

УДК 621.382.3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПОЛИСТОРОВ

Г. С. КАРАЯН, А. А. ДЖЕРЕДЖЯН, Р. С. АСАТРЯН

Институт радиофизики и электроники АН АрмССР

(Поступила в редакцию 3 октября 1983 г.)

Проведен расчет вольт-амперных характеристик некоторых асимметричных полисторов с оптическим управлением и изучена взаимосвязь эффекта плазменного взаимодействия и потока падающих фотонов. Получены формулы для характерных точек вольт-амперных характеристик рассмотренных систем.

В современной электронике в настоящее время бурно развиваются два направления: многозначная электроника [1—4] и оптоэлектроника [5, 6]. Их сочетание было бы очень плодотворным, так как оно обладало бы преимуществами обоих направлений.

В связи с этим возникает необходимость исследования свойств электропроводности многоуровневых полупроводниковых элементов (полисторов) с оптическим управлением. Свойства неоднородных полупроводниковых систем исследованы во многих работах [7—10], но в них не преследовалась цель получения многоуровневых систем с оптическим управлением. В работе [11] получены формулы для распределения концентрации неосновных носителей у границ электронно-дырочных переходов во внешнем поле излучения.

Отметим прежде всего, что с физической точки зрения достаточно лишь изучение трехуровневых систем. Поэтому здесь мы рассмотрим полистор на основе шестислойных структур с условиями

$$\begin{aligned}\beta_2^* &\equiv \beta_2 + \beta_3 - 1 > 0, \\ \beta_4^* &\equiv \beta_4 + \beta_5 - 1 < 0, \\ \bar{\beta}_4 &\equiv \beta_4^* + \Delta\beta_4 > 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где $\Delta\beta_4 = \beta_3\beta_4 i_3 \beta_2^* (i_2^*)^{-1}$, $i_2^* = i_2 - \beta_2^2 i_1 - \beta_3^2 i_3$, i_k — ток насыщения через k -переход, β_k — коэффициент переноса носителей по k -базе.

Согласно теории [12, 13] условия (1) обеспечивают трехуровневый характер полистора (т. е. они являются необходимыми условиями) и являются достаточными для того, чтобы рассеиваемая на полисторе мощность в проводящем состоянии была малой.

С целью сравнения рассмотрим две задачи, когда однородно освещается только вторая или только третья база, т. е.

$$1) g(x) = \begin{cases} g_0, & x \in (l_2, d_2) \\ 0, & x \in (l_2, d_2); \end{cases}$$

$$2) g(x) = \begin{cases} g_0, & x \in (l_3, d_3) \\ 0, & x \in (l_3, d_3). \end{cases}$$

Тогда, используя методику работы [3] и формулы (1)–(4) работы [11], нетрудно получить уравнения для плотностей токов через переходы:

$$\begin{aligned} J &= i_1(\xi_1 - 1) + i_1 \delta_1 \xi_1^{1/2} + \beta_2 i_1(1 - \xi_2) - J_1^y, \\ (1 - m_2) J &= \beta_2 i_1(\xi_1 - 1) + \beta_3 i_3(\xi_3 - 1) + i_2(1 - \xi_2) + \\ &+ I_2 + \frac{V_2(1 - m_2)}{r_2} + J_2^y, \\ J &= i_3(\xi_3 - 1) + \beta_3 i_3(1 - \xi_2) + \beta_4 i_3(1 - \xi_4) - J_3^y, \\ (1 - m_4) J &= \beta_4 i_3(\xi_3 - 1) + \beta_5 i_5(\xi_5 - 1) + I_4 + \\ &+ \frac{V_4(1 - m_4)}{r_4} + i_4(1 - \xi_4), \\ J &= i_5(\xi_5 - 1) + \beta_5 i_5(1 - \xi_4), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\xi_k = \exp[(-1)^{k+1} V_k]$, r_k — величина сопротивления, отнесенная к единице площади в единицах $kT/ei_1 S$, m_k — коэффициент лавинного умножения (ЛУ) носителей за счет их ударной ионизации. I_k — ток через k -переход, обусловленный тепловой генерацией носителей, который в случае параболического распределения потенциала имеет вид

$$I_k = I_{k0} \sqrt{V_k}. \quad (3)$$

Здесь влияние внешнего излучения учтено в величинах J_1^y , J_2^y и J_3^y играющих роль управляющих воздействий. Они задаются формулами

$$J_k^y = \frac{eg_0 L_2}{\text{sh } \gamma_2} \left[-\frac{1 - \text{ch } \gamma_2}{1 + \beta_2 i_1 (ev_{22})^{-1}} \cdot \delta_{1k} + \frac{\beta_2 i_1 (\text{ch } \gamma_2 - 1) \delta_{2k}}{i_{02}} \right] \quad (4)$$

для первой задачи и

$$J_k^y = \frac{eg_0 L_3}{\text{sh } \gamma_3} \left[\frac{\beta_3 i_3 (\text{ch } \gamma_3 - 1) \delta_{2k}}{i_{03}} + \frac{1 - \text{ch } \gamma_3}{1 + \beta_3 i_3 (ev_{23})^{-1}} \delta_{3k} \right]$$

для второй задачи, v_{22} и v_{23} — насыщенные значения скоростей носителей в области второго коллекторного перехода (см. также [3, 12]). Из-за нелинейности (трансцендентности) и взаимосвязи уравнений между собой в системе (2) без качественной теории [3, 12, 13] их анализ крайне затруднен. С привлечением этой теории расчеты значительно упрощаются и приводят к следующим результатам (соответственно для омического, теплового и лавинного механизмов ОДС):

$$\begin{aligned} J_{2\text{cp}} &= J_{2\text{cp}}^T - J_1^y, \\ V_{2\text{cp}} &= V_{2\text{cp}}^T - [J_2^y + (1 - \beta_3) J_1^y] r_2 S, \\ J_{2\text{cp}} &= J_{2\text{cp}}^T - J_1^y, \end{aligned}$$

$$V_{2\text{cp}} = \frac{1}{i_2^2} \{ \varphi_2^T - [J_2^y + (1 - \beta_3) J_1^y] \}^2; \quad (5)$$

$$J_{2\text{cp}} = \frac{i_1 \delta_1^2}{4} \left[\left(\frac{\beta_2}{\beta_2^* + m_{\text{cp}}} \right)^2 - 1 \right] - J_1^y,$$

$$f_2(V_{2\text{cp}}) = \frac{i_1 \delta_1^2}{4} \frac{(1 - \beta_3 - m_{\text{cp}})^2}{\beta_2^* + m_{\text{cp}}} - [J_2^y + (1 - \beta_3 - m_{\text{cp}}) J_1^y]$$

для первой задачи и

$$J_{2\text{cp}} = J_2^T,$$

$$V_{2\text{cp}} = V_2^T - r_2 S (J_2^y + \beta_3 J_3^y);$$

$$J_{2\text{cp}} = J_2^T,$$

$$V_{2\text{cp}} = \frac{1}{i_2^2} [\varphi_2^T - (J_2^y + \beta_3 J_3^y)]^2; \quad (6)$$

$$J_{2\text{cp}} = \frac{i_1 \delta_1^2}{4} \left[\left(\frac{\beta_2}{\beta_2^* + m_{\text{cp}}} \right)^2 - 1 \right],$$

$$f_2(V_{2\text{cp}}) = \frac{i_1 \delta_1^2}{4} \frac{(1 - \beta_3 - m_{\text{cp}})^2}{\beta_2^* + m_{\text{cp}}} - (J_2^y + \beta_3 J_3^y)$$

для второй задачи, где

$$J_2^T = \frac{i_1 \delta_1^2}{4} \left[\left(\frac{\beta_2}{\beta_2^*} \right)^2 - 1 \right],$$

$$\varphi_2^T = \frac{i_1 \delta_1^2}{4} \frac{1 - \beta_3}{\beta_2^*}, \quad (7)$$

$$f_k(V_k) = I_k(V_k) - \frac{(1 - m_k) V_k}{Sr_k}.$$

Как видно из формул (5)–(7), напряжения срыва в отличие от токов второго перехода зависят от механизма электропроводности перехода; влияние света на напряжение тоже зависит от этого фактора.

Простым дифференцированием можно убедиться, что в случае лавинного механизма

$$\frac{dV_{2\text{cp}}}{dg_0} < 0, \quad \frac{dJ_{2\text{cp}}}{dg_0} > 0. \quad (8)$$

В случае остальных механизмов второе неравенство нарушается.

В первой задаче ток убывает с ростом J_1^y , а во второй задаче он постоянен. Эти результаты можно получить также на основе общих физических соображений.

Исключив g_0 из систем (5) или (6), получим траектории точки максимума ВАХ $V(J)$ на плоскости (V, J) , которые представлены на рис. 1 и 2 соответственно для первой и второй задач. Траектории с номерами 1, 2, 3 соответствуют тепловому, омическому и лавинному механизмам

ОДС. Величины токов и напряжений в точке В ВАХ даются формулами (соответственно для омического и теплового механизмов):

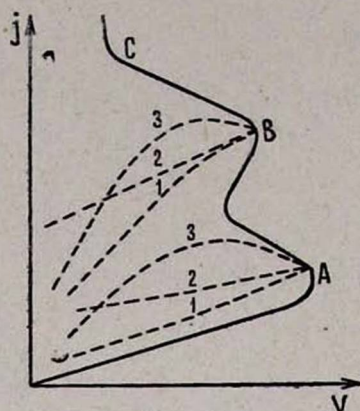


Рис. 1. Качественная ВАХ фотополупроводника, когда освещается вторая база.

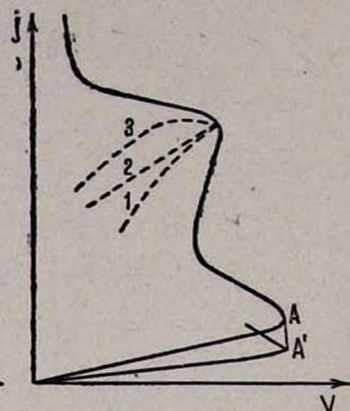


Рис. 2. Качественная ВАХ фотополупроводника, когда освещается третья база.

$$\begin{aligned}
 J_B &= J_B^T - (J_1^T + \gamma_0 J_2^T) \gamma_1^{-1}, \\
 V_B &= S r_4 \left[\gamma_1^T - \frac{\gamma_1 \gamma_5 - \bar{\beta}_4}{\gamma_1} J_1^T - \left(\frac{\gamma_5}{\beta_2} - \frac{\gamma_0 \bar{\beta}_4}{\gamma_1} \right) J_2^T \right]; \\
 J_B &= J_B^T - (J_1^T + \gamma_0 J_2^T) \gamma_1^{-1}, \\
 V_B &= (\gamma_1 i_4)^{-2} \left[\varphi_B^T \gamma_1 - (\gamma_1 \gamma_5 - \bar{\beta}_4) J_1^T - \left(\frac{\gamma_1 \gamma_5}{\beta_2} - \bar{\beta}_4 \right) J_2^T \right]^2
 \end{aligned} \quad (9)$$

для первой задачи и

$$\begin{aligned}
 J_B &= J_B^T - \gamma_0 \gamma_1^{-1} (J_2^T + \beta_3 J_3^T), \\
 V_B &= r_2 S \left[\varphi_B^T - \left(\frac{\gamma_5}{\beta_2} + \frac{\gamma_0 \bar{\beta}_4}{\gamma_1} \right) J_2^T - \left(\bar{\beta}_4 - \frac{\beta_3 \beta_4}{\gamma_1} \right) J_3^T \right]; \\
 J_B &= J_B^T - \gamma_0 \gamma_1^{-1} (J_2^T + \beta_3 J_3^T), \\
 V_B &= \frac{1}{(\gamma_1 i_4)^2} \left[\varphi_B^T \gamma_1 - \left(\frac{\gamma_1 \gamma_5}{\beta_2} - \gamma_0 \bar{\beta}_4 \right) J_2^T - (\gamma_1 \bar{\beta}_4 - \beta_3 \bar{\beta}_4) J_3^T \right]^2
 \end{aligned} \quad (10)$$

для второй задачи, где

$$\begin{aligned}
 J_B^T &= \frac{i_1 \delta_1^2}{4 \gamma_1 \gamma_2} \left[\left(\frac{\gamma_1 \gamma_5}{\bar{\beta}_4} \right)^2 - 1 \right], \quad \varphi_B^T = \frac{i_1 \delta_1^2}{4 \gamma_1 \gamma_2} \frac{(\gamma_1 \gamma_5 - \bar{\beta}_4)^2}{\bar{\beta}_4}, \\
 \gamma_1 &= 1 - \frac{\beta_2 i_1 (1 - \beta_3)}{\theta_2 - \beta_3^2 i_3}, \quad \gamma_2 = 1 - \frac{\beta_3^2 i_1}{\theta_2 - \beta_3^2 i_3}, \\
 \gamma_5 &= \frac{\beta_2 \beta_3 \beta_4 i_3}{\theta_2^*} = \frac{\beta_2}{\beta_2^*} \Delta \beta_4, \\
 \gamma_0 &= \frac{\beta_2 i_1}{\theta_2 - \beta_3^2 i_3}, \quad \hat{\beta}_4 = \frac{\beta_4 (\theta_2 - \beta_3^2 i_1)}{\theta_2^*}.
 \end{aligned} \quad (11)$$

Напряжение V_B , как это видно из формул (4), (9)—(11), не зависит от механизма ОДС второго перехода, а зависит от наличия первого и второго переходов. Дело в том, что при наличии этих переходов изменяются физические коэффициенты, определяющие величину V_B , особенно после инверсии знака напряжения (ИЗН) второго перехода. Но после ИЗН второй переход не сохраняет информацию о механизме ОДС, чем и обусловлена указанная независимость.

V_A в отличие от V_B (см. рисунки) зависит от механизма токопрохождения как через второй, так и через четвертый переходы (прямосмещенные переходы существенно влияют только на остаточное напряжение V_C). Это наглядно видно из определения

$$V_A = V_2^{cp} + V_4(J_2^{cp}). \quad (12)$$

Если первый член в правой части (12) зависит лишь от параметров первых трех переходов, то второй член обусловлен параметрами всех переходов структуры. Дело в том, что функция $V_4(J)$ зависит от параметров последних трех баз, а J_2^{cp} в аргументе $V_4(J)$ зависит от первых трех баз и от управляющего воздействия как во второй, так и в третьей базах. Поэтому V_A может быть весьма сложной функцией g_0 в зависимости от механизма токопрохождения через оба коллектора.

Фотополистор можно получить в случае обоих типов рассмотренных освещений. В частности, для получения линейного фотополистора необходимо, чтобы система уравнений

$$\begin{aligned} R_{II} J_A(0) &= E - V_A(0), \\ R_{II} J_B(J_y) &= E - V_B(J_y), \\ R_{II} J_C(2J_y) &= E - V_C(2J_y) \end{aligned}$$

имела решение для двух из трех величин g_0 , R_{II} и E при заданной третьей. Здесь R_{II} и E — величины сопротивления и ЭДС во внешней цепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многочисленные элементы и структуры. Сб. научных трудов под ред. М. А. Ракова. Изд. Наукова Думка, Киев, 1978.
2. Нильсон Р. С., Уильсон А. Н. ТИИЭР, 68, 5 (1980).
3. Караян Г. С. Сб. статей «Полупроводниковые гетероструктуры и фотопреобразователи солнечной энергии. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1982.
4. Smith K. C. IEEE, Trans. Comp., C-30, 619 (1981).
5. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. Изд. Советское радио, М., 1977.
6. Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. Изд. Мир, М., 1976.
7. Грехов И. В., Конакова Р. В., Шуман В. Б. ФТП, 4, 969 (1970).
8. Шик А. Я., Шмарцев Ю. В. ФТП, 14, 1724 (1980).
9. Неустров А. Н., Осипов В. В. Микроэлектроника, 9, 99 (1980).
10. Стафеев В. И., Азарев В. И. ФТП, 8, 387 (1974).
11. Асатрян Р. С., Джереджян А. А., Караян Г. С. Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции «Метрология и качество», Ереван, 1984.
12. Авакьянц Г. М., Караян Р. С., Джереджян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 5, 402 (1974).
13. Караян Г. С. Кандидатская диссертация, Ереван, 1975.

ՀԱՅՈՊՈԼԻՄՏՈՐՆԵՐԻ ՄԻ ՔԱՆԻ ԲԵՆԻԹԱԳՐԵՐԻ
ՏԵՍԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ

Հ. Ս. ԿԱՐԱՅԱՆ, Հ. Հ. ԶԵՐԵԶԻԱՆ, Ռ. Ս. ԱՍԱՏՐՅԱՆ

Հետազոտված են հիստազոդոդային վեցչերտ կառուցվածքների հատկությունները երկրորդ կամ երրորդ բաղաձայնի լուսավորության դեպքում, երբ գոյություն ունեն երեք կայուն վիճակներ: Դիսարկված են բաղաձայնի դիֆերենցիալ դիֆազիոնային տեղամասի առաջացման երկու մեխանիզմներ (օհմական և ջերմային): Վոլտ-ամպերային բնութագրերի վրա էքստրեմալ կետերի համար ստացված են բանաձևեր, որոնք կախված են լուսավորման պարամետրերից:

THEORETICAL INVESTIGATION OF SOME CHARACTERISTICS
OF PHOTOPOLYSTORS

H. S. KARAYAN, H. H. DZHEREDZHIAN, R. S. ASATRYAN

Current voltage characteristics of some asymmetrical optically-controlled polystors were calculated. The ohmic and thermal mechanisms of the negative differential part formation were considered. Expressions for the external points on the CV characteristics were obtained as functions of illumination parameters.