

ЧИСЛО ЛОРЕНЦА И ФАКТОР ХОЛЛА В ВЫРОЖДЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ РbTe:Тl ПРИ РЕЗОНАНСНОМ РАССЕЙАНИИ: СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Для обычных механизмов рассеяния время релаксации носителей тока τ относительно слабо зависит от энергии ϵ . При этом в случае сильного вырождения электронов или дырок фактор Холла A_R близок к 1, а число Лоренца – к универсальной постоянной $L=L_0=\pi^2/3=3.289$ (в единицах $(k_B/e)^2$).

Иная ситуация имеет место, если время релаксации сильно изменяется с энергией, так что в пределах $k_B T$ относительное изменение τ не мало. В этом случае фактор A_R и L отличаются от приведенных выше констант даже в вырожденных образцах.

Таким механизмом рассеяния является резонансное рассеяние носителей тока, которое наблюдается в халькогенидах свинца, легированных таллием [1]. Тем не менее обработка экспериментальных данных по теплопроводности и эффекту Холла обычно производилось без учета указанного обстоятельства.

Цель настоящей работы – выяснить, как велик упомянутый эффект при различных параметрах, в частности, тех значениях, которые имеют место в РbTe:Тl, а также сравнение с экспериментальными данными.

Примесные состояния, вырожденные по энергии с зонным континуумом, не могут быть стационарными. Конечное время жизни дырки в локализованном на атоме Тl состоянии приводит к конечной ширине примесной полосы Γ .

Обмен электронами между зонными и примесными состояниями приводит к рассеянию импульса носителей тока с энергиями, близкими к энергии примесного состояния ϵ_i – резонансному рассеянию. Последнее может приводить к снижению подвижности, особенно сильному, когда уровень Ферми находится в пределах пика плотности состояний, создаваемого примесными центрами, а температурное размытие уровня Ферми не выходит за пределы этого пика. Резонансное рассеяние характеризуется резкой и немонотонной зависимостью времени релаксации от энергии носителей.

Рассматривался случай, когда одновременно имеют место резонансное рассеяние и обычное рассеяние на акустических фононах, описываемое временем релаксации τ_0 . Для вычисления числа Лоренца использовались выражения, полученные в работе [2], а для фактора Холла A_τ , обусловленного резонансным рассеянием, было получено выражение:

$$A_\tau = I_{0,2} / I_{0,1}^2, \quad (1)$$

где

$$I_{n,m} = \int_{-\mu^*}^{\infty} (-\partial f / \partial x) x^n \left[1 + A / \left(1 + \left(\frac{x}{\tilde{A}^*/2} + M \right)^2 \right) \right]^{-m} dx, \quad (2)$$

а n , m – целые числа. Константа A характеризует относительный вклад резонансного рассеяния при энергии $\epsilon = \epsilon_i$, Γ^* – ширина примесной полосы в единицах $k_B T$, параметр M – отступление химического потенциала от центра примесной полосы. Этот параметр связан с коэффициентом заполнения примесной полосы и может изменяться путем дополнительного легирования.

На рис. 1 изображены зависимости расчетных величин L от параметра M при значениях параметров A и $\Gamma^*/2$, соответствующих относительно большому и малому содержанию Тl и температурам около 100 и 300 К.

Вычисленные значения фактора Холла A_T , заметно превышают единицу, когда уровень Ферми расположен внутри примесной полосы (M в пределах от -1 до 2). В этой области величина A_T слабо зависит от M . Например, для температуры $T \sim 100$ К и концентрации таллия $N_{Tl} \sim 0.5$ ат.% A_T равен 1.7. Используя вычисленные значения фактора Холла, была произведена коррекция глубины залегания примесной полосы: 0.186 эВ вместо 0.16 эВ [3].

Рассеяние фононов при двойном легировании РbТе таллием и натрием изучалось ранее [4] с целью определения зарядового состояния атомов Тl, по которому можно судить о характере эффективного взаимодействия носителей заряда, находящихся на одном атоме Тl. Примененный метод был основан на представлении [5], что каждый заряженный примесный атом рассеивает фононы независимо от других примесей благодаря протяженной области поляризации, возникающей вокруг заряженного центра. Для разделения измеряемой теплопроводности на электронную и фононную составляющие требуется число Лоренца. В вырожденных образцах РbТе:(Тl,Na) число Лоренца в работе [4] принималось равным $\pi^2/3$. Был произведен перерасчет полученных в [4] величин, используя кривую 4 на рис.1. Были вычислены теоретические кривые зависимости фононного теплового сопротивления при дополнительном легировании натрием для различных предположений о характере взаимодействия носителей на примесном центре (притяжение, отталкивание, отсутствие взаимодействия). Во всех трех вариантах теоретические кривые находятся в явном противоречии с экспериментальными.

Л.В.Прокофьева и А.А.Шабалдин провели анализ температурной зависимости теплопроводности в кристаллах РbТе:Тl. Согласия теории с экспериментом удалось достичь только при условии, что рассеяние фононов на заряженных примесях отсутствует. Значения числа Лоренца при температурах около 100К составили $L=5$ и $L=6.7$ для двух образцов, что находится в согласии с результатами расчета для резонансного рассеяния, приведенными выше на рис. 1 для относительно малого заполнения примесной полосы Тl дырками ($M \approx - (0.5-1.0)$).

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.И.Кайданов, С.А.Немов, Ю.И.Равич. ФТП, **26**, 201 (1992).
2. С.А.Немов, Ю.И.Равич. УФН, **168**, 817 (1998).
3. Т.Р.Машкова, С.А.Немов. ФТП, **19**, 1864 (1985).
4. М.К.Житинская, С.А.Немов, Ю.И. Равич. ФТТ, **40**, 1206 (1998).
5. Ю.И.Равич, Б.А.Ефимова, И.А.Смирнов. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца РbТе, РbSe, РbS (М., Наука, 1968).

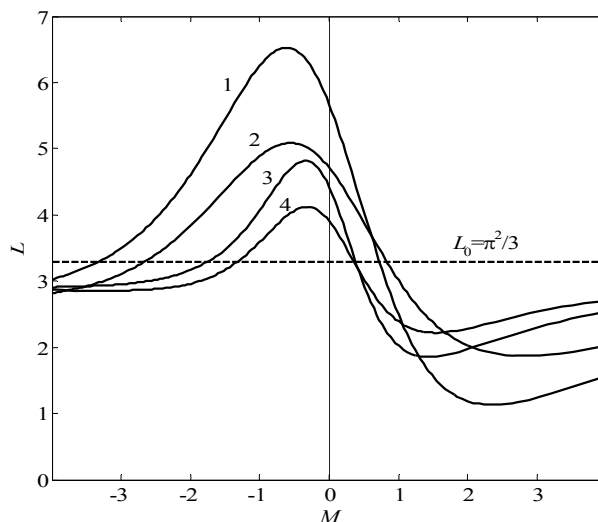


Рис. 1. Расчетные результаты для числа Лоренца как функции параметра заполнения примесной полосы M . Значения $\Gamma^*/2$ для кривых 1, 2 – 1, для 3, 4 – 2.5; параметр A для кривой 1 равен 22, 2 – 6, 3 – 10, 4 – 3