

УДК 621.383.52:621.723

## ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МИКРОСКОП НА БАЗЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИК ФПУ

© И. И. Ли, В. Г. Половинкин

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13  
E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru*

Предложен проект инфракрасного (ИК) микроскопа, регистрирующего собственное тепловое излучение объектов. Проведён анализ температурного разрешения ИК-микроскопа в зависимости от параметров оптической системы, конструктивных и фотоэлектрических параметров многоэлементных ИК ФПУ.

*Ключевые слова:* фотоприёмное ИК-устройство, микроскоп, устройство считывания, температурное разрешение, спектральный диапазон.

DOI: 10.15372/AUT20220514

**Введение.** Инфракрасный (ИК) микроскоп обычно рассматривают как разновидность микроскопа, в котором используется излучение ИК-диапазона для подсветки исследуемых объектов, непрозрачных для видимого излучения, либо ИК-микроскоп, оснащённый инфракрасным фурье-спектрометром [1]. Предметом данной работы является оптимизация облика тепловизионного микроскопа, регистрирующего собственное тепловое излучение объектов, а также системный анализ температурного разрешения в зависимости от параметров оптической системы микроскопа, спектрального диапазона, фотоэлектрических и конструктивных параметров многоэлементных ИК ФПУ.

**Структурная схема тепловизионного микроскопа.** Одной из основных проблем проектирования тепловизионного микроскопа является задача минимизации избыточного фонового излучения вне объектной области микроскопа. В [2, 3] для уменьшения фоновой нагрузки тепловизионного ИК-микроскопа применено экранирующее сферическое зеркало. В данной работе анализ тепловизионного микроскопа основан на традиционной оптической схеме ИК ФПУ, согласовании объектива с геометрией охлаждаемой диафрагмы [4].

Структурная схема тепловизионного микроскопа приведена на рис. 1. При анализе использовались следующие параметры оптической системы тепловизионного микроскопа и многоэлементного ИК ФПУ:

- относительное отверстие  $K_{DF} = D/F$  ( $D$  — диаметр и  $F$  — фокусное расстояние объектива микроскопа);
- охлаждаемая диафрагма  $D_{о.д}$  диаметром  $2R_{о.д}$ , расстояние  $h$  до фокальной плоскости ИК ФПУ;
- расстояние от объектива до матрицы ФПУ  $L = F(K_{\text{отт}} + 1)$ , где  $K_{\text{отт}}$  — коэффициент оптического увеличения;
- размер пикселя и формат ИК ФПУ;
- спектральный диапазон чувствительности ИК ФПУ  $\lambda_1 - \lambda_2$ ;
- квантовая эффективность фотоприёмников ( $\eta$ );
- зарядовая ёмкость устройства ввода и уровень собственных шумов кремниевого мультиплексора;
- температура фона ( $T_{\text{ф}}$ );
- температура исследуемого объекта ( $T_{\text{об}}$ ).

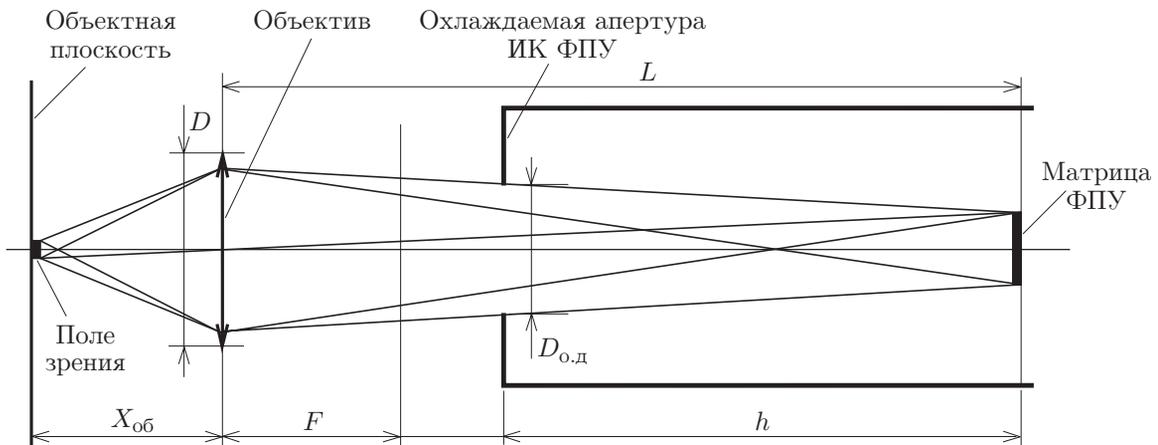


Рис. 1. Структурная схема тепловизионного микроскопа

**Температурное разрешение тепловизионного ИК-микроскопа.** При расчётах температурного и пространственного разрешения (NETD) тепловизионного микроскопа удобно ввести два обобщённых параметра: геометрический фактор охлаждаемой апертуры ИК ФПУ  $K_{о.д}$ , характеризующий долю фонового излучения, падающего на ФПУ через охлаждаемую диафрагму. Из структурной схемы тепловизионного микроскопа следует, что для круглой диафрагмы геометрический фактор охлаждаемой апертуры можно рассчитать по соотношению [5]

$$K_{о.д}(r) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{r^2 + h^2 - R_{о.д}^2}{\sqrt{(r^2 + h^2 + R_{о.д}^2)^2 - 4r^2 R_{о.д}^2}} \right],$$

где  $r$  — смещение элемента в фокальной плоскости от центра диафрагмы. Это соотношение также позволяет оценить неоднородность уровня фонового излучения от положения фоточувствительного элемента. Геометрический фактор (второй параметр) оптической системы тепловизионного микроскопа определяется как отношение излучения, падающего на единичную площадь в фокальной плоскости ИК ФПУ, к излучению на единичную площадь в объектной плоскости тепловизионного микроскопа без учёта геометрии охлаждаемой диафрагмы следующими соотношениями:

$$K_{об} = \left( \frac{\sin(\theta)}{K_{опт}} \right)^2, \quad \sin^2(\theta) = \frac{\tan^2(\theta)}{1 + \tan^2(\theta)}, \quad \tan(\theta) = \frac{D}{2X_{об}} = \frac{K_{DF}K_{опт}}{2(K_{опт} + 1)}.$$

Здесь  $\theta$  — апертурный угол в пространстве предметов.

В тепловизионном микроскопе необходимо учитывать взаимное виньетирование охлаждаемой диафрагмы и объектива. Источником полезного сигнала является только часть объектива, которая видна через  $K_{об}$  диафрагмы, а источником фонового сигнала является часть диафрагмы, которая не занята объективом  $K_{об}$ . Наш опыт проектирования криостатов тепловизионных систем различного назначения показывает, что расстояние от охлаждаемой диафрагмы до объектива  $\sim 20$  мм,  $h = L - 20$  мм.

Плотность потока фотонов в заданном спектральном диапазоне от источника с температурой  $T$  определяется известными выражениями:

$$N_{\Phi}(\lambda_1, \lambda_2, T) = \sigma_P T^3 \int_{x_2}^{x_1} \frac{x^2 \partial x}{e^x - 1}, \quad x_{1,2} = \frac{h\nu c}{\lambda_{1,2} k_B T},$$

$$\sigma_P = \frac{2\pi}{c^2} \left( \frac{k_B}{h\nu} \right)^3 = 6,325 \cdot 10^{10} \quad (\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}^3)^{-1}.$$

Здесь  $h\nu$  и  $k_B$  — постоянные Планка и Больцмана соответственно,  $c$  — скорость света. Для определения температурного разрешения необходимо вычислить  $\partial N_\Phi / \partial T$ .

$$\frac{\partial N_\Phi}{\partial T} = 3 \frac{N_\Phi}{T} - \sigma_P T^2 (f_p(x_1) - f_p(x_2)), \quad f_\Phi(x) = \frac{x^3}{e^x - 1}.$$

Количество электронов, накопленных фоточувствительным элементом (ФЧЭ) от фонового излучения и объекта, определяется выражениями:

$$S_\Phi = k_p N_\Phi(\lambda_1, \lambda_2, T_\Phi) K_{\text{о.д}}(r) K_{\text{о.д}}, \quad S_{\text{об}} = k_p N_\Phi(\lambda_1, \lambda_2, T) K_{\text{об}} k_r, \quad k_p = S_{\text{ФЧЭ}} t_a \eta,$$

где  $S_{\text{ФЧЭ}}$  — площадь ФЧЭ,  $t_a$  — время накопления. Уровень шума ИК ФПУ ( $S_{\text{ш}}$ ) определяется флуктуациями фонового излучения ( $S_\Phi$ ) и сигналами от объекта ( $S_{\text{об}}$ ), собственными шумами кремниевого мультиплексора ( $S_M$ ),  $S_{\text{ш}} = \sqrt{S_M^2 + S_\Phi + S_{\text{об}}}$ . Температурное разрешение  $\Delta T = S_N / (k_p \partial N_P / \partial T)$ .

На рис. 2, *a* расчёт проводился для ФЧЭ размером  $15 \times 15$  мкм, спектральный диапазон 4,3–4,8 мкм для объектива  $D/F = 1$ ,  $F = 17$  мм,  $L = 68$ ,  $h = 48$ , коэффициент увеличения  $K_{\text{опт}} = 3$ , что обеспечивает пространственное разрешение  $\sim 5$  мкм (см. рис. 1). Время накопления 20 мс, температура объектов 293 К. На рис. 2, *a* для кривых 1, 2 уровень собственных шумов кремниевого мультиплексора  $S_M = 400$  эл., для кривых 3, 4  $S_M = 800$  эл. [6].

Температурное разрешение тепловизионного микроскопа улучшается с увеличением  $D_{\text{о.д}}$  и достигает максимального значения при  $D_{\text{о.д}} \approx 12$  мм. При дальнейшем увеличении диаметра охлаждаемой диафрагмы NETD тепловизионного микроскопа ухудшается, так как уровень фотосигналов от объектов исследования не увеличивается (кривые 1, 3 на рис. 2, *b*), а уровень шумов возрастает вследствие увеличения компоненты шума, обусловленной флуктуациями избыточного фонового излучения (кривые 2, 4 на рис. 2, *b*).

На рис. 3 приведены расчётные зависимости NETD от диаметра охлаждаемой диафрагмы и параметров оптической системы  $D$ ,  $F$ . Время накопления 20 мс, температура объектов 293 К, спектральный диапазон 4,3–4,8 мкм, коэффициент усиления  $K_{\text{опт}} = 3$ .

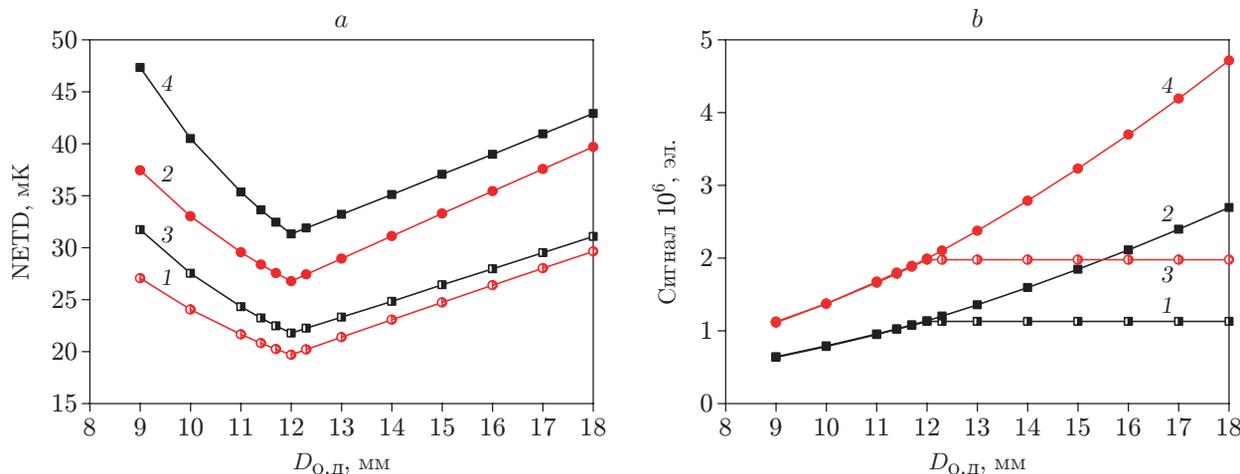


Рис. 2. Расчётные зависимости от диаметра круглой охлаждаемой диафрагмы  $D_{\text{о.д}}$ : NETD (*a*) и уровни сигналов (*b*). Кривые 1, 3 излучения от объекта и 2, 4 с учётом фонового излучения; для кривых 1, 2 квантовая эффективность  $\eta = 0,7$  и для кривых 3, 4  $\eta = 0,4$

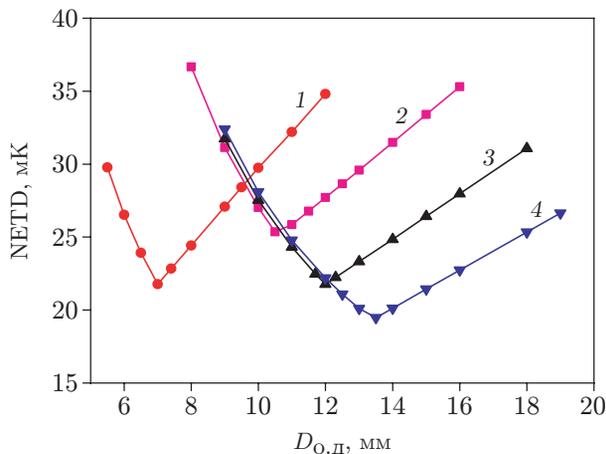


Рис. 3

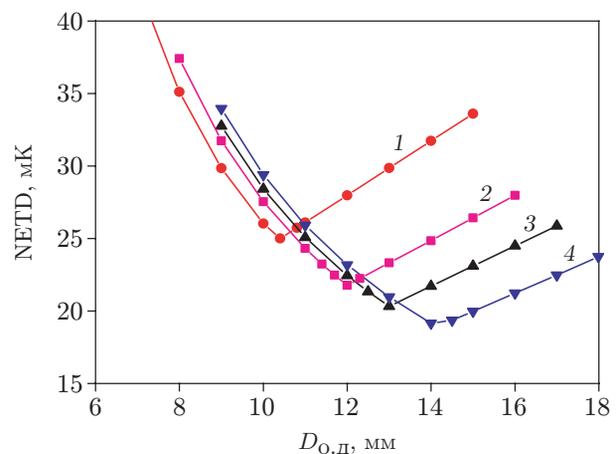


Рис. 4

Рис. 3. Расчётные зависимости NETD от диаметра охлаждаемой диафрагмы для ФЧЭ размером  $15 \times 15$  мкм и параметров оптической системы: кривая 1 для  $F = 12$  мм,  $D = 12$  мм,  $L = 48$  мм,  $h = 28$  мм; 2 для  $F = 17$  мм,  $D = 15$  мм,  $L = 68$  мм,  $h = 48$  мм; 3 для  $F = 17$  мм,  $D = 17$  мм,  $L = 68$  мм,  $h = 48$  мм; 4 для  $F = 17$  мм,  $D = 19$  мм,  $L = 68$  мм,  $h = 48$  мм

Рис. 4. Расчётные зависимости NETD тепловизионного микроскопа от диаметра круглой охлаждаемой диафрагмы и размеров пикселей в качестве параметра для объектива с  $F = 17$  мм и  $D = 17$  мм: кривая 1 для ФЧЭ =  $10 \times 10$  мкм; 2 для ФЧЭ =  $15 \times 15$  мкм; 3 для ФЧЭ =  $20 \times 20$  мкм; 4 для ФЧЭ =  $30 \times 30$  мкм

На рис. 4 приведены расчётные зависимости NETD от диаметра круглой охлаждаемой диафрагмы и размеров пикселей в качестве параметра при условии сохранения пространственного разрешения 5 мкм, равного шагу ФЧЭ/ $K_{\text{опт}}$  (время накопления 20 мс, температура объектов 293 К, спектральный диапазон 4,3–4,8 мкм).

Зависимости на рис. 3, 4 характеризуют влияние параметров оптической системы тепловизионного микроскопа и размеров ФЧЭ при условии сохранения пространственного разрешения  $\sim 5$  мкм на NETD. Для тепловизионного микроскопа диафрагма объектива не является определяющим фактором. Ухудшение NETD при уменьшении диаметра объектива может быть компенсировано потерей временного разрешения за счёт увеличения времени накопления. Однако при этом усиливается влияние паразитного фонового освещения, «темновых» токов фотоприёмника и шума типа  $1/f$  [7, 8].

Центральным вопросом при разработке тепловизионного ИК-микроскопа является выбор спектрального диапазона чувствительности ИК ФПУ в целях обеспечения максимального температурного разрешения для объектов при комнатных температурах. В табл. 1 приведены расчётные зависимости NETD тепловизионного микроскопа от спектрального диапазона для объектов при комнатной температуре и уровне сигналов от объектов при времени накопления 20 мс для ФЧЭ размерами  $15 \times 15$  мкм. Спектральный диапазон чувствительности 4,3–4,8 мкм, температура фона и объектов 293 К. Очевидным результатом является улучшение температурного разрешения с увеличением границы длинноволновой чувствительности с учётом суммарного шума мультиплексора и электроники. При этом апертура охлаждаемой диафрагмы  $D_{0,d} = 12$ ,  $h = 48$  мм, объектив  $D/F = 1,0$ ,  $F = 17$ ,  $K_{\text{опт}} = 3$ , квантовая эффективность 0,7.

В табл. 2 приведены зависимости температурного разрешения для случая, когда время накопления от спектрального диапазона ограничивается 200 мс (5 кадр./с) либо зарядовой

Таблица 1

**Основные параметры тепловизионного микроскопа на базе ИК ФПУ  
формата 640 × 512**

Спектральный диапазон, мкм	Микроскоп NETD, мК $S_M = 0; 400; 800$ эл.	Сигнал от объектов, $10^6$ эл.
1,7–3,05	128,93, 431,19, 832,5	0,01598
1,7–3,2	97,47, 241,75, 453,07	0,03106
1,7–3,4	69,5, 127,01, 223,68	0,0684
1,7–3,6	51,75, 76,16, 123,16	0,1372
1,7–3,8	39,94, 50,97, 74,88	0,2545
1,7–4,0	31,78, 37,09, 49,72	0,4418
1,7–4,2	25,94, 28,68, 35,59	0,7249
1,7–4,4	21,64, 23,12, 27,08	1,133
1,7–4,8	15,91, 16,42, 17,87	2,452
4,3–4,8	21,39, 22,48, 25,45	1,54

Таблица 2

**Температурное разрешение при времени накопления 200 мс  
либо при ограничении времени накопления зарядовой ёмкостью мультиплексора**

Спектральный диапазон, мкм	NETD, мК, $S_M = 0; 400; 800$ эл.	Время накопления, мс	Сигнал от объекта, $10^6$ эл.
1,7–3,05	36,26, 48,38, 73,61	200	0,205
1,7–3,2	27,21, 32,20, 43,91	200	0,3987
1,7–3,4	19,4, 21,09, 25,51	200	0,8781
1,7–3,6	14,44, 15,08, 16,86	200	1,761
1,7–3,8	11,38, 11,65, 12,41	200	3,267
1,7–4,0	10,56, 10,77, 11,38	141	4,0
1,7–4,4	11,52, 11,75, 12,41	55	4,0
1,7–4,8	12,46, 12,70, 13,42	25,42	4,0
4,3–4,8	13,28, 13,54, 14,30	40,46	4,0

ёмкостью кремниевого мультиплексора  $4 \cdot 10^6$  электронов. Ограничение времени накопления для спектрального диапазона более 4,0 мкм обусловлено необходимостью обеспечения температурного диапазона для объектов  $\sim 50\text{--}60$  °С при типичных величинах зарядовой ёмкости кремниевого мультиплексора  $\sim 2\text{--}4 \cdot 10^7$  электронов.

На рис. 5 приведены расчётные зависимости NETD тепловизионного микроскопа от температуры объекта (рис. 5, *a*) и уровни сигналов от объекта (рис. 5, *b*). Уровень сигналов от фона и объекта определяет требования к зарядовой ёмкости и типу ячейки устройства ввода мультиплексора. Для спектрального диапазона с длинноволновой границей до 4 мкм достаточно зарядовой ёмкости мультиплексора  $\sim 1\text{--}4 \cdot 10^6$  электронов. Такую зарядовую ёмкость обеспечивают мультиплексоры с устройством ввода сигналов на основе трансимпедансного усилителя, уровень собственных шумов которых  $\sim 200\text{--}400$  электронов [6]. Для средневолнового диапазона 4–4,8 мкм необходимы мультиплексоры с зарядовой ёмкостью  $1\text{--}5 \cdot 10^7$  электронов, с устройством ввода сигналов на основе прямоинжекционного устройства считывания, уровень собственных шумов которых несколько выше  $\sim 500\text{--}800$  электронов. Для спектрального диапазона до 5 мкм и температуры ФПУ не выше 100–120 К влияние «темновых» токов для обоих типов фотодиодов ( $n\text{--}p$ ) и ( $p\text{--}n$ ), соответствующих «Правилу 07», и шума типа  $1/f$  незначительно [7, 8].

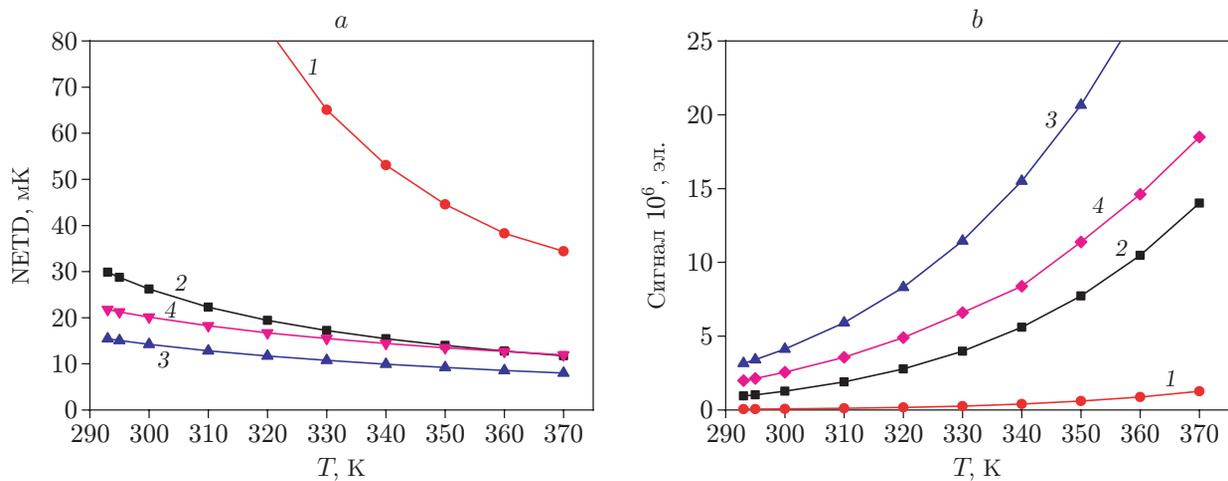


Рис. 5. Расчётные зависимости тепловизионного микроскопа от температуры объекта для ИК ФПУ с размером пикселей  $15 \times 15$  мкм: NETD (а) и уровни сигналов от объекта (б). Кривые 1 — спектральный диапазон 1,7–3,2 мкм,  $S_M = 400$  эл., 2 — 1,7–4,2 мкм,  $S_M = 800$  эл., 3 — 1,7–4,8 мкм,  $S_M = 800$  эл., 4 — 4,3–4,8 мкм,  $S_M = 800$  эл. Диаметр охлаждаемой диафрагмы 12 мм,  $L = 68$  мм,  $h = 48$  мм,  $K_{\text{опт}} = 3$ ,  $\eta = 0,7$ ,  $T_{\text{ф}} = 293$  К

Отметим преимущество ИК ФПУ с узкополосной спектральной чувствительностью. В спектральном диапазоне 4,3–4,8 мкм отсутствуют линии поглощения в атмосфере, что позволит снизить влияние атмосферы на результаты экспериментов [9]. В то же время важно, чтобы предел светочувствительности длинноволновых фоточувствительных ФПУ на основе HgCdTe превышал предел длинноволнового фильтра по меньшей мере на 0,3–0,4 мкм. Это позволит уменьшить длину оптического поглощения ( $L_{\text{опт}}$ ) до  $\sim 3$  мкм и соответственно уменьшить эффект  $L_{\text{опт}}$  на фоточувствительные характеристики ФЧЭ, снизить хроматические aberrации объектива.

Приведённые на рис. 2–5 и в табл. 1, 2 оценки NETD позволяют определить общие требования к оптической системе ИК-микроскопа, объективу, фотоприёмному ИК-модулю (спектральному диапазону, размеру ФЧЭ, требованиям к зарядовой ёмкости кремниевого мультиплексора). Эти расчётные зависимости получены в предположении, что квантовая эффективность не зависит от размеров ФЧЭ и размеров оптических объектов в фокальной плоскости ИК ФПУ. Оценки квантовой эффективности, учитывающие основные фотоэлектрические (длины оптического поглощения —  $L_{\text{опт}}$ , длины диффузии неосновных носителей —  $L_D$ , толщины фоточувствительного слоя (ФС) —  $T_{\text{ФС}}$ ) и конструктивные (размеры ФЧЭ, диаметр  $p$ - $n$ -переходов —  $D_{pn}$ ) параметры, описаны в [10–12]. В этих работах показано, что для малоразмерных объектов, сравнимых с размерами ФЧЭ, интегральная квантовая эффективность ФЧЭ существенно ниже квантовой эффективности при однородной засветке, поэтому для малоразмерных объектов температурное разрешение будет хуже.

Зависимости NETD для центральных ФЧЭ при однородной засветке (сплошные кривые) и центрального ФЧЭ при локальной засветке (пунктирные кривые) при условии сохранения пространственного разрешения для размера ФЧЭ/ $K_{\text{опт}} = 5$  мкм от размеров ФЧЭ и толщины светочувствительного слоя ( $T_{\text{ФС}}$ ) в качестве параметра показаны на рис. 6.

Приведённые на рис. 6 зависимости показывают влияние фотоэлектрических и конструктивных параметров ФЧЭ на характеристики тепловизионного микроскопа. Расчёты

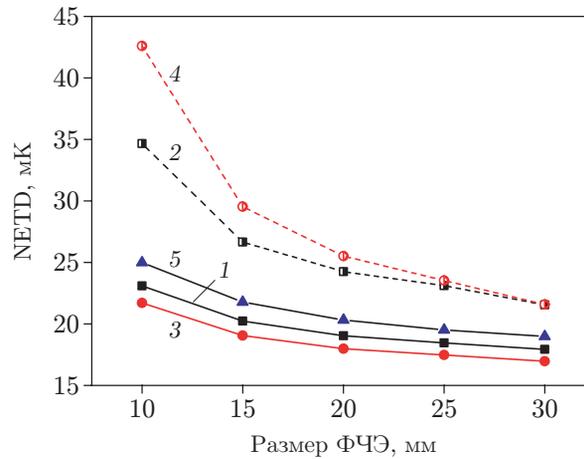


Рис. 6. Расчётные зависимости тепловизионного микроскопа NETD от размера ФЧЭ при однородном (1, 3, 5) и локальном (2, 4) освещении (вдоль границ ФЧЭ). Для кривых 1, 2  $T_{\text{ФС}} = 5$  мкм, для кривых 3, 4  $T_{\text{ФС}} = 8$  мкм, а для кривой 5 квантовая эффективность ( $\eta = 0,7$ ) постоянна по площади ФЧЭ

проводились для объектива  $D/F = 1,0$  ( $F = 17$ ), спектрального диапазона 4,3–4,8 мкм, времени накопления 20 мс, для значений  $T_{\text{ФС}} = 5$  и  $T_{\text{ФС}} = 8$  мкм. Для ФЧЭ размерами  $10 \times 10$ ,  $15 \times 15$ ,  $20 \times 20$ ,  $25 \times 25$  и  $30 \times 30$  мкм при типичных конструктивных и фотоэлектрических параметрах ИК ФПУ  $D_{\text{пр}} = 5, 9, 12, 16$  и  $20$  мкм соответственно, уровень шума собственного кремниевого мультиплексора составлял 800 эл.,  $L_D = 20$  мкм и  $L_{\text{опт}} = 3$  мкм. Отметим, что разница в NETD при локальной и однородной засветках возрастает с уменьшением размеров ФЧЭ, что, в свою очередь, обусловлено уменьшением квантовой эффективности при локальной засветке [9–11]. Так, например, для ФЧЭ размером  $30 \times 30$  мкм при однородной и локальной засветках  $T_{\text{ФС}} = 5$  мкм  $\eta_{\text{одн}} = 0,755$  и  $\eta_{\text{лок}} = 0,569$ , а при  $T_{\text{ФС}} = 8$  мкм  $\eta_{\text{одн}} = 0,846$  и  $\eta_{\text{лок}} = 0,567$ , тогда как для ФЧЭ размером  $10 \times 10$  мкм при  $T_{\text{ФС}} = 5$  мкм  $\eta_{\text{одн}} = 0,792$  и  $\eta_{\text{лок}} = 0,429$ , а при  $T_{\text{ФС}} = 8$  мкм  $\eta_{\text{одн}} = 0,874$  и  $\eta_{\text{лок}} = 0,321$ .

Преимущество ИК ФПУ с меньшим размером ФЧЭ заключается в том, что позволяет значительно уменьшить расстояние от охлаждаемой диафрагмы до фокальной плоскости ИК ФПУ и, следовательно, габаритные размеры криостата тепловизионного микроскопа. Требования к температуре охлаждения ИК ФПУ для тепловизионного микроскопа должны быть на 10–20 К ниже, особенно в режиме ограничения времени накопления по зарядной способности мультиплексора, чем для тепловизионных систем. Это связано с меньшей апертурой тепловизионного ИК-микроскопа, более жёсткими требованиями к уровню фонового излучения и темновым фотодиодным токам [13]. Поскольку тепловизионный ИК-микроскоп — прибор лабораторный, то проблема энергопотребления не является принципиальной.

**Заключение.** Проведён системный анализ возможностей тепловизионного ИК-микроскопа на базе многоэлементного ИК ФПУ, регистрирующего собственное тепловое излучение объектов исследования, в зависимости от характеристик оптической системы, спектрального диапазона, конструктивных и фотоэлектрических параметров ИК ФПУ. Показана возможность реализации тепловизионного ИК-микроскопа с пространственным разрешением  $\sim 5$ – $6$  мкм и температурным разрешением  $\sim 20$ – $30$  мК для объектов при комнатных температурах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fourier** ransform spectroscopy. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fouriertransform\\_spectroscopy](https://en.wikipedia.org/wiki/Fouriertransform_spectroscopy) (дата обращения: 11.05.2022).
2. **Базовкин В. М., Мжельский И. В., Курышев Г. Л., Половинкин В. Г.** Инфракрасный сканирующий микроскоп с высоким пространственным разрешением // *Автометрия*. 2011. **47**, № 5. С. 98–102.
3. **Курышев Г. Л., Мжельский И. В., Настовьяк А. Е., Половинкин В. Г.** Калибровка фотоприёмного устройства в составе ИК-микроскопа // *Автометрия*. 2011. **47**, № 5. С. 103–108.
4. **Ли И. И., Половинкин В. Г.** Об оптимизации конструктивных параметров ИК тепловизионного микроскопа // *Успехи прикладной физики*. 2016. **4**, № 5. С. 523–528.
5. **Siegel R., Howel J.** *Thermal Radiation Heat Transfer*. McGraw-Hill Book Company, 1972. 814 p.
6. **Abbast S., Shafique A., Ceylan O. et al.** A partially Pixel-Parallel ROIC for MWIR imagers with columnwise residue quantization // *IEEE Trans. Electron Device*. 2018. **65**, N 11. P. 4916–4923. DOI: 10.1109/TED.2018.2871172.
7. **Tennant W. E.** “Rule 07” Revisited: Still a Good Heuristic Predictor of p/n HgCdTe photodiode Performance // *Journ. Electron. Mater.* 2010. **39**, N 7. P. 1030–1035. DOI: 10.1007/s11664-010-1084-9.
8. **Kinch M. A.** *State-of-the-Art Infrared Detector Technology*. Washington: SPIE Press, Bellingam, 2014. 280 p.
9. **Gaussorgues G.** *Infrared Thermography, Bases, Techniques, Application*. Chapman & Hall, 1994. 504 p.
10. **Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И.** Моделирование пространственного распределения квантовой эффективности фотодиодных матриц и фотоэлектрических характеристик многоэлементных ИК ФПУ на их основе // *Автометрия*. 2018. **54**, № 6. С. 114–121. DOI: 10.3103/S8756699018060155.
11. **Polovinkin V. G., Stuchinsky V. A., Vishnyakov A. V., Lee I. I.** Monte Carlo simulation of photoelectric characteristics of Mercury-Cadmium-Tellurium based infrared-focal-plane-array detectors // *IEEE Trans. Electron. Device*. 2018. **65**, N 11. P. 4924–4930. DOI: 10.1109/TED.2018.2872129.
12. **Lee I. I., Polovinkin V. G.** Photoelectric characteristics of multielement photodiode-based IR FPAs on epitaxial CdHgTe films // *Journ. Electron. Mater.* 2021. **50**, N 6. P. 3365–3371. DOI: 10.1007/s11664-021-08825-8.
13. **Kerlain A., Brunner A., Sam-Giao D. et al.** Mid-wave HgCdTe FPA based on P on N technology: HOT recent developments. NETD: Dark current and 1/f noise considerations // *Journ. Electron. Mater.* 2016. **45**, N 9. P. 4557–4562. DOI: 10.1007/s11664-016-4506-5.

*Поступила в редакцию 11.05.2022*

*После доработки 16.05.2022*

*Принята к публикации 31.05.2022*