

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: САМОКОМПЕНСАЦИЯ ДВОЙНЫХ АКЦЕПТОРОВ ЦИНКА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ КРЕМНИЙ—ГЕРМАНИЙ

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

Обнаружено тушение фотопроводимости в твердых растворах кремний—германий n - и p -типа, легированных цинком. Полученные результаты объясняются с помощью модели метастабильного глубокого центра, в рамках которой термическая и оптическая перезарядка дефекта сопровождается его туннелированием между позициями различной симметрии. Показано, что самокомпенсация одиночных центров цинка усиливается при увеличении процентного содержания германия в твердых растворах SiGe .

Цинк в кремнии представляет собой двойной акцептор, туннелирующий в процессе перезарядки между позициями различной симметрии: нейтральное состояние $D^0 = (\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Si}})^0$ и двукратно заряженное $D^{--} = (\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Si}})^{--}$ находятся соответственно в гексагональном и тетраэдрическом междоузлиях, а состояние $D^- = (\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Si}})^-$ имеет симметрию C_{2v} [1-3]. Соответствующая схема адиабатических потенциалов представлена на рис. 1. С помощью ЭПР и фотоемкостной спектроскопии было показано, что одиночный центр цинка в кремнии имеет отрицательный порядок акцепторных уровней в запрещенной зоне, вследствие чего частично самокомпенсируется в ходе negative-U реакции [1, 2]



В решетке кремния, однако, не удается достигнуть подобной стопроцентной компенсации из-за наличия потенциальных барьеров между позициями различных зарядовых состояний одиночного центра цинка, которые определяют его метастабильные свойства. В свою очередь известно, что увеличение процентного содержания германия в твердых растворах Si-Ge подавляет метастабильные свойства глубоких центров [4] и может быть сильным стимулятором negative-U реакции (1). В настоящей работе это показано на примере исследования самокомпенсации одиночных акцепторов цинка в твердых растворах кремний—германий различного состава.

Легирование монокристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0.005-0.03$) n - и p -типа производилось в условиях высокотемпературной диффузии цинка с последующей закалкой образцов в масле. Спектры фотопроводимости регистрировались в условиях варьирования величины внешнего электрического поля. Экспериментальные результаты представлены на рис. 2, 3.

В образцах Si-Ge $\langle \text{Zn} \rangle$ n -типа обнаружено характерное тушение фотопроводимости при $h\nu = 1$ эВ (рис. 2). Данный эффект усиливался при увеличении содержания германия, а также стимулировался внешним электрическим полем (рис. 2). Кроме того, увеличение электрического поля приводило к возрастанию фотопроводимости в образцах как n -, так и p -типа (рис. 2, 3). Однако в Si-Ge $\langle \text{Zn} \rangle$ p -типа тушения фотопроводимости при $h\nu = 1$ эВ не наблюдалось (рис. 3).

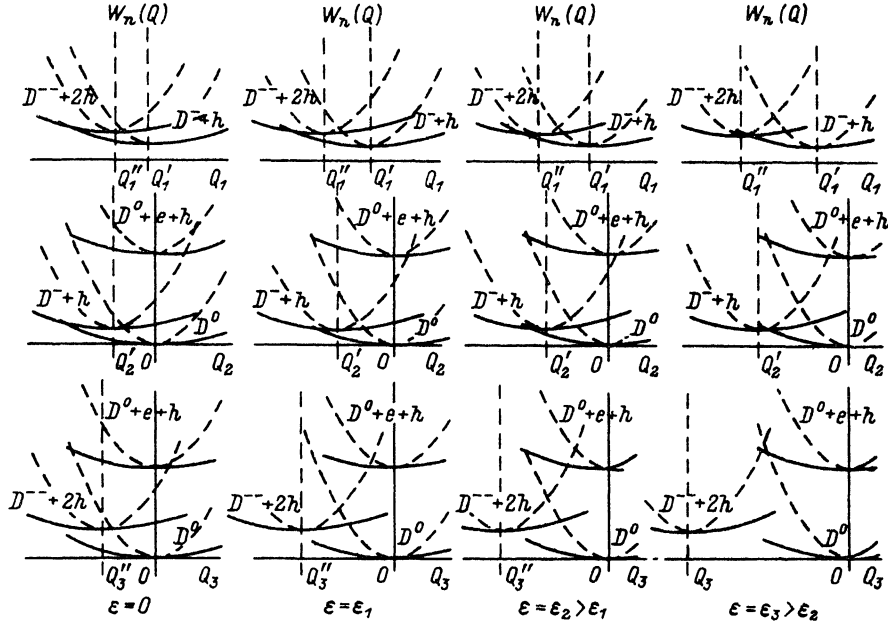
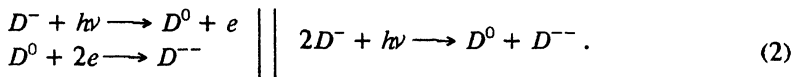


Рис. 1. Адиабатические потенциалы $W_n(Q)$ зарядовых состояний одиночного центра цинка в твердых растворах кремний—германий.

Штриховые линии — образцы с малым процентным содержанием германия, сплошные — образцы с большим процентным содержанием германия.

В рамках модели метастабильного глубокого центра (рис. 1) наблюдаемое тушение фотопроводимости при $h\nu = 1$ эВ обусловлено фотодиссоциацией остаточной концентрации D^- -центров:



Процесс (2) представляет собой оптический аналог negative-U реакции (1) и стимулирует уменьшение времени жизни неравновесных носителей [5, 6], вследствие чего наблюдается характерный провал в спектре фотопроводимости при оптимальной энергии фотоионизации D^- -центра (см. рис. 1, второй ряд).

Увеличение электрического поля усиливает метастабильные свойства одиночного центра цинка (рис. 1) и тем самым повышает эффективность реакции (2). Наиболее ярко это проявляется в образцах n -типа с малым содержанием германия (рис. 2, а). Исчезновение характерного провала при $h\nu = 1$ эВ в спектре фотопроводимости Si—Ge p -типа обусловлено, с одной стороны, меньшей концентрацией остаточных D^- -центров, а с другой — уменьшением их самокомпенсации в отсутствие донорных центров фосфора. Кроме того, изменение метастабильных свойств в условиях варьирования электрическим полем оказывает влияние на процесс спонтанной самокомпенсации одиночных центров цинка (1) [6]. Видно, что рост электрического поля увеличивает барьеры между адиабатическими потенциалами, соответствующими различным зарядовым состояниям одиночного центра цинка (рис. 1) [5, 6]. При этом снижается эффективность реакции (1) и тем самым увеличивается время жизни неравновесных носителей, что сопровождается увеличением фотопроводимости во всем спектре (рис. 2, 3).

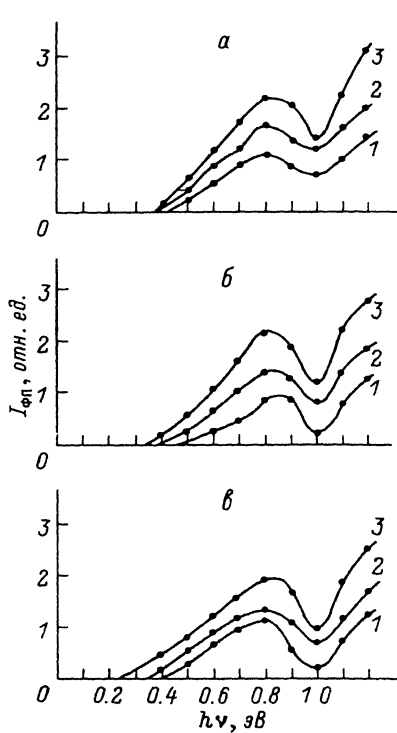
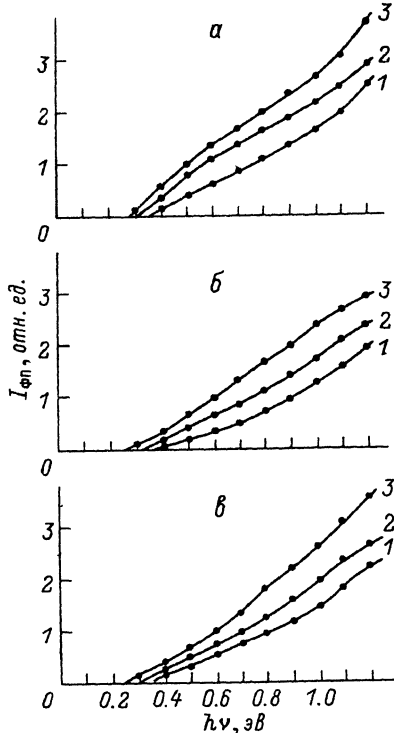


Рис. 2. Спектры фотопроводимости в образцах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (Zn) *n*-типа.
x: а — 0.005, б — 0.01, в — 0.003; ϵ , В/см: 1 — $4 \cdot 10^4$, 2 — $6.5 \cdot 10^4$, 3 — $1.2 \cdot 10^5$.

Рис. 3. Спектры фотопроводимости в образцах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (Zn) *p*-типа.
x: а — 0.01, б — 0.02, в — 0.03; ϵ , В/см: 1 — $4 \cdot 10^4$, 2 — $6.5 \cdot 10^4$, 3 — $1.2 \cdot 10^5$.

Таким образом, обнаруженные эффекты тушения и регенерации фотопроводимости в твердых растворах кремний—германий, содержащих одиночные центры цинка, зависят от процентного содержания германия и величины внешнего электрического поля. Показано, что метастабильные свойства одиночного центра цинка, которые могут усиливаться или ослабляться при изменении электрического поля и процентного содержания германия, управляют процессами фото- и спонтанной самокомпенсации в твердых растворах кремний—германий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Bagraev N. T. // *Hyperfine Interactions of Defects in Semiconductors* / Ed. by G. Langoush. Amsterdam, 1991.
- [2] Altink H. E., Bagraev N. T., Gregorkiewicz T., Ammerlaan C. A. J. // *Proc. XX Int. Conf. Phys. of Semicond.* / Ed. by E. M. Anastassakis, Ioannopoulos. N. Y., 1990. P. 589—594.
- [3] Altink H. E., Gregorkiewicz T., Ammerlaan C. A. J. // *Sol. St. Commun.* 1990. V. 71. N 2. P. 115—120.
- [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.
- [5] Bagraev N. T., Mashkov V. A., Kolchanova N. M., Polovtsev I. S. // *Mater. Sci. Forum.* 1989. V. 38-41. P. 1361—1366.
- [6] Bagraev N. T., Mashkov V. A. // *Sol. St. Commun.* 1988. V. 65. P. 1111—1115.