

ЧАСТОТНАЯ И КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТИ ФОТООТКЛИКА ПОЛУПРОВОДНИКА С ДРЕЙФОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ

Горлей П.Н., Горлей П.П., Чупыра С.Н.

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

58012, ул. Коцюбинского, 2, г. Черновцы, Украина

e-mail: semicon@chnu.cv.ua

1. Введение

Фоторефрактивный аналог эффекта Ганна, предсказанный в [1], дает возможность дополнительного регулирования скорости распространения электрических доменов в полупроводниках с помощью изменения параметров падающего лазерного излучения.

В данной работе представлены частотные и концентрационные зависимости фотоотклика полупроводника под действием малых временных возмущений сигнала в кристалле ограниченного объема, работающего в режиме генератора тока при наличии фото-Ганн-эффекта.

2. Теоретическая модель

Рассмотрим объемный полупроводник со структурой n-GaAs, в котором присутствуют глубокие донорные и акцепторные уровни (с концентрациями центров, соответственно, N_D и N_A). Предполагается, что на полупроводник воздействует два квазимонохроматических луча света с частотами колебаний волн ω_0 и $\omega_0 + \Omega$ ($\Omega \ll \omega_0$), в результате чего создается движущаяся интерференционная картинка, интенсивность которой описывается зависимостью

$$I(z, t) = I_0 [1 + m \cos (kz + \Omega t)], \quad (1)$$

Одномерная система уравнений в безразмерных переменных, которая описывает динамику носителей заряда в полупроводнике при таких условиях, имеет следующий вид [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_1}{\partial \tau} &= a f(x, \tau)(b - y_1) - y_1 y_2 \\ \frac{\partial y_2}{\partial \tau} &= \frac{\partial y_1}{\partial \tau} + \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left[y_2 v(y_3) + \beta \frac{\partial y_2}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial y_3}{\partial x} &= - \frac{1}{\alpha \beta} (y_2 - y_1 + 1) \end{aligned} \quad (2)$$

где $\tau = \gamma N_A t$, $x = \varepsilon \varepsilon_0 E_s \gamma z / eD$, $y_1 = N_D^i / N_A$, $y_2 = n / N_A$, $y_3 = E / E_s$, $a = sI_0 / \gamma N_A$, $b = N_D / N_A$, $\alpha = \varepsilon \varepsilon_0 E_s v_s / eDN_A$, $\beta = \varepsilon \varepsilon_0 E_s \gamma / e v_s$, $k = eDk / \varepsilon \varepsilon_0 E_s \gamma$, $\omega_0 = \Omega / \gamma N_A$, $f(x, \tau) = 1 + m \cos (kx + \tau)$. $v = v(y_3) / v_s = y_3 (1 + Ay_3^3) / (1 + Ay_3^4)$ - безразмерная скорость дрейфа [1]. Здесь s - поперечное сечение фотоионизации, γ и D - коэффициенты рекомбинации и диффузии соответственно, e - величина заряда электрона, ε_0 и ε - диэлектрическая проницаемость вакуума и полупроводника соответственно, v_s - значение насыщения скорости движения электронов, E_s - напряженность поля насыщения, A параметр, зависящий от материала. Считалось, что коэффициенты D , s и γ не зависят от величины напряженности электрического поля и пространственных координат.

В [2] показано, что стационарные пространственно-однородные ($x \rightarrow \infty$, $\tau \rightarrow \infty$, $m = 0$) решения системы уравнений (2) y_{10} и y_{20} имеют вид:

$$y_{10} = 0.5(\sqrt{(a-1)^2 + 4ab} - (a-1)), \quad y_{20} = 0.5(\sqrt{(a-1)^2 + 4ab} - (a+1)). \quad (3)$$

Стационарное значение напряженности электрического поля $y_{30} > 0$ в середине образца при заданной плотности электрического тока j_0 , протекающего через образец, находят как решение уравнения $j_0 = y_{20}v(y_{30})$.

Пусть интенсивность внешнего освещения (параметр a) и протекающий в полупроводнике ток (j_0) испытывают небольшие временные возмущения [3]:

$$a(\tau) = a + \delta a \cdot \exp(-i\omega\tau), \quad j(\tau) = j_0 + \delta j \cdot \exp(-i\omega\tau), \quad (4)$$

где ω - частота возмущений. В таком случае концентрация носителей заряда и величина напряженности электрического поля в образце также будут ощущать небольшие изменения:

$$y_n = y_{n0} + \delta y_n \cdot \exp(-i\omega\tau), \quad (n = 1..3), \quad (5)$$

где $\delta y_n = f_n(x)$ не зависит от времени.

В работе показано, что фотоотклик полупроводника на такие возмущения имеет следующий вид:

$$\frac{\delta j}{\delta \Phi} = a_1(b - y_{10}) \left\{ (Z_L + Z_R) \cdot \left(\frac{y_{20}}{\beta} \frac{\partial v}{\partial y_{30}} - i\omega \right) \cdot (a + y_{10} + y_{20} - i\omega) \right\}^{-1} \times \left\{ 1 - \left[a_1 l (1 + (\lambda_1 - \lambda_2)^{-1} (\lambda_1 (e^{\lambda_1 l} - 1)^{-1} - \lambda_2 (e^{\lambda_2 l} - 1)^{-1})) \right]^{-1} \right\} \quad (6)$$

где Z_R и Z_L - соответственно импедансы образца и внешнего сопротивления, l - безразмерная длина образца, λ_1 и λ_2 - параметры, сложным образом зависящие от параметров образца и параметров y_{n0} , а Φ - вариация полного числа квантов света, поглощаемых во всем объеме полупроводника в единицу времени и вызывающих возбуждение электронов с донорного уровня в зону проводимости.

3. Результаты и обсуждение

Как видно из (6), фотоотклик исследуемой системы сложным образом зависит от интенсивности падающего лазерного освещения, степени компенсации примесей b , плотности тока j_0 , длины образца l и частоты модуляции ω . В граничном случае «длинного» образца ($l \gg 1$) формула (6) упрощается:

$$\frac{\delta j}{\delta \Phi} = a_1(b - y_{10}) \frac{\beta}{l} \tau_0 \left\{ \left(1 + \frac{Z_L}{R_0} (1 - i\omega\tau_1) \right) \cdot (1 - i\omega\tau_0) \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где $\tau_0^{-1} = a + y_{10} + y_{20}$, $\tau_1^{-1} = \frac{y_{20}}{\beta} \frac{\partial v}{\partial y_{30}}$, $R_0 = \frac{\tau_1}{C_0}$, $C_0 = \frac{\beta}{l}$.

Выражение (7) характерно для электрической цепи, состоящей из параллельных активного сопротивления R_0 и емкости C_0 , подсоединенных последовательно к нагрузке с импедансом Z_L . Следует отметить, что (7) содержит коэффициент $(b - y_{10})$, отображающий степень компенсации образца. Из (7) следует, что фотоотклик падает, как только частота превысит либо обратное время захвата носителей глубокими примесями τ_0^{-1} , либо обратное время электрического переходного процесса τ_1^{-1} , характерного для цепи.

Анализ выражения (7) для произвольных значений импеданса Z_R очень сложен и поэтому нами рассмотрен граничный режим генератора тока, когда $|Z_R \ll Z_L|$. В этом случае вариации тока δj и напряжения δV связаны законом Кирхгофа $Z_L \cdot \delta j + \delta V = 0$, так что

$$\operatorname{Re} \frac{\delta V}{\delta \Phi} = (b - y_{10}) \frac{v(y_{30}) \tau_0}{l} \tau_1 K \frac{1 - \omega^2 \tau_0 \tau_1 - \Lambda \omega (\tau_0 + \tau_1)}{(1 + \omega^2 \tau_0^2)(1 + \omega^2 \tau_1^2)},$$

$$\operatorname{Im} \frac{\delta V}{\delta \Phi} = (b - y_{10}) \frac{v(y_{30}) \tau_0}{l} \tau_1 K \frac{\Lambda (1 - \omega^2 \tau_0 \tau_1) + \omega (\tau_0 + \tau_1)}{(1 + \omega^2 \tau_0^2)(1 + \omega^2 \tau_1^2)}.$$
(8)

где K и Λ - сложные функции, зависящие от характеристического времени релаксации, параметров материала, длины образца и интенсивности освещения.

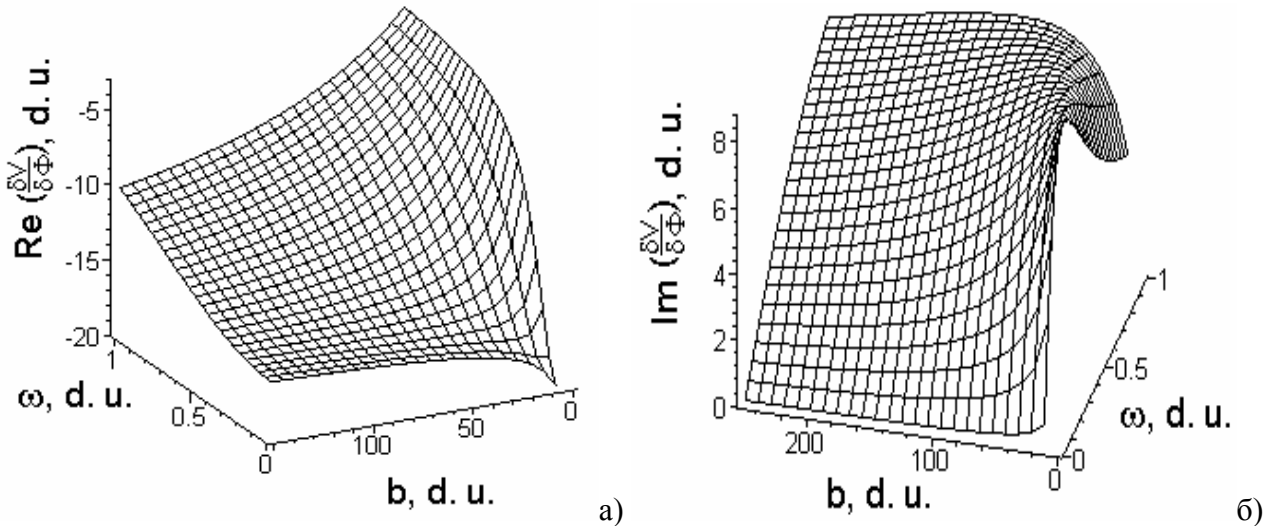


Рис. 1. Частотная и концентрационная зависимости фотоотклика длинного образца в режиме генератора тока при $y_{30}=3$, $a=0.2$.

На рис. 1 показана частотная и концентрационная зависимости фотоотклика образца, рассчитанных по формулам (8). Видно, что увеличение частоты возмущений освещения при малых степенях компенсации для действительной части фотоотклика сначала приводит к резкому возрастанию (по абсолютному значению), а затем – с увеличением ω наступает насыщение. Увеличение степени компенсации приводит к более плавному изменению частотной зависимости действительной части фотоотклика. Концентрационная зависимость мнимой части фотоотклика при малых степенях компенсации ведет себя иначе: при небольших значениях ω с ростом частоты гиперболически возрастает, затем – переходит через максимум и падает. При больших степенях компенсации она является возрастающей функцией частоты. Таким образом, изменяя степень компенсации образца, можно управлять частотной зависимостью фотоотклика образца.

Список литературы

- [1] M. Segev, B. Collings, D. Abraham, *Physical Review Letters* 76, 3798-3801 (1996)
- [2] P. M. Gorley, P. P. Horley, J. Gonzalez-Hernandez, Yu. Vorobiev, *Materials Science and Engineering* B88, 286-291(2002)
- [3] V. L. Bonch-Bruevich, I. P. Zvyagin, A. G. Mironov. *Domain electric instability in the semiconductors* (Nauka, Moscow, 1972).