

## КИНЕТИКА РЕЛАКСАЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В КРЕМНИИ Р-ТИПА КОМПЕНСИРОВАННОМ АТОМАМИ ФОСФОРА

Сулаймонов А.А. - [sulaymonov1882@gmail.com](mailto:sulaymonov1882@gmail.com)

Дўсназаров Э.М. - [elyor.dusnazarov@gmail.com](mailto:elyor.dusnazarov@gmail.com)

Институт Ядерной физики АН Узбекистана

Обсуждается кинетика релаксации фотопроводимости нейтронно-легированного кремния р-типа. Обнаружено, что в компенсированном р-Si<B,P> и контрольном р-Si<B> релаксационный процесс происходит различным образом. Различие объясняется на базе представлений о различной степени микронеоднородности по проводимости материала. Для определения термоотжига структурных дефектов предлагается метод, на основе изучения зависимости подвижности носителей заряда от времени отжига.

Известно, что кремний – наиболее широко используемый полупроводниковый материал в электронной технике. В связи с этим к свойствам и характеристикам этого материала предъявляются самые жесткие требования. В частности, накопление термо- и радиационных дефектов в кремнии, в большинстве случаев, приводит к возникновению компенсирующих центров. Если концентрация этих центров становится сравнимой с исходной концентрацией носителей заряда, то электрофизические и фотоэлектрические свойства материала заметно меняются. Большинство исследователей считает, что на фотоэлектрические свойства компенсированного материала влияет характер примесных центров [1, 2], а другие исследователи считают основным вклад потенциальных барьеров между высокоомными и низкоомными областями [3-5]. При этом влияние вклада глубоких примесных центров и потенциальных барьеров между  $p^-$  и  $p^+$  (или  $n^-$  и  $n^+$ ) – областями на электрофизические свойства материала остается изученным в недостаточной степени.

Целью работы является изучение влияния микронеоднородности по проводимости на кинетику фотопроводимости кремния, компенсированного атомами фосфора.

В качестве исходного материала использовался кремний р-типа с  $\rho = 1 \div 100$  Ом·см. Легирование кремния примесью фосфора (P) путем ядерной реакции (НЛК) [6-7]:  $^{30}\text{Si} (n, \gamma) ^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P} + \beta^-$  проводилось в атомном реакторе типа ВВР-СМ при интенсивности тепловых нейтронов  $\sim 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. При этом концентрацию введенного фосфора можно рассчитать по формуле:  $N_P = 1,7 \cdot 10^{-4} \Phi$ , где  $\Phi = I \cdot t$  – поток медленных нейтронов, см<sup>-2</sup>,  $I$  – плотность потока медленных нейтронов, см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>,  $t$  – время облучения, с.

Отжиг радиационных дефектов проводили при температуре ~1270 К на воздухе, в течение ~30 мин с последующим медленным охлаждением со скоростью (5÷10) град/мин. Омические контакты на p-Si получали путем припаивания сплава Sn+In (50% + 50%) при температуре ~400 К. Электрофизические параметры легированного кремния приведены в табл.1.

Как видно из таблицы подвижности основных носителей заряда в компенсированном кремнии p-типа отличаются в зависимости от исходной концентрации бора, т.е. при вышеуказанной температуре отжига радиационные дефекты отжигаются не полностью.

Для выяснения номинального значения подвижности носителей заряда проводился изотермический отжиг. Результаты приведены на рисунке 1. Как видно из рисунка  $\mu$  увеличивается с ростом времени изотермического отжига и, чем больше концентрация компенсирующих донорных центров (в данном случае, фосфора), тем сильнее номинальное значение  $\mu$  сдвигается в сторону большего времени отжига (при этом концентрация основных носителей заряда в исследованных образцах остаётся практически неизменной).

Следовательно, можно сказать, что для достижения номинального значения концентрации носителей заряда достаточно температуры ~ 1270 К и времени отжига ~ 30 мин., для уменьшения влияния структурных дефектов (например, областей разупорядочения) на подвижность носителей необходимо увеличить время отжига.

Далее для выяснения влияния неоднородности компенсированного материала исследовалась кинетика релаксации неравновесных носителей заряда.

**Таблица**

Электрофизические параметры нейтронно - легированного кремния в зависимости от исходного материала ( $T_{отж} = 1270$  К,  $t_{отж} = 30$  мин)

Тип образцов	Исходный образец	Нейтронно-легированный кремний (НЛК)			Концентрация фосфора, $см^{-2}$
		$\rho$ , Ом·см	$\rho$ , $см^{-3}$	$\mu$ , $см^2/V\cdot c$	
1	КДБ-1	$2,8 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^{13}$	170	$\sim 2 \cdot 10^{16}$
		$2,6 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{13}$	200	
		$2,9 \cdot 10^3$	$1,95 \cdot 10^{13}$	180	
		$3,7 \cdot 10^3$	$6,1 \cdot 10^{12}$	282	
2	КДБ-10	$3,6 \cdot 10^3$	$6,34 \cdot 10^{12}$	274	$\sim 2 \cdot 10^{15}$
		$3,6 \cdot 10^3$	$6,94 \cdot 10^{12}$	250	
		$2,4 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^{12}$	330	
		$2 \cdot 10^3$	$9,7 \cdot 10^{12}$	320	
3	КДБ-100	$2,2 \cdot 10^3$	$8,74 \cdot 10^{12}$	325	$\sim 1,9 \cdot 10^{14}$

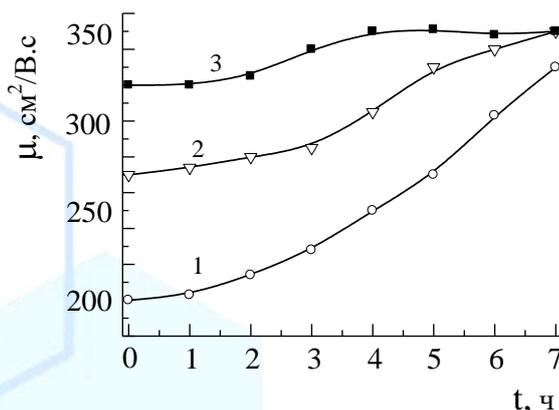


Рис.1. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры изотермического отжига в НЛК

( $T = 1270 \text{ K} = \text{const}$ ) при различном флюенсе тепловых нейтронов ( $\text{см}^2$ ): 1 –  $10^{19}$ ; 2 –  $10^{18}$ ; 3 –  $10^{17}$  и исходного удельного сопротивления ( $\text{Ом}\cdot\text{см}$ ): 1 – 1; 2 – 10; 3 – 100

Как известно, время релаксации проводимости в однородных полупроводниках ограничено максимальным значением [3]:

$$\tau_{\max} = (v \cdot \sigma_{\min} \cdot \Delta n)^{-1},$$

где  $v \approx 10^7 \text{ см/с}$  - тепловая скорость носителей,  $\sigma_{\min} = 10^{-22} \div 10^{-23} \text{ см}^2$  - наименьшее сечение захвата носителей,  $\Delta n$  – концентрация неравновесных носителей заряда (в нашем случае  $\Delta n \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Для этих величин получаем  $\tau_{\max} \leq 1 \div 2 \text{ с}$ . Процессы релаксации, обладающие временами, большими  $\tau_{\max}$ , следует относить к долговременным, вызванным неоднородным распределением проводимости материала [3].

Результаты исследования кинетики фотопроводимости (ФП) в компенсированном  $p\text{-Si}\langle\text{B,P}\rangle$  (для  $\rho \approx 2 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ ) представлены на рис.2. Спад ФП в общем виде с достаточной точностью можно представить выражением:

$$I_{\text{ф}} = A_1 \cdot \exp(-t/\tau_1) + A_2 \cdot \exp(-t/\tau_2)$$

где  $t$  - время наблюдения,  $\tau$  - постоянная времени процесса:  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - время релаксации неосновных и основных носителей, соответственно,  $A$  - коэффициенты зависящие от концентрации носителей заряда.

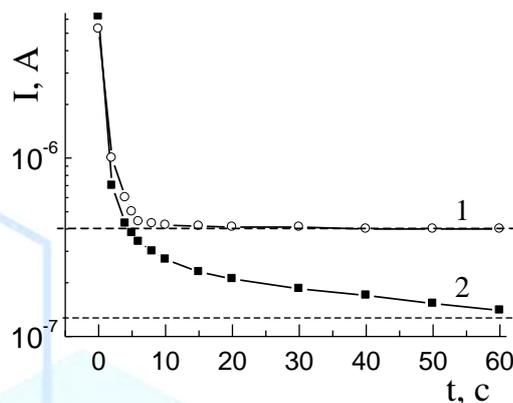


Рис.2. Кинетика релаксации фототока в p-Si<B,P> (1) и p-Si<B> (2)

Как видно из рисунка 2 в компенсированном и контрольном кремнии релаксационный процесс происходит различным образом: для p-Si<B,P> –  $\tau_2 \approx 98$  с, а для p-Si<B> –  $\tau_2 \approx 5$  с.

В работе [7-11] известно, что с ростом концентрации компенсирующих центров (N), размеров (r) и амплитуды ( $\Delta_0$ ) флуктуации растут, и определяются следующими выражениями:

$$r = (N)^{1/3}/p^{2/3}, \quad \Delta = (e^2\chi)(N)^{2/3}/p^{1/3}$$

Анализ результатов, приведенных в табл.1, показывает, что в образцах I типа больше r и  $\Delta_0$  по сравнению с образцами других типов, кроме того эти образцы имеют смещенную проводимость (p - и n - области), из-за неравномерного распределения основной примеси - бора. В качестве контрольного использовались кремний p-типа с удельным сопротивлением  $2 \pm 35$  % кОм·см.

Отличие релаксационных процессов в компенсированном и контрольном кремнии объясняется различной степенью микронеоднородности по проводимости.

Для сравнения кинетики релаксации фотопроводимости в p-Si<B,P> параллельно исследовался кремний, компенсированный иридием. В качестве исходного материала использовался кремний p-типа с  $\rho \approx 2 \pm 35$  % кОм·см. Легирование осуществлялось методом термодиффузии при температуре 1270÷1320 К в течение ~ 5 часов. Результаты исследования приведены на рисунке 3. Анализ этих результатов показал, что в зависимости от степени компенсации значение  $\tau_2$  находится в интервале 10÷90 с.

Сопоставляя кинетики релаксации фотопроводимости в кремнии p-типа, компенсированном примесями иридия и фосфора, можно сказать, что релаксационный процесс (при равенстве  $\rho$  образцов), на наш взгляд, не зависит от наличия примеси, создающей глубокие энергетические уровни.

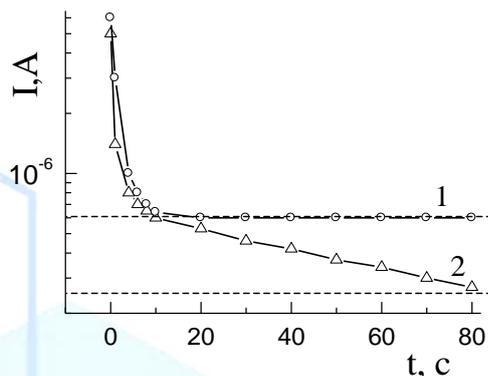


Рис.3. Кинетика релаксации фототока в  $p\text{-Si}\langle B, Ir \rangle$  при различных температурах диффузии: 1 – 1220 К; 2 – 1370 К

### Выводы

Показано, что с ростом времени изотермического отжига подвижность носителей заряда растет и чем больше концентрации центров фосфора, тем больше затягивается номинальное значение  $\mu$  в сторону большего времени отжига, что связано неполным отжигом структурных дефектов (в данном случае, областей разупорядочения).

Обнаружено, что в компенсированном  $p\text{-Si}\langle B, P \rangle$  и контрольном  $p\text{-Si}\langle B \rangle$  релаксационный процесс происходит различным образом: для  $p\text{-Si}\langle B, P \rangle$   $\tau \approx 98$  с, и для  $p\text{-Si}\langle B \rangle$   $\tau \approx 5$  с. При этом с ростом исходной концентрации носителей заряда (в данном случае бора-В) в компенсированном кремнии наблюдается возрастание постоянной времени релаксации основных носителей –  $\tau_2$  (при равных значениях  $\rho$ ), которое обусловлено различной степенью микронеоднородности по проводимости в исследованных образцах.

Выявлено, что фотопроводимость в кремнии р-типа, компенсированном примесями иридия ( $p\text{-Si}\langle B, P, Ir \rangle$ ) и фосфора ( $p\text{-Si}\langle B, P \rangle$ ), определяется микронеоднородностями по проводимости.

### 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.y 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 neutrons on the electrophysical properties of nuclear-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.