Тензочувствительность p–n-перехода при освещении

© Г. Гулямов*, А.Г. Гулямов*•¶

* Наманганский инженерно-педагогический институт,
160103 Наманган, Узбекистан
• Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан,
100084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 29 мая 2014 г. Принята к печати 4 сентября 2014 г.)

Рассмотрено влияние света на тензочувствительность p–n-перехода. Показано, что тензочувствительностью освещенного p–n-перехода можно управлять постоянной деформацией ε_0, частотой света ω и ее интенсивностью I_0. Установлено, что вблизи критических точек под действием деформации коэффициент поглощения может сильно измениться и вследствие этого коэффициент тензочувствительности p–n-перехода может принимать аномально большие значения.

1. Введение

Рассмотрим изменение тока в полупроводнике при приложении деформации. Изменение тока при воздействии деформации вызывается изменением энергетического спектра полупроводника [1]. При поглощении света появляется фототок δj. Этот ток зависит от коэффициента поглощения α и интенсивности I света [2]. Это изменение сильно влияет на коэффициент поглощения света. Таким образом, с помощью деформации можно управлять поглощением света и, следовательно, изменением фототока через полупроводник. Коэффициент поглощения особенно сильно изменяется вблизи края фундаментального поглощения и других критических точек, соответствующих сингулярности плотности состояний [2]. Цель работы заключается в исследовании влияния освещения на тензочувствительность p–n-перехода.

2. Теоретический расчет

Рассмотрим влияние света на тензочувствительность p–n-перехода. При поглощении света p–n-переходом полный ток j состоит из темнового тока j_d и фототока j_I:

$$j = j_d - j_I = j_s\left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1\right) - j_I. \qquad (1)$$

Здесь $j_I = e f_S \beta$ — фототок, g_S — темп генерации пар; β — доля фотодырок, дошедших до перехода без рекомбинации; g_S — темп генерации $g_S = \frac{\alpha I}{\hbar\omega}$, где α — коэффициент поглощения света, $\hbar\omega$ — энергия квантов света, I — интенсивность света, U — напряжение, приложенное на p–n-переход. Ток насыщения определяется следующим выражением:

$$j_s = e\left(\frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d}\right) n_i^2 \quad n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}. \qquad (2)$$

Здесь $D_{n,p}$ и $L_{n,p}$ — коэффициенты и длины диффузии электронов и дырок, $N_{n,p}$ — концентрации акцепторов и доноров, $N_{c,p}$ — эффективные плотности состояний зоны проводимости и валентной зоны [2]

$$j_I = e g_s \beta = e\beta\,\frac{\alpha I}{\hbar\omega} \qquad (3)$$

— ток, обусловленный светом.

Рассмотрим режим генератора напряжения [3]. Пусть к диоду подано большое обратное смещение, в этом случае ток, обусловленный светом, будет равен

$$j = -j_s - j_I. \qquad (4)$$

Рассмотрим изменение тока при приложении деформации. Коэффициент поглощения особенно сильно изменяется вблизи критических точек, $|\nabla_p E| = \left(\mathbf{v}_c(p) - \mathbf{v}_v(p)\right)$, где соответствующие сингулярности плотности состояний и $\mathbf{v}_c(p) - \mathbf{v}_v(p) = 0$ [2].

Изменение темнового тока и фототока равно

$$\delta j = -\delta j_d - \delta j_I. \qquad (5)$$

При параболических законах дисперсии частотная зависимость коэффициента поглощения при прямых разрешенных переходах имеет вид [2]

$$\alpha(\omega) \propto (\omega - \omega_m)^{\frac{1}{2}}, \qquad (6)$$

где $\omega_m = \frac{E_g}{\hbar}$, E_g — ширина запрещенной зоны. Частотная зависимость коэффициента поглощения при прямых запрещенных переходах имеет вид

$$\alpha(\omega) \propto (\omega - \omega_m)^{\frac{3}{2}}. \qquad (7)$$

В общем виде коэффициент поглощения есть некоторая функция ω и $\omega - \omega_m : \alpha(\omega - \omega_m)$.

В нашем случае ω_m и E_g зависят от деформации ε. Положим $E_g(\varepsilon) = E_g(0) - \Delta\varepsilon$. Здесь Δ — потенциал деформации [2]. Тогда при приложении деформации изменение фототока равно

$$\delta j_I = e\beta\,\frac{I}{\hbar\omega}\,\delta\alpha, \qquad (8)$$

¶ E-mail: abdurasul.gulyamov@mail.ru

изменение коэффициента поглощения, обусловленное деформацией, равно

$$\delta\alpha = \frac{\partial\alpha}{\partial\omega_m}\frac{\partial\omega_m}{\partial\varepsilon}\,\delta\varepsilon. \tag{9}$$

Коэффициент тензочувствителности имеет вид [3]

$$K = \frac{\delta R}{R\delta\varepsilon}. \tag{10}$$

Здесь R — сопротивление полупроводника, δR — изменение сопротивления при воздействии деформации $\delta\varepsilon$. В режиме постоянного напряжения

$$j = \frac{U}{R}, \quad U = \text{const}, \quad R = \frac{U}{j}, \quad \frac{\delta R}{R} = -\frac{\delta j}{j}.$$

Здесь $j = (j_d + j_I)_{\varepsilon=0}$ — полный ток в отсутствие деформации. Если в отсутствие деформации $E_g(0) = \hbar\omega$ и $j_I = 0$, тогда полный ток равен темновому току — j_d. Тогда для коэффициента тензочувствительности получим

$$K = \frac{\delta j}{j_d\delta\varepsilon} = \frac{\delta j_d + \delta j_I}{j_d\delta\varepsilon} = \frac{\delta j_d}{j_d\delta\varepsilon} + \frac{\delta j_I}{j_d\delta\varepsilon} = K_d + K_d\frac{\delta j_I}{\delta j_d}, \tag{11}$$

где $K_d = \frac{\delta j_d}{j_d\delta\varepsilon}$ — коэффициент тензочувствительности в темноте, второй член $\frac{\delta j_I}{j_I\delta\varepsilon}$ — увеличение коэффициента тензочувствительности за счет освещения. Вычислим последний член (11)

$$\delta\alpha = \frac{\partial\alpha}{\partial\omega_m}\frac{\partial\omega_m}{\partial\varepsilon}\,\delta\varepsilon.$$

Учитывая (8)–(10), получим

$$K = \frac{\delta j_I}{j_d\delta\varepsilon} = \frac{e\beta\frac{I}{\hbar\omega}}{j_d}\frac{\partial\alpha}{\partial\omega_m}\frac{\partial\omega_m}{\partial\varepsilon}. \tag{12}$$

Коэффициент тензочувствительности, обусловленный светом, вблизи „красной границы“, когда $j_I < j_d$, составляет

$$K_I = \frac{\delta j_d}{j_d\delta\varepsilon} + \frac{\delta j_I}{j_d\delta\varepsilon} = \frac{\delta j_d}{j_d\delta\varepsilon}\left(1 + \frac{\delta j_I}{\delta j_d}\right) = K_d\left(1 + \frac{\delta j_I}{\delta j_d}\right)$$
$$\approx K_d\frac{\delta j_I}{\delta j_d} \gg K_d; \quad \frac{\delta j_I}{\delta j_d} \gg 1.$$

Отсюда следует, что при освещении полупроводника вблизи красной границы тензочувствительность сильно возрастает.

Согласно (8),

$$\delta j_I = e\beta\frac{I}{\hbar\omega}\,\delta\alpha = e\beta\frac{I}{h\omega}\frac{\partial\alpha}{\partial\omega_m}\frac{\partial\omega_m}{\partial\varepsilon}\,\delta\varepsilon.$$

Изменение темнового тока при деформации равно

$$\delta j_d = \delta j_s = \frac{\partial j_s}{\partial E_g}\frac{\partial E_g}{\partial\varepsilon}\,\delta\varepsilon.$$

Отсюда для (12) получаем следующее выражение:

$$\frac{\partial j_I}{\partial j_d} = \frac{e\beta\frac{I}{\hbar\omega}\frac{\partial\alpha}{\partial\omega_m}\frac{\partial\omega_m}{\partial\varepsilon}\delta\varepsilon}{\frac{\partial j_s}{\partial E_g}\frac{\partial E_g}{\partial\varepsilon}\delta\varepsilon}. \tag{13}$$

Учитывая, что $\omega_m = E_g/\hbar$, имеем

$$\frac{\partial\alpha}{\partial\omega_m}\frac{\partial\omega_m}{\partial\varepsilon} = \frac{\partial\alpha}{\partial E_g}\frac{\partial E_g}{\partial\varepsilon}, \tag{14}$$

тогда получим

$$\frac{\delta j_I}{\delta j_d} = \frac{e\beta\frac{I}{\hbar\omega}\frac{\partial\alpha}{\partial E_g}}{\frac{\partial j_s}{\partial E_g}} = f(E_g, \omega, \varepsilon, I). \tag{15}$$

Отсюда видно, что тензочувствительность при слабом освещении $(j_I < j_s)$ прямо пропорционально интенсивности освещаемого света I. В общем случае $\alpha(\omega, E_g) = \alpha(\hbar\omega - E_g)$ — некоторая функция $\hbar\omega - E_g$. Вблизи красной границы последнее выражение пропорционально деформации

$$\hbar\omega - E_g(0) + \delta\varepsilon = \Delta\varepsilon.$$

Поэтому

$$\frac{\partial\alpha}{\partial E_g} = \frac{\partial\alpha}{\Delta\partial\varepsilon}.$$

То же самое справедливо для тока насыщения:

$$\frac{\partial j_s}{\partial E_g} = e\left(\frac{D_n}{L_nN_a} + \frac{D_p}{L_pN_a}\right)n_i^2\left(-\frac{1}{kT}\right)$$
$$= j_s\left(-\frac{1}{kT}\right), \tag{16}$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial E_g} = -\frac{\partial\alpha(\hbar\omega - E_g)}{\partial(\hbar\omega - E_g)}. \tag{17}$$

Например, для разрешенных прямых переходов,

$$\frac{\partial\alpha}{\partial E_g} \propto \frac{1}{\omega}(\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}}, \tag{18}$$

а для запрещенных прямых переходов

$$\frac{\partial\alpha}{\partial E_g} \propto \frac{1}{\omega}(\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}}, \tag{19}$$

$$\frac{\delta j_I}{\delta j_d} = \frac{e\rho\frac{I}{\hbar\omega}\frac{\partial\alpha(\hbar\omega - E_g)}{\partial(\hbar\omega - E_g)}}{j_s\frac{1}{kT}} = \frac{e\beta I}{\hbar\omega}\frac{kT}{j_s}\frac{\partial\alpha(\hbar\omega - E_g)}{\partial(\hbar\omega - E_g)}. \tag{20}$$

Эта величина зависит от интенсивности света и легко управляется с помощью I.

Формулы (12) и (20) справедливы, когда $j_s > j_I$ и $\delta j_s > \delta j_I$, и выполняются при слабых интенсивностях и вблизи красной границы $\omega = \omega_m$.

Рассмотрим другой предельный случай, когда фототок больше темнового тока, $|j_I| > j_s$ и $\delta j_I > \delta j_s$, тогда из выражения (9) для коэффициента тензочувствительности получим

$$K_I = \frac{\delta j_I}{j_{I(\varepsilon=0)}\delta\varepsilon}. \tag{21}$$

Здесь δj_I — изменение фототока при деформации, $j_I(\varepsilon = 0)$ — фототок при отсутствии деформации

$$j_I = e\beta\,\frac{\alpha I}{\hbar\omega}, \quad \delta j_I = \frac{e\beta}{\hbar\omega}\,I\delta\alpha. \tag{22}$$

Тогда, согласно (21) и (22),

$$K_I = \frac{\delta\alpha}{\alpha_0\delta\varepsilon}. \tag{23}$$

Здесь $\alpha_0(\hbar\omega - E_g)_{\varepsilon=0}$ — коэффициент поглощения в отсутствие деформации; $\delta\alpha = \alpha(\varepsilon) - \alpha(0)$ — изменение коэффициента поглощения, при деформации

$$\delta\alpha = \alpha(\hbar\omega - E_g + \Delta\delta\varepsilon) - \alpha(\hbar\omega - E_g), \tag{24}$$

при слабой деформации $\delta\varepsilon \to 0$

$$\delta\alpha = \frac{\partial\alpha}{\partial(\hbar\omega - E_g)}\,\frac{\partial(\hbar\omega - E_g)}{\partial(\Delta\varepsilon)}\,\Delta\delta\varepsilon, \tag{25}$$

$$\left(\frac{\alpha(\hbar\omega - E_g + \Delta\delta\varepsilon)}{\partial(\hbar\omega - E_g)} - 1\right)\alpha_0(\hbar\omega - E_g) = \delta\alpha;$$

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha_0} = \left(\frac{\alpha(\varepsilon)}{\alpha_0(0)} - 1\right),$$

тогда тензочувствительность освещенного $p{-}n$-перехода для слабой деформации, согласно (21),

$$K_I = \frac{\partial \ln\alpha}{\partial(\hbar\omega - E_g)}\,\Delta. \tag{26}$$

Тензочувствительность освещенного полупроводника, когда $j_I > j_s$, равна

$$K = \frac{\delta\alpha}{\alpha\delta\varepsilon} = \frac{\partial\alpha}{\alpha\partial\varepsilon}.$$

Когда $\alpha = A(\hbar\omega - E_g + \Delta\delta\varepsilon)^n$, $\hbar\omega > E_g$, для коэффициента тензочувствительности освещенного полупроводника получим следующее выражение:

$$K = \frac{1}{\hbar\omega - E_g}\,\Delta. \tag{27}$$

Оценим значение K при $\hbar\omega - E_g = 0.01$ эВ, $\Delta = 10$ эВ: $K = \frac{10}{0.01} = 10^3$, при слабой деформации $\hbar\omega - E_g = 0.001$ эВ $K = \frac{10}{0.001} = 10^4$. Отсюда следует, что чем ближе частота света к красной границе, тем больше коэффициент тензочувствительности. Таким образом, можно получить аномально большую тензочувствительность вблизи красной границы освещенного полупроводника.

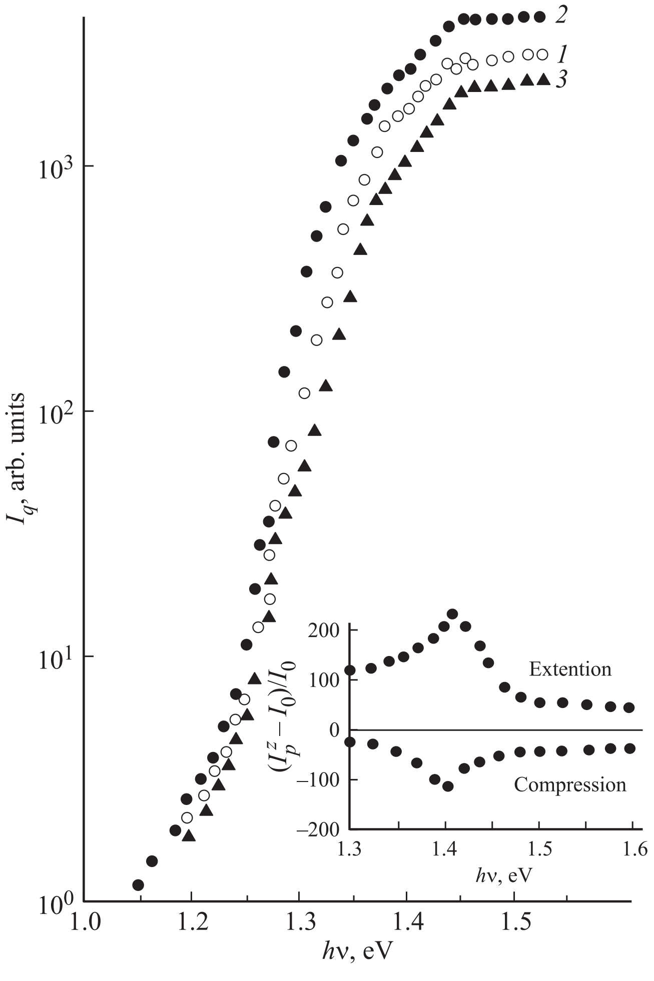
Если деформацию представить как постоянная деформация плюс малая деформация $\varepsilon = \varepsilon_0 = \delta\varepsilon$, тогда коэффициент тензочувствительности можно представить в виде

$$K = \frac{\partial \ln\alpha(\varepsilon_0)}{\partial(\hbar\omega - E_g - \Delta\varepsilon_0)}\,\Delta.$$

Отсюда следует, что тензочувствительность освещенного полупроводника зависит от постоянной деформации ε_0.

3. Сравнение с экспериментом

В работе [4] исследуются спектры тока короткого замыкания (I_q), поликристаллических пленок CdTe, легированных примесью Ag и обладающих фотовольтаическим свойством. Пленки выращивались методом термического испарения, в качестве подложки использовалось органическое стекло толщиной 0.1 мм, нагретое до 500 K. Толщина пленок составляла 0.7–1.2 мкм. Были получены результаты исследования спектральной зависимости фотоэдс, отнесенной к единице энер-



Зависимость тока короткого замыкания пленок CdTe : Ag под механической деформацией $\varepsilon = \pm 2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. На вставке показано изменение коэффициента фототензочувствительности пленок при растяжении и сжатии [4].

гии падающего излучения, при деформациях $\varepsilon = 0$ и $\varepsilon = \pm 2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед., которые приведены на рисунке.

Интересно то, что наибольшее значение K_v обнаруживается в области края собственного поглощения вблизи энергии фотона $h\nu = 1.3$ эВ при деформации растяжения $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. ($K_v = 800$) и $h\nu = 1.37$ эВ при сжатии $\varepsilon = -2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. ($K_v = 300$).

Этот эффект качественно может быть объяснен с помощью изменения ширины запрещенной зоны при деформации.

При частотах, меньших частоты фундаментального поглощения, коэффициент тензочувствительности образца должен слабо зависеть от частоты света, а при частотах, больших частоты фундаментального поглощения, за счет увеличения концентрации неравновесных носителей коэффициент тензочувствительности должен резко падать. Только вблизи края фундаментального поглощения должно наблюдаться максимальное значение коэффициента тензочувствительности. Эксперименты подтверждают эти выводы теории. Действительно, из рисунка видно, что тензочувствительность освещенного полупроводника при энергиях фотонов, близких к ширине запрещенной зоны $\hbar\omega = E_g$, достигает своего максимума. С ростом энергии фотонов при больших частотах тензочувствительность резко падает. Это также свидетельствует о справедливости построенной теории.

4. Заключение

Тензочувствительностью освещенного $p-n$-перехода можно управлять постоянной деформацией ε, частотой света ω и интенсивностью I. Вблизи критических точек под действием деформации коэффициент поглощения может сильно возрастать, и вследствие этого коэффициент тензочувствительности $p-n$-перехода может принимать аномально большие значения.

Список литературы

[1] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках (М., Наука, 1972).

[2] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников (М., Наука, 1977).

[3] А.Л. Полякова. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов (М., Энергия, 1978).

[4] С.М. Отажонов. Матер. конф. „Фотоэлектрические явления в полупроводниках-2004“ (Ташкент, 20–21 апреля 2004) с. 39.

Редактор Т.А. Полянская

Tensosensitivity $p-n$-junction under illumination

G. Gulyamov, A.G. Gulyamov*•*

* Namangan Engineering-Pedagogical Institute,
160103 Namangan, Uzbekistan
• Physicotechnical Institute,
Academy of Sciences of the Republic Uzbekistan,
100084 Tashkent, Uzbekistan

Abstract It is considered the influence of light on tensosensitivity $p-n$-junction. It is shown that tensosensitivity illuminated $p-n$-junction can be controlled constant deformation ε_0, frequency of light ω and its intensity I_0. It has been established that in the vicinity of the critical points under the action of deformation of the absorption coefficient, and can greatly change due to this tensosensitivity factor $p-n$-junction may receive an abnormally large value.