

УДК 621.383.52: 621.723

## Об оптимизации конструктивных параметров тепловизионного ИК-микроскопа

И. И. Ли, В. Г. Половинкин

*В работе проводится анализ температурного и пространственного разрешения ИК-микроскопа, регистрирующего собственное тепловое излучение объектов исследования, в зависимости от основных конструктивных параметров оптической системы микроскопа и фотоэлектрических параметров ИК ФПУ.*

PACS: 85.60 Gz

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

### Введение

Инфракрасный (ИК) микроскоп обычно рассматривают как разновидность микроскопа, в котором используется излучение ИК-диапазона для подсветки исследуемых объектов [1]. Предметом данной статьи является тепловизионный микроскоп на базе многоэлементного ИК фотоприемного устройства (ФПУ), регистрирующий собственное тепловое излучение объектов исследования и, следовательно, обеспечивающий возможность наблюдения температурного микрорельефа с высоким пространственным разрешением. Важнейшим отличием тепловизионного ИК-микроскопа от микроскопа видимого диапазона является то, что незанятое объективом поле зрения фотоприемника является источником избыточного фонового ИК-излучения. Поэтому необходимо проводить совместный анализ параметров оптической системы

и ИК ФПУ [2, 3] для обеспечения эффективной работы всего ИК-микроскопа.

Целью данной работы являлось проведение анализа температурного и пространственного разрешения ИК-микроскопа, регистрирующего собственное тепловое излучение объектов исследования, в зависимости от основных конструктивных параметров оптической системы микроскопа и фотоэлектрических параметров ИК ФПУ.

### Структурная схема тепловизионного микроскопа

На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема тепловизионного микроскопа. При анализе использовались следующие параметры оптической системы тепловизионного микроскопа и многоэлементного ИК ФПУ[3]:

- относительное отверстие  $D/F$ , фокусное расстояние объектива микроскопа  $F$ , коэффициент оптического увеличения  $K$ ;
- охлаждаемая диафрагма с диаметром  $D_{од} = 2r$  и расстоянием  $h$  до фокальной плоскости ИК ФПУ;
- размер пикселя и формат ИК ФПУ, спектральный диапазон чувствительности ИК ФПУ ( $\lambda_1-\lambda_2$ ); квантовая эффективность фотоприемников  $\eta$ ; зарядовая емкость устройства ввода и уровень собственных шумов кремниевого мультиплексора; температура фона —  $T_{ф}$ ; температура исследуемого объекта —  $T_{об}$ .

---

Ли Ирлам Игнатьевич, ведущий научный сотрудник<sup>1</sup>.

Половинкин Владимир Григорьевич, старший научный сотрудник<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.  
Тел. (383) 330-77-81. E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет.  
Россия, 630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20.

Статья поступила в редакцию 14 июня 2016 г.

© Ли И. И., Половинкин В. Г., 2016

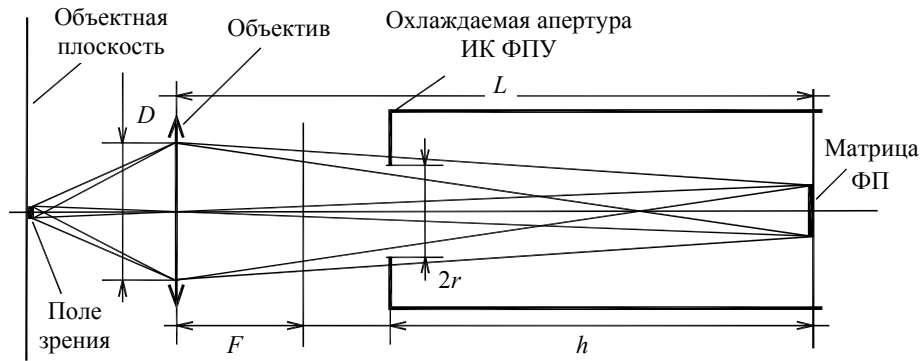


Рис. 1. Структурная схема тепловизионного микроскопа.

При расчетах температурного, пространственного разрешения удобно ввести два обобщенных параметра:

– геометрический фактор охлаждаемой апертуры ИК ФПУ —  $F_{од}$ , характеризующий долю фонового излучения падающего на фотоприемник (ФП) через охлаждаемую диафрагму; для круглой диафрагмы геометрический фактор охлаждаемой апертуры рассчитывается по соотношению:

$$F_{од}(r, h, a) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{a^2 + h^2 - r^2}{\sqrt{(a^2 + h^2 + r^2)^2 - 4a^2r^2}} \right] \quad (1)$$

где  $a$  — смещение элемента в фокальной плоскости от центра диафрагмы, причем это соотношение также позволяет оценить неоднородность уровня фонового излучения от положения фоточувствительного элемента [4];

– геометрический фактор оптической системы тепловизионного микроскопа, определяемый как отношение излучения падающего на единичную площадь в фокальной плоскости ИК ФПУ к излучению с единичной площади от объекта исследования; этот геометрический фактор оптической системы, без учета геометрии охлаждаемой диафрагмы, вычисляется по соотношению:

$$F_{об} = \frac{\sin^2(\theta)}{K^2} = \frac{1}{K^2} \frac{\text{tg}^2(\theta)}{1 + \text{tg}^2(\theta)}; \quad (2)$$

$$\text{tg}(\theta) = \frac{DK}{2F(K+1)}.$$

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

Приведенные выражения для геометрических факторов есть максимальные возможные значения. В реальной системе необходимо учитывать взаимное виньетирование диафрагмы и объектива. Например, часть диафрагмы, занятая объективом,

не является источником фонового излучения, а источником полезного сигнала может быть только видимая через диафрагму часть объектива. Влияние этих факторов учитывалось введением дополнительных коэффициентов использования объектива —  $K_{об}$  и диафрагмы —  $K_{д}$ .

### Температурное разрешение тепловизионного микроскопа

Как следует из структурной схемы на рис. 1, расстояние от объектива до фокальной плоскости ИК ФПУ определяется произведением коэффициента усиления на фокусное расстояние объектива  $L = F(K + 1)$ . Наш опыт проектирования криостатов тепловизионных систем различного назначения показывает, что расстояние  $h$  от охлаждаемой диафрагмы до фокальной плоскости ИК ФПУ должно быть на 15—25 мм меньше  $L$ .

На рис. 2 приведены расчетные зависимости NETD (эквивалентная шуму разность температур) от диаметра охлаждаемой диафрагмы ИК ФПУ и параметров объектива. При расчетах ориентировались на ИК ФПУ форматом 320×256 с мультиплексором ISC9809 с входным устройством на основе трансимпедансного усилителя с зарядовой емкостью —  $3,5 \times 10^6$  электронов, паспортный уровень собственных шумов мультиплексора = 400 электронов, (уровень собственных шумов мультиплексора взят из технического паспорта для мультиплексора ISC9809 Indigo Systems). На базе этого мультиплексора изготовлено ИК ФПУ на основе фотодиодов  $p^+n$ -типа проводимости на МЛЭ HgCdTe, выращенного на кремниевой подложке с длинноволновой границей  $\sim 5$  мкм [5]. На рис. 2 расчет проводился для спектрального диапазона 4,6—4,8 мкм, с размером пикселя 30×30 мкм (габариты фоточувствительной области 9,6×7,68 мм), квантовая эффективность фотоприемников = 0,8, время накопления 20 мс, коэффициент увеличения  $K$  принят равным 6, что обеспечивает пространственное разрешение  $\sim$  размер пикселя/ $K \sim 5$  мкм.

Считается, что источники фонового излучения, а также сигналы от объектов в поле зрения тепловизионного микроскопа излучают как абсолютно черное тело. Температуры фона и объекта на рис. 2 приняты равными 293 К, расстояние от охлаждае-

мой диафрагмы до фокальной плоскости ИК ФПУ  $h = L - 20$  мм.

Для понимания зависимостей на рис. 2 в табл. 1 приведены численные значения расчетных параметров для кривых 2 и 4.

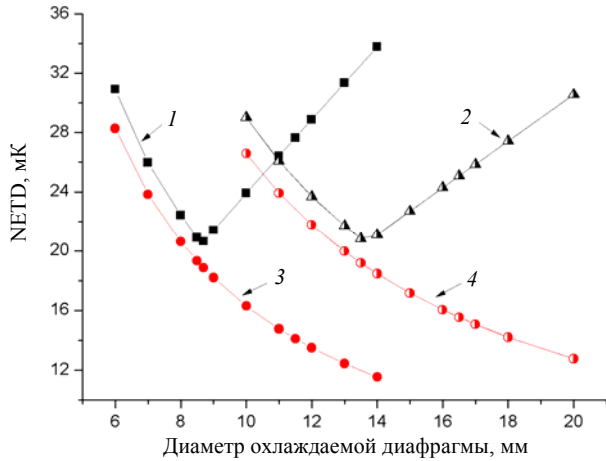


Рис. 2. Расчетные зависимости NETD от диаметра охлаждаемой диафрагмы ИК ФПУ, где кривая 1 —  $D/F = 1,0, F = 12$  мм, 2 — объектив —  $D/F = 1,0, F = 17$  мм, 3, 4 — NETD тепловизионной системы с объективом согласованным с диаметром охлаждаемой диафрагмы.

Таблица 1

$D_{од}$ (мм)/геометрический фактор	Фон (в единицах $10^6$ электронов)/NETD, мК	Полный сигнал/сигнал от объекта (в единицах $10^6$ электронов)	NETD, мК
20/ 0,0146	4,735/12,77	4,419/1,912	30,56
18/ 0,0119	3,85/14,21	3,53/1,912	27,43
17/ 0,0106	3,435/15,07	3,12/1,912	25,86
16,5/ 0,0102	3,238/15,55	2,922/1,912	25,07
16/ 0,00943	3,047/16,05	2,73/1,912	24,28
15/ 0,0083	2,681/17,17	2,364/1,912	22,69
14/ 0,00723	2,34/18,46	2,021/1,912	21,09
13,5/ 0,00673	2,175/19,19	1,866/1,866	20,83
13/ 0,00624	2,02/19,97	1,73/1,73	21,7
12/ 0,00533	1,721/21,76	1,474/1,474	23,68
11/ 0,00488	1,447/23,92	1,239/1,239	26,07

Во втором столбце табл. 1 приведены значения сигналов от фона и температурное разрешение тепловизора (кривая 4 на рис. 2). Расчетные зависимости (кривые 3, 4 на рис. 2) соответствует хорошо известным зависимостям NETD тепловизора с согласованной с диафрагмой охлаждаемой апертуры светосилой объектива, т.е. температурное разрешение растет с увеличением апертуры (геометрического фактора). Температурное разрешение тепловизионного микроскопа (5-й столбец в табл. 1) при апертурах меньших 13,5 мм также растет с увеличением апертуры и достигает максимального значения при коэффициенте использования объектива, близком к единице. Для объектива с  $D/F = 1, F = 17$  мм, это условие выполняется для охлаждаемой диафрагмы диаметром 13,5 мм,  $h = 82$  мм, а для объектива с  $D/F = 1, F = 12$  мм оптимальной будет диафрагма 8,7 мм,  $h = 62$  мм. При геометрическом факторе охлаж-

даемой апертуры больше оптимального NETD тепловизионного микроскопа ухудшается вследствие возрастания компоненты шума, обусловленной флуктуациями фонового излучения, а при уменьшении геометрического фактора NETD ухудшается вследствие уменьшения уровней сигналов от объекта исследования (3-й столбец в табл. 1).

Результаты, приведенные на рис. 2, рассчитаны для центрального элемента ИК ФПУ. Для оценки однородности температурного разрешения на рис. 3 приведены результаты для центрального и трех периферийных элементов ИК ФПУ. При малых и при больших значениях диаметра диафрагмы все элементы находятся в, примерно, одинаковых условиях. Различия проявляются при значениях диаметра, близких к оптимальному. В этом случае для периферийных элементов происходит перераспределение коэффициентов ис-

пользования: уменьшение для объектива и увеличение для диафрагмы.

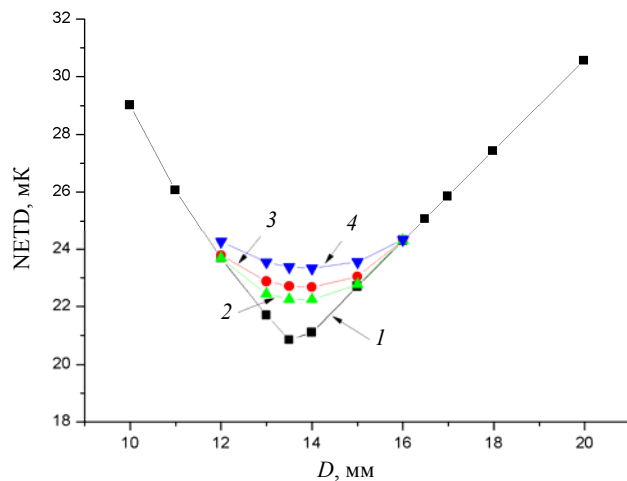


Рис. 3. Расчетные зависимости NETD от диаметра охлаждаемой диафрагмы  $D$  ИК ФПУ,  $F = 17$  мм, где 1 — для центрального элемента матрицы фоточувствительных элементов:  $(x, y) = (0, 0)$ , 2 — для элемента матрицы с координатами  $(x, y) = (0, \pm 128)$ , 3 —  $(x, y) = (\pm 160, 0)$ , 4 —  $(x, y) = (\pm 160, \pm 128)$ .

В табл. 2 приведены расчетные значения NETD тепловизионного микроскопа на основе ИК ФПУ форматом  $320 \times 256$  при условии сохранения пространственного разрешения  $5$  мкм ( $L/K = 5$  мкм), причем с размерами пикселя от  $40 \times 40$  мкм до

$20 \times 20$  мкм при оптимальном значении диаметра охлаждаемой диафрагмы. Спектральный диапазон чувствительности ИК ФПУ  $4,6$ — $4,8$  мкм, суммарный шум мультиплексора и электроники —  $400$  электронов. Объектив  $D/F = 1,0$ ,  $F = 17$  мм, температура фона и объекта принята равной  $293$  К, квантовая эффективность  $0,8$ , время накопления  $20$  мс.

Отметим, что NETD тепловизионного микроскопа относительно слабо зависят от размера пикселя ИК ФПУ, но уменьшение размера пикселя позволит значительно уменьшить расстояние от охлаждаемой диафрагмы до фокальной плоскости ИК ФПУ и, следовательно, габаритные размеры тепловизионного микроскопа.

Центральным вопросом при разработке тепловизионного микроскопа является выбор спектрального диапазона чувствительности ИК ФПУ. В табл. 3 приведены расчетные зависимости NETD тепловизионного микроскопа в зависимости от спектрального диапазона для комнатной температуры объекта. Очевидным результатом является улучшение температурного разрешения с ростом длинноволновой границы чувствительности. Однако необходимо учитывать уровень сигналов от фона и сигналов от объекта, определяющие требования к типу ячейки устройства ввода и зарядовой емкости кремниевого мультиплексора.

Таблица 2

Расчетные зависимости NETD тепловизионного микроскопа на основе ИК ФПУ форматом  $320 \times 256$  от размера пикселя при условии сохранения пространственного разрешения  $5$  мкм

Геометрический фактор апертуры	Полный/ сигнал от объекта, $10^6$ электронов	NETD, мК
Размер пикселя $40 \times 40$ мкм, Апертура $14,8$ , $h = 133$ мм, $L = 153$ мм, $K = 8$ .		
0,00308	1,486/1,481	23,66
Размер пикселя $30 \times 30$ мкм, Апертура $14,2$ , $h = 99$ мм, $L = 119$ мм, $K = 6$ .		
0,00512	1,406/1,393	24,54
Размер пикселя $25 \times 25$ мкм, Апертура $13,5$ , $h = 82$ мм, $L = 102$ мм, $K = 5$ .		
0,00673	1,296/1,296	25,43
Размер пикселя $20 \times 20$ мкм, Апертура $13$ , $h = 65$ мм, $L = 85$ мм, $K = 4$ .		
0,0099	1,238/1,238	26,08

Таблица 3

Формат ИК ФПУ  $320 \times 256$ , элемент  $30 \times 30$  мкм, суммарный шум мультиплексора + электроники  $400$  электронов. Апертура  $D=14$ ,  $h = 82$  мм. Объектив  $D/F = 1,0$ ,  $F = 17$ , коэффициент оптического увеличения  $5$ , квантовая эффективность  $0,8$ , температура фона и объекта  $293$  К.

Спектральный диапазон, мкм	Микроскоп NETD, мК	Полный сигнал (в единицах $10^6$ электронов)
1,7—3,05	182,6	0,043
1,7—3,2	107,6	0,083
1,7—3,4	61,43	0,18
1,7—3,6	40,03	0,37
1,7—3,8	28,66	0,68
1,7—4,0	21,86	1,18
1,7—4,4	14,34	3,06
1,7—4,8	10,4	6,57
4,6—4,8	21,09	2,02

При выборе устройства считывания ИК ФПУ предназначенного для тепловизионного микроскопа необходимо учитывать, что в ИК-микроскопе минимизируется апертурное окно на фон. В этом случае для ИК ФПУ на основе прямоинжекционного устройства считывания значительно возрастают требования к динамическому сопротивлению фотодиодов, в особенности, в спектральном диапазоне до 3,5 мкм [6]. ИК ФПУ с кремниевым мультиплексором на основе трансимпедансного усилителя лишены этих недостатков, однако зарядовая емкость таких мультиплексоров, как правило, существенно ниже зарядовой емкости устройств считывания на основе прямоинжекционных устройств считывания.

Таким образом, выбор спектрального диапазона тепловизионного микроскопа определяется из требований к пространственному разрешению, которое ограничивается длинноволновой границей чувствительности ИК ФПУ, требуемым температурным разрешением и зарядовой емкостью устройств считывания.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости NETD тепловизионного микроскопа в зависимости от температуры объекта при температуре фона 293 К.

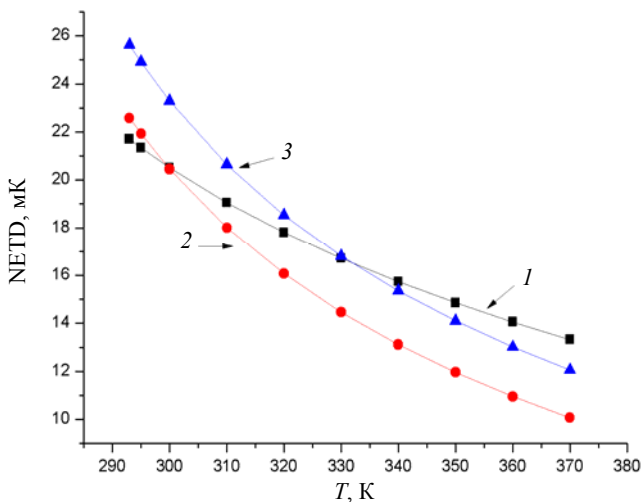


Рис. 4. Расчетные зависимости NETD тепловизионного микроскопа в зависимости от температуры объекта,  $\eta = 0,8$ , время накопления 20 мс, 1 — спектральный диапазон 4,6—4,8 мкм, 2 — спектральный диапазон 1,7—4,0 мкм, 3 — спектральный диапазон 3,4—4,0 мкм.

Необходимо также учитывать спектр пропускания атмосферы, так как даже на расстоянии  $\sim 10$  см в спектральном диапазоне 2—5 мкм заметны полосы поглощения атмосферой, что снижает качество изображения, а также затрудняет калибровку прибора [7].

Преимущество ИК ФПУ с узкополосной спектральной чувствительностью заключается также в том, что в спектральном диапазоне 4,6—4,8 мкм отсутствуют линии поглощения атмосферой и, следовательно, температура и влажность не будут влиять на условия проведения экспериментов. Уменьшаются и хроматические аберрации объектива. Для кривых 1–3 на рис. 3 при зарядовой емкости  $3,5 \times 10^6$  электронов для объектов температурный диапазон будет ограничен до 320—330 К. Расширение температурного диапазона для объектов до температуры 360—370 К требует мультиплексор с зарядовой емкостью  $10^7$  электронов. Так, из табл. 3 следует, что для спектрального диапазона 1,7—4,8 мкм необходимо использовать устройство считывания с зарядовой емкостью большей  $6 \times 10^6$  электронов.

### Заключение

В работе проведен системный, оптимизационный анализ возможностей тепловизионного микроскопа на базе многоэлементного ИК ФПУ, регистрирующего собственное тепловое излучение объектов исследования, в зависимости от характеристик оптической системы, параметров ИК ФПУ и спектрального диапазона. Показана возможность реализации тепловизионного микроскопа, позволяющего проводить исследования температурного микрорельефа объектов, находящихся при комнатной температуре, с температурным разрешением 20—30 мК при пространственном разрешении 5—6 мкм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фотоника, словарь терминов. Под ред. В. Н. Овсяка. — Новосибирск, 2004.
2. Ковчавцев А. П., Валишева Н. А., Базовкин В. М., Гузев А. А., Ли И. И., Половинкин В. Г., Ефимов В. М., Строганов А. С., Царенко А. В., Мжельский И. В., Панова З. В., Настовьяк А. Е., Вицина Н. Р., Левцова Т. А., Девятова С. Ф., Кузмин Н. Б. в кн. Юбилейный сборник избранных трудов института физики полупроводников им. А. В. Ржанова (1964—2014), Новосибирск, 2014.
3. Базовкин В. М., Мжельский И. В., Курьшев Г. Л., Половинкин В. Г. // Автометрия. 2011. Т. 47. № 5. С. 98.
4. Зигель Р., Хауэлд Дж. Теплообмен излучением. — М.: Мир, 1975.
5. Bazovkin V. M., Dvoretzky S. A., Guzev A. A., Kovchavtsev A. P., Marin D. V., Polovinkin V. G., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Tsarenko A. V., Vasi'ev V. V., Varavin V. S., Yakushev M. V. // Infrared Physics. 2016. Vol. 76. P. 72.
6. Gumenjuk-Sichevska J. V., Karnausenko D. D., Lee I. I., and Polovinkin V. G. // Opto-electronics Review. 2011. Vol. 19. No. 2. P. 63.
7. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. — М.: Изд. Мир, 1988.

## Optimization of design parameters for the IR thermal imaging microscope

I. I. Lee<sup>1</sup> and V. G. Polovinkin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Rzhanov Institute of Physics of Semiconductors, SB RAS  
13 Acad. Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University  
20 Marks av., Novosibirsk, 630073, Russia

Received June 14, 2016

*Consideration is given to the analysis of temperature and spatial definition for an IR thermal imaging microscope in relation to basic design parameters of the microscope optical system and photoelectric parameters of the IR photodetector.*

PACS: 85.60 Gz

*Keywords:* IR, photodetector, microscope, readout circuits (ROIC), temperature definition, spectral range.

### REFERENCES

1. *Photonics, Handbook*. Ed. by V. N. Ovsyuk (Novosibirsk, 2004) [in Russian].
2. A. P. Kochavtsev, N. A. Valisheva, V. M. Bazovkin, et al., in Book: *Jubilee Collection of Selected Works of the Rzhanov Institute of Physics of Semiconductors (1964—2014)* (Novosibirsk, 2014) [in Russian].
3. V. M. Bazovkin, I. V. Mzhelskii, G. L. Kuryshev, and V. G. Polovinkin, *Optoelectron., Instrum. Data Process.* **47** (5), 98 (2011).
4. R. Zigel and J. Haueld, *Heat Interchange by Radiation* (Mir, Moscow, 1975) [in Russian].
5. V. M. Bazovkin, S. A. Dvoretzky, A. A. Guzev, et al., *Infrared Physics* **76**, 72 (2016).
6. J. V. Gumenjuk-Sichevska, D. D. Karnaushenko, I. I. Lee, and V. G. Polovinkin, *Opto-electronics Review* **19** (2), 63 (2011).
7. Gilbert Gaussorgues, *La Thermographie Infrarouge* (Lavoisier, Paris; Mir, Moscow, 1988).