

## The cooler factor of the cooler with compound branches

V. G. Okhrem

Chernivtsi faculty National Technical University "Kharkiv politechnical Institute", Chernivtsi, Ukraine

*The work of the thermoelectric cooler which consists of the main and auxiliary elements from the point of view of the cooler factor has been investigated. The dependence of cooler factor on temperature difference has been found. It comes from obtained numerical data the cooler factor has a little value therefore the given cooler can be used for cooling microelectronic devices which produce a little heat by working.*

УДК 621.384.3

## Предельная чувствительность приемных устройств, содержащих CO<sub>2</sub>-квантовый усилитель и смотрящий тепловизор

А. Н. Свиридов

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Приведены расчеты предельных порогов чувствительности приемных устройств с CO<sub>2</sub>-квантовыми усилителями (ПУ с КУ), предназначенных для лазерных локаторов и активных систем видения. При расчетах учитывались зависимости порогов чувствительности ПУ с КУ от параметров КУ, характеристик используемых в них приемников и методов (электрических или визуальных) регистрации сигналов.*

Работа состоит из двух частей. В первой части\*, опубликованной в работе [1], анализировались предельные параметры ПУ, содержащих CO<sub>2</sub>-КУ и одноэлементный (квантовый или пироэлектрический) приемник излучения. Показана высокая эффективность применения квантовых усилителей при приеме слабых лазерных сигналов. Приемные устройства с квантовыми усилителями могут иметь в  $10^3 \div 10^4$  более высокую чувствительность, чем чувствительность используемых в них приемников излучения. Их использование в активных лазерных системах позволит, соответственно, в  $10^3 \div 10^4$  раза увеличить потенциал этих систем. Приемные устройства с КУ и одноэлементным приемником излучения перспективны для применения в лазерных локаторах. Эти ПУ работают с электронной регистрацией и обработкой электрических сигналов и предназначены для лазерных локаторов. Во второй (данной) части работы анализируются предельные параметры ПУ, содержащих импульсный CO<sub>2</sub>-КУ и смотрящий тепловизор. Эти ПУ работают с визуальной регистрацией и обработкой информации и предназначены для наблюдения ИК-изображений объектов, облучаемых CO<sub>2</sub>-лазером.

### Приемные устройства с КУ и смотрящим тепловизором

Построим математическую модель ПУ с КУ и смотрящим тепловизором (т. е. тепловизором с двухмерной фокальной матрицей (ДФМ), пригодную для расчетов порогов чувствительности ПУ в зависимости от параметров КУ (коэффициента усиления, светосилы, эффективной ширины спектральной полосы усиления), характеристик матричного приемника, полосы усиления усилителей промежуточной частоты, подключенных к приемникам, и др.

*Введем следующие обозначения:*

$h, k, \sigma, c, q$  — соответственно, постоянные Планка, Больцмана, Стефана-Больцмана, скорость света и заряд электрона;

$\lambda, \nu$  — длина волны и частота лазерного излучения, соответственно;

$G$  — коэффициент усиления КУ;

$p$  — суммарное давление смеси газов в КУ;

$\psi_{\text{CO}_2}, \psi_{\text{N}_2}, \psi_{\text{He}}$  — соответствующие доли газовых компонент в смеси;

$T_g$  — температура газа в активной среде КУ;

$\Delta\nu_v$  — расстояние между соседними частотами излучения CO<sub>2</sub>-лазера ( $\Delta\nu_v = 53 \cdot 10^9$  Гц);

\* Первая часть статьи опубликована в № 1, 2006 г.

$\Delta\nu_a(G)$  — эффективная (по полувысоте) ширина контура усиления линии КУ при усилении  $G$ ;

$\xi$  — эффективный коэффициент пропускания оптической системы ПУ;

$\tau_f$  — коэффициент пропускания охлаждаемого оптического фильтра;

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — соответственно, коротко- и длинноволновая граница пропускания охлаждаемого фильтра;

$\Delta\lambda_f$  — спектральная полоса пропускания охлаждаемого фильтра ( $\Delta\lambda_f = \lambda_2 - \lambda_1$ );

$\Delta\nu_f$  — полоса пропускания охлаждаемого фильтра ( $\Delta\nu_f = \Delta\nu_f \cdot c / \lambda_1 \cdot \lambda_2$ );

$N_2, N_1, g_2, g_1$  — населенности и статистические веса, соответственно, верхнего и нижнего колебательно-вращательных уровней молекулы  $\text{CO}_2$ , участвующих в усилении излучения  $\text{CO}_2$ -лазера;

$R_i$  — средний коэффициент отражения сцены для излучения с длиной волны 10,6 мкм;

$A$  — относительное отверстие объектива;

$F$  — фокусное расстояние объектива;

$M$  — число пространственных мод, усиливаемых квантовым усилителем;

$N$  — число чувствительных элементов (пикселей) ДФМ;

$N_p, N_c$  — число чувствительных элементов в строке и число строк, соответственно;

$S_0, \varepsilon, C, T_{mid}$  — площадь, коэффициент излучения, теплоемкость и средняя температура чувствительного элемента ДФМ, соответственно;

$T_i$  — температура сцены;

$W_i$  — энергия импульса излучения лазера подсветки, отраженная сценой и поступившая на вход ПУ с КУ и ДФМ;

$\tau_i$  — время, в течение которого излучение от импульса лазера подсветки, усиленное КУ, облучает ДФМ;

$\tau_a$  — время, в течение которого спонтанное излучение и тепловое излучение сцены, выходящие из КУ, облучают ДФМ;

$\tau_k$  — длительность кадра тепловизора;

$f_k$  — частота кадров тепловизора;

$\tau_c$  — время накопления пиксела ( $\tau_c = 1/f_k \cdot N_c$ );

$\Delta f$  — полоса усилителя промежуточной частоты;

$\mu$  — коэффициент заполнения ДФМ.

Пусть  $M = N$ , и оптические системы на входе и выходе КУ идеальны ( $S_a$  — площадь абберриционного изображения моды в плоскости ДФМ не превышает площади дифракционного изображения моды  $S_d$ ).

Выберем  $S_0$  и  $A$  — относительное отверстие объектива, установленного на выходе КУ перед ДФМ таким образом, чтобы  $S_d = S_0$ . (В этом случае должно выполняться следующее соотношение:  $A^2 \cdot S_0 \cdot \pi / 4 = \lambda^2$  [2], при этом на каждый пиксел ДФМ

будет поступать одна пространственная мода излучения с длиной волны  $\lambda$ ).

Будем полагать, что перед матричным приемником установлен оптический затвор, открывающийся на время  $\Delta t$  (во время максимального усиления импульсного КУ) в момент поступления на вход ПУ с КУ, отраженного сценой импульса излучения  $\text{CO}_2$ -лазера подсветки, облучающего каждым импульсом всю сцену. При работе оптического затвора  $\tau_i = \tau_a = \Delta t$ .

Будем также считать, что частота кадров тепловизионного изображения равна частоте импульсов лазерной подсветки сцены. Тогда на каждый пиксел ДФМ будут поступать за время  $\tau_c$  следующие энергии излучений:

$W(G)$  — энергия, принимаемая каждым пикселом ДФМ от импульса излучения  $\text{CO}_2$ -лазера подсветки, отраженного от объектов сцены и усиленного КУ;

$W_{sp}(G)$  — энергия от импульса спонтанного излучения КУ;

$W_{ti}(G)$  — энергия от теплового излучения сцены, не усиленного КУ;

$W_{ki}(G)$  — энергия от теплового излучения сцены, усиленного КУ.

Запишем выражения для энергий, принимаемых каждым пикселом ДФМ, от перечисленных выше излучений:

$$W(G) = \xi \tau_f \varepsilon \frac{\mu W_i}{N} G; \quad (1)$$

$$W_{sp}(G) = \xi \tau_f \varepsilon \tau_a 2 h \nu \frac{\Delta \nu_f}{\nu_v} \Delta \nu_a(G) \times \\ \times \frac{N_2}{N_2 - N_1} \frac{g_2}{g_1} (G - 1); \quad (2)$$

$$W_{ti}(G) = \tau_c \Phi (1 - \phi(G)) \cdot (1 - R_i) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \pi h c^2 \lambda^{-5}}{h c e^{\lambda k T_i} - 1} d \lambda; \quad (3)$$

$$W_{ki}(G) = \tau_a \Phi (G - 1) \phi(G) \cdot (1 - R_i) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \pi h c^2 \lambda^{-5}}{h c e^{\lambda k T_i} - 1} d \lambda, \quad (4)$$

где 
$$\Phi = \frac{1}{4} \varepsilon \xi \tau_f S_0 \pi A^2. \quad (5)$$

Пусть ДФМ представляет собой неохлаждаемую микроболометрическую матрицу, т. е. тепловой приемник, в котором регистрируются не потоки фотонов, а приращение внутренней энергии (температуры) пиксела. Шумы теплового приемника определяются  $\Delta W(t)$ - флуктуациями теплового потока при равновесии [3]:

$$\overline{\Delta W(t)^2} = 4kT^2 G_{\Sigma} \Delta f, \quad (6)$$

где  $G_{\Sigma}$  — суммарный (за счет излучения и теплопроводности) коэффициент тепловых потерь.

Полагая, что суммарные тепловые потери микроболометрического пиксела определяются в основном радиационными потерями и что его коэффициент поглощения в ИК-диапазоне  $\lambda_0, \dots, \lambda_n$  близок к единице ( $\varepsilon > 0,8$ ), можно показать, что  $\Delta W(T_{mid})$  — флуктуации излучения пиксела в этом спектральном диапазоне в пределах плоского угла зрения  $180^\circ$  описываются следующим выражением [3]:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta W(\lambda_0, \lambda_n, T_{mid})^2} = \\ = \varepsilon S_0 2kT_{mid}^2 \Delta f \frac{d}{dT_{mid}} W(\lambda_0, \lambda_n, T_{mid}). \end{aligned} \quad (7)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \overline{\Delta W(T_{mid})^2} = \varepsilon S_0 2k(T_{mid})^2 \times \\ \times \frac{1}{2\tau_c} \frac{d}{dT_{mid}} \int_{\lambda_0}^{\lambda_n} \Psi(\lambda, T_{mid}) d\lambda, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{где } \Psi(\lambda, T_{mid}) = 2\pi h c^2 \lambda^{-5} \frac{hc}{e^{\lambda k T_{mid}} - 1}. \quad (9)$$

Тогда, если известны  $G_{\Sigma}$  и температурная постоянная времени пиксела  $\tau_T$  и справедливы следующие неравенства:  $\tau_i \leq \tau_a \leq \tau_c < \tau_T < \tau_k, T_{mid} \gg \gg \Delta T_{\Sigma}(G)$  (где  $\Delta T_{\Sigma}(G) = \Delta T_s(G) + \Delta T_{sp}(G) + \Delta T_{ti}(G) + \Delta T_{iki}(G)$ ), можно определить  $C$  — теплоемкость пиксела и рассчитать приращения температуры пиксела за время  $\tau_c$  под действием каждого из перечисленных выше излучений

$$\begin{aligned} C = G_{\Sigma}(\tau_T); \\ \Delta T_s(G) = \frac{\Delta W(G)}{C} K; \quad \Delta T_{sp}(G) = \frac{\Delta W_{sp}(G)}{C} K; \\ \Delta T_{ti}(G) = \frac{\Delta W_{ti}(G)}{C} K; \quad \Delta T_{iki}(G) = \frac{\Delta W_{iki}(G)}{C} K, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{где } K = e^{-\left(\frac{\tau_c}{\tau_T}\right)}.$$

Определим  $\overline{\Delta T_n(T_{mid})^2}$  — среднеквадратическую амплитуду флуктуации температуры пиксела (находящегося при температуре  $T_{mid}$ ), обусловленную флуктуациями теплового потока при термодинамическом равновесии

$$\overline{\Delta T_n(G)^2} = \left(\frac{K}{C}\right)^2 \overline{\Delta W(T_{mid})^2}.$$

Можно также показать, что  $\overline{\Delta T_{sn}(G)^2}$  — среднеквадратическая амплитуда флуктуации температуры пиксела, обусловленная флуктуациями, поступающего на него лазерного излучения, от оптически сопряженного с ним участка сцены, описывается следующим выражением:

$$\overline{\Delta T_{sn}(G)^2} = \left(\frac{\tau_f \varepsilon \xi G K}{C}\right)^2 \frac{h\nu W}{2}.$$

Пусть  $\overline{\Delta T_{spn}(G)^2}$  — среднеквадратическая амплитуда флуктуации температуры пиксела, обусловленная флуктуациями, поступающего на него спонтанного излучения КУ. Тогда можно показать, что

$$\begin{aligned} \overline{\Delta T_{spn}(G)^2} = \left[ K \frac{(G-1)}{C} M \xi \tau_f \varepsilon h\nu \right]^2 \cdot \tau_a \frac{\Delta\nu_f}{\Delta\nu_v} \Delta\nu_a(G) \times \\ \times \frac{N_2}{N_2 - N_1} \frac{g_2}{g_1}. \end{aligned}$$

Получение тепловизионного изображения с помощью болометрической матрицы можно условно разделить на несколько стадий.

1. Получение оптического изображения на матрице чувствительных элементов и формирование температурных сигналов пикселей, адекватных распределению интенсивности излучения в фокальной плоскости.

2. Формирование электрических сигналов, адекватных температурным сигналам.

3. Обработка этих сигналов и формирование изображения на мониторе.

Рассмотрим факторы, ограничивающие предельную чувствительность на первой стадии получения тепловизионного изображения.

Предельная чувствительность пиксела ДФМ (как было отмечено выше) ограничена флуктуациями потоков оптических излучений, облучающих этот пиксел, под действием которых происходят флуктуации его температуры. Выше были приведены выражения, определяющие среднеквадратические амплитуды флуктуации температуры пиксела, обусловленные флуктуациями радиационного теплообмена пиксела с окружающей средой; флуктуациями поступающего на него лазерного излучения от оптически сопряженного с ним участка сцены и флуктуациями поступающими на него спонтанного излучения КУ.

При условии, что полезным сигналом будем считать  $\Delta T_s(G)$  — приращение температуры пиксела, обусловленное только действием лазерного излучения, сумму  $(\Delta T_{iki}(G) + \Delta T_{ti}(G))$ , так же, как

и флуктуации температуры пиксела, следует отнести к шуму.

Тогда  $Z(G)$  — отношение сигнал/шум (СШ) может быть представлено в следующем виде:

$$Z(G) = \Delta T_s(G) \left[ \Delta T_{ti}(G) + \Delta T_{tki}(G) + \overline{\Delta T_n(T_{mid})}^2 + \overline{\Delta T_{spn}(G)^2 + \Delta T_{sn}(G)^2}^{0,5} \right]. \quad (11)$$

Следует отметить, что в знаменатель выражений (10) в качестве слагаемого включены флуктуации температуры пиксела, обусловленные флуктуациями поступающего на него спонтанного излучения КУ, но не включено в качестве слагаемого  $\Delta T_{sp}(G)$  — приращение температуры пиксела, обусловленное действием спонтанного излучения КУ.

Это объясняется тем, что в идеальном КУ спонтанное излучение должно облучать все пиксели матрицы с одинаковой интенсивностью и, следовательно, не должно влиять на контраст изображения. (В идеальном КУ должны быть одинаковы коэффициенты усиления для всех пространственных мод).

В неидеальном КУ имеют место пространственные временные разбросы величин коэффициентов усиления мод и интенсивностей спонтанного излучения. В этом случае спонтанное излучение КУ надо рассматривать как шум, и тогда выражение для отношения СШ примет следующий вид:

$$Z_l(G) = \Delta T_s(G) \left[ \Delta T_{ti}(G) + \Delta T_{tki}(G) + \Delta T_{sp}(G) + \left( \overline{\Delta T_n(T_{mid})}^2 + \overline{\Delta T_{spn}(G)^2 + \Delta T_{sn}(G)^2} \right)^{0,5} \right]. \quad (12)$$

Следует отметить, что при работе с частотой кадров около 20 Гц и более влияние этих неоднородностей существенно уменьшается вследствие усреднения при визуальном наблюдении изображений на мониторе.

Найдем выражение для порога чувствительности —  $W_{thr}(G)$ , рассматриваемого ПУ с идеальным КУ и ДФМ. Из соотношения  $Z(G) = 1$  после подстановки соответствующих выражений из (1) — (10) получим:

$$W_{thr}(G) = Chv \times \left\{ V(G) + \frac{0,18}{C} \left[ \sqrt{2GL} + \left( 2G^2L^2 + 16CGLV(G) + 32C^2Q(G) \right)^{0,5} \right] \right\} / LG,$$

где  $L = Khv\xi\epsilon\tau_f$ ,  $V(G) = \Delta T_{ti}(G) + \Delta T_{tki}(G)$ ;

$$Q(G) = \overline{\Delta T_n(T_{mid})}^2 + \overline{\Delta T_{spn}(G)^2}.$$

Если КУ неидеальный и неодинаково облучает пиксели спонтанным излучением, то выражение для  $W_{1thr}(G)$  получается из уравнения  $Z_l(G) = 1$  и отличается от  $W_{thr}(G)$  тем, что  $V(G)$  имеет вид:

$$V(G) = \Delta T_{ti}(G) + \Delta T_{tki}(G) + \Delta T_{sp}(G),$$

где  $W_{thr}(G)$  и  $W_{1thr}(G)$  — пороговые энергии ПУ, соответственно, с идеальным и неидеальным КУ.

Пусть (для определенности) параметры ДФМ полностью соответствуют параметрам неохлаждаемой микроболометрической матрицы, разработанной компанией Raytheon IRCOE [4]. Матрица имела следующие основные характеристики.

Спектральная область 8—14 мкм. Число пикселей  $N = 320 \times 240$ . Размеры пиксела  $S_0 = 50 \times 50$  мкм. Суммарный коэффициент тепловых потерь  $G_\Sigma = 3 \cdot 10^{-8} - 1,5 \cdot 10^{-7}$  Вт·К<sup>-1</sup>. Температурная постоянная времени  $\tau_T = (10 - 40) \cdot 10^{-3}$  с. Коэффициент поглощения  $> 80$  %, коэффициент заполнения  $\mu = 30 - 65$  %; сопротивление 50 кОм. Температурный коэффициент сопротивления  $> 2,2$  %. Сигнальная чувствительность  $2,5 \cdot 10^7$  В/Вт, или 50 мВ/К. NETD при  $F/1 < 20$  МК.

Каждый пиксел матрицы представлял собой тонкую (0,5 мкм) пластинку из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, удерживаемую на расстоянии 2 мкм от поверхности кремниевой подложки матрицы с помощью двух узких и тонких опорных стоек из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, которые обеспечивали превосходную термоизоляцию пластинки и возможность считывания сигнала с тонкого (500 Å) термочувствительного резистивного слоя V<sub>Ох</sub>, нанесенного на пластинку из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Рассчитаем (по соотношениям, приведенным выше) зависимости:  $\Delta T_s(G)$ ;  $\Delta T_{sp}(G)$ ;  $\Delta T_{ti}(G)$ ;  $\Delta T_{tki}(G)$ ;  $\Delta T_\Sigma(G)$ , а также  $\left( \overline{\Delta T_n(T_{mid})}^2 \right)^{1/2}$ ;

$$\left( \overline{\Delta T_{spn}(G)^2} \right)^{1/2}; \quad \left( \overline{T_{sn}(G)^2} \right)^{1/2}; \quad Z(G); \quad Z_l(G);$$

$W_{thr}(G)$ ,  $W_{1thr}(G)$ .

Расчеты будем проводить при следующих исходных данных.

$T_{mid} = 300$  К;  $T_i = 300$  К;  $R_i = 0,05$ ;  $\epsilon = 0,9$ ;  $\xi = 0,3$ ;  $\lambda_0 = 1 \cdot 10^6$  м;  $\lambda_n = 50 \cdot 10^6$  м;  $C = 1,8 \cdot 10^{-9}$  Дж/К;  $f_k = 25$  Гц;  $\tau_c = 1,7 \cdot 10^{-4}$  с;  $\Delta f = 2 \cdot 10^6$  Гц;  $G_\Sigma = 9 \cdot 10^{-8}$  Вт/К;  $\tau_T = 20 \cdot 10^{-3}$  с.

При расчетах, результаты которых приведены ниже, будем полагать, что  $\tau_f = 1$  (пропускание фильтра, предусмотренного в математической модели, равно 1 в спектральном диапазоне  $\lambda_0, \dots, \lambda_n$ , т. е., что фильтр отсутствует).

При расчетах будем считать (так же, как и в первой части статьи), что КУ работает на смеси газов  $\psi_{CO_2} = 2$ ;  $\psi_{N_2} = 1$ ;  $\psi_{He} = 2$ , с суммарным давлением  $p = 30$  Торр при  $T_g = 600$  К.

На рис. 1 и 2 приведены перечисленные выше зависимости, рассчитанные при таких данных:  $\Delta t = \tau_i = \tau_a = 1 \cdot 10^{-6}$  с,  $W = 1 \cdot 10^{-15}$  Дж (см. рис. 1) и  $\Delta t = \tau_i = \tau_a = 1 \cdot 10^{-8}$  с,  $W = 1 \cdot 10^{-17}$  Дж (см. рис. 2).

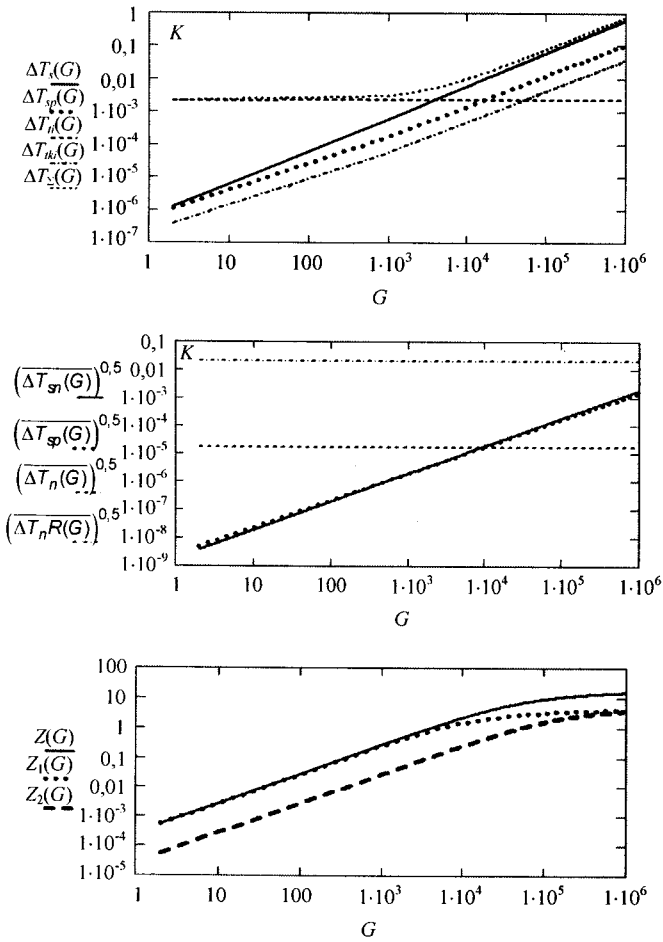


Рис. 1. Зависимости  $\Delta T_s(G)$ ,  $\Delta T_{sp}(G)$ ,  $\Delta T_n(G)$ ,  $\Delta T_{ki}(G)$ ,  $\Delta T_z(G)$ ,  $\left(\overline{\Delta T_n(T_{mid})^2}\right)^{1/2}$ ,  $\left(\overline{\Delta T_{spn}(G)^2}\right)^{1/2}$ ,  $\left(\overline{\Delta T_{sn}(G)^2}\right)^{1/2}$ ,  $Z(G)$ ,  $Z_1(G)$

Рассмотрим полученные зависимости. При выбранных исходных данных суммарное действие всех излучений, попадающих на пиксел, повышает его температуру не более чем на 1 град при  $W = 10^{-15}$  Дж и  $G \leq 10^6$  (см. рис. 1), а также при  $W = 10^{-17}$  Дж и  $G \leq 10^8$  (см. рис. 2). При этом отношение СШ достигает величин  $Z(G) > 10$  и  $Z_1(G) > 1$ .

Насыщение зависимостей  $Z(G)$  и  $Z_1(G)$  происходит после того, как суммы слагаемых в знаменателях выражений (11) и (12), увеличивающихся при увеличении  $G$ , станут больше слагаемых, независящих от  $G$ , т. е. в случае идеального усилителя основным фактором, ограничивающим отношение сигнал/шум при больших усилениях КУ, является  $\Delta T_{ki}(G)$  — приращение температуры пиксела, обусловленное тепловым излучением участка сцены, сопряженного с этим пикселем,

часть из которого, попадающая в полосу усиления КУ, усиливается наряду с полезным сигналом.

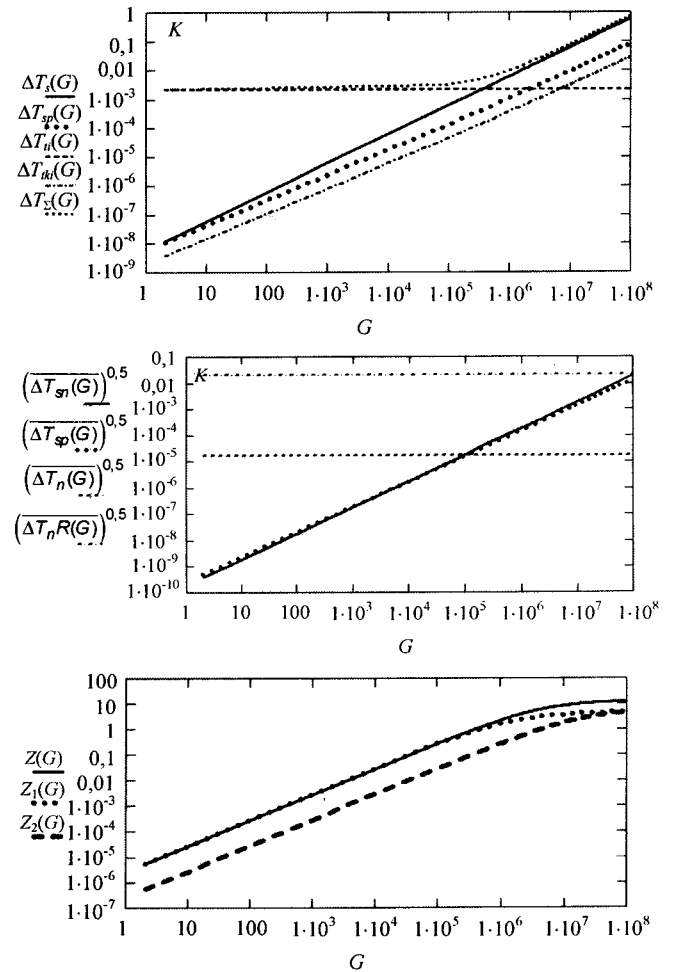


Рис. 2. Зависимости  $\Delta T_s(G)$ ,  $\Delta T_{sp}(G)$ ,  $\Delta T_n(G)$ ,  $\Delta T_{ki}(G)$ ,  $\Delta T_z(G)$ ,  $\left(\overline{\Delta T_n(T_{mid})^2}\right)^{1/2}$ ,  $\left(\overline{\Delta T_{spn}(G)^2}\right)^{1/2}$ ,  $\left(\overline{\Delta T_{sn}(G)^2}\right)^{1/2}$ ,  $Z(G)$ ,  $Z_1(G)$

В случае неидеального усилителя наряду с  $\Delta T_{ki}(G)$  основным фактором, ограничивающим отношение сигнал/шум при больших усилениях КУ, является  $\Delta T_{sp}(G)$  — приращение температуры пиксела, обусловленное спонтанным излучением КУ.

На рис. 3 приведены зависимости  $W_{thr}(G)$  и  $W_{1thr}(G)$ , рассчитанные, соответственно, для  $\Delta t = \tau_i = \tau_a = 1 \cdot 10^{-6}$  с (см. рис. 3, а) и  $\Delta t = \tau_i = \tau_a = 1 \cdot 10^{-8}$  с (см. рис. 3, б).

Видно, что предельные величины пороговых энергий за  $\Delta t = \tau_i = \tau_a = 1 \cdot 10^{-6}$  с равны  $W_{thr}(G) = 10^{-16}$  Дж и  $W_{1thr}(G) = 5 \cdot 10^{-16}$  Дж, соответственно, при  $G = 10^5$  и  $G = 10^4$ , а за  $\Delta t = \tau_i = \tau_a = 1 \cdot 10^{-8}$  с предельные величины пороговых энергий снижаются почти на два порядка и равны  $W_{thr}(G) = 10^{-18}$  Дж и  $W_{1thr}(G) = 5 \cdot 10^{-18}$  Дж, соответственно, при  $G = 10^7$  и  $G = 10^6$ .

По мере уменьшения  $\Delta t = \tau_i = \tau_a$  (т. е. по мере уменьшения длительности пребывания оптически-

го затвора, расположенного перед матричным приемником, в открытом состоянии) уменьшается приращение температуры пиксела от суммарного действия всех излучений и увеличивается относительная доля шумовых компонентов в знаменателе выражения (11), связанная с флуктуациями температуры пиксела.

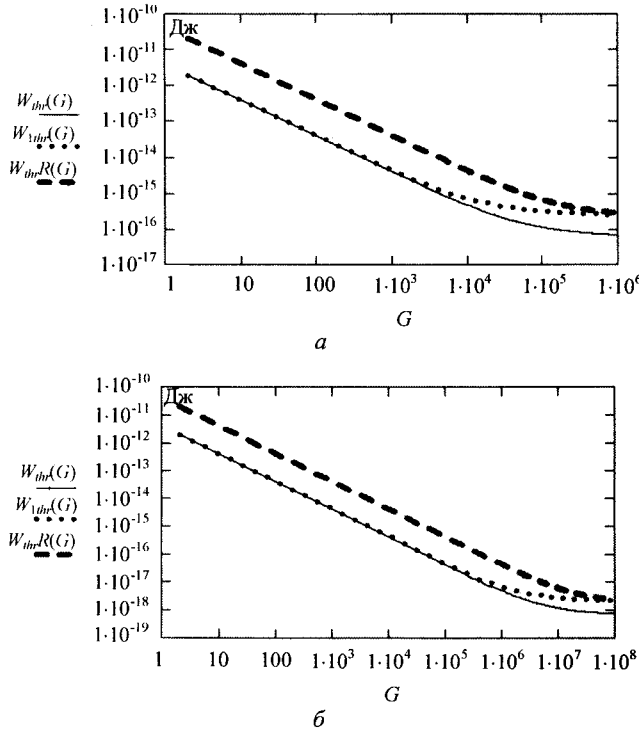


Рис. 3. Зависимости  $W_{thr}(G)$ ,  $W_{1thr}(G)$ , рассчитанные: а — для  $\tau_1 = \tau_2 = 1 \cdot 10^{-6}$  с; б — при  $\tau_1 = \tau_2 = 1 \cdot 10^{-8}$  с

Увеличение  $G$  приводит к пропорциональному росту этой доли шумовых составляющих, и при  $G > 5 \cdot 10^6$  составляющая шума  $(\Delta T_{sn}(G))^2$  становится больше, чем независимая от усиления составляющая шума  $\Delta T_{nr}(G)$ , после чего отношение сигнал/шум перестает увеличиваться, а величина пороговой энергии ПУ с КУ перестает уменьшаться при дальнейшем увеличении  $G$ .

Другой фактор, ограничивающий уменьшение пороговой энергии ПУ с КУ при уменьшении  $\tau$ , и  $\tau_a$  и увеличении  $G$ , связан с необходимостью увеличения полосы усиления КУ и, следовательно, необходимостью увеличения давления газовой смеси КУ, что в свою очередь приводит к увеличению составляющих шума. Например, полоса усиления рассматриваемого КУ (по уровню 0,9 при  $G = 10^6$ ) приблизительно равна 50 МГц, что обеспечивает эффективное усиление импульсов с длительностью не более  $10^{-8}$  с.

Для работы с импульсами длительностью менее  $10^{-8}$  с и  $G > 10^6$  необходимо увеличение давления смеси, что вызовет увеличение интенсивности

спонтанного излучения КУ и увеличение шумовой составляющей, связанной с увеличением температуры пиксела под действием спонтанного излучения, и увеличение амплитуд флуктуаций температуры пиксела.

Отметим, что наличие принципиальных ограничений возможности уменьшения  $\Delta t$ -длительности приема оптического сигнала, связанного с тем, что при уменьшении  $\Delta t$  до величины, близкой к времени когерентности источника сигнала  $\tau_{cog}$ , интерференционные флуктуации фотонов становятся соизмеримыми с квантовыми флуктуациями, вследствие чего мощность шума увеличивается пропорционально  $1/\Delta t$  [5]. Время когерентности импульсного  $CO_2$ -лазера, облучающего сцену, можно оценить как:  $\tau_{cog} \approx 1/\Delta\nu \approx 10^{-8} \div 10^{-9}$  с, где  $\Delta\nu$  — эффективная ширина контура усиления активной среды, которая для импульсных  $CO_2$ -лазеров находится в пределах  $10^8 \div 10^9$  Гц.

Таким образом, предельная чувствительность рассматриваемого ПУ с КУ, рассчитанная только с учетом факторов, действующих на первой стадии получения тепловизионного изображения (создание оптического изображения на матрице чувствительных элементов и формирование температурных сигналов пикселей, адекватных распределению интенсивности излучения в фокальной плоскости) характеризуется предельной пороговой энергией, равной  $\sim 10^{-18}$  Дж.

Очевидно, что из-за наличия аддитивных шумов на двух последующих стадиях получения тепловизионного (ТПВ) изображения (формирование электрических сигналов, адекватных температурным сигналам; обработка электрических сигналов и формирование изображения на мониторе ТПВ) величина пороговой энергии существенно увеличится по сравнению с предельной.

В нашем случае возможно провести оценку пороговой энергии ПУ с КУ с учетом аддитивных шумов на двух последующих стадиях изображения, так как расчеты параметров ПУ с КУ базировались на данных болометрической матрицы (разработанной компанией Raytheon IRCOE), для которой (при  $F/1$ ) известна величина эквивалентной радиационному шуму разности температур  $NETD < 20$  мК. Оценку будем производить для "условно-реального" тепловизора с величиной  $NETD = 20$  мК, отличающегося от реального тем, что минимальная величина  $NETD$  ограничивается только вследствие амплитудных флуктуаций температур пикселей  $\Delta T_{nr}$ .

Будем считать, что тепловизор с этой матрицей не может различать источники с температурами, отличающимися друг от друга менее чем на 20 мК только из-за амплитудных флуктуаций температур

пикселей, имеющих величину  $\left(\overline{(\Delta T_{nR})^2}\right)^{0,5} = 20$  мК. (Для сравнения уровень этих флуктуаций показан на рис. 1 и 2).

В этом случае выражение для отношения сигнал/шум тепловизора с КУ запишется:

$$Z_2(G) = \Delta T_s(G) / \left[ \Delta T_{ii}(G) + \Delta T_{iki}(G) + \Delta T_{sp}(G) + \left( \overline{\Delta T_n^2} + \overline{\Delta T_{spn}(G)^2} + \overline{\Delta T_{sn}(G)^2} + \overline{\Delta T_{nR}^2} \right)^{0,5} \right].$$

Это выражение для  $W_{thr}R(G)$  — пороговой энергии подобного тепловизора с КУ — будет иметь такой же вид, как и выражение (11), но при этом запишем следующим образом:

$$Q(G) = \overline{\Delta T_n^2} + \overline{\Delta T_{spn}(G)^2} + \overline{(\Delta T_{nR})^2}.$$

Зависимости  $Z_2(G)$  и  $W_{thr}R(G)$  представлены для сравнения на тех же рисунках, что и зависимости, рассчитанные для первой стадии получения тепловизионного изображения.

Видно, что  $Z_2(G)$  — отношение сигнал/шум "условно-реального" тепловизора с КУ — почти на порядок меньше, чем  $Z(G)$  — предельного отношения сигнал/шум, рассчитанного для первой стадии получения тепловизионного изображения для ДФМ с идеальным КУ. В случае ДФМ с неидеальным КУ  $Z_1(G)$  мало отличаются от  $Z_2(G)$  при  $G > 10^5$ .

$W_{thr}R(G)$  — пороговая энергия "условно-реального" тепловизора с КУ при  $G \approx 10^6$  и  $G \approx 10^8$  оценивается, соответственно, величинами  $4 \cdot 10^{-16}$  и  $3 \cdot 10^{-18}$  Дж, что в 3—4 раза выше величины предельных значений пороговых энергий, рассчитанных при таких же коэффициентах усиления для ДФМ с идеальным КУ.

Итак, показано, что ПУ с  $\text{CO}_2$ -КУ и матричным болометрическим тепловизором имеет наименьшую пороговую энергию при приеме импульсных сигналов, при этом время открытия оптического затвора, который предлагается устанавливать перед матричным приемником, должно быть равно длительности принимаемого импульса излучения. Пороговая энергия уменьшается при уменьшении длительности лазерных импульсов вплоть до  $10^{-8}$  с.

Проведенные в работе [1] расчеты порогов чувствительности (при регистрации излучения  $\text{CO}_2$ -лазера) приемных устройств, содержащих КУ и одноэлементный квантовый приемник и КУ и одноэлементный пироэлектрический приемник, позволяют сделать оценки порогов чувствительности ПУ с КУ и тепловизором на основе матрицы квантовых приемников и чувствительность ПУ с тепловизором на основе матрицы пироэлектрических приемников.

$\Phi_{lim}(G)$  — предельный порог чувствительности ПУ с КУ и квантовым КРТ-приемником ( $30 \times 30$  мкм,  $T = 77$  К), перед которым имеется охлаждаемый фильтр с шириной  $\Delta\lambda_f = 0,245 \cdot 10^{-6}$  м, при  $G \approx 10^3$  достигает величины  $(7 \cdot 10^{-16} \div 10^{-15}) \text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ .

Полагая, что этот параметр существенно не ухудшится в ПУ с КУ и матричным КРТ-приемником, оценим пороговую энергию этого устройства при регистрации импульса лазерного излучения длительностью  $\tau_i = 10^{-6}$  с (требующего полосы усилителя  $\Delta f \approx 10^6 \div 10^7$  Гц) как  $W_{thr}(G) \approx \Phi_{lim}(G) \times \Delta f^{1/2} \cdot \tau_i \approx (1-3) \cdot 10^{-18}$  Дж. Увеличение  $G$  выше  $10^3$  нецелесообразно как из-за насыщения зависимости  $W_{thr}(G)$  [1], так и из-за ограниченных емкостей накопления в ячейках мультиплексора, которые в настоящее время не превышают  $3 \cdot 10^7 \div 10^8$  электронов. При  $G = 10^3$  количество электронов, накопленных в ячейке мультиплексора за  $\tau_i = 10^{-6}$  с при приеме одной пространственной моды спонтанного излучения КУ, оценивается величиной  $(2-3) \cdot 10^7$  электронов. Поэтому величину  $W_{thr}(G) \approx (1-3) \cdot 10^{-18}$  Дж можно считать предельной для ПУ с КУ и тепловизором с матричным КРТ-приемником.

Воспользовавшись результатами расчетов  $\Phi_{lim}(G)$  для ПУ с КУ и одноэлементным пироэлектрическим приемником, приведенными в работе [1], можно аналогичным образом оценить предельную пороговую энергию ПУ с КУ и тепловизором с пироэлектрической матрицей. В этом случае предельная величина  $W_{thr}(G) \approx (1-3) \cdot 10^{-16}$  Дж.

Отметим, что величина пороговой энергии реального ПУ с двухкаскадным КУ и пировидионом, оцененная по данным экспериментальных исследований в работе [6] (при  $G \approx 10^5$ ), равнялась  $10^{-15}$  Дж.

Для построения ПУ с КУ и КРТ-матричными тепловизорами достаточно КУ с коэффициентами усиления до  $10^3$ , а для построения ПУ с КУ и болометрическими или пироэлектрическими матричными тепловизорами требуются КУ с коэффициентами усиления порядка  $10^4 \div 10^7$ , причем в обоих случаях  $M$  — число пространственных мод, усиливаемых КУ, должно быть не менее  $N$  числа чувствительных элементов матрицы. Число пространственных мод (с длиной волны  $\lambda$ ), усиливаемых однокаскадным (одномодульным) КУ, и эффективный коэффициент усиления КУ определяются следующими выражениями:

$$M = \frac{1}{16} \pi^2 \frac{D_a^4}{(L_o \lambda^2)^2};$$

$$G_e = R_m^n e^{\alpha L_a n},$$



где  $D_a$  — диаметр входного и выходного отверстий КУ;

$L_o$  — длина пути усиливаемого излучения между двумя последовательными отражениями от сферических зеркал оптической системы КУ;

$L_a$  — длина пути усиливаемого излучения через усиливающую среду между двумя последовательными отражениями от сферических зеркал оптической системы КУ;

$G_e$  — эффективный коэффициент усиления КУ;

$\alpha$  — показатель усиления активной среды;

$R_m$  — коэффициент отражения зеркал оптической системы КУ;

$n$  — число проходов усиливаемого излучения через активную среду.

В работе [6] показано, что в однокаскадных (одномодульных)  $\text{CO}_2$ -усилителях произведение коэффициента усиления на число мод, которое было предложено называть параметром качества усилителя "П", практически не удается (из-за самовозбуждения модуля КУ, обусловленного рассеянием усиливаемого излучения на точечных дефектах окон и зеркал) сделать большим, чем  $10^9$ , где  $\Pi = G \cdot M$ ,  $\Pi_{\max} \leq 10^9$ . Этого вполне достаточно для построения ПУ с одномодульным КУ и КРТ-матричными тепловизором. Например, импульсный  $\text{CO}_2$ -КУ с конструкцией, близкой по типу к конструкции, описанной в [6], при  $L_o = 33$  см,  $L_a = 30$  см,  $D_a = 3,1$  см,  $n = 13$ ,  $\alpha \approx 0,02$  см<sup>-1</sup> имеет параметр качества  $\Pi = 2 \cdot 10^8$  и обеспечивает одновременное усиление 100 тыс. пространственных мод с коэффициентом усиления более 2000 ( $K_e = 2140$ ).

Подобный КУ может работать с частотой повторения импульсов усиления до 20 Гц при электрической энергии, потребляемой импульсным блоком питания (в пересчете на один импульс), 5—8 Дж.

Для построения ПУ с КУ и тепловизором с болометрической или пироэлектрической матрицей необходим КУ с  $\Pi \geq 10^{11}$ , т. е. с  $M \geq 8 \cdot 10^4$  и  $G \geq 10^6$ .

Подобный квантовый усилитель должен состоять из двух или трех усилительных каскадов (модулей), между которыми помещены (для предотвращения самовозбуждения) оптические вентили. В [6] дано описание ПУ с двухкаскадным КУ и пировидиконом.

На рис. 4 показан импульсный трехкаскадный КУ (без импульсного блока питания), содержащий оптические вентили на основе германиевых призм полного внутреннего отражения и имеющий  $G \approx 10^8$  и  $M \approx 10^3$ .

Квантовый усилитель может работать с частотой повторения импульсов усиления до 20 Гц при электрической энергии, потребляемой импульс-

ным блоком питания (в пересчете на один импульс), около 25 Дж. Усилительные модули КУ охлаждаются от замкнутой системы водяного охлаждения с производительностью около 1 л/мин.



Рис. 4. Фотография импульсного трехкаскадного КУ

Таким образом, в работе показано, что при регистрации изображений объектов, облучаемых  $\text{CO}_2$ -лазером, чувствительность приемного устройства, содержащего многомодовый  $\text{CO}_2$ -КУ (КУ изображения) и тепловизор на основе ДФМ, может быть в тысячи раз выше, чем чувствительность самого тепловизора, благодаря чему можно ожидать эффективного использования ПУ с КУ и ДФМ при построении активных систем видения (АСВ).

Активные системы ИК-видения (как и человеческое зрение и системы видения в ближнем ИК-диапазоне на основе электронно-оптических преобразователей) обеспечивают получение изображения сцены, облученной источником подсветки, только за счет локальных различий в отражательных свойствах. Изображения, полученные с помощью АСВ, более естественны и часто легче распознаются, чем тепловые изображения, получаемые за счет собственного излучения объектов наблюдения.

На рис. 5 для примера приведены фотографии лица и руки человека, полученные с экрана пировидикона ПУ с  $\text{CO}_2$ -КУ без лазерной подсветки (тепловизионный режим) и при лазерной подсветке (активный режим). Подсветку осуществляли импульсным  $\text{CO}_2$ -лазером. Длительность импульса подсветки (по полувысоте)  $\approx 0,8$  мкс. В ПУ использовали одномодульный  $\text{CO}_2$ -КУ с параметром качества  $\Pi \approx 1,2 \cdot 10^5$  ( $M \approx 8,5 \cdot 10^3$ ,  $G \approx 14$ ).



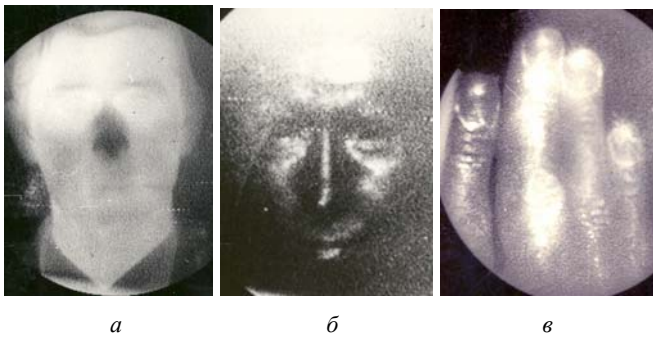


Рис. 5. Фотографии лица (а, б) и руки (в) человека, полученные с экрана пировидикона ПУ с  $\text{CO}_2$ -КУ:

а — изображение без лазерной подсветки;  
б, в — изображение с лазерной подсветкой

Активные системы видения, не заменяя тепловидение, позволяют получать дополнительную информацию об объектах (в том числе информацию о дистанции до объектов наблюдения). Поэтому несмотря на технические сложности, связанные с разработкой и реализацией  $\text{CO}_2$ -КУ и приемных устройств на их основе, а также на их габаритные размеры, массу и энергопотребление, их применение в АСВ с подсветкой сцены излучением импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера представляется технически оправданным, так как позволяет без соответствующего увеличения  $W_I$ -энергии (мощности) лазера в тысячи раз увеличивать ПЛС-потенциал лазерной системы видения путем соответствующего уменьшения  $W_{thr}$ -порога чувствительности приемного устройства (ПЛС  $\sim W_I / W_{thr}$ ).

Очевидно, что увеличивать во столько же раз ПЛС только путем увеличения  $W_I$  нецелесообразно и практически невозможно.

Импульсные АСВ на основе ПУ с  $\text{CO}_2$ -КУ имеют преимущества перед гетеродинными ПУ, так как в последних шумы увеличиваются пропорционально полосе усилителя промежуточной частоты. Кроме того, для работы с гетеродинными ПУ необходимы одномодовые лазеры с высокой стабильностью частоты, которые имеют большие габаритные размеры и стоимость, чем лазеры, требуемые для АСВ на основе ПУ с  $\text{CO}_2$ -КУ.

#### Л и т е р а т у р а

1. Свиридов А. Н. Расчет предельных параметров приемных устройств с  $\text{CO}_2$ -квантовыми усилителями, предназначенных для лазерных локаторов и активных систем видения// Прикладная физика. 2006. № 1. С. 116—123.
2. Гальярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь. — М.: Связь, 1978.
3. Таубкин И. И., Трищенко М. А. Предельные чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения//Оптический журнал. 1996. Июнь. № 6. С. 18—42.
4. Radford W., Murphy D., Finch A., Kennedy A., Ray M., Sayed A., Wyles J., Wyles R., Varesi J., Moody E., Cheung E. Sensitivity Improvements in uncooled microbolometer FPAs// SPIE. 1999. V. 3696.
5. Росс М. Лазерные приемники. — М.: Мир, 1969.
6. Свиридов А. Н., Мартынов С. Н. Фотоприемные устройства с  $\text{CO}_2$ -квантовыми усилителями для активных ИК-систем// Оптический журнал. 1996. № 6. С. 67—70.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

## Ultimate sensitivity of receiving devices keeping $\text{CO}_2$ -quantum amplifier and staring thermal imager

A. N. Sviridov

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*The calculations of ultimate thresholds of receiving devices with  $\text{CO}_2$ -quantum amplifiers (RD with QA), intended for lidars and active systems of vision are conducted. At calculations the relations of thresholds RD with QA from parameters QA, characteristics of infrared sensor used in them.*