

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.247.049.7:621.383.52

ИНФРАКРАСНЫЕ ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ “ФОТОДИОД–ПРЯМОИНЖЕКЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО СЧИТЫВАНИЯ”

© 2010 г. Д. Д. Карнаушенко; И. И. Ли, канд. техн. наук; В. Г. Половинкин, канд. физ.-мат. наук
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: Irlamlee@isp.nsc.ru

Представлены математическая модель, программа и результаты расчета многоэлементных гибридных инфракрасных (ИК) фотоприемных устройств на основе системы “фотодиод–прямоинжекционное устройство считывания”. Программа реализована в системе математических расчетов Mathcad и позволяет проводить расчеты всех основных параметров многоэлементных гибридных ИК фотоприемных устройств с использованием как модельных, так и экспериментальных фотоэлектрических параметров ИК фотодиодов в зависимости от электрофизических и конструктивных параметров устройств считывания.

Ключевые слова: $Hg_{1-x}Cd_xTe$ -фотодиод, многоэлементное ИК ФПУ, устройство считывания с прямой инжекцией заряда, тепловизионная система.

Коды OCIS: 040.1240, 040.3060, 230.5160.

Поступила в редакцию 16.02.2010.

Устройство с прямой инжекцией заряда является основным типом устройств считывания для многоэлементных гибридных инфракрасных (ИК) фотоприемных устройств (ФПУ) в спектральном диапазоне 8–12 мкм [1]. Тем не менее до сих пор анализ этой системы и тепловизионных систем на ее основе ограничивается качественными оценками и не позволяет сформулировать требования к фотоэлектрическим, электрофизическим и конструктивным параметрам фотоприемников, кремниевым устройствам считывания, обеспечивающим достижение заданных параметров многоэлементных ИК ФПУ [2–4].

Математическая модель системы “ИК фотодиод–прямоинжекционное устройство считывания”

Данная работа развивает подход анализа системы “ИК фотодиод–прямоинжекционное устройство считывания”, предложенный в [5]. Работа устройства считывания с прямой инжекцией заряда определяется напряжением $V_{вх}$ на входном затворе. Поэтому необходимо иметь

возможность рассчитывать все основные характеристики системы в зависимости от $V_{вх}$. При расчете используется модель длинноканального транзистора в режиме слабой инверсии [6]. Анализ системы “фотодиод–устройство ввода с прямой инжекцией заряда” проводится в рамках “классической” модели фотодиода, когда его фототок определяется как

$$I = \eta_k I_\phi + I_0 \left[1 - \exp(-\beta V_{фд}) \right] + \frac{V_{фд}}{R_{ш}},$$

где η_k – квантовая эффективность фотодиода, I_ϕ – ток фонового излучения, I_0 – ток насыщения фотодиода, $\beta = kT/q$, k – постоянная Больцмана, T – температура, q – заряд электрона, $V_{фд}$ – напряжение на фотодиоде, $R_{ш}$ – шунтирующее сопротивление фотодиода.

Коэффициент ввода тока η_I определяется выражением

$$\eta_I = \frac{g_{вх}}{1/R_{фд} + g_{вх} + j\omega C_{вх}}.$$

Здесь $g_{вх} = \partial I_{вх}/\partial V \approx qI_{вх}/kTN^*$ – проводимость канала входного затвора, $R_{фд}$ – динамическое

сопротивление фотодиода, $C_{\text{вх}}$ – емкость входного узла фотоприемного канала, $I_{\text{вх}}$ – ток, интегрируемый в устройстве считывания, $N^* = (C_{\text{пд}} + C_{\text{оо}} + C_{\text{пс}})/C_{\text{пд}}$, $C_{\text{пд}}$ – удельная емкость подзатворного диэлектрика, $C_{\text{оо}}$ – удельная емкость области обеднения, $C_{\text{пс}}$ – удельная емкость быстрых поверхностных состояний, ω – круговая частота.

Шумовой заряд $\bar{Q}(t)$, интегрируемый под затвором накопления прямоинжекционного устройства считывания, рассчитывается с помощью функции Макдональда в терминах спектральной плотности $S_i(\omega)$ [7]:

$$\bar{Q}^2(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{S_i(\omega)}{\omega^2} (1 - \cos \omega t) d\omega.$$

Спектральная плотность шумового тока канала под входным затвором определяется выражением

$$S_i(\omega) = 4kTg_{\text{вх}}\alpha_1 |1 - \eta_I|^2 + \frac{2\pi B_{\text{вх}} I_{\text{вх}}^2}{\omega} |1 - \eta_I|^2 + \left(2qI + \frac{4kT\alpha_2}{R} \right) |\eta_I|^2 + \frac{2\pi B}{\omega} (I - \eta_I I_{\text{ф}})^2 |\eta_I|^2.$$

Здесь первое и второе слагаемые описывают тепловые шумы и шумы типа $1/f$ входного МДП-транзистора, третье и четвертое – тепловые шумы и шумы типа $1/f$ фотодиода. При этом $B_{\text{вх}} = K/WL(C_{\text{пд}} + C_{\text{оо}})^2$, $B = 2\pi\alpha$, W и L – ширина и длина канала входного МДП-транзистора устройства ввода, α , α_1 , α_2 , K – численные коэффициенты [5, 8–11].

Обнаружительная способность фотоприемного канала со считыванием сигналов с ИК фотодиода в прямоинжекционное устройство ввода определяется выражением

$$D^* = \frac{(AT_{\text{н}})^{1/2} \eta_I \eta_{\text{к}}}{\left(\frac{\hbar c}{\lambda} \right) (Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + Q_4^2 + Q_5^2)^{1/2}},$$

где A – площадь фотодиода, $T_{\text{н}}$ – время накопления, $\hbar c/\lambda$ – энергия кванта света, λ – длина волны, Q_{1-4} – первая, вторая, третья и четвертая составляющие шума системы в выражении для $S_i(\omega)$, интегрируемые под затвором накопления устройства считывания за время $T_{\text{н}}$, Q_5 – прочие шумы, например шум измерительного канала, выраженные количеством электронов.

Расчет начинается с задания электрофизических и конструктивных параметров устройств считывания, фотоэлектрических параметров фотодиода и условий работы ИК ФПУ [5]. При заданном напряжении на входном затворе $V_{\text{вх}}$

вычисляются значения токов $I_{\text{вх}}$ и $I_{\text{фд}}$. Напряжение на фотодиоде определяется из условия $I_{\text{вх}} = I_{\text{фд}}$. В следующем цикле напряжению $V_{\text{вх}}$ присваивается новое значение и расчет всех характеристик повторяется. В итоге получаются зависимости всех основных параметров системы “фотодиод–прямоинжекционное устройство считывания” от напряжения смещения на затворе входного МДП-транзистора.

Примеры модельных расчетов системы

На рис. 1 приведены расчетные зависимости от $V_{\text{вх}}$ напряжения на фотодиоде $V_{\text{фд}}$, коэффициента ввода тока η_I , тока, вводимого в устройство считывания $I_{\text{вх}}$, и обнаружительной способности D^* при длинноволновой границе чувствительности фотодиода $\lambda = 10$ мкм. Значения конструктивных параметров, используемых при расчетах, следующие: $C_{\text{пд}} = 1,24 \times 10^{-7}$ Ф/см², $W \times L = 30 \times 3$ мкм, $C_{\text{вх}} = 0,5$ пФ, $\alpha = 10^{-3}$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$, $K = 1,5 \times 10^{-24}$ Ф²/см², $A = 5 \times 10^{-4}$ см², $\eta_{\text{к}} = 0,8$ и $T = 77$ К. Произведение $g_{\text{вх}} R_{\text{фд}}$ (при $V = 0$) равно 794 (кривые 1), 11,1 (кривые 2, 3), 3,4 (кривые 4) и 1,4 (кривые 5).

При $g_{\text{вх}} R_{\text{фд}} > 100$ систему можно назвать “идеальной” (кривые 1). Для такой системы при возрастании напряжения $V_{\text{вх}}$, когда напряжение на фотодиоде приближается к 0, величина η_I достигает значения, близкого к единице, а D^* совпадает с теоретическим пределом (для $\eta_{\text{к}} = 0,8$) чувствительности, ограниченной флуктуациями фонового излучения. С последующим возрастанием $V_{\text{вх}}$ для “идеальной” системы основные параметры фотоприемного канала (η_I , $I_{\text{вх}}$, D^*) практически не зависят от $V_{\text{вх}}$, электрофизических и конструктивных параметров устройств считывания. В “неидеальных” системах (кривые 2–5), для которых соотношение $g_{\text{вх}} R_{\text{фд}} \gg 1$ выполняется недостаточно строго, характер зависимостей $I_{\text{вх}}(V_{\text{вх}})$ и $D^*(V_{\text{вх}})$ существенно изменяется. Ток $I_{\text{вх}}$, интегрируемый в устройстве считывания, возрастает с увеличением $V_{\text{вх}}$, а кривые $D^*(V_{\text{вх}})$ имеют хорошо выраженный максимум при напряжениях $V_{\text{вх}}$, при которых фотодиод на 5–30 мВ смещен в обратном направлении. Значение D^* , наоборот, относительно слабо зависит от произведения $g_{\text{вх}} R_{\text{фд}}$, в частности, при изменении соотношения $g_{\text{вх}} R_{\text{фд}}$ с 794 до 3,4 (кривые 1 и 4 на рис. 1г) D^* уменьшается с $2,87 \times 10^{11}$ смГц^{1/2}/Вт до $1,96 \times 10^{11}$ смГц^{1/2}/Вт, т. е. менее чем в 1,5 раза. Отметим, что для кривых 2 и 3 на рис. 1г произведение $g_{\text{вх}} R_{\text{фд}}$ одинаково, однако зависимости

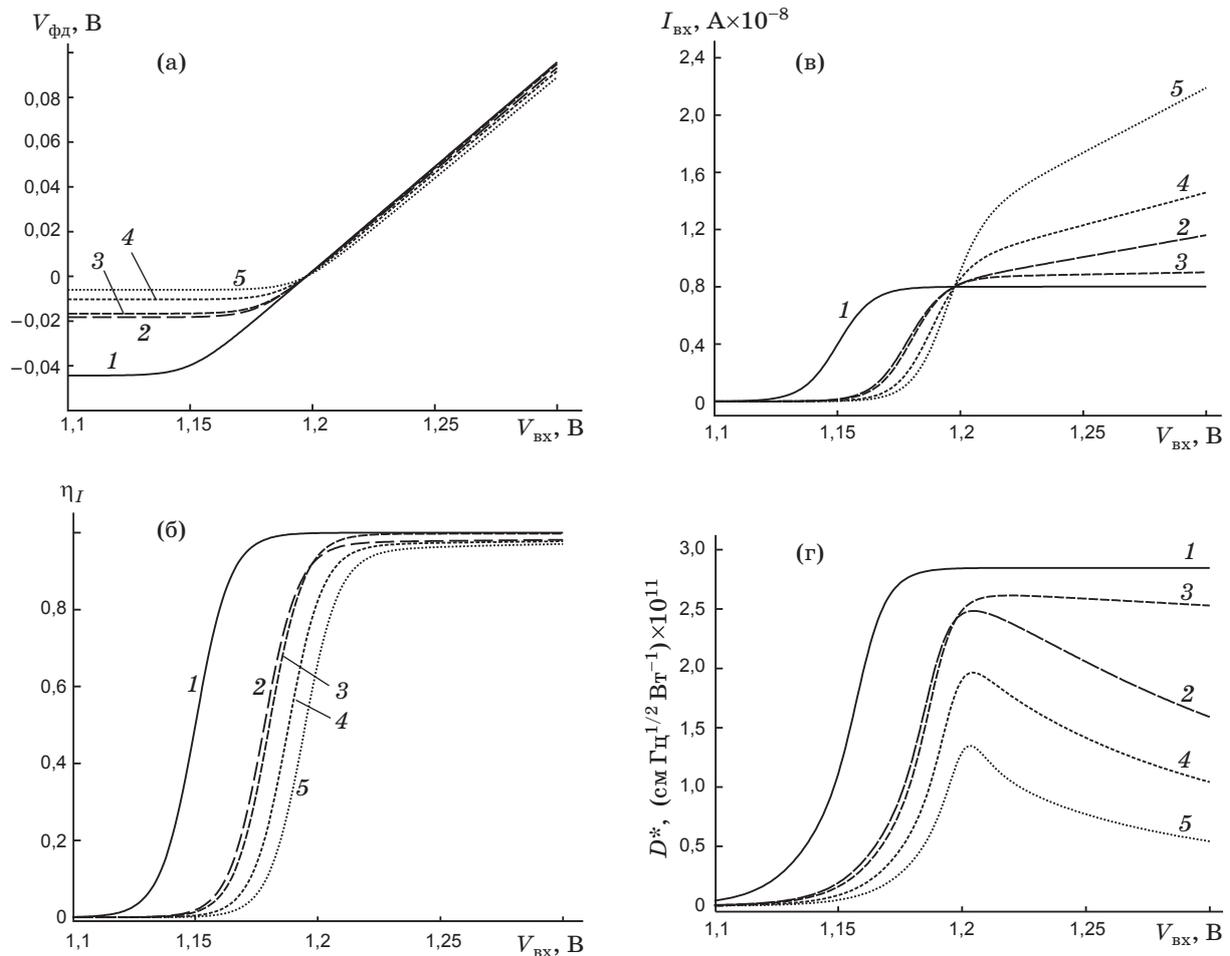


Рис. 1. Расчетные зависимости характеристик системы фотодиод–прямоинжекционное устройство считывания от напряжения смещения на входном затворе $V_{вх}$: а – напряжение на фотодиоде, б – коэффициент ввода тока η_I , в – ток, интегрируемый в устройстве считывания $I_{вх}$; г – обнаружительная способность D^* при времени накопления $T_{н} = 5 \times 10^{-4}$ с, $I_{ф} = 1 \times 10^{-8}$ А, $\eta_{к} = 0,8$; для кривой 1 – $I_0 = 1 \times 10^{-11}$ А, $R_{ш} = 1 \times 10^{11}$ Ом; 2 – $I_0 = 5 \times 10^{-10}$ А, $R_{ш} = 3 \times 10^7$ Ом; 3 – $I_0 = 7 \times 10^{-10}$ А, $R_{ш} = 3 \times 10^8$ Ом; 4 – $I_0 = 2 \times 10^{-9}$ А, $R_{ш} = 2 \times 10^7$ Ом; 5 – $I_0 = 5 \times 10^{-9}$ А, $R_{ш} = 1 \times 10^7$ Ом.

$I_{вх}(V_{вх})$ (рис. 1в) и $D^*(V_{вх})$ (рис. 1г) существенно отличаются.

Причины этих отличий становятся ясными из расчетных зависимостей, приведенных на рис. 2, на которых дополнительно к зависимостям $D^*(V_{вх})$ (правая ось) показаны зависимости $Q_1(V_{вх}), Q_2(V_{вх}), Q_3(V_{вх}), Q_4(V_{вх})$ (левая ось). Для “идеальной” системы (рис. 2а) суммарный шум Q_{Σ} определяется токовым шумом фотодиода Q_3 , практически совпадающим с шумом, обусловленным флуктуациями фонового излучения. Для “неидеальных” систем (рис. 2б, 2в) Q_{Σ} растет с ростом от $V_{вх}$. Возрастание шума и, соответственно, снижение D^* определяется, главным образом, ростом компонентов Q_3, Q_4 . При этом разница в зависимостях D^* с увеличением $V_{вх}$

определяется в основном ростом шумов фотодиода типа $1/f$ (компонент Q_4), а отличие в зависимостях $Q_4(V_{вх})$ обусловлено большим током $I_{вх}$ и меньшим коэффициентом ввода тока η_I . Таким образом, при фиксированном произведении $g_{вх}R_{фд}$ и нулевом напряжении на фотодиоде лучшую чувствительность ИК ФПУ обеспечивают диоды с большим динамическим сопротивлением при их смещении на 10–30 мВ в обратном направлении. Шумы входного МДП-транзистора (кривые 1, 2) существенны только при напряжениях $V_{вх}$, когда $\eta_I \ll 1$, даже если $g_{вх}R_{фд} \approx 1$, и для современного уровня кремниевой технологии ($C_{пд} \approx (0,5-1,2) \times 10^{-7}$ Ф/см², $N^* \approx 1$) они не ограничивают обнаружительную способность ИК ФПУ.

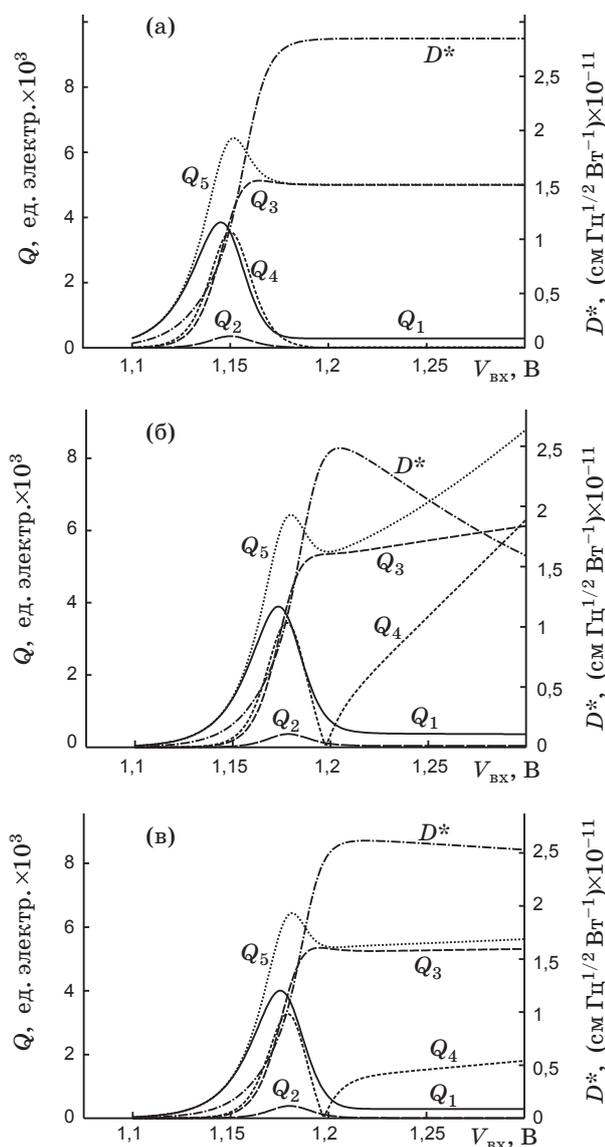


Рис. 2. Расчетные зависимости компонентов шума Q_1 – Q_4 и обнаружительной способности от $V_{\text{вх}}$. Для кривых Q_1 – Q_3 параметры фотодиода те же, что на рис. 1 для кривых 1, 2, 3 соответственно. Левая ось ординат – компоненты шума Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ; $Q_5 = (Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + Q_4^2)^{1/2}$; правая ось ординат – $D^*(V_{\text{вх}})$.

Одними из важнейших характеристик многоэлементных ИК ФПУ являются уровень геометрического шума и однородность по чувствительности фотоприемных каналов. Однородность фотоэлектрических параметров определяется разбросом фотоэлектрических параметров фотодиодов ($\eta_k, R_{\text{ш}}, I_0$) и электрофизических и конструктивных параметров устройств считывания. Для устройств считывания с прямой инжекцией, работающих в режиме слабой инверсии, основную роль играет не разброс геометрических размеров затворов входного МДП-транзистора, а разброс их пороговых напряжений. Разброс

пороговых напряжений приводит к разбросу напряжений смещения на фотодиоде, разбросу коэффициентов ввода тока η_I и, как следствие, к изменению передаточных характеристик.

На рис. 3 приведены расчетные гистограммы входных токов $I_{\text{вх}}(V_{\text{вх}})$ (а, б) и обнаружительной способности $D^*(V_{\text{вх}})$ (в, г) при среднеквадратическом отклонении (СКО) пороговых напряжений входного МДП-транзистора $\sigma(V_{\text{пор}}) = 10$ мВ. Такое значение СКО типично для изделий большинства современных предприятий микроэлектронной промышленности [12]. При расчетах считалось, что разброс пороговых напряжений описывается нормальным распределением с количеством реализаций, равным 1000. Оптимальное напряжение $V_{\text{вх}}$, при котором уровень геометрических шумов минимален $\Delta(I_{\text{вх}})$ (рис. 3б) и количество фотоприемных каналов с пониженной обнаружительной способностью минимально (рис. 3г), равно 1,231 В. Для одиночного фотоприемного канала максимальное значение D^* достигается при напряжении $V_{\text{вх}} = 1,205$ В (рис. 1, кривая 2). При этом напряжении, с учетом дисперсии пороговых напряжений, уровень геометрического шума существенно выше (рис. 3а), выше и процент фотоприемных каналов с пониженной чувствительностью. Из расчетных зависимостей также следует, что даже при оптимальном для многоэлементных ИК ФПУ напряжении $V_{\text{вх}} = 1,231$ В для 2% элементов разброс пороговых напряжений ведет к большей потере в обнаружительной способности, чем 2–4-кратное уменьшение динамического сопротивления фотодиодов. В данном случае, чтобы избежать существенного ухудшения параметров многоэлементных ИК ФПУ, необходимо иметь доступ к кремниевой технологии с $\sigma(V_{\text{пор}})$ не более 2–3 мВ.

Моделирование системы с использованием экспериментальных вольтамперных характеристик фотодиодов

Развитая выше методика дает возможность проводить анализ системы “фотодиод–прямоинжекционное устройство считывания” на основе экспериментальных вольтамперных характеристик (ВАХ) фотодиодов. На рис. 4 приведены два семейства “темновых” и “световых” ВАХ фотодиодов на основе варизонной гетероэпитаксиальной структуры $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ со стехиометрическим составом фоточувствительного слоя $x = 0,225$ (показаны выборки по 100 фо-

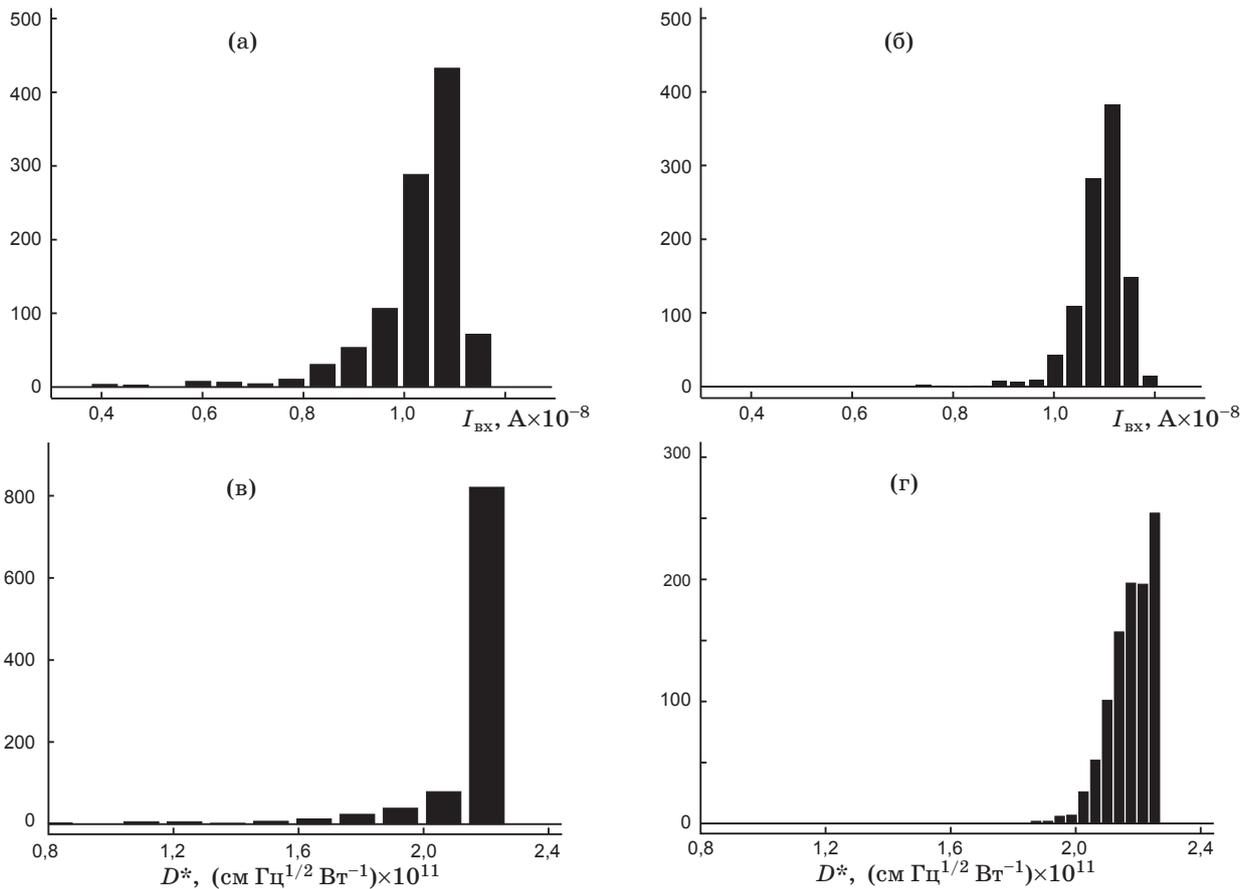


Рис. 3. Влияние разброса пороговых напряжений на характеристики многоэлементных ИК ФПУ. Гистограммы распределения токов $I_{\text{вх}}(V_{\text{вх}})$ – а, б; $D^*(V_{\text{вх}})$ – в, г, при СКО пороговых напряжений входного МДП-транзистора с $\sigma(V_{\text{вх}}) = 10$ мВ, $I_0 = 7 \times 10^{-10}$ А, $R_{\text{ш}} = 3 \times 10^8$ Ом, $I_{\text{ф}} = 1 \times 10^{-8}$ А, $\eta_{\text{к}} = 0,8$, при напряжениях $V_{\text{вх}} = 1,205$ (а, в) и $1,231$ В (б, г).

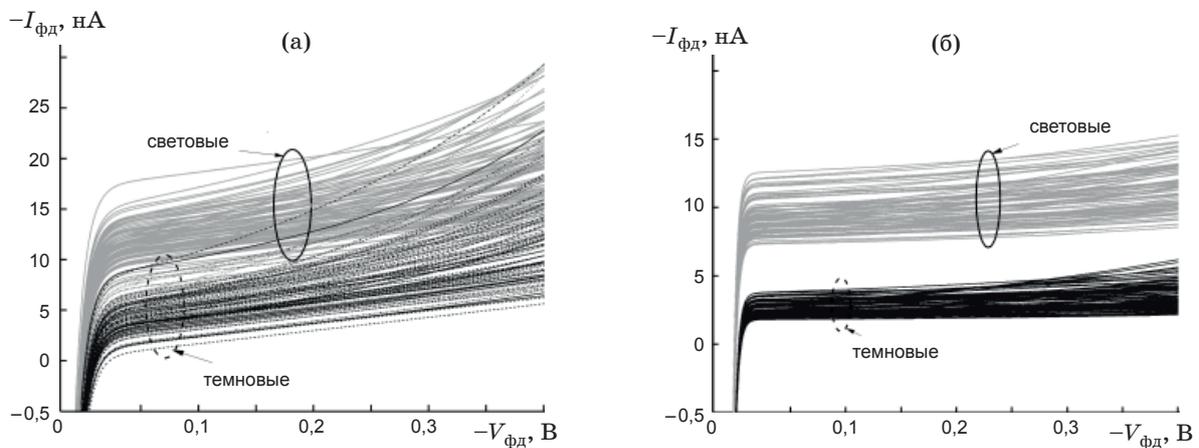


Рис. 4. Два семейства экспериментальных “темновых” и “световых” ВАХ фотодиодов на основе варизонной гетероэпитаксиальной структуры $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с стехиометрическим составом фоточувствительного слоя $x = 0,225$ [13].

тодиодам). ВАХ получены аппроксимацией экспериментальных зависимостей выражением $I(V_{\text{фд}}) = C_0 + C_1 \exp(C_2 V_{\text{фд}}) + C_3 \exp(C_4 V_{\text{фд}}) + C_5 V_{\text{фд}}$, где коэффициенты $C_0 - C_5$ подбираются индивидуально для каждого фотодиода. Фотодиоды,

ВАХ которых показаны на рис. 4, изготовлены на одинаковых подложках; отличие в ВАХ обусловлено изменениями в технологии нанесения пассивирующих защитных слоев [13].

Анализ системы с использованием экспериментальных ВАХ фотодиодов позволяет также

рассчитать все основные характеристики фотоприемного канала – $\eta_I(V_{\text{ВХ}})$, $I_{\text{ВХ}}(V_{\text{ВХ}})$, $D^*(V_{\text{ВХ}})$. В качестве примера на рис. 5 даны зависимости $D^*(V_{\text{ВХ}})$ при СКО пороговых напряжений $\sigma(V_{\text{пор}}) = 10$ мВ для пяти произвольно выбранных ИК фотодиодов с ВАХ из семейства кривых, приведенных на рис. 4 соответственно. Зависимости $D^*(V_{\text{ВХ}})$ на рис. 5 объясняют влияние разброса ВАХ фотодиодов и разброса пороговых напряжений на однородность по чувствительности многоэлементных ИК ФПУ.

На рис. 6 представлены расчетные гистограммы $D^*(V_{\text{ВХ}})$ многоэлементных ИК ФПУ на основе фотодиодов с ВАХ, приведенными на рис. 4, при СКО пороговых напряжений входного МДП-транзистора устройств считывания $\sigma(V_{\text{пор}}) = 10$ мВ при оптимальном для данных ВАХ напряжении $V_{\text{ВХ}} = 1,26$ В. Анализ показы-

вает, что для ИК ФПУ с ВАХ, приведенными на рис. 4а, доступ к высококачественной кремниевой технологии с дисперсией пороговых напряжений не более 2–3 мВ позволит существенно (на 20–30%) снизить геометрический шум $\Delta I_{\text{ВХ}}(V_{\text{ВХ}})$ и избежать появления фотоприемных каналов с D^* хуже 1×10^{11} смГц^{1/2}/Вт. Для ИК ФПУ на основе фотодиодов с ВАХ, приведенными на рис. 4б, разброс обнаружительной способности в меньшей степени зависит от разброса пороговых напряжений, а определяется в основном разбросом квантовой эффективности фотодиодов.

Необходимо отметить, что в данной работе численные значения коэффициентов α , α_1 , α_2 , K взяты из литературных источников [9, 10] и могут существенно отличаться от экспериментальных, измеренных на конкретных фотоприемниках, кремниевых кристаллах с устрой-

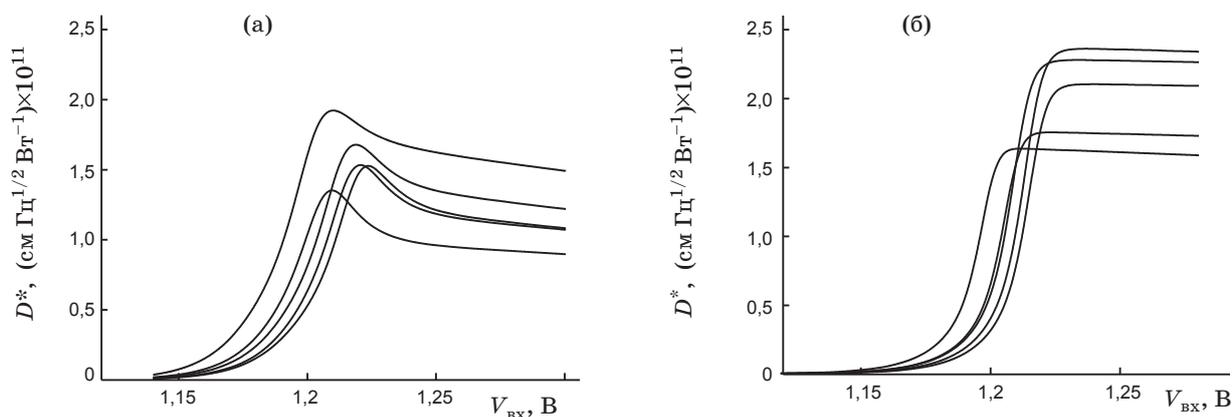


Рис. 5. Расчетные зависимости $D^*(V_{\text{ВХ}})$ для 5 произвольных фотодиодов из серии ВАХ. а и б – для фотодиодов с ВАХ, приведенными на рис. 4а и 4б соответственно при СКО пороговых напряжений с $\sigma(V_{\text{пор}}) = 10$ мВ.

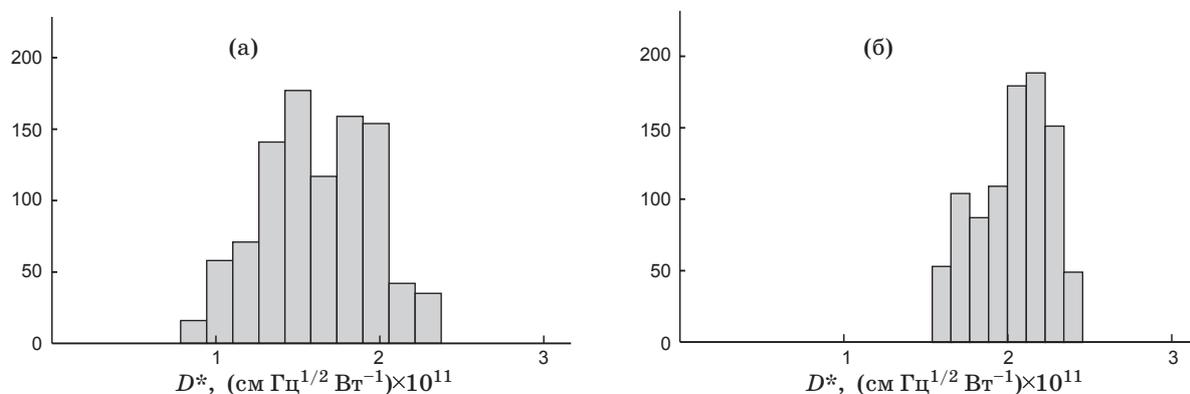


Рис. 6. Расчетные гистограммы обнаружительной способности многоэлементных ИК ФПУ при СКО пороговых напряжений с $\sigma(V_{\text{пор}}) = 10$ мВ; а и б соответствуют ВАХ фотодиодов на рис. 4а и 4б.

ствами считывания. При этом уточнения значений коэффициентов α_1 и K практически не изменят результатов численного расчета. Тем не менее, как показывает сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей, расчетные зависимости с достаточной точностью соответствуют экспериментальным. Предложенные модель, методика и программа дают возможность выявить основные особенности, выработать критерии и требования к электрофизическим и конструктивным параметрам, прогнозировать характеристики многоэлементных ИК ФПУ на основе системы “фотодиод–прямоинжекционное устройство считывания”. Значения численных коэффициентов либо уточненные модели шумов фотодиодов легко могут быть встроены в программу, что позволит повысить точность прогнозирования параметров ИК ФПУ.

Выводы

Показано, что разработанные модель и программа расчета системы “ИК фотодиод–прямоинжекционное устройство считывания” обеспечивают возможность детального сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей основных фотоэлектрических параметров ИК ФПУ, прогнозировать и оптимизировать параметры многоэлементных ИК ФПУ и тепловизионных систем на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы. Пер. с англ. / Под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. *Steckl A., Koehler T.* Theoretical analysis of directly coupled 8–12 μm hybrid IR CCD serial scanning // Proc. Int. Conf. Application of CCD's. 1973. P. 247–258.
3. *Longo J.T., Cheung D.T., Andrews A.M., Wang C.C., Tracy J.M.* Infrared focal plane in intrinsic semiconductors // IEEE J. Solid State Circuits. 1978. V. SC-13. № 1. P. 139–157.
4. *Felix P., Moulin M., Munier B., Portmann J., Rebold J.* CCD readout of infrared hybrid focal – plane arrays // IEEE Transaction on Electron Devices. 1980. V. ED-27. № 1. P. 175–188.
5. *Кунакбаева Г.Р., Лу И.И., Черепов Е.И.* Система фотодиод–ПЗС-устройства ввода с прямой инжекцией для многоэлементных ИК ФПУ // Радиотехника и электроника. 1993. В. 5. С. 922–930.
6. *Overstraeten R., Declerck G., Muls P.* Theory of the MOS transistor in weak inversion – new method to determine the number of surface states // IEEE Trans. Electron Devices. 1975. V. ED-22. P. 282–288.
7. *Букингем М.* Шумы в электронных приборах и системах. М.: Мир, 1986. 338 с.
8. *Buss D., Kansy R., Barton J.* KTC noise on direct injection from IR diodes // IEEE Trans. Electron Devices. 1980. ED-27. № 5. P. 998–1000.
9. *Chow K., Roud J., Sub D., Blackwell J.* Hybrid infrared focal-plane arrays // IEEE Trans. Electron Devices. 1982. V. ED-29. P. 3–13.
10. *Reibold G.* Modified $1/f$ trapping noise theory and experiments in MOS transistors biased from weak to strong inversion – influence of interface states // IEEE Trans. Electron Devices. 1984. V. ED-31. P. 1190–1198.
11. *Tobin S., Iwasa S., Tredwell T.* $1/f$ noise in (Hg, Cd)Te photodiodes // IEEE Trans. Electron Devices. 1980. V. ED-27. P. 43–48.
12. *Козлов А., Марчишин И., Овсяк В.* Кремниевые мультиплексоры 1×576 для ИК фотодиодов на основе соединений кадмий–ртуть–теллур // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 4. С. 278–286.
13. *Васильев В.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Марчишин И.В., Михайлов Н.Н., Предеин А.В., Ремесник В.Г., Сабина И.В., Сидоров Ю.Г., Сусяков А.О.* Матричные фотоприемники 320×256 со встроенным коротковолновым отрезающим фильтром // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 36–41.