

УДК 681.383

## Простая компьютерная модель ИК-фоторезистора

Л. И. Дьяконов, Е. В. Сусов, Г. В. Чеканова  
Государственное унитарное предприятие "Альфа", Москва, Россия

*Разработана одномерная компьютерная модель для расчета ИК-фоторезистора. Фоторезистор из  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  состоит из левой контактной, центральной активной (облучаемой) и правой контактной областей. Можно варьировать длину каждой области, ее состав и содержание нескомпенсированных доноров, а также скорость рекомбинации неосновных носителей на обоих контактах. Модель позволяет вычислять распределение избыточных носителей по длине фоторезистора ( $\Phi R$ ) и зависимость вольтовой чувствительности от напряженности поля.*

Самый примитивный  $\Phi R$  из  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  (КРТ) — это параллелепипед с омическими контактами на его торцах. Если толщина элемента мала и можно пренебречь рекомбинацией на боковых поверхностях, то мы получаем одномерную модель фоточувствительного элемента (ФЧЭ).

Впервые в работе Риттнера [1], а позднее Вильямса [2] и Кинча с сотрудниками [3] показано, что амбиполярный дрейф и диффузия неравновесных носителей ограничивают предельно достижимую чувствительность элемента. Так, рекомбинация избыточных носителей на контактах снижает эффективное время их жизни, а при достаточно большой напряженности поля время жизни может ограничиваться уже временем пролета носителей между контактами.

Для увеличения "эффективного времени жизни" предложено использовать структуру [3], в которой примыкающие к контактам участки КРТ затенены непрозрачным экраном. Для носителей, генерированных в активной области, диффузионный пробег к контактам увеличивается, соответственно возрастают и их интегральная концентрация и чувствительность элемента.

Еще более выгодно тем или иным способом снижать скорость рекомбинации избыточных носителей на контактах. Для этого есть три возможности.

1. В работе [4] предложено увеличивать ширину запрещенной зоны в приконтактных областях элемента, тогда на границе с активной областью возникает внутреннее ("встроенное") поле, препятствующее перемещению носителей к контакту. При достаточно большом напряжении смещения у границы с гетеропереходом возникает область, обогащенная носителями.

2. С той же целью можно использовать приконтактные области с высокой концентрацией основных носителей, т. е. контакты  $n^+$ - $n$ -типа. Проведены экспериментальный и теоретический анализы такого ФЧЭ [5].

3. Наконец, можно снижать скорость рекомбинации на контактах путем ионного травления поверхности КРТ перед осаждением металла. Расчеты для этого варианта одномерной модели выполнены в работе [6].

Мы решили объединить подходы, изложенные во всех трех упомянутых работах и временно избавиться от некоторых ограничений, введшихся авторами ради упрощения расчетов (симметрия и т.п.).

### Теория

Схема одномерной модели  $\Phi R$  показана на рис. 1. Она состоит из левого контакта, левой контактной области 1, центральной активной

(облучаемой) области 2, правой контактной области 3 и правого контакта. Все три области имеют разную длину  $A$ ,  $L$  и  $C$ , соответственно. Координату  $z$  отсчитываем от левого контакта.

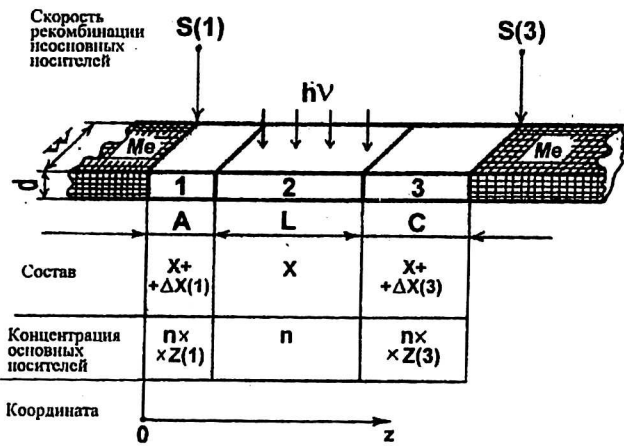


Рис. 1. Схема ФЧЭ

Для активной области 2 заданы:  $X$  — состав КРТ и  $n$  — концентрация нескомпенсированных доноров. Каждая из контактных областей 1 и 3 характеризуется избытком  $\Delta X(1)$  и  $\Delta X(3)$  содержания CdTe по сравнению с активной областью 2. Аналогично заданы  $Z(1)$  и  $Z(3)$  — отношения концентрации нескомпенсированных доноров  $n^+(1)$  и  $n^+(3)$  в областях 1 и 3, соответственно, к их содержанию  $n$  в активной области. Скорость рекомбинации неравновесных носителей на левом контакте обозначена через  $S(1)$ , на правом —  $S(3)$ .

Расчет модели аналогичен принятому в работе [4]. Для каждой из трех областей составляем уравнение амбиполярного транспорта избыточных носителей. Получаем, соответственно, три дифференциальных уравнения 2-го порядка, записанных в строчку, как принято в компьютерных программах.

$$Dd^2P(1)/dz^2 - \mu E(1)dP(1)/dz - P(1)/\tau = 0; \quad (1)$$

$$Dd^2P(2)/dz^2 - \mu E(2)dP(2)/dz - P(2)/\tau + g = 0; \quad (2)$$

$$Dd^2P(3)/dz^2 - \mu E(3)dP(3)/dz - P(3)/\tau = 0, \quad (3)$$

где  $P(i)$  — концентрация избыточных носителей в области  $i$ ;

$z$  — текущая координата;

$D$  — коэффициент диффузии неосновных носителей;

$\mu$  — подвижность неосновных носителей;

$E(i)$  — напряженность поля в области  $i$ ;

$\tau$  — время жизни избыточных носителей;

$g$  — объемная скорость генерации избыточных носителей.

Поскольку концентрация равновесных носителей во всех трех областях предполагается раз-

ной, то в каждой из них получается разная напряженность поля  $E(i)$ :

$$E(1) = VZ(3)/[AZ(3) + LZ(1)Z(3) + CZ(1)];$$

$$E(2) = VZ(1)Z(3)/[AZ(3) + LZ(1)Z(3) + CZ(1)];$$

$$E(3) = VZ(1)/[AZ(3) + LZ(1)Z(3) + CZ(1)],$$

где  $V$  — напряжение на ФР.

Общий вид решений уравнений транспорта (1)–(3) дается уравнениями (4)–(6), соответственно:

$$P(1)/(g\tau) = A_1 \exp(\alpha_1 z) + B_1 \exp(\beta_1 z); \quad (4)$$

$$P(2)/(g\tau) = A_2 \exp(\alpha_2 z) + B_2 \exp(\beta_2 z) + 1; \quad (5)$$

$$P(3)/(g\tau) = A_3 \exp(\alpha_3 z) + B_3 \exp(\beta_3 z), \quad (6)$$

где  $\alpha(i), \beta(i) = -\mu E(i)/(2D) \pm \{[\mu E(i)/(2D)]^2 + 1/(D\tau)\}^{0,5}$ .

Чтобы найти значения шести неизвестных численных коэффициентов  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$  в (4)–(6), необходимо составить и решить систему шести уравнений, которые вытекают из граничных условий.

На границе левого контакта и области 1 ( $z = 0$ ) поток избыточных носителей, обусловленный поверхностной рекомбинацией, равен разности диффузионного и дрейфового потоков, т. е.

$$1) \quad DdP(1)/dz - \mu E(1)P(1) = S(1)P(1). \quad (7)$$

На границе 1, 2 ( $z = A$ ) переносимый дрейфом и диффузией поток избыточных носителей непрерывен;

$$2) \quad \mu E(1) - DdP(1)/dz = \mu E(2) - DdP(2)/dz. \quad (8)$$

На той же границе отношение концентраций избыточных носителей в областях 2 и 1 определяется изгибом  $\Delta E(1)$  валентной зоны;

$$3) \quad P(2)/P(1) = \exp[\Delta E(1)/kT] = ZET(1). \quad (9)$$

Если в слое 1 концентрация CdTe выше, чем в слое 2 на  $\Delta X(1)$ , то происходит изгиб валентной зоны на  $\Delta E_1(1) = 1,54\Delta X(1)$ . Если же, кроме того, в слое 1 концентрация нескомпенсированных доноров в  $Z(1)$  раз больше, чем в слое 2, то валентная зона дополнительно изгибается на  $\Delta E_2(2) = kT \ln[Z(1)]$ , так что  $\Delta E(1) = \Delta E_1(1) + \Delta E_2(2)$ .

Общий перепад концентраций  $ZET(1)$  между областями 1 и 2 выражается формулой

$$ZET(1) = \exp[1,54\Delta X(1)/(kT)] n^+(1)/n = KСИ(1)Z(1).$$

В этой формуле  $KСИ(1)$  есть разрыв концентрации, обусловленный только различием состава

вов областей 1 и 2. Итак, из граничных условий имеем уже три уравнения (7)–(9) связи между коэффициентами  $A_i$ ,  $B_i$  в системе уравнений (4)–(6).

Рассмотрев границы область 2 — область 3 ( $z = A + L$ ) и область 3 — правый контакт ( $z = A + L + C$ ), аналогичным образом находим еще три недостающих уравнения связи (10)–(12):

$$4) \mu E(2) - DdP(2)/dz = \mu E(3) - DdP(3)/dz; \quad (10)$$

$$5) P(2)/P(3) = \exp\{[\Delta E_1(3) + \Delta E_2(3)]/kT\} = ZET(3); \quad (11)$$

где  $\Delta E_1(3) = 1,54\Delta\chi(3)$ ;

$$\Delta E_2(3) = kT \ln[n^+(3)/n];$$

$$ZET(3) = \exp[1,54\Delta\chi(3)/kT]n^+(3)/n = KСИ(3)Z(3);$$

$$6) -DdP(3)/dz + \mu E(3)P(3) = S(3)P(3). \quad (12)$$

После того как мы подставим в граничные уравнения значения  $P(i)$  из (4)–(6) и координаты  $z$  каждой рассматриваемой границы, получаем шесть уравнений, связывающих шесть неизвестных коэффициентов  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ , а именно:

$$1) A_1 = -B_1[D\beta_1 - \mu E(1) - S(1)]/[D\alpha_1 - \mu E(1) - S(1)]; \quad (13)$$

$$2) \mu E(1) [A_1 \exp(\alpha_1 A) + B_1 \exp(\beta_1 A)] - D[\alpha_1 A_1 \exp(\alpha_1 A) + \beta_1 B_1 \exp(\beta_1 A)] = \mu E(2) [A_2 \exp(\alpha_2 A) + B_2 \exp(\beta_2 A) + 1] - D[\alpha_2 A_2 \exp(\alpha_2 A) + \beta_2 B_2 \exp(\beta_2 A)];$$

$$3) A_2 \exp(\alpha_2 A) + B_2 \exp(\beta_2 A) + 1 = ZET(1) [A_1 \exp(\alpha_1 A) + B_1 \exp(\beta_1 A)];$$

$$4) \mu E(2) \{A_2 \exp[\alpha_2(A + L)] + B_2 \exp[\beta_2 \times (A + L)] + 1\} - D\{\alpha_2 A_2 \exp[\alpha_2(A + L)] + \beta_2 B_2 \exp[\beta_2(A + L)]\} = \mu E(3) \{A_3 \exp[\alpha_3 \times (A + L)] + B_3 \exp[\beta_3(A + L)]\} - D\{\alpha_3 A_3 \exp[\alpha_3 \times (A + L)] + \beta_3 B_3 \exp[\beta_3(A + L)]\};$$

$$5) A_2 \exp[\alpha_2(A + L)] + B_2 \exp[\beta_2(A + L)] + 1 = ZET(3) \{A_3 \exp[\alpha_3(A + L)] + B_3 \exp[\beta_3(A + L)]\};$$

$$6) A_3 = -B_3 \exp[\beta_3 - \alpha_3](A + L + C) [D\beta_3 - \mu E(3) + S(3)] / [D\alpha_3 - \mu E(3) + S(3)]. \quad (14)$$

Так как коэффициенты  $A_1$ ,  $B_1$  и  $A_3$ ,  $B_3$  выражаются друг через друга относительно просто (13), (14), то систему шести уравнений легко

свести к системе четырех уравнений с четырьмя неизвестными, исключив  $A_1$  и  $A_3$ . В самом общем виде можно записать ее как систему уравнений:

$$\begin{cases} a_{11}B_1 + a_{12}A_2 + a_{13}B_2 + a_{14}B_3 = \sigma_1; \\ a_{21}B_1 + a_{22}A_2 + a_{23}B_2 + a_{24}B_3 = \sigma_2; \\ a_{31}B_1 + a_{32}A_2 + a_{33}B_2 + a_{34}B_3 = \sigma_3; \\ a_{41}B_1 + a_{42}A_2 + a_{43}B_2 + a_{44}B_3 = \sigma_4. \end{cases}$$

В этой системе коэффициенты при неизвестных и свободные члены образуют матрицу:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \end{matrix}$$

Аналитические выражения для всех 20 элементов матрицы имеют следующий вид:

$$a_{11} = (\alpha_1 - R_1) \exp(\alpha_1 A) / [D\beta_1 - \mu E(1) - S(1)] + (R_1 - \beta_1) \times \exp(\alpha_1 A);$$

$$a_{12} = -(R_2 - \alpha_2) \exp(\alpha_2 A);$$

$$a_{13} = -(R_2 - \beta_2) \exp(\alpha_2 A);$$

$$a_{14} = 0; \quad a_{21} = 0;$$

$$a_{22} = (R_2 - \alpha_2) \exp[\alpha_2(A + L)];$$

$$a_{23} = (R_2 - \beta_2) \exp[\beta_2(A + L)];$$

$$a_{24} = (R_3 - \alpha_3) \exp[\beta_3 - \alpha_3] C + \beta_3(A + L) \times [D\beta_3 - \mu E(3) + S(3)] / [D\alpha_3 - \mu E(3) + S(3)] - (R_3 - \beta_3) \exp[\beta_3(A + L)];$$

$$a_{31} = ZET(1) \exp(\alpha_1 A) [D\beta_1 - \mu E(1) - S(1)] / [D\alpha_1 - \mu E(1) - S(1)] - ZET(1) \exp(\beta_1 A);$$

$$a_{32} = \exp(\alpha_2 A);$$

$$a_{33} = \exp(\beta_2 A);$$

$$a_{34} = 0; \quad a_{41} = 0;$$

$$a_{42} = \exp[\alpha_2(A + L)];$$

$$a_{43} = \exp[\beta_2(A + L)];$$

$$a_{44} = ZET(3) \exp[(\beta_3 - \alpha_3)C + \beta_3(A + L)] \times [D\beta_3 + \mu E(3) + S(3)] / [D\alpha_3 - \mu E(3) - S(3)] - ZET(3) \exp[\beta_3(A + L)];$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= R_2; & \sigma_2 &= -R_2; \\ \sigma_3 &= -1; & \sigma_4 &= -1, \end{aligned}$$

где  $R_1 = \mu E(1)/D$ ;  $R_2 = \mu E(2)/D$ ;  $R_3 = \mu E(3)/D$ .

Рассчитываем значения всех элементов  $a_{ij}$  и  $\sigma_i$  матрицы. Затем вычисляем  $B_1, A_2, B_2, B_3$  "в лоб" классическим методом Крамера. Для этого следует вычислить дополняющий определитель при неизвестном и разделить его на определитель системы. Тогда  $B_1$ , например, выражается равенством:

$$B_1 = \begin{vmatrix} \sigma_1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ \sigma_2 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \sigma_3 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ \sigma_4 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \\ \hline a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}.$$

Следовательно, потребуется найти пять определителей 4-го порядка, т. е. каждый раз суммировать по 24 произведения четырех сомножителей из коэффициентов  $a_{ij}$ , где индексы  $i, j$  взяты по правилу перестановок. Коэффициенты  $A_1$  и  $A_3$  определяем затем из уравнений связи (13), (14) с  $B_1$  и  $B_3$ , соответственно.

Вычислив значения  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$  в (4)–(6), мы решили задачу о распределении избыточных носителей по длине всех трех областей ФЧЭ. Распределение выводится на экран компьютера в графическом виде.

Расчет вольтовой чувствительности  $R_v$  полностью следует методике, принятой в работе [4].  $R_v$  определяется как сумма вкладов от всех трех областей:

$$R_v = [\lambda \eta \tau / (hcwdbn)] \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 S_{ij} E(i),$$

- где  $\lambda$  — длина волны;  
 $h$  — постоянная Планка;  
 $c$  — скорость света;  
 $\eta$  — квантовая эффективность;  
 $w$  — ширина ФЧЭ;  
 $d$  — толщина ФЧЭ;  
 $b$  — отношение подвижности электронов к подвижности дырок;  
 $n$  — концентрация нескомпенсированных доноров;  
 $i$  — номер области ФЧЭ;  
 $j = 1$  — вклад в  $R_v$ , подсчитанный по интегральной концентрации избыточных носителей в области;  
 $j = 2$  — вклад в  $R_v$ , подсчитанный по разности концентрации избыточных носителей на границах области.

Для каждой области этот вклад состоит из двух слагаемых: первое — пропорционально произведению напряженности поля на интегральное содержание избыточных носителей, второе — разности концентрации носителей на границах области. Ниже даны выражения для всех шести слагаемых:

$$S_{11} = [(b + 1)B_1/L] [-\exp(\alpha_1 A)/\alpha_1 + \exp(\beta_1 A)/\beta_1 + 1/\alpha_1 - 1/\beta_1];$$

$$S_{12} = \{D(b - 1)B_1/[\mu E(1)L]\} \times [-\exp(\alpha_1 A) + \exp(\beta_1 A)];$$

$$S_{21} = [(b + 1)/L] \{ (A_2/\alpha_2) [\exp(\alpha_2(A+L)) - \exp(\alpha_2 A)] + (B_2/\beta_2) [\exp(\beta_2(A+L)) - \exp(\beta_2 A)] + L \};$$

$$S_{22} = \{D(b - 1)/[\mu E(2)L]\} \{ A_2 [\exp(\alpha_2(A+L)) - \exp(\alpha_2 A)] + B_2 [\exp(\beta(A+L)) + \exp(\beta_2 A)] \};$$

$$S_{31} = [(b + 1)B_3/L] \exp[B_3(A+L)] \{ \exp(\beta_3 C) \times [\exp(-\alpha_3 C) - 1]/\alpha_3 + [\exp(\beta_3 C) - 1]/\beta_3 \};$$

$$S_{32} = \{D(b - 1)B_3/[\mu E(3)L]\} \exp[\beta_3(A+L)] \times \{ \exp[-(\alpha_3 - \beta_3)C] - 1 \}.$$

Меняя напряжение на ФЧЭ, получаем каждый раз новое значение для  $R_v$ , и в итоге — зависимость  $R_v$  от напряженности поля. График ее выводится на экран персонального компьютера.

Предлагаемую компьютерную модель можно легко редуцировать до любого более простого варианта ФЧЭ. Например, чтобы получить характеристики простого ФЧЭ без контактных областей 1 и 3, достаточно задать длины этих областей символически малыми величинами, например  $10^{-7}$  см.

Если нам нужен вариант с чисто омическими контактами, достаточно положить скорость рекомбинации на них очень большой, например  $10^7$  см/с.

Чтобы получить характеристики ФЧЭ с подтенными контактами в областях 1 и 3, следует сделать одинаковым состав (следовательно, ширину запрещенной зоны) всех трех областей и сделать равными концентрации нескомпенсированных доноров в каждой из них. С помощью нашей модели и редуцирования, где необходимо, мы легко получили графики, рассчитанные в упоминавшихся выше работах [4–6].

### Применение

Модель можно использовать для оптимизации параметров ФЧЭ. Рассмотрим, например, вариант ФЧЭ с подтением у контактов.

Возьмем ФР с типичными параметрами: температура  $T = 77$  К, толщина  $d = 12$  мкм, ширина  $w = 50$  мкм, длина активной области  $L = 50$  мкм, состав КРТ  $X = 0,22$ , концентрация основных носителей  $n = 7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, время жизни  $\tau = 1,5$  мкс, подвижность неосновных носителей (дырок)  $\mu = 600$  см<sup>2</sup>/(В·с).

Если левая приконтактная (подтененная) область  $A = 20$  мкм, правая  $C = 55$  мкм, то для напряженности поля  $E = +4$  В/см (левый контакт — анод) расчет по модели дает распределение относительной концентрации избыточных носителей по длине ФР, показанное на рис. 2.

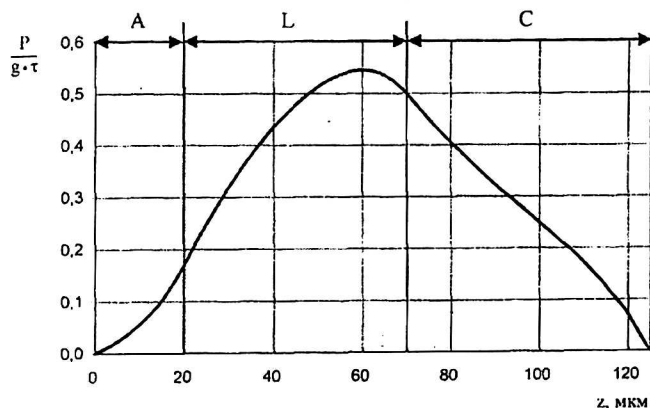


Рис. 2. Распределение относительной плотности избыточных носителей в ФЧЭ с подтенением (параметры ФР в тексте)

Если при той же геометрии изменять величину и знак напряженности поля, то получаем зависимость от нее вольтовой чувствительности, показанную на рис. 3.

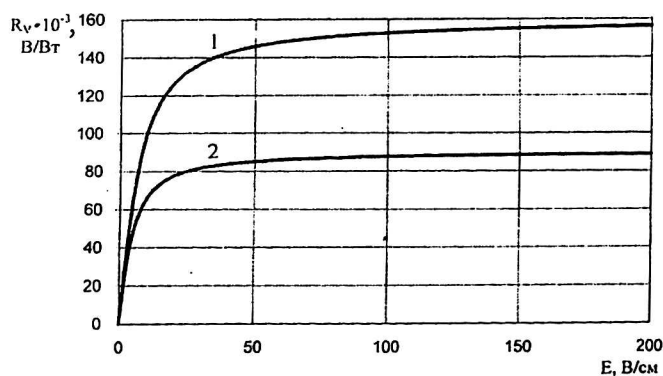


Рис. 3. Зависимость  $R_v$  от величины и знака  $E$  в ФЧЭ с подтенением (параметры ФР в тексте):

1 — левый контакт — анод; 2 — правый контакт — катод

Подтенение ФР может быть сделано по-разному: симметричным, односторонним у катода или несколько смещенным от него. Что лучше?

Закрепим в нашем примере положение контактов и зададимся одной и той же суммарной длиной подтененных областей  $A + C = 75$  мкм. Будем менять положение активной области относительно контактов, т. е. смещать ее относительно левого контакта — анода. Расчет дает зависимость вольтовой чувствительности от величины смещения в виде кривой с максимумом, показанной на рис. 4. Смещение, соответствующее максимуму, как раз и оказывается оптимальным. Действительно, здесь не только достигается наибольшая чувствительность, но и минимальное влияние на нее небольших отклонений смещения от заданного положения.

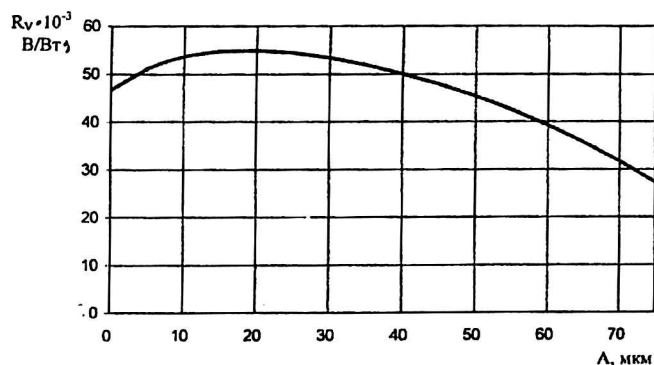


Рис. 4. Влияние смещения активной области относительно контактов на  $R_v$  при  $E = 4$  В/см (параметры ФР в тексте)

## Заключение

Мы назвали нашу компьютерную модель простой. Она, действительно, проста для пользователя, так как ему достаточно набрать параметры ФР, прочесть рассчитанные характеристики и вызвать на экран оформленные графики.

## Литература

1. Rittner Edmund S. Electron process in photoconductors//Photoconductivity Conference held at Atlantic City November 4-6, 1954. Edited Breckenridge R. G., N. Y., 1955. P. 215-268.
2. Williams R. L. Sensitivity limits of 0,1 ev intrinsic photoconductors//Infrared physics, 1968. V. 8. P. 337-343.
3. Kinch M. A., Borrello S. R., Breazeale B. H., Simmons A. Geometrical enhancement of HgCdTe photoconductive detectors//Ibid, 1977. V. 17. № 2. P. 137-142.
4. Arch D. K., Wood R. A., Smith D. L. High responsivity HgCdTe heterojunction photoconductor//J. Appl. Phys., 1985. V. 58. № 6. P. 2360-2370.
5. Shacam-Diamond Y. J., Kidron I. Contact and bulk effects in intrinsic photoconductive infrared detectors//Infrared Physics, 1981. V. 21. P. 105-115.
6. Ashley T., Elliott C. T. Accumulation effects at contacts to n-type cadmium-mercury-telluride photoconductors//Ibid, 1982. V. 22. P. 367-376.

## Simple computer model of IR-photoconductor

L. I. Diakonov, E. V. Susov, G. V. Chekanova  
The State United Enterprise "Alpha", Moscow, Russia

*The one-dimensional model of IR-photoconductor (PC) is developed for computer simulation. PC, made from  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  (CMT), consist of left, contact section, center active (IR-irradiated) section and right contact section. One can to change the length of every section, it composition, density of majority carriers in it and rate of minority carriers recombination at both contacts. The model allows to find the distribution of minority carriers on length of PC and the dependence of voltage responsivity from electric field, applied to PC.*