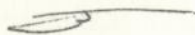


ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

КХЕИР БЕК ХАСИБА



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
В СЛОИСТЫХ ПРОВОДНИКАХ

01.04.07 - физика твердого тела

АВТОРЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1994



Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Харьковском государственном университете

Научный руководитель - Д-р физ.-мат. наук,
проф. Песчанский В.Г.

Официальные оппоненты: Д-р физ.-мат. наук, доц.
Оболенский Михаил Александрович
(ХГУ, г. Харьков)
К. физ.-мат. наук, ст. н. с.
Кириченко Ольга Викторовна
(ФТИНТ НАН Украины, г. Харьков)


Ведущая организация - Донецкий физико-технический институт
НАН Украины, г. Донецк)

Защита состоится " 2 " ноября 1994 г. в
16⁰⁰ часов на заседании специализированного совета
Д 053.06.02 в Харьковском государственном университете
(310077, г. Харьков, пл. Свободы, 4, ауд. им. К.Д. Синель-
никова)

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной

ЛНБ ім. В. Стефаника бібліотеке ХГУ
АН України

автореферат разослан " 31 " октября 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета  В.П. Пойда

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ И СТЕПЕНЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМАТИКИ
ДИССЕРТАЦИИ. Интерес к исследованию физических свойств низкоразмерных проводников в значительной мере связан с поиском новых сверхпроводящих материалов с высокими критическими параметрами. Еще в 60-х годах идея Литтла о возможности реализации высокотемпературной сверхпроводимости в квазиодномерных органических полимерах стимулировала синтез проводников органического происхождения. Значительная часть синтезированных в последние годы сверхпроводников обладает слоистой структурой с резкой анизотропией электропроводности в нормальном (не сверхпроводящем) состоянии. К ним относятся ди-халькогениды переходных металлов $NbSe_2$, TaS_2 , соли тетратиафүльвалена, галогены тетраселентетрацена. В них электропроводность вдоль слоев оказывается по порядку величины близкой к электропроводности чистой меди, а поперек слоев она на несколько порядков меньше. Экспериментальное обнаружение эффекта Шубникова-де Гааза во многих органических проводниках и металлический тип их проводимости дают основание полагать, что за их электронные свойства ответственна система заряженных фермионов, аналогичных электронам проводимости в металлах. Свойства системы носителей заряда в органических проводниках пока еще мало исследованы к настоящему времени, однако, их изучение весьма важно не только в связи с необходимостью выяснения механизма образования сверхпроводящего состояния в них, но и для более глубокого понимания обнаруженных при исследовании таких проводников некоторых своеобраз-

ных физических явлений, существенно отличающих эти проводники от обычных металлов.

Цель работы и основные задачи исследования состоят в теоретическом исследовании высокочастотных свойств слоистых проводников с квазидвумерным электронным энергетическим спектром произвольного вида. Для достижения поставленной цели необходимо было воспользоваться сформулированной Л.Онсагером /1/ и И.М.Лифшицем /2/ обратной задачей восстановления вида поверхности Ферми таких проводников с помощью экспериментальных данных, полученных при исследовании намагниченности и кинетических явлений в сильном магнитном поле. В ходе выполнения работы предполагалось провести поиск эффектов, специфичных для квазидвумерного проводника, которые должны быть чувствительными к виду электронного энергетического спектра.

Методы исследований. Приведенные в диссертации результаты теоретических исследований получены с использованием метода расчета высокочастотных характеристик слоистых проводников, который основывается на уравнениях Максвелла для электромагнитных полей и кинетическом уравнении Больцмана.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что в ней впервые разработаны элементы теории распространения электромагнитных волн в слоистых органических проводниках с резкой анизотропией электропроводности в магнитном поле без каких-либо предположений о конкретном виде квазидвумерного энергетического спектра носителей заряда. Показаны высокая чувствительность глубины затухания электромагнитных волн в слоистом проводнике к поляризации падающей волны и ориентации внешнего магнитного поля относительно слоев.

Впервые решена задача об осцилляционной зависимости импеданса от угла между нормалью к слоям слоистого проводника и вектором сильного магнитного поля. Показано, что в квантующих магнитных полях с понижением температур в условиях эффекта Шенберга происходит значительное уменьшение глубины скин-слоя.

Основные научные положения, которые выносятся на защиту:

1. Ориентационный эффект в поглощении энергии электромагнитных волн слоистым органическим проводником связан с существенным изменением асимптотического поведения высокочастотной электропроводности вдоль нормали к слоям при некоторых значениях угла θ между нормалью к слоям и вектором магнитного поля. В результате имеют место осцилляции импеданса при изменении угла θ , а период осцилляции определяется диаметром поверхности Ферми. Эффект реализуем в достаточно сильных магнитных полях, когда радиус кривизны траектории электрона r_H меньше глубины скин-слоя, и позволяет определить анизотропию диаметров поверхности Ферми.

2. Решение задачи о зависимости глубины проникновения электромагнитного поля различной поляризации в слоистый органический проводник от степени гофрировки поверхности Ферми, частоты электромагнитного поля, длины свободного пробега носителей заряда и степени совершенства поверхности образца.

3. В квантующих магнитных полях с понижением температуры в условиях эффекта Шенберга происходит значительное уменьшение глубины скин-слоя.

Теоретическая и практическая ценность работы состоит в том, что полученные в ней результаты могут быть использованы для дальнейшего развития теории распространения электромаг

нитных волн в слоистых проводниках, а именно для более детального изучения электронного энергетического спектра слоистых проводников.

В том случае, когда слоистые проводники имеют поверхность Ферми в виде слабогофрированного цилиндра, использование предсказанных в работе эффектов позволяет полностью определить не только форму поперечного сечения цилиндра, но и степень гофрировки поверхности Ферми.

Результаты работы, полученные при исследовании чувствительности глубины затухания электромагнитного поля к поляризации переменного электрического поля и ориентации внешнего магнитного поля относительно слоев слоистого проводника, могут быть использованы на практике для создания фильтров, пропускающих волну с вполне определенной поляризацией.

Личный вклад соискательницы в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в том, что она принимала непосредственное участие в формулировании задач исследования и обсуждении его результатов. Ею выполнены все теоретические расчеты, а именно определены глубина проникновения электромагнитного поля в слоистый проводник вдоль слоев и поперек к ним, исследована электропроводность слоистых проводников с квазидвумерным энергетическим спектром, решено кинетическое уравнение Больцмана.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на Международной конференции по физике низкоразмерных структур (Черноголовка, Россия, 7-10 декабря 1993 г.) и на 14-ой Генеральной конференции Европейского физического общества по физике конденсированного состояния (Мадрид, Испания, 28-31 марта 1994 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 5 публикациях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, примечания и списка цитированной литературы. Она содержит 77 страниц машинописного текста, включая 6 рисунков и библиографию из 51 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, цель и задачи работы, показана научная новизна результатов и их теоретическая и практическая ценность, сформулированы основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе "Распространение электромагнитных волн в металлах", которая носит обзорный характер, кратко изложены классические работы, посвященные теории аномального скин-эффекта, а именно работы А.Пипшарда /3/, Г.Ройтера и Е.Зондгаймера /4/, М.Я.Азбеля /2,5/, Л.А.Фальковского /6/, а также квантовым осцилляционным явлениям /7/.

В последующих двух главах изложены оригинальные результаты исследования высокочастотных свойств проводников с квазидвумерным электронным энергетическим спектром вида

$$\varepsilon(\vec{p}) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n(p_x, p_y) \cos \frac{ap_z}{\hbar}, \quad (1)$$

где a - расстояние между слоями квазидвумерного слоистого проводника, ось z направлена вдоль нормали \vec{n} к слоям, а $\varepsilon_n(p_x, p_y)$ - произвольные функции своих аргументов, однако их максимальное значение A_n на поверхности Ферми $\varepsilon(\vec{p}) = \varepsilon_F$ су-

щественно убывает с ростом n , так что

$$A_1 = \eta A_0 \ll A_0; \quad A_{n+1} \ll A_n \quad (2)$$

Во второй главе "Поверхностный импеданс слоистого проводника" проанализировано влияние поляризации волны на глубину затухания электромагнитного поля. С помощью кинетического уравнения Больцмана в τ -приближении для интеграла столкновений найдена связь плотности тока \vec{j} с переменным электрическим полем \vec{E} с частотой ω . После чего система уравнений Максвелла в немагнитных проводниках становится замкнутой и допускает анализ распространения электромагнитных волн в слоистом проводнике с энергетическим спектром носителей заряда вида (1).

Если длина свободного пробега носителей заряда значительно меньше характерного масштаба неоднородности электромагнитного поля, то глубина затухания электрического поля вдоль слоев δ_1 по порядку величины совпадает с глубиной скин-слоя в изотропном металле а именно

$$\delta_1 = \delta_0 \left[\frac{1 + \omega^2 \tau^2}{\omega \tau + \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где $\delta_0 = c(2\pi\omega\sigma_0)^{1/2}$ - глубина проникновения квазистационарного поля в металл с электропроводностью σ_0 , c - скорость света в вакууме.

Соотношение между глубиной затухания $\delta_{||}$ электрического поля E_z и δ_1 носит универсальный характер

$$\delta_{||} \approx \delta_1 / \eta \quad (4)$$

если электропроводность поперек слоев $\sigma_{xx} \approx \sigma_0 \eta^2$ значительно превышает частоту волны. В обратном предельном случае, когда $\sigma_{xx} < \omega$ учет тока смещения существенен и

$$\delta_{||} = \frac{c}{2\pi\sigma_{xx}} \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (5)$$

В условиях аномального скин-эффекта глубина затухания электрического поля поперек слоев в $\eta^{-2/3}$ раз превышает δ_1 , т.е.

$$\delta_{\parallel} = \delta_1 / \eta^{2/3} \quad (6)$$

Соотношение (6) остается справедливым при конечной длине свободного пробега l , пока $\delta_{\parallel} \ll l$. Однако может статься, что при $\eta \ll 1$ глубина затухания электрического поля E_z может превысить l , но $\delta_1 \ll l$. При $\delta_{\parallel} > l \gg \delta_1$ электрическое поле E_z убывает вглубь проводника таким же образом, как и в случае нормального скин-эффекта, т.е. для δ_{\parallel} справедливы формулы (4) и (5), соотношение между δ_{\parallel} и δ_1 имеет вид

$$\delta_{\parallel} = \frac{\delta_1^{3/2}}{\eta l^{1/2}}, \quad (7)$$

если ток смещения мал по сравнению с током проводимости поперек слоев.

В третьей главе "Высокочастотные свойства слоистых проводников в магнитном поле" исследовано влияние на поверхностный импеданс и глубину затухания электромагнитного поля достаточно сильного постоянного внешнего магнитного поля \vec{H} , когда частота обращения электронов проводимости $\Omega = eH/m^*c$ значительно меньше времени их свободного пробега, т.е. $\Omega\tau \gg 1$. Здесь m^* - циклотронная эффективная масса носителей заряда.

В магнитном поле $\vec{H} = (0, H\sin\theta, H\cos\theta)$, параллельном поверхности образца $x = 0$, связь между плотностью тока и электрическим полем оказывается квазилокальной, если радиус кривизны траектории электрона в магнитном поле r_H много меньше δ_1 . При этом не играет роли соотношение между глубиной скин-слоя и длиной свободного пробега носителей заряда. В этом случае, рассмотренном в разделе 3.1 "Сильное

магнитное поле", характер отражения носителей заряда границей образца проявляется лишь в малых поправках к импедансу по малому параметру γ_n/δ_1 либо γ_n/δ_n , поскольку носители заряда, движущиеся параллельно поверхности образца и удаленные от нее на расстояние, большее $2\gamma_n$, не взаимодействуют с ней. При ϑ , близком к $\pi/2$, электронные орбиты становятся сильно вытянутыми, а при $\vartheta = \pi/2$ они разрываются, переходя в две открытые траектории электронов в импульсном пространстве. В этом случае состояние поверхности образца существенным образом влияет на величину импеданса. Если размеры электронных орбит все же значительно меньше глубины скин-слоя, т.е. ϑ существенно отлично от $\pi/2$, то характер распространения электромагнитных волн может быть проанализирован с помощью асимптотического поведения в сильном магнитном поле электропроводности безграничного проводника.

У всех синтезированных до настоящего времени квазидвумерных проводников электронные и "дырочные" объемы, огибаемые поверхностью Ферми в импульсном пространстве, нескомпенсированы, т.е. число электронов N_1 не равно числу дырок N_2 . При $N_1 \neq N_2$ магнитосопротивление вдоль слоев имеет такой же порядок величины, что и электросопротивление в отсутствие магнитного поля. Глубина затухания δ_1 электрического поля вдоль слоев при этом имеет такой же порядок величины, как в случае нормального скин-эффекта в отсутствие внешнего магнитного поля, хотя соотношение между δ_1 и l может быть произвольным. В результате δ_1 слабо зависит от угла ϑ во всей области углов, где размеры орбиты электронов проводимости меньше глубины скин-слоя. Глубина затухания электрического поля поперек слоев, напротив, существенно зависит от ориен-

тации магнитного поля. Это связано с существенным изменением асимптотического поведения компоненты тензора электропроводности

$$\sigma_{zz}(\eta, \vartheta, k) = \frac{2e^3 H}{c(2\pi\hbar)^3} \int_0^T dp_H \int_{-\infty}^t dt' \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{a_{nm}^2}{\hbar^2} \varepsilon_n(p_H, t) \varepsilon_m(p_H, t') \exp\nu(t'-t) \sin \frac{a}{\hbar} p \left[\frac{p_H}{\cos\vartheta} - p_y(p_H, t) \operatorname{tg}\vartheta \right] \sin \frac{a}{\hbar} p \left[\frac{p_H}{\cos\vartheta} - p_y(p_H, t) \operatorname{tg}\vartheta \right] \cos \frac{kc}{eH \cos\vartheta} \left[p_y(t', p_H) - p_y(t, p_H) \right] \quad (8)$$

при некоторых значениях ϑ . Здесь p_H - проекция импульса электрона на направление магнитного поля, $T = 2\pi/\Omega$, $\nu = 1/\tau - 1\omega$.

Глубину затухания электромагнитного поля нетрудно определить с помощью дисперсионных соотношений

$$k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{4\pi i \omega}{c^2} \tilde{\sigma}_{yy}(k) = 0$$

$$k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{4\pi i \omega}{c^2} \tilde{\sigma}_{zz}(k) = 0 \quad (9)$$

если воспользоваться асимптотическим разложением компонент тензора электропроводности $\sigma_{ij}(k)$ в ряд по степеням $kr_H \ll 1$. В силу резкой анизотропии энергетического спектра носителей заряда в плоскости (p_y, p_z) главные оси тензора

$$\tilde{\sigma}_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} - \sigma_{\alpha x} \sigma_{x\beta} / \sigma_{xx}; \quad (\alpha, \beta) = (y, z) \quad (10)$$

близки к осям y и z .

В двумерном проводнике ($\eta = 0$) все сечения поверхности Ферми плоскостью $p_H = \text{const}$ одинаковы, так что p_x и p_y , а следовательно, и $\varepsilon_n(p_x, p_y)$ зависят лишь от одной переменной t - времени движения заряда в магнитном поле. При $\eta \neq 0$ появляется зависимость также и от p_H , которая весьма мала, если $\eta \ll 1$ и проявляется лишь в малых поправках по параметру η

$$p_x(t, p_H) = p_x^0(t) + \eta \Delta p_x(t, p_H) \quad (11)$$

$$p_y(t, p_H) = p_y^0(t) + \eta \Delta p_y(t, p_H)$$

В достаточно сильном магнитном поле, когда $|\nu T| \ll 1$, асимптотическое выражение для σ_{zz} с учетом соотношения (11) принимает вид

$$\sigma_{zz} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4an^2\pi^2 e^3 H \cos\theta}{(2\pi\hbar)^4 c \nu T} \left\{ \left[\int_0^{\pi} dt \varepsilon_n(t) \cos\left[\frac{an}{\hbar} p_y(t) \operatorname{tg}\theta\right] \right]^2 + \left[\int_0^{\pi} dt \varepsilon_n(t) \sin\left[\frac{an}{\hbar} p_y(t) \operatorname{tg}\theta\right] \right]^2 \right\} + \sigma_0 \eta^2 \left[\eta^2 + (k r_H)^2 + (\nu T)^2 \right] \quad (12)$$

Если при некотором значении $\theta = \theta_0$ наиболее существенные в сумме слагаемые с $n = 1$ одновременно обращаются в нуль, то зависимость σ_{zz} от магнитного поля значительно изменяется. Здесь численные множители порядка единицы в поправках к сумме по n опущены.

В том случае, когда закон дисперсии носителей заряда имеет вид

$$\varepsilon(\vec{p}) = \frac{p_x^2}{2m_1} + \frac{p_y^2}{2m_2} + A \cos \frac{ap_x}{\hbar} \quad (13)$$

когда $p_y(t) = p_y(0) \cos \Omega t$, а $\Omega = eH/c(m_1 m_2)^{1/2}$, выражение для σ_{zz} приобретает вид

$$\sigma_{zz} = A^2 \frac{4\pi e^2 a (m_1 m_2)^{1/2}}{(2\pi\hbar)^4} J_0^2\left(\frac{ap_y(0)}{\hbar} \operatorname{tg}\theta\right) + \sigma_0 \eta^2 \left[\eta^2 + (k r_H)^2 + (\nu T)^2 \right] \quad (14)$$

где $J_0(x)$ - функция Бесселя, которая имеет бесконечное число нулей. Если $\operatorname{tg}\theta \gg 1$, то нули функции Бесселя периодически повторяются с периодом

$$\Delta(\operatorname{tg}\theta) = \frac{2\pi\hbar}{ap_y(0)} \quad (15)$$

Это приводит к периодическому изменению с углом θ глуби-

ны проникновения электрического поля $E_z(x)$ и, следовательно, импеданса, что позволяет с помощью измерения этих осцилляций определить диаметр поверхности Ферми в направлении оси p_y , точнее его асимптотическое значение при $\eta \ll 1$.

При ϑ существенно отличном от ϑ_0 соотношение между δ_1 и $\delta_{||}$ с точностью до численных множителей порядка единицы имеет вид

$$\delta_1 = \delta_{||}\eta, \quad (16)$$

а при $\vartheta = \vartheta_0$ глубина проникновения электрического поля E_z , определяется из дисперсионного соотношения

$$k^2 = \frac{\omega^2 + 4\pi l \omega_0 \eta^2 [\eta^2 + (vT)^2]}{c^2 - 4\pi l \omega_0 \eta^2} \quad (17)$$

значительно возрастает, и в угловой зависимости импеданса имеет место серия узких максимумов, интенсивность которых в достаточно чистых проводниках, когда $l\eta^2 > \delta_0$, убывает с ростом магнитного поля, а при $l\eta^2 < \delta_0$, напротив, возрастает пропорционально $l\delta_0/r_H\eta$, если $l\eta < r_H < \delta_0/\eta$. При не слишком больших частотах, когда ток смещения мал по сравнению с током проводимости вдоль нормали к слоям, глубину скин-слоя $\delta_{||}$ можно представить следующей интерполяционной формулой:

$$\delta_{||} = l \left[\frac{r_H^2 + \delta_0^2 \eta^{-2}}{r_H^2 + l^2 \eta^2} \right]^{1/2} \quad (18)$$

В случае крайне слабой электропроводности поперек слоев, когда $\omega/c > \sigma_0 \eta^2 (\eta^2 + (vT)^2)$, глубина скин-слоя $\delta_{||}$ имеет следующий вид:

$$\delta_{||} = \frac{\delta_0}{\eta^2} \left\{ 1 + \left[\frac{r_H}{l\eta} \right]^2 + \left[\frac{r_H \omega}{c\eta} \right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (19)$$

и в достаточно сильных магнитных полях, когда

$$r_H < (l^2 \eta^2 + \delta_0^2 \eta^{-2})^{1/2},$$

длина затухания электрического поля вдоль нормали к слоям равна δ_0 / η^2 .

Необычная зависимость импеданса от величины сильного магнитного поля и его ориентации относительно кристаллографических осей, специфичная для квазидвумерных проводников, вполне наблюдаема в слоистых проводниках типа солей тетрафлуорвалена, галогенов тетраселентетрацена в радио- и СВЧ диапазонах в магнитных полях $H = 10^5 \text{ Э}$, когда может быть легко реализуемым случай сильного магнитного поля ($\gamma_H \ll 1$).

Исследование поверхностного импеданса в этих условиях позволит определить степень гофрировки и анизотропию диаметров поверхности Ферми.

В разделе 3.2 "Предельно аномальный скин-эффект" вычислена глубина проникновения переменного электрического поля в случае, когда электрон за время свободного пробега успевает совершить много оборотов в магнитном поле, однако диаметр его орбиты больше δ_1 . В этом случае важную роль играет состояние поверхности образца, поскольку носители заряда, не покидающие скин-слой, вносят большой вклад в поверхностный ток, шунтирующий электромагнитную волну.

В условиях циклотронного резонанса ($\omega = n\Omega$, n - целое число) глубину затухания электрического поля $E_y(x)$ можно найти с помощью дисперсионного соотношения

$$k^2 = \frac{4\pi i \omega}{c^2} \left\{ \frac{\sigma_0}{k\gamma_H} + \frac{\sigma_0}{W + \nu_T} \left[\frac{\gamma_H}{kl^2} \right]^{1/2} \right\} \quad (20)$$

а вне резонанса ($\omega \neq n\Omega$) с помощью соотношения

$$k^2 = \frac{4\pi i \omega}{c^2} \left\{ \frac{\sigma_0}{kl} + \frac{\sigma_0}{W + \nu_T} \left[\frac{\gamma_H}{kl^2} \right]^{1/2} \right\} \quad (21)$$

Здесь опущен ток смещения, а гофрировка поверхности Ферми полагается достаточно малой, так что разброс частот Ω для

электронов с энергией Ферми много меньше частоты их внутри-объемных столкновений и, следовательно, все они участвуют в формировании циклотронного резонанса. В обратном предельном случае, когда $\eta \gg r_H/l$ первое слагаемое в фигурных скобках выражения (20) приобретает дополнительный малый множитель $(r_H/l\eta)^{1/2}$. Кроме того мы полагали, что время между столкновениями с поверхностью электронов, не покидающих скин-слой, $T_\lambda = 2\pi[\delta_1/r_H]^{1/2} \Omega^{-1}$ много меньше периода изменения фазы электромагнитной волны $2\pi/\omega$; W - ширина индикатрисы рассеяния электронов проводимости границей образца. Малосущественные численные множители порядка единицы в формулах (20) и (21), как и прежде, опущены.

Вне резонанса глубина проникновения электрического поля $E_y(x)$ имеет вид

$$\delta_1 = \delta_{\infty} \left[\frac{\delta_{\infty}}{r_H} \right]^{1/6} (W + r_H/l) \quad (22)$$

где $\delta_{\infty} = [vc^2/\omega\omega_0^2]^{1/3}$.

В резонансных условиях формула (22) для δ_1 остается справедливой в случае достаточно гладкой поверхности образца, когда $W < (r/l)^{5/6} (r/\delta_{\infty})^{1/2}$ и электроны практически зеркально отражаются нею. В обратном предельном случае основной вклад в высокочастотный ток вносят резонансные электроны, которые не взаимодействуют с поверхностью проводника, и глубина проникновения

$$\delta_1 = \delta_{\infty} \left[\frac{\eta + r_H/l}{l/r_H} \right]^{1/6} \quad (23)$$

не зависит от вероятности зеркального отражения электронов границей образца.

Если глубина проникновения δ_1 электрического поля $E_z(x)$ также много меньше диаметра электронной орбиты, то между δ_1

и δ_{\parallel} вне резонанса имеет место универсальное соотношение

$$\delta_{\perp} = \delta_{\parallel} \eta^{4/5} \quad (24)$$

Это соотношение остается справедливым и в условиях циклотронного резонанса, если $W \ll r_H^{3/2} / l \delta_{\perp}^{1/2}$.

При $r_H^{3/2} / l \delta_{\parallel}^{1/2} < W \ll r_H^{3/2} / l \delta_{\perp}^{1/2}$ глубина проникновения электрического поля E_z определяется лишь взаимодействием с волной в основном "объемных" электронов, не сталкивающихся с границей образца. В этом случае δ_{\parallel} не зависит от состояния поверхности образца

$$\delta_{\parallel} = r_H^{1/3} \left(\delta_0 / \eta \right)^{2/3} \quad (25)$$

однако δ_{\perp} существенно зависит от характера отражения носителей заряда поверхностью проводника

$$\delta_{\perp} = (Wl)^{2/5} \delta_0^{4/5} r_H^{-1/5} \quad (26)$$

В последнем разделе третьей главы 3.3 "Квантовые осцилляции поверхностного импеданса" рассмотрены квантовые осцилляции поверхностного импеданса при достаточно низких температурах в условиях эффекта Шенберга, когда амплитуда осцилляций магнитной восприимчивости значительно превышает величину магнитной восприимчивости Ландау. В этом случае магнитная восприимчивость χ может быть близкой к $1/4\pi$, когда однородное состояние становится неустойчивым и возникают домены с различным значением магнитной индукции B при постоянном значении поля H . Показано, что при $0 < (1 - 4\pi\chi) \ll 1$ электромагнитная волна практически не проникает в проводник и осцилляции импеданса, как и его плавно меняющаяся с магнитным полем часть, определяемые с помощью дисперсионного соотношения

$$k^2 = \frac{\omega^2 + 4\pi i \omega \left\{ \sigma_{\text{мон}}(k, H) + \sigma_{\text{осц}}(k, H) \right\}}{1 - 4\pi\chi(T, H)} \quad (27)$$

убывают с понижением температуры.

В заключении кратко резюмированы основные результаты и обобщающие выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенное в работе теоретическое исследование высокочастотных свойств слоистых проводников с квазидвумерным электронным спектром произвольного вида позволило установить ряд специфических особенностей распространения электромагнитных волн в низкоразмерных проводниках. Основные результаты исследований приведены ниже в виде итоговых обобщающих выводов.

1. Получены соотношения между глубинами проникновения электрического поля в слоистый проводник с квазидвумерным электронным энергетическим спектром вдоль и поперек слоев в зависимости от напряженности магнитного поля, частоты электромагнитного поля, степени гофрировки поверхности Ферми и степени совершенства поверхности образца.

2. Установлена высокая чувствительность высокочастотных характеристик слоистых проводников с металлическим типом проводимости к виду поляризации переменного электрического поля падающей волны, что может быть использовано для создания фильтров, пропускающих электромагнитные волны с вполне определенной поляризацией.

3. Показано, что в квазидвумерном проводнике имеет место ориентационный эффект, проявляющийся в наличии серии узких максимумов на зависимости импеданса от угла между вектором магнитного поля и нормалью к слоям. Расстояние между этими

максимумами содержит информацию о форме поперечного сечения поверхности Ферми в виде слабогфрированного цилиндра.

4. Показано, что в квантовых магнитных полях с понижением температуры в условиях эффекта Шенберга происходит значительное уменьшение глубины скин-слоя.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Onsager L. Interpretation of the de Haas - van Alphen effect. // *Phil.Mag.*- 1952.- V.43, N 344.- P.1006 - 1008.
2. Лишиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И. Электронная теория металлов. - М.: Наука. 1971.- 415с.
3. Pippard A.B. The surface impedance of superconductors and normal metals at high frequencies // *Proc.Roy.Soc.*- 1947.- V.A191.- P.385 - 399.
4. Reuter G.H.T., Sondheimer E.H. The theory of the anomalous skin-effect in mettals // *Proc.Roy.Soc.*- 1948.- V.A195.- P.336 - 364.
5. Азбель М.Я. Периодические диамагнитные структуры и фазовые переходы // *ЖЭТФ.*- 1967.- Т.53.- С.1751 - 1764.
6. Фальковский Л.А. Аномальный скин-эффект на шероховатой поверхности в магнитном поле // *ЖЭТФ.*- 1981.- Т.80.- С.775 - 790.
7. Shoenberg D. Magnetic oscillation in metals // Cambridge Univ.Press.- 1984.- 350p.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Песчанский В.Г., Савельева С.Н., Клеир Бек Х. Аномальная прозрачность слоистых проводников // *ФТТ.*- 1992.- Т.34.-

С. 1640 - 1643.

2. Песчанский В.Г., Кхеир Бек Х., Савельева С.Н. Высокочастотные свойства слоистых проводников в сильном магнитном поле // ФНТ.- 1992.- Т.18, N 9.- С.1012 - 1017.
3. High frequency phenomena in layered conductors / Peschansky V.G., Kheir Bek H., Savel'eva S.N., Torjanik D.A. // Physics of Low-Dimensional Structures.- 1994.- V.1, N 7.
4. High frequency phenomena in layered conductors / Peschansky V.G., Kheir Bek H., Savel'eva S.N., Torjanik D.A. // Abstract of Report at 1 International Conference Physics of Low-Dimensional Structures Institute of Solid State Physics Russian Academy of Science.- Chernogolovka - 93.- 1993.- P.53.
5. Peschansky V.G., Kheir Bek H., Torjanik D.A. High frequency phenomena in layered conductors // Europhysics conference abstracts, GCCMD-14.- Madrid.- 1994.- V.18a.- P.129.

Кхеир Бек Х. "Поширення електромагнітних хвиль в шаруватих провідниках".

Дисертація у формі рукопису на здобуття наукового ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла. Харківський державний університет, Харків. 1994.

Захищається 5 наукових праць, які містять результати теоретичних досліджень особливостей поширення електромагнітних хвиль в шаруватих провідниках з квазидвовимірним електронним енергетичним спектром. В роботі вперше розроблені елементи теорії поширення електромагнітних

хвиль в шаруватих провідниках з різкою анізотропією електропровідності в магнітному полі без будь-яких припущень щодо конкретного вигляду квазідвовимірною енергетичного спектру носіїв заряду. Показана висока чутливість глибини згасання електромагнітних хвиль в шаруватому провіднику до поляризації падаючої хвилі та орієнтації зовнішнього магнітного поля відносно шарів. Вперше розв'язана задача про осциляційну залежність імпедансу від кута між нормаллю до шарів шаруватого провідника та вектором сильного магнітного поля. Показано, що в квантуючих магнітних полях при зниженні температури в умовах ефекту Шенберга здійснюється значне зменшення глибини скін-шару.

Ключові слова:

шаруваті провідники, анізотропія електропровідності, глибина згасання, осциляційна залежність імпедансу, магнітне поле, поляризація хвиль, високочастотні властивості.

Khair Bek H. "Propagation of electromagnetic waves in layered conductors".

The thesis (in manuscript form) is submitted for a Candidate Degree in Physical and Mathematical Sciences, speciality 01.04.07 (Solid State Physics).

Kharkov State University, Kharkov, Ukraine, 1994.

The results of theoretic investigations of the propagation of electromagnetic waves in layered conductors with quasi-two-dimensional electron energy spectrum are presented in five scientific papers which are being defended.

This paper contains a first attempt to elaborate a theory of propagation of electromagnetic waves in layered con

ductors with sharp anisotropy of electrical conduction in magnetic field, without any suggestions about specific form of quasi-two-dimensional energetic spectrum of charge carriers.

The depth of decay of electromagnetic waves in layered conductors is shown to be highly sensitive to the incident wave polarization and to the orientation of external magnetic field to the layeres. The present work contains the first solution to the present problem of oscillation dependence of the impedance on the angle between the normal to the layeres of a layered conductor and the vector of strong magnetic field. The depth of skin-layer is shown to decrease considerably with quantizing magnetic fields when temperature is lowered under the conditions of Shoenberg effect.

Ответственный за выпуск

Д-р ф.-м.н., проф. Песчанский В.Г.

Подписано к печати 18.10.94 г.

Формат 60x84 1/16. Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 85. Зак. 30. Бесплатно.

Ротапринт Института монокристаллов

Харьков, пр. Ленина, 60

30-70-97

455905

AB 31.164

AB 31.164