

Д.М.Сергеев^{1,2}, Г.Т.Оспанова², А.О.Жұмахан², Қ.Ш.Шұңқеев²

¹Әуе қорғанысы күштерінің Әскери институты, Ақтөбе;
²Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік мемлекеттік университеті
 (E-mail: serdau@rambler.ru)

Екі зоналы асқын өткізгіштерде аралық және аралас күйлердің қатар болу мүмкіндігі туралы (магний дибориді негізінде)

Мақалада магний дибориді тәрізді Абрикосов критерийі орындалмайтын $\left(\kappa_1 < \frac{1}{\sqrt{2}}, \kappa_2 > \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ екі

зоналық асқын өткізгіштердің типін анықтауға арналған жұмыстарға шолу жасалған. «1-типті асқын өткізгіш–диэлектрик–2-типті асқын өткізгіш» джозефсондық ауысымы негізінде қарастырылып отырған асқын өткізгіштердің типі $|\alpha_1|, |\alpha_2|$ феноменологиялық коэффициенттері мен температураға тәуелді екендігі көрсетілген. Осыған орай магний диборидінде асқын өткізгіштіктің жаңа типі — «1,5-типті асқын өткізгіштіктің» орын алуы әлі нақты дәлелденбеген. Біздің ойымызша, бұл құбылыс сыртқы әлсіз магнит өрісінің әсерінен асқын өткізгіштерде аралық және аралас күйлердің қатар болуынан пайда болуы мүмкін.

Кілт сөздер: екі зоналы асқын өткізгіш, аралық күй, аралас күй, магний дибориді (MgB₂), Гинзбург-Ландау параметрі, 1-және 2-типті асқын өткізгіштер.

Асқын өткізгіштерді микроскопиялық сипаттау үшін Бардин-Купер-Шриффер (БКШ) теориясында энергетикалық саңылау Δ негізгі параметр ретінде пайдаланылса ($0 \leq T < T_c$ аралығында), Гинзбург-Ландау (ГЛ) теориясы арқылы феноменологиялық сипаттауда ($T \approx T_c$) реттелу параметрі ψ қолданылатындығы белгілі [1,2]. ГЛ теориясына сәйкес еркін энергия функционалы келесі теңдеумен сипатталады [3]:

$$F = F_n + \alpha |\psi|^2 + \frac{1}{2} \beta |\psi|^4 + \frac{1}{2m} \left| \left(-i\hbar \nabla - \frac{2e}{c} A \right) \psi \right|^2 + \frac{B^2}{8\pi}, \quad (1)$$

мұндағы F_n — қалыпты фазадағы еркін энергия; α, β — асқын өткізгіштікті сипаттайтын феноменологиялық коэффициенттер; m — квазибөлшек массасы; \hbar — Планк тұрақтысы; e — электрон заряды; c — жарық жылдамдығы; B — магнит өрісінің индукциясы; A — магнит өрісінің вектор-потенциалы; *теңдеудегі градиентті қосылғыш* — асқын өткізгіш электрондардың кинетикалық энергиясының тығыздығы. ГЛ теориясында (1) теңдеуді асқын өткізгіштерді сипаттайтын екі ұзындық масштабы арқылы түрлендіруге болады [3, 4]. Олар — когеренттік ұзындығы ξ және магнит өрісінің ену тереңдігі λ :

$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m|\alpha(T)}}; \quad (2)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{mc^2}{4\pi n_s e^2}} = \sqrt{\frac{mc^2 \beta}{16\pi^2 e^2 |\alpha(T)}}; \quad (3)$$

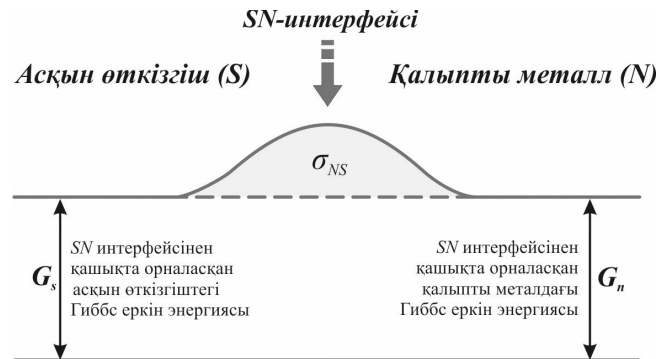
мұндағы n_s — асқын өткізгіш электрондардың тығыздығы (концентрациясы).

Асқын өткізгіштердегі екі негізгі ұзындық масштабтарының қатынасы ((2) және (3) өрнектер қатынасы) Гинзбург-Ландау параметрі деп аталады [4, 5]:

$$\kappa = \lambda / \xi. \quad (4)$$

Абрикосов критерийіне сәйкес (4) қатынас және соған байланысты «қалыпты металл (N)–асқын өткізгіш (S)» интерфейсінің энергиясы σ_{NS} оң немесе теріс мән қабылдауы бойынша асқын

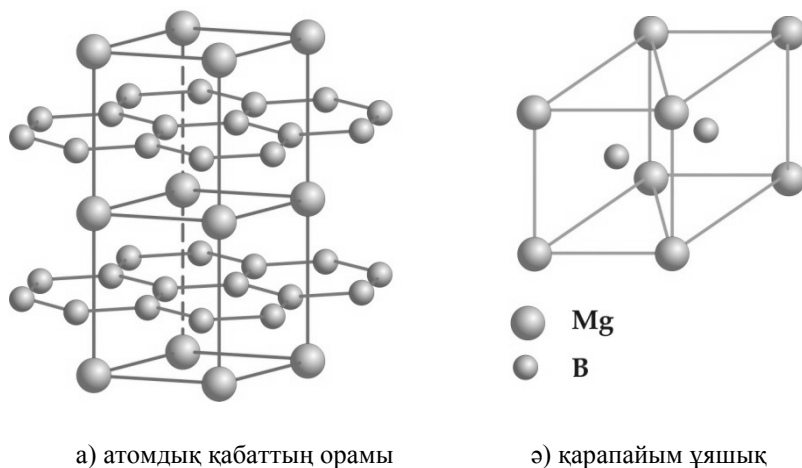
өткізгіштердің типтері анықталады [5]: егер $\kappa < \frac{1}{\sqrt{2}}$, $\sigma_{NS} > 0$ болса, 1-типті асқын өткізгішікке жатады, ал $\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}}$, $\sigma_{NS} < 0$ теңсіздіктері орындалғанда, 2-типті асқын өткізгішікке жатады (1-сур.).



1-сурет. «Қалыпты металл — асқын өткізгіш» интерфейсінің энергиясы

2001 ж. магний диборидінде MgB_2 жоғары критикалық температурада (шамамен 39 К) асқын өткізгіштік құбылысы ашылды [6, 7]. Құрылысы қарапайым қосынды үшін бұл күтпеген жағдай болатын (2-сур.). Көптеген әр түрлі эксперименттік техникаларды қолдану арқылы салыстырмалы жоғары критикалық температура магний диборидінде бір емес, екі энергетикалық саңылаудың болуынан екендігі дәлелденді ($\Delta_\sigma \approx 7,1$ meV и $\Delta_\pi \approx 2,2$ meV) (3-сур.) [8–10]. MgB_2 Ферми бетінен екі зонаның орналасуын көруге болады: екі үшөлшемді (3D) π -зона электрон және кемтік тәрізді тасымалдағыштармен және екі өлшемді (2D) σ -зона кемтік тәрізді тасымалдағышпен. Электрон тәрізді тасымалдағышты π -зона ортада X іспетті цилиндр түрінде көрсетілген, ал кемтік тәрізді π -зона Ферми беткейінің үстін және астын қамти орналасқан (3-сур., ә). Ферми беткейінің төрт бұрышында екіөлшемді σ -зона орналасқан.

Магний диборидінде асқын өткізгіштіктің ашылуы екі зоналы асқын өткізгіштердің теориялық және эксперименттік зерттелуіне арналған басылымдардың санын күрт өсірді [11–17]. Екі зоналы асқын өткізгіштерге байланысты көптеген шешімін таппаған есептердің ішінде өзекті және әлі күнге дейін талас тудырып келе жатқан мәселелердің бірі – мұндай асқын өткізгіштерге магнит өрісінің әсері.



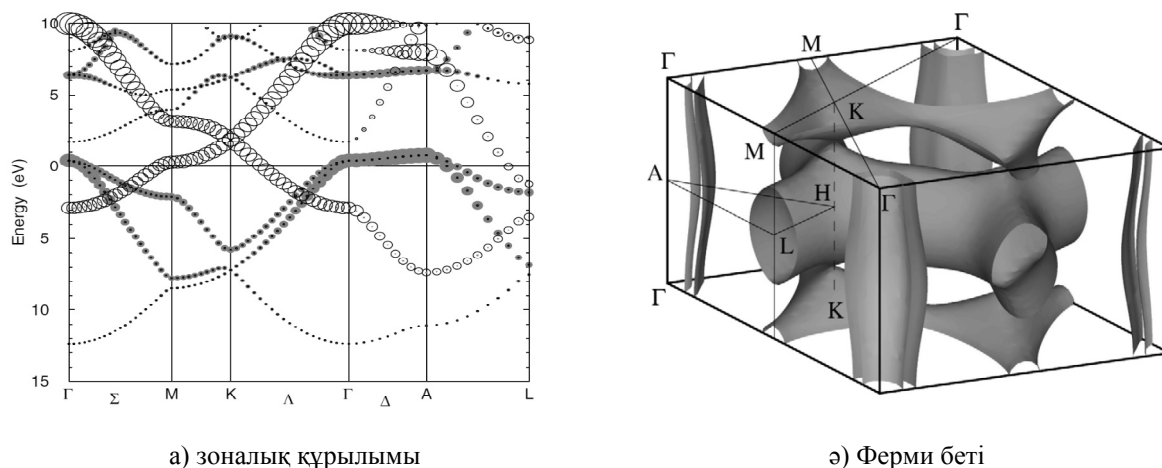
2-сурет. Магний диборидінің құрылымы

Екі зоналы асқын өткізгіштердің қасиеттерін толық сипаттайтын теория әлі жоқ, бірақ жалпыланған БКШ және ГЛ теориялары магний диборидінің кейбір қасиеттерін жақсы сипаттайды.

MgB₂ жалпыланған БКШ теориясында негізгі параметр ретінде екі энергетикалық саңылау Δ₁, Δ₂, ал ГЛ теориясында екі реттелу параметрі ψ₁, ψ₂ қолданылады. Сол себепті MgB₂ қасиетін критикалық температура маңында сипаттайтын ГЛ теңдеуі бір зоналы асқын өткізгіштер теңдеуінен (1) өзгеше:

$$F = F_n + \alpha_1 |\psi_1|^2 + \frac{1}{2} \beta_1 |\psi_1|^4 + \frac{1}{2m_1} \left| \left(-i\hbar\nabla - \frac{2e}{c} A \right) \psi_1 \right|^2 + \alpha_2 |\psi_2|^2 + \frac{1}{2} \beta_2 |\psi_2|^4 + \frac{1}{2m_2} \left| \left(-i\hbar\nabla - \frac{2e}{c} A \right) \psi_2 \right|^2 - \gamma (\psi_1^* \psi_2 + \psi_1 \psi_2^*) + \frac{B^2}{8\pi}, \quad (5)$$

мұндағы 1 және 2 индексімен берілген параметрлер сәйкесінше бірінші және екінші зоналарға тиесілі.



3-сурет. Магний диборидінің электрондық құрылымы [8]

ГЛ теңдеуіне (5) сәйкес екі зоналы асқын өткізгіштер қасиеттері екі ψ₁, ψ₂-функциялары арқылы айқындалады, немесе мұндай асқын өткізгіштерде екі асқын өткізгіш конденсат бар деген сөз. Демек, екі зоналы асқын өткізгіштер әр зонаға тиесілі төрт ұзындық масштабы арқылы сипатталады: екі когеренттілік ұзындықтары ξ₁, ξ₂

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m_1 |\alpha_1(T)|}}; \quad (6)$$

$$\xi_2 = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m_2 |\alpha_2(T)|}}; \quad (7)$$

және екі магнит өрісінің ену тереңдіктері λ₁, λ₂:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{m_1 c^2}{4\pi n_{s1} e^2}} = \sqrt{\frac{m_1 c^2 \beta_1}{16\pi^2 e^2 |\alpha_1(T)|}}; \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{m_2 c^2}{4\pi n_{s2} e^2}} = \sqrt{\frac{m_2 c^2 \beta_2}{16\pi^2 e^2 |\alpha_2(T)|}}. \quad (9)$$

Олай болса, (4, 6–9)-формуларына сәйкес екі зоналы асқын өткізгіштерге екі Гинзбург-Ландау параметрлері тән шартты бірінші зона үшін

$$\kappa_1 = \lambda_1 / \xi_1; \quad (10)$$

шартты екінші зона үшін

$$\kappa_2 = \lambda_2 / \xi_2. \quad (11)$$

(10, 11)-формуларымен берілген екі Гинзбург-Ландау параметрлеріне ие мұндай асқын өткізгіштерді қай типке жатқызуға болады? Әрине, егер төмендегі шарт орындалса:

$$\kappa_1 = \frac{\lambda_1}{\xi_1} < \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \kappa_2 = \frac{\lambda_2}{\xi_2} < \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (12)$$

онда SN-интерфейсі энергиясының мәні оң болатындығы $\sigma_{NS} > 0$ күмәнсіз, бұл жағдайда екі зоналы асқын өткізгішті бірінші типке жатқызамыз, ал егер (12)-өрнекке қарама-қарсы келесі шарт орындалса:

$$\kappa_1 = \frac{\lambda_1}{\xi_1} > \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \kappa_2 = \frac{\lambda_2}{\xi_2} > \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (13)$$

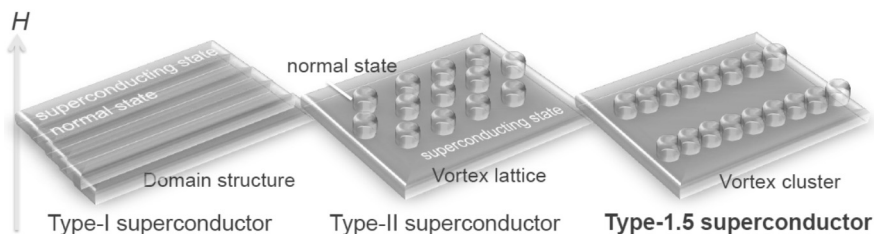
онда SN-интерфейсі энергиясының мәні теріс болатындығы $\sigma_{NS} < 0$ күмәнсіз, бұл жағдайда екі зоналы асқын өткізгішті екінші типке жатқызамыз. Бірақ екі зоналы асқын өткізгіш магний диборидінде (12), (13)-шарттар орындалмайды. Бірінші зона (π -зона) үшін $\lambda_1 = \lambda_\pi \approx 33,6$ нм, $\xi_1 = \xi_\pi \approx 51$ нм, (10)-формулаға сәйкес бірінші ГЛ параметрі: $\kappa_1 \approx 0,6588 < \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7071$. Екінші зона (σ -зона) үшін $\lambda_2 = \lambda_\sigma \approx 47,8$ нм, $\xi_2 = \xi_\sigma \approx 13$ нм, (11) формулаға сәйкес екінші ГЛ параметрі $\kappa_2 \approx 3,6769 > \frac{1}{\sqrt{2}}$. Олай болса,

$$\kappa_1 = \frac{\lambda_1}{\xi_1} < \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \kappa_2 = \frac{\lambda_2}{\xi_2} > \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

шарт орындалса, асқын өткізгішті қай типке жатқызуға болады: бірінші ме, әлде екінші ме? Бұл сұрақ аясында физиктердің арасында әлі ортақ келісім жоқ, тартыс жалғасуда [18–21].

Е. Babaev пен М. Speight [22] жұмысында ГЛ теориясы аясында (14) теңсіздіктер орындалған жағдайда асқын өткізгіштерде «жартылай Мейсснер күйі» орын алатындығы келтірілген. Артынша «жартылай Мейсснер күйі» термині «1,5-типті асқын өткізгіштік» терминіне ауыстырылды [23–29]. Олардың ойынша, екі немесе көп зоналы асқын өткізгіштерде (14) теңсіздіктер орындалғанда бірінші де, екінші де типке жатпайтын жаңа күй — «1,5-типті асқын өткізгіштік» күйі пайда болады. Жаңа күйде сыртқы магнит өрісінің әсерінен екінші типті асқын өткізгіштердегідей үшбұрыш тәрізді құйынды тор пайда болмайды, оның орнына құйынды молекулалар (кластер) жиынтығы қалыптасатындығымен ерекшеленеді. Артынша, V. Moshchalkov жетекшілігімен «1,5-типті асқын өткізгіштік» күйі экспериментте байқалғаны туралы еңбектер жарияланды [23–25, 27], бірақ бұл эксперимент нәтижелерімен келіспейтін немесе «1,5-типті асқын өткізгіштер» болуы мүмкін еместігі туралы қарсы пікірлер айтылып [19; 30, 31], ғалымдар көзқарасы екіге бөлінді.

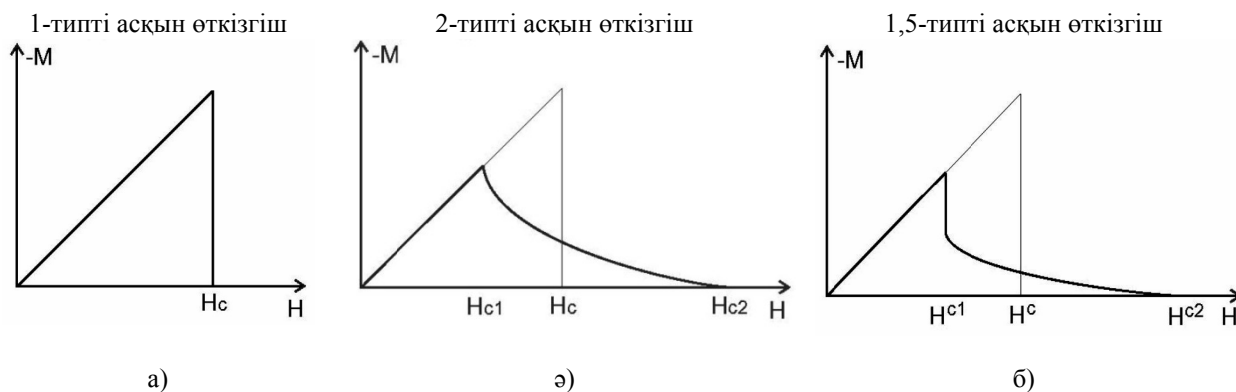
V. Moshchalkov жетекшілігімен жүргізілген эксперименттерде [23–25] Е. Babaev пен М. Speight жұмысындағы [22] болжам толықтай қолдау тапты немесе магнит өрісінің әсерінен 1,5-типті асқын өткізгіштерде құйынды молекулалар тәрізді бөлшектер жиналып, кластерлер құрайтындығы көрсетілген (4-сур.), әрі 1,5-типті асқын өткізгіштіктің магниттелу заңдылықтары бізге белгілі типтерден өзгеше екендігі анықталған (5-сур.).



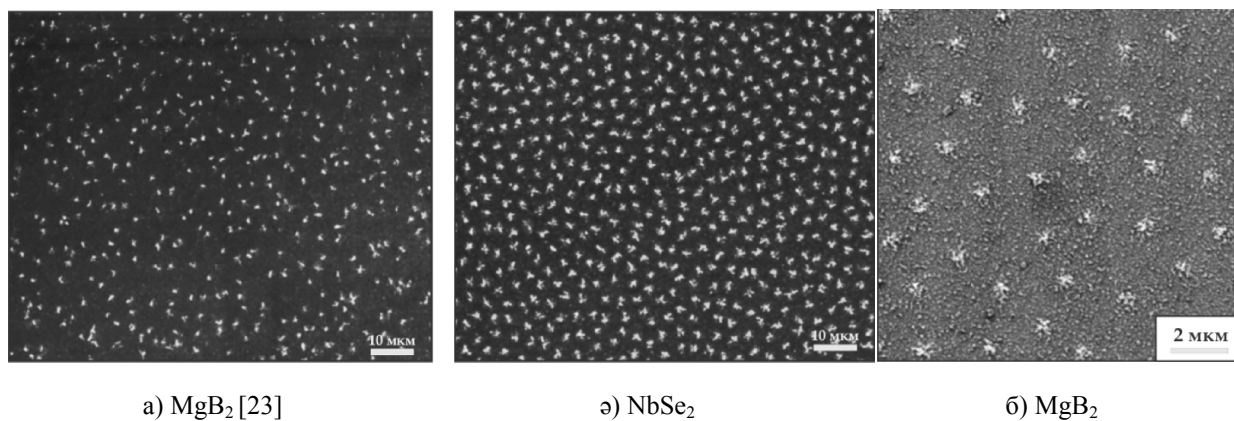
4-сурет. 1-, 2- және мүмкін 1,5-типті асқын өткізгіштердің магнит өрісімен әсерлесуі [24].

6-суретте сыртқы магнит өрісіндегі 2-типті және мүмкін 1,5-типті асқын өткізгіштерде пайда болатын құйындар құрылымы көрсетілген. MgB₂ сыртқы магнит өрісі 1 Э болғанда құйын құрылымы

біркелкі еместігі көрініп тұр. NbSe_2 монокристалында құйындар дұрыс Абрикосовтың үшбұрыштық торын құрайды.

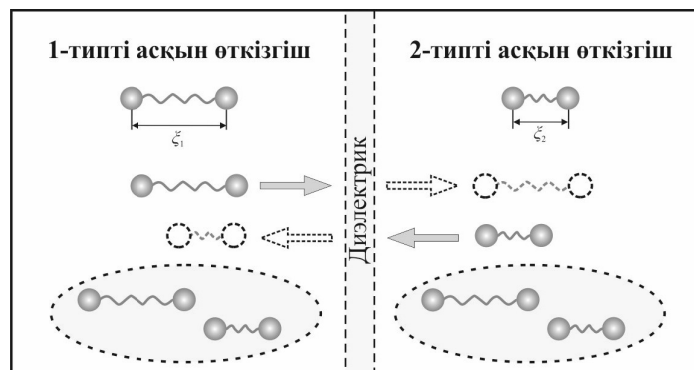


5-сурет. Әр түрлі типтердегі асқын өткізгіштердегі магниттелу заңдылықтары (сызба түрінде) [29]



6-сурет. Сыртқы магнит өрісінің әсерінен асқын өткізгіштерде пайда болатын құйындар құрылымы ($T = 4,2 \text{ K}$) [23, 32]

1,5-типті асқын өткізгіштердің моделін 1 және 2 типті асқын өткізгіштерден тұратын джозефсон ауысымы түрінде қарастыруға болады (7-сур.). Мұнда 1-типті асқын өткізгіш $\Delta_1, \xi_1, \Psi_1, \lambda_1$ параметрлері, ал 2-типті асқын өткізгіш $\Delta_2, \xi_2, \Psi_2, \lambda_2$ параметрлері арқылы сипатталған [33]. Қарастырылып отырған джозефсон құрылымында асқын өткізгіш электрондар 1-типті асқын өткізгіш аймағынан 2-типті асқын өткізгіш аймағына (және керісінше) туннелденуінен жоғарыда аталған параметрлердің араласуына әкеледі.



«1 типті асқын өткізгіш — диэлектрик — 2 типті асқын өткізгіш» ауысымы

7-сурет. Әр түрлі типті асқын өткізгіштерден тұратын джозефсон ауысымы

Қосұйықтық модельге сәйкес асқын өткізгіштерде еркін электрондар концентрациясы асқын өткізгіш n_s және қалыпты n_n электрондар қосындысынан тұрады: $n = n_s + n_n$ [34]. Осыған ұқсатып, шартты түрде 1,5-типті асқын өткізгіштердегі асқын өткізгіш электрондар концентрациясы 1 (n_{s1}) және 2 типті асқын өткізгіш электрондар (n_{s2}) қосындысынан тұрады деп алайық:

$$n_{s1,5} = n_{s1} + n_{s2}. \quad (15)$$

(15) шартқа сәйкес, келесі теңсіздік орындалғанда:

$$n_{s1} \gg n_{s2}, \quad (16)$$

1-типті асқын өткізгіштердің қасиеттері басым болады, ал, керісінше,

$$n_{s1} \ll n_{s2}, \quad (17)$$

2-типті асқын өткізгіштердің қасиеттері басым байқалуы тиіс.

Олай болса, 1,5-типті асқын өткізгіштердің қасиеттері келесі шарт орындалғанда ғана көрінеді:

$$n_{s1} \approx n_{s2}. \quad (18)$$

(14)-теңсіздікті түрлендіріп, келесі түрде жазайық:

$$\frac{\kappa_2}{\kappa_1} > 1. \quad (19)$$

Бұл қатынасты (6–9) формулалары арқылы анықталатын когеренттілік ұзындықтары ξ_1, ξ_2 мен магнит өрісінің ену терендіктері λ_1, λ_2 мәндерін және (10, 11) Гинзбург-Ландау параметрлерін есепке ала отырып, түрлендірейік

$$\frac{\kappa_2}{\kappa_1} \approx \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\sqrt{n_{s2}}}{\sqrt{n_{s1}}} \cdot \frac{|\alpha_1(T)|}{|\alpha_2(T)|} > 1. \quad (20)$$

(18)-шарт орындалса және $m_1 \approx m_2$:

$$\frac{\kappa_2}{\kappa_1} \propto \frac{|\alpha_1(T)|}{|\alpha_2(T)|}. \quad (21)$$

(21)-формуладан (14)-шарт орындалатын асқын өткізгіштердің қай типке жататындығы $|\alpha_1(T)|, |\alpha_2(T)|$ феноменологиялық коэффициенттері мен температураға тәуелді екені көрініп тұр.

Сыртқы магнит өрісінің әсерінен 1-типті асқын өткізгіштерде аралық күй (4-сур., а), ал 2-типті асқын өткізгіштерде аралас күй байқалатыны белгілі (4-сур., ә). Бұл күйлер сәйкесінше Абрикосов критерийі арқылы анықталады. 1-типті асқын өткізгіштерге Менделеев кестесіндегі асқын өткізгіш элементтер жатса, 2-типті асқын өткізгіштерге қорытпалар, интерметаллидті қосылыстар және жоғары температуралы асқын өткізгіштер енеді. Бірақ кейбір асқын өткізгіш элементтерде Nb, V, Te ГЛ параметрі үшін $\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}}$ теңсіздігі орындалады немесе бұлар — 2-типті асқын өткізгіштер.

Ал кейбір қорытпаларда, мысалы, In+2%Pb ($T = 2,67$ К) ГЛ параметрі $\kappa \approx 0,3 < \frac{1}{\sqrt{2}}$, яғни, 1-типті асқын өткізгішке жатқызуымыз керек. Сондай-ақ (21)-формулаға сәйкес температура төмендегенде ГЛ параметрінің κ мәні өсуінен болатын салдарға тоқталып өтейік: ваннадийде V температура абсолюттік нөлге жақындағанда $\kappa \approx 1,5$; Pb_{0,99}Tl_{0,01} қорытпасында $T = 7,2$ К болғанда — $\kappa \approx 0,58$, ал $T = 4,2$ К болғанда $\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}}$ [35].

H.Träuble мен U.Essmann ертедегі жұмысында Pb+4%In қорытпасы мен Nb монокристалының магнит өрісіндегі сипаттамаларын зерттеген [36]. Бір қызығы, авторлар әлсіз магнит өрісінде квантталған жіп тәрізді магнит ағымы кластер құрайтынын (немесе әркелкі түйіндер түзетіндігін) электрондық микроскоп көмегімен анықтаған. Бұл құбылысты асқын өткізгіштерде аралық және аралас күйлердің қатар болуынан пайда болған құбылыс деп түсіндіруге болады. V.Moshchalkov жетекшілігімен жүргізілген эксперименттерде магний диборидінде байқалатын құйынды

молекулалар тәрізді бөлшектердің жиналуы немесе квантталған жіп тәрізді магнит ағымы кластер құрайтындығы аралық және аралас күйлердің қатар болуынан пайда болған құбылыс ретінде түсіндіруге болатын тәрізді. Өйткені MgB_2 күйінды молекулалар тәрізді бөлшектердің жинақталуы әлсіз магнит өрісінде ғана байқалады (аталмыш экспериментте — 1 Э). Сыртқы магнит өрісін ары қарай жоғарлатқанда күйінды тор құрылымы зор өзгеріске ұшырайды: ~ 5 Э — жоғары және төмен тығыздықты күйінды жолақтардың алмасуы байқалады; ~ 10 Э — күйінды біркелкі қалыпқа келеді. Л.Я.Винников тобының жұмысында [32] сыртқы магнит өрісінің мәні 4 Э болғанда MgB_2 Абрикосовтың үшбұрыштық құрылымы тәрізді күйінды тор пайда болатындығы (6-сур., б), сол себепті магний диборидін 2 типті асқын өткізгішке жатқызу керек делінсе, одан кейін жарыққа шыққан J.Geyer, R.M.Fernandes, V.G.Kogan және J.Schmalian «Екі зоналы асқын өткізгіштердің интерфейстік энергиясы» «Interface energy of two band superconductors» атты жұмысында асқын өткізгіштерді екі типке бөлу «қалыпты металл — асқын өткізгіш» интерфейсінің энергиясы σ_{NS} оң немесе теріс мән қабылдауы бойынша жүзеге асады, ал $\sigma_{ns} = 0$ мүмкін еместігін көрсете отыра, магний диборидінде $\sigma_{NS} > 0$, сол себепті 1-типті асқын өткізгіш деген тұжырымға келеді [30]. Осының бәрі мақалада қарастырылып отырған джозефсон моделіндегі (16–18)-шарттардың орындалуына байланысты MgB_2 типі өзгеріп отыратындығын көрсететін сияқты. Яғни, екі зоналы асқын өткізгіште (14)-теңсіздіктер орын алған жағдайда, асқын өткізгіштің типін анықтауда белгілі Абрикосов критерийі жұмыс жасамайды. Сондықтан мұндай асқын өткізгіштердің типін тек эксперименттік әдіс арқылы (нақты температурада сыртқы магнит өрісімен әсерлесуіне байланысты) анықтаған жөн.

Сонымен, «1,5-типті асқын өткізгіштіктің» болуына қарсы мәліметтерді келтірейік:

- аталмыш құбылыс V. Moshchalkov жетекшілігімен жүргізілген эксперименттерден басқа эксперименттерде әзірге байқалған жоқ (мысалы, [30]);
- магний диборидінде пайда болатын әркелкі күйінды тор әлсіз сыртқы магнит өрісінде ғана орын алады (мысалы, [23–25]);
- SN интерфейсінің энергиясы нөлге тең емес $\sigma_{ns} \neq 0$, сондықтан асқын өткізгіштіктің жаңа түрін анықтайтын критерий толық орындалмайды (мысалы, [30]);
- бұрынғы эксперименттік жұмыстардың нәтижесімен сәйкес келмейді (мысалы, [32, 11]).

Қорыта келсек, магний диборидінде асқын өткізгіштің жаңа түрі — «1,5-типті асқын өткізгіштіктің» орын алуы қате пікір, бұл құбылысты сыртқы әлсіз магнит өрісінің әсерінен асқын өткізгіштерде аралық және аралас күйлердің қатар болуынан пайда болған құбылыс деп түсіндіруге болады.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Bardeen J., Cooper L.N., Schriffer J.R. Theory of Superconductivity // Phys. Rev. — 1957. — Vol. 108. — P. 1175–1204.
- 2 Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д. К теории сверхпроводимости // ЖЭТФ. — 1950. — Т. 20. — С. 1064–1081.
- 3 Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. — М.: МЦНМО, 2000. — 398 с.
- 4 Де Жен П. Сверхпроводимость металлов и сплавов. — М.: Мир, 1968. — 280 с.
- 5 Abrikosov A.A. On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group // Sov. Phys. JETP. — Vol. 5. — No. 6. — P. 1174–1182.
- 6 Nagamatsu J., Nakagawa N., Muranaka T., Zenitani Y., Akimitsu J. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride // Nature. — 2001. — Vol. 410. — P. 63–64.
- 7 Ивановский А.Л. Сверхпроводящий MgB_2 и родственные соединения: синтез, свойства, электронная структура // Успехи химии. — 2001. — Вып. 70 (9). — С. 811–829.
- 8 Mazin I.I., Antropov V.P. Electronic structure, electron-phonon coupling, and multiband effects in MgB_2 // Physica C. — 2003. — Vol. 385. — P. 49–65.
- 9 Choi H.J., Roundy D., Sun H., Cohen M.L., Louie S.G. The origin of the anomalous superconducting properties of MgB_2 // Nature. — 2002. — Vol. 418. — P. 758–760.
- 10 Ивановский А.Л. Зонная структура и свойства сверхпроводящего MgB_2 и родственных соединений // ФТТ. — 2003. — Т. 45. — С. 1742–1769.
- 11 Шабанова Н.П., Головашкин А.И. Взаимосвязь критического магнитного поля H_c и остаточного удельного сопротивления в двузонном сверхпроводнике MgB_2 // ФТТ. — 2009. — Т. 51. — С. 637–642.
- 12 Максимов Е.Г., Каракозов А.Е., Горшунев Б.П., Пономарев Я.Г., Жукова Е.С., Дрессел М. Теоретический анализ двухщелевой сверхпроводимости диборидов магния и пниктидов железа в обобщенной α -модели // ЖЭТФ. — 2012. — Т. 142. — С. 282–293.

- 13 *Гриненко В.А.* Верхнее критическое поле ячеистого диборида магния // Письма в ЖЭТФ. — 2007. — Т. 85. — С. 756–760.
- 14 *Сидоров С.Л., Таренков В.Ю., Дьяченко А.И., Хачатурова Т.Я.* Избыточный ток в контактах на основе диборида магния // ФТТ. — 2007. — Т. 49. — С. 769–772.
- 15 *Фисун В.В., Тринумень Л.Ю., Янсон И.К.* Низкочастотные фононы в микроконтактном спектре MgB_2 // Физика низких температур. — 2005. — Т. 31. — № 10. — С. 1104–1109.
- 16 *Yanson I.K., Naidyuk Yu.G.* Advances in point-contact spectroscopy: two-band superconductor MgB_2 // Physics of low temperature. — 2004. — Vol. 30. — No. 4. — P. 355–372.
- 17 *Krivoruchko V.N., D'yachenko A.I., Tarenkov V.Yu.* Andreev-spectroscopy study of unconventional superconductivity in $MgB_2:(La,Sr)MnO_3$ nanocomposite // Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur. — 2014. — Vol. 40. — No. 10. — P. 1147–1154.
- 18 *Babaev E., Silaev M.* Comment on «Ginzburg-Landau theory of two-band superconductors: Absence of type-1.5 superconductivity» // Phys. Rev. B. — Vol. 86. — P. 16501.
- 19 *Kogan V.G., Schmalian J.* Reply to «Comment on ‘Ginzburg-Landau theory of two-band superconductors: Absence of type-1.5 superconductivity’» // Phys. Rev. B. — Vol. 86. — P. 016502.
- 20 *Garaud J., Agterberg D.F., Babaev E.* Vortex coalescence and type-1.5 superconductivity in Sr_2RuO_4 // Phys. Rev. B. — Vol. 86. — P. 060513(R).
- 21 *Dolocan V.O., Veauvy C., Servant F., Lejay P., Hasselbach K., Liu Y., Maily D.* Observation of Vortex Coalescence in the Anisotropic Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4 // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Vol. 95. — P. 097004.
- 22 *Babaev E., Speight M.* Semi-Meissner state and neither type-I nor type-II superconductivity in multicomponent superconductors // Phys. Rev. B. — 2005. — Vol. 72. — P. 180502 (R).
- 23 *Moshchalkov V.V., Menghini M., Nishio T., Chen Q.H., Silhanek A.V., Dao V.H., Chibotaru L.F., Zhigadlo N.D., Karpinski J.* Type-1.5 Superconductivity // Phys. Rev. Lett. — 2009. — Vol. 102. — P. 117001–117004 [arXiv:0902.0997].
- 24 *Moshchalkov V.V.* Type-1.5 Superconductivity: abstract Book International Workshop on Superconductivity in Reduced Dimensions, Salzburg. — Austria, 2010. — P. 52.
- 25 *Moshchalkov V.V.* Type-1.5 Superconductivity: abstract Book International Conference on Superconductivity and Magnetism ICSM-2010. — Antalya, Turkey, 2010. — P. 8.
- 26 *Babaev E., Carlström J., Speight M.* Type-1.5 Superconducting State from an Intrinsic Proximity Effect in Two-Band Superconductors // Phys. Rev. Lett. — 2010. — Vol. 105. — P. 67003.
- 27 *Nishio T., Dao V.H., Chen Q.H., Chibotaru L.F., Kadowaki K., Moshchalkov V.V.* Scanning SQUID microscopy of vortex clusters in multiband superconductors // Phys. Rev. B. — 2010. — Vol. 81. — P. 20506(R).
- 28 *Speight M.* Long Range Vortex Interactions and Type 1.5 Superconductivity // AIP Conf. Proc. — 2011. — Vol. 1389. — P. 660–663.
- 29 *Babaev E., Carlström J., Garaud J., Silaev M., Speight J.M.* Type-1.5 superconductivity in multiband systems: Magnetic response, broken symmetries and microscopic theory — A brief overview // Physica C. — 2013. — Vol. 479. — P. 2–14.
- 30 *Geyer J., Fernandes R.M., Kogan V.G., Schmalian J.* Interface energy of two band superconductors // Phys. Rev. B. — 2010. — Vol. 82. — P. 104521. [arXiv:1007.2794].
- 31 *Kogan V.G., Schmalian J.* Two-band superconductors near T_c // [arXiv:1008.0581] (August, 3, 2010).
- 32 *Vinnikov L.Ya., Karpinski J., Kazakov S.M., Jun J., Andereg J., Bud'ko S.L., Canfield P.C.* Vortex structure in MgB_2 single crystals observed by the Bitter decoration technique // Phys. Rev. B. — 2003. — Vol. 67. — P. 092512.
- 33 *Сергеев Д.М., Оспанов М.К.* Джозефсоновская модель сверхпроводников 1,5 рода // Изв. вузов. — Физика. — 2013. — Т. 56. — № 8 (3). — С. 128–130.
- 34 *Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.* The Feynman Lectures on Physics. — Mir (Addison Wesley), 1977. — Vol. 9. — 254 p.
- 35 *Антонов Ю.Ф.* О сосуществовании промежуточного и смешанного состояний в сверхпроводниках // Электрон. науч. журн. «Исследовано в России». — [ЭР]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/059.pdf>
- 36 *Träuble H., Essmann U.* Die Beobachtung magnetischer Strukturen von Supraleitern zweiter Art // Physica Status Solidi. — 1967. — Vol. 20. — P. 95–111.

Д.М.Сергеев, Г.Т.Оспанова, А.О.Жумахан, К.Ш.Шункеев

О возможном сосуществовании промежуточного и смешанного состояний в двузонных сверхпроводниках (на примере диборида магния)

В статье проведен обзор работ, посвященных определению типа двузонных сверхпроводников (подобные дибориду магния), где нарушается критерий Абрикосова $\left(\kappa_1 < \frac{1}{\sqrt{2}}, \kappa_2 > \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$. В рамках джозефсоновской модели «сверхпроводник 1-типа — диэлектрик — сверхпроводник 2-типа» показано, что тип таких сверхпроводников зависит от значений феноменологических коэффициентов $|\alpha_1|$, $|\alpha_2|$ и температуры. В этой связи понятие о новом типе сверхпроводников в дибориде магния — «полупроводниковой сверхпроводимости» представляется преждевременным. На наш взгляд, наблюдающийся эффект в подобных сверхпроводниках возникает за счет сосуществования промежуточного и смешанного состояний под воздействием внешнего слабого магнитного поля.

D.M.Sergeyev, G.T.Ospanova, A.O.Zhumakhan, K.Sh.Shunkeyev

About possible existence of intermediate and mixed states in the two-band superconductors (on example of magnesium diboride)

A review of papers devoted to the definition of the type of two-band superconductors (such as magnesium diboride), where the Abrikosov criterion is violated $\left(\kappa_1 < \frac{1}{\sqrt{2}}, \kappa_2 > \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$ was done. Within Josephson model «Superconductor of 1-type — Insulator — Superconductor of 2-type» was shown that type of such superconductors depends on the values of the phenomenological coefficients $|\alpha_1|, |\alpha_2|$ and temperature. In this context, the concept of a new type of superconductors in magnesium diboride of «Type of 1,5 superconductivity» seems premature. In our opinion, the observed effects in these superconductors is due to the coexistence of intermediate and mixed states under the influence of an external weak magnetic field.

References

- 1 Bardeen J., Cooper L.N., Schrieff J.R. *Phys. Rev.*, 1957, 108, p. 1175–1204.
- 2 Ginzburg V.L., Landau L.D. *ZhETF*, 1950, 20, p. 1064–1081.
- 3 Schmidt V.V. *Introduction to the physics of superconductors*, Moscow: MTsNMO, 2000, 402 p.
- 4 De Gennes P. *Superconductivity of metals and alloys*, Moscow: Mir, 1968, 280 p.
- 5 Abrikosov A.A. *Sov. Phys. JETP*, 5, p. 1174–1182.
- 6 Nagamatsu J., Nakagawa N., Muranaka T., Zenitani Y., Akimitsu J. *Nature*, 2001, 410, p. 63–64.
- 7 Ivanovskii A.L. *Uspekhi khimii*, 2001, 70 (9), p. 811–829.
- 8 Mazin I.I., Antropov V.P. *Physica C*, 2003, 385, p. 49–65.
- 9 Choi H.J., Roundy D., Sun H., Cohen M.L., Louie S.G. *Nature*, 2002, 418, p. 758–760.
- 10 Ivanovskii A.L. *FTT*, 2003, 45, p. 1742–1769.
- 11 Shabanova N.P., Golovashkin A.I. *FTT*, 2009, 51, p. 637–642.
- 12 Maksimov E.G., Karakozov A.E., Gorshunov B.P., Ponomarev Ya.G., Zhukova E.S., Dressel M. *ZhETF*, 2012, 142, p. 282–293.
- 13 Grinenko V.A. *Pis'ma v ZhETF*, 2007, 85, p. 756–760.
- 14 Sidorov S.L., Tarenkov V.Yu., D'yachenko A.I., Khachaturova T.Ya. *FTT*, 2007, 49, p. 769–772.
- 15 Fisun V.V., Triputen' L.Yu., Yanson I.K. *Physics of low temperature*, 2005, 31, 10, p. 1104–1109.
- 16 Yanson I.K., Naidyuk Yu.G. *Physics of low temperature*, 2004, 30, 4, p. 355–372.
- 17 Krivoruchko V.N., D'yachenko A.I., Tarenkov V.Yu. *Low Temperature Physics/Physics of low temperature*, 2014, 40, 10, p. 1147–1154.
- 18 Babaev E., Silaev M. *Phys. Rev. B*, 86, p. 016501.
- 19 Kogan V.G., Schmalian J. *Phys. Rev. B*, 86, p. 016502.
- 20 Garaud J., Agterberg D.F., Babaev E. *Phys. Rev. B*, 86, p. 060513(R).
- 21 Dolocan V.O., Veauvy C., Servant F., Lejay P., Hasselbach K., Liu Y., Mailly D. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95, p. 097004.
- 22 Babaev E., Speight M. *Phys. Rev. B*, 2005, 72, p. 180502 (R).
- 23 Moshchalkov V.V., Menghini M., Nishio T., Chen Q.H., Silhanek A.V., Dao V.H., Chibotaru L.F., Zhigadlo N.D., Karpinski J. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102, p. 117001–117004 [*arXiv:0902.0997*].
- 24 Moshchalkov V.V. *Abstract Book International Workshop on Superconductivity in Reduced Dimensions*, Salzburg, Austria, 2010, p. 52.
- 25 Moshchalkov V.V. *Abstract Book International Conference on Superconductivity and Magnetism ICSM-2010*, Antalya, Turkey, 2010, p. 8.
- 26 Babaev E., Carlström J., Speight M. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105, p. 067003.
- 27 Nishio T., Dao V.H., Chen Q.H., Chibotaru L.F., Kadowaki K., Moshchalkov V.V. *Phys. Rev. B*, 2010, 81, p. 020506(R).
- 28 Speight M. *AIP Conf. Proc.*, 2011, 1389, p. 660–663.
- 29 Babaev E., Carlström J., Garaud J., Silaev M., Speight J.M. *Physica C*, 2013, 479, p. 2–14.
- 30 Geyer J., Fernandes R.M., Kogan V.G., Schmalian J. *Phys. Rev. B*, 2010, 82, p. 104521. [*arXiv:1007.2794*].
- 31 Kogan V.G., Schmalian J. [*arXiv:1008.0581*] (August, 3, 2010).
- 32 Vinnikov L.Ya., Karpinski J., Kazakov S.M., Jun J., Anderegg J., Bud'ko S.L., Canfield P.C. *Phys. Rev. B*, 2003, 67, p. 092512.
- 33 Sergeyev D.M., Ospanov M.K. *Higher Education. Physics*, 2013, 56, 8/3, p. 128–130.
- 34 Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M. *The Feynman Lectures on Physics*, Mir (Addison Wesley), 1977, 9, 254 p.
- 35 Antonov Yu.F. *Electronic scientific Journal «Investigated in Russia»*, [ER]. Access mode: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/059.pdf>
- 36 Träuble H., Essmann U. *Physica Status Solidi*, 1967, 20, p. 95–111.