

УДК 621.383.4/5.012:546.48'49'24

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Б. П. Мухачев, С. В. Артамонов
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Рассматривается методика, позволяющая определить параметры (ширину электродов и время накопления сигнала) интегральной фоточувствительной ячейки матричного фотоприемного устройства оптико-электронных средств, исходя из максимизации предельной обнаружительной способности данного фоточувствительного элемента на фоне собственных шумов. Приводятся результаты расчетов для интегральной фоточувствительной ячейки на основе материала InSb.

Краткое описание архитектуры и функционирования интегральной фоточувствительной ячейки

Фоточувствительная ячейка (ФЧЯ) интегральной инфракрасной (ИК) матрицы нового типа, разработанной в Государственном научном центре Российской Федерации НПО "Орион" [1], выполняет три основные функции: регистрацию ИК-излучения, накопление сигнала и его считывание. ФЧЯ представляет собой (рис. 1) планарный p - n -переход, совмещающий в себе функции фоточувствительного элемента (ФЧЭ) и элемента коммутации, покрытого сверху тонким слоем диэлектрика, на который, в свою очередь, нане-

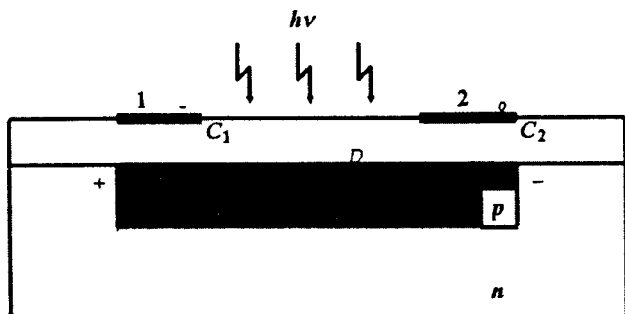


Рис. 1. Архитектура интегральной ФЧЯ: 1 — электрод, соединенный с шиной столбца ИК-матрицы; 2 — электрод, соединенный с шиной строки ИК-матрицы; D — диэлектрический слой; p и n — области полупроводника p - и n -типа проводимости соответственно

сены два тонких проводящих слоя, выполняющих роль электродов. Емкости, образованные между этими электродами и p^+ -областью p^+ - n -перехода, выполняют функции элементов накопления сигнала и его считывания. Электроды могут располагаться на разных уровнях и быть как прозрачными, так и непрозрачными для ИК-излучения.

Структура соединения ФЧЯ в рассматриваемой матрице показана на рис. 2. Все электроды 1 каждого из столбцов ИК-матрицы соединены между собой узкими проводящими перемычками (шинами) Y_i , а все электроды 2 каждой из строк матрицы соединены между собой шиной X_j , изолированными от шин Y_i . Каждая из шин X_j соединена с инвертирующим входом соответствующего операционного усилителя, который работает в режиме усилителя заряда и поддерживает напряжение, близкое к нулю, на каждой шине X_j . Слой полупроводника n -типа, выполняющий роль подложки фоточувствительной матрицы, заземлен, т. е. на нем поддерживается напряжение, равное нулю.

Рис. 2 демонстрирует режим накопления, когда ключи в цепях обратной связи операционных усилителей замкнуты. Накопление сигнала происходит непрерывно и одновременно на всех ФЧЯ, а считывание осуществляется сразу со всего выбранного столбца (строки) и происходит за время, много меньшее времени накопления. При этом все столбцы (строки) опрашиваются в течение времени накопления сигнала.

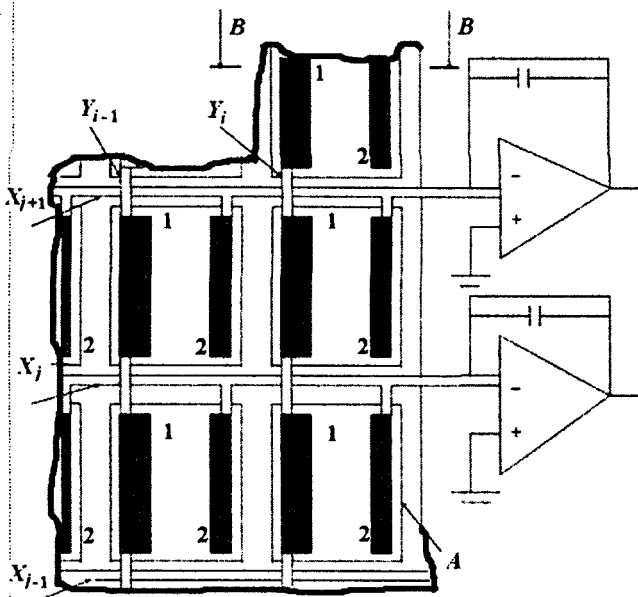


Рис. 2. Схема организации ИК-матрицы (структура соединения ФЧЯ и операционных усилителей): \$Y_i\$ — шины столбцов, соединяющие электроды 1 ФЧЯ; \$X_j\$ — шины строк, соединяющие электроды 2 ФЧЯ; \$A\$ — общая площадь \$p\$-области ФЧЯ; \$B-B\$ — сечение ФЧЯ

Математическое описание процесса накопления сигнала интегральной ФЧЯ

Уравнение, описывающее процесс накопления заряда в ФЧЯ, имеет вид [1]

$$(C_1 + C_2) \frac{\partial V(t)}{\partial t} = q\eta (J_b + J_s) F_3(t) + \frac{qn_i W(t) A}{\tau}, \quad (1)$$

$$W(t) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 (V_k - V(t))}{qN_d}},$$

$$C_1 + C_2 \gg C_{pn},$$

$$C_{pn}(V) = A \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 q N_d}{2(V_k - V(t))}}.$$

Здесь \$C_1 = A_1 \left(\frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0}{D} + \frac{\epsilon\epsilon_0}{X_d} \right)\$, \$C_2 = A_2 \left(\frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0}{D} + \frac{\epsilon\epsilon_0}{X_d} \right)\$ — емкости электродов 1 и 2 соответственно; \$A_1, A_2\$ — площади металлических контактов (электродов) 1 и 2 (см. рис. 1); \$\epsilon_{ox}\$ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя; \$\epsilon_0\$ — электрическая постоянная; \$D\$ — толщина диэлектрика; \$\epsilon\$ — отно-

сительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; \$X_d = \sqrt{\left(\frac{\epsilon D}{\epsilon_{ox}} \right)^2 + \frac{2|V(0)|\epsilon\epsilon_0}{qN_a}} - \frac{\epsilon D}{\epsilon_{ox}}\$ — ширина области пространственного заряда в полупроводнике; \$V_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}\$ — контактная разность потенциалов \$p\$-\$n\$-перехода [2]; \$k\$ — постоянная Больцмана; \$T\$ — рабочая температура ФЧЯ; \$q\$ — заряд электрона; \$N_a\$ — концентрация акцепторов; \$N_d\$ — концентрация доноров; \$n_i\$ — собственная концентрация носителей в полупроводнике; \$\eta\$ — квантовая эффективность поглощения ИК-излучения; \$J_b\$ и \$J_s\$ — плотности потоков фотонов фонового и сигнального излучений соответственно, падающих на ФЧЯ; \$\tau\$ — эффективное время генерации носителей в области пространственного заряда; \$F_3(t)\$ — засвеченная в момент времени \$t\$ площадь чувствительной поверхности ФЧЯ (рис. 3).

При выводе дифференциального уравнения, описывающего накопления сигнала в ФЧЯ, пренебрегли туннельным током, так как напряжение, приложенное к \$p\$-\$n\$-переходу в начальный момент времени, меньше напряжения пробоя.

Решение уравнения (1) в момент окончания накопления \$t = t_{in}\$, равно \$V(t_{in}) = f(J_s, x_1, x_2)\$,

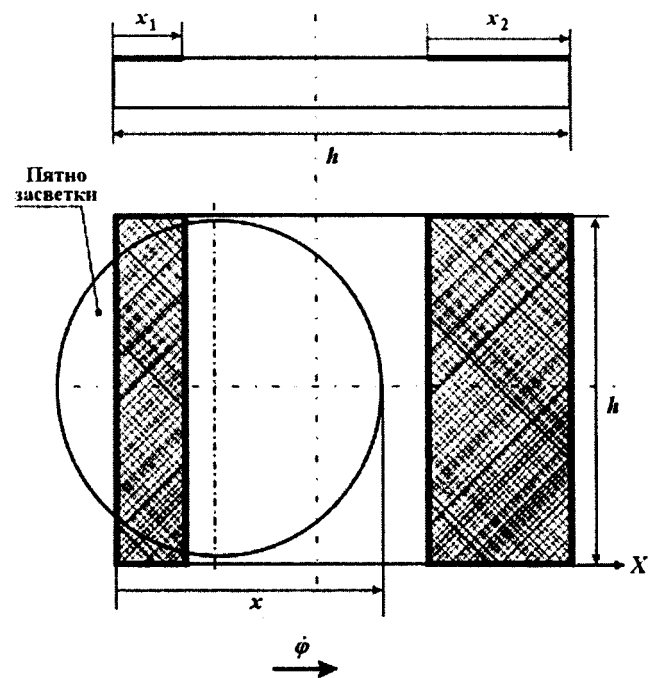


Рис. 3. Засвеченная фоточувствительная часть ФЧЯ: \$h\$ — размер ФЧЯ; \$x_1, x_2\$ — ширина первого и второго электродов соответственно; \$\phi\$ — угловая скорость движения пятна изображения по ФЧЯ

при условии, что в момент времени $t = 0$ напряжение на p - n -переходе было равно $V(0)$, ищется численно.

Считаем, что дифракционная картина ограничивается только одним пятном, первым пятном Эри, внутри которого сосредоточено 90 % [3] всей энергии падающего потока, и энергия распределена равномерно по всему пятну. Тогда площадь чувствительной поверхности ФЧЯ, засвеченная на момент времени t_i , вычисляется следующим образом (рис. 4):

$$F_3(t_i) = \sum_{j=1}^{N_F} \Delta F_{3j}.$$

Здесь

$$\Delta F_{3j} = \begin{cases} \Delta F_3, & \text{если } (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 \leq r_d^2; \\ 0, & \text{если } (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 > r_d^2; \end{cases}$$

$\Delta F_3 = \Delta x \Delta y$; $x_0 = x - r_d$; $y_0 = h/2$; r_d — радиус пятна изображения; N_F — количество факетов, аппроксимирующих поверхность ФЧЯ; x_j, y_j — координаты центра рассматриваемого факета, которые вычисляются по следующим формулам:

$$x_0 = x_1; \quad y_0 = h;$$

$$y_j = \begin{cases} \frac{\Delta y}{2}, & \text{если } y_{j-1} > h - \frac{3\Delta y}{2}; \\ y_{j-1} + \frac{\Delta y}{2}, & \text{если } \frac{\Delta y}{2} \leq y_{j-1} \leq h - \frac{3\Delta y}{2}; \end{cases}$$

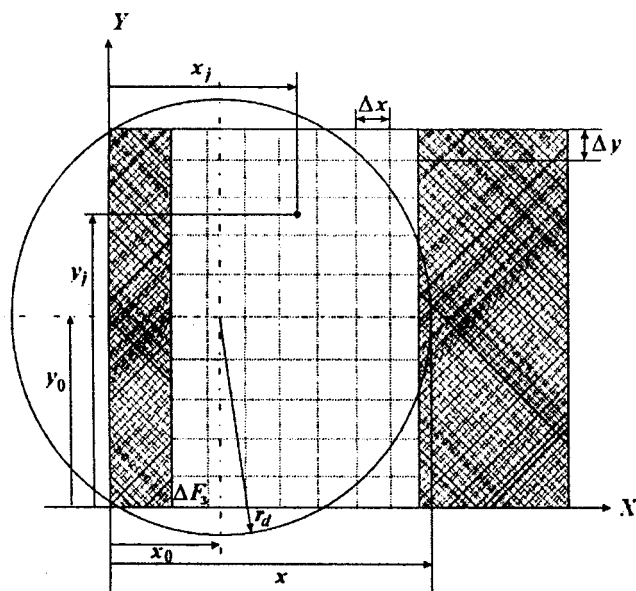


Рис. 4. Определение площади засвеченной фоточувствительной части ФЧЯ

$$x_j = \begin{cases} x_{j-1}, & \text{если } \frac{\Delta y}{2} \leq y_j \leq h - \frac{\Delta y}{2}; \\ x_{j-1} + \frac{\Delta x}{2}, & \text{если } y_j = \frac{\Delta y}{2}. \end{cases}$$

Устройство считывания сигнала, представленное в данном случае зарядовым усилителем, — неотъемлемая часть матричного фотоприемного устройства (ФПУ) [1]. Поэтому при рассмотрении пороговых характеристик матрицы необходимо учитывать не только темновой шум ФЧЯ и шум, связанный с флуктуациями фонового излучения (как это делается при расчете пороговых характеристик единичных фотоприемников [4, 5]), но и так называемый kTC -шум [6] и шум зарядового усилителя. Эти шумы не коррелированы, поэтому суммарная дисперсия флуктуаций напряжения на выходе прибора равна сумме дисперсий каждого шума [1]:

$$\overline{\Delta U^2} = \overline{\Delta U_{C_2}^2} + \frac{kT}{C_{cr} + C_b + \frac{nC_1C_2}{C_1 + C_2}} + S_{am}\Delta f,$$

где $\overline{\Delta U_{C_2}^2} = q|V(t_{in}) - V(0)|/C_2$ — дисперсия флуктуаций напряжения на конденсаторе C_2 в момент времени t_{in} , определяемых темновыми шумами ФЧЯ и флуктуациями фонового излучения; kT/C_Σ — дисперсия флуктуаций напряжения, связанных со случайной установкой начального значения потенциала (и заряда) на ФЧЯ (с kTC -шумом); k — постоянная Больцмана; T — рабочая температура ФЧЯ; C_Σ — суммарная емкость, подключенная к входу зарядового усилителя; C_{cr} — суммарная емкость перекрестий шин строки и столбцов матрицы; C_b — емкость шины строки; $S_{am}\Delta f$ — дисперсия флуктуаций напряжения, определяемых шумом зарядового усилителя; S_{am} — спектральная плотность шума усилителя; $\Delta f = 2n/t_{in}$ — полоса частот усилителя; n — число ячеек в строке матрицы.

При выводе уравнения для суммарной дисперсии флуктуаций напряжения ΔU^2 не учитывались шумы, связанные с состояниями на границе раздела *полупроводник-диэлектрик*. Справедливость этого допущения основана на том, что в рассматриваемой ФЧЯ не происходит переноса заряда вдоль границы раздела *полупроводник-диэлектрик* между пространственно-разнесенными электродами. Кроме того, разработчиками предполагалось, что при последующей обработке сигнала не используется метод двойной коррелированной выборки [6], который позволяет устранить kTC -шум. Если же в системе обработки

сигнала используется этот метод, то kTC -шумом можно пренебречь.

Так как математическое ожидание флуктуаций напряжения на выходе прибора равно нулю, то зависимость для отношения сигнал/шум имеет вид

$$S_{c/ш} = \frac{|V(t_{in}) - V_d(t_{in})|}{\Delta U},$$

где $V_d(t_{in})$ — решение дифференциального уравнения при отсутствии засветки J_s .

При выводе зависимости для отношения сигнал/шум не учитывалось, что при считывании накопленного заряда с i -й ФЧЯ j -й строки матрицы через шину X_j этой строки и цепь обратной связи j -го операционного усилителя (см. рис. 2), кроме тока разрядки емкости C_2 опрашиваемой ФЧЯ, протекает ток, связанный с накоплением фонового и сигнального зарядов на остальных ФЧЯ строки. Но, как утверждают разработчики этой матрицы, если считать сигнал с каждой ФЧЯ строки (столбца) за время, меньшее t_{in}/n (что приведет к увеличению полосы частот усилителя и ужесточению требований к его шумовым характеристикам), то этот дополнительный шум будет подавлен [1].

Так как в данной работе исследуются предельно возможные обнаружительные характеристики матрицы ФПУ, то ширина электрода 1 (см. рис. 1) оптимизироваться не будет. В рассматриваемом случае ширина x_1 выбрана на порядок больше толщины диэлектрика (условие правомочности применения теории плоского конденсатора), т. е. $x_1 = 1$ мкм.

Определение ширины электродов и времени накопления сигнала интегральной ФЧЯ матричного ФПУ оптико-электронных средств

Изменение площади засвеченной части чувствительной поверхности ячейки $F_3(t)$ при движении пятна в течение всего процесса накопления в самом общем виде при условии, что диаметр дифракционного пятна больше линейного размера ФЧЯ, показано на рис. 5.

За общее время t_{np} нахождения пятна в ячейке можно произвести K считываний реализованного фототока, накопленного за время t_{in} (рис. 6), т. е.

$$K \left(0 \leq t_{in} \leq \frac{h - x_1 - x_2 + 2r_d}{F\dot{\varphi}} \right) =$$

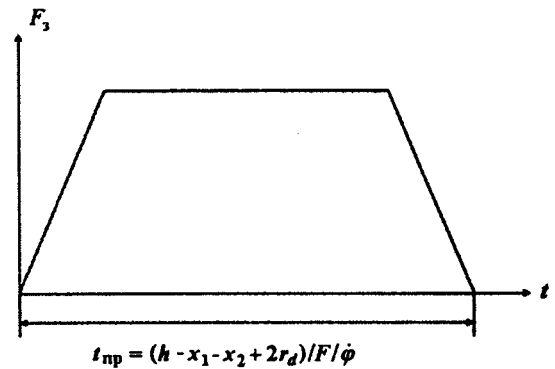


Рис. 5. Процесс засвечивания ячейки дифракционным пятном (F — фокус оптической системы)

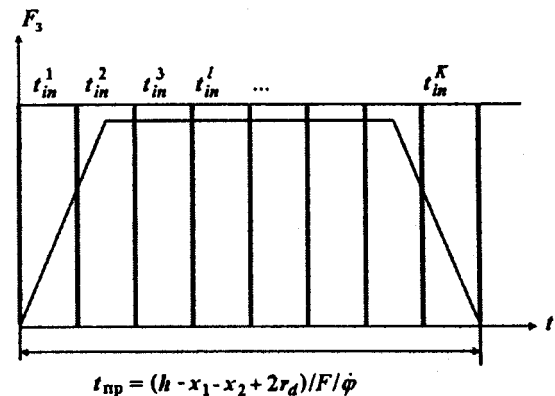


Рис. 6. Схема K считываний

$$= \begin{cases} 1, & \text{если } t_{in} = \frac{h - x_1 - x_2 + 2r_d}{F\dot{\varphi}}; \\ \text{int} \left(\frac{1}{t_{in}} \frac{h - x_1 - x_2 + 2r_d}{F\dot{\varphi}} \right) + 1, & \\ \text{если } t_{in} < \frac{h - x_1 - x_2 + 2r_d}{F\dot{\varphi}}. \end{cases}$$

Запаздывание системы в l -м считывании на время τ_3 учтем следующим образом (рис. 7):

$$F_3^l (0 \leq \tau_K \leq t_{in}; 0 \leq l \leq K) =$$

$$= \begin{cases} F_3^l(\tau_K) & \text{при } t_{in}(l-1) - \tau_3 \leq \tau_K \leq \\ & \leq t_{in}^l - \tau_3; \\ 0 & \text{при } \tau_K < 0; \tau_K > t_{np}. \end{cases}$$

Отношение сигнал/шум в l -м считывании будет функцией $S_{c/ш}^l = f(t_{in}, x_2, \dot{\varphi})$. Здесь t_{in} — время накопления сигнала; x_2 — ширина второго электрода; $\dot{\varphi}$ — угловая скорость движения пятна изображения по ФЧЯ.

Из [7] известно, что для сигнала со случайными амплитудой и начальной фазой вероятность обнаружения цели в l -м считывании сигнала

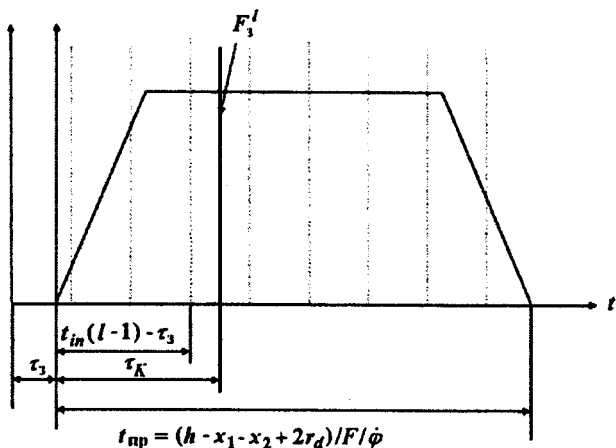


Рис. 7. Учет запаздывания системы

$$P_{\text{обн}}^l = P_{\text{лт}}^{1/(1+S_{\text{с/ш}}^l)}$$

где $P_{\text{лт}}$ — вероятность ложной тревоги; $S_{\text{с/ш}}^l$ — отношение сигнал/шум в l -м считывании сигнала.

Вероятность обнаружения цели за K считываний в общем случае зависит от времени запаздывания системы τ_3 , которое, в свою очередь, есть величина случайная. Поэтому в дальнейших расчетах будем ориентироваться на некую усредненную по τ_3 величину $P_{\text{обн}}^K$, которую вычислим как

$$P_{\text{обн}}^K = 1 - P_{\text{н}}^K,$$

где $P_{\text{н}}^K$ — средняя вероятность необнаружения цели,

$$P_{\text{н}}^K = \frac{1}{t_{\text{ин}}} \int_0^{t_{\text{ин}}} \prod_{l=1}^K (1 - P_{\text{обн}}^l(\tau_3)) d\tau_3.$$

Исходя из всего вышесказанного процедура определения ширины электродов x_1, x_2 и времени накопления сигнала $t_{\text{ин}}$ интегральной ФЧЯ матричного ФПУ оптико-электронных средств будет следующей:

1. Для заданной угловой скорости линии визирования ϕ определяется координата x прямолинейного и равномерного перемещения пятна изображения вдоль горизонтальной линейки фоточувствительных элементов матричного ФПУ по формуле $x = F\phi t$, $t \in [0, t_{\text{пр}}]$, где F — фокусное расстояние оптической системы; $t_{\text{пр}}$ — время прохождения пятна изображения по ФЧЭ матрицы фотоприемников.
2. Для ширины второго электрода x_2^i , выбранной из ряда $x_2^i \in [x_1, h - x_1]$ (см. рис. 3), ищется такое время накопления сигнала $t_{\text{ин}}^i$,

при котором вероятность обнаружения цели за K считываний будет максимальной: $P_{\text{обн}}^{iK} \rightarrow \max$, где $P_{\text{обн}}^K = 1 - \frac{1}{t_{\text{ин}}} \times$

$\times \int_0^{t_{\text{ин}}} \prod_{l=1}^K (1 - P_{\text{обн}}^l(\tau_3)) d\tau_3$; K — количество считываний сигнала, которое можно произвести за общее время $t_{\text{пр}}$ нахождения пятна на ФЧЭ; τ_3 — время запаздывания системы.

3. Из найденных максимумов определяется главный — максимально возможная вероятность обнаружения сигнального излучения на фоне собственных шумов для требуемой угловой скорости линии визирования. Этот глобальный максимум является искомым предельной обнаружительной характеристикой ФЧЯ. Одновременно с этим определяется оптимальная ширина второго электрода x_2 (ширина первого электрода x_1 берется постоянной и равной 1 мкм) и время накопления сигнала $t_{\text{ин}}$.

Результаты расчета оптимальных параметров интегральной ФЧЯ на основе материала InSb

Исходные данные, которые использовались для определения параметров интегральной ФЧЯ, приведены в таблице.

На рис. 8 представлены зависимости максимально возможной вероятности обнаружения $P_{\text{обн}}$ сигнального потока излучения ФЧЭ, времени накопления $t_{\text{ин}}$ и ширины второго электрода x_2 от угловой скорости линии визирования ϕ .

Исходные данные для определения параметров интегральной ФЧЯ

N	Величина	Обозначение	Единицы измерения
1	Плотность потока излучения, приходящего на ФЧЭ матрицы ФПУ	$J_s + J_b$	$5 \cdot 10^{12} (\text{см}^2 \cdot \text{с})^{-1}$
2	Фокус оптической системы	F	0,3 м
3	Размер ФЧЭ матрицы ФПУ	h	$2 \cdot 10^{-5}$ м
4	Ширина первого электрода	x_1	10^{-6} м
5	Вероятность ложной тревоги	$P_{\text{лт}}$	10^{-4}
6	Радиус пятна изображения на ФЧЭ	r_d	10^{-5} м

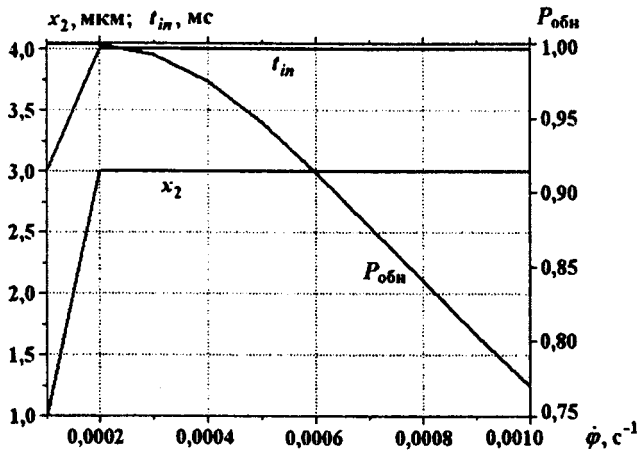


Рис. 8. Вероятность обнаружения сигнального излучения и оптимальные время накопления и ширина второго электрода ФЧЯ

Список литературы

1. Морозов В. А., Осипов В. В., Селяков А. Ю., Таубкин И. И. Интегральный матричный фотоприемник нового типа на основе InSb // Микроэлектроника. 1996. Т. 25, № 3. С. 163—175.

2. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988.
4. Неустроев Л. Н., Осипов В. В. К теории пороговых свойств полупроводниковых фотоприемников // Физика и техника полупроводников. 1981. Т. 15, № 11. С. 2186—2196.
5. Кернер Б. С., Осипов В. В., Смолин О. В., Султанов А. Н. Пороговые характеристики инфракрасных фоточувствительных приборов с зарядовой связью. Часть 1. Фоточувствительные элементы // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1989. № 8 (1502). С. 48.
6. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. М.: Мир, 1979.
7. Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы. М.: Советское радио, 1968.

Статья поступила в редакцию 18.04.07.