

Рекомбинационный механизм пьезофоторезистивного эффекта в компенсированных полупроводниках

© Б.М. Павлишенко[¶], Р.Я. Шувар

Львовский национальный университет им. Ивана Франко (физический факультет),
79005 Львов, Украина

(Получена 2 ноября 2004 г. Принята к печати 15 ноября 2004 г.)

Методами численного моделирования исследуется рекомбинационный механизм пьезофоторезистивного эффекта с учетом влияния компенсирующих примесей. Показана возможность усиления стационарным фотовозбуждением амплитуд переменных концентраций свободных носителей, индуцированных динамической деформацией полупроводника.

1. Введение

В условиях совместного воздействия на полупроводник переменной механической деформацией и стационарным фотовозбуждением возникает пьезофоторезистивный эффект (ПФРЭ), который состоит в усилении стационарным фотовозбуждением переменной составляющей проводимости полупроводника, индуцированной динамической деформацией [1,2]. Одним из возможных механизмов возникновения ПФРЭ может быть рекомбинационный механизм, обусловленный влиянием механической деформации на темпы рекомбинации неравновесных фотоносителей [3]. В последнее время большое внимание уделяется частным случаям теории рекомбинации Шокли–Рида–Холла [4–7]. В работе [4] в рамках этой теории исследуется влияние компенсирующих примесей на фотоэлектрические свойства полупроводника. Сообщается об эффекте резкого роста сопротивления, времени жизни и фотопроводимости с ростом концентрации глубоких примесей.

В данной работе теоретическими методами и методами численного моделирования исследуется рекомбинационный механизм ПФРЭ, а также влияние на данный механизм компенсирующих примесей.

2. Теоретическая модель

Для теоретического и численного анализа выберем модель полупроводника с простой структурой зон, одним уровнем глубоких рекомбинационных центров акцепторного типа в запрещенной зоне и одним уровнем мелких донорных примесей. Влияние деформации учитывается феноменологически через модуляцию энергетического положения краев зоны проводимости E_c и валентной зоны E_v :

$$E_{c,v}(t) = E_{c,v} + \Delta E_{c,v} \cos \omega t, \quad (1)$$

где ω — частота переменной деформации, $\Delta E_{c,v}$ — амплитуды переменной деформации краев зон. Фотовозбуждение учитывается через темп оптической генерации неравновесных носителей.

[¶] E-mail: pavlsh@yahoo.com

В рамках теории рекомбинации Шокли–Рида–Холла [8] уравнения непрерывности для свободных и локализованных носителей рассматриваются в виде

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= G + C_{nr}N_r n_1 - C_{nr}P_r n, \\ \frac{dp}{dt} &= G + C_{pr}P_r p_1 - C_{pr}N_r p, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$n_1 = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_r}{kT}\right], \quad p_1 = N_v \exp\left[-\frac{E_r - E_v}{kT}\right],$$

$$N_r + P_r = M_r,$$

n, p — концентрации свободных носителей; C_{nr}, C_{pr} — коэффициенты захвата носителей на рекомбинационный уровень; N_r, P_r — концентрации электронов и дырок, локализованных на рекомбинационных центрах; M_r — концентрация рекомбинационных центров; G — темп оптической генерации неравновесных носителей заряда; E_r — энергетическое положение рекомбинационного уровня; N_c, N_v — эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне соответственно; T — температура, k — постоянная Больцмана. Уравнения (2) дополняются уравнением электронейтральности. Анализ этих уравнений проведен по первой гармонике методом комплексных амплитуд в области стационарного фотовозбуждения в линейном приближении по тензору деформации. В результате получены уравнения для комплексных амплитуд переменных концентраций неравновесных носителей

$$\begin{aligned} i\omega \Delta n &= -\frac{\Delta n}{\tau_n} + \pi_n, \\ i\omega \Delta p &= -\frac{\Delta p}{\tau_p} + \pi_p, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \pi_n &= \frac{N_r(N_r + p + p_1 + i\omega C_{pr}^{-1})\Delta n_1 + P_r(n + n_1)\Delta p_1}{C_{pr}^{-1}N_r + C_{pr}^{-1}(n + n_1) + C_{nr}^{-1}(p + p_1) + (C_{nr}C_{pr})^{-1}i\omega}, \\ \pi_p &= \frac{P_r(P_r + n + n_1 + i\omega C_{nr}^{-1})\Delta p_1 + N_r(p + p_1)\Delta n_1}{C_{pr}^{-1}N_r + C_{pr}^{-1}(n + n_1) + C_{nr}^{-1}(p + p_1) + (C_{nr}C_{pr})^{-1}i\omega}, \\ \Delta n_1 &= -\frac{\Delta E_c - \Delta E_r}{kT} n_1, \quad \Delta p_1 = -\frac{\Delta E_r - \Delta E_v}{kT} p_1. \end{aligned}$$

В последующем анализе рассматривается квазистационарная область частот, для которой выполняется условие $\omega \ll \tau_n^{-1}, \tau_p^{-1}$. С ростом фотовозбуждения заселенность рекомбинационного уровня достигает насыщения и амплитуды $\Delta n, \Delta p$ асимптотически приближаются к значениям

$$(\Delta n)_{\text{sat}} = (\Delta p)_{\text{sat}} = \frac{C_{nr}\Delta n_1 + C_{pr}\Delta p_1}{C_{nr} + C_{pr}}. \quad (4)$$

Анализ зависимостей $\Delta n(G)$ (люкс-амперных характеристик) проводился методом численного моделирования. Значения стационарных концентраций свободных и локализованных носителей, которые входят как параметры в уравнения (3), находились путем численного решения системы уравнений (2) в стационарном случае. Для численных расчетов была взята модель полупроводника с реалистичными параметрами: ширина запрещенной зоны $E_g = 0.8$ эВ, энергия уровня $E_r = 0.4$ эВ и концентрация рекомбинационных центров $M_r = 10^{16}$ см $^{-3}$; коэффициенты захвата носителей на рекомбинационные центры $C_{nr} = 10^{-12}$ см $^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $C_{pr} = 10^{-11}$ см $^3 \cdot \text{с}^{-1}$; глубина залегания донорной примеси $E_d = 0.1$ эВ; амплитуда деформации энергетического положения краев зон $\Delta E = 10^{-5}$ эВ; температура полупроводника $T = 300$ К. Для определенности расчеты приведены для электронной составляющей проводимости, но характер зависимостей справедлив также и для дырочной составляющей.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены рассчитанные люкс-амперные характеристики пьезофоторезистивного эффекта для принятой модели полупроводника при разных концентрациях мелкой донорной примеси N_d . Рассмотрим механизм усиления стационарным фотовозбуждением амплитуд переменной составляющей неравновесных носителей Δn , возникающих под воздействием переменной деформации (кривые 1, 2). С ростом фотовозбуждения изменяется концентрация локализованных на

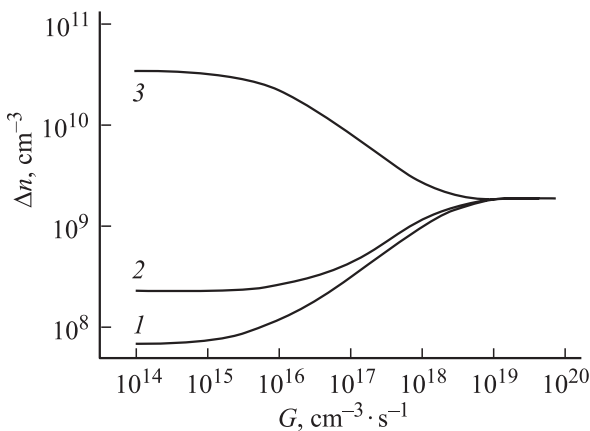


Рис. 1. Зависимость амплитуды переменной концентрации (Δn) от темпа оптической генерации неравновесных носителей (G) при разных концентрациях компенсирующих донорных примесей N_d , см $^{-3}$: 1 — 10^{14} , 2 — 10^{15} , 3 — 10^{16} .

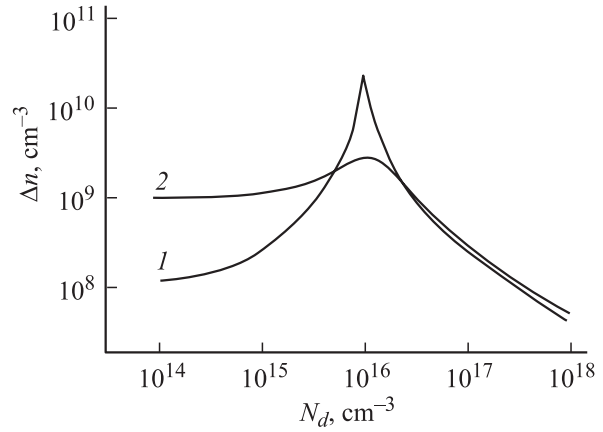


Рис. 2. Зависимость амплитуды переменной концентрации (Δn) от концентрации компенсирующих донорных примесей (N_d) при разных уровнях темпа оптической генерации неравновесных носителей G , см $^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$: 1 — 10^{16} , 2 — 10^{18} .

рекомбинационном уровне электронов. В уравнениях (1) влияние деформации учитывается в множителях n_1, p_1 , входящих в составляющую, которая описывает темп термической генерации. Таким образом, происходит модуляция переменной деформацией темпа термической генерации локализованных на рекомбинационных центрах носителей в зоны. С ростом концентрации локализованных электронов под воздействием стационарного фотовозбуждения растет темп термической генерации, который описывается членом $C_{nr}N_r n_1$ в уравнениях (1), и, как следствие, комплексные амплитуды переменных концентраций Δn . При больших уровнях фотовозбуждения амплитуда Δn выходит на насыщение в результате насыщения заселенности рекомбинационного уровня. Качественно иной характер имеет кривая 3 на рис. 1, рассчитанная для концентрации компенсирующей донорной примеси, равной концентрации рекомбинационных центров акцепторного типа. В этом случае все электроны с донорных центров вследствие условия электронейтральности локализуются на рекомбинационных центрах, при этом темп термической генерации, пропорциональный концентрации локализованных электронов, имеет максимальное значение. В области больших уровней фотовозбуждения с ростом стационарных концентраций свободных неравновесных носителей происходит некоторое опустошение рекомбинационных центров, уход локализованных на них электронов, и вследствие этого уменьшается величина комплексной амплитуды. На рис. 2 приведены зависимости комплексной амплитуды от концентрации компенсирующей донорной примеси для двух уровней фотовозбуждения. На приведенных кривых наблюдается один максимум в области полной компенсации, когда концентрация донорной примеси равна концентрации рекомбинационных центров акцепторного типа. Для области донорных концентраций, больших концентрации рекомбинационных центров, характерен фактически одинаковый ход кривых при разных уровнях фотовозбуждения. В этой

области фотовозбуждение слабо влияет на перераспределение локализованных на рекомбинационном уровне электронов.

4. Заключение

В рамках модели рекомбинации Шокли–Рида–Холла показано, что один из механизмов возникновения пьезофоторезистивного эффекта может быть обусловлен влиянием переменной механической деформации на темп термической генерации локализованных на рекомбинационных центрах носителей в зоны вследствие модуляции деформацией энергетического положения краев зон. Эффект усиления фотовозбуждением амплитуды переменных концентраций обусловлен влиянием стационарного фотовозбуждения на заселенность рекомбинационного уровня. При точно компенсирующих концентрациях примеси практически исчезает зависимость амплитуды переменной концентрации от стационарного фотовозбуждения вследствие полного заполнения рекомбинационного уровня носителями из компенсирующих примесных центров.

Список литературы

- [1] Г.Д. Гусейнов, Г.Б. Абдулаев. Докл. АН СССР, **208** (5), 1052 (1973).
- [2] A. Mahapatra, P.G. Kornreich, S.T. Kowel. Phys. Rev. B, **18** (6), 2766 (1978).
- [3] Й.М. Стахира, Р.Я. Шувар, Б.М. Павлищенко. УФЖ, **40** (7), 723 (1995).
- [4] С.Ж. Каражанов. ФТП, **34** (8), 909 (2000).
- [5] И.Н. Воловичев, Ю.Г. Гуревич. ФТП, **35** (3), 321 (2001).
- [6] С.В. Кузнецов. ФТП, **35** (10), 1244 (2001).
- [7] А.П. Одринский. ФТП, **38** (3), 310 (2004).
- [8] В.Е. Лашкарев, А.В. Любченко, М.К. Шейнкман. *Неравновесные процессы в фотополупроводниках* (Киев, Наукдумка, 1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Recombination mechanism of the piezophotorestrictive effect in compensated semiconductors

B.M. Pavlyshenko, R.Ya. Shuvar

Ivan Franko Lviv National University
(Physical Department),
79005 Lviv, Ukraine

Abstract A recombination mechanism of the piezophotorestrictive effect, taking into account the compensating impurity, is analyzed by numerical modelling methods. The ability to amplify the alternating concentration of free carries amplitudes by stationary optical excitation was shown.