

05;12

Неохлаждаемые термочувствительные элементы на основе кристаллических полупроводников

© И.М. Несмелова,¹ Н.П. Цицина, В.А. Андреев

Федеральное государственное унитарное предприятие
Научно-производственное объединение „Государственный институт прикладной оптики“,
420075 Казань, Россия

¹e-mail: eugene@mi.ru

(Поступило в Редакцию 3 июля 2003 г.)

На примере монокристаллов антимонида индия рассмотрена возможность создания неохлаждаемых термочувствительных элементов для ИК области спектра. Рассчитаны оптимальные электрические параметры InSb для получения болометрических элементов с максимальной чувствительностью. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными, полученными на термодатчиках из антимонида индия.

Одной из важнейших задач при создании элементов оптоэлектроники является выбор термочувствительного материала, от которого во многом зависит возможность достижения высоких характеристик прибора. В настоящее время интенсивно исследуются материалы с наибольшими значениями температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и удельного сопротивления с целью создания на их основе неохлаждаемых, высокочувствительных, дешевых болометрических фотоприемников для инфракрасной (ИК) области спектра, а также малогабаритных, высокоточных, малоинерционных датчиков температуры. Наличие полупроводниковых материалов с различными значениями ширины запрещенной зоны позволяет создавать датчики температуры от 150 до ~ 1000 К.

Известно, что температурный коэффициент сопротивления β полупроводников в области собственной проводимости имеет отрицательное значение и величину, большую, чем на порядок, по сравнению, например, с металлами [1],

$$\beta = -\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad \text{или} \quad \beta = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT}, \quad (1)$$

где R — электрическое сопротивление элемента, σ — электропроводность материала.

В данной работе на примере монокристаллов антимонида индия рассматривается возможность создания неохлаждаемых термочувствительных элементов для оптоэлектроники. Рассчитаны основные электрические характеристики антимонида индия вблизи комнатной температуры в зависимости от концентрации носителей заряда и температуры с целью определения параметров материала, из которого могут быть изготовлены термочувствительные (болометрические) элементы с максимальной чувствительностью.

Для области собственной и смешанной проводимости электронная и дырочная составляющие электропроводности складываются:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (2)$$

постоянная Холла:

$$|R_H| = \frac{1}{e} \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2}, \quad (3)$$

где $n, \mu_n; p, \mu_p$ — концентрации и подвижности электронов и дырок соответственно.

Сделаем замену $p = a \cdot n_i$, где n_i — собственная концентрация носителей заряда для фиксированной температуры; a — величина, определяющая соотношение между дырками и электронами в материале. Тогда уравнения (2) и (3) преобразуются:

$$\sigma = en_i\mu_p \cdot (b/a + a), \quad (4)$$

$$|R_H| = \frac{1}{en_i} \frac{b^2 - a^2}{(b + a^2)^2}, \quad (5)$$

где $b = \mu_n/\mu_p$.

Одним из основных параметров термочувствительного элемента является вольтовая чувствительность S , которая для болометра пропорциональна $S \sim \beta R \alpha I$ [2], где α — коэффициент поглощения материала чувствительного элемента; I — ток, протекающий через болометр. У полупроводников в области собственного поглощения $\alpha \sim 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-1}$. Вольтовая чувствительность болометрического элемента в основном определяется произведением

$$S \approx \beta \cdot R = \frac{1}{\sigma^2} \frac{d\sigma}{dT}. \quad (6)$$

Собственная концентрация носителей заряда для антимонида индия вычислялась по формуле из [3]

$$n_i = 2.9 \cdot 10^{11} (2400 - T)^{0.75} (1 + 2.7 \cdot 10^{-4} T) T^{1.5} \times \exp[(-0.129 + 1.5 \cdot 10^{-4} T)/kT], \text{ см}^{-3}. \quad (7)$$

Подвижности носителей заряда определялись по [4]

$$\mu_n = 77000 (T/300)^{-1.66}, \text{ см}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (8)$$

$$\mu_p = 2.55 \cdot 10^7 \cdot T^{-1.81}, \text{ см}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (9)$$

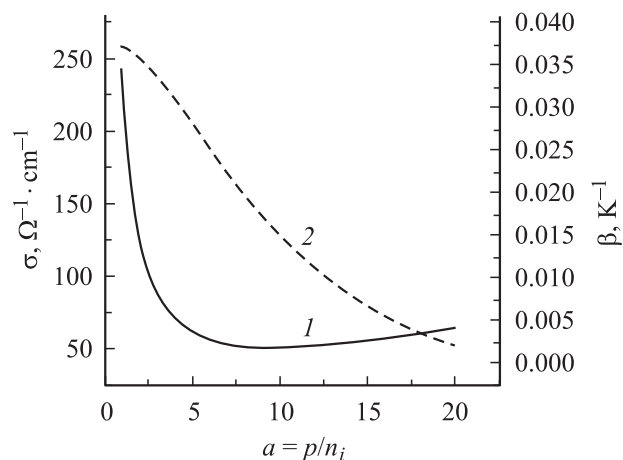


Рис. 1. Зависимости электропроводности (1) и абсолютное значение ТКС (2) от параметра $a = p/n_i$ для антимионида индия при 300 К.

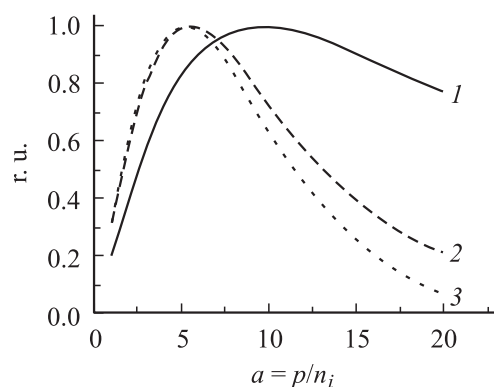


Рис. 2. Зависимости удельного сопротивления ρ , постоянной Холла $|R_H|$ кристаллического антимионида индия и чувствительности S болометрического элемента от параметра $a = p/n_i$ при 300 К: 1 — S , 2 — $|R_H|$, 3 — ρ .

На рис. 1 представлены результаты расчетов зависимости электропроводности и ТКС от параметра $a = p/n_i$ для InSb при 300 К. Минимальное значение σ_{\min} наблюдается при $a = 9.59$ и приходится на область смешанной проводимости, где $p > n$. Вычисленная по формуле (7) собственная концентрация для антимионида индия при 300 К равняется $n_i = 1.95 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, так что при 300 К минимальное значение электропроводности будет у материала с $p = 1.87 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

На рис. 2 даны расчетные кривые для S , $|R_H|$ и удельного сопротивления $\rho = 1/\sigma$ при 300 К в зависимости от параметра a . Все величины нормированы к своему максимуму. Как видно, максимальное значение чувствительности болометрического элемента S_{\max} наблюдается при $a = 5.17 (p_{300 \text{ K}} = 1.01 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3})$. Максимум $|R_H|$ соответствует значению $a = 5.51 (p_{300 \text{ K}} = 1.07 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3})$.

Таким образом, получено, что максимальную чувствительность неохлаждаемых термочувствительных элементов из InSb следует ожидать в образцах, легированных акцепторной примесью, и при 300 К они имеют следующие параметры: $p = 1.01 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\sigma = 60.1 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\rho = 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$, $|R_H| = 989 \text{ cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}$, в таких образцах $\beta = -2.77 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Подобным образом были рассчитаны значения параметра a , соответствующие максимуму сигнала S_{\max} при фиксированных температурах в диапазоне 290–320 К. Положение S_{\max} с температурой смещается незначительно: от $a = 5.170$ (при $T = 290 \text{ K}$) до $a = 5.179$ (при $T = 320 \text{ K}$); концентрация дырок увеличивается от $8 \cdot 10^{16}$ до $1.6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Величины S_{\max} и $|R_H|_{\max}$ уменьшаются в 2 раза, а ТКС снижается от $|\beta| = 2.95 \cdot 10^{-2}$ до $2.45 \cdot 10^{-2}$.

Из монокристаллического антимионида индия были изготовлены малогабаритные, малоинерционные, высокоточные термочувствительные элементы — датчики температуры на область 307–315 К, которая соответствует шкале медицинского термометра. Термочувствительные элементы представляли собой меандр площадью $(1.5 \times 1.5) \text{ mm}$ и толщиной $\sim 50 \mu\text{m}$. Сопротивление элемента равнялось 2.0–2.5 кОм. В таблице представлены электрические параметры образцов антимионида индия, из которых были изготовлены датчики температуры. Как видно из таблицы, экспериментальные значения электропроводности меньше, чем расчетные значения, что, вероятно, обусловлено тем, что при расчетах не были учтены все механизмы рассеяния носителей заряда.

Анализ экспериментальных результатов, представленных в таблице, показал, что из кристаллов InSb, параметры которых удовлетворительно согласуются с теорией, получены болометрические элементы с чувствительностью и ТКС, близкими к расчетным значениям (образцы 1–3). Параметры образцов 4 и 5 не соответствуют расчетам, в результате чего из этих кристаллов были получены элементы с низкими значениями S_{\max} и ТКС.

Таким образом, на примере кристаллов антимионида индия были рассчитаны оптимальные электрические параметры образцов для создания неохлаждаемых термочувствительных элементов (болометров, термодатчиков) для приборов оптоэлектроники. Показано, что наиболь-

Электрические параметры образцов антимионида индия для неохлаждаемых термочувствительных элементов (300 К)

№ образца	$ R_H $, $\text{cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}$	σ , $\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	β^* , K^{-1}	S_{rel}^{**}
1	903	33.3	$-2.80 \cdot 10^{-2}$	1.00
2	725	34.0	$-2.54 \cdot 10^{-2}$	0.90
3	680	29.6	$-2.33 \cdot 10^{-2}$	0.94
4	332	25.6	$-1.30 \cdot 10^{-2}$	0.61
5	140	24.0	$-0.90 \cdot 10^{-2}$	0.45

* ТКС определялся в интервале температур 307–315 К.

** S_{rel} нормированы к S_{\max} образца 1.

шая чувствительность элементов может быть получена на кристаллах, легированных акцепторной примесью с $p_{300\text{K}} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Аналогичные расчеты могут быть выполнены для полупроводников с иными значениями ширины запрещенной зоны, у которых область собственной проводимости приходится на другой интервал температур. Термочувствительные элементы могут быть изготовлены для несколько иной области спектра.

Список литературы

- [1] *Линевег Ф.* Измерение температур в технике. Москва, Металлургия, 1980.
- [2] *Зеров В.Ю., Маляров В.Г.* // Оптический журнал. 2001. Т. 68. С. 88.
- [3] *Oszwaldowski M., Zimpel M.* // J. Phys. Chem. Solids. 1988. Vol. 49. P. 1179.
- [4] *Маделунг О.* Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. М.: Мир, 1967.