

## Определение излучательной способности поверхности полупроводниковых приборов методом отражения

*Евдокимова Н. Л., Ежов В. С., Минин В. Ф.*

*Точность ИК измерений температуры полупроводниковых приборов и других объектов зависит от правильного выбора значения излучательной способности ( $\varepsilon$ ) поверхности объекта. Рассмотренные в литературе методы определения  $\varepsilon$  требуют обязательного нагрева объекта. В работе рассмотрена возможность определения  $\varepsilon$  без нагрева самого объекта. Метод основан на явлении отражения ИК излучения от поверхности полупроводникового прибора. Получена формула расчёта  $\varepsilon$ . Проведено сравнение результатов измерения  $\varepsilon$  методом отражения и прямым методом на ряде поверхностей полупроводниковых приборов.*

Одним из факторов, определяющих предельно допустимые режимы эксплуатации полупроводниковых приборов, является достижение максимально допустимой температуры структуры. Превышение данного критерия приводит к ускорению процессов деградации и к ранним отказам приборов [1-2]. В работе [3] показано, что регистрация инфракрасного излучения может быть использована для отбора транзисторов с различным запасом по предельно допустимой мощности. Поэтому бывает необходим контроль температуры приборов в рабочем режиме. С этой целью часто используют прямой метод измерения температуры приборов с помощью пирометра либо тепловизора. Для определения температуры тел с помощью инфракрасного (ИК) пирометра или тепловизора необходимо знать коэффициент относительной излучательной способности поверхности исследуемого тела, именуемый в дальнейшем коэффициентом излучения  $\varepsilon$ . В прилагаемых к пирометрам описаниях, например в работе [4], для определения  $\varepsilon$  исследуемые образцы необходимо нагревать. Причём, чем сильнее нагрет образец, тем выше точность измерения. Однако нагреть образец не всегда возможно. Поэтому целью работы являлось определение  $\varepsilon$  без нагрева образца.

По закону Кирхгофа [4-5] коэффициент излучения равен коэффициенту поглощения  $\alpha$ . Из закона сохранения энергии следует, что для непрозрачных тел коэффициент поглощения  $\alpha$  связан с коэффициентом отражения  $\rho$  следующим соотношением:

$$\alpha + \rho = 1. \quad (1)$$

Используя закон Кирхгофа, получим

$$\varepsilon + \rho = 1. \quad (2)$$

Следовательно, коэффициент излучения можно определить через коэффициент отражения:

$$\varepsilon = 1 - \rho. \quad (3)$$

Воспользуемся этим соотношением для определения коэффициента излучения  $\varepsilon$  через коэффициент отражения  $\rho$ .

Для определения  $\rho$  используем внешний источник нагрева, дающий направленный на образец поток энергии  $W_{\text{вн.ист}}$ .

Коэффициент отражения при этом будет определяться как

$$\rho = W_{\text{отр}} / W_{\text{вн.ист}}. \quad (4)$$

Эксперимент состоит из двух этапов: измерения энергии внешнего источника  $W_{\text{вн.ист}}$  и энергии, отражённой от поверхности исследуемого образца. Первому измерению

будет соответствовать индекс 1, второму – 2.

Для измерения  $W_{\text{вн.ист}}$  направим поток от внешнего источника на идеально отражающую поверхность в виде гладкой тонкой алюминиевой фольги (рис. 1).

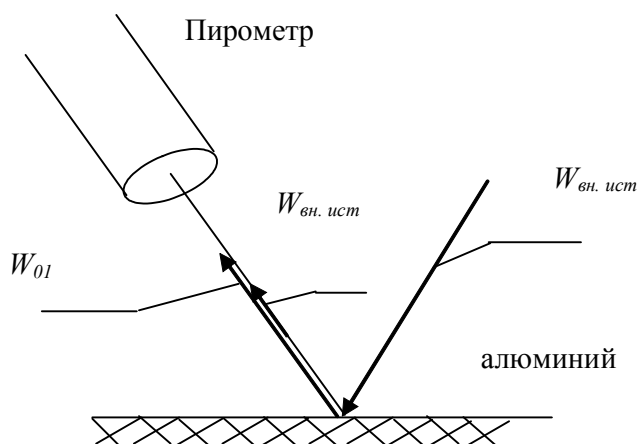


Рис. 1

Энергетические потоки, поступающие в пирометр, при внешнем источнике нагрева при отражении от алюминия

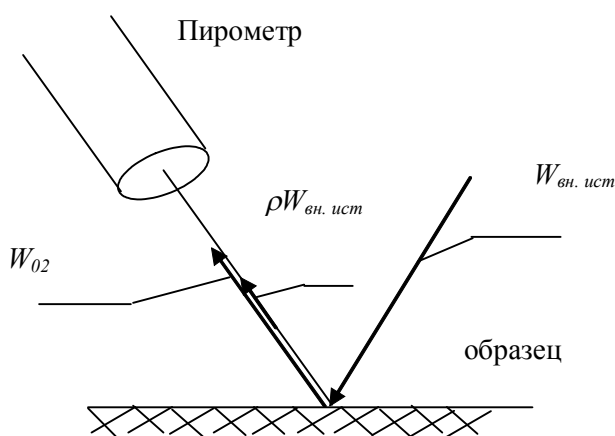


Рис. 2

Энергетические потоки, поступающие в пирометр, при внешнем источнике нагрева в случае отражения от исследуемого образца

Полная энергия  $W_{\text{полн1}}$ , попадающая на пирометр, складывается из энергии внешнего источника  $W_{\text{вн.ист}}$  и энергии, попадающей на пирометр при отсутствии внешнего источника  $W_{01}$ :

$$W_{\text{полн1}} = W_{\text{вн.ист}} + W_{01} \quad (5)$$

Полную энергию, попадающую на пирометр, можно измерить, установив на пирометре  $\varepsilon = 1$ . Из формулы (5) находим энергию внешнего источника:

$$W_{\text{вн.ист}} = W_{\text{полн1}} - W_{01} \quad (6)$$

Для определения  $W_{01}$  нужно измерить энергию, поступающую от алюминиевой поверхности на пирометр при отсутствии внешнего источника.

Теперь найдем энергию, отраженную от поверхности исследуемого образца (рис. 2).

При этом полная энергия  $W_{\text{полн2}}$ , попадающая на пирометр, складывается из отраженной от поверхности образца энергии внешнего источника  $\rho W_{\text{вн.ист}}$  и энергии, попадающей на пирометр при отсутствии внешнего источника  $W_{02}$ :

$$W_{\text{полн2}} = \rho W_{\text{вн.ист}} + W_{02} \quad (7)$$

Из (6) и (7) получим выражение для коэффициента отражения:

$$\rho = \frac{W_{\text{полн2}} - W_{02}}{W_{\text{полн1}} - W_{01}} \quad (8)$$

Энергия связана с температурой по закону Стефана-Больцмана [5]:

$$W = \sigma T^4, \quad (9)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Подставляя (9) в (8) и сокращая  $\sigma$ , получим выражение для коэффициента отражения:

$$\rho = \frac{T_2^4 - T_{02}^4}{T_1^4 - T_{01}^4} \quad (10)$$

Таким образом, на основании (3) и (10) излучательную способность  $\varepsilon$  можно определить как

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_2^4 - T_{02}^4}{T_1^4 - T_{01}^4}. \quad (11)$$

Необходимо отметить, что данный метод определения излучательной способности применим только к непрозрачным для ИК диапазона материалам. Например, высокоомный кремний (без металлизации) является прозрачным для ИК излучения. Поэтому к нему данный метод неприменим. Другой оговоркой является использование формулы (9), которая справедлива для всего спектра теплового излучения. При измерении температуры пирометром нужно учитывать, что пирометр измеряет не всё тепловое излучение, а только его часть, соответствующую диапазону рабочих длин волн пирометра. Обоснование возможности использования этой формулы для диапазона длин волн 8-16 мкм (пирометр Optris LS) дано в работе [6].

При использовании формул (10) и (3) были определены коэффициенты относительной излучательной способности различных поверхностей полупроводниковых структур.

Стенд, на котором был реализован этот метод, показан на рис. 3.

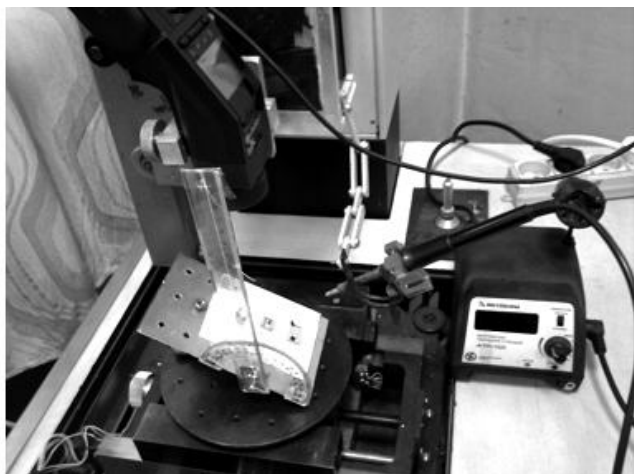


Рис. 3

Стенд для измерения излучательной способности поверхности полупроводниковых структур методом отражения

В качестве внешнего источника был использован медный стержень, температура которого поддерживалась с точностью до 1 °С. ИК излучение измерялось пирометром Optris LS. При заданной в установках пирометра  $\varepsilon = 1$  измерялась энергия, поступающая на пирометр. Пирометр крепился вертикально на штативе. Исследуемые образцы были размещены на наклонной платформе. Угол наклона платформы к горизонту составлял порядка 40°. Нагретый медный стержень располагался таким образом, чтобы угол падения ИК луча, идущего от медного стержня к исследуемой поверхности, был равен углу отражения луча, поступающего в пирометр. При этом

показания пирометра были максимальными. Изменение энергии внешнего источника осуществлялось изменением стабилизированной температуры медного стержня.

В качестве исследуемых образцов были использованы следующие поверхности: пластина GaAs, нанесенный на поверхность пластины термоиндикатор ТИ-150, корпус транзистора 2П816К, пластина с транзисторными структурами, пластина с омическими контактами Au-Ge, кристалл транзистора 2П816К, керамика (используемая в качестве крышек транзисторов), кристалл транзистора 2П762, нанесенный на поверхность пластины черный лак.

Температуры, измеренные в градусах Цельсия, приведены в табл. 1. Затем температуры были переведены в шкалу Кельвина:  $T = 273 + t$ . По формулам (10) и (3) в программе Excel были рассчитаны коэффициенты отражения  $\rho$  и излучения  $\varepsilon$  соответственно. Значения температур, измеряемых пирометром без внешнего источника, при отражении от алюминия и от образцов оказались равными с точностью до градуса

и обозначены в дальнейшем  $t_0$ . Результаты измерений температур  $t_0$ ,  $t_1$  и  $t_2$  и расчёта  $\rho$  по формуле (10) и  $\varepsilon$  по формуле (3) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения  $\varepsilon$  методом отражения

образцы	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\rho$	Значения $\varepsilon_{\text{отр}}$ , полученные методом отражения
пластина GaAs	22	112	53	0,26	0,74
ТИ-150	22	112	24	0,02	0,98
корпус 2П816К	22	112	82	0,57	0,43
транз. структура	22	112	92	0,71	0,29
омич. конт. Au-Ge	22	112	90	0,69	0,31
тр-р 2П816К	22	112	97	0,84	0,16
керамика	22	112	28	0,05	0,95
тр-р 2П762	22	112	91	0,70	0,30
черный лак	22	112	30	0,06	0,94

Определение  $\varepsilon_{\text{отр}}$  было проведено для двух температур внешнего источника 50 и 112  $^\circ\text{C}$ . Значения  $\varepsilon_{\text{отр}}$ , определяемые для двух температур источника, оказались одинаковыми в пределах точности задания температуры источника (1  $^\circ\text{C}$ ).

Для проверки полученных результатов,

Таблица 2

Результаты измерения  $\varepsilon$  с помощью нагрева

образцы	Значения $\varepsilon_{\text{нагр}}$ , полученные прямым методом, путем нагрева образцов				Средн. знач. $\varepsilon_{\text{нагр}}$
	50 $^\circ\text{C}$	60 $^\circ\text{C}$	70 $^\circ\text{C}$	80 $^\circ\text{C}$	
пластина GaAs	0,75	0,77	0,78	0,78	0,77
ТИ-150	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
корпус 2П816К	0,5	0,44	0,47	0,52	0,48
транз. структура	0,28	0,27	0,3	0,29	0,29
омич. конт. Au-Ge	0,30	0,31	0,35	0,32	0,32
кристалл 2П816К	0,11	0,19	0,13	0,13	0,14
керамика	0,83	0,93	0,93	0,93	0,91
кристалл 2П762	0,33	0,35	0,36	0,35	0,35
черный лак	0,98	0,96	0,97	0,97	0,97

найденных методом отражения, были измерены значения  $\varepsilon$  прямым методом – с помощью нагрева этих же структур в термокамере. Термокамера была нагрета до 50, 60, 70 и 80  $^\circ\text{C}$ . Полученные значения относительной излучательной способности  $\varepsilon_{\text{нагр}}$ , измеренные при разных температурах, приведены в табл. 2.

Рассчитанная в программе Excel корреляция массива  $\varepsilon_{\text{отр}}$  таблицы 1 и массива  $\varepsilon_{\text{нагр}}$  таблицы 2 составляет 0,995. Таким

образом, относительную излучательную способность тел, имеющих полированную поверхность (для исключения диффузного отражения), можно определять методом отражения.

### Выводы

1. Излучательную способность непрозрачных поверхностей полупроводниковых приборов можно определять без нагревания исследуемого прибора, используя явление отражения ИК излучения, поступающего от внешнего источника.

2. Расчёт излучательной способности проводится по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_2^4 - T_{02}^4}{T_1^4 - T_{01}^4},$$

где  $T_1$  и  $T_{01}$  – температуры с внешним источником тепла и без него соответственно,

---

измеряемые при отражении от идеально отражающей поверхности,  $T_2$  и  $T_{02}$  – температуры с внешним источником тепла и без него соответственно, измеряемые при отражении от поверхности исследуемого прибора.

3. Сравнение предлагаемого метода определения излучательной способности, использующего отражение ИК излучения от внешнего источника, с традиционным методом, использующим нагрев исследуемого объекта, показало корреляцию результатов измерения 0,995.

4. Результаты работы могут быть использованы в практике ИК измерений.

### *Литература*

1. Синкевич В. Ф. Физические основы обеспечения надёжности мощных биполярных и полевых транзисторов // Электронная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 232.

2. Евдокимова Н. Л., Ежов В. С., Минин В. Ф., Перельман Б. Л. Оценка качества мощных транзисторов по их предельно допустимым и теплофизическим параметрам // Электронная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 244.

3. Иткин Б. Я., Концевой Ю. А., Демина Г. К., Кудин В. Д. Исследование связи инфракрасного излучения с отказами транзисторов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 1969. – Вып. 4. – С. 92.

4. Non-Contact Temperature Measurement, the company «Optris», [http://www.optris.com/tl\\_files/pdf/Downloads/IR-Basics.pdf](http://www.optris.com/tl_files/pdf/Downloads/IR-Basics.pdf).

5. Температурные измерения. Справочник // Под ред. О. А. Герашенко и др. – Киев : Наук. думка. – 1989.

6. Евдокимова Н. Л., Ежов В. С., Иванов С. В., Минин В. Ф., Синкевич В. Ф. Способ определения излучательной способности поверхности полупроводниковых приборов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1(228). – С. 57-63.