

SZUPRAVEZETÉS ALAPJAI ÉS ALKALMAZÁSA

SUPERCONDUCTION FUNDS AND APPLICATION

Bársony Krisztián ^{1*}

¹ Informatika Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Pallasz Athéné Egyetem, Magyarország

Kulcsszavak:

szupravezető
kvantumfizika
BCS elmélet
nulla celsius

Keywords:

superconductor
quantum physics
BSC theory
zero celsius

Cikktörténet:

Beérkezett 2017. január 24.
Átdolgozva 2017. február 15.
Elfogadva 2017. március 14.

Összefoglalás

A szupravezetés jelenségét a XX. század elején fedezték fel. Kezdetben a működéséhez szükséges hűtést csak laboratóriumi körülmények között tudták biztosítani, mégis egyre több elméleti fizikus érdeklődött a jelenség iránt. Leírására egyre precízebb Nobel-díjakat érdemlő elméletek születtek. Kísérleti fizikus kollégáik sem tétlenkedtek, sikerült olyan speciális anyagokat gyártaniuk, melyek már olcsóbb hűtés mellett is szupravezető tulajdonságot mutatnak. Használatukkal számos mérnöki probléma vált megoldhatóvá, egyszerűbbé. A közel nulla Ohmos ellenállású huzalok használatát az energetikai iparban próbálják hasznosítani. A szupravezető segítségével kialakítható erős, homogén mágneses teret az orvostudományban képalkotásra, míg a gépészetben kis veszteségi ellenállású járművek gyártására használják fel.

Cikkemben a történeti áttekintés után ismertetem a szupravezető típusokat. A jelenségek megértésére bepillantást nyújtok a legfontosabb elméleti modellekbe. Cikkem végén kategorizálom, majd bemutatom a napjainkban alkalmazott erős-, és gyengeáramú villamos alkalmazásokat.

Abstract

Although, the potential of the superconductivity has been already known from the beginning of the 20th century and its theory could be certified under laboratory conditions, nowadays still various new approaches and applications are born to take advantage of the opportunities of this physical phenomenon.

In the first half part of the article the theoretical physical concepts about the superconductors are introduced, while the second part contains the classification of the applications and their short description.

1. Bevezetés, típusok bemutatása

A szupravezetés története 1908-ig nyúlik vissza. Heike Kamerlingh Onnes holland fizikus ekkor cseppfolyósította a héliumot. Mivel a hélium folyékony halmazállapotban -293°C -os, így alacsony hőmérsékletű kísérletekbe foghatott. 1911-ben alacsony hőmérsékleten, különböző anyagok ellenállásának vizsgálatánál azt vette észre, hogy bizonyos kritikus hőmérséklet alatt, az ellenállás ugrásszerűen megszűnt [9]. Az anyagok ezen állapotát elnevezte szupravezető állapotnak, és

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76 516 422
E-mail cím: barsony.krisztian@gamf.kefo.hu

amely fémes anyagok ilyen viselkedést mutattak a szupravezető nevet kapták. Nagypontosságú mérésekkel kimutatták, hogy az ólom fajlagos ellenállása szupravezető állapotban $4 \cdot 10^{-25} \Omega \text{m}$.

Már Kamerlingh is észrevette, hogy a szupravezető állapotban lévő anyag kritikus mágneses tér hatására visszatér normál állapotba. Az összefüggést az (1) egyenlet írja le

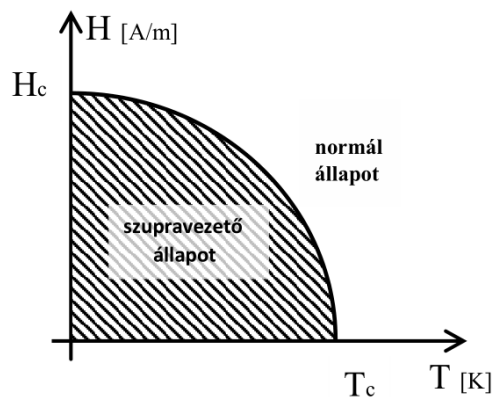
$$H_k = H_0 \left(\frac{T^2}{T_k^2} \right), \quad (1)$$

ahol H_k a szupravezetőhöz tartozó kritikus mágneses térerősség, H_0 a nulla Kelvin fokhoz tartozó kritikus mágneses térerősség, a T_k a kritikus hőmérséklet a T pedig a szupravezető hőmérsékletét.

A szupravezető anyagok tulajdonságaik szerint csoportosíthatók. Találunk kritikus hőmérséklethez történő csoportosítást úgy, mint alacsony hőmérsékletű szupravezetők (AHS vagy angol rövidítésből LTS) és magas hőmérsékletű szupravezetők (MHS vagy HTS). Jellemző még a számmal jelzett típusok megkülönböztetése (I., II., III. típus). Több helyen a III. típust nem választják külön, hanem a II. típus második generációjaként [11] vagy az inhomogén anyagszerkezetre utalva nem-ideális II. típusként is emlegetik [4]. Találkozhatunk még szilárdság szerinti csoportosítással is, mint a fémes tulajdonságokkal bíró lágú és kerámia tulajdonságú kemény szupravezetőkkel.

1.1. I. Típusú szupravezető

Az előbbieken bemutatott két állapottal bíró alacsony kritikus hőmérséklettel rendelkező szupravezető anyagokat soroljuk az I-es típusba. A mágneses tér behatolását az anyagba a London-féle behatolási mélység határozza meg. Ez nanométerekben mérhető, így a szupravezető árama is ezen vékony felületi rétegben fog folyni.



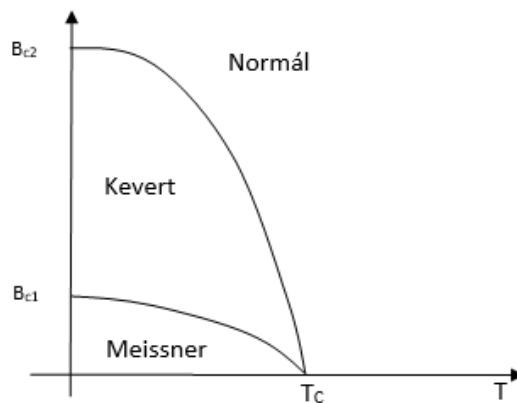
1. ábra I. típusú szupravezető állapot hőmérséklet és mágneses térerősség függése

1. táblázat I. típusú szupravezetők kritikus paramétereit [4]

Elem	Kritikus hőmérséklet T_c (K)	Kritikus mágneses tér H_c (A/m)
nióbium	9,46	$1,575 \cdot 10^5$
higany	4,15	$3,28 \cdot 10^4$
ólom	7,19	$6,39 \cdot 10^4$
vanádium	5,3	$1,05 \cdot 10^5$
ón	3,72	$2,46 \cdot 10^4$

1.2. II. Típusú szupravezető

1935-ben bejelentették, hogy a fémek viselkedésétől eltérően az ötvözetekbe behatolt mágneses fluxus csökkenő külső térben nem szorul ki teljesen az anyagból, hanem a fémbe marad addig, míg az anyag szupravezető állapotban van. A jelenség fluxusmegkötés néven vált ismertté, az állapotot kevert állapotnak nevezzük. Van olyan szupravezető, aminél a felső kritikus indukció értéke elérheti a 100T nagyságrendet is (elméletét a 2.2-ben részletesebben kifejtem). Fontos még megemlíteni, hogy ezen AHS-vel homogén mágneses teret lehet kialakítani, ami adott alkalmazásoknál komoly előnyt jelent.



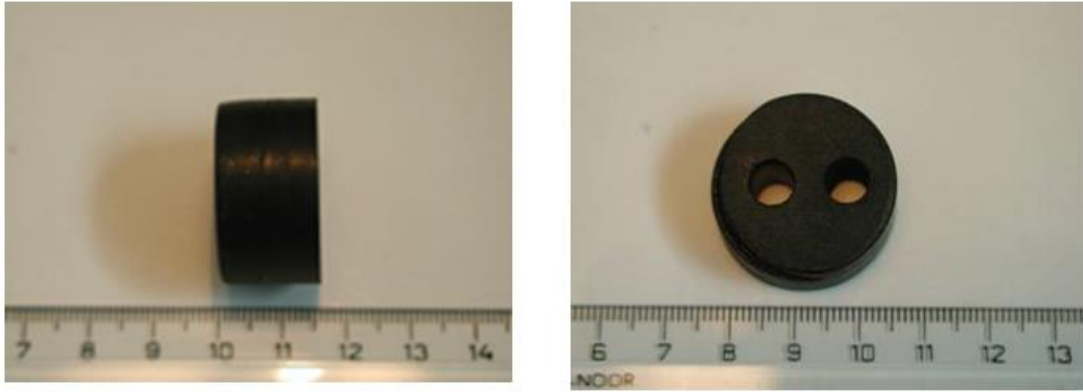
2. ábra II. típusú szupravezető kevert állapottal [4]

2. táblázat II. típusú szupravezetők kritikus paraméterei [4]

Vegyület illetve ötvözet	Kritikus hőmérséklet T_c (K)	Kritikus mágneses tér H_c (A/m)
$Nb_3(Al_{0,8}Ge_{0,2})$	20,5	$0,8 \cdot 10^7$
Nb_3Sn	18,5	$1,6 \cdot 10^7$
Nb_3Al	18	$1,6 \cdot 10^7$
V_3Si	17	$1,3 \cdot 10^7$
V_3Ga	16,8	$2,8 \cdot 10^7$

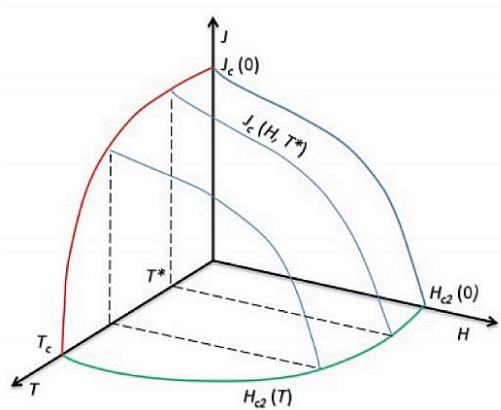
1.3. III. Típusú szupravezető

A fejlesztésekben 1986-ban újabb előrelépés mutatkozott, ugyanis Alex Müller és George Bednorz előállították a La-Ba-Cu-O alapú kerámia szupravezetőt melynek kritikus hőmérséklete 35K körülire adódott [10]. Pár hónappal később Maw-Kuen Wu kínai származású amerikai kutató és csapata újabb áttörést ért el a kerámia szupravezetőkkel. Az általuk bemutatott Y-Ba-Cu-O (YBCO) szupravezető a nitrogén forráspontra fölért hőmérsékleten szupravezető állapotba kerül, ami 77K-t jelent. Ezen típusú anyagok már a magas hőmérsékletű szupravezetők (MHS) kategóriájába tartozik. Fizikai viselkedésük szempontjából kemények és ridegek, mint a kerámiák, emiatt megmunkálásuk törés, repedés bekövetkezése nélkül nehézkes, de megoldható [4] (ld. 3. ábra). Ellenállás szempontjából szintén érdekes anyagokról van szó, mivel normál állapotban a kerámiákra jellemzően nagy ellenállást képviselnek, míg szupravezető állapotban ez az érték közel nulla.



3. ábra Megmunkált YBCO szupravezető tömb [4]

Továbbá a III. típusú szupravezetőknek anyagszerkezeti eltérése miatt megvan az az előnye az I-es és II típusú szupravezetőkkel szemben, hogy lényegesen magasabb az a kritikus elektromos áramerősség, ami alatt nem tér vissza normálállapotba. Ez nagyságrendileg 1000 A/cm^2 jelent. Ha az előző ábránkat (1. ábra) kiegészítjük az áramerősséggel, akkor egy kritikus felületet kapunk, amely megmutatja, milyen paraméterek mellett marad az anyagunk szupravezető állapotban.



4. ábra III. típusú szupravezető kritikus felülete [8]

3. táblázat III. típusú szupravezetők kritikus hőmérséklet paramétere [4]

Anyag	Kritikus hőmérséklet T_c (K)
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$	62
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,9}$	83
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,94}$	91,2
$\text{EuBaCuO}_{7-\delta}$	95
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	109
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ Veszélyes, erősen mérgező!	123
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{O}_{8+\delta}$	133

2. Szupravezetőkhez köthető elméleti alapfogalmak

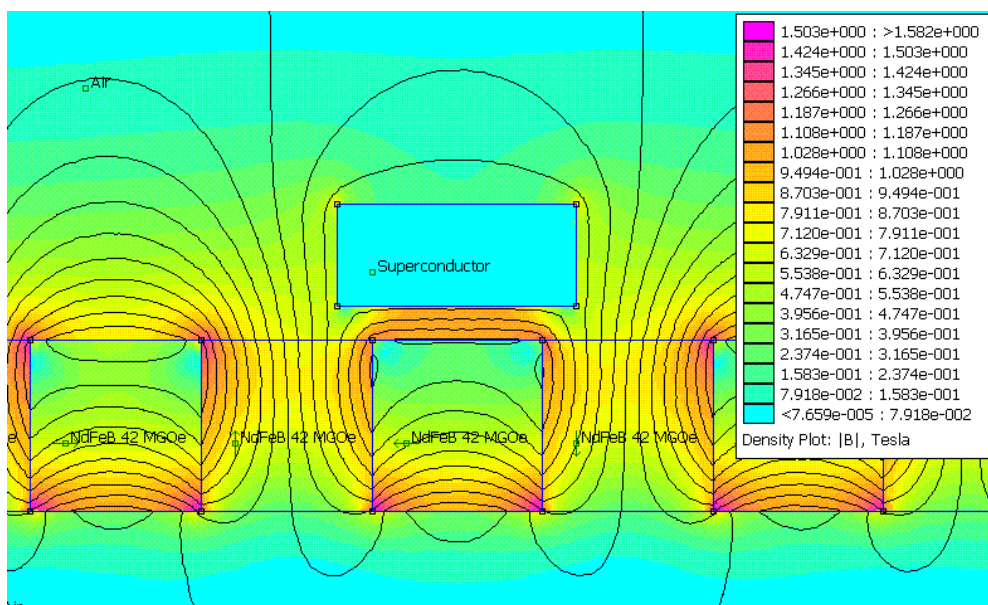
Kamerlingh nulla ellenállásának felfedezése után - amiért Nobel-díjjal kitüntették - megpróbálták az elméleti fizikai hátteret is biztosítani. Elsőként a szupravezetéshez köthető fontos jelenség, a szupravezetők diamágneses viselkedését próbálták elmélettel is igazolni. Ennek megismerését, és lebegtetéshez köthető alkalmazásokat 1933-ban Meissnernek és Ochsenfeldnek köszönhetjük. Elméletének kidolgozásában segítségükre volt Fritz és Heinz

London (London-elmélet). A klasszikus és komplex makroszkópikus méretben keresendő elméletet az 1950-es években a szovjet Ginzburg és Landau hozta létre [12]. Segítségével Abrikosov két csoportra tudta osztani a szupravezetőket, amiért 2003-ban Nobel-díjat is kapott. Az eddigi legtöbb jelenséget igazolni tudó kvantummechanikai elméletet csak később 1957-ben mutatta be J. Bardeen, L. N. Cooper, és J. R. Schrieffer, akik Nobel-díjat érdemeltek. 1963-ban W.A. Little megpróbálja a BCS elméletet nemfémek anyagokra általánosítani, ezzel feltételezi, hogy a kritikus hőmérséklet - a BCS-modell alapján William L. McMillan által valószínűsített elméleti maximális 40K helyett – akár több száz Kelvin is lehet. Feltételezése 1986-ban beigazolódtott, a III. típusú keramikussal MHS felfedezésével, ami szintén Nobel-díjat érdemelt.

A BCS-modell kidolgozásával egy időben megszületett a Josephson-effektus is, ami a két szupravezető réteg közötti vezetést feltételez az esetben is, ha őket vékony szigetelőréteggel választjuk el. Munkájáért 1973-ban ő is Nobel-díjat kapott.

2.1. Meissner-Ochsenfeld effektus

1933-ban W. Meissner és R. Ochsenfeld kísérletekkel bizonyította, hogy szupravezető állapotban lévő anyagokból kizorul a mágneses térerősség és diamágneses tulajdonságot mutatnak. 1-nél kisebb permeabilitású anyagok a természetben is előfordulnak, ellenben a szupravezetők közel ideálisnak, nullának tekinthetők. Így, ha mágnest közelítünk a szupravezetőhöz, azt taszítani, illetve stabil állapotban fogja tartani. Ezen tulajdonságára több gyakorlati alkalmazást is fejlesztettek már.



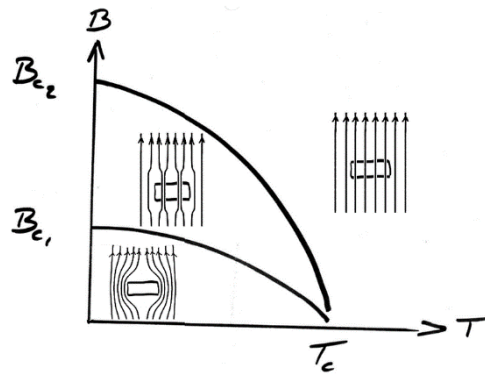
5. ábra A szupravezetőből kizorult mágneses térerősség

A szupravezető anyagba a mágneses térerősség nanométeres nagyságrendben tud behatolni, a London-elmélet igazolásában. Ezen felületen mágneses közegben áram indukálódik, ami a rá, hatással lévő mágnes irányába ellenerőt fejt ki. A szupravezető belsejét a felületi áramok leárnyékolják, ezért a belsejében nem tud mágneses tér kialakulni, így permeabilitása nulla lesz.

Ellentétben a Lenz törvényénél ismert jelenséggel, itt a szupravezetőben lévő, mágnesség hatására gerjesztett áram idővel nem csökken, így a lebegés fenntartására megfelelő az egyenáram.

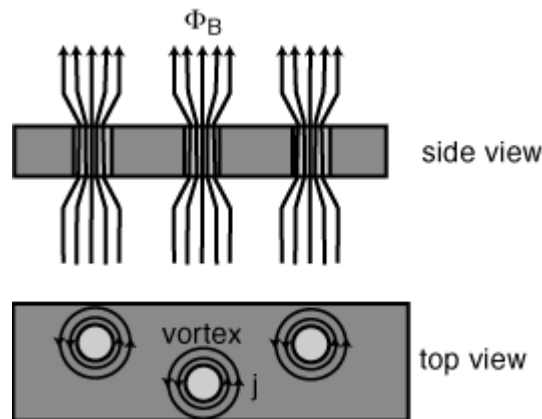
2.2. Kevert állapot elmélete (vortex)

Az 1950-es évek elején a Ginzburg-Landau-elméletre [12] építve Alekszej Alekszejevics Abrikosov felismerte a II. típusú szupravezetőket, és a hozzájuk tartozó kevert állapotot.



6. ábra Szupravezető állapotainak mágneses tulajdonsága [13]

Normál állapotban az anyagba behatol a mágneses tér. Az anyagot a kritikus hőmérséklet alá hűtve elérjük, hogy az anyagból kiszoruljon a mágneses tér (Meissner-effektus), ekkor viselkedik diamágnesként. Ha a lehűtött szupravezető anyagot növekvő külső mágneses hatásnak tesszük ki, azt tapasztaljuk, hogy visszatér normál állapotba. A II. típusú anyagoknál az állapotváltozás két fázis alatt megy végbe. A B_{C1} mágneses fluxussűrűséget átlépve az anyag kevert állapotba kerül, amit azt jelenti, hogy a mágneses tér apró csövek (fluxusörvények vagy angol elnevezésében vortex) mentén, az anyagon áthatol. Hogy az anyag belseje diamágneses maradjon, a vortexek körül áram alakul ki. Ennek segítségével megvalósítható a nagyobb mágneses térerősség melletti szupravezetés. Az 1960-70-es években már szupravezető szalag segítségével 15T-s elektromágneseket terveztek.



7. ábra A kevert állapotban kialakuló vortexek

A II.-es típusú szupravezetőknél azt vették észre, hogy amennyiben a kevert állapotban lévő szupravezetőre oldal irányban áramot vezetnek, az anyag visszatér normál állapotba. Ez azzal magyarázható, hogy a külső áram a vortexek körül kialakult köráramokra hatással van, aminek hatására a fluxusörvények helyet cserélnek. Ez a folyamat disszipatív, aminek hatására az anyag hőmérséklete ugrásszerűen a kritikus fölé emelkedik, így visszatér normálállapotba.

A III. típusú anyagba bevitt anyagszintű inhomogenitás lehetővé teszi a vortexek megkötését. Így a fluxoidok között ébredő Lorentz erő ellenében rögzítő erő (pinning) kevert állapotban tartja az anyagot magasabb elektromos térerősség átvezetése mellett is.

2.3. Kvantummechanikai (BCS) elmélet

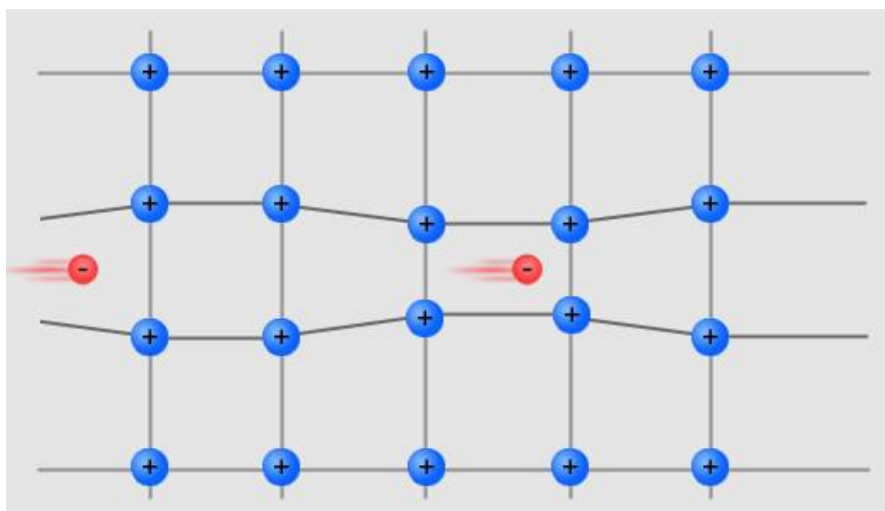
Szupravezető állapotban az atomtörzshöz közeledő szabad elektron megzavarja az atomtörzs rezgésállapotát, ennek következtében az ion rezgési energiát bocsájt ki. A rezgés energia-kvantumát fononnak nevezzük. Ez közvetíti az elektronok közötti kölcsönhatást. Ez a

kölcsönhatás vonzó az ellentétes spinű elektronok között, így adott elektronok párokká – feltalálója után Cooper-párokká – fejlődnek.

W.A. Little ezt általánosította a nemfémek anyagokra. Feltételezi, hogy a fémek ionrácsa közötti kölcsönhatást más kölcsönhatások helyettesíthetik (elektronok polarizációs terének kvantuma), melyek szintén elektronpárképződést eredményeznek.

A Cooper-párok nem szorosan összekapcsolt elemek, a rácsállandó nagyságrendjénél nagyságrendekkel távolabb helyezkedhetnek el. A nulla eredő spinű Cooper-párokat bozonoknak nevezik. Ezek szabadon mozoghatnak a kristályrácsban.

A Cooper-pár kötési energiája a szupravezető Fermi-energiáját csökkenteni. A Fermi-energia felett egy tiltott sáv, ún. gap keletkezik. Ha a Cooper-pár kötési energiája nagyobb, mint az ionrácsot jellemző hőenergia, akkor a rács nem akadályozza a párok mozgását, így elektronok nem veszítenek energiát. Ily módon a gap létezésével magyarázzák az ellenállás nélküli vezetést.



8. ábra Cooper párok, és hatásuk az atomtörzsre

Továbbá fontos tény, hogy az árammal átjárt szupravezető gyűrű által körülfogott fluxus kvantált, vagyis egy meghatározott fluxus érték egész számú többszöröse lehet. Meghatározásában a (2) egyenlet lehet segítségünkre

$$\Phi = n \left(\frac{h}{2e} \right), \quad (2)$$

ahol h a Planck-állandó, a nevezőben lévő $2e$ pedig a Cooper elektron pár energiáját jelenti. A kvantált mágneses fluxus $2 \cdot 10^{-15}$ Vs.

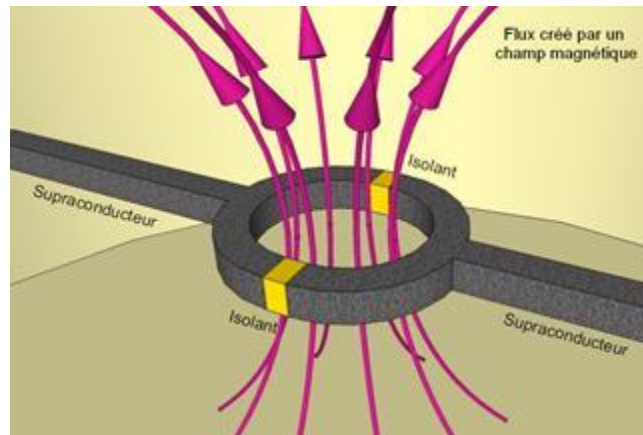
Ezen elmélet kidolgozásáért Bardeen, Cooper és Schrieffer Nobel díjat kapott. 1961-ben párhuzamosan folytatott kísérletek során az elmélet beigazolódott. Jelenleg is a kezdbetűikből alkotott kvantumfizikai alapokon nyugvó BCS-modell az irányadó.

3. Szupravezetők alkalmazása

A fizikusok sok lehetőséget találtak már a szupravezetők felfedezése után, így annak kutatása nagy ütemben haladt és halad is napjainkban. Elsősorban a nulla elektromos ellenállású és a különleges mágneses tulajdonságait próbálják hasznosítani. Ipari alkalmazásoknál nagy előrelépés a III. típusú MHS feltalálásával indult meg. Elterjedt ipari alkalmazásai az orvostudományban (MRI, NRM), elektronikában (ZÁK), és mechatronikában (MAGLEV) is elterjedt.

3.1. Gyenge áramú alkalmazások

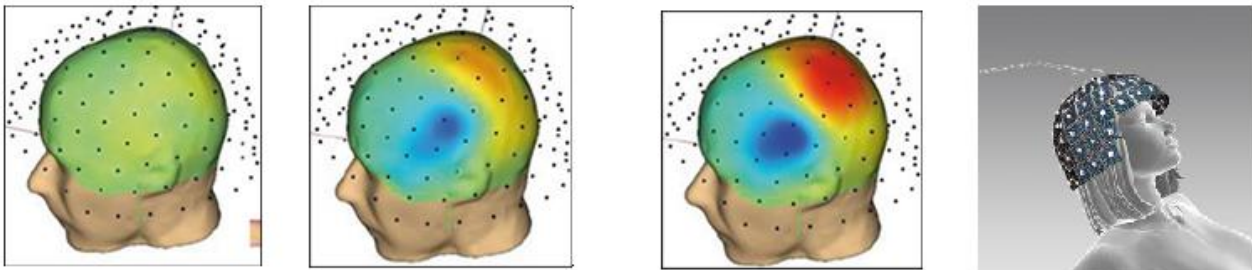
3.1.1. SQUID



9. ábra Kialakított SQUID gyűrű [13]

A SQUID (superconducting quantum interference device) Josephson effektusra épülő alkalmazás. Segítségével femtotesla értéket kimutató magnetómetert lehet létrehozni. Kialakításában mikrométer nagyságú szupravezető-szigetelő-szupravezető szendvicsből felépülő gyűrűt hoznak létre, melyben külső mágneses gerjesztés határa áram jön létre. Segítségével kimutatható lett a Planck-állandó értéke is.

Gyakorlati alkalmazásoknál a magnetoencefalográfiát (MEG) lehet megemlíteni. Itt több SQUID szenzorból álló csoportot helyeznek a páciens fejbőréhez, így regisztrálni tudják az agy adott részein történő mágneses aktivitást, illetve lokalizálni tudják az epilepsziát. Mérési nehézségeket a folyékony héliummal történő hűtés okoz és az, hogy agyi tevékenység által keltett mágneses intenzitás 8-9 nagyságrenddel kisebb, mint a Föld mágneses intenzitása.



10. ábra MEG szenzorhálózata, és a készített eredmény [13]

3.1.2. Szuperszámítógép

Szuperszámítógépek esetében is a Josephson-effektust használják ki a logikai értékek tárolására. Egy bitnyi információt, egyetlen kvantum mágneses fluxussal tárolják az előbb bemutatott Josephson gyűrűben. Az ily módon felépített tároló nagyobb sebességgel tudja az állapotát váltani. A RSFQ (rapid single flux quantum logic) logikai elem segítségével épített elektronikai számítógéppel akár terahertzes sebességet is el lehet érni [15].

Szuperszámítógépek fejlesztésében korlátozott lehetőségek állnak rendelkezésre. A 90-es évek derekától fogva jelennek meg kvantumszámítógépről szóló cikkek [16][17]. Ennek alapját a qubitek képezik, melyek nem csak az 1 és 0 állapotot tudják felvenni, hanem ennek szuperpozícióját is, azaz az 1-et és 0-át egyszerre. Ez esetben, ha műveletet hajtunk végre qubitekkel, az eredmény párhuzamosan jön létre, egy lépés után megkapjuk az összes eredményt.

Egy klasszikus kétállapotú 3 bites memória, kétállapotú qubitekkel szerelt memória esetén 2^3 információ tárolására alkalmas. Az elmélet már rendelkezésre áll. 2009-ben a Yale egyetemen a

quantumbiteket alumíniumatomokból kialakították és alapműveleteket sikerült vele végrehajtani. Az egyetlen probléma, hogy a kvantum-szuperpozíciót biztosító állapotot csak mikroszekundumnyi időig tudják fenntartani. Bizakodó becslések alapján 2020-ra sikerülhet célfeladatra kialakított kvantumrendszert kialakítani [14].

Kvantumszámítógép megvalósítása kvantumállapottal rendelkező anyagot követel meg. Mivel a szupravezető rendelkezik mágneses kvantumelemekkel (fluxonokkal), ezért irányában is folytatnak ehhez kapcsolódó kísérleteket.

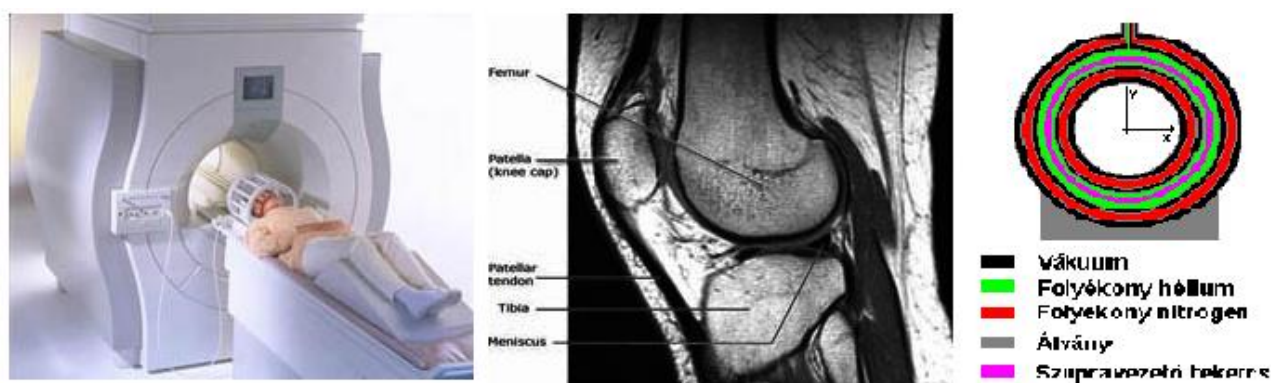
3.2. Erős áramú alkalmazások

3.2.1. Vezeték típusú felhasználások

a) MRI

A szupravezetők felhasználásának legjövödelmezőbb alkalmazása a mágneses rezonancias képalkotás (MRI). Segítségével feltárás nélkül vizsgálható a koponya, gerinc, szív, ízületek és belső szervek. Bár a vizsgálat már a második világháborúban is ismeretes volt, elterjedése a szupravezetők által keltett homogén mágneses tér megvalósításával vált elterjedté.

„A vizsgált testrészt egy mesterségesen fenntartott, erős mágneses térbe helyezik. Ez az erőter megdönti a hidrogénatomokban a protonok tengelyének irányát. Azért alkalmas a hidrogén a tanulmányozásra, mert elegendő mennyiségben van jelen a víz által a testben, és páratlan protonszámú. Ezeket a szkennelés alatt, rétegenként, plusz energiával „bombázzák”, ezzel megváltoztatják a tengelyük dőlését. Ezután a proton, miközben „igyekszik” visszaállítani eredeti dőlésszögét, a kapott energiát visszasugározza. Ezt a visszasugárzott energiát képes mérni a készülék, és ez alapján számítógép segítségével rekonstruálható a háromdimenziós kép is. „[18]



11. ábra MRI készülék, készített felvétel, és a mágnes metszeti képe [19]

b) Zárlati áramkorlátozó (SFCL)

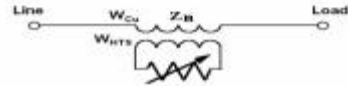
A villamos-energia-felhasználásának exponenciális növekedése miatt egyre több hálózatban lépik túl a berendezések a rendeltetésnek meghatározott zárlati áramokat. Ennek kezelése újszerű alkalmazásként a szupravezetőből kialakított zárlati áramkorlátozót (ZÁK) hoztak létre. Az addigi szabályozástechnikára épülő mérés-beavatkozással megvalósított, vagy egyszerűbb megszakításon alapuló rendszereket felválthatta az anyagának tulajdonságából fakadó szupravezető ZÁK. Két fajta kialakítás létezik. A rezisztív típusú, a hálózat vezetékével sorba kötött szupravezető elem. A III. típusú anyagoknál láthattuk, hogy amint egy meghatározott áramsűrűség halad át a szupravezetőn, az visszatér nagy ellenállású normálállapotba, ezzel korlátozva a kialakult áramot.



• **Rezisztív típusú**



• **Induktív típusú**

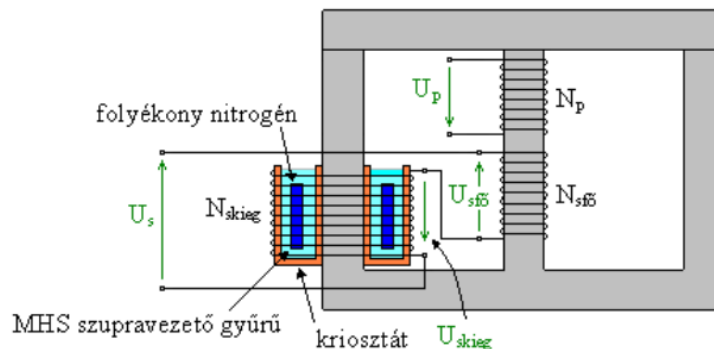


12. ábra Szupravezetős MHS ZÁK kialakításai [19]

Létezik még az induktív típusú kialakítás. Ez esetben a váltakozó áramot egy tekercs primerkörén vezetjük át, szekunderkörének pedig egy szupravezetőből kialakított gyűrűt helyezünk. Ha a korlátozón a primer áram egy kritikus értéket meghalad – zárlat jön létre -, akkor a szekunderkörben lévő gyűrűben kialakuló áram a szupravezetőben lévő kritikus áramot meghaladja. Ekkor a szekunderkör ellenállása megnő, ezáltal csökkentve az ellengerjesztést. A zárlat megszűnése után a szupravezető-állapot visszaáll, így karbantartásmentes áramkorlátozót kapunk. Előnye még a rezisztív párjával szemben, hogy a szupravezető gyűrű sérülése esetén nem történik szakadás a hálózaton - így az kényszerből tovább üzemeltethető -, illetve a hűtést egyszerűbb kialakítani, ha a szekunder kör elkülönítve található.

c) Szupravezetős önkorlátozó transzformátor

Ha az induktív magas hőmérsékletű szupravezetővel készített zárlati áramkorlátozót kiegészítjük egy plusz tekercssel egy újabb alkalmazást, az önkorlátozó transzformátort kapjuk.



13. ábra Önkorlátozó transzformátor [19]

Normál üzemben az MHS gyűrű ellengerjeszt, így az oszlop fluxusa közelít a nullához. Korlátozó üzemben a szekunder oldali eredő feszültséget csökkenti le a szembe kapcsolt osztott szekunder tekercselés, ezzel korlátozza a szekunder áramot.

d) Szupravezetős kábelek

A nagyvárosok energiafelhasználása rohamosan nő, így egyre komolyabb terhelésnek vannak kitéve az elektromos hálózatok így a távvezetékek is. Egyes erőművek fizikai adottságaik miatt is távolabb helyezkednek el a felhasználási helyüktől – megújuló energiaforrások – emiatt a

vezetékek hosszának csökkentését nem mindig lehet megvalósítani. A klasszikus réz, alumínium kábelek vesztesége elérheti a 10%-ot is, amit hő formájában disszipálnak. Emiatt a vezetékeket sok esetben olajjal hűtik.



14. ábra Felül hagyományos, alul szupravezetős kábel méretezése 12,5 KA terhelésre

A szupravezető távvezetékeknél a veszteség egy százalék alá csökkenthető és a hűtést környezetvédelmi szempontból veszélytelen folyékony nitrogénnel megvalósíthatják. Ráadásul mivel nincs akkora veszteség, a távvezetékekben lévő feszültséget sem kell 100kV nagyságúra feltranszformálni, így a hálózat kevesebb elemből áll. Hátránya, hogy a kerámia huzal előállítás költsége kb. tízszerese a hagyományos változatokénak, és hűtés nélkül az ellenállása lényegesen megnő réz típusú társaihoz képest. Ma már vannak cégek, melyek MHS szupravezető alkalmazásokra, köztük kábelek készítésére specializálódtak, így kész kábeleket is lehet tőlük rendelni [11].

Az első szupravezetős távvezetékekkel szerelt hálózatot 2000 februárjában helyezték üzembe kísérleti jelleggel. A kialakított 30 méter hosszú kábelben 12,5kV esik, és 1250A áram folyik. A hálózat azóta több mint 6000 órát üzemelt 100%-os terhelés mellett, meghibásodás nélkül [21].

e) Szupravezetős energiatároló (SMES)

A SMES (Superconduction Magnetic Energy Storage) berendezésekben az elektromos energiát mágneses mező formájában tárolják, amelyet egy szupravezető tekercsen áthaladó elektromos áram indukál. A tárolás a szupravezetőnek köszönhetően gyakorlatilag veszteségmentes. A hálózatba történő visszatáplálásakor is csak 2-3 % energia vesz el hő formájában. Alkalmazását jellemzően hálózati zavarok áthidalására alkalmazzák 1-2 másodperc időtartamig – jelenleg nincs más technológia, amivel ilyen gyorsan a teljes töltöttségről a lemerített állapotot el lehet érni.

Bár az SMES rendszer drágább és nagyobb, mint a többi energiatároló rendszer, egyetlen egység egyszerre 3 MW energiát is képes a hálózatra adni, környezetbarát, és bárhová telepíthető, ami igen vonzóvá teszi.



15. ábra A világ legnagyobb SMES-e Japánban Kameyama-ban található, 10MW-os

A szupravezetők energetikai alkalmazása nem csupán elméleti, Németországban (2012) és Kínában (2011) mind a négy technikát (b, c, d, e) aktívan alkalmazzák. 2011-ben a kínai Baiyin városban üzembe állítottak egy új állomást, amelyben szupravezető kábelek, SMES energiatárolás, transzformátor és ZÁK egység található. [21]

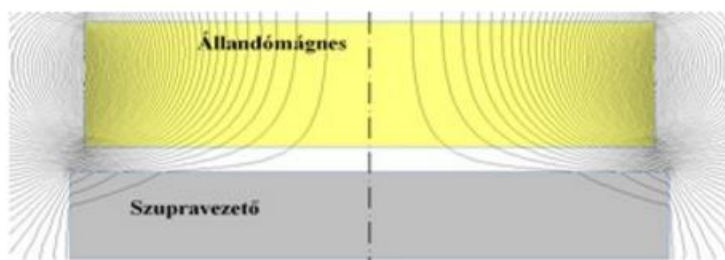
3.2.2. Tömbi felhasználások

a) Lendkeresek energiatároló

Az SMES-hez hasonlóan itt is energiatárolókról van szó, viszont itt az energiát nem maga a szupravezető anyag tárolja, hanem egy lendkerék forgásából adódó kinetikai energia. A lendkerék sűrűlédásának csökkentése érdekében a szupravezetőt a lebegtetett csapágyak kivitelezésére használják fel. A sűrűlédás tényezője golyós csapágyak esetében 10^{-3} , elektromágneses csapágynál 10^{-4} , MHS csapágynál 10^{-9} .

A lendkerék felgyorsítása (a tároló feltöltése) és a veszteségek pótlása villamos motorral történik, az energia visszanyerés (a tároló kisütése) generátorral és teljesítményelektronikai átalakítóval. A motor és a generátor lehet azonos egység és a lendítő tömeg lehet a motor/generátor forgórésze is. A forgó tömeg fordulatszáma akár 85 000 fordulat/perc is lehet.

Ilyen jellegű kinetikai energiatárolót 1-2 perces időtartamú feszültségletörések áthidalására, a dízelagregátorok indulásáig alkalmazzák.



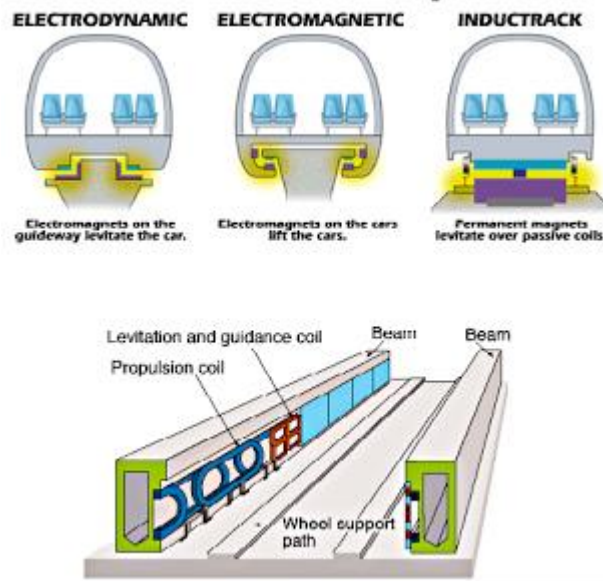
16. ábra Axiális szupravezető csapágy kialakítása [19]

b) Lebegtetések

A mágneses lebegtetés és hajtás elve nem újdonság, már 1934-ben szabadalmaztatta Hermann Kemper. A megvalósítás gondolata a 20. század hatvanas éveiben, Nyugat-Németországban, az USA-ban és Japánban merült fel. A német Messerschmitt-Bölkow-Blohm konzern már 1971-ben egy 660 m-es kísérleti pályán próbálta az elv valóra váltását. A munkában rövidesen minden érdekelt német nagyvállalat – a Deutsche Bundesbahntól, a ThyssenKruppon és

a Henschelen át a Siemensig – bekapcsolódott és 1979-ben már engedélyezték az első ilyen, személyszállításra is alkalmas jármű üzembe helyezését.

Működését tekintve két rendszer ismeretes. A német EMS (electromagnetic suspension) és a japán EDS (electrodynamic suspension).



17. ábra Az EMS és EDS rendszer kialakítása [22]

Az EDS rendszerben szupravezető tekercseket helyeznek el a vonatokban, amik nagyon erős mágnesként viselkednek. Ahogy a vonat gyorsít, a pálya két oldalán elhelyezett hagyományos tekercsekben áram indukálódik, amely elektromágneses erőt fejt ki a szupravezető mágnesre. 150 km/h felett ez az erő elég ahhoz, hogy 100 mm magasságban lebegtesse a vonatot [20]. A sínben lévő tekercseket csak lassításkor és gyorsításkor kell vezérelni, emiatt energiahatékonyabb a többi rendszernél, bár az EDS rendszer előállítási költsége magasabb az EMS rendszerénél.

Az EMS rendszer tisztán elektromágneses elvet használ. Mind a sínben, mind a kocsiban elektromágneseket helyez el, melynek szabályozásával elérhető a jármű pár centivel történő megemelése, illetve mozgásának kezelése. Bár a pályaszakaszt csak addig kell energiával ellátni míg a vonat elhalad, a közlekedés teljes idejére energiát használ a jármű.

Bár a fejlesztések nagy ütemben haladnak jelenleg Kínában (EMS) és Németországban (EMS) utazhatunk ilyen technikával. Japánban (EDS) 1997-2011-ig a közember számára is elérhető volt a Yamanashi tesztvonalon utazni. A mindennapi forgalom megszüntetése után nem bontották el, mai napi tesztekét végzik. 2015 áprilisában elérték az eddigi legnagyobb sebességet vasúton, ez 603km/h-ra adódott. A japánok szeretnék egy új vonalat nyitni Tokyo és Nagoyova között tömegközlekedés céljából. Ez várhatóan 2027-re fog elkészülni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm az ötleteket és a rendelkezésemre bocsájtott szakirodalmakat Dr. Kósa Jánosnak.

Köszönettel tartozok a kutatás támogatásáért, amely az **EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Pallasz Athéné Egyetemen”** pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Charles P. Poole: Handbook of Superconductivity, 2000, ISBN: 978-0-12-561460-3
- [2] Kósa János: Szupravezető minták előállítására és ezen anyagok alkalmazásai lehetőségei
Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka IX.: Nemzetközi Tudományos Konferencia. 346 p.
2004. pp. 119-124. ISBN:973-8231-33-7
- [3] Kurt Mendelson: Az abszolút zérusfok, Gondolat, Budapest, 1983, ISBN: 9632812387
- [4] Kósa János: YBCO szupravezető gyűrűk és zárt hurkok új alkalmazási lehetősége, PhD értekezés, Budapest, 2011
- [5] Dr. Puskás Ferenc: A szupravezetés, Firka, 1991/1, EPA00220
- [6] Kovács Endre: Szilárdtestfizika, félvezetők
Megtekintés: 2016.11.10
Link: http://web.uni-miskolc.hu/~www_fiz/KovacsE/SzilardtestINFO.pdf
- [7] Dr. Vajda István: Szupravezetők az elektrotechnikában
Megtekintés 2017. 1.10
Link: https://vet.bme.hu/drupal/sites/default/files/tantargyi_fajlok/3_ELESzupravezetes2012.pdf
- [8] Giuseppe Celentano, Andrea Augieri: High temperature superconductivity: challenges and perspectives for electric power applications
ENEA, Technical Unit for Nuclear Fusion
Megtekintés: 2017.01.21
Link: <http://www.enea.it/it/pubblicazioni/EAI/anno-2012/n.-3-maggio-giugno-2012/high-temperature-superconductivity-challenges-and-perspectives-for-electric-power-applications>
- [9] H. Kamerlingh Onnes, research notebooks 56 and 57, Kamerlingh Onnes Archive, Boerhaave Museum, Leiden, the Netherlands
- [10] G. Bednorz, and A. Muller (1986), Possible superconductivity in the Ba-La-Cu-O system, Z. Phys. B Vol. 64 pp. 189-193
- [11] SuperPower INC. (Gyártói honlap)
Megtekintés: 2017. 01. 22.
Link: <http://www.superpower-inc.com/>
- [12] V. L. Ginzburg and L. D. Landau, Zh. Eksp. Theor. Fiz 20, 1064 (1950)
- [13] Szupravezetőt népszerűsítő oldal
Megtekintés: 2017. 01. 22.
<http://www.supraconductivite.fr/>
- [14] Szedlák Ádám: Szuperagy lesz a kvantumszámítógép
<http://www.origo.hu/techbazis/20121009-az-egesz-vilagot-a-feje-tetejere-fogja-forditani-a-quantumszamitogep.html>
- [15] Dr. Balázs Zoltán: Digitális technika szupravezető eszközökkel
Megtekintés: 2017. 01. 23.
Link: <http://uni-obuda.hu/users/balazsz/Fizikall.el%F5ad%E1s/Digit%E1lis%20technika%20szupravezet%E1s%20eszk%E1z%20eszk%F6z%F6kk.el.ppt>
- [16] Neil Gershenfeld and Isaac L. Chuang: Quantum Computing with Molecules
Megjelenés: 1998
Megtekintve: 2017. 01. 23.
Link: <http://cba.mit.edu/docs/papers/98.06.sciqc.pdf>
- [17] Quantum Information and Computation. C. H. Bennett in Physics Today, Vol. 48, No. 10, pages 24–30; October 1995.
- [18] Tajnafői-Vida Éva: MRI – Mágneses rezonancia vizsgálat
Megtekintés: 2017. 01. 23.
Link: <http://www.vital.hu/mri-vizsgalat>
- [19] BME VET jegyzet
Megtekintés: 2017. 01. 23.
Link: https://vet.bme.hu/drupal/sites/default/files/tantargyi_fajlok/5a_zak.pdf
- [20] Dr. Farkas László: A szupravezetés erősáramú alkalmazásai
Megtekintés: 2017. 01. 23.
Link: <http://mvmpartner.hu/hu-HU/Szolgalatasok/Villamos-Energia/Erdekessegek/Aszupravezeteserosaramualkalmazasai>
- [21] Balázs Zoltán: Szupravezetők műszaki alkalmazásai
Megtekintés:2017.01.23
Link: uni-obuda.hu/users/balazsz/Fizikallnemvedett/FIZIKA%2011-5-2szupravez.ppt
- [22] Technoword: Magnetic levitation
Megtekintés:2017. 01.23
Link: <http://techdatacare.blogspot.hu/2011/12/magnetic-levitation.html>