

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 539.2; 548.4

ЗАКАРЯН ТИГРАН ВАНИКОВИЧ

ВЛИЯНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ДИНАМИКУ ДИСЛОКАЦИЙ В МЕТАЛЛАХ

01.04.07 - "Физика твердого тела"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ЕРЕВАН-1994

Работа выполнена в отделе физики твердого тела Института
Радиофизики и Электроники НАН Республики Армения

Научный руководитель: доктор физико-математи-
ческих наук Варданян
Роберт Агасиевич

Официальные оппоненты: чл. корр. АН РА, доктор
физ.-мат. наук, проф.
Арутюнян Владимир
Михайлович

доктор физ.-мат. наук,
Кочарян Карен Норай-
рович

Ведущая организация: Ереванский Физический
Институт

Защита состоится "23" сентября 1994г. в 15 часов на
заседании Специализированного совета К 055.01.11 по
присуждению ученой степени кандидата физ.-мат. наук в
Ереванском Государственном Университете по адресу: 375090,
г.Ереван, ул.Шопрона 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского
Государственного Университета.

Автореферат разослан "9" июля 1994г.

Ученый секретарь Специализированного
совета, доктор физ.-мат. наук

Г.Г.Адонц

Г.Г.Адонц

Актуальность темы

Бурный прогресс в области технологии обработки материалов явился толчком к развитию физики пластичности и прочности.

Хорошо известно, что пластичность материалов определяется движением элементарных "носителей" пластической деформации — дислокаций. Поэтому, не случайно, что объяснение многих физических эффектов, связанных с пластичностью, таких как фотопластический эффект, эффект сверхпроводящего разупрочнения и др., было дано на основе дислокационных моделей.

Движущиеся дислокации, будучи по своей природе решеточными образованиями, активно взаимодействуют с другими элементарными возбуждениями кристалла: электронами проводимости, фононами, магнами и др., что и является источником потерь их кинетической энергии. Указанные вопросы обсуждались в работах многих авторов. Однако, при их рассмотрении упускалась из вида существенная специфика вопроса, связанная с вихревой природой винтовых дислокаций. Следует отметить, что она не учтена также и в работах, где предполагается наличие магнитного поля.

В кристаллах с высокими барьерами Пайерлса движение дислокаций осуществляется посредством перегибов на дислокационных линиях (кинков), причем, кинки могут стопориться на примесях и проводить на них значительную часть времени. Ясно, что при определении вероятности открепления кинка тип примеси должен играть не последнюю роль. Однако, в существующих на сегодняшний день теоретических работах не исследованы вопросы, связанные с подвижностью кинков в кристаллах с различными типами легирующих примесей.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является исследование влияния диссипативных процессов на динамику дислокаций и кинков. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Расчет скоростной зависимости силы электронного торможения винтовой дислокации с целью уточнения эффективности взаимодействия электронов с коротковолновыми дислокационными фононами.

2. Определение скоростных и полевых зависимостей силы торможения винтовой дислокации во внешнем магнитном поле.

3. Расчет вероятности открепления кинка от точечного препятствия при различных величинах коэффициента вязкости среды для определения конкретного механизма открепления.

Научная новизна и практическая ценность

В диссертационной работе впервые:

1. Учтена экранировка взаимодействия "резонансных" электронов с упругой волной в задаче об электронном торможении винтовой дислокации.

2. Получена нелинейная скоростная зависимость электронной компоненты силы торможения винтовой дислокации.

3. Примесь в задаче об откреплении дислокационного кинка рассматривается как частица, обладающая конечной массой, что позволяет учесть влияние различных легирующих примесей.

4. Рассматривается роль коэффициента вязкости среды при преодолении кинком точечного центра.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Аналитическое выражение для скоростной зависимости силы электронного торможения винтовой дислокации при наличии в спектре поперечных упругих волн компонент, эффективность взаимодействия которых с электронной подсистемой мала.

2. Асимптотические выражения для силы торможения дислокации во внешнем магнитном поле.

3. Аналитическое выражение для вероятности флуктуационного преодоления кинком точечного центра; учет стохастичности точечного центра в задаче о флуктуационном откреплении от него кинка; учет массы центра в выражении для вероятности преодоления.

4. Аналитическое выражение для вероятности открепления кинка от примеси в среде с конечной величиной коэффициента вязкости.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 29-ом Советании по физике низких температур (г.Казань, 1992г.), на 3-ей Европейской Конференции по материалам и

процессам (г.Страсбург, Франция, 1992г.), на семинарах отдела физики твердого тела ИРФЭ АН РА.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из Введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 74 страниц машинописного текста и 5 рисунков. Список литературы содержит 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность поставленной проблемы, сформулированы цели и основные задачи диссертации, характеризуется состояние проблемы, приводится краткий обзор литературы по рассматриваемым вопросам.

В первой главе получена скоростная зависимость силы электронного торможения винтовой дислокации в металле.

В первом параграфе за основу анализа за основу взята простейшая модель изотропного электронного газа, характеризующаяся параболическим законом дисперсии, а поле смещений движущейся дислокации представляется в виде пакета плоских упругих волн, для которых справедливо линейное соотношение дисперсии $\omega = (k \cdot v)$, где ω и k – частота и волновой вектор данной фурье-компоненты, v – скорость движения дислокации.

Во втором параграфе раскрывается специфика настоящей задачи, заключающаяся в том, что упругое поле чисто винтовой дислокации сформировано исключительно из поперечных волн, которые, в свою очередь, в металле возбуждают электромагнитные волны длиной порядка скин-глубины проникновения δ . До тех пор, пока длина возбужденной электромагнитной волны меньше длины порождающей ее упругой волны, коэффициент поглощения энергии этой упругой волны пропорционален ее частоте: $\Gamma \sim \omega$.

В третьем параграфе показано, что так обстоит дело не для всех компонент спектра дислокационных волн. При выполнении соотношения $k\delta \gg 1$, что имеет место для коротковолновых мод,

энергообмен между упругими волнами и электронами ухудшается, что отражается на характере зависимости $\Gamma(\omega) \sim \omega^{-3}$. Показано, что количество этих мод уменьшается с увеличением скорости дислокации. Проведен аналитический расчет силы торможения с учетом того, что, с одной стороны, основной вклад в мощность потерь вносится волнами, чья длина порядка величины вектора Бюргерса b , а с другой – удельный вклад этих волн мал.

Получено аналитическое выражение для силы торможения винтовой дислокации

$$f = \frac{R}{6\pi^2} \cdot \frac{n p_F b^2 \omega_p}{c v_F^{1/2}} \cdot V^{3/2},$$

где R – константа порядка единицы, n – плотность электронного газа, ω_p – плазменная частота Лэнгмюра, c – скорость света, v_F – скорость Ферми.

Во второй главе рассмотрена задача о торможении винтовой дислокации в металле во внешнем неквантующем магнитном поле.

В первом параграфе приведены физические соображения, согласно которым помещение металла во внешнее магнитное поле приводит к изменению его механических свойств.

Во втором параграфе получено обобщенное выражение для коэффициента затухания упругой волны в случае комплексной проводимости.

В третьем параграфе анализируются оба случая параллельной и перпендикулярной ориентации вектора напряженности магнитного поля H и оси дислокации в слабых магнитных полях. Показано, что во всех случаях зависимость поглощенной энергии упругих волн от напряженности магнитного поля носит убывающий характер, что формально обусловлено наличием проводимости в знаменателе выражения для коэффициента затухания упругой волны. Физическая же причина такого убывающего характера заключается в том, что если в отсутствие магнитного поля траектория электрона представляет собой прямую линию, то при его наличии она переходит в трохоиду, что эффективно увеличивает длину пробега l . В предельном случае $\omega_c \tau \ll 1$ (ω_c – циклотронная частота, τ – время релаксации) для относительной мощности потерь получается множитель Динглия

$$\frac{W^{H=0} - W}{W^{H=0}} = \exp(-2\pi/\omega_c \tau)$$

где $W^{H=0}$ — мощность потерь в отсутствие поля, W — абсолютная мощность потерь.

В четвертом параграфе рассматриваются предельные случаи сильных магнитных полей $\omega\tau \ll 1 \ll \omega_c \tau$ и $1 \ll \omega\tau \ll \omega_c \tau$, и как показывает рассмотрение, в случае параллельной ориентации вектора напряженности магнитного поля и оси дислокации, для мощности потерь можно получить следующие выражения:

$$W/W^{H=0} = (\pi/\omega_c \tau)^{1/2} \sim H^{-1/2}$$

$$W/W_0 = \pi^2/3\omega_c \tau (4c^2 v_F q_m^3 / (3\omega_p^2 \omega_c))^{1/3} \sim H^{-2/3}$$

При перпендикулярной ориентации вектора напряженности магнитного поля и оси дислокации, для мощности потерь получено следующее выражение

$$W = W^{H=0} + W^{H \perp q}$$

где $W^{H \perp q}$ — соответствующее асимптотическое выражение для параллельной ориентации магнитного поля и оси дислокации.

В третьей главе рассмотрена задача об откреплении дислокационного перегиба (кинка) от флуктуирующего точечного препятствия в вязком газе квазичастичных возбуждений кристалла.

В первом параграфе предполагается, что кинк находится в параболическом потенциале точечного центра, совершающего, в свою очередь, флуктуационные колебания. Решается совместно два уравнения движения (для кинка и точечного центра) со случайными некоррелированными стационарными правыми частями.

Во втором параграфе получены корреляционные функции для квадратов смещений кинка, точечного центра, а также произведения смещений кинка и центра. Отмечено, что коэффициент трения γ присутствует не только в диссипативном члене, но и в соответствии с флуктуационно-диссипационной теоремой — в случайной силе.

В третьем параграфе показано, что в случае малого трения и бесконечно тяжелого стопора вероятность открепления имеет следующий вид:

$$W = \frac{\tilde{\omega}}{2\pi} \cdot \begin{cases} \exp(-V^*/T) & T \gg \hbar\tilde{\omega} \\ \exp(-2V^*/\hbar\tilde{\omega}) & T \ll \hbar\tilde{\omega}, \end{cases}$$

где V^* — эффективная энергия активации процесса, $\tilde{\omega}$ — характерная частота колебаний кинка в поле примеси. Получено также аналогичное выражение для случая тяжелого кинка и легкой примеси

$$W = \frac{\omega_0}{2\pi} \cdot \begin{cases} \exp\left[-\frac{V^* \cdot (\kappa/2\xi)}{T}\right] & T \gg \hbar\omega_0 \\ \exp\left[-\frac{2V^* \cdot (\kappa/2\xi)}{\hbar\omega_0}\right] & T \ll \hbar\omega_0. \end{cases}$$

где ω_0 — характерная частота колебаний примеси в поле кристаллической решетки, κ — жесткость связи центр+решетка, ξ — жесткость системы кинк+центр.

Показано, что при выполнении естественного для кристалла условия $\kappa/2\xi > 1$ и при $T \gg \max\{\tilde{\omega}; \omega_0\}$, в динамике процесса открепления существенны тепловые колебания кинка, а не стопора. Требование $T \ll \min\{\tilde{\omega}; \omega_0\}$ при выполнении условия $\varepsilon(\tilde{\omega}/\omega_0) < 1$ приводит к тому, что начинают превалировать квантовые флуктуации перегиба ($\varepsilon = m/\mu$, где m и μ — массы кинка и примеси соответственно). Рассмотрены также случаи, когда динамика системы определяется стопорным механизмом открепления. Последнее выполняется, когда, во-первых, реализуется неравенство $\varepsilon(\tilde{\omega}/\omega_0) > 1$, и, во-вторых, — когда $(\hbar\omega_0/2T) > (\kappa/2\xi)$.

В четвертом параграфе получено выражение для вероятности открепления в случае конечной вязкости среды

$$W \sim \exp\left[-\frac{\pi V^*}{\hbar\tilde{\omega}(\pi - 2\gamma/m\tilde{\omega})}\right],$$

которые показывают, что вероятность открепления растет с увеличением массы примеси.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

I. Учтена экранировка взаимодействия "резонансных" электронов с упругой волной в задаче об электронном торможении

винтовой дислокации.

2. Получено аналитическое выражение зависимости силы торможения винтовой дислокации от скорости ее движения, которая является степенной функцией с показателем $3/2$ во всем диапазоне скоростей движения дислокации.

3. Наглядно показано, что с увеличением скорости движения степень экранировки уменьшается.

4. Получены асимптотические выражения для силы торможения винтовой дислокации в металле во внешнем магнитном поле.

5. Получено аналитическое выражение для вероятности открепления кинка от примеси в пределе малой обобщенной вязкости среды.

6. Показано, что в пределе малой вязкости более "легкие" кинки быстрее открепляются от примеси.

7. Получено выражение для вероятности открепления в случае конечной величины коэффициента трения.

8. Масса примеси включена в число основных параметров задачи об откреплении кинка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. R.A.Vardanian and T.V.Zakarian. On Electronic Damping of Screw Dislocations. - Phys. Lett. A, 1991, v.160, no.5, pp.465-467.

2. R.A.Vardanian and T.V.Zakarian. Influence of Impurities on Kink Dynamics in Crystals with High Peierls Barriers. - Solid State Commun., 1993, v.86, no.7, pp.455-458.

3. Р.А.Варданян, Т.В.Закарян. Влияние магнитного поля на электронное торможение винтовых дислокаций в металле. - Препринт ИРФЭ-94-1, Аштарак, 1994, 17с. (послано в журнал Solid State Communications)

4. Р.А.Варданян, Т.В.Закарян. Об электронном торможении винтовых дислокаций. - Тезисы докладов 29-го Совещания по физике низких температур, Казань 1992, том II, стр.335.

5. R.A.Vardanian and T.V.Zakarian. Dislocation Mobility in Crystals with High Peierls Barriers. - The 3rd European Conference on Materials and Processes, Strasbourg (France) 1992, p.B-IV.3.

ՏԻԳՐԱՆ ՎԱՆԻԿԻ ԶԱԶԱՐՅԱՆ

ԴԻՍԻՊԼԻՆԱՅԻ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ՄԵՏԱՂՆԵՐՈՒՄ ԴԻՍԼՈԿԱՑԻԱՆԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱՑԻ ՎՐԱ

Ա Մ Փ Ո Փ Ա Գ Ի Ր

Սույն աշխատանքը պարունակում է մի շարք խնդիրների լուծումը, ինչպիսիք են՝ մետաղում պտուտակային դիսլոկացիայի էլեկտրոնային արգելակման ուժի կախումը արագությունից, արգելակումը արտաքին մագնիսական դաշտի առկայության պայմաններում, դիսլոկացիոն ծովածքի ազատումը կետային արգելակից: Դիտարկված են ակտուալ եզրային դեպքեր, ստացված են անալիտիկ արտահայտություններ: Բերված է արդյունքների որակական մեկնաբանություն և կատարված են կարգային գնահատումներ:

Заказ 257

Тираж 100

Отпечатано в типографии Государственного Инженерного
Университета Армении. 375009, Ереван, ул. Теряна 105