

СЕКЦІЯ XXI. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ НАДПРОВІДНИКІВ І ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ТЕХНІЦІ

Липкань Віктор Михайлович

Здобувач вищої освіти

факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Вінницький національний технічний університет, Україна

Науковий керівник: Мартинюк Володимир Валерійович

канд.техн.наук, доцент кафедри загальної фізики

Вінницький національний технічний університет, Україна

Вступ

Надпровідність – це стан деяких твердих матеріалів, при якому їх електричний опір переходить до нульового значення після охолодження нижче критичної температури T_c [1]. У цьому стані також спостерігається витіснення магнітного поля з об'єму матеріалу (ефект Мейснера) [2]. Явище відкрив Гейке Камерлінг-Оннес у 1911 році під час дослідів з ртуттю при температурі приблизно 4,2 К [1][3].

Фізичні принципи надпровідності

Критична температура, критичне поле і критичний струм

Коли матеріал охолоджується до температури нижче T_c , він переходить у надпровідний стан, тобто його опір R наближений до нуля. Наприклад, ртуть має $T_c = 4,2$ К [3]. Коли матеріал перебуває в надпровідному стані, існує максимальне магнітне поле B_c (для надпровідників типу I) або B_{c2} (для типу II), при якому надпровідність зникає. Також є максимальна густина струму J_c , при перевищенні якої надпровідність руйнується [4].

Мікроскопічний механізм: Куперові пари

За класичною теорією Теорія Бардіна–Купера–Шріффера (BCS-теорія) електрони провідності при температурі нижче T_c утворюють пари (Куперові пари), які рухаються через кристалічну ґратку без розсіяння фононами або іншими дефектами [5]. Ці пари мають сумарний

спін 0 і поведуться як бозони, що конденсуються в єдиний квантовий стан, забезпечуючи надпровідність.

Ефект Мейснера та типи надпровідників

Надпровідники витісняють з свого об'єму магнітне поле – це і є ефект Мейснера (рис. 1), що свідчить про квантову природу явища, а не просто про нульовий опір [2].

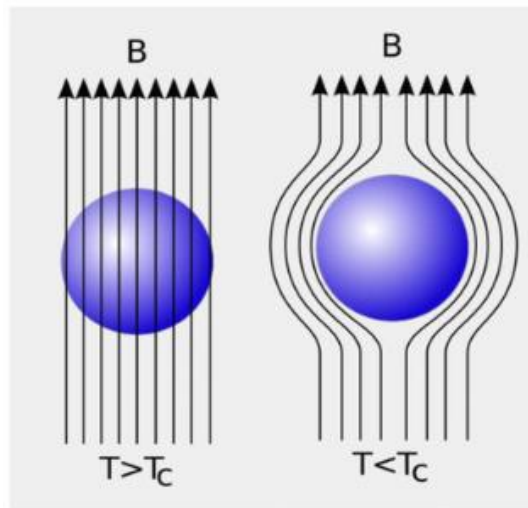


Рис. 1 Ефект Мейснера

Матеріали-надпровідники поділяють на:

- Тип I – чисті метали, наприклад Pb, Hg, для яких надпровідний стан існує лише при низькому магнітному полі;
- Тип II – сплави, інтерметаліди чи кераміки, які мають два критичних поля B_{c1} і B_{c2} , можуть витримувати значні магнітні поля і мають значну практичну цінність [1][4].

Приклади матеріалів та характеристик

- Матеріал ніобій-титан (NbTi) – один із найпоширеніших технічних надпровідників, має критичну температуру близько 9,2 К.
- Сполука Nb_3Sn (A15 структура) – має $T_c = 18$ К і верхнє критичне поле B_{c2} понад 25 Тесла [5].
- Купратні високотемпературні надпровідники (ВТНП) – наприклад $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ мають T_c понад 90 К (наприклад до 93 К) [6].

Застосування надпровідників у техніці

Медичні застосування

Надпровідні електромагніти застосовуються у апаратах для магнітно-резонансної томографії (МРТ). Завдяки використанню

надпровідного дроту (наприклад NbTi) створюються сильні однорідні магнітні поля (наприклад 1,5 Т або 3 Т) з мінімальними втратами [6].

Енергетика та передача струму

Використання надпровідних кабелів дозволяє передавати великі струми без втрат на опір.

Наприклад, надпровідники можуть замінити традиційні мідні лінії в системах високої потужності. Прототипи надпровідних кабелів продемонстрували можливість передачі струмів густиною значно вищою, ніж у звичайних провідниках [3].

Потужні магніти, прискорювачі, магнітне левітування

У прискорювачах частинок, наприклад у CERN, застосовуються надпровідні магніти на основі NbTi, які працюють при температурі $\sim 1,9$ К і магнітних полях $\sim 8,4$ Т [4].

У транспортній техніці – потяги на магнітному підвісі (Maglev) використовують надпровідні магніти, які створюють сильне магнітне поле для левітації та руху без контактної тертя.

Інші приклади

- Зберігання енергії – системи SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) використовують надпровідні котушки для накопичення великої енергії в магнітному полі без втрат [3].

- Обмежувачі струму – надпровідні пристрої, які автоматично переходять у нормальний стан при перевантаженні, обмежуючи струм і захищаючи мережу.

Обмеження та перспективи

Основні технічні обмеження:

- Необхідність охолодження до дуже низьких температур (рідкий гелій, рідкий азот) – це складна і дорога технологія [7].

- Механічна крихкість деяких надпровідних матеріалів, особливо ВТНП – ускладнює виготовлення дротів [4][7].

- Обмеження за густиною струму J_c і критичним полем B_{c2} у високотемпературних матеріалах [8].

Перспективи: пошук матеріалів з вищою T_c і нижчими витратами охолодження, покращення механічних та електромагнітних характеристик, масове впровадження в енергетику та транспорт [7].

Висновки

Фізичні принципи роботи надпровідників – від нульового електричного опору та спарювання електронів до витіснення магнітного

поля – дозволяють реалізувати технології з підвищеною ефективністю: медичні магніти, енергетичні кабелі, транспортні системи. Проте практична реалізація вимагає подолання технічних бар'єрів охолодження, витрат матеріалів і виготовлення. Надпровідність має потенціал стати фундаментом наступного покоління електротехнічних систем.

Список використаних джерел

1. Локтєв В.М. «Лекції з фізики надпровідності» – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. URL: https://bitp.kiev.ua/files/doc/lectures/lecture_01.pdf [дата звернення: 10.11.2025].
2. «Надпровідність: поняття, принципи та перспективи» // Енциклопедія Сучасної України, 2020. URL: <https://esu.com.ua/article-71322> [дата звернення: 10.11.2025].
3. Silver T.M. «Applications of high temperature superconductors» // Europhysics News, Vol. 32, No. 3, 2001. URL: <https://www.europhysicsnews.org/articles/eprn/pdf/2001/03/eprn01302.pdf> [дата звернення: 11.11.2025].
4. Ballarino A. «Application of high temperature superconductors to accelerators» // CERN LHC Project Report 420, 2000. URL: <https://cds.cern.ch/record/466522/files/lhc-project-report-420.pdf> [дата звернення: 11.11.2025].
5. Bussmann-Holder A., Keller H. “High temperature superconductors: underlying physics and applications” // arXiv:1911.02303, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1911.02303> [дата звернення: 12.11.2025].
6. «Застосування явища надпровідності» // MoyaOsvita.com.ua, 28.07.2015. URL: <https://moyaosvita.com.ua/fizuka/zastosuvannya-yavishha-nadprovidnosti/> [дата звернення: 12.11.2025].
7. «Фізики сформулювали нову теорію надпровідності» // 24 Канал, 13.07.2021. URL: https://24tv.ua/tech/nova-teoriya-nadprovidnosti-dopomozhe-zrobiti-novini-tehnologiy_n1684150 [дата звернення: 12.11.2025].
8. Chao Yao, Yanwei Ma. “Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications” // arXiv:2106.02825, 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2106.02825> [дата звернення: 12.11.2025].