

ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

ТОМ
12

3 · 1986

- ра для прецизионных измерений параметров электронных спектров / А. Г. Бударин, В. А. Вентцель, О. А. Воронов, А. В. Руднев // Тепловая техника.— 1982.— № 4.— С. 66—68.
- ные измерения эффективных масс в кадмии методом эффекта де Га-тап Альфена / А. Г. Бударин, В. А. Вентцель, О. А. Воронов и др. // —1983.—84, вып. 4.— С. 1511—1516.
- высокого давления до 18 кбар для работы при гелиевых температурах / Иксевич, А. И. Вороновский, А. Ф. Гаврилов, В. А. Сухонаров // ПТЭ.— № 6.— С. 161—164.
- давления на поверхность Ферми кадмия / В. А. Вентцель, О. А. Воро- II. Лихтер, А. В. Руднев // ЖЭТФ.— 1976.— 70, вып. 1.— С. 1706—
- ть Ферми кадмия при электронно-топологическом фазовом переходе пленкам / С. Л. Будько, А. И. Вороновский, А. Г. Гапотченко, Е. С. Икке- ЖЭТФ.— 1984.— 86, вып. 2.— С. 778—783.
- ных В. П., Марьяхин А. А., Мельник В. Л. Изучение поверхности кадмия // ЖЭТФ.— 1967.— 52, вып. 3.— С. 617—628.
- Ш. А. Electron structure of polyvalent metals // Phys. Rev.— 1960.— 5.— Р. 1190—1206.
- Asbel' — Kaner cyclotron resonance in zinc // J. Phys. F.— 3, N 5.— Р. 988—1002.
- Cyclotron resonance on improved specimens of zinc // Phys. Rev. B.— 1, N 4.— Р. 1479—1486.

на высоких давлениях

Получено 30.07.85

Московской обл.

Е. ДЕМЬЯНОВ, В. Р. СОБОЛЬ, А. А. ДРОЗД, В. И. МАТВЕЕВ

ДИСЛОКАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ЗАРЯДА В МЕДИ

В работе описаны гальваномагнитные измерения на пластически деформированных медных образцах. Обнаружено эффективное малоугловое рассеяние электронов на дислокациях. Точечные и размерные дефекты, генерируемые в образцах в процессе низкотемпературной пластической деформации, изменяют характер зависимости магнитосопротивления как для открытых, так и для замкнутых траекторий. При сравнительно больших плотностях деформационного рассеяния электронов становится преимущественно изотропным.

Влияние протяженных дефектов кристаллической структуры на электрические коэффициенты меди изучается в настоящее время весьма активно. Принято считать, что основной вклад в добавочное дислокационное электросопротивление при $T = 4,2$ К вносит высокоугловое рассеяние электронов на дислокациях протяженных дефектов [1]. Однако, как показано в [2,3], температурная зависимость теплопроводности при малых деформациях при $T \leq 4,2$ К не линейна, причем теплопроводность изменяется с деформацией не монотонно. Кроме того, оценка плотности дислокаций по приросту теплосопротивления дает значение на несколько процентов выше по сравнению с другими более прямыми методами. Данные о зависимости теплопроводности от деформации связываются с рассеянием электронов на квазилокальных дефектах в виде упругих полей напряжений и с так называемым дислокационным электросопротивлением. В работе [4], в которой изучалась температурная зависимость добавочного дислокационного электросопротивления, показано, что температурная зависимость в области температур $T = 30 - 90$ К имеет вид ступенчатой зависимости от степеней деформации.

Известно, в сильном магнитном поле при наличии определенных дефектов у поверхности Ферми (ПФ), приводящих к быстрому изменению распределения электронов в импульсном пространстве, вероятность малоугловых столкновений может существенно возрастать. В связи с этим зависимость магнитосопротивления от температуры

и других характеризующих рассеяние параметров, а также от ориентации и величины магнитного поля, когда осуществляется выход на асимптотическую зависимость, определяется особенностями механизмов рассеяния [6]. В работе [7] исследовано влияние продольного магнитного поля на зависящую от температуры часть сопротивления медных вискерсов. Установлено, что воздействие деформации, как и магнитного поля, увеличивает область квадратичной температурной зависимости сопротивления от 1,5 до 2,3 К. Данные явления связываются с резкой анизотропией времени релаксации электронов на ПФ, т. е. воздействие дислокаций и магнитного поля имеют одну природу [8].

В настоящем сообщении представлены результаты исследования влияния низкотемпературной пластической деформации монокристаллов меди на их электроперенос в поперечном магнитном поле. Используемые в эксперименте семейства образцов Cu-1 и Cu-2 подвергали многократной сту-

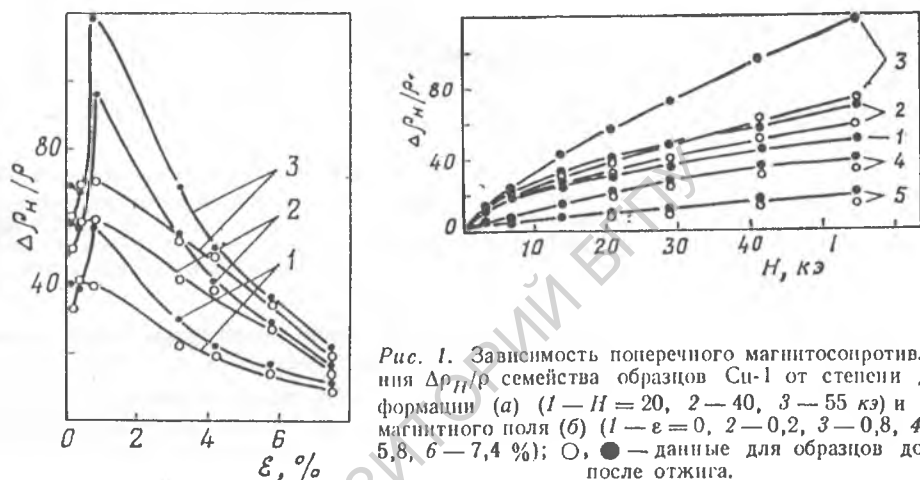


Рис. 1. Зависимость поперечного магнитосопротивления $\Delta\rho_H/\rho$ семейства образцов Cu-1 от степени деформации (а) (1 — $H=20$, 2 — 40, 3 — 55 кэ) и от магнитного поля (б) (1 — $\varepsilon=0$, 2 — 0,2, 3 — 0,8, 4 — 5,8, 6 — 7,4 %); \circ , \bullet — данные для образцов до и после отжига.

пенчатой деформации при температуре жидкого гелия. После каждого нагружения образцы выдерживали при $T=100^\circ\text{C}$ в течение одного часа с последующим медленным охлаждением [4]. Ось образцов Cu-1 совпадала с осью симметрии третьего порядка, а для семейства Cu-2 — с осью четвертого порядка. Ориентация вектора напряженности магнитного поля H для Cu-1 приводила к существованию только замкнутых орбит, а для Cu-2 имелся слой открытых траекторий. Сопротивление регистрировали при $T=4,2$ К в магнитном поле гелиевого криостата УИС-1 немедленно после холодной деформации и после отжига вакансий.

На рис. 1 представлены деформационная и полевая зависимости магнитосопротивления $\Delta\rho_H/\rho$ образцов Cu-1, где $\Delta\rho_H/\rho = (\rho_H - \rho)/\rho$, ρ_H и ρ — сопротивление в магнитном поле H и в его отсутствие. Как видно из рис. 1, а, даже для неотожженного состояния магнитосопротивление немонотонно зависит от деформации, при деформации $\sim 0,8\%$ имеется экстремум, величина которого резко возрастает с отжигом вакансий. Полевая зависимость $\Delta\rho_H/\rho$ характерна тем, что если для исходного состояния ее вид близок к насыщению, то при малых деформациях ($\varepsilon \sim 0,8\%$) зависимость магнитосопротивления от магнитного поля более сильная как в отожженном состоянии, так и без отжига. При сравнительно больших деформациях ($\varepsilon \sim 7\%$), магнитосопротивление возрастает с увеличением поля гораздо слабее, а величина магнитосопротивления до и после отжига различается незначительно. Как показано в [6], эффективные времена релаксации, определяющие электропроводность в области сильных магнитных полей $\tau_{\text{эф}}^\infty$ и в нулевом магнитном поле $\tau_{\text{эф}}^0$, могут существенно отличаться друг от друга и в связи с этим области сильных и слабых магнитных полей

в области промежуточных магнитных полей (ОПМП). Это связано в частности, с тем, что в отсутствие поля проводимость в значительной степени определяется временем диффузии через ПФ, а в сильных полях в определенных условиях существенным оказывается время переброса. ОПМП имеет место при $T > T_n$, где T_n — некоторая характерная температура, определяемая из соотношения $T_n/T_0 < 10^{-1}$; $T_0 = \Delta\rho S$ — минимальное расстояние между поверхностями Ферми в схеме расщепленных зон, S — скорость звука). Для данной ориентации, когда имеют место замкнутые орбиты, T_0 соответствует 60 К. Таким образом, температура $T = 4,2$ К вполне соответствует ОПМП, в которой процессы перемещения могут приводить к эффективным открытым траекториям, а проводимость может зависеть от магнитного поля не только как H^{-2} , но и как H^{-1} . При этом соответствующая компонента тензора сопротивления

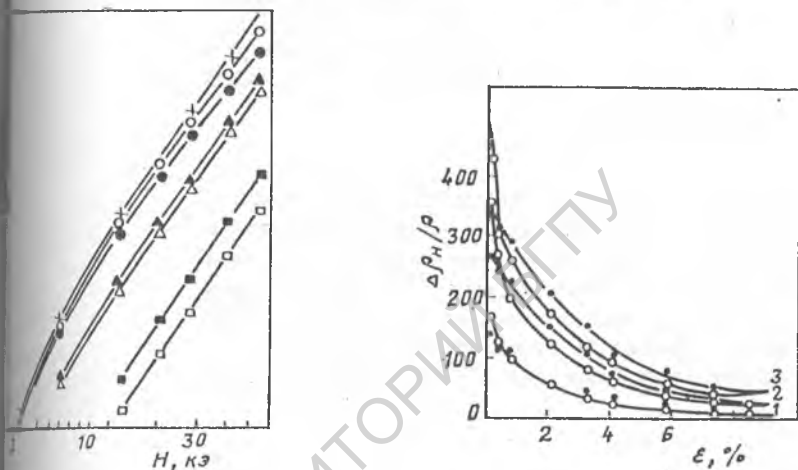


Рис. 2. Зависимость магнитосопротивления семейства образцов Си-2:

от магнитного поля при различной плотности деформационных дефектов: \times — $\epsilon=0$, Δ — 0,2, \blacktriangle — 0,8, \square , \blacksquare — 2 %; \circ — от степени деформации при различных полях H , кэ: 20 (1); 40 (2); 55 (3) (светлые и темные значки — данные для образцов до и после отжига соответственно).

увеличиваться с увеличением магнитного поля. Наблюдаемые экспериментально зависимости $\rho_H \sim H^n$ с $n < 1$, по-видимому, обусловлены тем, что в интеграле столкновений имеется также вклад, обусловленный искажением структуры, рассеивающими изотропно, которые, в частности, имеют возможность экспериментально наблюдать найерлсовское зависимость сопротивления.

Полевая и деформационная зависимости магнитосопротивления образцов Си-2 представлены на рис. 2. Характерно, что для исходного состояния ($\epsilon=0$) показатель степени в полевой зависимости $\Delta\rho_H/\rho$ остается постоянным во всей области магнитных полей, а для слабдеформированного состояния в сильных полях он уменьшается. С отжигом вакансий эта зависимость усиливается. При более высоких степенях деформации ($\epsilon=2\%$) показатель степени опять возрастает до уровня исходного для широкого диапазона значений H .

Деформационная зависимость магнитосопротивления $\Delta\rho_H/\rho$ обнаруживает уменьшение $\Delta\rho_H/\rho$ с повышением концентрации дефектов структуры (рис. 2, б). При больших деформациях магнитосопротивление в отожженном состоянии выше, чем до отжига, что коррелирует с правилом Колларда, так как сопротивление в отожженном состоянии меньше, а при малых деформациях имеет место обратное соотношение. Характерная зависи-

мость сопротивления от деформации представлена на рис. 3. Нелинейный характер зависимости $\rho(\epsilon)$ свидетельствует о нелинейном приросте деформационных дефектов.

В работе [9] показано, что в присутствии открытости ОПМП возникает с приближением вектора магнитного поля H к границе двумерно открытой области на стереографической проекции при условии

$$\tau_F \beta^2 < \omega_c^{-1} < \tau_F, \quad (1)$$

и имеет место в угловом интервале $|\varphi| < (\omega_c \tau_F)^{-0.5}$, $\beta = T/\Theta$ (Θ — температура Дебая, ω_c — циклотронная частота, φ — угол, отсчитываемый от границы двумерно открытой области). Для меди с остаточным сопротивлением $\sim 2 \cdot 10^{-10}$ ом·см и величиной $\beta \simeq 0,01$ при $T = 4,2$ К, в магнитном поле $H \simeq 50$ кэ соотношение (1) действительно имеет место, при этом $\varphi \simeq 5^\circ$ и почти перекрывает двумерную область открытостей. Следуя [9], можно считать, что проводимость как функция магнитного поля пропорциональна $(\omega_c^2 \tau_F)^{-0.5}$, соответственно

этому сопротивление должно возрастать с увеличением магнитного поля с показателем степени, равным 1,5.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что малые деформации весьма слабо влияют на сечение рассеяния электронов проводимости при электропереносе в нулевом магнитном поле, что согласуется с положением о том, что основной вклад в электросопротивление дает рассеяние электронов на большие углы. Магнитосопротивление же очень чувствительно к малым плотностям деформационных дефектов, при этом аномалии в поведении магнитосопротивления имеют место и в присутствии вакансий. Данное обстоятельство

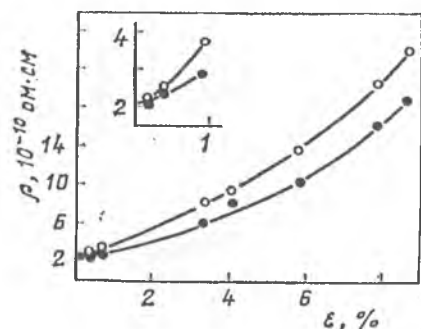


Рис. 3. Типичная зависимость сопротивления ρ от степени деформации ϵ после холодной деформации (○) и после отжига при 100°C (●). На вставке — область малых деформаций.

свидетельствует о частично малоугловом характере рассеяния электронов на точечных дефектах. После отжига вакансий изменения в поведении магнитосопротивления особенно велики, т. е. малоугловой характер рассеяния на квазилокальных фоновых модах, на полях напряжений, несущественный в нулевом магнитном поле, более ярко выражен в силу эффективной экранировки ядер протяженных дефектов.

При больших деформациях, когда плотность введенных дефектов велика, электронное рассеяние преимущественно изотропно, при этом роль полей напряжений уменьшается как вследствие уменьшения расстояния между дислокациями, так и в связи с тем, что дислокационная структура имеет более резко выраженный петлевой характер — дислокации замыкаются внутри образца, не выходя на поверхность. При этом поля упругих напряжений уменьшаются с расстоянием по кубическому закону [10], и главную роль играют близкодействующие потенциалы ядер протяженных дефектов. При малых деформациях повышение анизотропии вызвано как захватом в ходе низкотемпературной деформации дислокациями примесных атомов, рассеивающих в первом приближении изотропно [11], так и вкладом в интеграл столкновений малоуглового рассеяния на вводимых протяженных дефектах [12], упругие поля напряжений которых более дальнедействующие, чем в замкнутых дислокационных петлях.

Авторы выражают благодарность А. И. Копелювичу за обсуждение результатов работы и полезные замечания.

E. DEM'YANOV, V. R. SOBOL', A. A. DROZD, and V. N. MATVEEV
MAGNETIC SCATTERING AND CHARGE TRANSPORT IN COPPER

Galvanomagnetic measurements are made on plastically deformed single crystal samples and the effective small-angle scattering of conduction electrons is observed and size defects generated at small degrees of low-temperature plastic deformation and the magneto-resistance field dependence both for the open and closed paths. At comparatively high densities of deformation defects the electron scattering becomes mainly isotropic.

LIST OF SYMBOLS. Θ , Debye temperature; ρ , electric resistance; ρ_H , electric resistance in the magnetic field; $\Delta\rho_H/\rho$ magneto-resistance; ω_c , Larmore frequency; ν , deformation degree; $\tau_{\text{эф}}$, effective relaxation time in zero magnetic field; τ_F , diffusion relaxation time; τ_H , effective Umklapp process relaxation time; $\tau_{\text{эф}}^{\infty}$, effective relaxation time in magnetic field.

FIGURE CAPTIONS. Fig. 1. Dependence of transverse magneto-resistance for specimens Cu-1 on deformation (a) (1 — $H = 20 \text{ kOe}$, 2 — 40 kOe ; 3 — 60 kOe) and magnetic field (b) (1 — $\nu = 0$; 2 — 0.2% ; 3 — 0.8% ; 4 — 5.8% ; 5 — 10%) (O and ● — before and after annealing, respectively).

Fig. 2. Dependence of magneto-resistance for specimens Cu-2 on: the magnetic field (a) at various densities of deformation defects (a) at different values of ν , %: 0 (O); 0.8 (Δ, ▲); 2 (O, ■); O, Δ, □ and ●, Δ, □ — before and after annealing, respectively; the degree of deformation at various H , kOe: 20 (1); 40 (2); 55 (3).

Fig. 3. Typical dependence of resistivity ρ on the degree of deformation ν after annealing (O) and after annealing at 100°C (●). The inset shows the small deformation

Dem'yanov R. A. The interaction of conduction electrons with dislocations and grain boundaries // Can. J. Phys.— 1982.— 19, N 5.— P. 766—778.

Dem'yanov R. A. O., Межов-Деглин Л. П., Касумов А. Ю. Непригодность закона Винни-Франца для описания соотношений между тепло- и электропроводностью механически деформированных кристаллов // ФТТ.— 1981.— 23, вып. 1.— С. 313—318.

Dem'yanov R. A. O., Межов-Деглин Л. П. Влияние пластической деформации на теплопроводность образцов из чистых меди и серебра // ФТТ.— 1982.— 24, вып. 1.— С. 207—210.

Dem'yanov R. A. O., Кулеско Г. И. Температурная зависимость сечения рассеяния электронов дислокациями в металлах // ЖЭТФ.— 1974.— 67, вып. 6 (12).— С. 2335—2340.

Dem'yanov R. A. B. The influence of small angle scattering on metallic conduction // Proc. Roy. Soc. A.— 1968.— 305, N 2.— P. 291—318.

Dem'yanov R. A. P. H., Копелиович А. И. О гальваномагнитных свойствах металлов с замятыми поверхностями Ферми при низких температурах // ЖЭТФ.— 1974.— 67, вып. 6 (12).— С. 2307—2321.

Dem'yanov R. A. G., Kotzler J. Magnetic field enhanced electron-electron scattering in the case of copper // Phys. Rev. B.— 1985.— 31, N 4.— P. 2535—2538.

Dem'yanov R. A. M., Wisner N. Effect of dislocation on electron-electron scattering of copper // Phys. F.— 1983.— 13, N 5.— P. 1207—1211.

Dem'yanov R. A. P. H., Копелиович А. И. Гальваномагнитные свойства чистых металлов в области промежуточных магнитных полей // 19-е Всесоюз. совещ. по физике металлов при низких температурах: Тез. докл., Минск, 1976. С. 148—149.

Dem'yanov R. A. M. Основы механики кристаллической решетки.— М.: Наука, 1972.— 176 с.

Dem'yanov R. A. Ю., Матвеев В. Н. Возврат электросопротивления в слабдеформированных монокристаллах меди // ФТТ.— 1976.— 18, вып. 12.— С. 3724—3726.

Dem'yanov R. A. Ю., Касумов, Ч. В. Копецкий, Л. С. Коханчик, В. Н. Матвеев // ФТТ.— 1977.— 19, вып. 1.— С. 271—275.

Копелиович А. И. Физика твердого тела
Том 11, вып. 1, с. 10—11, 1973

Получено 12.08.85

В. КАРДЕНАС, М. А. ЛУРЬЕ, В. Г. ПЕСЧАНСКИЙ

РЕЗОНАНСНОЕ СВЯЗЫВАНИЕ ВСПЛЕСКОВ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТОНКИХ ПРОВОДНИКАХ

Рассмотрены три новых высокочастотных резонансных эффекта в прозрачности тонких пластин, наблюдение которых позволит получить детальную информацию о спектре и релаксационных свойствах электронов проводимости в металле.