

## ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА

УДК 539.534.9

### НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ФОТОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ С $p$ - $n$ -ПЕРЕХОДАМИ

© 2013 г.

*В.Н. Азарев, В.И. Стафеев*

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

ett@phys.unn.ru

Поступила в редакцию 22.01.2013

Рассмотрен нестационарный эффект фотомагнитного напряжения, возникающий в многослойной структуре с предварительно заряженными  $p$ - $n$ -переходами. Показано, что максимальное нестационарное фотомагнитное напряжение может на несколько порядков превышать стационарное значение.

*Ключевые слова:* долговременная релаксация, фотомагнитное напряжение, многослойные структуры с  $p$ - $n$ -переходами.

Эффекты аномального фотонапряжения (АФН) и аномального фотомагнитного напряжения (АФМ) в поликристаллических пленках PbS, CdTe и других известны давно [1]. Для объяснения этих эффектов используются модели многослойных структур с  $p$ - $n$ -переходами (МС) [1–4] либо структур с межкристаллитными барьерами [5, 6]. Поскольку большие значения аномального фотонапряжения и фотомагнитного напряжения представляют интерес для создания фотовольтаических приборов, то были созданы и исследованы планарные МС на основе эпитаксиальных пленок PdS на изолирующих подложках [7]. Количество  $p$ - $n$ -переходов в них достигало 40, а минимальный период МС был 0.9 мкм. В настоящее время планарная технология позволяет уменьшить размеры отдельных  $p$ - и  $n$ -областей до нескольких микрометров, что сравнимо с размерами кристаллитов в поликристаллических пленках. При этом для осуществления АФН-эффекта потребуется дополнительное маскирование  $p$ - $n$ -переходов через один, а АФМ-эффект будет возникать и в немаскированных МС.

Мы рассмотрим планарную МС на изолирующей подложке. Размеры  $p$ - и  $n$ -областей пусть равны толщине МС. Параметры  $p$ - и  $n$ -областей примем для простоты одинаковыми. Максимальное стационарное фотомагнитное напряжение на многослойной структуре с  $2m$   $p$ - $n$ -переходами при больших уровнях освещения, когда токи световой генерации существенно превышают токи тепловой генерации, согласно [8] будет:

$$V_0 = 2m \frac{kT}{e} \frac{2}{\pi} \mu B, \quad (1)$$

где  $\mu$  – подвижность носителей заряда,  $B$  – магнитная индукция. При выводе формулы (1) предполагалось, что  $\alpha \gg d^{-1}$  и  $L \ll d$ , где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $L$  – длина диффузионного смещения,  $d$  – размер кристаллита.

Долговременная релаксация в МС определяется перезарядом барьерных емкостей  $p$ - $n$ -переходов [9]. Если на МС подано большое внешнее напряжение (много больше  $2mkT/e$ ), то, в основном, напряжение будет падать на обратно смещенных  $p$ - $n$ -переходах. При этом заряд, запасенный на их емкостях, существенно превышает заряд на емкостях прямо смещенных  $p$ - $n$ -переходов. Если концы МС после этого закоротить, то протекающим током смещения емкости  $p$ - $n$ -переходов перезаряжаются за короткое время таким образом, что на всех  $p$ - $n$ -переходах устанавливаются обратные смещения. Далее разряд барьерных емкостей определяется токами, текущими через обратно смещенные  $p$ - $n$ -переходы, поэтому время разряда на много порядков превышает время жизни неравновесных носителей заряда [9]. Если в процессе релаксации токи соседних  $p$ - $n$ -переходов различны по величине (например, из-за неоднородной засветки  $p$ - $n$ -переходов или из-за градиента температуры вдоль МС), то в процессе релаксации барьерные емкости разряжаются с разной скоростью, и на МС возникает нестационарное напряжение, величина которого зависит от первоначального заряда барьерных емкостей и разности токов разряда сосед-

них  $p$ - $n$ -переходов [10, 11]. Величина максимального нестационарного напряжения может достигать значений порядка  $m\phi$ , где  $\phi$  – контактная разность потенциалов между  $p$ - и  $n$ -областями, то есть порядка  $10^3 - 10^4$  В/см.

Рассмотрим МС с предварительно заряженными емкостями  $p$ - $n$ -переходов в режиме холостого хода. Пусть заряд, запасенный в  $n$ -области, составляет  $Q(0) \gg Q_0$ , где  $Q_0$  – равновесный заряд ионизованных доноров в слоях объемного заряда в  $n$ -области. В произвольный момент времени заряд на барьерных емкостях в  $n$ -области между  $j$ -м и  $(j+1)$ -м  $p$ - $n$ -переходами равен:

$$Q(t) = Q_j(t) + Q_{j+1}(t) = \frac{Q_0}{2} \sqrt{1 + \frac{|V_j(t)|}{\phi}} + \frac{Q_0}{2} \sqrt{1 + \frac{|V_{j+1}(t)|}{\phi}}, \quad (2)$$

где  $V_j, V_{j+1}$  – напряжения на  $j$ -м и  $(j+1)$ -м  $p$ - $n$ -переходах.

Если теперь концы МС разомкнуты, то в режиме холостого хода полное напряжение на МС будет:

$$V = m(|V_j| - |V_{j+1}|). \quad (3)$$

При освещении МС в поперечном магнитном поле изменение заряда на барьерных емкостях происходит под действием токов тепловой и световой генерации  $I_s, I_f$ , а также фотомагнитного тока  $I_{fm}$  [8]:

$$\frac{dQ_j}{dt} = -I_s - I_f - I_{fm} = -I_j, \quad (4)$$

$$\frac{dQ_{j+1}}{dt} = -I_s - I_f + I_{fm} = -I_{j+1}. \quad (5)$$

Токи  $I_f, I_{fm}$  определяются диффузией неравновесных носителей заряда в квазинейтральных областях. Поэтому до тех пор пока  $V_j, V_{j+1}$  отрицательны и превышают по абсолютной величине  $kT/e$ , токи  $I_f$  и  $I_{fm}$  можно считать постоянными, так как концентрация неравновесных дырок на границах с  $p$ - $n$ -переходами  $p(0), p(d) \ll p_n$ , где  $p_n$  – равновесная концентрация дырок в  $n$ -области. Если тепловая генерация дырок происходит также преимущественно в квазинейтральных областях, то  $I_s$  также можно считать постоянным. Когда в процессе релаксации отрицательные напряжения  $V_j, V_{j+1}$  уменьшаются до значений порядка  $kT/e$  или становятся положительными, токи  $I_{j+1}, I_j$  будут зависеть от времени.

Решая совместно уравнения (2)–(5), при условии постоянства токов  $I_{j+1}, I_j$ , получим полное напряжение на МС:

$$V(t) = \frac{4m\phi}{Q_0} [t^2(I_{j+1}^2 - I_j^2) - tQ(0)(I_{j+1} - I_j)]. \quad (6)$$

Максимальное фотонапряжение достигается при  $t=t_{\max}=Q(0)/2(I_j + I_{j+1})$ . При этом заряд на барьерных емкостях в  $n$ -области между  $j$ -м и

$(j+1)$ -м  $p$ - $n$ -переходами  $Q(t_{\max})=Q(0)/2$ . Поскольку  $Q(0) \gg Q_0$ , то напряжения  $V_j, V_{j+1}$  при  $t=t_{\max}$  остаются отрицательными и по абсолютной величине много больше  $kT/e$ , так что токи  $I_{j+1}, I_j$  действительно можно считать постоянными. Тогда максимальное фотонапряжение будет:

$$V_{\max} = m\phi \left( \frac{Q(0)}{Q_0} \right)^2 \left( \frac{I_j - I_{j+1}}{I_j + I_{j+1}} \right). \quad (7)$$

При  $I_f \gg I_s$  и  $\mu B \ll 1$ , то есть  $I_{fm} \ll I_f$ , для максимального фотомагнитного напряжения получим:

$$V_{\max} = m\phi \left( \frac{Q(0)}{Q_0} \right)^2 \left( \frac{I_{fm}}{I_f} \right) = m\phi \left( \frac{Q(0)}{Q_0} \right)^2 \left( \frac{2\mu B}{\pi} \right) \quad (8)$$

Отношение  $I_{fm}/I_f = 2\mu B/\pi$  согласно [8].

Максимальное значение нестационарного фотомагнитного напряжения (8) существенно превышает стационарное фотомагнитное напряжение (1):

$$\frac{V_{\max}}{V_0} = \frac{e\phi}{2kT} \left( \frac{Q(0)}{Q_0} \right)^2 \gg 1. \quad (9)$$

Для CdTe  $e\phi/2kT \approx 30$ , при  $(Q(0)/Q_0)^2 \approx 10$ , согласно (9)  $V_{\max}/V_0 \approx 300$ .

Таким образом, в МС с предварительно заряженными барьерными емкостями  $p$ - $n$ -переходов возможен нестационарный фотомагнитный эффект, во много раз превышающий стационарное значение. Рассмотренный эффект может представлять большой интерес для создания чувствительных датчиков магнитного поля, так как обычный стационарный эффект в АФН-пленках [8] уже превышает по чувствительности к магнитному полю датчики Холла на порядок.

#### Список литературы

1. Адирович Э.И. // УФН. 1971. Т. 105. С. 746–748.
2. Адирович Э.И., Рубинов В.М., Юабов Ю.М. // ДАН СССР. 1965. Т. 164. С. 529.
3. Набиев Г.А. // ФИП PSE. 2008. Т. 6. Вып. 3–4. С. 202–209.
4. Агарев В.Н., Степанова Н.А. // ФТП. 2000. Т. 34. № 4. С. 452–455.
5. Атакулов Ш.Б., Зайнолобидинова С.М., Набиев Г.А., Тухтаматов О.А. // ФТП. 2012. Т. 46. Вып. 6. С. 728–733.
6. Атакулов Ш.Б., Зайнолобидинова С.М., Набиев Г.А., Тухтаматов О.А. // ФТП. 2012. Т. 46. Вып. 6. С. 734–738.
7. Батукова Л.М., Карпович И.А., Янькова Т.Н. // Известия вузов. Физика. 1974. № 1. С. 53–56.
8. Адирович Э.И., Матов Э.М., Юабов Ю.М. // ДАН СССР. 1969. Т. 188. С. 1254.
9. Стафеев В.И. // ФТП. 1972. Т. 6. С. 2134–2139.
10. Агарев В.Н. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 13. С. 626–628.
11. Агарев В.Н. // ФТП. 1997. Т. 31. № 8. С. 920–922.

**TRANSIENT PHOTOMAGNETIC EFFECT IN MULTILAYER STRUCTURES WITH p-n JUNCTIONS***V.N. Agarev, V.I. Stafeev*

The transient effect of photomagnetic voltage in a multilayer structure with pre-charged p-n junctions is considered. It is shown that the maximum transient photomagnetic voltage can be several orders of magnitude greater than the stationary one.

*Keywords:* long-time relaxation, photomagnetic voltage, multilayer structures with p-n junctions.