

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 2

2001

УДК 535.247.049.7 : 621.383.52

И. И. Ли

Проведен анализ основного параметра тепловизионных систем (тепловизора) – температурного разрешения NEDT. Показано, что NEDT в диапазоне длин волн 5–14 мкм определяется, в основном, зарядовой емкостью устройства считывания (кремниевый процессор).

Еще недавно ИК-техника, в особенности самые современные тепловизионные системы на базе матричных фотоприемников, применялась исключительно в военных целях. В настоящее время тепловизионные системы находят широкое применение в народном хозяйстве: медицина, мониторинг окружающей среды, контроль утечки тепла и т. д.

Для большинства пользователей основным параметром, характеризующим тепловизионную систему (тепловизор), является эквивалентная радиационному шуму разность температур – NEDT. Теоретический анализ предельных возможностей тепловизора в зависимости от спектрального диапазона, уровня фонового излучения, подробно представленный в ряде работ [1–3], относится, в основном, к так называемым «идеальным» тепловизорам на основе фотоприемников с обнаружительной способностью в режиме с ограничением чувствительности флуктуациями фонового излучения (режим ОФ) без учета шума устройств считывания. Под «идеальным» подразумевается тепловизор с системой считывания фотосигналов с матрицы фотоприемных элементов с неограниченной зарядовой емкостью, которая обеспечивает максимально возможное время накопления, равное времени считывания всего кадра. В работе показано, что для тепловизоров на основе матричных фотоприемных устройств (ФПУ), работающих в «смотрящем» режиме, NEDT определяется, в основном, не обнаружительной способностью фотоприемников, а зарядовой емкостью кремниевый процессора, т. е. способностью процессора эффективно использовать попадающий на фотоприемники фотосигнал. Зарядовая емкость кремниевый процессора в силу технологических ограничений, как правило, не превышает $1-4 \cdot 10^7$ электронов и недостаточна для обеспечения оптимального времени накопления.

Для расчета основных параметров тепловизора воспользуемся известными соотношениями для обнаружительной способности фотоприемников D_{λ}^* [1]:

$$D_{\lambda, \max}^* = \eta \lambda_2 / (u^{1/2} \hbar c (\eta \Phi)^{1/2}) = \eta \lambda_2 / (1,24 q (u \eta \Phi)^{1/2}), \quad (1)$$

9*

131

где η – квантовая эффективность, λ_2 – граничная длина волны, u – численный коэффициент (для квантовых фотоприемников $u = 2$), \hbar – постоянная Планка, c – скорость света, q – заряд электрона, Φ – фоновый поток, фотон/(см² · с). С учетом шума процессора (n_n), выраженного в количестве шумовых электронов, соотношение для обнаружительной способности преобразуется к виду

$$D_\lambda^* = \eta \lambda_2 / (1,24 q (u \eta \Phi_{\text{эф}})^{1/2}), \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{эф}} = ((\eta \Phi t S_{\text{ФП}}) + (n_n)^2) / \eta t S_{\text{ФП}}$, t – время накопления, $S_{\text{ФП}}$ – площадь фоточувствительной области. Пороговая мощность вычисляется по соотношению

$$\text{NEP} = (S_{\text{ФП}} B)^{1/2} / D_\lambda^* = (S_{\text{ФП}} / (2t))^{1/2} / D_\lambda^*, \quad (3)$$

где B – ширина полосы пропускания.

Пороговая разность температур тепловизора определяется из соотношения [1]

$$\text{NEDT} = ((2F/d) 2kT^2 D_p^*(2\pi) (1 - 0,3\lambda/14)) D_{p\lambda, \text{max}}^* / D_\lambda^* (2t S_{\text{ФП}})^{1/2}, \quad (4)$$

где F – фокусное расстояние объектива, d – диаметр входного зрачка объектива, k – постоянная Больцмана, T – температура фона, $D_p^*(2\pi)$ – обнаружительная способность «идеального» фотоприемника при апертуре 180°, $D_{p\lambda, \text{max}}^*$ – обнаружительная способность «идеального» фотоприемника (соотношение (1), $\eta = 1,0$). Как показано в [1], соотношения (3), (4) в диапазоне длин волн $\lambda = 1 - 14$ мкм с точностью до 30 % соответствуют более точным аналитическим выражениям.

В [4] приведены характеристики тепловизора на основе матрицы InSb фотодиодов 256 × 256.

В таблице представлены численные оценки основных параметров ФПУ, полученные по соотношениям (1)–(4), и экспериментальные результаты из [4]. При апертуре 29° и температуре фона 293 К уровень фонового излучения $P = 4,8 \cdot 10^{-5}$ Вт/см², $D_p^*(2\pi) = 1,33 \cdot 10^{11}$ см^{1/2} · Гц^{1/2} · Вт⁻¹.

Как следует из таблицы, численные оценки хорошо соответствуют экспериментальным значениям. Единственным подгоночным параметром, не указанным в [4], является $2F/d = 10$. Во втором столбце приведены расчетные данные при $P = 4,48 \cdot 10^{-5}$ Вт/см². Возможно, в этом случае численные оценки D_λ^* несколько занижены, так как в реальных системах, как правило, применяются холодные диафрагмы, уменьшающие мощность фонового излучения. Это подтверждается тем, что при используемых в расчетах мощности фонового излучения, времени накопления и квантовой эффективности фотоприемника $\sim 0,5$ информационный заряд фона $N = 5,8 \cdot 10^7$ электронов, т. е. больше зарядовой емкости процессора. Реально время накопления выбирают из условия, что фоновый заряд не превышает $\sim 0,6 - 0,7$ зарядовой емкости процессора. В третьем столбце численные оценки проведены при $P = 2,8 \times 10^{-5}$ Вт/см². Это соответствует мощности фонового излучения при холодной прямоугольной шторке с эквивалентной (по диагонали) апертурой 29°.

Параметры	Фотодиод			«Идеальное» ФПУ*, $P = 2,8 \times 10^{-5}$ Вт/см ²
	Эксперимент, $T = 77$ К	Расчет*		
		$P = 4,48 \times 10^{-5}$ Вт/см ²	$P = 2,8 \times 10^{-5}$ Вт/см ²	
Шаг элементов, мкм (см ²)	35 ($1,2 \cdot 10^{-5}$)	35 ($1,2 \cdot 10^{-5}$)	35 ($1,2 \cdot 10^{-5}$)	35 ($1,2 \cdot 10^{-5}$)
Размер элементов, мкм (см ²)	27 ($7,3 \cdot 10^{-6}$)	27 ($7,3 \cdot 10^{-6}$)	27 ($7,3 \cdot 10^{-6}$)	27 ($7,3 \cdot 10^{-6}$)
Кадровая частота, Гц	70	70	70	70
Квантовая эффективность	–	0,6	0,6	1,0
Сигнальный заряд электрона	–	$5,8 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^8$
Время накопления, мс	6,6	6,6	6,6	14,2
D_{λ}^* , см ^{1/2} ·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	$4,5 \cdot 10^{11}$	$4,2 \cdot 10^{11}$	$5,4 \cdot 10^{11}$	$6,97 \cdot 10^{11}$
NEP, Вт/см ²	–	$7,0 \cdot 10^{-14}$	$5,6 \cdot 10^{-14}$	$2,95 \cdot 10^{-14}$
NEDT, мК	5,5	6,3	6,2	3,3

* При $T = 293$ К, $\lambda = 1-5,4$ мкм

В четвертом столбце приведены расчетные значения «идеального» ФПУ ($\eta = 1,0$, $t = 14,2$ мс, т. е. время накопления равно времени кадра). Отметим, что для «идеального» ФПУ (при тактовой частоте 5 МГц) необходимо, чтобы зарядовая емкость процессора была выше 25 пКл. Важно отметить, что во всех вариантах, если уровень собственных шумов процессора не превышает 2000–3000 электронов, обнаружительная способность D_{λ}^* близка к режиму ОФ.

Для ФПУ 256×256 зарядовой емкости устройств ввода кремниевого процессора 7,9 пКл недостаточно, чтобы обеспечить время накопления, равное времени кадра (при 70 кадрах в секунду время накопления 6,6 мс, а время кадра 14,2 мс). Уменьшить время кадра до 6,6 мс можно за счет повышения тактовой частоты до 12 МГц. Если время накопления меньше времени кадра и ограничивается зарядовой емкостью процессора, то улучшение таких параметров, как квантовая эффективность фотоприемника и степень заполнения фокальной плоскости фоточувствительными элементами, не приведет к улучшению NEDT. Так, например, уменьшение D_{λ}^* с уменьшением квантовой эффективности можно полностью компенсировать увеличением времени накопления.

Максимально возможное температурное разрешение достигается при условии, что зарядовая емкость процессора обеспечивает время накопления, равное времени кадра. Тепловизор, описанный в [4], имеет характеристики, близкие к теоретическим оценкам.

Соотношений (1)–(4) достаточно для анализа предельных возможностей тепловизионных систем. Эти соотношения показывают, что при использовании тепловизора в радиометрических измерениях для фотоприемника с еди-

ничной площадью (1 см^2) при времени регистрации 1 с и апертуре 60° минимальное температурное разрешение NEDT составляет $7,9 \cdot 10^{-6} \text{ К}$ для диапазона $\lambda = 1-3 \text{ мкм}$ и $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ К}$ для диапазона $\lambda = 1-12 \text{ мкм}$.

Большой интерес представляют оценки NEDT тепловизора «типичной» конфигурации в зависимости от длины волны: размерность 256×256 , шаг элементов 35 мкм , квантовая эффективность $0,5$; время накопления 20 мс ; кадровая частота 50 кадр/с ; апертура $30-60^\circ$.

На рис. 1 приведены численные оценки NEDT для двух апертурных углов, где кривая 1 соответствует апертуре 30° ($2F/d = 10$), кривая 2 – апертуре 60° ($2F/d = 3$), время накопления равно времени кадра – 20 мс . Высокий уровень технологии ИК-фотоприемников при не очень малых апертурах обеспечивает их обнаружительную способность, близкую к режиму ОФ для всего диапазона длин волн ($\lambda = 1-14 \text{ мкм}$). При этих условиях NEDT улучшается с ростом λ . Кривые 3–5 рассчитывались при условии ограниченной зарядовой емкости процессора: $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^7$ и $8 \cdot 10^7$ электронов соответственно (апертура 60° , $2F/d = 3$), время накопления рассчитывалось из условия, что $\eta \Phi_i S_{\text{ФП}}$ равно зарядовой емкости процессора.

Характер зависимостей NEDT(λ) кардинально меняется, если оценки делать при условии постоянной зарядовой емкости процессора.

Как видно из кривых 3–5, уже для $\lambda > 3,2 \text{ мкм}$ NEDT «реальных» тепловизоров начинает полностью определяться зарядовой емкостью кремниевых процессоров. С ростом λ температурное разрешение «реальных» тепловизоров ухудшается, тогда как для «идеальных» оно улучшается. Для крайних правых точек кривых 3–5 время накопления $< 30-100 \text{ мкс}$, т. е. меньше времени считывания одной строки. В этом случае применение матричных ФПУ по температурному разрешению не дает преимуществ перед ФПУ на основе фотоприемников линейчатого типа.

Для ФПУ с зарядовой емкостью процессора $2 \cdot 10^6$ электронов максимальное температурное разрешение достигается в диапазоне $\lambda = 3-3,2 \text{ мкм}$.

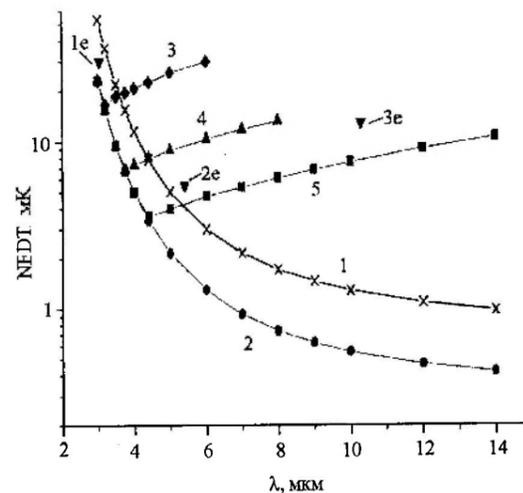


Рис. 1. Расчетные зависимости NEDT от длины волны при различной зарядовой емкости процессора

В работе [5] приведено экспериментальное значение NEDT – 30 мК (точка 1е на рис. 1), полученное на тепловизоре ТКВр-ИФП, разработанном в Институте физики полупроводников СО РАН. Матрица фотоприемников выполнена на основе InAs МДП-структур. В диапазоне длин волн $\lambda = 2,8\text{--}3,05$ мкм зарядовой емкости МДП-фотоприемников достаточно, чтобы копировать фотосигнал в течение всего времени кадра. Полученное температурное разрешение $\lambda = 3,0\text{--}3,4$ мкм NEDT = 3,5 мК, что составляет ~50 % теоретического предела.

Оценки для ФПУ на основе InSb МДП-фотоприемников показывают, что NEDT $\geq 60\text{--}70$ мК (зарядовая емкость InSb МДП-структур не превышает $4\text{--}5 \cdot 10^5$ электронов). Таким образом, уже в среднем диапазоне длин волн для тепловизоров со значениями NEDT, близкими к теоретическому пределу, необходимо использовать фотодиоды с устройствами считывания, имеющими зарядовую емкость выше $4 \cdot 10^7$ электронов.

Точка 3е на рис. 1 – экспериментальный результат из работы [6] для ФПУ на основе HgCdTe в диапазоне $\lambda = 1\text{--}10,3$ мкм, NEDT ≈ 13 мК ниже, чем в диапазоне $\lambda = 1\text{--}5,4$ мкм, и составляет всего ~5 % теоретического предела (время накопления 100 мкс, т. е. составляет всего 1/140 времени кадра). В работах [4, 6] использовался один и тот же кремниевый процессор, что подтверждает расчетные зависимости об ухудшении NEDT с увеличением длины волны при одинаковом значении зарядовой емкости процессора. С увеличением длинноволновой границы растут требования к зарядовой емкости процессора. Если для среднего ИК-диапазона ($\lambda = 3,0\text{--}5,4$ мкм) достаточно зарядовой емкости процессора 10–20 пКл, то для диапазона $\lambda = 8\text{--}14$ мкм для «идеального» тепловизора необходимо не менее 100 пКл. Реализовать процессор для матричных ФПУ с такой зарядовой емкостью невозможно. В настоящее время разработка процессоров для диапазона $\lambda = 8\text{--}14$ мкм ведется в двух направлениях:

– увеличение зарядовой емкости процессоров. Процессор, рассматриваемый в [4, 6], имеет наибольшую по литературным источникам зарядовую емкость. В этих работах представлены ФПУ 256×256 в диапазонах $\lambda = 1\text{--}5,4$ мкм и $\lambda = 1\text{--}10,3$ мкм с максимальным температурным разрешением. В [7] описан процессор, имеющий зарядовую емкость 20 пКл при толщине затворного диэлектрика 500 Å (использование современных технологий с толщиной подзатворного диэлектрика 120–150 Å позволит реализовать устройства считывания с зарядовой емкостью более 50 пКл). В этом процессоре каждый кадр состоит из четырех независимых фрагментов, т. е. время накопления для каждого фрагмента равно 1/4 времени кадра, при этом каждый фрагмент последовательно выводится на один общий выход;

– разработка процессоров с токовым вычитанием постоянных во времени компонентов (фонового излучения) индивидуально для каждого канала (необходимо вычитать не менее 90–95 %) и с интегрированием информационных компонентов фотосигнала. Эти работы ведутся с использованием самых современных субмикронных технологий, недоступных отечественным разработчикам. Возможно, в будущем такие процессоры будут реализованы.

Необходимо отметить, что обработка фотосигналов (вычитание постоянных во времени компонентов фотосигналов), по крайней мере, в $2^{1/2}$ ухудшает параметры «идеального» тепловизора.

На рис. 2 приведены зависимости NEDT от температуры фона. Кривые 1, 2 – расчетные зависимости для тепловизора на основе InAs с зарядовой емкостью устройств считывания $2 \cdot 10^6$ электронов, при времени накопления 20 мс ($\lambda = 2,8-3,05$ мкм). Кривые 3–8 – для тепловизора на основе InSb ($\lambda = 1-5,4$ мкм), 3–6 – для тепловизора с зарядовой емкостью процессора $2 \cdot 10^6$ электронов, 7, 8 – $2 \cdot 10^7$ электронов. Кривые 3, 4 рассчитывались при постоянном времени накопления 0,06 мс, 5, 6 – при времени накопления, удовлетворяющем условию $\eta \Phi t S_{\text{ФП}} = 2 \cdot 10^6$ электронов, 7, 8 – при времени накопления 0,6 мс. Кривые 1, 3, 5 и 7 рассчитывались без учета шума процессора, а 2, 4, 6 и 8 – с учетом шума процессора (800 электронов).

При температуре фона выше 30°C (303 K) для кривых 1–4 наступает ограничение по зарядовой емкости (информационный заряд фона становится выше $2 \cdot 10^6$ электронов). Для ФПУ на основе InAs при температуре фона 10°C заряд, обусловленный фоновым излучением, уменьшается до $1,9 \cdot 10^5$ электронов. Этим объясняется увеличение относительной роли шумов процессора (шум процессора, используемого в тепловизоре ТКВр-ИФП, 600–800 электронов, кривая 2). Из этих зависимостей следует, что тепловизоры на основе InAs ($\lambda = 2,8-3,05$ мкм) при одинаковой зарядовой емкости устройств считывания обеспечивают более высокую NEDT и, следовательно, имеют определенные преимущества при температуре фона $20-30^\circ\text{C}$ перед тепловизором на основе InSb в диапазоне $\lambda = 1-5,4$ мкм. Эти преимущества проявляются, например, при использовании тепловизора в медицине (температура объектов $\sim 30-35^\circ\text{C}$), спектральный диапазон тепловизора на основе InAs близок к оптимальному.

Чтобы реализовать потенциально более высокую NEDT тепловизоров в диапазоне $\lambda = 1-5,4$ мкм, необходимы процессоры с большей зарядовой емкостью (кривые 7, 8). В диапазоне $\lambda = 8-14$ мкм для достижения тех же значе-

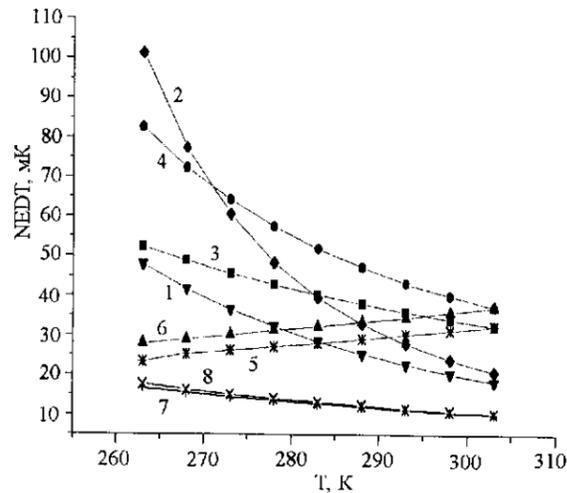


Рис. 2. Зависимости NEDT от температуры фона при апертуре 60° ($2F/d = 3$)

ний NEDT, что и в диапазоне $\lambda = 1-5,4$ мкм, требования к зарядовой емкости процессора в 10–20 раз выше. Таким образом, при заданной зарядовой емкости считывающего процессора можно выбрать спектральный диапазон ФПУ, при котором достигается максимальное значение NEDT тепловизионной системы.

Данная методика оценки NEDT может быть применена практически для любых тепловизионных систем. Для конкретных систем требуется только дополнительный анализ уровня собственных шумов устройства считывания и фотоприемников в режиме работы, определяемом используемыми устройствами считывания (параметр n_n).

Автор выражает признательность А. П. Ковчавцеву за предоставление пакета программ для расчета фоновых потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. М.: Радио и связь, 1992.
2. Taubkin I. I., Trishenkov M. A., Vasilchenko N. V. Minimum temperature difference detected by the thermal radiation of objects // *Infrared Phys. Technol.* 1994. 35, N 5. P. 715.
3. Woolaway J. New sensor technology for the 3-to5 μm imaging band // *Photonics Spectra*. 1991. P. 113.
4. Mottin E., Pantigny P., Boch R. An improved architecture of IRFPA readout circuits // *SPIE*. 1997. 3061. P. 117.
5. Курьшев Г. Л., Ковчавцев А. П., Вайнер Б. Г. и др. Медицинский тепловизор на основе матричного ФПУ 128×128 , работающий в диапазоне спектра 2,8–3,05 мкм // *Автометрия*. 1998. № 4. С. 5.
6. Destefanis K. G., Audebert P., Mottin E., Rambaud P. High performance LWIR 256×256 HgCdTe focal plane array operating at 88 // *SPIE*. 1997. 3061. P. 111.
7. Демьяненко М. А., Копп О. Р., Курьшев Г. Л. и др. Матричный ИК-фотоприемный модуль на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs // *Автометрия*. 1998. № 4. С. 35.

*Институт физики полупроводников СО РАН,
E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
24 февраля 2000 г.*
