

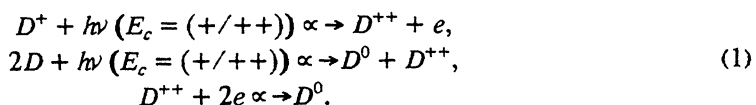
## МЕТАСТАБИЛЬНОСТЬ ЦЕНТРОВ МАРГАНЦА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ КРЕМНИЙ—ГЕРМАНИЙ

Баграев Н. Т., Мирсаатов Р. М., Половцев И. С., Сирожов У., Юсупов А.

Исследованы процессы тушения и регенерации фотопроводимости, возникающие после предварительной монохроматической оптической накачки в твердых растворах кремний—германий *p*-типа, легированных марганцем. Данные эффекты объясняются с помощью модели глубокого дефекта, туннелирующего при перезарядке между позициями различной симметрии в решетке Si—Ge.

Марганец в кремнии *p*-типа является двойным донором и формирует в запрещенной зоне систему взаимосвязанных глубоких уровней:  $(0/+)$  —  $E_c$  —  $-0.45$  эВ,  $(+/++)$  —  $E_v + 0.3$  эВ [1]. При этом позиция дефекта в решетке зависит от его зарядового состояния: центры  $D^{++} = (\text{Mn}_i\text{V}_{\text{Si}})^{++}$ ,  $D^0 = (\text{Mn}_i\text{V}_{\text{Si}})^0$  находятся в узле решетки, а  $D^+ = (\text{Mn}_i\text{V}_{\text{Si}})^+$  — в тетраэдрическом междоузлии [2]. Поэтому перезарядка изолированного центра марганца сопровождается его туннелированием между различными позициями в решетке кремния. Подобное поведение глубокого примесного центра может быть описано в рамках модели дефекта с немонотонной зависимостью константы электрон-колебательного взаимодействия от зарядового состояния [3]. Соответствующая схема адиабатических потенциалов зарядовых состояний изолированного центра марганца в кремнии представлена на рис. 1. Существенно, что наличие потенциальных барьеров между термами, соответствующими разным зарядовым состояниям глубокого центра, определяет его метастабильные свойства. В настоящей работе метастабильные свойства изолированного центра марганца исследовались в условиях изменения жесткости решетки кремния путем введения германия.

В образцах кремния *p*-типа, легированного марганцем, предварительная монохроматическая накачка светом с энергией  $h\nu = E_c$  —  $(+/++)$  стимулирует процесс двухэлектронного захвата (рис. 1) [3]:



Данная реакция ответственна за возникновение нового метастабильного состояния  $D^0 + D^{++}$ , которое за счет оже-процессов вызывает сильное снижение времени жизни неравновесных носителей и, как следствие, приводит к тушению сигнала фотопроводимости (рис. 2).

Известно, что наличие германия в решетке кремния снижает жесткость системы глубокого центра, в самом подавляя его метастабильные свойства (штрихи на рис. 1) [4]. В частности, германий в кремнии может усилить при охлаждении кристалла спонтанную самокомпенсацию изолированных доноров марганца  $[2D^+ \rightarrow D^0 + D^{++}$  (рис. 1)], что автоматически уменьшает величину регистрируемой фотопроводимости.

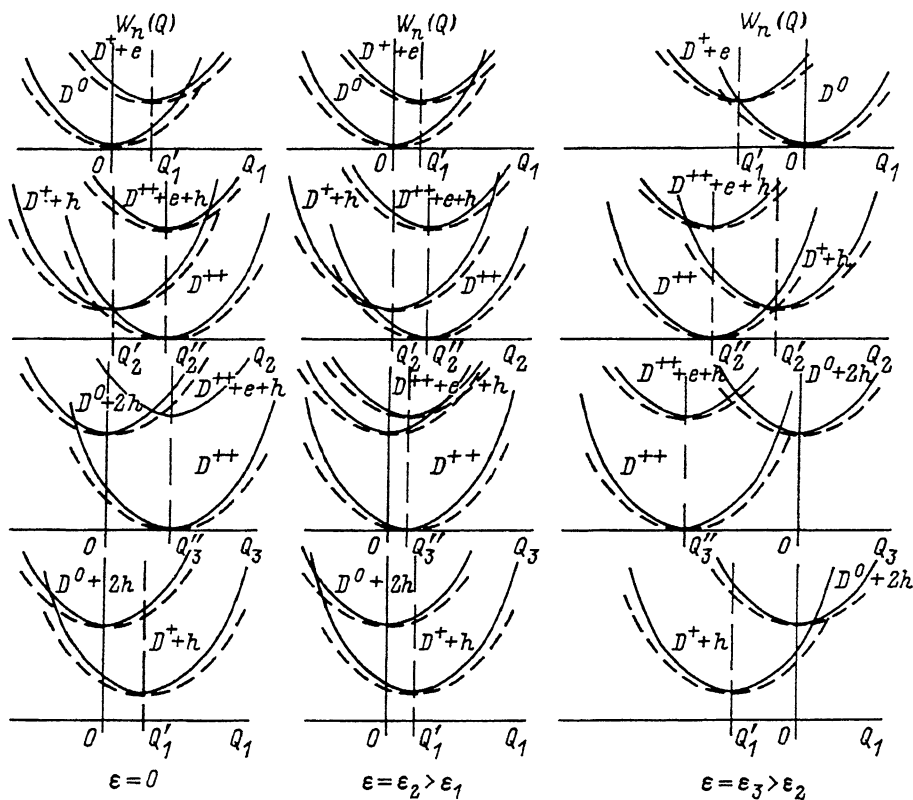


Рис. 1. Адиабатические потенциалы зарядовых состояний одиночного центра марганца в твердых растворах кремний—германий.

Сплошные линии соответствуют образцам с малым процентным содержанием германия; штрихи — образцам с большим процентным содержанием германия.

Легирование монокристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0.01$ )  $p$ -типа производилось путем высокотемпературной диффузии марганца ( $1200^\circ\text{C}$ ) с последующей закалкой в масле. Спектральное распределение фотопроводимости регистрировалось в условиях различных длин волн и времен предварительной оптической накачки монохроматическим светом. Кроме того, варьировалась величина приложенного к образцу электрического поля.

Обнаружено увеличение сигнала фотопроводимости после предварительной накачки образца светом с энергией в интервале  $0.75 < h\nu < 0.95$  эВ (рис. 2, 3, кривая 2), которое исчезало при увеличении времени облучения ( $t > 5$  мин) (рис. 2, 3, кривая 3). Наблюдаемый эффект может быть объяснен в рамках модели глубокого центра с немонотонной зависимостью константы электрон-колебательного взаимодействия от его зарядового состояния. В твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (Mn) изменение эластичных свойств системы усиливает роль процесса одноэлектронного захвата на центр  $D^{++}$  (рис. 1):



что вызывает увеличение сигнала фотопроводимости при малых временах накачки (рис. 2, 3, кривая 2) в отличие от поведения фотопроводимости в  $\text{Si}$  (Mn), где реакция (2) подавлялась более интенсивным процессом тушения (1). Однако с увеличением времени облучения двухэлектронный захват в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (Mn) начинает играть доминирующую роль, индуцируя тушение сигнала фотопроводимости во всем спектре (рис. 2, 3, кривая 3).

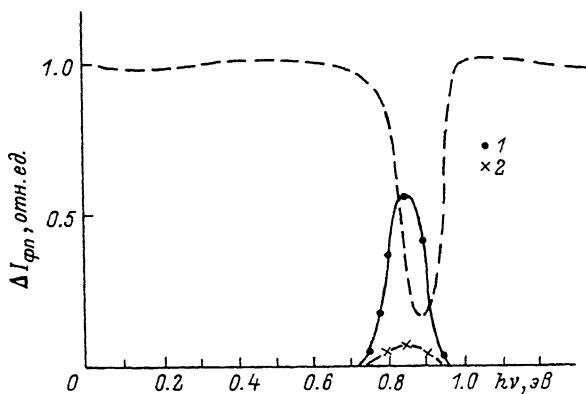


Рис. 2. Спектральная зависимость увеличения межзонной фотопроводимости в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\langle\text{Mn}\rangle$  ( $x = 0.01$ ) после предварительной накачки ( $T = 77 \text{ K}$ ).  $t$ , мин: 1 — 5, 2 — 20. Штрихи — спектральная зависимость тушения межзонной фотопроводимости после предварительной накачки ( $t = 20$  мин) в образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$ .

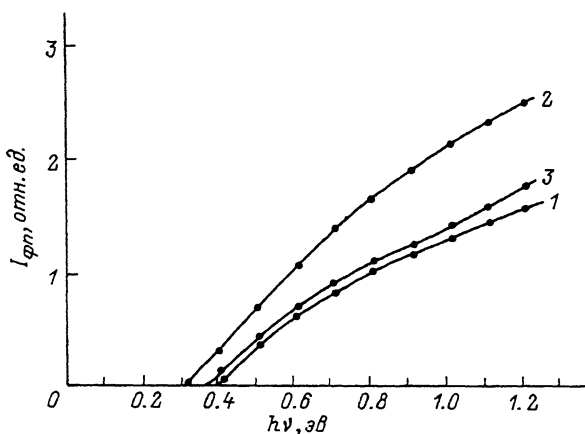


Рис. 3. Спектры фотопроводимости в зависимости от времени и длины волны предварительной оптической накачки в  $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\langle\text{Mn}\rangle$  ( $x = 0.01$ ) ( $T = 77 \text{ K}$ ), напряжение на образце  $U = 40 \text{ В}$  ( $\epsilon = 4 \cdot 10^4 \text{ В/см}$ ).

1 — исходный спектр; 2 — увеличение сигнала фотопроводимости после накачки светом с энергией  $h\nu = 0.85 \text{ эВ}$ ,  $t = 5$  мин; 3 —  $t = 20$  мин.

В сильных электрических полях увеличения фотопроводимости не наблюдалось. Подобное поведение сигнала фотопроводимости обусловлено влиянием эффекта Штарка на положение зарядовых состояний изолированного центра марганца в решетке  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (рис. 1) [3]. Изменение расстояния между позициями центров  $D^+$ ,  $D^{++}$  и  $D^0$  при возрастании внешнего электрического поля приводит к увеличению вероятности как двухэлектронного, так и одноэлектронного захвата (рис. 1). В этих условиях, однако, фотоиндуцированная самокомпенсация (1) играет более существенную роль даже при малых временах оптической накачки (рис. 2).

Таким образом, метастабильность центров марганца зависит от процентного содержания германия в твердых растворах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\langle\text{Mn}\rangle$ . Показано, что рост сигнала фотопроводимости при малых временах предварительной накачки светом  $h\nu = E_c - (+/++)$  обусловлен интенсивным заполнением центра  $D^+$  вследствие одноэлектронного захвата. Данный эффект исчезал с увеличением времени предварительной монохроматической накачки из-за возрастающей конкуренции со стороны процессов двухэлектронного захвата. Обнаружено, что внешнее

электрическое поле управляет динамикой тушения и регенерации фотопроводимости в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (Мп) за счет эффекта Штарка на глубоком центре марганца.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Czaputa R., Feicytinger H., Oswald J. // Sol. St. Commun. 1983. V. 47. N 4. P. 223—226.
- [2] Ludwig G. W., Woodbary H. H. // Phys. Rev. Lett. 1960. V. 5. N 3. P. 98—107.
- [3] Bagraev N. T., Mashkov V. A. // Sol. St. Commun. 1988. V. 65. P. 1111—1116.
- [4] Атабаев И. Г., Баграев Н. Т., Машков В. А., Саидов М. С., Сирожов У., Юсупов А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 525—531.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Получена 1.10.1991  
Принята к печати 3.10.1991

---