

УДК 621.383.52:546.48'49'24

Моделирование вольт-амперных характеристик фотодиодов из КРТ

К. О. Болтарь, Н. И. Яковлева
ФГУП «НПО «Орион»», Москва, Россия

Проанализированы различные механизмы протекания тока в p – n -переходах фотодиодов на основе твердых растворов кадмий–ртуть–теллур (КРТ), построена математическая модель, позволяющая по ряду параметров материала КРТ определять вольт-амперную характеристику (ВАХ) p – n -перехода, и решена обратная задача: по ВАХ с помощью моделирования на ЭВМ определяются основные параметры фотодиодов и характеристики КРТ в области p – n -перехода. Измерены экспериментально и проведено моделирование ВАХ фотодиодов в эпитаксиальных слоях КРТ, полученных методами жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), испарения и конденсации (ИКД) и фотодиодов в объемном материале КРТ.

Вольт-амперные характеристики фотодиодов широко используются для исследований и контроля качества p – n -переходов фотоприемников

ИК-диапазона [1–4]. Их обработка численными методами позволяет провести оценку вклада различных механизмов протекания тока в фотодио-

дах, определить некоторые характеристики исходных материалов и параметры $p-n$ -переходов, а также дать рекомендации по совершенствованию технологии фотодиодов.

На основе фундаментальных теоретических зависимостей различных токовых составляющих строится математическая модель ВАХ, включающая основные параметры фотодиодов и характеристики материала КРТ. Из анализа экспериментальных ВАХ и теоретических зависимостей определяются основные параметры фотодиодов и характеристики материала КРТ по следующему алгоритму:

- из теоретических зависимостей и характеристик особенностей ВАХ фотодиодов выбираются начальные значения варьируемых параметров, характеризующие основные параметры фотодиодов и материала КРТ;

- проводится последовательное приближение значений варьируемых параметров на ЭВМ таким образом, чтобы обеспечить наилучшее совпадение измеренных ВАХ и результатов моделирования ВАХ на ЭВМ (минимум отклонения теоретической и экспериментальной ВАХ).

Модель расчета ВАХ

Темновой ток фотодиода состоит из диффузионного, генерационно-рекомбинационного, фонового, туннельного токов и тока шунтирующей утечки. В работах [1—4] перечислены основные механизмы, определяющие ток фотодиода

$$J = J_D + J_{g-r} + J_{ph} + J_{TT} + J_{TB} + J_S,$$

- где J_D — диффузионно-дрейфовый ток;
- J_{g-r} — генерационно-рекомбинационный ток;
- J_{ph} — фоновый ток;
- J_{TT} — туннельный ток, обусловленный процессом туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне;
- J_{TB} — туннельный ток, обусловленный процессом туннелирования зона—зона;
- J_S — ток шунтирующей утечки, характеризующий возможные проколы в $p-n$ -переходе.

Диффузионный ток

Полученная из решения уравнения непрерывности при условии отсутствия генерации носителей заряда от внешнего излучения плотность диффузионного тока сводится к сумме токов основных носителей заряда в p - и n -областях [5]

$$J_D = J_{De} + J_{Dh} = en_i^2 \left(\frac{D_e}{N_A L_e} + \frac{D_h}{N_D L_h} \right) [\exp(v) - 1],$$

где J_{De} — плотность диффузионного тока в p -области полупроводника;

- J_{Dh} — плотность диффузионного тока в n -области полупроводника;
- n_i — собственная концентрация;
- N_A — концентрация акцепторов в p -области;
- N_D — концентрация доноров в n -области;
- D_h — коэффициент диффузии дырок в n -области;
- D_e — коэффициент диффузии электронов в p -области;
- L_h — диффузионная длина дырок в n -области;
- L_e — диффузионная длина электронов в p -области;
- $v = \frac{eV}{kT}$ — приведенное напряжение, приложенное к $p-n$ -переходу;
- e — заряд электрона;
- k — постоянная Больцмана;
- T — температура фотодиода.

Выражение для диффузионного тока, используемое в численной модели расчета, запишем в виде

$$J_D = J_{DO} [\exp(v) - 1],$$

где J_{DO} — варьируемый параметр.

Генерационно-рекомбинационный ток

Процессы генерации-рекомбинации, происходящие в области объемного заряда, оказывают значительное влияние на работу $p-n$ -перехода. Зависимость тока генерации-рекомбинации от напряжения имеет сложный вид и исследована в ряде работ [3, 6]. Плотность тока J_{g-r} , обусловленного процессами генерации-рекомбинации в обедненном слое полупроводника толщиной W при обратном смещении, определяется выражением [6]

$$J_{g-r} = \frac{-eWn_i}{2\tau_0},$$

- где τ_0 — эффективное время жизни носителей заряда в обедненном слое;
- W — ширина обедненного слоя полупроводника, вычисляемая по формуле

$$W = \left[2\varepsilon_S ((V_{bi} - V)/e) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2} = w_0 \left(1 - \frac{v}{V_{bi}} \frac{kT}{e} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

- где w_0 — ширина обедненного слоя при нулевом напряжении смещения;
- V_{bi} — встроенный потенциал, который для резкого $p-n$ -перехода определяется формулой

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln(N_D N_A / n_i). \quad (2)$$

Ток J_{g-r} пропорционален ширине обедненного слоя, которая в свою очередь зависит от приложенного напряжения смещения. Упрощенное выражение, используемое в математической модели расчета для генерационно-рекомбинационной составляющей тока в обратной ветви фотодиода, имеет вид

$$J_{g-r} = J_{RO} \left[\exp\left(\frac{v}{2}\right) - 1 \right] \left(1 - \frac{v}{V_{bi}} \frac{kT}{e} \right)^{1/2},$$

где J_{RO} , V_{bi} — варьируемые параметры.

Фоновый ток

Фоновое ИК-излучение вызывает фоновый ток, плотность которого определяется формулой [1]

$$J_{ph}(Q) = \eta e Q,$$

где η — квантовая эффективность фотодиода;
 Q — поток излучения.

Выражение для фонового тока, используемое в модели расчета, имеет вид

$$J_{Ph} = J_{Ph0},$$

где J_{Ph0} — варьируемый параметр.

Туннельный ток через уровни ловушек

Ток туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне определяется выражением [2]

$$J_{TT} = J_{TTO} \exp\left(\frac{-C_{TT}}{(V_{bi} - V)^{1/2}}\right),$$

где J_{TTO} — постоянная составляющая туннельного тока через уровни ловушек;

C_{TT} — константа, вычисляемая по формуле [2]

$$C_{TT} = \frac{4,3 \cdot 10^{10} E_g^{1/2} (E_g - E_t)^{3/2}}{N_{A(depletion)}}, \quad (3)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны;
 E_t — энергетический уровень ловушек;

$N_{A(depletion)}$ — концентрация акцепторов в обедненной области $p-n$ -перехода, которая в диодах из КРТ, как правило, существенно меньше, чем N_A .

Энергетические уровни и собственная концентрация n_i вычисляются по формулам модели Немировского и Финкмана [4].

При моделировании ВАХ параметры J_{TTO} и C_{TT} считаются варьируемыми.

Ток туннелирования зона—зона

Ток туннелирования зона—зона определяется согласно модели Зенера [3]

$$J_{ТВ} = \frac{ea(V_{bi} + V)^2}{W} \exp\left(\frac{-C_{ТВ}W}{(V_{bi} - V)}\right),$$

где a — постоянная равная $\frac{e^2 m_r^{1/2}}{18\pi\hbar^2 E_g^{1/2}}$;

$C_{ТВ}$ — постоянная, рассчитываемая из уравнения

$$\frac{\pi m_r^{1/2} E_g^{3/2}}{2 e\hbar}; \quad (4)$$

m_r — эффективная масса.

Для математической модели ВАХ ток туннелирования зона—зона выражается следующей формулой:

$$J_{ТВ} = J_{ТВО} \frac{(V_{bi} - V)^2}{W} \exp\left(\frac{-C_{ТВ}W}{(V_{bi} - V)}\right),$$

где $J_{ТВО}$, $C_{ТВ}$ — варьируемые параметры;
 W определяется из выражения (1), в котором W_0 — варьируемый параметр.

Ток утечки

Ток шунтирующей утечки J_S появляется при наличии проколов в $p-n$ -переходе и в математической модели вычисляется по формуле

$$J_S = V g_S,$$

где g_S — варьируемый параметр, определяющий проводимость утечки.

Моделирование ВАХ на ЭВМ

Ток фотодиода J_m при моделировании может быть представлен в виде функции одной переменной v и N параметров $P_1 \dots P_N$, характеризующих материал КРТ и механизмы протекания тока, изложенные в предыдущем разделе

$$J_m = J_m(v, P_1 \dots P_N).$$

При условии правильности выбранных моделей механизмов протекания токов и корректности метода экспериментального измерения тока фотодиода $J(v_k)$ при напряжениях v_k и числе экспериментальных точек измерения ВАХ $K > N$ функционал

$$S(P_1 \dots P_N) = \sqrt{\sum_{k=1}^K (J(v_k) - J_m(v_k, P_1 \dots P_N))^2 / K}.$$

будет иметь минимум при истинных значениях параметров $P_1 \dots P_N$.

Выбор начальных значений параметров

На рис. 1 показана типичная экспериментальная ВАХ фотодиода из КРТ в области рабочих напряжений $-400 \div 200$ мВ, на которой указаны начальные значения токов, выбранные в качестве начальных параметров численной модели.

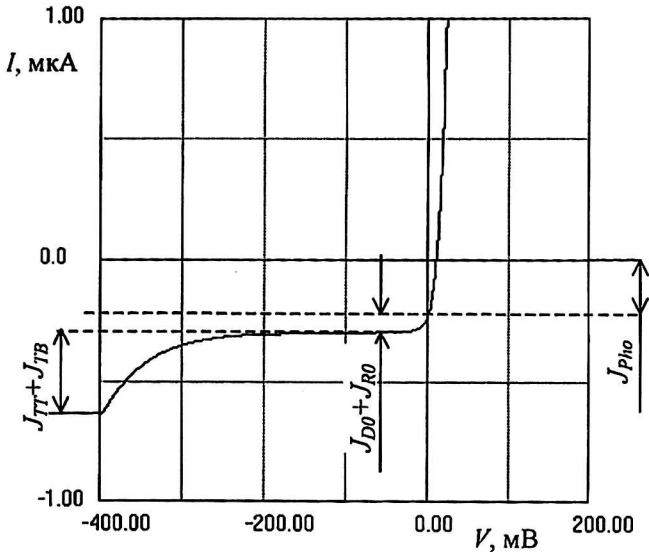


Рис. 1. Типичная ВАХ фотодиода из КРТ

Начальные значения параметров расчета выбираются следующим образом:

J_{Ph0} — фоновый ток, равный току при нулевом напряжении смещения $J(0)$.

Начальные значения диффузионного тока J_{DO} и генерационно-рекомбинационного J_{RO} выбираются равными

$$J_{DO} = J_{RO} = 0,5 (J(-50) - J(0)),$$

где $J(0)$ — ток при нулевом смещении;

$J(-50)$ — ток при обратном напряжении смещения 50 мВ, полученный из экспериментальной характеристики. Для определения начальных значений J_{DO} и J_{RO} можно использовать вместо обратного значения смещения 50 мВ любое значение напряжения смещения V в диапазоне $V_{bi} \gg V \gg \frac{kT}{e}$.

Начальное значение тока туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне полупроводника $J_{ТТО}$ определяется формулой

$$J_{ТТО} = \frac{0,5(J_{\max} - J(-50))}{\exp\left(\frac{-C_{ТТ}}{(V_{bi} - V_{\max})^{1/2}}\right)},$$

где J_{\max} — ток при максимальном обратном напряжении смещения V_{\max} .

Начальное значение туннельного тока зона-зона $J_{ТВО}$ выбирается следующим образом:

$$J_{ТВО} = \frac{0,5(J_{\max} - J(-50))W_{\max}}{(v_{bi} - v)^2 \exp\left(\frac{-C_{ТТ}W_{\max}}{(V_{bi} - V)^{1/2}}\right)},$$

где W_{\max} — ширина обедненной области при максимальном обратном напряжении смещения.

Разница между током при максимальном обратном смещении и током при обратном смещении 50 мВ равна сумме туннельных токов.

Начальное значение шунтирующей проводимости g_S принимается равным среднему значению дифференциальной проводимости экспериментальной ВАХ в диапазоне напряжений $-150 \div -100$ мВ (в этом диапазоне экспериментальные значения дифференциальной проводимости, обусловленные другими механизмами протекания тока, как правило, минимальны).

Начальные значения варьируемых параметров V_{bi} , $C_{ТТ}$, $C_{ТВ}$ определяются по формулам (2), (3), (4), соответственно.

Минимизация функционала

Задача минимизации функционала S решается численными методами на ЭВМ следующим образом: задаются начальные значения параметров $P_1 \dots P_N$, затем итерационным методом эти значения уточняются. Итерации осуществляются комбинацией усовершенствованного метода приближений методом Ньютона по каждому параметру отдельно и градиентного спуска до достижения наименьшего среднеквадратичного отклонения теоретической и экспериментальной ВАХ.

Представленная модель расчета обеспечивает соответствие теоретической и экспериментальных ВАХ с точностью $\leq 0,2\%$, при этом число итераций составляет ≈ 100 , время расчета на ЭВМ Pentium-3 при числе экспериментальных точек ВАХ $K = 256$ не превышает 1 мин.

Результаты

На рис. 2–4 приведены результаты измерений и моделирования ВАХ ряда фотодиодов состава $x = 0,2-0,3$ в эпитаксиальных слоях КРТ, полученных методами ЖФЭ, МЛЭ, ИКД, методом химического осаждения из паров металлоорганических соединений и ртути (МОС) и фотодиодов в объемных образцах КРТ.

Концентрация носителей в p -области полупроводника составляла $N_A = 0,7-2,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu_h = 300-600 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Площадь $p-n$ -перехода всех образцов составляла $20 \times 20 \text{ мкм}$. Для изготовления $p-n$ -переходов использовались один и тот же процесс пассивации поверхности и одинаковая технология имплантации и отжига n^+ -слоя.

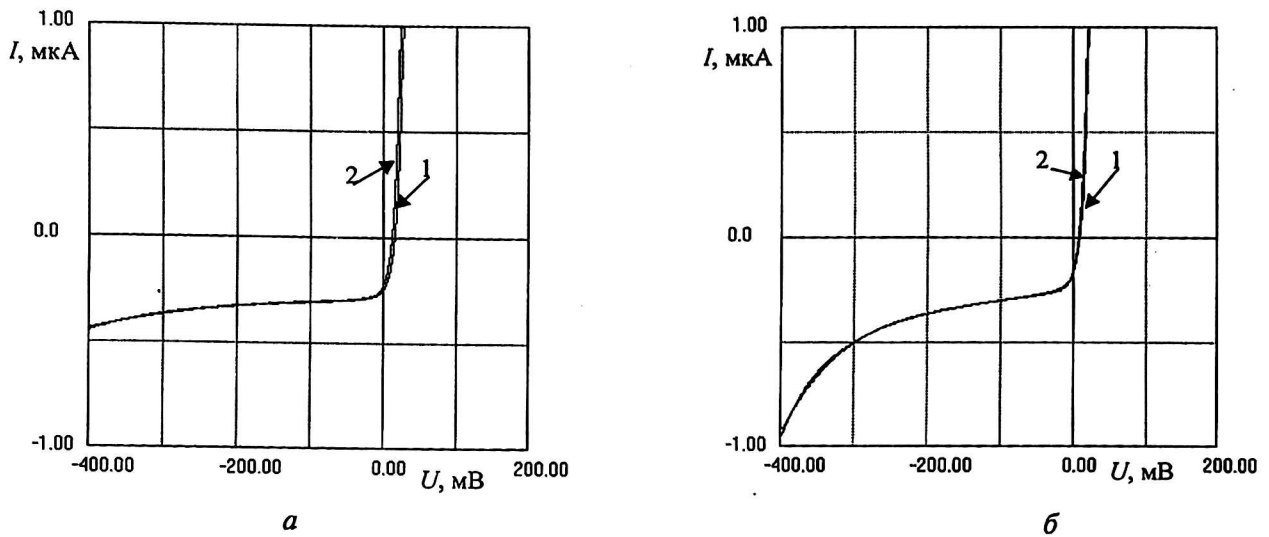


Рис. 2. ВАХ фотодиодов в эпитаксиальных слоях КРТ состава $x = 0,2$, полученных методом ЖФЭ при температуре $T = 80$ К (а), и фотодиодов, имеющих избыточный ток туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне (б): 1 — результат моделирования; 2 — экспериментальная зависимость

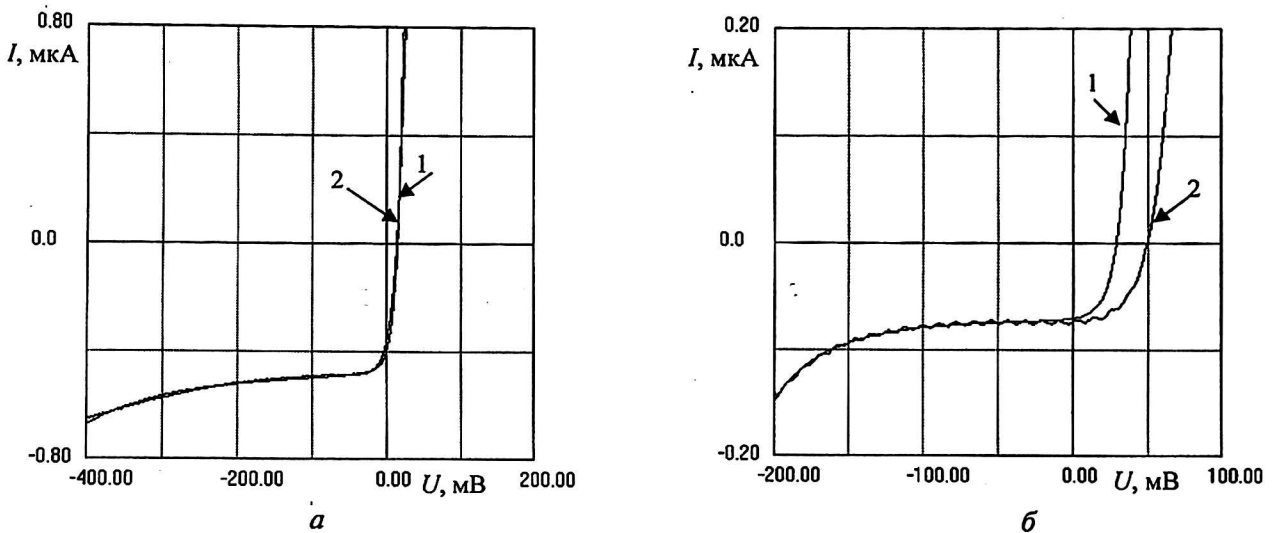


Рис. 3. ВАХ фотодиодов в эпитаксиальных слоях КРТ состава $x = 0,2-0,3$, полученных методом МЛЭ (а) и ИКД (б) при температуре $T = 80$ К: 1 — результат моделирования; 2 — экспериментальная зависимость

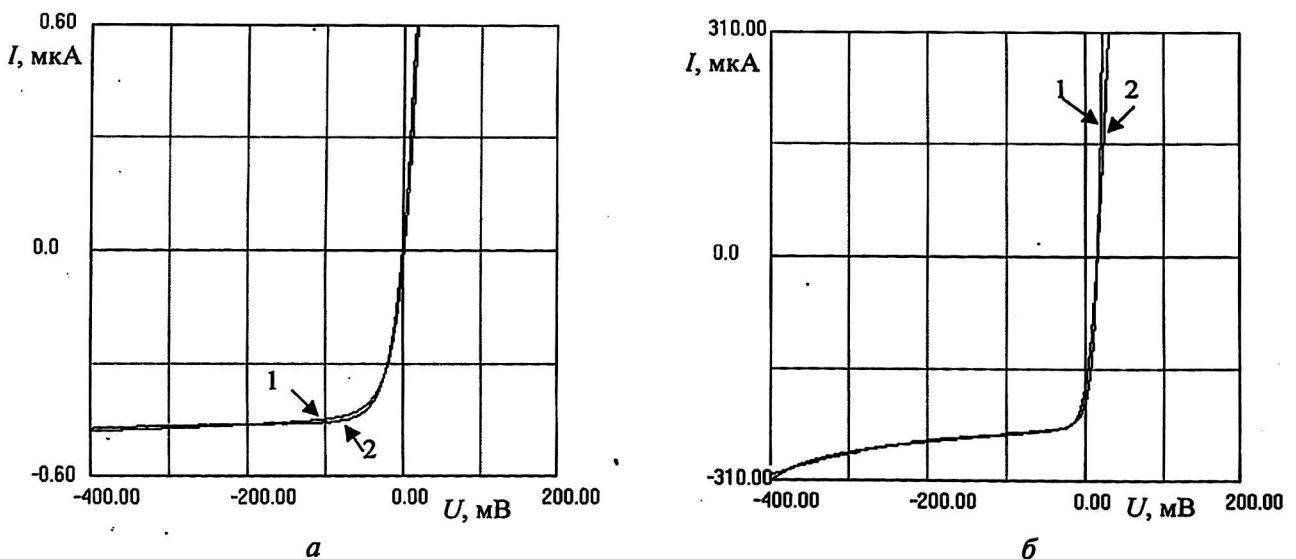


Рис. 4. ВАХ фотодиода в эпитаксиальном слое КРТ состава $x = 0,3$, полученных методом МОС при $T = 200$ К (а), и ВАХ фотодиода в объемной структуре КРТ площадью 1×1 мм при $T = 80$ К (б): 1 — результат моделирования; 2 — экспериментальная зависимость

На рис. 2, а, б представлены типичные ВАХ фотодиодов в эпитаксиальных слоях (ЭС) КРТ, полученных методом ЖФЭ, которые используются в матричных фотоприемниках смотрящего и многорядного типа [7, 8]. Фотодиод (см. рис. 2, б) имеет избыточный ток туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне.

На рис. 3 приведена ВАХ фотодиодов в ЭС КРТ, выращенных методом МЛЭ (см. рис. 3, а), и ВАХ фотодиода, полученной в ЭС КРТ, выращенных методом ИКД (см. рис. 3, б).

На рис. 4 приведена ВАХ фотодиода в ЭС КРТ, выращенном методом МОС состава $x = 0,3$ при $T = 200$ К (см. рис. 4, а) и ВАХ фотодиода в объемном материале КРТ площадью 1×1 мм при рабочей температуре $T = 80$ К (см. рис. 4, б).

В табл. 1 представлены результаты моделирования ВАХ ряда структур. Из приведенных результатов следует, что ВАХ $p-n$ -перехода определяется в основном технологией изготовления фотодиодов и слабо зависит от технологии изготовления слоя КРТ. Метод изготовления слоя КРТ оказывает существенное влияние на типы

дом МЛЭ, для диодов с различными размерами площади $p-n$ -перехода, имеющего форму квадрата.

Измеренные зависимости тока фотодиода от размера стороны диода позволяют оценить длину диффузии в базе фотодиода. Вклад в фоновый ток дают носители, генерируемые в области под $p-n$ -переходом и в области рядом с $p-n$ -переходом на расстоянии длины диффузии L . Зависимость фонового тока от размера стороны квадрата $p-n$ -перехода можно грубо оценить по формуле

$$J_{ph}(d) = j_{ph}(d + L)^2 \text{ или } \sqrt{J_{ph}} = \sqrt{j_{ph}}(d + L),$$

где j_{ph} — плотность фонового тока.

На рис. 5 представлена зависимость корня квадратного из фонового тока $\sqrt{J_{ph}}$ от размера стороны квадрата $p-n$ -перехода. По этому графику можно оценить значение диффузионной длины неосновных носителей в p -области, которая равна половине расстояния, отсекаемого

Таблица 1

| Наименование | Номер структуры | | | | | | | |
|--|--|---------|---------|----------|-------|-------|-------------------|-------|
| | E21041210 | E201222 | E210117 | E2104107 | H7102 | ИКД46 | 1198В | |
| Метод эпитаксии | ЖФЭ | ЖФЭ | ЖФЭ | ЖФЭ | МЛЭ | ИКД | | |
| Состав, x | 0,214 | 0,218 | 0,220 | 0,222 | 0,218 | 0,240 | 0,210 | |
| T , К | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 200 | 80 | |
| Диафрагма, град. | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | |
| Ток в рабочей точке (-50 мВ), нА | 300 | 300 | 280 | 150 | 480 | 80 | $2,38 \cdot 10^5$ | |
| Механизмы протекания тока при $U_{см} = -200$ мВ | Ток фоновый, % | 69,46 | 70,86 | 45,98 | 72,41 | 69,25 | 95,32 | 77,62 |
| | Ток диффузионный, % | 8,73 | 7,91 | 14,91 | 7,57 | 8,77 | 0,93 | 11,10 |
| | Ток генерационно-рекомбинационный, % | 20,99 | 19,59 | 35,00 | 18,51 | 21,45 | 1,83 | 10,82 |
| | Ток туннелирования через уровни ловушек, % | 0,80 | 1,64 | 4,10 | 1,50 | 0,53 | 1,92 | 0,46 |
| | Ток туннелирования зона—зона, % | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Таблица 2

| Наименование | Размер $p-n$ -перехода, мкм | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 20 | 40 | 70 | 100 | 200 | |
| Ток в рабочей точке (-50 мВ), нА | 590 | 1240 | 2270 | 3440 | 8870 | |
| Механизмы протекания тока при $U_{см} = -200$ мВ | Ток фоновый, % | 73,92 | 76,94 | 75,69 | 73,03 | 87,03 |
| | Ток диффузионный, % | 6,75 | 5,36 | 4,89 | 7,76 | 3,68 |
| | Ток генерационно-рекомбинационный, % | 18,51 | 15,88 | 18,78 | 18,67 | 8,71 |
| | Ток туннелирования через уровни ловушек, % | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,54 | 0,58 |
| | Ток туннелирования зона—зона, % | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

дефектов фотодиодов и процент дефектных фотодиодов. Эта проблема будет рассмотрена в другой работе.

В табл. 2 представлены результаты моделирования ВАХ структуры Н7-1, полученной мето-

проведенной по экспериментальным точкам прямой от оси абсцисс. Из графика следует, что для данного образца длина диффузии $L \approx 20$ мкм.

На рис. 6 представлена зависимость отношения тока туннелирования через уровни ловушек

в запрещенной зоне к размеру стороны площадки $p-n$ -перехода от размера стороны площадки. Из графика следует, что практически весь ток туннелирования пропорционален периметру $p-n$ -перехода и практически не зависит от площади перехода, что означает локализацию тока туннелирования по периметру площадки $p-n$ -перехода и может объясняться наличием p^+ -слоя у поверхности КРТ [3].

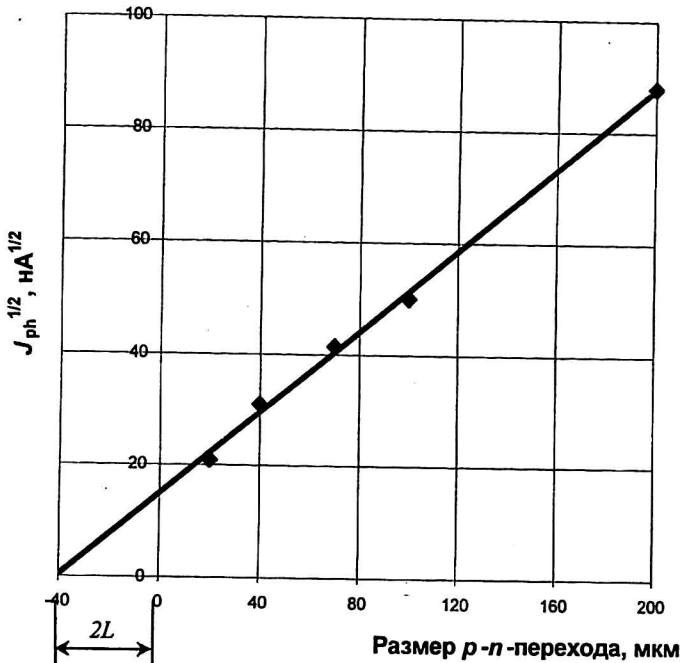


Рис. 5. Зависимость отношения корня квадратного фонового тока от размера $p-n$ -перехода

Таким образом, результаты моделирования ВАХ фотодиодов позволяют анализировать механизмы протекания тока в $p-n$ -переходах, определять параметры материала исходных структур и могут использоваться для получения рекомендаций по улучшению технологического процесса изготовления матричных фотоприемников на основе фотодиодов из КРТ.

Литература

1. Piotrowski J.// Infrared Photon Detectors. Edited by A. Rogalsky, 1995. P. 451.
2. Nemirovsky Y., Rosenfeld D., Adar R., Kornfeld A.// J. Vac. Sci. 1989. № 2. P. 528–535.
3. Bhan R. K., Gopal Vishnu// J. Semicond. Sci. Technol., 1994. N. 9. P. 289-297.
4. Nemirovsky Y., Finkman E.// J. Appl. Phys. 1969. № 40. P. 4865.

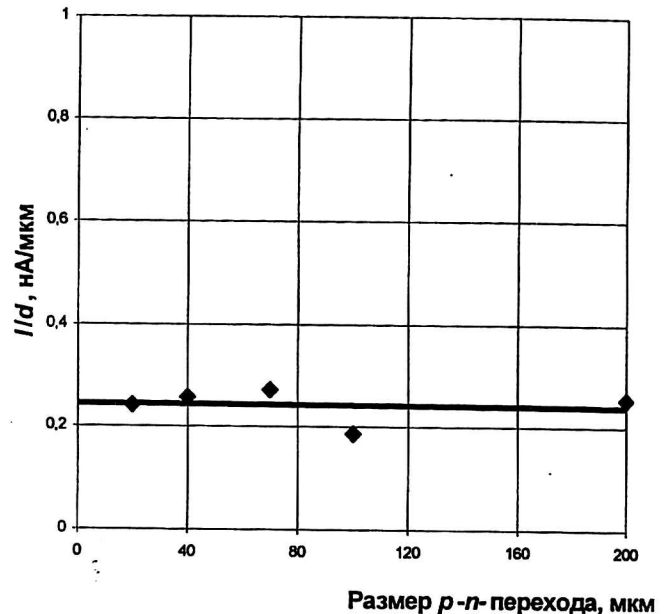


Рис. 6. Зависимость отношения тока туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне к размеру $p-n$ -перехода от размера $p-n$ -перехода

5. Shockley W., Read W. T.// Phys. Rev. 1952. № 87. P. 838.
6. Sah C.T., Noyce R.N., Shockley W.// Proc. IRE. 1957. N. 45. P. 1228.
7. Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Головин С. В., Иванов В. Ю., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Акимов В. М., Климанов Е. А., Лакеенков В. М., Сидоров Ю. Г.// Прикладная физика. 1999. № 3. С. 32–41.
8. Бовина Л. А., Соляков В. Н., Мансветов Н. Г., Бурлаков И. Д., Головин С. В., Иванов В. Ю., Стафеев В. И., Ильин Ю. К., Климанов Е. А.// Там же. 1999. № 4. С. 31–37.

HgCdTe photodiodes current-voltage characteristics simulation

K. O. Boltar, N. I. Iakovleva

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Different current mechanisms in HgCdTe $p-n$ junctions have been analyzed. Current-voltage characteristics of photodiodes in HgCdTe epitaxial layers formed by different epitaxial methods are measured and simulated. The numerical simulation of photodiodes current-voltage characteristics allows to evaluate HgCdTe material parameters and improve Focal Plane Arrays technology.