

РЕАКЦИИ ЦЕНТРОВ ЖЕЛЕЗА, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПИННИНГОМ УРОВНЯ ФЕРМИ В КРЕМНИИ *p*-ТИПА

Баграев Н. Т., Половцев И. С.

Исследованы метастабильные центры железа в кремнии *p*-типа. Показано, что метастабильность глубоких дефектов в кристаллах *p*-типа возникает за счет пиннинга уровня Ферми вблизи поверхности кристалла, который индуцирует диффузию неравновесных дырок в объем образца.

Туннелирование глубоких центров между узлом решетки и позицией off-центра в процессе оптической перезарядки индуцирует гашение и последующую регенерацию межзонной фотопроводимости в полупроводниках *n*-типа [1, 2]. Данные эффекты объясняются в концепции локальной отрицательной кор-

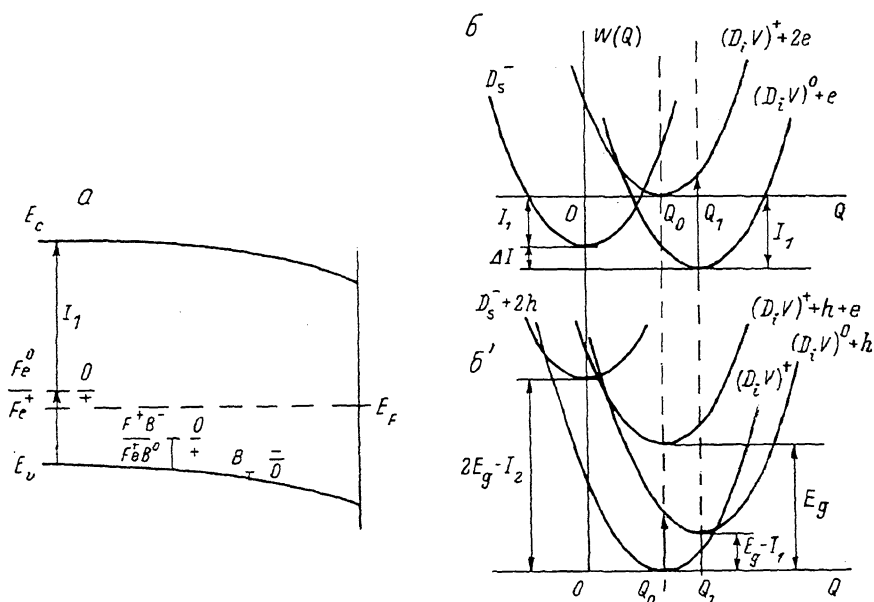
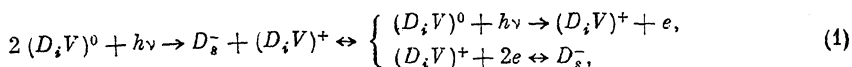


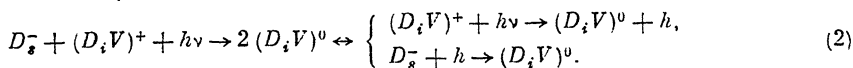
Рис. 1. Зонная схема (а) и адиабатические потенциалы (б, б') центров железа в условиях пиннинга уровня Ферми вблизи поверхности кремния *p*-типа.

б — двухэлектронные адиабатические потенциалы для переходов центр железа—зона проводимости в кремнии *n*- и *p*-типа; б' — двухэлектронные адиабатические потенциалы для переходов валентная зона—центр железа в кремнии *p*-типа.

реляционной энергии ($U < 0$) [l^{-3}] [$h\nu \geq I_1$; см. рис. 1, где $Fe^0 = (D_iV)^0$, $Fe^- = D_s^-$, $Fe^+ = (D_iV)^+$], благодаря чему стимулируется реакция перехода глубокого донорного центра $(D_iV)^0$ в метастабильное состояние D_s^-



которое ответственно за гашение межзонной фотопроводимости [1, 2]. Регенерация межзонной фотопроводимости в полупроводниках n -типа наблюдается в условиях распада метастабильных D_i^- -центров в ходе последующей накачки светом с энергией $E_g - I \leq h\nu < I_1$ (рис. 1) [1]:



В объеме полупроводниковых кристаллов p -типа при избытке концентрации $(D_iV)^+$ -центров подобные эффекты гашения практически не наблюдаются из-за оптических переходов валентная зона $-(D_iV)^+$ -состояние $[(D_iV)^+ - (D_iV)^0$ -переход], ответственных за процессы регенерации межзонной фотопроводимости. Однако вблизи поверхности полупроводника p -типа, где концентрация леггирующей примеси, как правило, сравнима с концентрацией исходной акцепторной примеси, вследствие пиннинга уровня Ферми (рис. 1) создаются благоприятные

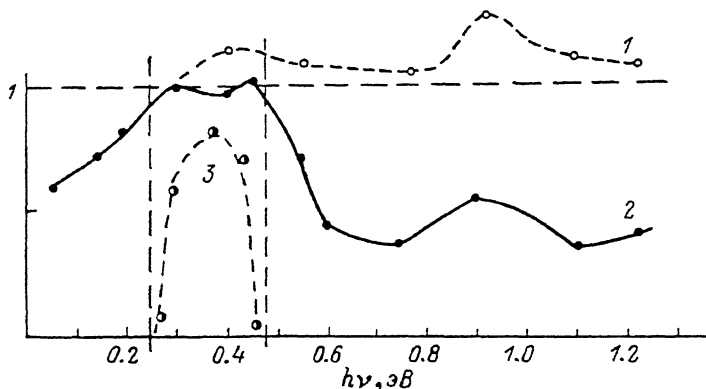


Рис. 2. Спектральные зависимости гашения (1, 2) и регенерации (3) межзонной фотопроводимости в кремнии p -типа, содержащем центры железа.

Предварительная оптическая накачка в течение: 1 — 10, 2 — 20 мин; 3 — последующая накачка в течение 20 мин после гашения монохроматическим светом с энергией $h\nu \geq 0.47$ эВ.

ные условия для диффузии неравновесных дырок в объем кристалла. Поэтому метастабильные свойства глубоких донорных центров вблизи поверхности полупроводников p -типа возникают даже при межзонной накачке.

В настоящей работе это продемонстрировано на примере исследований длительных изменений межзонной фотопроводимости в условиях предварительной накачки монохроматическим светом образцов кремния p -типа, легированных железом ($T=77$ К) (рис. 2). Длительная предварительная накачка светом с энергиями $h\nu \leq 0.25$ и $h\nu \geq 0.47$ эВ стимулировала эффекты гашения (рис. 2). Последующая накачка светом с $0.25 < h\nu < 0.47$ эВ приводила практически к полной регенерации сигнала межзонной фотопроводимости (рис. 2). Зарегистрированные эффекты можно объяснить в рамках вышеописанной концепции локальной отрицательной корреляционной энергии для глубокого центра.

В условиях предварительной накачки светом с энергией $h\nu \geq 0.79$ эВ становится возможной реакция (1) (рис. 1). В этом случае гашение межзонной фотопроводимости происходит так же, как и в кремнии n -типа, легированном железом [2]. Кроме того, в кремнии p -типа диффузия неравновесных дырок в объем кристалла стимулирует гашение межзонной фотопроводимости даже в условиях предварительной накачки светом с $h\nu \geq E_g$ (рис. 2). Предварительная накачка светом с энергией $0.47 \leq h\nu < 0.79$ эВ индуцирует гашение I_ϕ за счет переходов валентная зона $-D^+$ -центр (рис. 1, б')



с последующей диффузией возникающих в процессе данной реакции неравновесных дырок в объем кристалла. Реакция фотопозиции исходной акцепторной примеси



вносит некоторый вклад в гашение I_{ϕ} после предварительной накачки при $h\nu \leq 0.25$ эВ. Кроме того, в этом диапазоне энергий предварительной накачки гашение межзонной фотопроводимости связано с переходами валентная зона — положительно заряженный донорный комплекс Fe—B [4]



которые также сопровождаются диффузией неравновесных дырок в объем кристалла. Тепловые переходы валентная зона—акцептор и валентная зона— Fe^+B^0 оказывают существенное влияние на процессы гашения I_{ϕ} и управляют взаимосвязанностью реакций (4) и (5).

Реакция (5) может быть, однако, причиной оптической регенерации межзонной фотопроводимости (рис. 2) после гашения при $h\nu \geq 0.47$ эВ, поскольку в ходе последующей накачки при $0.25 < h\nu < 0.47$ эВ переходы $\text{Fe}^+\text{B}^0 \rightarrow \text{Fe}^+\text{B}^-$ приводят к возникновению «горячих» дырок в валентной зоне. Последние в свою очередь индуцируют реакцию восстановления Fe^+ -центров



и соответствующую регенерацию межзонной фотопроводимости (рис. 2).

Следует отметить, что при небольших временах предварительной накачки наблюдался даже относительный рост I_{ϕ} (рис. 2). Это свидетельствует о различной скорости реакций, ответственных за гашение (1), (3), (5) и регенерацию (5) межзонной фотопроводимости, и о сложной динамике туннелирования неравновесных дырок в объем кристалла.

Таким образом, в настоящей работе обнаружены эффекты гашения и регенерации межзонной фотопроводимости в кремнии *p*-типа, легированном железом, которые обусловлены пиннингом уровня Ферми вблизи поверхности кристалла.

Список литературы

- [1] Bagraev N. T., Mashkov V. A. // Sol. St. Commun. 1988. V. 65. N 10. P. 1111—1117.
- [2] Bagraev N. T., Лебедев А. А., Машков В. А., Половцев И. С. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 7. С. 2076—2084.
- [3] Bagraev N. T., Mashkov V. A. // Mater. Sci. Forum. 1986. V. 10-12. P. 435—443.
- [4] Graff K., Pieper H. // J. Electrochem. Soc. 1981. V. 128. N 3. P. 669—674.

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

Получена 9.03.1989
Принята к печати 15.05.1989