ПОВЕРХНОСТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЭНЕРГИИ И ЭФФЕКТ БЕНЕДИКСА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Стельмах О. Б., Чекурин В. Ф.

В связи с возможным практическим применением эффекта Бенедикса [1] представляют интерес выяснение механизмов его возникновения и вычисление величины ЭДС. Рассматривались механизмы, связанные с диффузией неравновесных термически генерированных носителей [1] и с влиянием градиента температуры на коэффициент объемной термоэдс [2].

Необходимым условием наблюдения эффекта Бенедикса является высокая градиентность температурного поля, поэтому исследования, как правило, проводятся на образцах ограниченных размеров. При этом распределение электронной температуры, а следовательно, и величина возникающей термоэдс существенно зависят от условий теплообмена подсистем полупроводника с внешней средой. Для вычисления этой ЭДС необходимо решить систему уравнений теплопроводности для носителей тока и фононов [3]. Предположим, что боковая поверхность образца, ориентированного вдоль оси x, теплоизолирована. Образец контактирует с тремя термостатами в точках $x=-a_1$, 0, a_2, температуры которых соответственно равны T_0, T_1, T_0. Для фононной подсистемы примем условия идеального теплового контакта с термостатами. Взаимодействие электронной подсистемы с поверхностью контакта будем учитывать поверхностной релаксацией энергии этой подсистемы, принимая граничные условия в виде

$$\begin{gathered}\frac{dT_{(n)}}{dx}=\frac{s_1 k_B}{\varkappa_{(n)}}\left(T_{(n)}-T_{(s)}\right) \quad \text{при} \quad x=-a_1,\\ \frac{dT_{(n)}}{dx}=-\frac{s_2 k_B}{\varkappa_{(n)}}\left(T_{(n)}-T_{(s)}\right) \quad \text{при} \quad x=a_2.\end{gathered} \tag{1}$$

Здесь $T_{(n)}(x)$ и $T_{(s)}(x)$ — температуры электронной и фононной подсистем; s_1 и s_2 — скорости остывания носителей на поверхностях $x=-a_1$ и $x=a_2$; $\varkappa_{(n)}$ — теплопроводность электронной подсистемы; k_B — постоянная Больцмана. При этом, если a_1 намного больше длины остывания k^{-1} и $a_2 \ll a_1$, то в случае слабо легированного образца получим следующее выражение для термоэдс Бенедикса:

$$U_{\text{Б}}=\frac{\alpha_{\text{ср}}\varkappa_{(n)}\left(\exp ka_2-1\right)\Delta T}{a_2\left(k\varkappa_{(n)}+k_B s_2\right)\exp ka_2}. \tag{2}$$

Здесь $k=\sqrt{P\left(\varkappa_{(n)}+\varkappa_{(s)}\right)/\left(\varkappa_{(n)}\varkappa_{(s)}\right)}$; $\Delta T=T_1-T_0$; P — коэффициент теплообмена между подсистемами; $\varkappa_{(s)}$ — теплопроводность решетки; $\alpha_{\text{ср}}$ — среднее значение коэффициента объемной термоэдс в интервале температур $[T_{(n)}(-a_1),\ T_{(n)}(a_2)]$. Отсюда следует, что в случаях, когда $k_B s_2 \ll k\varkappa_{(n)}$, поверхностная релаксация энергии не оказывает существенного влияния на ЭДС Бенедикса.

Если выполняется также условие $\exp ka_2 \gg 1$, то вместо (2) получим

$$U_{\text{Б}}=\frac{\alpha_{\text{ср}}\varkappa_{(n)}\Delta T}{a_2\left(k\varkappa_{(n)}+k_B s_2\right)}. \tag{3}$$

При симметричном нагреве ($a_1=a_2=a$) ЭДС Бенедикса зависит от разности скоростей остывания носителей на поверхностях $x=-a_1$ и $x=a_2$. В этом случае для слабо легированного полупроводника имеем

$$U_{\text{Б}}=\frac{\alpha_{\text{ср}}\varkappa_{(n)}k_B\left(s_2-s_1\right)\left(2\operatorname{sh} ka-\operatorname{sh} 2ka\right)\Delta T}{a\left[\left(k^2\varkappa_{(n)}^2+k_B^2 s_1 s_2\right)\operatorname{sh} 2ka+k_B k\varkappa_{(n)}\left(s_1+s_2\right)\operatorname{ch} 2ka\right]}. \tag{4}$$

Формула (3) довольно хорошо описывает экспериментальные результаты, приведенные в [2]. Действительно, поскольку в условиях проведения эксперимента $\alpha_{\text{ср}}$ слабо изменяется с изменением ΔT, то зависимость $U_{\text{Б}}$ от ΔT, рассчитанная по формуле (3), будет близка к линейной, что наблюдалось в эксперименте. Рассчитанные значения ЭДС Бенедикса при $\Delta T=60$ К составляют ~ 0.8 мВ, соответствующие экспериментальные значения ~ 3—4 мВ. При расчете коэффициент P оценивался по формуле $P=3nk_B/(2\tau_e)$, где n — концентрация носителей, τ_e — среднее время релаксации энергии. Полученное значение k составляло $5 \cdot 10^5$ м$^{-1}$, длина $a_2=110$ мкм, так что условие $\exp ka_2 \gg 1$ выполнялось. Отметим, что для $\Delta T=60$ К в работе [2] получено даже лучшее совпадение между теоретическими и экспериментальными результатами ($U_Б \sim 1$ мВ). Для этого аторам пришлось сделать предположение о том, что релаксация энергии носителей определяется их рассеянием на акустических фононах, а импульса — на ионизированных примесях. Однако при меньших значениях ΔT теоретическое значение $U_Б$, полученное в этой работе, заметно меньше экспериментального. Это нетрудно понять, если учесть, что приведенная в [2] теоретическая зависимость $U_Б$ от ΔT имеет вид кубической параболы, в то время как экспериментальная зависимость близка к линейной. В нашем случае различие между теоретическими и экспериментальными значениями $U_Б$ примерно одинаково во всех точках диапазона изменения ΔT. Так, при $\Delta T=10$ К полученное нами значение $U_Б \sim 0.14$ мВ, экспериментальное значение $U_Б \sim 2$ мВ.

В заключение отметим, что некоторое расхождение между экспериментальными и теоретическими результатами может быть связано с тем, что принятые в данной модели условия не полностью соответствовали условиям эксперимента. В частности, нагрев образца производился не в одной точке, а по некоторой поверхности. Это могло привести к тому, что длина a_2 в действительности была меньшей.

Литература

[1] Тауц Я. Фото- и термоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1962. 256 с.
[2] Анатычук Л. И., Булат Л. П., Комолов Е. Н. — ФТП, 1982, т. 16, в. 9, с. 1711—1713.
[3] Басс Ф. Г., Бочков В. С., Гуревич Ю. Г. Электроны и фононы в ограниченных полупроводниках. М., 1984. 288 с.

Институт прикладных проблем
механики и математики АН УССР
Львов

Получено 17.11.1987
Принято к печати 25.03.1988

ФТП, том 22, вып. 9, 1988

СПЕКТРЫ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНТАКТА I—III—VI_2—ЭЛЕКТРОЛИТ

Константинова Н. Н., Прочухан В. Д., Рудь Ю. В., Таиров М. А.

В последние годы происходит расширение физических исследований фотоэлектрохимических ячеек на основе тройных полупроводников, что свидетельствует о возможностях их использования в качестве фотопреобразователей сол-

Физические свойства кристаллов I—III—VI_2
и электрохимических ячеек на их основе ($T=300$ К)

Кристалл	Структура	Тип проводимости	ρ, Ом·см	$1/\lvert R \rvert e$, см$^{-3}$	E_G, эВ	Область S_u^m, эВ	S_u^m, В/Вт	s, эВ$^{-1}$
$CuInTe_2$	Халькопирит	p	0.01	$2 \cdot 10^{19}$	0.96, 1.06	1.2	3÷5	30
$CuInSe_2$			1	$3 \cdot 10^{17}$	1.04	1.2	600	60
$CuInS_2$			15	$2 \cdot 10^{16}$	1.53	1.53	$5 \cdot 10^4$	65
$AgGaTe_2$			10^2	$6 \cdot 10^{15}$	1.32	1.6	200	20
$AgInS_2$	Ромбическая	n	5	$1 \cdot 10^{15}$	1.97	2.1	$1 \cdot 10^4$	30