ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

ПОЛТАВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ПЕДАГОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.Г. КОРОЛЕНКА

ВИПУСК 6 (33)

СЕРІЯ "ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ"

ПОЛТАВА - 2003

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

ПОЛТАВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ПЕДАГОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.Г. КОРОЛЕНКА

ВИПУСК 6 (33)

СЕРІЯ „ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ”

ПОЛТАВА - 2003

УДК 53 + 51 (08)
ББК 22.3я 5+22.1я 5

Вісник Полтавського державного педагогічного університету імені В.Г. Короленка. Збірник наукових праць: Випуск 6(33). — Серія „Фізико-математичні науки". — Полтава, 2003. — 140 с.

Збірник містить публікації з актуальних питань математики та фізики.

Опубліковані матеріали можуть бути використані науковцями, аспірантами, викладачами вузів, інженерами, працівниками, які працюють в цих наукових напрямках.

Головна редакційна колегія:

докт. іст. наук, проф., академік АПН України **Пащенко В.О.**
(голювний редактор),
докт. біол. наук, проф. Байрак О.М.,
докт. пед. наук, проф., член-кор. АПН України Бойко А.М.,
докт. пед. наук, проф. Гриньова М.В.,
докт. екон. наук, проф. Жученко В.С.,
докт. іст. наук, проф. Лобурець В.Є.,
докт. філол. наук, проф. Ніколенко О.М.

Редакційна колегія серії:

докт. фіз.-мат.наук, проф. Баранник А.Ф.,
докт. фіз.-мат.наук, проф. Єлізаров О.І.,
докт. фіз.-мат.наук, проф. Ємець О.О.,
докт. фіз.-мат.наук, проф. Поперенко Л.В.,
докт. фіз.-мат.наук, проф., акад. АН ВШ України Руденко О.П.,
(заступник головного редактора)
докт. фіз.-мат.наук, проф. Шут М.І.

Відповідальний редактор — канд. філол. наук, доцент Безобразова Л.Л.

Друкується за ухвалою вченої ради Полтавського державного педагогічного університету імені В.Г. Короленка (протокол № 6 від 29.12.03).

Збірник уходить до Переліку №2 наукових праць, у яких можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт (Постанова президії Вищої атестаційної комісії України від 8 вересня 1999 р., №01-05/9).

Свідоцтво про державну реєстрацію ПЛ №248.

ISBN – 966-7653-11-2

© Колектив авторів, 2003 р.
© Видавництво „АСМІ", 2003 р.
© Друкарня „Техсервіс", 2003 р.

The model spherocylinders for the describing thermodynamic characteristics of alkylbenzene (from benzene to hexylbenzene) within a wide range of measurements for the parameters of a state is investigated. The parameters for the potential of a rectangular "pit" at the coefficients of a package 0,57 and 0,64 – are defined. It is shown that with an increase of the mole mass of alkylbenzene the depth "the pit" for the potential is increased.

KEY WORDS: equation of the state, intermolecular potential, coefficient of package molecules, compressibility factor, spherocylinder.

УДК 538.3

А.М. Єрмолаєв,
А.І. Шурдук
(Полтава)

Резонансний зв'язок електромагнітних і звукових хвиль у металах із квазілокальними станами електронів у магнітному полі

Розглянуто зв'язок поперечних електромагнітних і звукових хвиль в металах з квазілокальними станами електронів. Показано, що взаємодія хвиль з круговою поляризацією "плюс" (анти-геліконів) із звуком приводять до існування зв'язаних хвиль і до їх взаємної трансформації. Обчислені спектр і декремент затухання зв'язаних хвиль.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: поперечні електромагнітні хвилі, квазілокальні стани електронів, магнітодомішкові рівні та рівні Ландау, магнітодомішкові хвилі, анти-гелікони, поперечний звук.

Вступ

Резонансна взаємодія між електромагнітними і звуковими хвилями в металах вивчалася в роботах [1-4]. Показано, що в досить сильному магнітному полі, коли характерний радіус орбіти електрона $R = \vartheta_F / \Omega$ (ϑ_F – фермівська швидкість, Ω – циклотронна частота) малий в порівнянні з довжиною слабозагасаючої спіральної електромагнітної хвилі, а її фазова швидкість збігається зі швидкістю звуку, має місце резонанс і виникають зв'язані хвилі. Вони супроводжуються поперечними коливаннями як електронної системи, так і решітки іонів. У випадку

$\vec{k} \| \vec{H}$ ($\vec{H}$ – напруженість магнітного поля, $\vec{k}$ – хвильовий вектор) з дисперсійного рівняння випливає існування двох поперечних циркулярно-поляризованих хвиль: резонансної з поляризацією "мінус" і нерезонансної з поляризацією "плюс". Резонанс має місце при умові $\omega\Omega = (\omega_p \cdot s_t / c)^2$, де ω – частота хвилі; ω_p – плазменна частота електронів; s_t – швидкість поперечного звуку; c — швидкість світла у вакуумі. Хвильовий вектор нерезонансної електромагнітної хвилі уявний, тому вона загасає на довжині хвилі. Для відповідної їй звукової хвилі дисперсія швидкості і загасання виявляються малими [4].

У роботах [1-4] зіткнення електронів із домішковими атомами враховувалися введенням феноменологічної константи ν – частоти зіткнень. Тим часом домішкові атоми в металі здатні розсіювати електрони резонансно, тобто утворювати квазілокальні стани [5]. Квазілокальні стани електронів на домішках, стимульовані магнітним полем, були названі магнітодомішковими [6;7]. Поблизу частот резонансних переходів електронів між магнітодомішковими рівнями і рівнями Ландау, існують смуги прозорості для специфічних хвиль, які також є магнітодомішковими [8]. Хвилі такого типу існують і в тому випадку, коли локалізація електронів зумовлена лише домішковими атомами і не зв'язана з магнітним полем. У роботі [9] приведені результати дослідження властивостей електромагнітних хвиль у металах із власними квазілокальними станами електронів, захоплених домішкою при відсутності магнітного поля. Локалізація електронів на домішкових атомах приводить до того, що в околі резонансної частоти ω_0 переходів електронів із квазілокального рівня на рівень Ландау з'являється можливість поширення хвиль з поляризацією «плюс» – антигеліконів [9]. Поширення цих хвиль у відсутності квазілокальних станів у спектрі електронів не – можливе. Оцінки показують, що швидкість антигелікону може виявитися

близькою до швидкості поперечного звуку в металі, що свідчить про можливе зв'язування антигеліконів з поперечним звуком.

II. Постановка задачі

У даній роботі наводяться результати дослідження характеристик зв'язаних електромагнітних і звукових хвиль у металах із квазілокальними станами електронів. Розглядається одна група носіїв з ізотропним спектром у слаболегованому зразку при наявності сильного магнітного поля. Передбачається, що $\vec{k} \| \vec{H}$. Результати виражені через характеристики квазілокального стану – полюс $\varepsilon_r - i \cdot \Gamma$ амплітуди резонансного розсіювання електронів ізольованим домішковим атомом (ε_r – положення резонансу, Γ – його напівширина) і лишок r амплітуди розсіювання в полюсі. Ці величини можна обчислити, конкретизуючи розсіюючий потенціал або отримати з досліду.

III. Результати

Врахування резонансного розсіювання електронів домішковими атомами приводить до появи в поперечних компонентах тензора динамічної провідності $\sigma_{ik}(\vec{k},\omega)$ резонансних доданків [8;9]. Коли квазілокальний рівень ε_r лежить нижче границі Фермі ε_F (це має місце, наприклад, в Bi з домішками Pb або Sn), то частоти резонансних переходів електронів із квазілокального рівня на рівні Ландау дорівнюють $\omega_s = \omega_0 + s \cdot \Omega$, де ω_0 – відстань між найближчим до границі Фермі вільним рівнем Ландау і квазілокальним рівнем; s =0, 1, ... – номер резонансу. В околі цієї частоти ($|\omega - \omega_s| << \Omega$) циркулярні компоненти високочастотної провідності в довгохвильовій межі ($kR << 1$) містять внесок [9]:

$$\delta\sigma_{\pm}^{(s)} = i \cdot \frac{\omega_p^2}{4\pi\omega_s} \cdot \alpha_{\pm}^{(s)} \cdot \left(\frac{\omega_s}{\omega - \omega_s + i \cdot \Gamma} \right)^{1/2}, \qquad (1)$$

де

$$\alpha_{\pm}^{(s)} = 2\cdot\left(\frac{m}{2}\right)^{3/2}\cdot\frac{r}{\pi}\cdot\frac{n_i}{n_e}\cdot\frac{\Omega^2}{\omega_s^{5/2}}\cdot[f(\varepsilon_r)-f(\varepsilon_r+\omega_s)]\left\{\begin{array}{c}\dfrac{N+s+1}{\left(1+\Omega/\omega_s\right)^2}\\ \dfrac{N+s}{\left(1-\Omega/\omega_s\right)^2}\end{array}\right. \qquad (2)$$

– сила осцилятора резонансного переходу. Тут m – ефективна маса електрона; n_e і n_i – відповідно концентрації електронів і домішкових атомів; N – число заповнених рівнів Ландау; f – функція Фермі; $\hbar = 1$. Коренева особливість в (1) зв'язана з особливістю щільності електронних станів на рівні Ландау, а різниця функцій Фермі в (2) враховує принцип Паулі. Вираз (1) справедливий і для переходів електронів з магнітодомішкових рівнів на рівні Ландау. У цьому випадку лишок амплітуди розсіювання в полюсі дорівнює

$$r = \frac{2\pi}{\Omega}\cdot\left(\frac{2\cdot\omega_0}{m}\right)^{3/2},$$

а сила осцилятора (2) містить суму за номерами магнітодомішкових рівнів, які беруть участь в переходах на частоті ω_s [8].

Дисперсійне рівняння для зв'язаних електромагнітних і звукових хвиль має вигляд [4]

$$\left(1-\frac{c^2\cdot k^2}{4\pi\cdot\omega\cdot\sigma_{\pm}}\right)\cdot\left(k^2\cdot s_t^2-\omega^2\right) = -\frac{H^2\cdot k^2}{4\pi\cdot\rho}, \qquad (3)$$

де ρ – густина металу. У випадку $|\omega + i\cdot\nu| << \Omega$ є один резонанс на частоті ω_0 $(s=0)$ лише тоді, коли квазілокальний рівень розташований безпосередньо під поверхнею Фермі. В околі цієї частоти врахуємо внесок (1) у дисперсійному рівнянні (3) для хвиль з поляризацією «плюс». У результаті воно набуває вигляду

$$\left[\omega^2 - u^2\cdot k^2\cdot\left(1+i\cdot\tilde{\gamma}\right)^{-1}\right]\left(k^2\cdot s_t^2-\omega^2\right) = -\frac{H^2}{4\pi\cdot\rho}\cdot k^2\cdot\omega^2, \qquad (4)$$

де

$$u^2(\omega) = \left(\frac{\omega c}{\omega_p}\right)^2\cdot\left(\alpha_+^{(0)}\right)^{-1}\cdot\left(1-\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{1/2}\cdot\left[1-\frac{\omega}{\Omega}\cdot\left(\alpha_+^{(0)}\right)^{-1}\cdot\left(1-\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{1/2}\right]^{-1}$$

– квадрат фазової швидкості антигелікону під час відсутності взаємодії зі звуком; $\tilde{\gamma} = \gamma / 2(\omega_0 - \omega)$, γ – загасання антигелікону [9]. Права частина (4) зумовлена індукційною взаємодією [4], яка зникає при $\rho \to \infty$. У результаті розв'язками дисперсійного рівняння (4) є антигелікон, що слабко загасає в смузі прозорості $[\omega(0), \omega_0]$, і в'язка звукова хвиля. Тут $\omega(0)$ – гранична частота антигелікону [9].

Розв'язок дисперсійного рівняння (4) для резонансних хвиль з поляризацією «плюс» дорівнює

$$k_{\pm}^2 = \left(\frac{\omega}{s_t}\right)^2 \cdot \left\{1 + \frac{1}{2}\cdot(\Delta + i\cdot\tilde{\gamma}) \pm \frac{1}{2}\cdot\left((\Delta + i\cdot\tilde{\gamma})^2 + 4\delta^2\right)^{1/2}\right\}, \quad (5)$$

де $\Delta = {s_t^2}/{u^2} - 1$, $\delta^2 = \dfrac{H^2}{4\pi\cdot\rho\cdot s_t^2}$, $\tilde{\gamma}$ – малі величини. Знаки $\pm$ у (5) відповідають двом гілкам спектру зв'язаних хвиль – низькочастотної і високочастотної. Резонанс має місце, коли фазова швидкість антигелікону наближається до швидкості звуку. Умова резонансу має вигляд

$$\omega^2 \cdot \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right)^{1/2} = \alpha_+^{(0)} \cdot \left(\omega_p \cdot \frac{s_t}{c}\right)^2.$$

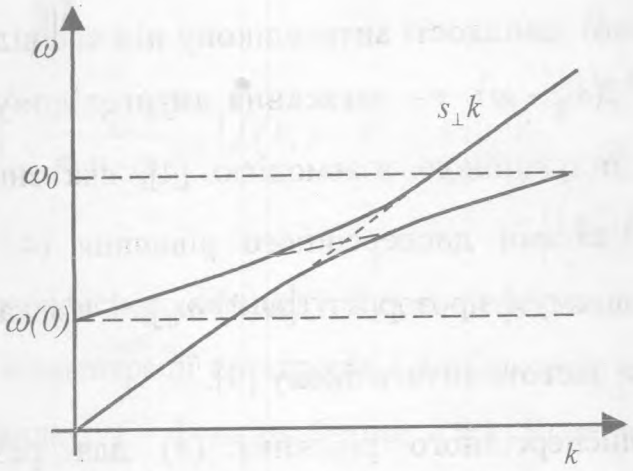
Закон дисперсії і загасання хвиль поблизу резонансу ($\Delta^2 << 4\delta^2$) визначаються виразом

$$k_{\pm}^2 = \left(\frac{\omega}{s_t}\right)^2 \cdot \left[1 \pm \delta + i\cdot\frac{\tilde{\gamma}}{2}\right]. \quad (6)$$

Далеко від резонансу ($\Delta^2 >> 4\delta^2$) асимптотики низькочастотної гілки описуються рівняннями:

$$k_+^2 = \left(\frac{\omega}{s_t}\right)^2 \cdot \left[1 + \Delta + i\cdot\tilde{\gamma}\right], \ \Delta > 0. \quad (7)$$

$$k_+^2 = \left(\frac{\omega}{s_t}\right)^2 \cdot \left[1 - \frac{\delta^2}{\Delta} + i\cdot\tilde{\gamma}\cdot\frac{\delta^2}{\Delta^2}\right], \ \Delta < 0. \quad (8)$$



Мал.1. Дві вітки спектру зв'язаних хвиль в металах з квазілокальними станами електронів

Спектр високочастотної хвилі при $\Delta > 0$ визначається формулою (8), а при $\Delta < 0$ збігається з (7).

На мал. 1 наведена залежність частоти від хвильового вектора для резонансної хвилі з поляризацією «плюс». Врахування взаємодії електронів провідності зі звуком поблизу резонансу знімає виродження і призводить до розщеплення гіток. При додатних Δ низькочастотна хвиля є антигеліконом, а при від'ємних переходить у звукову. І, навпаки, високочастотна хвиля, що є звуковою при $\Delta > 0$, перетворюється в антигелікон при $\Delta < 0$. При $\Delta \to 0$ має місце резонанс, і поділ хвиль на звукову і антигелікон неможливий.

IV. Висновки

1. Отримано розв'язок дисперсійного рівняння для зв'язаних електромагнітних і звукових хвиль в металах з квазілокальними станами електронів.

2. Отримана умова резонансного зв'язку, а також закон дисперсії і затухання низькочастотної і високочастотної гіток спектра зв'язаних хвиль.

3. З'ясовано, що звукових хвиль з антигеліконами, що поширюються в металах із квазілокальними станами електронів, призводить до існування зв'язаних хвиль і до їхньої взаємної трансформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Акрамов Г.Т.* Резонансное затухание звука в металле в магнитном поле // ФТТ. – 1968. – Т.54. — Вып.4. – С.1259-1263.
2. *Landenberg D.N., Bok J.* Helicon-phonon interaction in solids // Phys. Pev. Lett. – 1963. – Vol.11, №2. – P.549-550.
3. *Конторович В.М.* Уравнение теории упругости и дисперсия звука в металах // ЖЭТФ. – 1963. – Т.45. — Вып.5(11). – С.1638-1653.
4. *Канер Э.А., Скобов В.Г.* Электромагнитные волны в металах с произвольным законом дисперсии электронов // ЖЭТФ. – 1964. – Т.46. — Вып. 3. – С.1106-1115.
5. *Лифшиц И.М., Гредескул С.А., Пастур Л.А.* Введение в теорию неупорядоченных систем. – М., 1982.
6. *Ермолаев А.М., Каганов М.И.* О причине биений при наблюдении эффекта де Гааза-ван Альфена в металлах типа висмута // Письма в ЖЭТФ. – 1967. – Т.6 – Вып.11. – С.984-986.
7. *Ермолаев А.М.* Влияние квазилокальных состояний на эффект де Гааза-ван Альфена в металлах типа висмута // ЖЭТФ. – 1968. – Т.54. — Вып.4. – С.1259-1263.
8. *Канер Э.А., Ермолаев А.М.* Слабозатухающие магнитопримесные волны в металлах // ЖЭТФ. – 1987. – Т.92, — Вып. 6. – С.2245-2256.
9. *Ермолаев А.М., Шурдук А.И.* Новый тип волн в металлах с резонансными состояниями электрона // ФТТ. – 1992. – Т.34. — № 7. – С.2300-2303.

Рассмотрена связь поперечных электромагнитных и звуковых волн в металлах с квазилокальными состояниями электронов. Показано, что взаимодействие волн с круговой поляризацией «плюс» (антигеликонов) со звуком приводит к существованию связанных волн и к их взаимной трансформации. Вычислены спектр и декремент затухания связанных волн.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поперечные электромагнитные волны, квазилокальные состояния электронов, магнитопримесные уровни и уровни Ландау, магнитопримесные волны, антигеликоны, поперечний звук.

The coupling of transverse electromagnetic and acoustic waves with quasi-local electron states in metals is considered. It is shown that the interaction of left-hand polarized waves (antihelicons) with acoustic waves leads to the existence of coupled waves as well as their mutual transformation. The spectrum and damping decrement of coupled waves are calculated.

KEY WORDS: Transverse electromagnetic waves. Quasi-local electron states. Magnetic impurity levels and Landau levels. Magnetic impurity waves. Antihelicons. Transverse sound.

Сухомлин Владислав Петрович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної фізики Полтавського державного педагогічного університету імені В.Г. Короленка.

Усов Володимир Васильович – кандидат фізико-математичних наук, доцент Одеського державного університету імені І. Мєчнікова.

Хлопов Андрій Михайлович – асистент кафедри загальної фізики Полтавського державного педагогічного університету імені В.Г. Короленка.

Чанцев Валерій Петрович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін Полтавського університету споживчої кооперації України.

Чуб Костянтин Федорович – кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри математичного аналізу та інформатики Полтавського державного педагогічного університету імені В.Г. Короленка.

Шкатуляк Микола Михайлович – кандидат фізико-математичних наук, доцент Одеського державного університету імені І. Мєчнікова.

Шпортько Костянтин Вікторович – аспірант кафедри загальної фізики Київського національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова.

Шурдук Андрій Іванович – кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри математики і фізики Полтавського університету споживчої кооперації України.

Шут Микола Іванович – доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент АПН України, завідувач кафедри загальної фізики Київського національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова.

Якубенко Володимир Павлович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

ЗМІСТ

ФІЗИКА

Січкар Т.Г., Горшунов О.В., Сіпій В.В., Шут М.І. — Високонаповнений композиційний матеріал на основі епоксидного полімеру..... 3

Шпортько К.В., Венгер Є.Ф., Пасічник Ю.А., Пацкун І.І. — Анізотропія поверхневих поляритонів ZnP_2..... 9

Зазимко Н.М. — Релаксаційні переходи і міцність полі-метилметакрилату..... 19

Богобоящий В.В., Єлізаров М.О. — Візуалізація пітингової корозії металевих плівок за допомогою методу хемографії..... 27

Чанцев В.П. — Ізотермічна модель процесу розчинення соляного шару..... 34

Махно М.Г. — Дослідження параметрів потенціалу міжмолекулярної взаємодії в рамках моделі сфероциліндрів..... 42

Єрмолаєв А.М., Шурдук А.І. — Резонансний зв'язок електромагнітних і звукових хвиль у металах із квазілокальними станами електронів у магнітному полі..... 49

Bandurin Yu., Esaulov V.A., Guillemot L., Monreal R.C. — Surface Miller index dependence of Auger neutralization of helium ions on silver monocrystalls..... 56

Хлопов А.М., Саєнко О.В., Руденко О.П., Сперкач Я.В. — Низькочастотна акустична релаксація у концентрованих водних розчинах хлориду нікелю..... 66

Редактор – Безобразова Л.Л.
Коректор – Безобразова Л.Л.
Комп`ютерна верстка – Матвієнко Ю.С.,
Гетало А.М., Веретельник О.С.

Здано до друку 7.12.2003 р. Підп. до друку 23.12.2003 р.
Гарнітура Times New Roman. Ум.друк.арк. 8, 05. Формат 60*84/16
Наклад 100. Зам. №163.

Видавництво „АСМІ"
Друкарня „Техсервіс"

Адреса:
36011, м. Полтава,
вул. В. Міщенка, 4.
Тел.: (0532) 56-36-71