

КИНЕТИКА ОТЖИГА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НЕЙТРОННО – КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Сулайманов А.А. - sulaymonov1882@gmail.com

Рафиков А.К. - Институт Ядерной Физики АН

Известно, что исследования компенсированного кремния для изготовления высокочувствительных дискретных полупроводниковых приборов имеют ряд ограничений, которые связаны с получением однородного материала с высоким удельным сопротивлением.

Для решения этой проблемы в настоящее время предлагаются новые способы получения материала с заданными свойствами и параметрами с использованием радиационной обработки.

В данной работе по сравнению с другими радиационными методами обработки кремния отдано предпочтение нейтронному облучению, позволяющее вводить с высокой эффективностью дефектных комплексов компенсирующего типа [1-5]. В соответствии с требованиями, предъявляемым к нейтронно-облученным материалам для нормализации электрофизических и получения заданных свойств, требуется проведение термической обработки кристалла [4-11]. Однако вопрос термической стабильности радиационных дефектов в нейтронно–компенсированном кремнии при последующих технологических операциях изготовления полупроводниковых приборов, в частности резисторов недостаточно изучен.

Целью работы является исследование кинетики отжига радиационных дефектов в нейтронно-компенсированном кремнии для выявления термостабильности их электрофизических параметров.

В качестве исходного материала были использованы монокристаллы кремния n-типа (с удельным сопротивлением от 50 до 100 Ом·см), полученные методом вытягивания из расплава (концентрация примесей кислорода $\sim 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³).

Исследуемые образцы изготавливались стандартным методом и имели геометрические размеры 1,5x1,5x0,04 мм³

Электрические контакты получали путем диффузии фосфора при температуре $1000 \pm 0,5$ °С в течение ~ 30 мин, затем образцы выдерживались в печи до полного охлаждения.

Готовые пластины методом скрайбирования разрезались до размеров 1,5x1,5 мм.

Измерения электросопротивления R $n^+ - n - n^+$ структуры проводились в одном и том же интервале температур ($30 \div 100$ °С) до и после облучения нейтронами. Структурная схема измерительного устройства приведена на рис.1.

Результаты измерения электросопротивления $n^+ - n - n^+$ структуры с исходным удельным сопротивлением $\rho_0 \sim 100 \cdot \text{Ом} \cdot \text{см}$ после облучения флюенсом быстрых нейтронов $2,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приведены на рисунке 2.

Термочувствительность материала B определялась по линейному участку зависимости $\lg R \sim f(1/T)$ (рисунок 2) по следующей формуле.

$$B = \frac{2,3 \cdot \lg \frac{R_1}{R_2}}{T_1^{-1} - T_2^{-1}} = 6800 \text{ К}$$

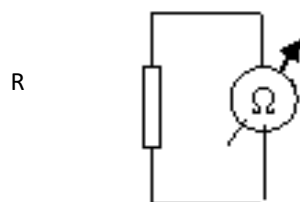


Рис.1 Электрическая схема измерения полупроводникового резистора R : Ω - Омметр

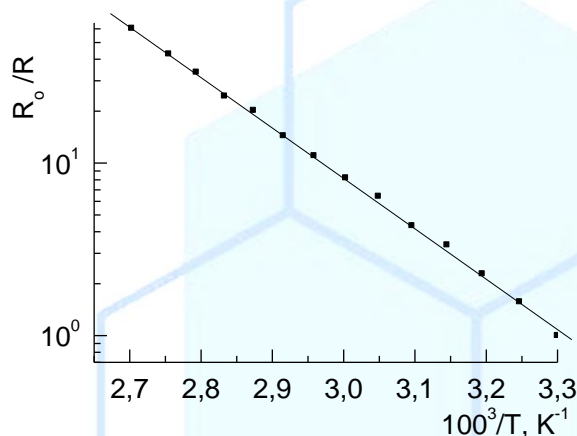


Рис.2. Зависимость электросопротивления нейтронно-компенсированного кремниевого резистора от температуры.

где R_1 и R_2 – электросопротивления соответствующие температуре T_1 и T_2 .

Температурная зависимость относительного изменения электросопротивления приведены в таблице 1.

Таблица 1.

$10^3/T, \text{ K}^{-1}$	R_0/R	R_0/R	R_0/R	R_0/R	R_0/R
3,3000	1	1	1	1	1
3,2468	1.5689	1,5626	1.55148	1.5586	1.5688
3,1945	2,2799	2,4225	2,2427	2,4293	2,3485
3,145	3.3518	3,4119	3.2580	3.4096	3.2899

3,096	4,3278	4,5112	4,3527	4,6740	4,4467
3,0488	6.4223	6.4288	6.3580	6.3980	6.4179
3,003	8,1989	8,0000	8,2400	8,3250	8,3405
2,9586	11.0196	10.5966	10.8950	11.1590	10.9045
2,9154	14,3933	14,8058	14,3270	14,6179	14,1638
2,8736	20.196	19.3333	19.5960	20.2580	19.9440
2,8330	24,4456	24,7970	24,5200	25,5586	24,4093
2,7933	33.6533	33.5050	33.2680	33.7860	32.4800
2,7548	42,846	42,9577	43.7852	43,5158	42,2739
2,7027	60,4444	60,8040	61.5200	61,5600	60,1481

Проведенный статистический анализ значений термочувствительности измеренных образцов показал, что выход одинаковых резисторов, с равными B из 100 шт составляет не менее 90 %.

Исследовался изотермический отжиг радиационных дефектов (РД) и из наклона температурной зависимости определялись значения постоянного распада ($\tau_{рас}$), при различных температурах. Результаты которых приведены на рис. 3. Постоянная времени распада определялось следующего выражения:

$$R_{отж} = R_o \cdot \exp(-t / \tau),$$

где R_o и $R_{отж}$ – электросопротивления до и после термоотжига; t - время отжига; $\tau_{рас}$ - постоянная времени распада.

Энергия активация распада определялись из температурной зависимости $\tau_{рас}$ (рисунки 3 и 4), которые удовлетворительно описывается следующим выражением:

$$\tau_{рас} = A \cdot \exp(Q/kT_{отж}),$$

где $A = 0,02526$ с – предэкспонента, $Q = 10623,2$ кал/моль - энергия активации отжига РД; $k = 1,99$ кал/град·моль – универсальная газовая постоянная.

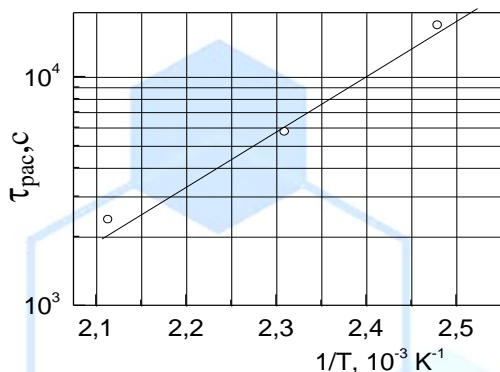


Рис.3. Относительное

изменения электросопротивления при изотермическом отжиге кремния после облучения потоком нейтронов $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ($T_{\text{отж}}$, К):

- 1- 373К; 2- 403 ($\tau_{\text{рас}}=17700 \text{ с}$);
3- 433($\tau_{\text{рас}}=5211,5 \text{ с}$); 4- 473 ($\tau_{\text{рас}}=2563 \text{ с}$).

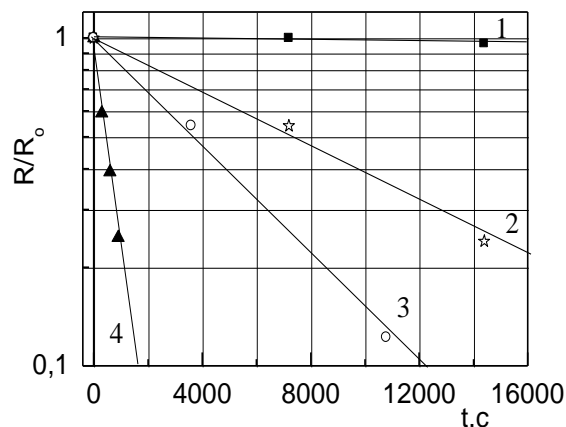


Рис.4. Зависимость постоянной времени распада радиационного центра от температуры отжига нейтронно-компенсированного кремния

Зная величину энергии активации распада радиационных дефектов Q , длительность температуры отжига $t_{\text{отж}}$, электросопротивление образца после облучения R_0 и задавая температуру отжига $T_{\text{отж}}$ из следующего выражениями, можно определить изменении электросопротивление в широком интервале:

$$\ln R_{\text{отж}} = \ln R_0 - \frac{t_{\text{отж}}}{A \cdot \exp\left(\frac{Q}{kT_{\text{отж}}}\right)}$$

Из полученных результатов выявлено, что путем введения радиационных дефектов с последующим термоотжигом в интервале $120 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ можно получать резисторы с заданными электросопротивлением.

Установлено, что в нейтронно-компенсированном кремнии распад радиационных дефектов практически до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ не наблюдается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юнусов М.С. Физические явления в кремнии, легированном элементами платиновой группы. - Ташкент: Фан, 1983. – 80 с.
2. Кирюхин А.Д., Григорьев В.В., Зуев А.В., Зуев В.В., Королев Н.А. Форма сигналов нестационарной фотопроводимости в кремнии, легированном золотом или серой. ФТП. 2007. Т.41. Вып.3. С. 269-272
3. Karimov M., Makhkamov Sh., Makhmudov Sh.A., Muminov R.A., Rakhmatov A.Z., Sulaimanov A.A., Tursunov N.A. Peculiarities of influence of radiation

- defects on photoconductivity of silicon irradiated by fast neutrons. (*Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc., 2010*) vol. 46 (4), pp. 298-300.
4. Sh.A. Makhkamov, M.Yu. Tashmetov, Sh.A. Makhmudov, A.K. Rafikov, A.A. Sulaimonov. Диффузия атомов примеси родия в кремнии для датчиков // FRANCE international conference: "Scientific approach to the modern education system" Part 10, 5th December, - Pp. -95-98.у 2022
 5. M. Yu. Tashmetov, Sh. A. Makhmudov, A. A. Sulaymonov, A. K. Rafikov, B. Zh. Abdurayimov. Photosensors Based on Neutron Doped Silicon // ISSN 0003-701X, Applied Solar Energy, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 71–73.
 6. Sh Makhmudov, A Sulaymonov, A Rafikov, G Xudayberganova. Study of after diffusion regions in highly doped silicon // International scientific journal Science and Innovation, ISSN: 2181-3337, V-1, №6, October 9, 2022, - Pp. -402-404.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7178339>
 7. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А. Влияние быстрых нейтронов на электрофизические свойства ядерно-легированного кремния р-типа» // Известия вузов, Физика. – Томск. 2011. – Вып. 5 – С. 75-78.
 8. M Karimov, Sh Makhkamov, NA Tursunov, Sh A Makhmudov, AA Sulaimonov. "The effect of fast neytrons on the electrophysical properties of nucler-doped p-silicon" // Russian Physics Journal 2011/10. vol 54. Pp589-593.
 9. Сулаймонов А,А. Сулаймонова Х.И. Терморезистор на основе компенсированного кремния. Proceedings of International Scientific Conference on Multidisciplinary Studies. Hosted online from Moscow, Russia.2023 вып 2 том 4ст 52-56.
 10. Сулаймонов А,А. Сулаймонова Х.И. Особенности нейтронной трансмутации легированного кремния. Proceedings of International Scientific Conference on Multidisciplinary Studies. Hosted online from Moscow, Russia.2023 вып 2 том 4 ст 57-61.
 11. Сулаймонов А,А. Рафиков А.К. Детекторы ядерного излучения на основе нейтронно-легированного кремния. Proceedings of International Scientific Conference on Multidisciplinary Studies. Hosted online from Moscow, Russia.2023 вып 2 том 4ст 62-66.