

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_3$

Степанов Н.П.¹, Лозовская А.С.²

¹ Забайкальский Государственный университет, Чита, Россия

² Забайкальский институт предпринимательства Сибирского университета потребительской кооперации, Чита, Россия

E-mail: np-stepanov@mail.ru

Знание температурной зависимости статических времен релаксации в полупроводниках открывает путь к интерпретации температурного поведения кинетических коэффициентов, таких, например, как электропроводность. Однако получение достоверной информации о величине времени релаксации свободных носителей заряда и его температурной зависимости является сложной задачей. Теоретический расчет времени релаксации и последующее сравнение его с результатами эксперимента осложнено тем, что эта величина формируется несколькими механизмами и, кроме рассеяния на колебаниях кристаллической решетки, сказывается влияние рассеяния на примесях и дефектах, интенсивность которых достоверно не известна. Экспериментальное определение времени релаксации также представляет определенные трудности. Это связано с тем, что экспериментально определяемые физические величины зависят от целого ряда параметров, которые сами являются функциями температуры. Например, коэффициент электропроводности зависит не только от времени релаксации, но и от эффективной массы свободных носителей заряда, закономерности температурного изменения которой, в большинстве случаев, неизвестна. Поэтому из данных об электропроводности сложно извлечь информацию о времени релаксации. Таким образом, большой массив экспериментальных данных о величине электропроводности полупроводникового материала, методика измерения которой при различных температурах отработана на достаточно высоком уровне, зачастую не используется в полной мере. В связи с этим актуальной является задача проведения такого рода исследований, из которых можно было бы получить достоверные данные о температурном поведении времени релаксации. Решения этой задачи можно добиться на основе использования данных об электропроводности материала, если при помощи дополнительного эксперимента получить информацию о величине отношения концентрации свободных носителей заряда n к их эффективной массе m^* , которое входит в выражение для электропроводности

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m^*}, \quad (1)$$

в котором e – заряд электрона, τ – время релаксации. В данной работе таким дополнительным экспериментом явилось исследование спектров плазменного отражения, которое позволяет установить величину отношения n/m^* при температуре фиксации спектра. Действительно, величина плазменной частоты – резонансной частоты колебаний свободных носителей заряда относительно ионного остова, описывается выражением

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi ne^2}{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}, \quad (2)$$

в котором ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, ϵ_∞ – поляризационный фон кристалла в высокочастотном диапазоне. Определив в ходе оптического эксперимента значения ω_p^2 и ϵ_∞ , имеем возможность рассчитать отношение n/m^* , подстановка которого в выражение (1) позволяет определить значение времени релаксации, при условии знания величины электропроводности при той же температуре, при которой фиксировался спектр плазменного отражения. Повторяя описанную процедуру для ряда температур, имеем возможность проследить за температурной зависимостью времени релаксации.

В данной работе описанный подход к определению статических времен релаксации и их температурной зависимости был применен для кристалла $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_3$. На рис.1 приведены спектры отражения кристалла $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_3$. Из рисунка видно, что по мере увеличения температуры плазменный минимум смещается в низкочастотную область спектра.

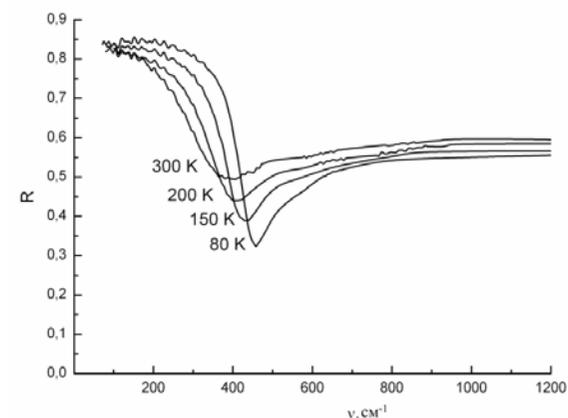


Рис.1. Спектры отражения образца $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_3$ при различных температурах, $E \perp C_3$.

Методика расчета плазменных частот и величины поляризационного фона кристалла подробно рассмотрены в работе [1]. Результаты расчета приведены в таблице. Как видно из таблицы, электропроводность кристалла $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_3$ в диапазоне температур от 85 до 300 К уменьшается в 7.39 раза, статическое время релаксации в 5.05 раза, а отношение n/m^* в 1.47 раза. Таким образом, необходимо констатировать то, что наблюдаемое уменьшение электропроводности только отчасти может быть объяснено уменьшением времени релаксации, и, следовательно, с ростом температуры изменяются параметры характеризующие состояние электронной системы материала, такие как концентрация свободных носителей заряда и их эффективная масса.

Таблица

Экспериментальные значения $\omega_{p\perp}$, $\epsilon_{\infty\perp}$, τ и результаты расчета n/m^* и τ для кристалла $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_3$.

T, K	$\omega_p \times 10^4, \text{c}^{-1}$	ϵ_{∞}	$\tau \times 10^{-12}, \text{OM}^{-1}\text{M}^{-1}$	$\frac{n}{m^*} \times 10^{22}$	$\tau \times 10^{-12}, \text{c}$
85	8.2	54	5.25	1.25	3.28
150	7.52	60	3.25	1.17	2.17
200	6.91	62	2.10	1.02	1.61
300	6.21	64	0.71	0.85	0.65

Причем, если считать, что в рамках параболического приближения эффективная масса остается практически неизменной, то увеличение соотношения n/m^* свидетельствует об уменьшении концентрации свободных носителей заряда с ростом температуры в 1.47 раза, что практически совпадает с величиной увеличения коэффициента Холла, наблюдающегося в исследуемых кристаллах в данном интервале температур. Причиной аномального поведения коэффициента Холла может являться сложный характер валентной зоны, содержащей как минимум два неэквивалентных экстремума - легких и тяжелых дырок [2]. В этом случае, увеличение температуры является причиной перераспределения носителей между указанными экстремумами, что и приводит к уменьшению концентрации легких дырок, формирующих доминирующий вклад в электропроводность, за счет увеличения концентрации тяжелых, малоподвижных дырок, так, что общее количество свободных носителей заряда практически не изменяется. То

обстоятельство, что наблюдаемое нами уменьшение соотношения n/m^* хорошо коррелирует с данными экспериментального исследования температурного поведения коэффициента Холла, позволяет повысить достоверность вывода о том, что в исследуемом диапазоне температур статическое время релаксации уменьшается в 5.05 раза.

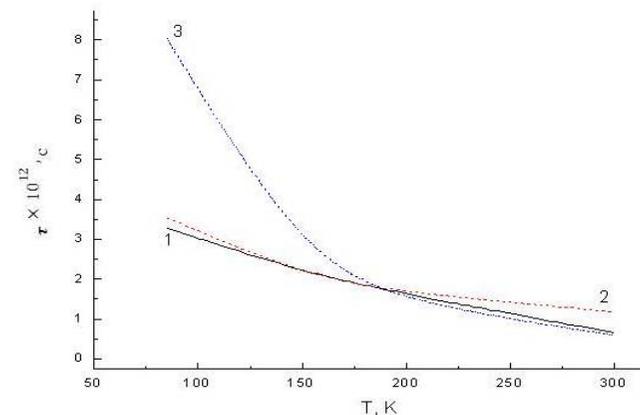


Рис.2. Температурная зависимость времени релаксации кристалла $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_3$ – 1, а также модельные кривые, характеризующие поведение $\tau(T)$ в вырожденном - 2 и невырожденном - 3 состояниях электронной системы.

Произведём оценку полученного результата с позиций теоретических представлений о механизмах рассеяния носителей заряда. Известно, что при температурах выше 100 К решеточное рассеяние доминирует над примесным. В соответствии с теорией акустического механизма рассеяния, для сильно вырожденных кристаллов время релаксации приблизительно пропорционально обратной температуре, а для невырожденных зависимость может быть близка к T^{-2} . На рис. 2 приведена температурная зависимость времени релаксации, построенная в соответствии с данными табл.1, а также модельные кривые, характеризующие поведение $\tau(T)$ в вырожденном и невырожденном состояниях электронной системы. Как видно из рис.2, в диапазоне температур от 85 до 150 К, наклон экспериментальной кривой $\tau(T)$ гораздо лучше соответствует T^{-1} , в то время как в области температур от 200 до 300 К T^{-2} . Это согласуется с представлением о том, что в исследуемом кристалле вырождение снимается при температуре 200 -250 К, так как

именно в этом диапазоне начинается отклонение температурной зависимости термоэдс от линейной [2], что также свидетельствует о переходе электронной системы в невырожденное состояние. Таким образом, есть основание считать, что полученные значения времени релаксации свободных носителей заряда исследованного кристалла в диапазоне температур от 85 до 300 К достоверны и реалистично отражают процессы, происходящие в его электронной системе. Это позволяет применить описанный подход к определению времени релаксации и к другим кристаллам $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$, обладающим повышенной термоэлектрической эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов, Н.П., Грабов В.М. Оптика и спектроскопия, 2002. т. 2. вып.5. с. 794-798.
2. Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . М., Наука, 1972, 320 с.