



Чи можна відновити життя на Марсі? Доктор Павло Міхеєнко з університету Бірмінгема, Англія вважає, що це можна зробити і що ця проблема тісно пов'язана із збереженням життя на Землі. Він поділяє думку про те, що життя на поверхні Марсу існувало, але зникло разом з придатною для нього атмосферою і водою коли Марс втратив магнітне поле, яке захищало його від Сонячного вітру. Таке магнітне поле ще існує на Землі, але в майбутньому воно теж зникне.

Магнітне поле Землі можна зберегти, використовуючи ефект надпровідності, так, як описано в роботі доктора Міхеєнка.

Подібно до цього, штучне магнітне поле можна створити і на Марсі. З невеликою допомогою атмосфера відновиться, річки і озера з'являться знов і планета може буде пристосована до життя людини.

Матеріалознавчі аспекти використання надпровідників в глобальних проектах подані в статтях П. Міхеєнка *A hope for superconductivity (Надпровідність і майбутнє)* ('Натураліст') і *Superconductivity for hydrogen economy* (Journal of Physics: Conference Series 286 (2011) 012014. http://iopscience.iop.org/1742-6596/286/1/012014/pdf/1742-6596_286_1_012014.pdf).

Доктор Павло Міхеєнко - міжнародно визнаний вчений з досвідом роботи в Україні, Польщі, Австралії і Великій Британії (унверситети Бірмінгема і Кембриджа).

Надпровідність і майбутнє людства

Виснаження запасів викопних видів палива та перехід на відновлювані джерела енергії відкривають перспективи активного використання надпровідності і, у свою чергу, надпровідність дає надію на подолання енергетичної кризи, що насувається і дозволяє вирішити глобальні проблеми, які постають перед людством. Автор пояснює, чому надпровідність є важливим явищем і як у майбутньому вона вплине на повсякденне життя людей.

Цього року у квітні надпровідність відзначила своє 100-річчя. Вона глибоко вкорінилась у науково-технічне життя. Проте більшості людей це екзотичне явище ні про що не говорить. Можливо, хтось пам'ятає, що воно пов'язано з низькими температурами і якимось дозволяє електричному струму текти без опору. Де-хто може спроможний пригадати дивний ефект левітації магніту над надпровідником. Ось, здається, і все. Обізнанішим відомо, що температура може бути виміряна за шкалою Кельвіна (К), де нуль за Цельсієм ($^{\circ}\text{C}$) дорівнює 273 К, і що надпровідність, як правило, виникає за температури, що дорівнює кільком Кельвінам. Саме це і було виявлено Камерлінг-Оннесом та співробітниками у 1911 році, коли вперше було досягнуто температури 4,2 К. Близько самої такої температури і було відкрито надпровідність. Технічний прогрес у дослідженні матеріалів дав можливість наблизити критичну температуру (тобто таку, нижче якої виникає надпровідність) до 20 К або -253°C . Такою вона і залишалась на протязі багатьох років. Найбільш авторитетні теоретики доводили, що надпровідність не може існувати за температур, вищих за 20 К. Якщо взяти до уваги, що найнижча температура у природі, зареєстрована на нашій планеті в Арктиці дорівнює -89°C , то виникає питання: «А навіщо такі дослідження і матеріали нам взагалі потрібні?» Цікаве питання, і я спробую на нього відповісти.

Незвичайні зміни у галузі надпровідності сталися у 1986 році, коли було відкрито високотемпературну надпровідність (ВТНП). Ця подія майже співпала з вибухом на Чорнобильській АЕС, що затьмарив ейфорію визначного відкриття. Треба було бути великими оптимістами, аби назвати «високотемпературною» надпровідність при -243°C . Але все ж поріг у 20 К було подолано і менш ніж за рік ефект надпровідності вже був зафіксований за температур вище температури кипіння рідкого азоту (77,3 К).

Настав бум фінансової підтримки надпровідності, очікувалась швидка технологічна революція. Головним аргументом на її користь була виняткова ефективність надпровідників і низька вартість рідкого азоту для їх охолодження (близько 30 центів за літр). Але ніхто не пам'ятає цієї революції – її не сталося.

На заводі стала, здавалось би, незначна перешкода – поверхня розділу між мікронними зернами ВТНП. Виявилось, що надструм, або електричний струм, що протікає без втрат енергії, не може перетнути навіть малокутові (з різницею в орієнтації кристалічної ґратки у декілька градусів) поверхні розділу між зернами. Надпровідники без таких поверхонь розділу можна виготовити, але це недешево.

То ж революція змінилася на еволюцію, яка в решті решт привела до економічно-ефективного виробництва ВТНП-стрічок і ВТНП-дротів. Але щільність критичного струму у них донині лишається невеликою, а їхня товщина обмежується лише кількома мікрометрами, тобто дуже високого надструму вони не витримують. Немає сумніву, що ситуація з часом покращиться, але часу залишається не так вже й багато, бо інші проблеми, з якими стикається людство, можуть зупинити прогрес у цій галузі.

Як не дивно, технічна революція можлива, але зовсім не та, яка очікувалась у 1986 році. І обумовлена вона не стільки бажанням покращити життя, скільки потребою вижити. Людство створило масштабне навантаження на довкілля. Вичерпання покладів викопних видів палива та надмірні викиди диоксиду вуглецю у атмосферу загрожують глобальною зміною клімату. Значна доля викидів CO_2 припадає на транспорт.

Розумним заходом запобігти глобальному потеплінню є використання чистого палива, що не утворює CO_2 , і яке можна отримати з відновлюваних ресурсів. Таке паливо вже знайдено. Це водень, найпоширеніший елемент у Всесвіті. Але постають практичні питання: як його отримати у достатній кількості, як транспортувати і у якій формі використовувати. Стиснений водень вимагає важких балонів. Є твердотілі пристрої для зберігання водню, але в них водень складає лише малу частку від загальної ваги. Зріджений водень вимагає належної теплоізоляції і дуже дорогого охолодження. Його низька температура (20 К) – з одного боку є перешкодою для його використання, а з іншого – перевагою, бо

саме низька температура і дає можливість використовувати надпровідники з економічним ефектом, що вартий витрат на охолодження.

Хоча деякі надпровідники навіть зараз функціонують у простішому для виробництва рідкому азоті, його використання у якості охолоджувача з метою глобального застосування у сфері надпровідності було б помилкою. Наприклад, вартість азоту, щоб заповнити трубопровід з надпровідником діаметром близько 1 метра, що з'єднує Лондон і Каїр, становитиме приблизно 10,000,000,000 гривень. Це втрачені гроші, тому що рідкий азот може функціонувати тільки як охолоджувач, а якщо цей трубопровід заповнити рідким воднем, його вже можна розглядати як систему накопичування і розподілення енергії, адже кожний літр водню може бути використаний як джерело енергії.

Рушії водневої економіки

Можливість широкого застосування надпровідників обумовлена переходом до водневої економіки, яка може бути найефективнішою відповіддю на обмеженість запасів викопного палива та неконтрольованість викидів парникових газів, що ведуть до глобального потепління. З іншого боку, воднева економіка можлива завдяки наявності великої кількості водню та його хімічним властивостям, що дозволяють використовувати цей елемент у якості енергоносія. Рушійними силами водневої економіки є екологічні, технологічні та політичні складові. Цілком імовірно, що у майбутньому уряди усіх країн стягнутимуть значні податки за використання викопного палива та фінансово заохочуватимуть ефективніше використання екологічно чистої енергії. Саме тут вступає в дію надпровідність.

Надпровідникові матеріали та воднева економіка

Вже винайдено доволі надпровідникових матеріалів, які можуть ефективно функціонувати у рідкому водні. Усі вони були відкриті після 1986 року. Одним з класів матеріалів, що придатні для використання у рідкому водні, є вже згадані ВТНП. Незважаючи на те, що вони надзвичайно чутливі до поверхнь розділу між зернами і мають не надто задовільні властивості за температури 77,3 К (у зрідженому азоті), у рідкому водні вони працюють значно краще. До того ж спостерігається прогрес у методах виготовлення ВТНП без великих кутів між зернами. Але найкращим матеріалом для водневих технологій є диборид магнію (MgB_2). Надпровідність у ньому було відкрито у 2001 році. Критична температура (T_c) MgB_2 удвічі перевищує температуру кипіння рідкого водню. Це єдиний з відомих матеріалів, що має T_c значно вище 20 К і надпровідний струм якого не знижується на поверхнях між зернами. Серед інших матеріалів, придатних для водневої економіки, відомі фулерени і нещодавно відкриті надпровідники на основі заліза, пніктиди (pnictides). Немає сумніву, що у майбутньому з'являться нові матеріали, придатні до роботи у рідкому водні.

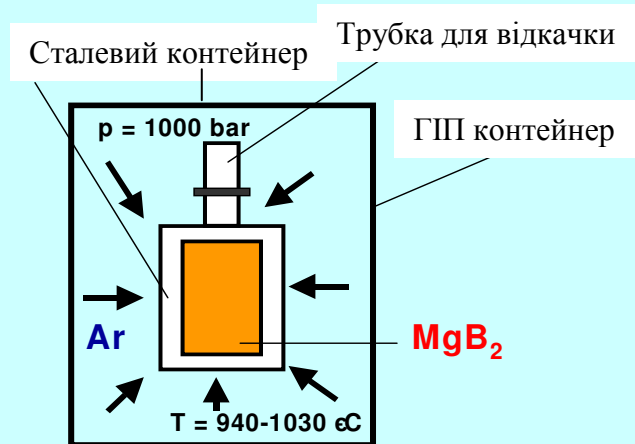
Надзвичайні властивості MgB_2

Надпровідність дибориду магнію недогледіли. Майже за 50 років до відкриття надпровідності у MgB_2 , він спокійно лежав собі на полицях наукових лабораторій, як непривабливий чорний порошок, і ніхто не спромігся поміряти його властивості при низьких температурах. Іронія полягає у тому, що його широко застосовували для синтезу інших матеріалів, у тому числі й надпровідників з низькою критичною температурою, які були досліджені досить ретельно. Виготовлений сучасними методами, такими, як гаряче ізостатичне пресування (ГІП) або резистивне спікання (РС), що схематично показані на малюнку 1, MgB_2 перетворюється на легкий, твердий і на вигляд подібний до золота матеріал. На малюнку 2 він показаний у формі диску (у центрі), що оточений залізним колом (білуватий колір), з невеликими брусками цього ж матеріалу зверху. Він є ніби втіленою мрією алхіміків: «золото» створене з чорного порошку. Так воно й є, бо справжня цінність цього матеріалу така сама, як і золота, а може й більша.

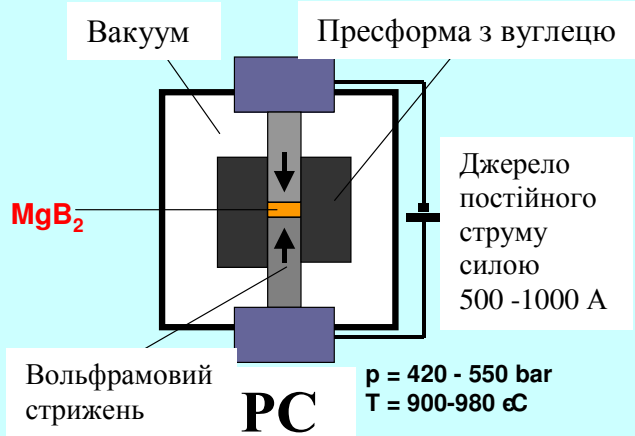
Найпривабливішими властивостями MgB_2 як надпровідника є висока критична температура (~ 40 К), що удвічі вища за температуру кипіння рідкого водню, висока щільність критичного струму (до 10^6 А/см² при 20 К) і низька щільності маси (2,62 г/см³). Передбачається, що диборид магнію буде найбільше використовуватись у інфраструктурі водневої економіки як матеріал для системи надпровідникових труб, що одночасно постачатимуть рідкий водень і, без втрат, електроенергію. У глобальній надпровідній системі майбутнього, схематично показаній на малюнку 3, рідкий водень і електроенергія постачатимуться з поновлюваних джерел: вітру, припливних хвиль, енергії сонця, тепла,

біологічних процесів, а також з ядерних і термоядерних станцій. Така система матиме кілька портів введення водню, електроенергії та численні дрібні порти доставки палива та енергії користувачам.

1 Сучасні методи виготовлення MgB_2



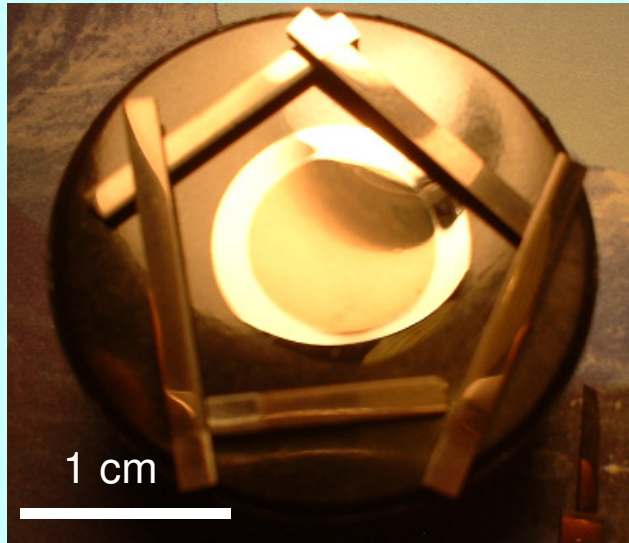
ГПІ



РС

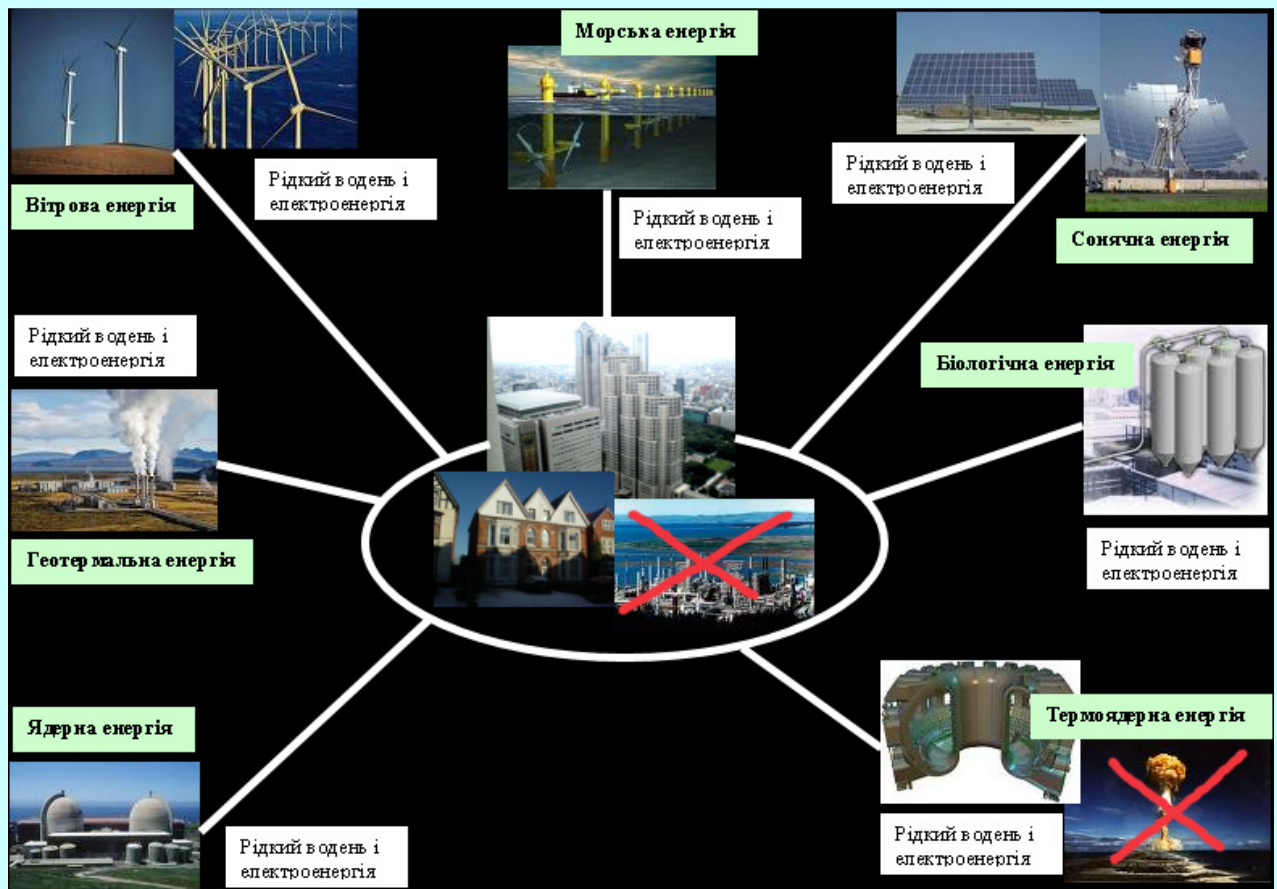
Схеми гарячого ізостатичного пресування (ГПІ) і резистивного спікання (РС). Матеріал в центрі - MgB_2 . Параметри обробки (тиск, температура і електричний струм) показані на малюнку. Стрілки вказують напрям тиску. Ці відносно прості методи дозволяють отримати полікристалічний MgB_2 з майже монокристалічною щільністю маси. Численні поверхні розділу між зернами, що утворюються при пресуванні, забезпечують сильний пінінг і високий критичний струм в матеріалі.

2 MgB_2 виготовлений гарячим ізостатичним пресуванням



MgB_2 виготовлений методом ГПІ у центрі бакелітового диска виглядає як золото. Він оточений кільцем з нержавіючої сталі. Кілька брусків вирізано з ГПІ- MgB_2 і розташовано навколо полірованого диска у формі п'ятикутника. MgB_2 - твердий матеріал, у три рази легший за нержавіючу сталь.

3 Інфраструктура водневої економіки



Глобальна інфраструктура водневої економіки буде складатися з надпровідникових MgB_2 труб, що одночасно доставлять рідкий водень і, без втрат, електроенергію. Рідкий водень і електроенергія будуть надходити з поновлюваних джерел, таких як вітрові, морські, сонячні, геотермальні і біологічні, а також з ядерних і термоядерних станцій. Така система матиме декілька великих портів введення водню і електроенергії і численні дрібні порти доставки палива та енергії користувачам. Великі нафтоперегонні заводи вже не будуть потрібні і, маємо сподіватись, людство використовуватиме ядерні і термоядерні пристрої тільки для енергетичних потреб.

Інфраструктура водневої економіки

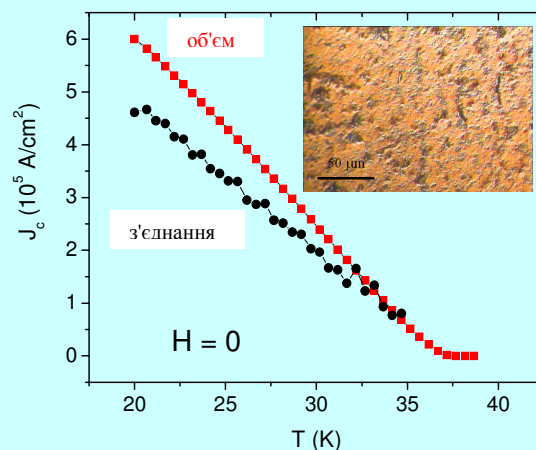
Загальна концепція розподілу енергії для водневої економіки відома як Надсистема Роподілу (НР) або Super Grid. Перші проекти НР передбачали використовувати ВТНП дріт (див., напр., Світ Фізики (Physics World), Т. 22, № 10, 2009, стор. 37). Останні проекти НР засновані на використанні MgB_2 як дешевшої альтернативи ВТНП. НР все ще залишається концепцією і нині немає технологій виробництва необхідних довгомірних MgB_2 -трубопроводів з великою площею перетину надпровідникового матеріалу. Одне з можливих рішень для виробництва труб з MgB_2 – об'єднати ГП з гарячою гідро-екструзією.

MgB_2 -труба з внутрішнім діаметром 18 см і зовнішнім – 20 см у режимі надпровідності може витримати потужність середньої електростанції (460 МВт). Така труба може бути виготовлена шляхом гарячої гідро-екструзії. Її невеликий діаметр може бути ідеальним для постачання електроенергії до міст від середнього розміру електростанцій. Однак такий діаметр буде недостатній для постачання належної кількості рідкого водню. Трубопровід великого діаметру, що поставляє і електроенергію, і водень, можна збудувати за технологією товстоплівкового покриття. Одна з таких технологій, що використовує надпровідникову фарбу на основі MgB_2 , є винаходом автора цієї статті. Просте фарбування нею металевих труб з наступною термічною обробкою створює товсте надпровідникове покриття. Надпровідникові властивості такого покриття вже були випробувані при низьких температурах.

Запропонована інфраструктура є досить гнучкою. Наприклад, вдень, коли попит на електроенергію великий, трубопровід може використовуватися в основному для доставки електроенергії. Вночі значна частина електроенергії може бути перенаправлена для виробництва водню шляхом електролізу води. Отриманий таким чином, та зріджений водень транспортуватиметься вранці у необхідній кількості як паливо.

Технологія фарбового покриття за своєю суттю не потребує з'єднання надпровідників. Однак труби виготовлені екструзією мають бути з'єднані так, щоб не переривати надпровідний струм. Технологія з'єднання MgB_2 надпровідників великої площі була розроблена автором у Бірмінгемі (Великобританія) і може бути втілена у життя вже нині. Малюнок 4 ілюструє властивості одного з надпровідникових з'єднань.

4 Надпровідні властивості з'єднання MgB_2



Температурна залежність критичного струму на з'єднанні (чорний колір) і в об'ємі MgB_2 -матеріалу (червоний колір). Щільність критичного струму на з'єднанні лише незначно зменшена порівняно з об'ємним MgB_2 . На вставці показане зображення з'єднання під оптичним мікроскопом (ледве помітна вертикальна лінія посередині зразка).

На ньому показана температурна залежність критичного струму на з'єднанні і в об'ємі MgB_2 -матеріалу. Щоб збільшити критичний струм, до дибориду магнію було додано наночастки Du_2O_3 . Щільність критичного струму на з'єднанні лише незначно менша порівняно з об'ємним MgB_2 . На сьогодні виготовлено лише кілька зразків таких з'єднань, тож подальше збільшення критичного струму теж цілком можливе. На вставці показано оптичне зображення з'єднання (вертикальна лінія посередині зразка). Використаний у цьому експерименті MgB_2 був виготовлений з дешевого низькосортного порошку. Незважаючи на відносно велику кількість порот і включень (темні області), щільність критичного струму у ньому досить висока і це забезпечує економічне використання MgB_2 .

Інфраструктура Надсистеми Розподілу призначена для створення вільної від викидів CO_2 економіки, оскільки при спалюванні водню утворюється лише вода. До речі, масштабне виробництво MgB_2 пропонує ще одну можливість для зменшення викидів CO_2 . Недоліком чистого MgB_2 у порівнянні з ВТНП є його відносно низьке критичне магнітне поле. Це обмежує застосування матеріалу у великих магнітних полях. Щоб підвищити критичне поле, достатньо ввести невелику кількість вуглецю у кристалічну ґратку MgB_2 . Це можна зробити просто змішавши порошок MgB_2 з рідким вуглеводнем. Під час термічної обробки такої суміші вуглеводень розпадається. Вуглець інтегрується у кристалічну ґратку MgB_2 і утримується там постійно (CO_2 не утворюється, отже нема потреби його утилізувати), а водень, що виділяється, можна зібрати, зрідити і використати як паливо. Це може бути надзвичайно ефективним способом розкладання рідкого вуглеводню. У разі організації достатнього виробництва MgB_2 , у масштабах тисяч, можливо мільйонів тон, цей процес значно зменшить викиди CO_2 , що мав би утворюватись під час простого спалювання вуглеводнів.

Глобальні застосування надпровідності

У разі стабільного постачання рідкого водню надпровідність широко увійде у повсякденне життя. Її впровадження може розпочатися з автомобілебудування. Нині вже існує кілька діючих моделей авто на рідкому водні, наприклад, BMW Hydrogen 7. Бак цього авто містить більше 100 літрів рідкого водню. Якщо рідкий водень (з його низькою температурою 20 К) вже є у авто, чому б не обладнати його надпровідниковими пристроями? Таке авто може мати високоефективний надпровідниковий двигун, надпровідниковий генератор для покриття всіх його електричних потреб, надпровідникову електричну проводку, надпровідниковий обмежувач струму для захисту електричної системи автомобіля, надпровідниковий (можливо квантовий) комп'ютер і тому подібне. Але чи варто обмежуватись лише надпровідниковим автомобілем? Що заважає обладнати надпровідниковими пристроями, які працюють на рідкому водні, літак, корабель, підводний човен, космічний корабель? Зрештою, чому б не зробити Надпровідникову Енергетичну Систему для окремого будинку? Вона, за наявності 200-300 літрів рідкого водню, також буде здатна забезпечити функціонування надпровідникового генератора, обмежувача струму, комп'ютера та інших надпровідникових пристроїв.

Будинок із запасом рідкого водню і надпровідниковим оснащенням буде забезпеченим енергією і захищеним від перебоїв у її постачанні. Якщо такий проект не надто важливий для житла, то для лікарень, оборонних споруд, будівель, що забезпечують інформаційний обмін, тощо, він може мати особливе значення. Можна припустити, що потреба, а відтак і ринок таких надпровідникових систем у майбутньому будуть значними.

Якщо постачання рідкого водню буде належно забезпечене, відкривається можливість вирішення глобальних проблем. Однією з найбільш важливих є захист магнітного поля Землі. Нашій планеті ще щастить, що вона має магнітний захист (малюнок 5). Такі планети як Марс і Венера його вже втратили. Марс міг би підтримувати життя, коли б він був захищений від сонячного вітру магнітним полем. Однак через зникнення поля внаслідок охолодження планети, її атмосфера була частково здерта потужним Сонячним вітром, і, замість можливого зеленого раю, Марс перетворився на холодне пекло, у той час як Венера, що ближче до Сонця, ніж Марс і Земля, перетворилася на гаряче пекло. На жаль, можливості магнітного захисту Землі обмежені. Ядро нашої планети охолоджується (незважаючи на глобальне потепління) і в якийсь момент циркуляція розплавленої лави усередині Землі уповільниться і її магнітне поле теж зникне.

Таке може статися не скоро, але тривожить інший процес - зміна магнітних полюсів Землі. За останні 10 мільйонів років це відбувалося 40-50 разів, і ми вже наближуємось до чергової їх зміни. За реалістичними підрахунками зміна полюсів може статись за 1500-1600 років. Під час такої зміни Земля протягом кількох років або десятків років буде без достатнього магнітного захисту. Частково вона втратить атмосферу. Отже, інтенсивне сонячне випромінювання викличе негативні зміни у біосфері: призведе до пригнічення росту рослин, сприятиме значному зростанню онкологічних захворювань і т. п.

Точні наслідки такого періоду без достатнього захисту не відомі, але вони не будуть приємними. Хоча загроза термінового зникнення поля існує, здається, люди нічого не можуть вдіяти, щоб відвернути її, бо не можуть впливати на процеси, що відбуваються у надрах нашої планети. Супутниковий моніторинг магнітного поля є єдиною розумною дією, що запропонована до сих пір.

5 Магнітний щит від сонячної радіації



Природний магнітний захист Землі від сонячного випромінювання. На малюнку схематично показано екранування масового викиду Сонячної корони.

Ми не можемо вплинути на процеси в надрах планети, але ми здатні захистити Землю, створивши штучне магнітне поле. Уявімо собі надпровідниковий MgB_2 трубопровід навколо планети, як показано на малюнку 6. Надпровідний струм у цьому трубопроводі утворить навкруги планети магнітне поле приблизно такої ж сили, яке воно є сьогодні.

6 Надпровідниковий трубопровід для магнітного захисту Землі



Штучний магнітний захист поля Землі від сонячного випромінювання за допомогою надпровідникового MgB_2 трубопроводу з охолодженням рідким воднем (червоний колір).

Звичайний провідник непридатний для цього, тому що електричний струм у ньому швидко зникне, у той час як надпровідний струм тече без зменшення (це основна властивість надпровідника). Сила струму, яка необхідна для створення трубопроводом магнітного поля у 0,5 ерстед (що дорівнює величині магнітного поля поблизу поверхні Землі), складає приблизно один мільярд ампер. Здається, це недосяжно великий струм, до того ж він має бути нижче критичного струму трубопроводу, щоб не знищити у ньому надпровідність. Однак, рахуючи з уже досягнутої щільності критичного струму в MgB_2 , що дорівнює 10^6 А/см², перетин площею усього 32×32 см² буде цілком достатнім щоб тримати такий струм у надпровідному стані. Якщо говорити більш детально, надпровідник такого перетину має бути розподілений по поверхні труби великого діаметра, щоби не пригнічувати надпровідність власним магнітним полем.

Здавалось би, знадобиться багато електростанцій, щоб створити такий великий струм. Та насправді електростанції не потрібні взагалі. Крім того, що надпровідник забезпечує протікання електричного струму без зменшення його рівня, він, до того ж, виштовхує магнітне поле. Якщо надпровідниковий «екватор» буде збудовано зараз, то через ефект «виштовхування магнітного поля» магнітне поле Землі не зможе вийти за надпровідникове кільце і поле буде зафіксовано у його теперішньому стані. Хтось може запитати: «Зачекайте, а як же процеси всередині планети?» Вони будуть протікати відповідно власній природі, але завдяки надпровідниковому «екватору» не зможуть змінити магнітне поле. Замість того вони наведуть електричний струм у трубопроводі, максимальне значення якого буде у два рази більше того, що необхідне для підтримки поля в 0,5 ерстед. Щоб зафіксувати магнітне поле Землі, трубопровід повинен тримати цей струм у надпровідному стані.

Оскільки напрям магнітного поля навколо планети не має особливого значення для людей, після періоду змін і стабілізації процесів в надрах планети струм у надпровідному «екваторі» може бути перерозподілений у менші надпровідникові кільця. Тоді магнітні полюси зміняться, а велика кількість енергії у формі надпровідникового струму у цих кільцях збережеться готовою до вживання. Її можна буде використати де завгодно: у домашньому господарстві, у промисловості і для наукових експериментів. Це не надто велика кількість енергії, але її було б достатньо для такої країни, як Великобританія, приблизно на один рік.

Описаний механізм можна розглядати як новий спосіб отримання енергії. На жаль, це не відновлювана енергія. Її буде забрано від нашої планети, що прискорить її охолодження. До того ж великий струм у надпровідниковому «екваторі» треба буде зберегти щоб захистити планету, коли потоки розплавленої магми перестануть генерувати поле.

Зміна полюсів Землі – рідкісна подія, що відбувається приблизно один раз на 200000 років. Але існує явище, що трапляється набагато частіше. Кожні 11 років магнітні полюси на Сонці також змінюються і у момент їх зміни Сонце посилає на Землю інтенсивний потік заряджених часток. Ці частки порушують рівновагу в магнітосфері Землі і наводять потужні струми у лініях електропередач, іноді руйнуючи їх, що викликає масові відключення електроенергії. Надпровідникові кільця великого розміру могли б перевести енергію цих потоків у придатний для використання надпровідний струм.

Найбільша магнітна активність, викликана Сонцем, спотерігається у районах, близьких до магнітних полюсів Землі, де великі напруги індукуються навіть на газопроводах. Саме тому є сенс встановити кільця надпровідникових трубопроводів у тих районах. Енергію, яку б ми отримали з цих трубопроводів, можна було б віднести до відновлюваних джерел (принаймні доти, поки на Сонці змінюються полюси). Її природа не дуже відрізняється від енергії сонячних променів. Різниця полягає лише у частоті електромагнітних коливань, або швидкості зміни електромагнітного поля. Великі надпровідникові кільця можуть отримувати енергію від магнітного поля, що змінюється повільно. Корисним для генерації енергії може також бути зовнішнє по відношенню до Сонячної системи магнітне поле. Рухаючись у космічному просторі, Земля може перетинати зони сильного магнітного поля і це можна використати для отримання енергії.

Однією з перешкод для таких глобальних проєктів може бути недостатня кількість надпровідникового матеріалу. Але для побудови надпровідникового «екватора» потрібно буде усього 5 мільйонів тонн бору, що становить тільки 0,00015% від його запасів у верхньому шарі земної кори товщиною один кілометр. За нинішніх темпів його виробництва, необхідну кількість бору можна видобути протягом 5-ти років.

Описаний спосіб добування енергії у масштабах планети може допомогти справитися ще з однією глобальною проблемою, яка складає навіть більшу загрозу, ніж зміна магнітних полюсів - виверження супервулканів. Наприклад, супервулкан у національному парку Слоустоун у США прокидається з періодичністю раз на 800000 - 600000 років. Після останнього виверження вже минуло 640000 років. Якщо воно відбудеться знову, Землю на декілька років вкриє густа хмара попелу. Ріст рослинності на

усій планеті буде пригнічений протягом тривалого часу, отже людству загрожуватиме голод. У результаті такого катаклізму значна кількість людей на планеті зникне протягом кількох місяців.

Якщо активну вулканічну зону оточити надпровідниковим трубопроводом, як показано на малюнку 7, виверженню вулкану можна буде запобігти. Перед виверженням змінюється циркуляція лави, і, відповідно, у зоні вулканічної активності змінюється магнітна проникність земної кори. Це створить потужний електричний струм у трубопроводі. Відведення цього струму забере енергію від супервулкану. Якщо відвести достатню кількість енергії, така локальна «хірургія» може зупинити виверження, або первести його у керований режим. У майбутньому, коли можна буде встановити та контролювати надпровідний струм у багатьох кільцях, це дозволить контролювати рух розпеченої лави у надрах Землі, не допускаючи її накопичення у найнебезпечніших місцях близько до поверхні планети.

7 Вилучення енергії з Супервулкану



Надпровідниковий трубопровід, що утворює кільце навколо вулканічної області, може запобігти виверженню супервулкану і бути використаний для отримання енергії.

Великі надпровідникові кільця можна також застосовувати для відхилення метеоритів, щоб запобігти їх зіткнення з Землею. Це ще одна небезпека, що загрожує людству. Більшість метеоритів містять залізо, нікель, або обидва метали, тобто вони або магнітні, або можуть бути намагнічені. Саме сила відштовхування, що виникає між надпровідником і магнітом, може і бути використана для відхилення метеоритів. Під час відхилення, частину їх енергії можна було б захопити як струм у надпровідниковому кільці. Деякі метеорити могли б навіть бути бажаними, бо від них можна було б отримати додаткову енергію.

Штучний магнітний захист Землі поки що може бути нездійсненним через певні технологічні чи політичні причини. Однак подібний захист можна створити локально, навколо великих міст чи навіть у меншому масштабі, навколо важливих об'єктів. Для початку можна було б застосувати цю технологію для захисту супутників. Диборид магнію - надзвичайно легкий надпровідник і, завдяки низькій температурі космічного простору, він працюватиме на орбіті без криогенної рідини. Фарба на основі MgB_2 може бути ідеальною для такого застосування. Особливо ефективним може бути використання фарби на Місяці або на орбіті Землі, де термічну обробку можна буде проводити у безкисневій атмосфері.

Отже зникнення викопних видів палива, загроза глобального потепління та перехід на поновлювані джерела енергії дозволяють нам сподіватись на широке використання надпровідності. Сама ж надпровідність дає надію на подолання енергетичної кризи та вирішення глобальних проблем, що стоять перед людством.

Подяка

Автор дякує д-ру І. Міхеєнко, д-ру М. Редвуду і Миколі Рудю - головному редактору журналу "Натураліст" за корисні коментарі і обговорення.

Вибрані публікації автора з надпровідності

1. P. Mikheenko, *Superconductivity for hydrogen economy*, **Journal of Physics: Conference Series** **286** 012014 (2011).
2. P. Mikheenko, V-S. Dang, Y.Y. Tse, M.M. Awang Kechik, P. Paturi, H. Huhtinen, Y. Wang, A. Sarkar, J.S. Abell and A. Crisan, *Integrated nanotechnology of pinning centers in $YBa_2Cu_3O_x$ films*, **Supercond. Sci. Technol.** **23** 125007 (2010)
3. P. Mikheenko, J.S. Abell, A. Sarkar, V-S. Dang, M.M. Awang Kechik, J.L. Tanner, P. Paturi, H. Huhtinen, N. Hari Babu, D. A. Cardwell, and A. Crisan, *Nano techniques for enhancing critical current in superconducting YBCO films*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, DOI: 10.1007/s10948-010-0861-2 (2010).
4. P. Mikheenko, A. Sarkar, V.-S. Dang, J.L. Tanner, J.S. Abell, and A. Crisan, *c-Axis correlated extended defects and critical current in $YBa_2Cu_3O_x$ films grown on Au and Ag-nano dot decorated substrates*, **Physica C** **469** 798–804 (2009).
5. P. Mikheenko, A. Sarkar, V.-S. Dang, J. L. Tanner, M. M. Awang Kechik, J. S. Abell, and A. Crisan, *Pinning Centers Induced in YBCO Films by Nano-Dots in Substrate Decoration and Quasi-Superlattice Approaches*, **IEEE Trans. Appl. Supercond.** **19**, No. 3, 3491-3494 (2009).
6. P. Mikheenko, S.K. Chen, J.L. MacManus-Driscoll, *Minute pinning and doping additions for strong, 20 K, in-field critical current improvement in MgB_2* , **Appl. Phys. Lett.** **91** 202508 (2007).
7. P. Mikheenko, E. Martínez, A. Bevan, J.S. Abell and J.L. MacManus-Driscoll, *Grain boundaries and pinning in bulk MgB_2* , **Superconductor Sci. Technol.** **20** S264-S270 (2007).
8. P. Mikheenko and J.S. Abell, *Spin injection into MgB_2* , **Journal of Physics: Conference Series** **43**, 297–300 (2006).
9. P. Mikheenko, A.I. Bevan, and J.S. Abell, *Nucleation and growth of dense phase in compressed MgB_2* , **Journal of Physics: Conference Series** **43**, 535–538 (2006).
10. P. Mikheenko, X. Deng, S. Gildert, M.S. Colclough, R.A. Smith, C.M. Muirhead, P.D. Prewett, and J. Teng, *Phase slips in submicrometer $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ bridges*, **Phys. Rev. B** **72**, 174506 (2005).
11. P. Mikheenko, R. Chakalova and C. M. Muirhead, *Conductivity of the interface for spin-polarized electrons in the pseudogap state of underdoped $YBa_2Cu_3O_x$* , **Phys. Rev. B** **71**, 184517 (2005).
12. P. Mikheenko, R. Chakalov, R. Chakalova, M.S. Colclough, and C.M. Muirhead, *Conductivity of the interface between $La_{0.7}Ca(Sr)_{0.3}MnO_3$ and underdoped $YBa_2Cu_3O_x$* , **Physica C** **408-410**, 365-366 (2004)
13. P. Mikheenko, K.K. Uprety and S.X. Dou, *Characteristic Properties of Low and High T_c Materials: BSCCO*, in **Handbook of Superconducting Materials**, Vol 1, Materials and Processing, Ed. D Cardwell and D Ginley, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003, p.947-992.
14. P. Mikheenko, R. Chakalov, M.S. Colclough, and C.M. Muirhead, *Magnetic flux penetration into MgB_2* , **Mod. Phys. Lett. B**, **17**, No 10-12, May 20, 675-689 (2003).
15. P. Mikheenko, M.S. Colclough, C. Severac, R. Chakalov, F. Welhoffer and C.M. Muirhead, *Effect of Spin Polarised Injection on the Mixed State of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$* , **Appl. Phys. Lett.** **78**, 356-358 (2001).
16. P. Mikheenko, B. Zeimetz, S.X. Dou, *Surface barrier controlled order-disorder transition in $Bi2223/Ag$ tapes*, **Physica C**, **325**, 83-90 (1999).
17. P. N. Mikheenko, J. Horvat, Q.Y. Hu, M. Ionescu and S.X. Dou, *Grain-boundary links and critical current of $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x/Ag$ tapes* **Superconductor Science Technology**, **10**, N6, 444-449, (1997).
18. P.N. Mikheenko, S.X. Dou, S.J. Lewandowski, I.S. Abaliosheva. *Quasi-2D behavior behavior of HTSC: consequence of small effective thickness of superconducting layer*. **Superconductor Science Technology** v.9, p.942-951, (1996).
19. P. N. Mikheenko, S.J. Lewandowski, R. Monaco, and V.A. Milyaev, *Experimental observation of transitions between phase states in four-junction parallel-series connected Josephson loops // Fiz. Nizk. Temp. **22** (1996) N6 pp.645-647 [**Low Temp. Phys.** **22**, N6 pp. 494 - 496 (1996)].*
20. P.N. Mikheenko, S.X. Dou, *Critical currents in artificial multilayers*. In book "Critical Current in Superconductors" (proceedings of 8th International Workshop on Critical Currents in Superconductors (IWCC) (Kitakyushu, Japan, May 27-29, 1996)), World Scientific Publisher, Singapore-New Jersey-London-Hong Kong, 1996, p.397-400.
21. P.N. Mikheenko, V.A. Voloshin, V.V. Babenko, V.G. Bootko, I.M. Resnik, Ya.I. Yuzhelevskii, *The location of two-dimensional superconducting layers in $YBa_2Cu_3O_7$* . In book: "**High Temperature Superconductivity and Tunneling Phenomena**" Edition of Don.PTI Ac.Sc.of Ukraine, Donetsk, 1995, p.133-138.
22. P.N. Mikheenko, *Restriction of critical current in HTSC: pinning or two-dimensionality?* In book: "**Critical currents in superconductors**", World Scientific, Singapore, p.268-271 (1994).