

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

УДК 538.945

ЯМПОЛЬСЬКИЙ Сергій Володимирович

**МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ АНІЗОТРОПНИХ
НАДПРОВІДНИКІВ ІІ РОДУ**

01.04.02 — «Теоретична фізика»

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ДОНЕЦЬК — 1993

№ 28920

Робота виконана в Донецькому фізико-технічному інституті АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00814066 (P)

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
ГРИШИН О. М.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
КРИВОРУЧКО В. Н.

кандидат фізико-математичних наук
БЕРЕЗА С. Ю.

Провідна організація: Інститут металофізики АН України

Захист відбудеться "22" травня 1993 року о 15⁰⁰ год на засіданні спеціалізованої ради К 068.06.01 в Донецькому державному університеті (340055, Донецьк, пр. Театральний 13, ДонДУ, фізичний факультет, ауд. 322)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донецького державного університету.

Автореферат розповсюджено "20" листопада 1993 року

Вчений секретар,
спеціалізованої ради К 068.06.01
кандидат фізико-математичних наук
ЗЮБАНОВ О. С.

Handwritten signature/initials

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вивчення магнітних властивостей надпровідників (НП) другого роду є багато років однією з головних проблем фізики надпровідного стану. По-перше, НП другого роду з головними матеріалами технічної надпровідності. Закріплення вихрів Абрикосова на дефектах кристалічної структури визначає критичні параметри цих речовин. Тому розрахунок структури магнітних потоків необхідний для вибору оптимальних технологій одержання "жорстких" НП з найбільшою струменосучов здатністю. По-друге, широко розглядається можливість використання "м'яких" НП як матеріалів для пристрів запису та зчитування інформації на пучках магнітного потоку /1/. По-третє, ця проблематика набула додаткової актуальності в зв'язку з відкриттям високотемпературної надпровідності. Нові високотемпературні надпровідники є типовими представниками НП другого роду.

Головною особливістю НП другого роду є існування області змішаного стану. В магнітному полі H_{c1} , яке має назву нижнього критичного, однорідний НП розбивається на систему областей надпровідної і звичайної фази, що чергуються. Основним елементом змішаного стану є вихор Абрикосова, що несе квант магнітного потоку $\Phi_0 = \pi\hbar c/e = 2,07 \cdot 10^{-7}$ Гс·см². Вихор має дві області. Перша, центральна, має розміри, приблизно рівні довжині когерентності ξ , в якій надпровідний параметр порядку зростає від нуля до деякої сталої величини. В другій, зовнішній області циркулюють незгасаючі струми, що необхідні для утворення кванту магнітного потоку. Для ізоляваного вихору ця область має радіус приблизно рівний з глибиною проникнення магнітного поля λ . Якщо магнітне поле підвищується, то концентрація вихрів зростає. Вони починають взаємодіяти один з одним і утворюють ґратові структури.

Нові високотемпературні НП як і "звичайні" низькотемпературні мають анізотропію надпровідних властивостей. Вона виявляється в анізотропії критичних полів /2/, форми вихрових ґратів (ВГ) /3/ та окремих вихрів /4/. Проте, вичерпний опис змішаного стану анізотропних НП ще відсутній.

Структура змішаного стану відбивається в дослідженнях форми ліній ядерного магнітного резонансу, розсіяння нейтронів та мюонів в надпровідникових матеріалах. Крім того, знання вірної рівноважної конфігурації вихрів є в'дправною сходишкою для розрахунків

пружних констант ВГ та вирішення важливої проблеми пінінгу та пластичності ВГ.

Виходячи з цього, мета дисертаційної роботи полягає в теоретичному дослідженні магнітних статичних властивостей НІ другого роду.

Наукова новизна. Вперше передбачене і докладно описане явище інверсії магнітного поля вихору Абрикосова в НІ з анізотропією типу "легка площина". Виведені загальні вирази для нижнього критичного поля та поля перегріву мейсснерівського стану в анізотропному кристалі. Вивчена анізотропія ефекту Мейсснера та поверхняного імпедансу двоосного НІ. Вперше отримана система рівнянь рівноваги та вирази для пружних модулів складних (що мають два вихри в елементарній комірці) ВГ. Описаний спосіб побудови елементарної комірки ВГ у НІ, що намагнічується вздовж осі анізотропії. Проаналізована трансформація комірки під час зміни орієнтації ВГ щодо осей симетрії кристалу. Передбачена структура із рідких ланцюжків вихрів у легкоплощинних НІ, що намагнічуються скісним полем. Виявлено, що такі ВГ обумовлені інверсією магнітного поля вихору, яка знижує поріг зародження ланцюжків. Пружні властивості такої структури залежать від способу деформування ґратів. Доведено, що в легкоосному НІ у скісному магнітному полі реалізуються правильні трикутні ВГ, що мають практично однакову жорсткість відносно різних напрямів їхнього стиснення та зсуву.

Наукова та практична цінність отриманих у дисертації результатів полягає в тому, що вони уточнюють і доповнюють фізичну картину статичних властивостей НІ другого роду і можуть бути використані при подальшому вивченні цих матеріалів. Зокрема, передбачена в роботі інверсія магнітного поля вихору якісно змінює погляди на структуру магнітних г. токів в НІ з великою анізотропією. Висновки про характер проникнення магнітного поля в НІ та про анізотропію поверхняного бар'єру дозволяють поширити уявлення про особливості перемагнічування анізотропних НІ другого роду. Висновки що до статичних властивостей магнітних вихрів можуть бути використані для аналізу та інтерпретації експериментальних даних по візуалізації вихрових структур. Передбачені в роботі ВГ із ланцюжків вихрів були опостережені в експерименті. Висновки що до структури рівноважних ВГ можна використати під час вивчення пінінгу вихрів, плавлення ВГ, а також динамічних властивостей НІ.

Публікації. Основні результати, що викладені в дисертації, опубліковані в дев'яти наукових роботах.

Обсяг та структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох глав, висновку, додатку та списку літератури, що містить 73 найменування. Повний обсяг роботи разом із 14 малюнками складає 96 сторінок машинописного тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність вибраної теми, сформульована мета роботи, коротко охарактеризований спосіб теоретичного аналізу поставленої задачі, показані наукова новизна, достовірність і практична цінність одержаних результатів, наведені структура і зміст дисертації по главах, коротко сформульовані головні висновки роботи, що винесені на захист.

В дисертації використано лондонівську межу феноменологічного підходу Гінзбурга-Ландау. Анізотропія НП враховується за допомогою тензора ефективних мас електронів $m\hat{\mu}$ ($\det \hat{\mu} = 1$). Розподіл магнітних полів у НП визначається рівнянням

$$\tilde{\mathbf{A}} + \lambda^2 \hat{\mu} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{A}} = \frac{\Phi_0}{2\pi} \lambda^2 \hat{\mu} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \nabla\psi, \quad (1)$$

де $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \frac{\Phi_0}{2\pi} \nabla\psi$ - градієнтно інваріантна комбінація векторного потенціалу \mathbf{A} та градієнту фази параметра порядку $\nabla\psi$. Права частина рівняння (1) визначається вихрями - джерелами магнітного поля:

$$\operatorname{rot} \nabla\psi = -2\pi \sum_{\mathbf{v}} \int d\mathbf{l}_{\mathbf{v}}^+ \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\mathbf{v}}^+), \quad (2)$$

$d\mathbf{l}_{\mathbf{v}}^+$ - елемент довжини вихору, $\mathbf{r}_{\mathbf{v}}^+$ - трьохмірний вектор, що фіксує точку на вихорі.

В першій главі розглянуто однорідний (або безвихровий) стан анізотропного НП. У лондонівській межі $\lambda \gg \xi$ розв'язана задача про проникнення магнітного поля в надпровідний анізотропний напівпростір $x > 0$ (ефект Мейсснера). В цьому випадку розподіл поля визначається рішенням рівняння (1) без правої частини. Встановлено, що магнітне поле

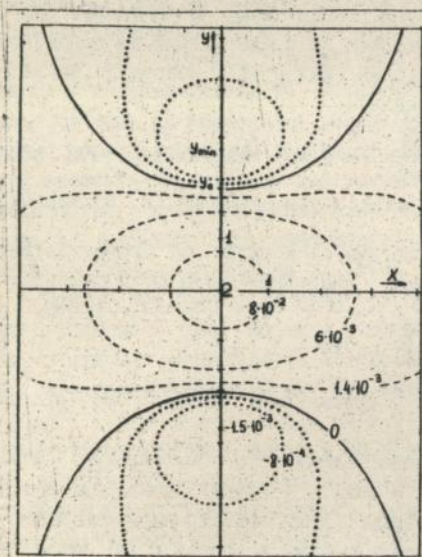
$$\mathbf{h}(x) = \frac{1}{(\hat{\mu}^{-1}\hat{\mathbf{n}})(\eta_1^2 - \eta_2^2)} \left\{ \left[\mathbf{h} \eta_1^2 (\hat{\mu}^{-1}\hat{\mathbf{n}}) + [\hat{\mathbf{n}}, \hat{\mu}[\hat{\mathbf{n}}, \mathbf{h}]] \right] \exp(-\eta_1 x / \lambda) \right\} - (3)$$

$$- \left\{ \hat{n}_z^2 (\hat{n} \hat{\mu}^{-1} \hat{n}) + [\hat{n}, \hat{\mu}(\hat{n}, \hat{n})] \right\} \exp(-\eta_2 x / \lambda) \Big\}.$$

$$\eta_{1,2}^2 = \frac{1}{2(\hat{n} \hat{\mu}^{-1} \hat{n})^{1/2}} \left[\mu_{yy} + \mu_{zz} \pm [(\mu_{yy} - \mu_{zz})^2 + 4\mu_{yz}^2]^{1/2} \right] \quad (4)$$

в суперпозицією двох експоненційно спадних в глибину НП розподілів (\hat{n} - внутрішня нормаль до поверхні НП). Поле в НП не співпадає за напрямом із зовнішнім магнітним полем \hat{n} . Воно має компоненту вздовж напрямку $[\hat{n}, \hat{n}]$. Це призводить до того, що поле під час проникнення вглиб НП залишається паралельним поверхні і повертається до осі з меншою ефективною масою.

У другій главі розглянуто магнітну структуру ізольованого вихору Абрикосова в одноосному НП. Розподіл поля є рішенням рівняння (1) з правою частиною. На мал. I зображений просторовий



Мал. I

розподіл позовдовжньої компоненти поля вихору h_z . Він поданий у вигляді ліній постійного рівня поля в разі нахилу осі анізотропії до вихору на кут $\gamma=30^\circ$, $\lambda/\zeta = 100$ і ефективної маси $\mu_a = 0,25$. Поле $\hat{h}_z(\hat{R})$ нормоване на величину нижнього критичного поля ізотропного НП $H_{c1}^0 = (\kappa_0^2 / 4\pi\lambda^2) \ln(\lambda/\zeta)$, відстані - на λ . Виділений напрям (вісь OY) співпадає з проекцією на базисну площину HOY осі анізотропії. Суцільними кривими зображені лінії постійного нульового рівня. Вони розподіляють області додатних (штрихові лінії) та від'ємних (пунктир) значень компоненти поля. Видно, що в базисній площині існують дві витягнуті вздовж осі анізотропії області,

де магнітне поле має напрям, протилежний повному магнітному пото-

кові у вихорі. При зменшенні величини μ_a область від'ємних значень h_z збільшується. Ефект інверсії існує тільки при $\mu_a < 1$. Він зникає, якщо $\mu_a = 1$ або вихор орієнтується в симетричному напрямі ($\gamma = 0^\circ, 90^\circ$). Поява ізольованого вихору в НІ стає вигідною в полі $H_{z1} = H_0^0 (\epsilon \mu^{-1} \epsilon)^{-1/2}$, $\epsilon = \mu/\mu_0$. При цьому він орієнтований в напрямку $\mu^{-1}\epsilon$. Анізотропія також впливає на поле, в якому зникає поверхняний бар'єр Біна-Лівінгстона:

$$H_{\text{в}} = \frac{\epsilon_0}{4\pi\lambda\epsilon} \frac{\eta_1 + \eta_2}{\mu \mu^{-1} \epsilon} \frac{[(\sqrt{\mu^{-1} \epsilon} \mu \epsilon + \mu_0 h) \mu (\sqrt{\mu^{-1} \epsilon} \mu \epsilon + \mu_0 h)]^{1/2}}{(\sqrt{\mu^{-1} \epsilon} \mu \epsilon + \mu_0 h)^2} \quad (5)$$

Завдяки анізотропії це поле залежить від орієнтації поверхні НІ до осей анізотропії.

Третя глава присвячена розгляду структури ВГ у НІ, що намагнічується вздовж осі анізотропії. Регулярна структура вихрів описується шістьма незалежними параметрами: одиничним вектором \vec{z} , який задає орієнтацію вихрів; довжинами векторів трансляції A_1 і A_2 ; кутами α і γ , котрі визначають орієнтацію векторів трансляції в базисній площині. В разі складних ВГ до цих додаються параметри, що визначають нахил та положення другого вихору в елементарній комірці. Рівноважні значення параметрів ВГ визначаються з умови мінімуму густини потенціала Гіббса. Його розклад біля положення рівноваги має в загальному випадку наступний вигляд:

$$G = G_0 + K \cdot \vec{\omega} + \sigma_{ij} u_{ij} + \frac{1}{2} T_{ij} \omega_i \omega_j + \frac{1}{2} C_{ijkl} u_{ij} u_{kl} + D_{ijk} \omega_i u_{jk} \quad (6)$$

Тут зміщення вихрів із ґратових вузлів визначаються тензором дistorсії $u_{ij} = \partial u_i / \partial x_j$, $i, j = 1, 2$ - індекси, що нумерують декартові координати векторів. Відхилення вихрів ω_i від рівноважного напрямку \vec{z} визначене двомірним вектором $\vec{\omega} = [\omega_1, \omega_2]$, K - момент сил, що діє на ґрати, ∂ - тензор пружних напружень. Головною особливістю анізотропного НІ є поява крім модулів нахилу \uparrow та модулів зсуву та стиснення \mathcal{C} перехрестних модулів нахилу-зсуву (стиснення) \mathcal{D} . Це означає, що нахил вихрів викликає деформації елементарної комірки в базисній площині і навпаки.

В разі намагнічування НІ вздовж осі анізотропії задача з допомогою масштабного перетворення координат зводиться до ізотропної. Перетворення координат полягає у зміні масштабів вздовж осей симетрії \vec{i} в $\mu_i^{1/2}$ разів. В ізотропному НІ єдиними рівноважними є правильні трикутні ВГ. Квадратні ВГ та структура типу "медові

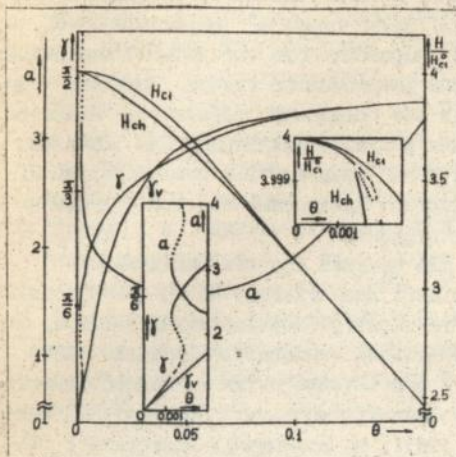
стілники", що має два вихри в елементарній комірни, відповідають рівнянням рівноваги, але не є стійкими. Анізотропія впливає на структуру ВГ таким чином. Довжини векторів трансляції ВГ \vec{A}_1 і \vec{A}_2 , а також кут Ξ поміж ними залежать від орієнтації ґратів в базисній площині. Вона задається кутом γ між вектором \vec{A}_1 і однією з осей симетрії. При зміні кута γ вектори $\vec{A}_1(\gamma)$ і $\vec{A}_2(\gamma)$ обертаються в базисній площині і утворюють еліпс з ексцентриситетом $(1 - \mu_a/\mu_b)^{1/2}$. Кут Ξ між \vec{A}_1 і \vec{A}_2 при цьому зв'язаний з кутом γ співвідношенням:

$$\cos \Xi = \cos \gamma \frac{\epsilon(1 - \epsilon\sqrt{3} \operatorname{tg} \gamma) + \operatorname{tg} \gamma(\sqrt{3 + \epsilon} \operatorname{tg} \gamma)}{[\epsilon^2(1 - \epsilon\sqrt{3} \operatorname{tg} \gamma)^2 + (\sqrt{3 + \epsilon} \operatorname{tg} \gamma)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

де $\epsilon^2 = \mu_b/\mu_a$. Енергія ВГ від кута γ не залежить. Це призводить до того, що умовам рівноваги влаштовує множина вихрових структур, що безперервно трансформуються одна в одну під час обертання ВГ в базисній площині.

В четвертій главі визначено структуру рідких ВГ в одноосному НП, що намагнічується полем, напрям якого не співпадає з напрямом осі анізотропії. В цьому випадку виродження енергії ВГ що до обертання в базисній площині зникає. Елементарна комірка має форму ромба, одна з діагоналей якого спрямована вздовж проєкції осі анізотропії на базисну площину. В НП з анізотропією типу "легка вісь" майже завжди існують правильні трикутні ВГ. Виключенням є орієнтація вихрів в напрямку, перпендикулярному "легкій" осі. Тут в екстремально малому інтервалі кутів γ відбувається стрибок кута Ξ від значення $2\pi/3$ до $\Xi = 2 \operatorname{arctg} \mu_a^{3/2}$. Пружні властивості таких ВГ майже однакові відносно різних способів їх деформування.

В НП з анізотропією "легка площина" вихри впорядковуються в ланцюжки, що орієнтовані вздовж осі анізотропії. Це відбувається завдяки інверсії магнітного поля, яка призводить до притягання вихрів один до одного. На мал. 2 зображені залежності параметрів ізольованого ланцюжка вихрів: відстань $a_{ch}(\theta)$ між вихрями в ланцюжку, кут нахилу $\gamma_{ch}(\theta)$ вихрів у ньому і порогове поле його виникнення $H_{ch}(\theta)$ - від кута нахилу θ зовнішнього магнітного поля H до осі анізотропії. Ці залежності побудовані для НП з ефективною масою $\mu_a = 0.25$. Для порівняння подані залежності поля $H_{c1}(\theta)$ і кута нахилу $\gamma(\theta)$ для ізольованого вихору. Видно, що $H_{ch}(\theta)$ завжди менше, ніж $H_{c1}(\theta)$. Це зниження порогового поля від H_{c1} до H_{ch} об-



Мал. 2

умовлене "ефектом середнього поля". При зростанні зовнішнього поля $H > H_{ch}$ найбільше змінюється відстань між ланцюжками вихрів, а відстань між вихрями в кожному ланцюжкові залишається майже без змін. Це призводить до появи двох типів пружних властивостей такої структури. Вона має найбільшу жорсткість відносно деформацій, що змінюють розташування вихрів в окремих ланцюжках. Разом з цим, жорсткість ВГ виявляється найменшою відносно зсуву їх вздовж ланцюжків та

отиснення в перпендикулярному напрямку. Такі деформації змінюють взаємне розташування ланцюжків, не займаючи їхньої структури.

У висновку сформульовані головні результати роботи, що подаються до захисту.

1. Одержаний розподіл мейсснерівського поля в двоосному НП у випадку довільної орієнтації осей анізотропії що до його поверхні.
2. Передбачене явище інверсії повздовжнього магнітного поля вихору Абрикосова в НП з великою анізотропією типу "легка площина". Визначена рівноважна орієнтація ізольованого вихору всередині і поблизу бічної поверхні анізотропного НП, одержані загальні вирази для нижнього критичного поля та поля перегріву мейсснерівського стану.
3. Одержані система рівнянь рівноваги та вирази для пружних модулів складних ВГ (що мають два вихрі в елементарній комірці). Виявлено, що під час намагнічування НП вздовж осі анізотропії незалежно від величини зовнішнього магнітного поля рівноважним є континуум ВГ, які мають однакову енергію і трансформуються одне в одного. Описаний спосіб побудови елементарної комірки такої структури, визначена її форма для різних орієнтацій комірки відносно осей анізотропії кристалу.

4. Визначена структура рідких ВГ в одноосних НП у скісному магнітному полі. У НП з анізотропією "легка площина" передбачені ВГ з ланцюжків вихрів. Виявлено, що порогове поле зародження ланцюжків є нижчим за нижнє критичне поле ізольованого вихору. Знайдено, що структура із вихрових ланцюжків має найменшу жорсткість відносно деформацій, що змінюють взаємне розташування ланцюжків. Виявлено, що в НП з анізотропією "легка вісь" реалізуються гексагональні ВГ, пружні властивості яких залишаються однаковими під час стискування або скилу ґратів в будь-якому напрямку.

У додатку подані вирази для пружних модулів складних ВГ.

Головні результати дисертації доповідались на І9 Міжнародній конференції з фізики низьких температур (Великобританія, 1990), на 26 Всесоюзній нараді з фізики низьких температур (Донецьк, 1990), на ІІ Всесоюзній конференції з високотемпературної надпровідності (Київ, 1989), на Другому Всесоюзному симпозіумі "Неоднорідні електронні стани" (Новосибірськ, 1987), на Всесоюзній конференції "Фізика і хімія високотемпературної надпровідності (теоретичні проблеми)" (Харків, 1989), на республіканській конференції "Металофізика надпровідників" (Київ, 1986), на ХХ науково-технічній конференції молодих дослідників ФТІНТ АН УРСР (Харків, 1989) і опубліковані в наступних роботах:

1. Гришин А. М., Мартынович А. Ю., Ямпольский С. В. Инверсия магнитного поля и цепочки вихрей в анизотропных сверхпроводниках // ЖЭТФ. - 1990. - 97, вып. 6. - С. 1930-1946.
2. Grishin A. M., Martynovich A. Yu., Yampolskii S. V. Magnetic field inversion and vortex chains in anisotropic superconductors // Physica B. - 1990. - 165&166, pt. 2. - P. 1103-1104.
3. Гришин А. М., Мартынович А. Ю., Ямпольский С. В. Структура и упругие модули вихревых решеток в анизотропных сверхпроводниках // ЖЭТФ. - 1992. - 101, вып. 2. - С. 649-670.
4. Гришин А. М., Мартынович А. Ю., Ямпольский С. В. Магнитные потоки в анизотропных лондоновских сверхпроводниках. - Препринт ДонФТИ № 88-12(149). - Донецк, 1988. - 48 с.
5. Гришин А. М., Мартынович А. Ю., Ямпольский С. В. Инверсия магнитного поля вихря в кристаллах ВТСП // В кн.: ІІ Всесоюзная конференция по високотемпературной сверхпроводимости. Тезисы докладов. Т. 2. - Киев, 1989. - С. 62-63.
6. Артемов А. Н., Гришин А. М., Ямпольский С. В. Электромагнитные

свойства слоистых сверхпроводников // В кн.: Второй Всесоюзный симпозиум "Неоднородные электронные состояния". Тезисы докладов. - Новосибирск, 1987. - С. 72-73.

7. Гришин А. М., Мартынович А. Ю., Ямпольский С. В. Решетки вихрей в анизотропных сверхпроводниках // В кн.: Всесоюзная конференция "Физика и химия высокотемпературной сверхпроводимости (теоретические проблемы)". - Харьков, 1989. - С. 63-69.
8. Гришин А. М., Ямпольский С. В. Магнитные свойства анизотропных сверхпроводников // В кн.: Тезисы конференции "Металлофизика сверхпроводников". - Киев, 1986. - С. 351.
9. Мартынович А. Ю., Ямпольский С. В. Магнитные свойства анизотропного лондонского сверхпроводника // В кн.: XX научно-техническая конференция молодых исследователей ФТИНТ АН УССР (тезисы докладов). - Харьков, 1989. - С. 62-63.

ЛИТЕРАТУРА

1. Звездин А. К., Попков А. Ф. // Электронная промышленность. -
2. Булаевский Л. П. // УФН. - 1976, - II6, вып. 3. - С. 449-484.
3. Винников Л. Я., Григорьева И. В., Гуревич Л. А., Осипьян Ю. А. // Письма в ЖЭТФ. - 1989. - 49, N 2. - С. 83-86.
4. Dolan G. J., Holtzberg F., Feild C., Dinger T. R. // Phys. Rev. Lett. - 1989. - 62, N 18. - P. 2184-2187.



Підп. до друку 5.11.93. Формат 60x84 1/16. Папір друк. № 2.
Обсетний друк. Умовн. друк. арк. 0,46. Умовн. фарб. - відб. 0,69.
Облк. - вид. арк. 0,55. Тираж 100 прим. Замовлення № 4-6974.
ДонДУ, 340055, Донецьк, пр. Тезтральний, 13

ДМОП, 340050, Донецьк, вул. Артема, 96

46446
ЛНБ ім. В. Стефанька
АН України

AB 28920

AB 28.920