

06:07:12

Гашение фотопроводимости в полупроводниках с пульсирующей рекомбинационной активностью

© С.Ж. Каражанов

Физико-технический институт НПО "Физика-Солнце", Ташкент

Поступило в Редакцию 6 ноября 1997 г.

Предложен новый механизм возникновения явления гашения фотопроводимости и отрицательного внутреннего фотоэффекта, обусловленных метастабильностью дефектов.

В настоящее время можно считать утвердившимся тот факт, что фото-, термо-, рекомбинационно- и экситонно-стимулированные трансформации метастабильных дефектов оказывают существенное влияние на упругие, тепловые, электронные и магнитные свойства твердых тел [1–9] и являются причиной многих явлений и эффектов, в частности образования диссипативных структур, фотовольтаического эффекта и т.д. Идея о возможности такого механизма возникновения названных выше двух эффектов впервые предложена в [1] и подтвердилась экспериментально [2–7]. Формирование диссипативных структур в [2] связано с фотостимулированной трансформацией метастабильных EL2-дефектов в арсениде галлия, в [3] — фотостимулированной генерацией метастабильных болтающихся связей в гидрированном аморфном кремнии, в [4] — инжекционной трансформацией зарядовых состояний метастабильных примесей марганца в кремнии, в [5] — фотостимулированным преобразованием метастабильных примесей галлия в теллуриде свинца, в [6] — фотостимулированными структурными превращениями в дисульфиде германия и т.д.

В данной работе будет показано, что метастабильность дефектов может также обуславливать явление гашения фотопроводимости и отрицательный фотоэффект. Поскольку проявление таких эффектов, в частности, в фотоэлектрических преобразователях солнечной энергии отрицательно сказывается на характеристике этих приборов и метастабильные дефекты имеются во многих полупроводниках, широко

используемые в современной фотоэнергетике (например, в кремнии, арсениде галлия, гидрированном аморфном кремнии и т.д.), представляет интерес исследование механизмов, приводящих к гашению фотопроводимости.

Рассмотрим полупроводник, содержащий метастабильные дефекты концентрацией N_R^t , незначительная часть которых N_R^a находится в рекомбинационно-активном состоянии, т.е. обменивается носителями заряда с обеими разрешенными зонами. Основная доля этих центров N_R^p находится в рекомбинационно-пассивном состоянии, т.е. носители заряда через них не рекомбинируют. Предполагается, что рекомбинационно-пассивные центры претерпевают фото-, рекомбинационно- и экситонно-стимулированную трансформацию, что способствует их переходу в рекомбинационно-активное состояние. Обратный переход центров осуществляется спонтанно.

Кинетика релаксации возбуждения такого полупроводника описывается системой

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = C_n N_R^a [n_1 f_R - n(1 - f_R)] + \Phi = -U_n + \Phi, & (1) \\ \frac{dp}{dt} = C_p N_R^a [(1 - f_R)p_1 - f_R p] + \Phi = -U_p + \Phi, & (2) \\ \frac{dN_R^a}{dt} = -\frac{N_R^a - N_{R0}^a}{\tau_N} + \Gamma, & (3) \\ N_R^t = N_R^a + N_R^p, \quad p = n + N_R^a f_R. & (4)-(5) \end{cases}$$

Здесь Φ — скорость фотогенерации свободных носителей заряда; Γ — скорость стимулированного преобразования рекомбинационно-пассивных центров в рекомбинационно-активные; n_1 , p_1 — статистические факторы Шокли–Рида, связанные с энергетическим уровнем E_R рекомбинационно-активного центра; f_R — степень заполнения N_R^a электронами.

Рассмотрим случай, когда активация пассивного центра стимулирована подсветкой. В таком случае в (3) слагаемое Γ можно представить в виде $\Gamma = \kappa \Phi^* N_R^p$, где Φ^* — число фотонов, падающих в единицу времени в единицу объема, осуществляющих фотостимулированный переход центра в рекомбинационно-активное состояние. При этом Φ и Φ^* могут соответствовать разным частотным диапазонам падающих фотонов.

В стационарных условиях ($dn/dt = dp/dt = de/dt$, $U_n = U_p = U$), линеаризуя (1)–(5), можно получить систему алгебраических уравнений для малых приращений концентрации свободных электронов $\Delta n = n - n_0$, дырок $\Delta p = p - p_0$, рекомбинационно-активных метастабильных центров $\Delta N_R^a = N_R^a - N_{R0}^a$, а также степени заполнения $\Delta f_R = f_R - f_0$, решая которую можно найти

$$\Delta n = \frac{\Phi [C_p N_{R0}^a f_0 + C_n(n_0 + n_1) + C_p(p_0 + p_1)] - C_n C_p \varkappa \Phi^* (N_R^t - N_{R0}^a) N_{R0}^a n_0 f_0 \tau_N (1 + \varkappa \tau_N \Phi^*)^{-1}}{C_n C_p N_{R0}^a [N_{R0}^a f_0 (1 - f_0) + (n_0 + n_1) f_0 + (p_0 + p_1) (1 - f_0)]}, \quad (6)$$

$$\Delta p = \frac{\Phi [C_n N_{R0}^a (1 - f_0) + C_n(n_0 + n_1) + C_p(p_0 + p_1)] - C_n C_p \varkappa \Phi^* (N_R^t - N_{R0}^a) N_{R0}^a \frac{p_1 (1 - f_0) \tau_N}{(1 + \varkappa \tau_N \Phi^*)}}{C_n C_p N_{R0}^a [N_{R0}^a f_0 (1 - f_0) + (n_0 + n_1) f_0 + (p_0 + p_1) (1 - f_0)]}, \quad (7)$$

$$\Delta N_R^a = \varkappa \tau_N \Phi^* N_{R0}^p (1 + \varkappa \tau_N \Phi^*)^{-1}. \quad (8)$$

Здесь n_0 , p_0 , N_{R0}^a и N_{R0}^p — концентрации электронов, дырок, рекомбинационно-активных и пассивных центров при термодинамически равновесном состоянии. Анализируя (6)–(8), нетрудно убедиться в том, что при $\varkappa \tau_N \Phi^* < 1$ Δn и Δp убывает, а ΔN_R^a возрастает с ростом скорости фотостимулированной трансформации метастабильных дефектов Φ^* , когда

$$\begin{aligned} & \Phi [C_p N_{R0}^a f_0 + C_n(n_0 + n_1) + C_p(p_0 + p_1)] \\ & > C_n C_p \varkappa \Phi^* (N_R^t - N_{R0}^a) \frac{N_{R0}^a n_0 f_0 \tau_N}{(1 + \varkappa \tau_N \Phi^*)}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \Phi [C_n N_{R0}^a (1 - f_0) + C_n(n_0 + n_1) + C_p(p_0 + p_1)] \\ & > C_n C_p \varkappa \Phi^* (N_R^t - N_{R0}^a) N_{R0}^a \frac{p_1 (1 - f_0) \tau_N}{1 + \varkappa \tau_N \Phi^*}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответственно время жизни носителей заряда τ

$$\tau = \frac{\Delta n}{U} = \frac{1}{C_p N_R} \frac{n_0 + n_1}{n_0 + p_0} + \frac{1}{C_n N_R} \frac{p_0 + p_1}{n_0 + p_0}, \quad (11)$$

найденное из (1)–(2) в стационарных условиях, убывает, что свидетельствует о развитии эффекта оптического гашения фотопроводимости. При высоких скоростях фотостимулированных преобразований метастабильных дефектов в рекомбинационно-активное состояние неравенства (9)–(10) не выполняются. Соответственно приращения концентрации электронов Δn (6) и дырок Δp (7) становятся отрицательными, что означает возникновение отрицательного фотоэффекта.

Следует отметить, что исследуемый эффект может также возникать как следствие рекомбинационно- и экситонно-стимулированных перестроек метастабильных дефектов. При этом рекомбинационно-пассивные центры переходят в рекомбинационно-активное состояние в результате воздействия на них энергии, выделяемой при безызлучательной рекомбинации электронов и дырок, а также аннигиляции экситонов. Система уравнений (1)–(5) проанализирована, полагая функцию Γ в (3) $\Gamma = \chi^* npN_R^p$ в первом случае и $\Gamma = \chi eN_R^p$ во втором случае. Для обоих случаев и получены условия возникновения гашения фотопроводимости и отрицательного фотоэффекта.

Рассматриваемое явление может иметь место также в результате влияния тепловых эффектов, когда восстановление рекомбинационной активности центра имеет термостимулированный характер. При этом полагаемое Γ в (3) следует рассматривать как функцию, возрастающую с ростом температуры кристалла. Тогда концентрация рекомбинационно-активных центров возрастает с ростом температуры, что сопровождается уменьшениями времени жизни и свидетельствует о возникновении эффекта температурного гашения фотопроводимости.

Известно, что при высоких температурах дефекты отжигаются. В такой области температур скорость термостимулированной активизации рекомбинационной способности Γ и время жизни τ_N метастабильных дефектов в (3) падают с ростом температуры кристалла, что приведет к спаду N_R^a и восстановлению фотопроводимости.

Таким образом, фото-, термо-, рекомбинационно- и экситонно-стимулированные трансформации метастабильных дефектов могут приводить к гашению фотопроводимости и отрицательному внутреннему фотоэффекту. При этом в условиях эффекта гашения время жизни носителей заряда τ убывает с ростом скорости преобразования метастабильных центров. Убывание времени жизни τ вызывает уменьшение

тока короткого замыкания J_{sc} и напряжения холостого хода V_{oc} фотоэлементов:

$$J_{sc} = q\Phi \cos h^{-1}(w/L), \quad V_{oc} \approx \frac{kT}{q} \ln [J_{sc}L(qD_p)^{-1} \operatorname{cotanh}(w/L)],$$

где $L = (D\tau)^{0.5}$ — диффузионная длина, D — коэффициент диффузии, w — длина базы. Поэтому в конечном итоге эффекты гашения приводят к уменьшению коэффициента полезного действия полупроводниковых фотопреобразователей.

Автор выражает благодарность проф. А.Ю. Лейдерман за полезные обсуждения данной работы.

Список литературы

- [1] *Karageorgy-Alkalaev P.M., Leiderman A.Yu.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1987. V. 100. N 1. P. 221–231.
- [2] *Буянова И.А., Савчук А.У., Шейнкман М.К.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 2. С. 40–43.
- [3] *Будагян Б.Г., Становов О.Н.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 12. С. 88–91.
- [4] *Аюпов К.С., Зикриллаев Н.Ф.* // ДАН РУз. 1992. № 8–9. С. 41–42.
- [5] *Любин В.М., Тихомиров В.К.* // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. В. 1. С. 25–28.
- [6] *Акимов Б.А., Брандт Н.Б., Албул А.В., Рябова Л.И.* // ФТП. 1997. Т. 31. В. 2. С. 133–136.
- [7] *Заячук Д.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 54. В. 7. С. 398–400.
- [8] *Манькин Э.А., Махмудов С.С.* // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. В. 4. С. 1312–1332.
- [9] *Емельянов В.И.* // Изв. АН. Сер. физ. 1996. Т. 60. В. 6. С. 121–144.