UO‘K 538.945:546.654'175

NbN NAMUNALARIDAGI O‘TA O‘TKAZUVCHANLIK UCHUN NAZARIY MODELLAR

Djurayev Davron Rahmonovich,
Buxoro davlat universiteti
Fizika kafedrasi professori, f.-m.f.d.
Temirov Og‘abek Farhod o‘g‘li,
Buxoro davlat universiteti tayanch doktoranti
Ahadov Abdullo Amrullojon o‘g‘li,
Buxoro davlat tibbiyot instituti
assistent o‘qituvchisi, f.-m.f.f.d. (PhD)

Annotatsiya. *Mazkur maqolada nanoo‘lchamli va o‘ta yupqa NbN namunalarida o‘ta o‘tkazuvchanlik xususiyatlarini tavsiflovchi nazariy yondashuvlar tahlil qilinadi. Adabiyotlarda kristall tuzilish, stexiometriya, kvant tartibsizlik darajasi, energiya tirqishi hamda holatlar zichligining o‘ta o‘tkazuvchanlikka ta’siri turli yondashuvlar orqali izohlangan. Biroq mavjud natijalar tahlili nanoo‘lchamli va kristall o‘lchamdagi NbN namunalarida kuzatiladigan xususiyatlarni yagona model doirasida to‘liq tushuntirib bo‘lmasligini ko‘rsatadi. Shu nuqtayi nazardan, maqolada mavjud nazariy modellar imkoniyatlari va cheklovlari qiyosiy tahlil qilinib, NbN ning turli o‘lchamdagi namunalarida o‘ta o‘tkazuvchanlik mexanizmlarini yagona yondashuv asosida tavsiflash zarurati asoslab beriladi.*

Kalit so‘zlar: *NbN, kvant tartibsizlik, Eliashberg nazariyasi ,McMillan, Ginzburg–Landau kogerent uzunligi , Berezinskii–Kosterlitz–Thouless (BKT) modeli , Simonin modeli , kvant cheklanishi.*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ОБРАЗЦАХ NbN

Аннотация. *В данной статье анализируются теоретические подходы, описывающие свойства сверхпроводимости в наноразмерных и сверхтонких образцах NbN. В научной литературе влияние кристаллической структуры, стехиометрии, степени квантового беспорядка, энергетической щели и плотности состояний на сверхпроводящие свойства объясняется с помощью различных теоретических подходов. Однако анализ имеющихся результатов показывает, что наблюдаемые свойства наноразмерных и кристаллических образцов NbN не могут быть полностью объяснены в рамках единой модели. В связи с этим в статье проводится сравнительный анализ возможностей и ограничений существующих теоретических моделей и обосновывается необходимость единого подхода к описанию механизмов сверхпроводимости в образцах NbN различного размера.*

Ключевые слова: *NbN, квантовый беспорядок, теория Элиашберга, Макмиллан, когерентная длина Гинзбурга–Ландау, модель Березинского–Костерлица–Таулесса (BKT), модель Симонина, квантовое ограничение.*

THEORETICAL MODELS FOR SUPERCONDUCTIVITY IN NbN SPECIALS

Abstract. *This article analyzes theoretical approaches describing the superconducting properties of nanoscale and ultrathin NbN samples. In the scientific literature, the effects of crystal structure, stoichiometry, the degree of quantum disorder, energy gap, and density of states on superconducting properties have been explained using various theoretical approaches. However, an analysis of the available results shows that the observed properties of nanoscale and crystalline NbN samples cannot be fully explained within a single model. In this regard, the article provides a comparative analysis of the capabilities and limitations of existing theoretical models and substantiates the need for a unified approach to describing the mechanisms of superconductivity in NbN samples of different sizes.*

Keywords: *NbN, quantum disorder, Eliashberg theory, McMillan, Ginzburg–Landau coherence length, Berezinskii–Kosterlitz–Thouless (BKT) model, Simonin model , quantum confinement.*

Kirish. O‘ta yupqa namunalar uchun o‘lchamning kamayishi strukturaviy fazalar aro chegaralar sonining ortishi va elektronlarning sochilishi kuchayishiga olib kelishi mumkin. Masalan, turli yupqa o‘lchamlariga ega NbN plyonkalarida kritik harorati T_c qiymati 13,1 K va 15,2 K ni, ixtiyoriy yo‘nalgan va eng kichik kristall o‘lchamli namunada esa 8,3 K ni tashkil etgan [1,2]. NbN yuqori o‘ta o‘tkazuvchanlik

xususiyatlariga ega muhim materialdan biri bo‘lib, unda T_c kristall tuzilish, stexiometriya, kvant tartibsizlik darajasi, plyonka qalinligi va kristall o‘lchamiga sezilarli darajada bog‘liq. Adabiyotlarda 50 nm qalinlikdagi NbN plyonkasida T_c=16,6 K ga yetgani, monokristalli NbN namunalarida esa T_c=14,5–15 K, yuqori sifatli monokristalli NbN plyonkalarida T_c=16,1–16,7 K qiymatlar kuzatilgani qayd etilgan [3,4].Nanoo‘lchamli NbN plyonkalarida o‘ta o‘tkazuvchanlikning qalinlikka bog‘liqligi elektron holatlarining o‘zgarishi bilan ham izohlanadi. NbN qalinligi kamayganda kvant cheklanishi natijasida elektron energiya sathlari alohida, Fermi sathi yaqinidagi holatlar zichligi o‘zgarishi mumkin. Bu esa T_c ning qalinlikka bog‘liq ravishda o‘zgarishiga olib keladi. [6–8] Shu bilan birga, Eliashberg nazariyasi nanometr o‘lchamdagi plyonkalarda kvant cheklanishining elektron holatlariga ta’sirini hisobga olib, $T_c$ning plyonka qalinligiga bog‘liqligini miqdoriy tavsiflash imkonini beradi [5]. O‘ta yupqa NbN plyonkalarida o‘ta o‘tkazuvchanlikning fazaviy xususiyatlari ham muhim ahamiyatga ega. BKT modeli bunday tizimlarda fazaviy o‘tishni o‘ta o‘tkazuvchanlik qattiqligi va uyurma–antiuyurma juftlari dinamikasi orqali tavsiflaydi. Finkel’shteyn yondashuvida esa plyonka qalinligining kamayishi va tartibsizlikning ortishi elektron–elektron o‘zaro ta’sirini kuchaytirib, T_c ning pasayishiga olib kelishi bilan izohlanadi [9–11]. NbN ning o‘ta o‘tkazuvchanligi turli fizik mexanizmlar kristall tuzilish va stexiometriya, kristall o‘lchami, kvant tartibsizlik, holatlar zichligi, kvant cheklanishi hamda fazaviy **yoki vaqt davomida kichik o‘zgarib, tebranib turishi** orqali tavsiflangan. Biroq ushbu yondashuvlarning har biri NbN ning ma’lum o‘lcham yoki fizik holatiga xos jarayonlarni tavsiflaydi. Shu sababli o‘ta yupqa va yupqa o‘lchamdagi NbN namunalarining o‘ta o‘tkazuvchanlik xususiyatlarini yagona nazariy yondashuv doirasida tushuntirish masalasi alohida tahlilni talab qiladi.

Adabiyotlar tahlili. Yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchanlik haqida umuman olganda NbN namunalaridagi o‘ta o‘tkazuvchanlik uchun nazariy modellar bo‘yicha juda ko‘plab ilmiy adabiyotlar va maqolalar mavjud. Ushbu maqolani yozishda shu toifadagi nazariy adabiyotlardan [5], [12],[13],[14],[15] [16],[21],[22],[23],[24] va amaliy ahamiyatga ega bo‘lgan ilmiy maqolalardan foydalanildi va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatida qayd etildi. Maqolada iqtibos tarzida olingan ma‘lumotlar tegishli manbasining foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidagi tartib raqami bilan ko‘rsatildi.

Natijalar va muhokamalar.

Eliashberg modeli. Ushbu yondashuv ilk bor nanometr o‘lchamdagi yupqa plyonkalarda yuzaga keladigan **kvant cheklanishi**ning elektron holatlariga ta’sirini hisobga oladi. Mazkur nazariya birinchi marta plyonka qalinligiga bog‘liq bo‘lgan o‘ta o‘tkazuvchanlikning **kritik haroratini** T_c miqdoriy jihatdan bashorat qilish imkonini berdi, bunda tanlab olinaladigan parametrlar qo‘llanilmadi. Shuningdek, nazariya plyonka qalinligi ortishi bilan **magnit maydonning singish chuqurligi** sezilarli darajada kamayishini ham bashorat qiladi. Bu xulosa mavjud tajriba ma’lumotlari bilan sifat jihatidan mos keladi. London elektrodinamikasi doirasida anizotropiya hisobga olinmagan holda, magnit maydonning singish chuqurligi λ(T) quyidagicha ifodalanadi [5]:

$$\lambda^{-2}(T)= \left(\frac{\hbar w_p}{c}\right)^2 \pi k_B T \qquad (1)$$

Magnit maydonning singish chuqurligi yoki **o‘ta oquvchanlik holati** zichligi tajriba yo‘li bilan aniqlanishi mumkin bo‘lgan yana bir fizik kattalik bo‘lib, u ikki zonali Eliashberg modeli doirasida ham hisoblanishi mumkin. Bu esa nazariyaning bashoratlari qanchalik ishonchli ekanligini qo‘shimcha ravishda tekshirish imkonini beradi.

McMillan modeli.

Bu modelda kritik harorat quyidagicha topiladi:

$$\mathbf{T_c}=\frac{\omega_{log}}{1.2} exp\left[-\frac{1.04(1+\lambda)}{\lambda-\mu^*(1+0.62\lambda}\right] \qquad \mathbf{(2)}$$

McMillan tenglamasidagi λ ning aniqlanishi quyidagicha bo‘ladi [14]

$$\lambda= \int_0^{\infty} \frac{\alpha^2(\omega)F(\omega)}{\omega} d\omega \qquad (3)$$

Bu yerda λ elektron-fonon juftlashishning effektiv konstantasi bo‘lib, u Eliashberg spektr funksiyasi orqali aniqlanadi. Tenglamadan kelib chiqadiki, past chastotali fononlar hissasining ortishi λ ning ortishiga olib keladi. Bu esa o‘z navbatida tenglamaga ko‘ra T_c ning ortishiga sabab bo‘ladi.[12,13]

Berezinskii–Kosterlitz–Thouless (BKT) modeli.

BKT modeli ikki o‘lchamli o‘ta o‘tkazuvchi plyonka uchun o‘ta o‘tkazuvchanlik turg‘unligi Js quyidagicha ifodalanadi [15].

$$Js=\frac{\hbar^2 c^2 d}{16\pi e^2 \lambda^2} \qquad (4)$$

Bu yerda d-plyonka qalinligi, λ-magnit maydonning singish chuqurligi,e-elektron zaryad esa yorug‘lik tezligidir.Mazkur tenglama o‘ta yupqa NbN plyonkalarda o‘ta o‘tkazuvchanlik turg‘unligi nafaqat qalinlikka,balki zaryad tashuvchilarning samarali hissasiga ham bevosita bog‘liq ekanni ko‘rsatdi.

BKT o‘tish harorati T_{BKT} universal shart asosida aniqlandi.

$$\frac{\pi Js(T_{BKT})}{T_{BKT}} = 2 \qquad (5)$$

(4) tenglama va (5) tenglamani birlashtirsa quyidagi ifoda kelib chiqadi.Ya’ni ushbu formula J_s ning T_{BKT} bog‘liqligini ifodalaydigan va ushbu tenglamadan T_{BKT} topilsa T_{BKT} ning d ga bog‘liqlik tenglamasi kelib chiqadi.

$$T_{BKT} = \frac{h^2 c^2 d}{128\pi^2 e^2 \lambda^2} \qquad (6)$$

(6) tenglamadan T_{BKT} qiymati d qalinlikga to‘g‘ri proporsional, ya’ni namuna qalinlik ortgan sari BKT temperaturasi ortadi. $T_{BKT} \sim$ d ushbu mezon uyurma-antiuyurma juftlarining ajralishi boshlanadigan kritik nuqtani belgilaydi. Shuning uchun J_s(T) ning haroratga bog‘liqligi yordamida o‘ta yupqa NbN plyonkalarning kvazi-ikki o‘lchamli fazaviy o‘tish sohasi tahlil qilindi.

Simonin modeli:

Ginzburg Landau qonuniyatiga bog‘liq bo‘lgan Simonin modeli quyidagi ko‘rinishga ega.

$$T_d = T_c\left(1-\frac{d_c}{d}\right) \qquad (7)$$

Ushbu (7) tenglama yupqa plyonkaning kritik harorati T_d uning qalinligi d ga bog‘liq ekanligini ko‘rsatadi. Bu yerda T_c - materialning hajmiy kritik harorati, d_c esa kritik qalinlikdir. Plyonka qalinligi d kamaygan sari kritik harorat T_d ham pasayadi. d=d_c bo‘lganda T_d=0 ga teng bo‘ladi, ya’ni kritik qalinlikda o‘ta o‘tkazuvchanlik holati yo‘qoladi. Shuningdek, ushbu bog‘lanish T_d ning 1/d ga nisbatan chiziqli kamayishini ifodalaydi.

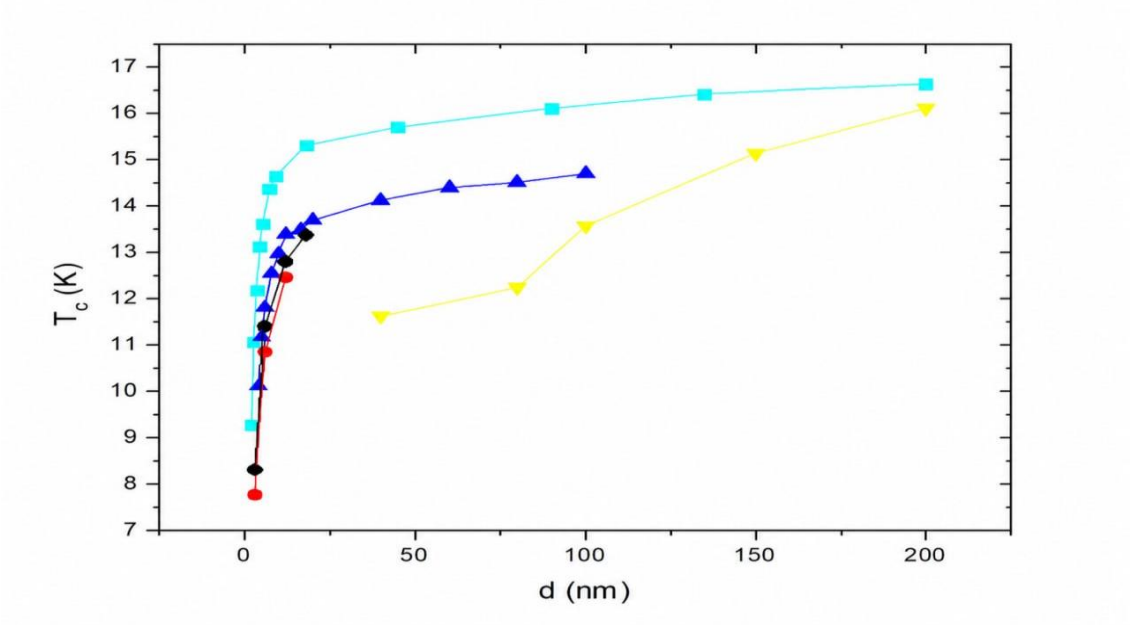
NbN yupqa namunalarda o‘ta o‘tkazuvchanlik xususiyatlarining plyonka qalinligiga bog‘liqligi nanometrik o‘lchamlarga o‘tilganda yuzaga keladigan muhim fizik hodisalardan biridir. Tahliliy natijalar plyonka qalinligi kamayishi bilan kritik temperatura T_c ning pasayishini ko‘rsatgan. Biroq ushbu pasayishning fizik mexanizmini tushuntirish uchun turli nazariy modellar taklif qilingan. Jumladan, **Eliashberg modeli,** McMillan modeli**, Simon modeli** va Berezinskii–Kosterlitz–Thouless (BKT) modeli NbN yupqa plyonkalaridagi T_c (d) bog‘lanishini tavsiflashda qo‘llanilgan.Eliashberg nazariyasi bo‘yicha hisoblangan qiymati o‘ta o‘tkazgich NbN yupqa plyonka uchun T_c = 13.1K qalinlik esa d = 4.5 nm [17].

McMillan modeli yordamida epitaksial NbN plyonkalarida kritik temperatura T_c ning qalinlikka bog‘liqligi tahlil qilindi. Tajribada plyonka qalinligi 2,2–200 nm oralig‘ida o‘zgarganda, T_c qiymati 9,28 K dan 16,63 K gacha oshishi kuzatildi. McMillan modeli ushbu o‘zgarishni tashuvchilar konsentratsiyasi va Fermi sathidagi holatlar zichligi N(0) bilan bog‘lash imkonini berdi [18].

BKT modeli asosida o‘rganilgan NbN yupqa plyonkalarida plyonka qalinligi kamayishi bilan ham T_{BKT}, ham T_c pasayishi kuzatiladi. Jumladan, d=12 nm bo‘lgan plyonkada T_{BKT}= 12,46 K va T_c=12,80 K, d=6 nm da mos ravishda T_{BKT}=10,8K T_c=10,8 K va T_c=11,40 K, d =3 nm da esa T_{BKT}=7.7 K va T_c=8,30K ni tashkil etgan. Demak, qalinlik kamayishi bilan supero‘tkazuvchanlikning xarakterli temperaturasi pasayadi [19]. Shu bilan birga, barcha holatlarda T_{BKT}<T_c bo‘lib, ular orasidagi farq mos ravishda **0,34 K (12 nm), 0,55 K (6 nm) va 0,53 K (3 nm)** ni tashkil qiladi. Bu natijalar NbN plyonkalarida BKT o‘tishi T_c ga juda yaqin temperaturada yuz berishini va plyonka yupqalashgan sari BKT o‘tishining temperaturasi ham pasayishini ko‘rsatadi.

Simonin modeli NbN yupqa plyonkalarida o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalari plyonka qalinligiga kuchli bog‘liq. Tajriba natijalariga ko‘ra, qalinlik 50 nm dan 5 nm gacha kamayganda**,** kritik temperatura T_c 15,3 K dan 11,2 K gacha pasayadi**.** Model asosida T_c ning yo‘qolishiga mos kritik qalinlik d_c=1,38 **nm** deb aniqlangan. [20]

NbN uchun T_c ning d bog‘liqligi grafigida namuna qalinligi 200 nm qalinlikdan 2.2 nm qalinlikgacha bo‘lgan qiymat tasvirlangan bundan T_c ning qiymatlari 16.63 K dan 9.28 K gacha o‘zgarishi ko‘rsatilgan.Ushbu qiymatlar grafikda siyan kvadratlar tasvirlangan.Grafikdagi T_c ning d ga bog‘liq grafigidagi qiymatlar Hall effekti va McMillan modeli bo‘yicha hisoblangan. Qalinlik kamayishi natijasida elektronlarning harakatlanishi va elektron-fonon o‘zaro ta’siri o‘zgarib, o‘ta o‘tkazuvchanlik energetik parametrlari va elektron holatlar zichligiga ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Natijada Kuper juftlarining hosil bo‘lish sharoitlari o‘zgarib, T_c pasayadi. Demak, NbN plyonkalarida qalinlik supero‘tkazuvchanlik xususiyatlarini belgilovchi muhim parametr hisoblanadi.



1-rasm. O‘ta o‘tkazuvchi kritik harorat T_c ning plyonka qalinligi *d* ga bog‘liqligi

1-rasmda T_c ning *d* ga bog‘liqlik tajribaviy qiymatlari grafikda tasvirlangan. O‘ta o‘tkazuvchan kritik harorat T_c ning plyonka qalinligi *d* ga bog‘liqligi turli adabiyot manbalari asosida keltirilgan. Grafikdagi moviy kvadratlar Q. Zhang va boshq. tomonidan epitaksial NbN plyonkalari uchun olingan natijalarni ifodalaydi [21] , ko‘k uchburchaklar L. Zhang va boshq. tomonidan NbTiN yupqa plyonkalari uchun olingan ma’lumotlarga mos keladi [22] , qora belgilar M. Mondal va boshq.ning NbN yupqa plyonkalaridagi BKT o‘tishiga oid natijalarini ko‘rsatadi [23], qizil doiralar esa S. P. Chockalingam va boshq. tomonidan epitaksial NbN plyonkalari uchun qayd etilgan eksperimental ma’lumotlarni ifodalaydi [24]. Grafikdan ko‘rinadiki, plyonka qalinligi kamayishi bilan T_c qiymati izchil ravishda pasayadi, ayniqsa o‘ta yupqa sohada bu pasayish yanada keskin namoyon bo‘ladi. Aksincha, qalinlik ortishi bilan T_c asta-sekin hajmiy holatga xos qiymatlarga yaqinlashib, to‘yinish xususiyatini ko‘rsatadi. Ushbu natijalar yupqa plyonkalarda o‘lcham effekti, zaryad tashuvchilar zichligi, kvant tartibsizlik darajasi hamda ikki o‘lchamli o‘ta o‘tkazuvchanlik fluktuatsiyalarining muhim rol o‘ynashini tasdiqlaydi.

Xulosa. NbN yupqa plyonkalarida qalinlik kamayishi bilan kritik temperatura $\boldsymbol{T_c}$ pasayadi. Eliashberg, McMillan, BKT va Simonin modellari bu bog‘liqlikni turli fizik mexanizmlar orqali tushuntiradi.Eliashberg modeli mikroskopik jarayonlarni chuqurroq tavsiflagani uchun eng istiqbolli hisoblanadi. Kelajakda Eliashberg va BKT modellarini birgalikda qo‘llash yanada aniq natijalar berishi mumkin.McMillan va Simonin modellari esa $\boldsymbol{T_c}$ (*d*) bog‘liqligi va kritik qalinlikni baholashda amaliy ahamiyatga ega.

ADABIYOTLAR:

1. J. J. Olaya, L. Huerta, S. E. Rodil, R. Escamilla, Thin Solid Films 516, 8768–8773 (2008).
2. S. Thakoor, J. L. Lamb, A. P. Thakoor, S. K. Khanna, J. Appl. Phys. 58, 4643 (1985).
3. B. Scheerer, Preparation of NbN Single Crystals, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Angewandte Kernphysik I (1979).
4. A. Shoji, S. Kiryu, S. Kohjiro, Appl. Phys. Lett. 60, 1624 (1992).
5. G. A. Ummarino, et al. 37, 065703 (2025). DOI: 10.1088/1361-648X/ad92ed.
6. T.-C. Chiang, Surf. Sci. Rep. 39, 181 (2000).
7. J. J. Paggel, T. Miller, T.-C. Chiang, Science 283, 1709 (1999).
8. M. H. Upton et al., Phys. Rev. Lett. 93, 026802 (2004).
9. M. T. Strongin, R. S. Thompson, O. F. Kammerer, J. E. Crow, Phys. Rev. B 2, 1078 (1971).
10. Yu. N. Ovchinnikov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 64, 719 (1973); Sov. Phys. JETP 37, 366 (1973).
11. A. M. Finkel'stein, Physica B 197, 636–648 (1994). DOI: 10.1016/0921-4526(93)E0220-B.
12. W. L. McMillan, Phys. Rev. 167, 331–344 (1968).
13. P. B. Allen, R. C. Dynes, Phys. Rev. B 12, 905–922 (1975).
14. K. Ramesh Babu, G.-Y. Guo, Phys. Rev. B 99, 064502 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.99.064502.

15. M. Mondal et al. Phys. Rev. Lett. 107, 217003 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.217003.

16. J. Simonin, Phys. Rev. B 33, 7830 (1986).

17. G. A. Ummarino, A. Zaccone, A. Braggio, F. Giazotto, Eliashberg Theory Prediction of Critical Currents in Superconducting Thin Films Under DC Electric Fields.

18. Q. Zhang, H , et al. IEEE Trans. Appl. Supercond. 29, 7500305 (2019).

19. M. Mondal, at al. Role of the Vortex-Core Energy on the Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition in Thin Films of NbN (2018).

20. J. Simonin, Phys. Rev. B 33, 7830 (1986).

21 Q. Zhang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 29, 1 (2019).

22 L. Zhang et al., Appl. Phys. Lett. 107, 122603 (2015).

23 M. Mondal et al., Phys. Rev. Lett. 107, 217003 (2011).

24 S. P. Chockalingam et al., Phys. Rev. B 77, 214503 (2008).