

ОПТИЧЕСКАЯ ПЕРЕЗАРЯДКА $D^{\circ} \rightarrow D^{-}$ И СПИНОВАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ В КРЕМНИИ

А.А.Кончиц, И.М.Зарицкий, Б.Д.Шанина

При $T \lesssim 6$ К обнаружено сильное падение интенсивности линий ЭП фосфора в закаленных образцах кремния при оптической подсветке, идентифицированное как перезарядка $D^{\circ} \rightarrow D^{-}$. Определена скорость спиновой релаксации (СР) электронов проводимости (ЭП) τ_s^{-1} в исследованных образцах.

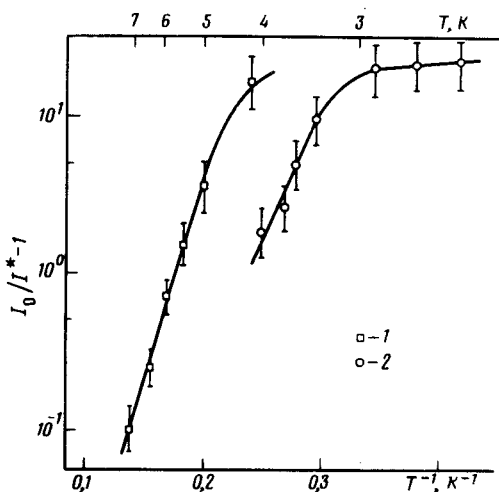
Влияние света на ЭП и СР парамагнитных центров (ПЦ) впервые исследовалось в Si : P [1], где была определена $\tau_s^{-1} \approx 10^8 \text{ сек}^{-1}$ для образца с концентрацией фосфора $N_p \approx 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $T = 1,25$ К и наблюдалось незначительное падение линий ЭП при подсветке, причина которого оставалась не выясненной.

В настоящей работе при $T = 1,8 \div 10$ К изучалось влияние межзонной оптической подсветки на ЭП и СР в образцах кремния с $N_p = 6 \cdot 10^{15}$ (1); $8 \cdot 10^{15}$ (2) и $2 \cdot 10^{16}$ (3) см^{-3} до и после термической закалки.

В исходных образцах наблюдалось незначительное падение линии ЭПР фосфора при включении света I^*/I_0 ($\approx 0,8; 0,7$ и $0,6$ для 1, 2 и 3 соответственно), где I_0 — интенсивность линии ЭПР в темноте.

Методом импульсного насыщения измерены времена "заплывания дыры" τ_1^* в линии ЭПР и релаксации всей линии τ_1^* при подсветке. Из соотношения $\tau_1^* (\tau_1^g)^{-1} \approx 1 + N_p^* U \tau_s^{-1}$, следующего из [2] при $\tau > \tau_s$ определены значения $\tau_s^{-1} \approx 7 \cdot 10^6$ (1); 10^8 (2) и $4 \cdot 10^8$ (3) сек $^{-1}$. Здесь U — вероятность обменного рассеяния [1], $\tau^{-1} = 10^6 \div 5 \cdot 10^7$ сек $^{-1}$ — скорость рекомбинации ЭП.

После термической закалки I^*/I_0 существенно уменьшилось для образцов 1 — 0,07 и 2 — 0,1 и незначительно для 3 — 0,4 при $T = 4,2$ К и мощности оптического возбуждения S_1 (рисунок). Температурная зависимость I^*/I_0 для образца 1 представлена на рисунке для двух значений S . Видно, что I^*/I_0 падает при понижении T , а также с ростом S .



Температурная зависимость интенсивности линии ЭПР в закаленном образце Si: P при межзонной подсветке. $N_p = 6 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, $1-S_1 \tau \approx 5 \cdot 10^7$ см $^{-3}$, $2-S_2 \tau \approx 1,5 \cdot 10^7$ см $^{-3}$

Время спада сигнала ЭПР при включении света ($t_{сп} \approx 1$ сек) близко к постоянной времени длинной экспоненты, которая имеется в нарастании концентрации ЭП n_e и обладает незначительным весом ($\approx 0,2$). После выключения света сигнал восстанавливается за время СР фосфора в темноте τ_1 .

τ_s^{-1} после закалки возрасла для всех образцов: $\tau_s^{-1} \approx 3 \cdot 10^8$ (1), $3 \cdot 10^8$ (2), $7 \cdot 10^8$ (3) сек $^{-1}$.

Падение линии ЭПР при подсветке может быть связано с нагревом спиновой системы ПЦ фосфора при обменном рассеянии на них поляризованных по спину ЭП [2], а также с перезарядкой нейтральных ПЦ фосфора $P^0 (D^0)$ в отрицательно заряженные центры $P^- (D^-)$ с захватом электрона [3]. Перезарядка $P^0 \rightarrow P^+$ при межзонной подсветке неэффективна из-за большой скорости захвата электронов P^+ центрами [4].

Решение системы кинетических уравнений для концентрации ЭП n_e и дырок n_h , нейтральных $N(D^0) \equiv N_p^*$ и заряженных $N(D^-)$ центров фосфора, нейтральных $N(A^0)$ и заряженных $N(A^+)$ центров захвата дырок совместно с уравнениями для релаксации спиновой поляризации ПЦ

фосфора и ЭП в стационарном случае приводит к следующему результату:

$$(I^*/I_0) = K_{\Pi} K_C. \quad (1)$$

Здесь $K_{\Pi} = [1 + RS \tau (b_-)^{-1}]^{-1}$ при $N(A^\circ) > N_p$; при $N(A^\circ) < N_p$ минимально достижимое значение $K_{\Pi}^{\min} = 1 - N(A^\circ)/N_p$ и $K_C^{-1} \approx 1 + \tau_s \tau^{-1}$ определяют падение линии за счет перезарядки $D^\circ \rightarrow D^-$ (K_{Π} и спинового нагрева (K_C); R — скорость захвата ЭП на D° , $b_- = b \exp(-E_i/kT)$ — скорость термической ионизации, E_i — энергия связи D^- центров.

Из сравнения (1) с экспериментом следует, что спиновый нагрев не играет существенной роли, поскольку для объяснения I^*/I_0 за счет K_C требуется, чтобы τ после закалки уменьшилось примерно на два порядка (для образца 2), в то время как в действительности τ падает не более, чем в три раза.

Следовательно, падение сигнала обусловлено перезарядкой $D^\circ \rightarrow D^-$. Это подтверждается также кинетикой спада сигнала при включении света. В случае спинового нагрева сигнал должен спадать со временем $\tau_1^* \approx 0,1$ сек. При перезарядке спад сигнала ЭПР и длинная экспонента в нарастании n_e должны, как это следует из теории, иметь одинаковые постоянные времена, что и наблюдается на эксперименте.

При выключении света происходит быстрый распад D^- центров [4] за время $t \ll \tau_1$. При этом спиновая система ПЦ фосфора нагревается, поскольку термический выброс электронов происходит с равновероятной скоростью для обеих проекций спина, а тепловой контакт ПЦ с решеткой через ЭП становится неэффективным из-за быстрого спада n_e . Поэтому сигнал ЭПР должен восстанавливаться за время τ_1 , что следует из решения кинетических уравнений и согласуется с экспериментом.

Из сравнения (1) с экспериментом (рисунок) определена $E_i \approx 4$ МэВ (для подсветки S_1). При снижении подсветки (S_2) E_i уменьшается ($E_i \approx 2,5$ МэВ). Эти данные близки к [3] и отличаются от [4], где получено $E_i = 0,78$ МэВ.

Отклонение от экспоненты при низких T (рисунок) и ограничение минимально возможного I^*/I_0 связано с особенностью поведения K_{Π} , следующего из (1) при $N(A^\circ) < N_p$. Если $N(A^\circ)/N_p \ll 1$, что, по-видимому, характерно для исходных образцов, $K_{\Pi} \approx 1$ (см. (1)) и падение сигнала будет незначительным, что и наблюдается экспериментально. Увеличение падения сигнала в закаленных образцах связано с образованием эффективных центров захвата дырок (например, дислокаций [5]).

Большие τ_s^{-1} в исходных образцах 2, 3, возрастание τ_s^{-1} после закалки, а также опыты по введению в исследуемые образцы других ПЦ показывают, что СР ЭП в них обусловлена обменным рассеянием на ПЦ. τ_s^{-1} в исходном образце 1 на порядок меньше известной ранее [1], но, по-видимому, еще не является собственной скоростью СР ЭП в кремнии.

Авторы благодарят С.М.Рябченко за полезное обсуждение.

Институт полупроводников
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 апреля 1979 г.

Литература

- [1] G.Feher E.A.Gere. Phys. Rev., 114,1245, 1959.
- [2] М.Ф.Дейген, В.Я.Братусь, Б.Е.Вугмейстер, И.М.Зарицкий, А.А.Золотухин, А.А. Кончиц, Л.С.Милевский. ЖЭТФ, 69, 2110, 1975.
- [3] Е.М. Гершензон, Г.Н.Гольцман, А.П.Мельников. Письма в ЖЭТФ, 14, 281, 1971; P.J.Dean, J.R.Haynes, W.F.Flood. Phys. Rev., 161, 711, 1967.
- [4] D.D.Thornton, A.Honig. Phys.Rev. Lett., 30, 909, 1973.
- [5] Р.А. Варданян. ЖЭТФ, 73, 2313, 1977.
-