

**Отзыв рецензента о бакалаврской дипломной работе студента  
721 группы Х.Г.Назаряна «Проводимость и термоэлектрические  
коэффициенты допированного титаната стронция при высоких  
температурах»**

По прошлому опыту я знаю Хачатура Назаряна, как очень способного и чрезвычайно мотивированного студента. В своей дипломной работе он прекрасно разобрался в такой запутанной и многосоставной области, как свойства титаната стронция, сумел внести заметный вклад в эту область и довел свои теоретические исследования до вида, пригодного для непосредственного сравнения с экспериментальными данными. Такое сравнение ему удалось провести с использованием небольшого числа подгоночных параметров и оно продемонстрировало хорошую точность предложенной теории (отклонения от эксперимента  $< 10\%$ ). В качестве главного механизма рассеяния в работе рассматривалось двухфононное рассеяние, электроны в основной части работы считались невырожденными, а фононы – равновесными. Интеграл столкновений находился численно, с помощью итерационной процедуры.

Помимо проводимости, в работе были также найдены и проанализированы коэффициент Зеебека  $\mathcal{S}$  и коэффициент Нернста  $\nu$ . Было проведено сравнение всех полученных результатов с экспериментом.

**Замечания и предложения.**

- Аннотация до некоторой степени вводит читателя в заблуждение. В ней говорится, что “...Главным источником диссипации предполагается рассеяние электронов на мягких поперечных оптических фононах...” Анализ интеграла столкновений, однако, показывает, что характерные энергии фононов, участвующих в процессе рассеяния (так же как и характерные энергии невырожденных электронов, дающих вклад в проводимость), имеют порядок температуры  $T$ . Так как температура велика по сравнению с  $\omega_{TO}$ , дисперсия фононов в существенной области энергий имеет акустический, а не оптический характер, а соответствующие фононы отнюдь не являются мягкими.
- В работе рассматривались электроны с параболическим спектром, влияние фононов на этот спектр описывалось зависимостью эффективной массы от температуры:  $m_{\text{eff}}(T)$ . Однако хорошо известно, что поляронный эффект очень по-разному перенормирует спектр электронов в разных его частях, приводя к непараболичности. У меня, разумеется, нет никакой уверенности в том, что это существенно для результатов работы, но в рассматриваемом невырожденном случае, когда в проводимости участвуют электроны с заметно различающимися энергиями, описание перенормировки спектра с помощью  $m_{\text{eff}}(T)$  представляется неестественным.
- Введение зависящего от энергии времени релаксации, строго говоря, возможно только в том случае, когда процессы рассеяния имеют упру-

гий (как при рассеянии на статических дефектах) или хотя бы квазиупругий (как при рассеянии на действительно мягких фононах) характер. В рецензируемой работе ни одна из этих возможностей не реализуется, поэтому линеаризованный интеграл столкновений, вообще говоря, должен описываться линейным интегральным оператором с ядром, зависящим не от одного, а от двух электронных импульсов (начального и конечного). Это ядро есть вероятность  $W(\mathbf{p}, \mathbf{p}')$  перехода электрона из состояния  $\mathbf{p}$  в состояние  $\mathbf{p}'$ , усредненная по фононам.

Однако, несмотря на заявления об использовании “зависящего от энергии времени релаксации  $\tau_{TO}(p)$ ”, при вычислении проводимости приближение времени релаксации реально не использовалось, а просто численно (с помощью итераций) решалось линеаризованное кинетическое уравнение Больцмана. Время релаксации  $\tau(p)$  вводилось феноменологически, как  $\tau(p) \equiv \delta n_{\mathbf{p}}/I(\mathbf{p})$  и, строго говоря, оказывалось функционалом  $\delta n_{\mathbf{p}}$ . Согласно стандартному определению, время релаксации (в тех случаях, когда оно имеет смысл) является характеристикой интеграла столкновений и не зависит от структуры полевого члена в кинетическом уравнении, Здесь же  $\tau(p) \equiv \tau(p)_{\text{field}}$  находилось для вполне конкретной задачи с конкретным полевым членом, обусловленным действием электрического поля (но не градиента температуры). Полевой член, вызванный градиентом температуры, имеет другую энергетическую зависимость из-за дополнительного множителя  $\xi_p$ , поэтому отклик на него должен описываться другим феноменологическим  $\tau(p) = \tau(p)_{\text{temp}}$ . Конечно, я не могу знать, насколько это обстоятельство численно важно, но с теоретической точки зрения формулы, выведенные в работе для термоэлектрических эффектов в предположении  $\tau(p)_{\text{field}} = \tau(p)_{\text{temp}}$ , кажутся сомнительными.

- В любом случае (даже если ограничиться только случаем электрического поля), тот факт, что в дипломной работе многократно и настойчиво говорится об использовании  $\tau$ -приближения, вводит читателя (и самого автора в первую очередь) в заблуждение. От этой неудачной терминологии следует отказаться при написании будущей статьи.
- Тот факт, что все характерные энергии в задаче имеют один и тот же порядок величины  $T$ , мне кажется, открывает некоторые возможности для исследования соответствующего линеаризованного кинетического уравнения аналитическими методами. Можно предположить, что переход к безразмерным переменным  $E_p/T$ ,  $\omega_k/T$  сведет задачу к некоторому универсальному интегральному уравнению, решив которое численно, можно будет получить корректное решение задачи.

В целом нужно сказать, что Хачатуром Назаряном была выполнена большая комплексная работа, причем она была доведена до чисел и графиков, что далеко не всегда встречается в дипломных работах теоретиков. В процессе обсуждения работы и моих замечаний к ней, Хачатур продемон-

стрировал совершенно адекватное понимание физики исследуемых процессов и способность быстро осознавать и исправлять ошибки.

Я оцениваю его бакалаврскую работу оценкой отлично (10) и рекомендую его поступление в магистратуру кафедры Проблем Теоретической Физики.

д.ф.-м.н., вед.н.с. ИТФ им. Ландау,

А.С.Иоселевич

Москва, 21.06.2021