшее увеличение времени отжига приводит к уменьшению значения ρ и при $t = 100$ минут она снизится до ~ 5 %. Под воздействием ТО при $T = 773$ К, в течение 30 минут наблюдается значительный рост значения ρ образцов, которая достигает до 60 % (кривая 3). При дальнейших значениях времени отжига значения ρ уменьшается до 7×10^3 (Ом см). Термообработка образцов при $T = 873$ К в течение 30 минут приводит к существенному увеличению значения ρ примерно в 4 раза (кривая 4), а дальнейшее увеличение времени отжига до 100 минут приво-

дит к снижению этого значения до $\sim 20\%$. В начальных стадиях ТО при $T = 973$ К, в течение 20 минут наблюдается резкое увеличение значения ρ образцов примерно в 8 раз (кривая 5). При дальнейших значениях времени отжига она заметно уменьшается и в течение $t = 100$ минут достигает 10^4 (Ом см).

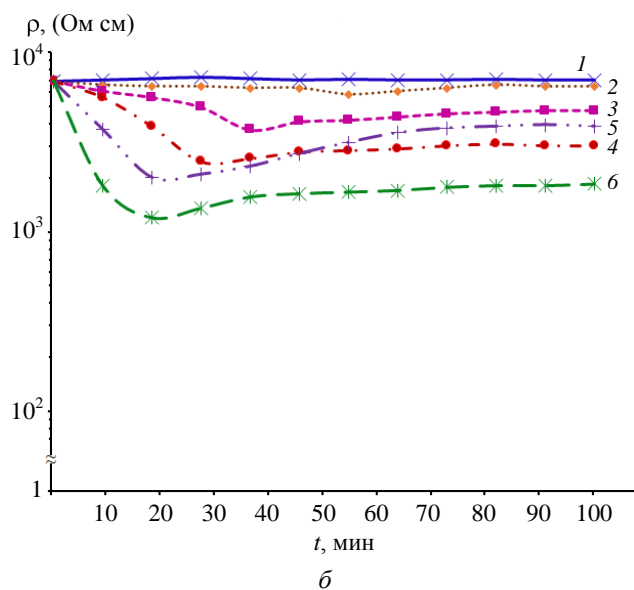
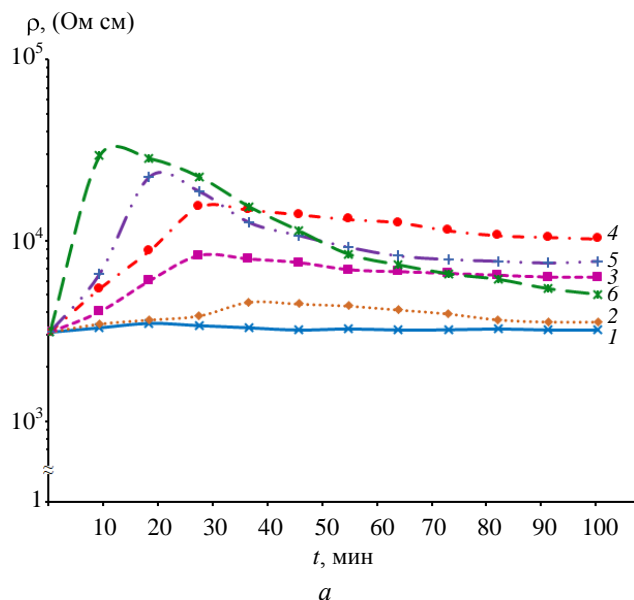


Рис. 2. Зависимости значения удельного сопротивления от времени отжига в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ (а) и $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ (б) при температурах: 1 – 573 К; 2 – 673 К; 3 – 773 К; 4 – 873 К; 5 – 973 К; 6 – 1073 К.

Под воздействием ТО при $T = 1073$ К в течение начальных 10 минут, в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ наблюдается еще более значительный рост значения ρ , приблизительно на один порядок (кривая 6 на рис. 2, а). С увеличением

времени отжига кривая проходит через максимум, после которого наблюдается значительное уменьшение значения ρ образцов, и при $t = 100$ минут она достигает $7,2 \times 10^3$ (Ом см). Как выяснилось, графики зависимости удельного сопротивления от времени отжига для образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ имеют характерную особенность, согласно которой с увеличением значения температуры ТО наблюдаемое расхождение в значениях ρ и ρ_0 возрастает.

Такой характер зависимости удельного сопротивления ρ образцов от времени отжига в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ объясняется тем, что при повышении температуры ТО в начальных стадиях отжига увеличивается концентрация электрически активных примесных атомов никеля, которая связана с переходом атомов примеси в узлы кристаллической решетки. При дальнейшем увеличении времени отжига она достигает своего состояния насыщения и далее постепенно усиливается процесс перехода атомов никеля из узлов в междоузельные состояния, что приводит к незначительному уменьшению значения ρ образцов.

Результаты аналогичных исследований зависимости значения ρ образцов $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, с $\rho_0 = 8 \times 10^3$ (Ом см) от времени отжига приведены на рис. 2, б. Выявлено, что под воздействием ТО при температуре $T = 573$ К, в исследуемом интервале времени существенных изменений в значении ρ не наблюдается (кривая 1). ТО при $T = 673$ К, в течение 50 минут приводит к небольшому уменьшению значения ρ образцов, которое составляет $\sim 10\%$ (кривая 2). Дальнейшее увеличение времени отжига приводит к небольшому росту значения ρ и при $t = 100$ минут она достигает $\sim 5\%$. Под влиянием ТО при $T = 773$ К, в течение начальных 40 минут наблюдается снижение значения ρ до 1,5 раза, а далее она начинает увеличиваться до 6×10^3 (Ом см) (кривая 3). Существенное снижение значения ρ образцов происходит под влиянием ТО при $T = 873$ К, в течение 30 минут и она составляет приблизительно в 2,5 раза (кривая 4). Дальнейшее увеличение времени ТО приводит к росту значения ρ до 10 %.

Как выяснилось ТО при $T = 973$ К, в течение 20 минут приводит к значительному уменьшению значения ρ образцов, которое

достигает до 3 раз (кривая 5). А при дальнейшем увеличении времени отжига она начинает увеличиваться и при $t = 100$ минут она достигает 7×10^3 (Ом см). В последующем значении ТО при $T = 1023$ К, в интервале времени 10–15 минут, в образцах p -Si<Ni> наблюдается резкое уменьшение значения удельного сопротивления до $\rho = 1,4 \times 10^3$ (Ом см) (кривая 6). С увеличением времени отжига до 20 минут кривая проходит через минимум, после которой наблюдается рост значения ρ образцов на ~20 %. В образцах p -Si<Ni> зависимости ρ от времени отжига также имеется определенный характер, согласно которому с ростом температуры ТО минимум наступает раньше и скорость роста кривых увеличивается.

Наблюдаемое уменьшение в зависимостях ρ от времени отжига в образцах p -Si<Ni> на начальных стадиях ТО связано с увеличением концентрации примесных атомов никеля в узлах кристаллической решетки, которые до этого находятся в электрически нейтральных состояниях в виде различных комплексов, нановключений или микровключений [11, 12]. Наблюдаемое умеренное увеличение значения ρ образцов p -Si<Ni> при дальнейших значениях времени отжига происходит за счет ухода атомов примеси из узлов кристаллической решетки в междоузельные состояния.

Для выяснения природы подобного изменения электропроводности образцов Si<Ni> n - и p -типа, под влиянием ТО были проведены микроструктурные анализы примесных нановключений и микровключений с помощью электронно-зондового микроанализатора до и после воздействия ТО. Как выяснилось, под влиянием ТО при $T > 773$ К количество мелких примесных микровключений, размерами до 0,5 мкм, по объему образцов n -Si<Ni> как n -типа, так и p -типа уменьшается. На снимках (рис. 3) видно, что количество примесных микровключений в объеме образцов n -Si<Ni>, которые имеют иглообразные, линзообразные или дискообразные формы, после воздействия ТО при $T = 1073$ К резко уменьшается. А микровключения, имеющие сферическую форму размерами более 10^{-6} м, сохраняют свою морфологию, т. е. они не подвергаются к распаду.

На рис. 4 представлены изображения примесных микровключений в образцах p -Si<Ni>, до и после воздействия ТО при $T = 1073$ К, полученные в режиме вторичных электронов. Как видно из рисунка примесные микровключения с относительно мелкими размерами (до 0,5 мкм), имеющие иглообразные и линзообразные формы, под воздействием ТО полностью распадаются. Относительно крупные микровключения являются более устойчивыми к внешним воздействиям.

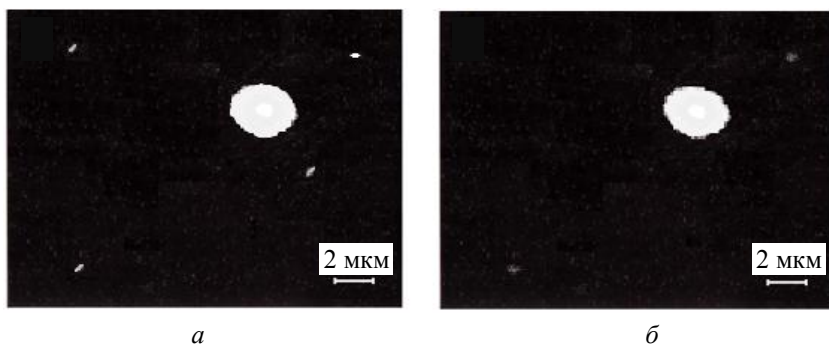


Рис. 3. Примесные микровключения никеля в образцах n -Si<Ni> до (а) и после (б) ТО при $T = 1073$ К.

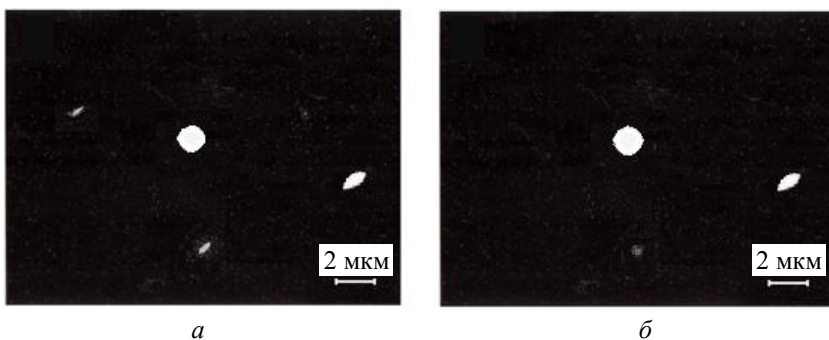


Рис. 4. Примесные микровключения никеля в образцах p -Si<Ni> до (а) и после (б) ТО при $T = 1073$ К.

Заключение

Таким образом полученные результаты показывают, что под воздействием ТО при $T < 773$ К, электрические свойства образцов Si<Ni> n - и p -типа остаются без существенных изменений. Значение удельного сопротивления образцов под воздействием ТО при температурах 773–1073 К, для образцов n -Si<Ni> в течение начальных 30 минут значительно увеличивается, а для образцов p -Si<Ni> в течение 40 минут существенно уменьшается. Результаты структурных исследований показали, что такое изменение значения ρ образцов связано с распадом микровключений примесных атомов никеля, и в последующем отделенные от них атомы переходят в узлы кристаллической решетки, где проявляют электроактивное свойство. С увеличением значения температуры ТО подобный переход атомов примеси усиливается, в результате которого значение ρ образцов достигает своего максимума в более короткий период. Дальнейшее увеличение времени отжига для образцов n -Si<Ni> приводит к слабому уменьшению удельного сопротивления, а для образцов p -Si<Ni> к небольшому увеличению значения ρ , которое обусловлено с уходом атомов никеля из узлов кристаллической решетки и образованием различных примесных комплексов с их участием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булярский С. В., Фистуль В. И. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. – М.: Наука, 1997.
2. Nakatsuka O., Hasegawa M., Kato K., Taoka N., Zaima Sh. // Japanese Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 53. № 5S2. P. 05GA12.
3. Lindroos J., Fenning D. P., Backlund D. J., Verlage E., Gorgulla A., Estreicher S. K., Savin H., Buonassisi T. // Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 113. Is. 20. doi.org/10.1063/1.4807799.
4. Morishige A. E., Jensen M. A., Hofstetter J., Yen P. X., Wang Ch., Lai B., Fenning D. F., Buonassisi T. // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 108. P. 202104.
5. Kveder V., Khorosheva M., Seibt M. // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 242. P. 147.
6. Бахадырханов М. К., Иллев Х. М., Аюнов К. С., Абдурахмонов Б. А., Кривенко П. Ю., Холмухамедов Р. Л. // Неорганические материалы. 2011. Т. 47. № 9. С. 1062.
7. Abdurakhmanov B. A., Bakhadirkanov M. K., Ayupov K. S., Iliyev H. M., Saitov E. B., Mavlyanov A., Kamalov H. U. // Nanoscience and Nanotechnology. 2014. Vol. 4 (2). P. 23.
8. Heuer M., Buonassisi T., Marcus M., Istratov A., Pickett D., Shibata T., Weber R. // Physical Review. 2006. B 73. P. 235204.
9. Климанов Е. А. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 5. С. 471.
10. Turgunov N. A. // Journal of Material Sciences & Engineering. 2018. Vol. 7. Is. 3. DOI: 10.4172/2169-0022.1000458.
11. Тургунов Н. А. // Доклады Академии Наук Высшей школы России. 2007. № 2 (9). С. 70.
12. Turgunov N. A. // Inorganic Materials. 2018. Vol. 54. № 12. P. 1183.

PACS: 85.30.-z

The influence of thermal processing on the electrical properties of silicon, alloyed nickel

N. A. Turgunov¹, E. H. Berkinov¹, and D. X. Mamazhonova²

¹ Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics
at the National University of Uzbekistan
20 Yangi Olmazor st., Tashkent, 100057, Uzbekistan

² National University of Uzbekistan
4 Universitetskaya st., Tashkent, 100174, Uzbekistan

Received June 01, 2020

The influence of heat treatment at temperatures $T = 573$ – 1073 K on the electrical properties of

silicon single crystals containing microinclusions of impurity nickel atoms is considered. The effect of heat treatment on the resistivity of nickel-doped silicon single crystals is studied. Using electron probe microanalysis, images of nickel impurity microinclusions were obtained before and after exposure to heat treatment.

Keywords: single-crystal silicon, nickel, diffusion, thermal annealing, cooling rate, nickel microinclusions, electron probe microanalysis.

REFERENCES

1. S. V. Bulyarsky and V. I. Fistul, *Thermodynamics and kinetics of interacting defects in semiconductors* (Nauka, Moscow, 1997).
2. O. Nakatsuka, M. Hasegawa, K. Kato, N. Taoka, and Sh. Zaima, *Japanese Journal of Applied Physics* **53** (5S2), 05GA12 (2014).
3. J. Lindroos, D. P. Fenning, D. J. Backlund, E. Verlage, A. Gorgulla, S. K. Estreicher, H. Savin, and T. Buonassisi, *Journal of Applied Physics* **113** (20), doi.org/10.1063/1.4807799 (2013).
4. A. E. Morishige, M. A. Jensen, J. Hofstetter, P. X. Yen, Ch. Wang, B. Lai, D. F. Fenning, and T. Buonassisi, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 202104 (2016).
5. V. Kveder, M. Khorosheva, and M. Seibt, *Solid State Phenomena* **242**, 147 (2016).
6. M. K. Bahadyrkhanov, H. M. Iliyev, K. S. Ayupov, B. A. Abdurakhmonov, P. Yu. Krivenko, and R. L. Kholmukhamedov, *Inorganic materials* **47** (9), 1062 (2011).
7. B. A. Abdurakhmanov, M. K. Bakhadirkanov, K. S. Ayupov, H. M. Iliyev, E. B. Saitov, A. Mavlyanov, and H. U. Kamalov, *Nanoscience and Nanotechnology* **4** (2), 23 (2014).
8. M. Heuer, T. Buonassisi, M. Marcus, A. Istratov, D. Pickett, T. Shibata, and R. Weber, *Physical Review* **B 73**, 235204 (2006).
9. E. A. Klimanov, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (5), 471 (2016).
10. N. A. Turgunov, *Journal of Material Sciences & Engineering* **7** (3), DOI: 10.4172/2169-0022.1000458 (2018).
11. N. A. Nurgunov, *Reports of the Academy of Sciences of the Higher school of Russia*, No. 2 (9), 70 (2007).
12. N. A. Turgunov, *Inorganic Materials* **54** (12), 1183 (2018).