

- [4] Кулюк Л. Л., Радауцан С. И., Струмбан Э. Е., Тэзлеван В. Е., Цицану В. И. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 3. С. 534—535.
- [5] Yokoyama Y., Tsukahara S., Satoh T. // J. Phys. Soc. Japan. 1972. V. 32. N 4. P. 1149.
- [6] Адомайтис Э., Добровольский Э., Кроткус А. // ФТП. 1984. Т. 16. В. 8. С. 1422—1425.
- [7] Anedda A., Garbato L., Raga F., Serpi A. // Phys. St. Sol. (a). 1978. V. 50. N 1. P. 643—650.
- [8] Георгобиани А. Н., Радауцан С. И., Тигивяну Н. М. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 2. С. 193—212.
- [9] Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1963. 494 с.
- [10] Gagliardi K., Schwerdtfeger C. F. // J. Phys. Chem. Sol. 1973. V. 34. N 7. P. 1281—1283.
- [11] Nakanishi H., Endo S., Irie T. // Japan. J. Appl. Phys. 1980. V. 19 (Suppl. 19-3). P. 261—266.
- [12] Свелин Р. А. Термодинамика твердого состояния. М., 1968. 314 с.
- [13] Nikiforow K. G., Gurevich A. G., Radautsyan S. I., Emiryanyan D. M., Tezlevan V. E. // Phys. St. Sol. (a). 1982. V. 72. N 1. P. K37—K39.

Институт физики полупроводников  
АН ЛитССР  
Вильнюс

Получено 12.12.1988  
Принято к печати 20.12.1988

ФТП, том 23, вып. 6, 1989

## ОПТИЧЕСКАЯ САМОКОМПЕНСАЦИЯ ДОНОРНЫХ ЦЕНТРОВ ЖЕЛЕЗА В КРЕМНИИ

Баграев Н. Т., Половцев И. С.

Центры с глубокими уровнями в полупроводниках характеризуются взаимосвязанностью низкосимметричных искажений решетки с зарядовыми и спиновыми корреляциями [<sup>1-4</sup>]. На основе результатов исследований двойных доноров и акцепторов в кремнии и GaAs была предложена обобщенная модель глубокого центра, туннелирующего при перезарядке между позициями off-центра и узлом решетки в условиях локальной отрицательной корреляционной энергии [<sup>4-6</sup>]. Кинетика долговременных рекомбинационных процессов, сопровождающихся туннелированием глубокого центра в решетке, может быть исследована с помощью измерений проводимости на постоянном токе после предварительной оптической накачки (persistent проводимость) [<sup>4, 7</sup>]. В данной работе это продемонстрировано на примере изучения кремния, содержащего донорные центры железа Fe<sup>0</sup>.

Образцы кремния *n*-типа с исходным удельным сопротивлением 200 Ом·см были легированы железом путем высокотемпературной диффузии (1200 °C) с последующей закалкой в масле. Persistent проводимость регистрировалась при 77 К в зависимости от времени и длины волны предварительной накачки монохроматическим светом. После каждого измерения производилось термическое восстановление образца путем нагрева до комнатной температуры.

После облучения образца монохроматическим светом с энергией  $0.24 \leq h\nu < 0.47$  эВ и  $0.79 < h\nu < E_g$  наблюдалась отрицательная persistent проводимость (рис. 1, кривая 1). Оптическая регенерация persistent проводимости стимулировалась последующей накачкой светом  $0.47 \leq h\nu \leq 0.79$  эВ (рис. 1, кривые 2, 3).

Экспериментальные результаты можно объяснить в концепции локальной отрицательной корреляционной энергии ( $U < 0$ ), в рамках которой кулоновское отталкивание электронов на центре компенсируется его туннелированием между различными положениями равновесия в решетке. При этом в процессе туннелирования могут изменяться как величина, так и знак корреляционной энергии  $U$ . Например, для донорных центров железа в кремнии двухэлектронное  $D_s^- \leftrightarrow Fe_s^{2-}$ -состояние с  $U < 0$  стабильно в узле решетки ( $Q=0$ ), а одноэлектронное  $(D_s V)^0 \leftrightarrow (Fe_s V_{Si})^0$ - и положительно заряженное  $(D_s V)^+ \leftrightarrow (Fe_s V_{Si})^+$ -состояния с  $U > 0$  существуют только в нецентральной междоузельном положении

(позиция  $off$ -центра),  $V \leftrightarrow V_{Si}$ -вакансия — в решетке кремния (рис. 2) [5]. На одноэлектронной зонной схеме зарядовые состояния донорного центра железа могут быть учтены путем введения уровней фонового и коррелированного электронов (см. вставку на рис. 2) [4, 7]. Последний вследствие  $I_2 < I_1$  находится в зоне проводимости:  $I_2 = I_1 + \Delta I$ . В этом случае электрон со дна зоны проводимости, поглощая фотон и (или) фононы, может перейти в метастабильное локальное состояние коррелированного электрона с образованием  $D_s^-$ -центра (рис. 2)



что приводит к отрицательной persistent проводимости после соответствующей предварительной оптической накачки  $h\nu \geq \Delta I$  (рис. 1, кривая 1;  $h\nu \geq 0.24$  эВ).

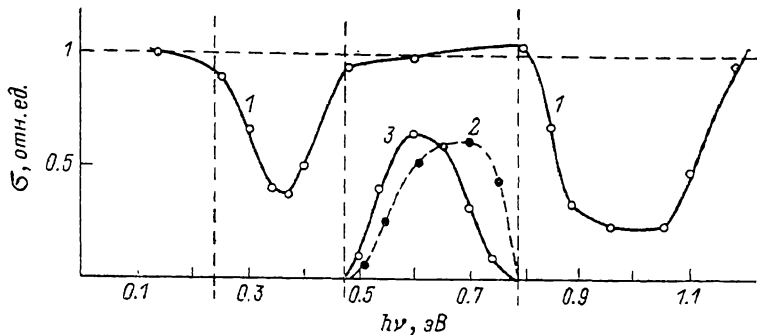


Рис. 1. Спектральные зависимости тушения (1) и регенерации (2, 3) проводимости на постоянном токе после оптической накачки (persistent проводимость) в кремнии, легированном железом.

1 — предварительная, 2, 3 — последующие оптические накачки в течение 20 мин каждая. Регенерация persistent проводимости после предварительной накачки (тушения) в интервале энергий, эВ: 2 —  $0.24 \leq h\nu \leq 0.47$ , 3 —  $h\nu \geq 0.79$ .

В условиях накачки светом с  $h\nu \geq I_2$ , кроме реакции (1), становится возможной двухэлектронная фотоионизация (рис. 2)  $D_s^-$ -центра



что приводит к распаду  $D_s^-$ -центров и соответственно к исчезновению отрицательной persistent проводимости (рис. 1, кривая 2).

Таким образом, в условиях оптически индуцированного захвата электрона проводимости на уровень коррелированного электрона (рис. 2) отрицательная persistent проводимость возникает в интервале энергий предварительной оптической накачки  $\Delta I \leq h\nu < I_2$  ( $0.24 \leq h\nu < 0.47$  эВ; рис. 1, кривая 1).

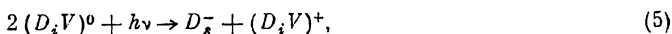
При облучении образца светом с энергией  $h\nu \geq I_1$  становится возможным прямой оптический переход



с образованием горячего электрона в зоне проводимости, который, релаксируя, индуцирует двухэлектронный захват с образованием  $D_s^-$ -центров [6, 8]



Следовательно, оптическая накачка  $h\nu \geq I_1$  в условиях наличия локальной отрицательной корреляционной энергии стимулирует переход нейтральных центров железа в метастабильное состояние



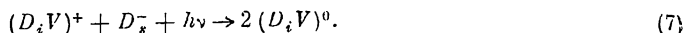
что автоматически приводит к эффективной откачке электронов из зоны проводимости (см. спектр отрицательной persistent проводимости при  $h\nu > 0.79$  эВ; рис. 1).

Восстановление persistent проводимости (рис. 1, кривая 2) происходит при ионизации метастабильных  $D_s^-$ -центров, что осуществляется: 1) последующим

нагревом образца до комнатной температуры, 2) последующей накачкой монохроматическим светом с энергией  $I_2 \leq h\nu < I_1$ , 3) последующей оптической накачкой ( $E_g - I_1$ )  $\leq h\nu < I_1$  (рис. 2), которая индуцирует переходы электронов из валентной зоны на уровень фонового электрона



что эквивалентно



Последняя реакция наблюдается только после предварительной накачки светом с энергией  $h\nu \geq I_1$  (рис. 1, кривая 3) [см. (5)].

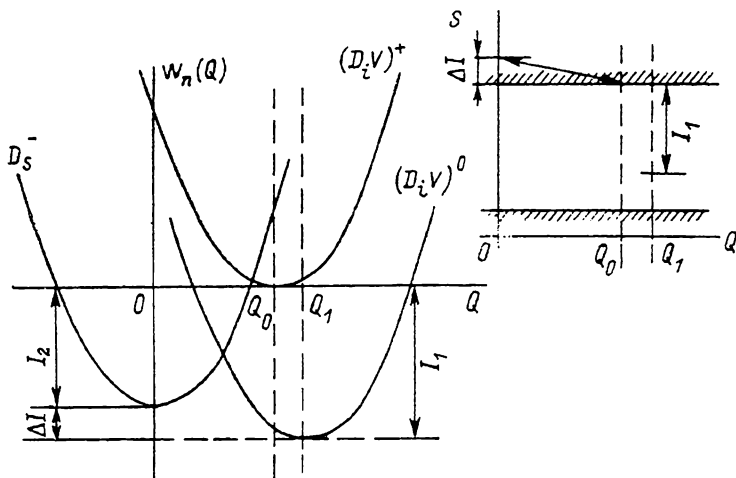


Рис. 2. Адиабатические потенциалы зарядовых состояний донорного центра  $Fe^0$  в кремнии  
На вставке — эквивалентная одноэлектронная зонная схема.

Следует отметить, что спектральные зависимости тушения и регенерации persistent проводимости (рис. 1) хорошо согласуются с соответствующими зависимостями тушения и регенерации сигналов ЭПР центров  $Fe^0$  в кремнии  $n$ -типа [5].

Таким образом, в кремнии  $n$ -типа, легированном железом, обнаружены оптическое тушение и последующая регенерация persistent проводимости, которые объясняются в модели донорного центра  $Fe^0$  с локальной отрицательной корреляционной энергией.

#### Список литературы

- [1] Anderson P. W. // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 34. N 15. P. 953—955.
- [2] Watkins G. D. // Festkörperprobleme. 1984. V. 24. P. 163—189.
- [3] Драбкин И. А., Мойжес Б. Я. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 4. С. 625—648.
- [4] Ваграев Н. Т., Mashkov V. A. // Mater. Sci. Forum. 1986. V. 10-12. P. 435—443.
- [5] Ваграев Н. Т., Лебедев А. А., Машков В. А., Половцев И. С. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 7. С. 2076—2084.
- [6] Ваграев Н. Т., Колчанова Н. М., Машков В. А. // Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 45. В. 5. С. 231—234.
- [7] Ваграев Н. Т., Mashkov V. A. // Sol. St. Commun. 1985. V. 55. N 9. P. 791—793.
- [8] Ваграев Н. Т., Mashkov V. A. // Sol. St. Commun. 1988. V. 65. N 10. P. 1111—1117.

Получено 17.10.1988  
Принято к печати 22.01.1989

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград