

MAGNETOELEKTRIKI

ROBERT BLINC

Institut Jožef Stefan
Ljubljana

PACS: 71.23.-k, 77.22.-d

Podan je pregled nekaterih osnovnih lastnosti magnetoelektričnih sistemov. Ti sistemi kažejo hkrati feromagnetne in feroelektrične lastnosti. Medtem ko magnetne sisteme poznamo že od antike, feroelektrične pa skoraj sto let, so se intenzivne raziskave magnetoelektričnih sistemov šele začele in to kljub temu, da je Pierre Curie že leta 1894 napovedal obstoj takih sistemov. Ponovno zanimanje za magnetoelektrične sisteme je posledica možne uporabe v spintroniki in kot spominskih elementov.

MAGNETOELECTRICS

Some properties of magnetoelectric systems are reviewed. These systems show simultaneously ferromagnetic and ferroelectric properties. Though magnetic systems are known since ancient times and ferroelectrics are known for nearly hundred years, intensive research of magnetoelectric systems started only recently. This is so in spite of the fact that Pierre Curie in 1894 predicted the existence of such systems on the basis of symmetry considerations. The renewed interest in magnetoelectric systems is due to their possible applications in memories and spintronics.

Leta 1894 je na podlagi simetrijskih premislekov Curie [1] opozoril, da naj bi obstajali tudi magnetoelektrični kristali tj. kristali, ki hkrati kažejo tako električno polarizacijo kot tudi magnetizacijo. Nekaj let pozneje je Debye [2], ki je neuspešno poskusil eksperimentalno dokazati obstoj magnetoelektričnih sistemov, prvi uporabil oznako magnetoelektriki.

Magnetoelektrični kristali kažejo hkrati spontan magnetni in električni red. To pomeni, da hkrati kažejo feromagnetne in feroelektrične lastnosti oziroma antiferomagnetne in antiferoelektrične lastnosti. Medtem ko magnetne sisteme poznamo že od antike, feroelektrične sisteme pa že skoraj sto let, so se intenzivne, tudi uporabne raziskave magnetoelektrikov (ME) začele šele pred nekaj leti. A število publikacij s tega področja eksponentno narašča [3, 4, 5, 6].

Značilnost feroelektrikov je zlomljena simetrija nasproti inverziji prostora. Vektor polarizacije $\vec{P}$ je polarni vektor, ki spremeni predznak pri inverziji prostora:

$$\vec{P} \rightarrow -\vec{P}, \quad \vec{r} \rightarrow -\vec{r}, \quad (1)$$

pač pa je invarianten nasproti obratu časa:

$$\vec{P} \rightarrow \vec{P}, \quad \vec{t} \rightarrow -\vec{t}. \quad (2)$$

Vektor magnetizacije pa je aksialni vektor, ki je invarianten nasproti inverziji prostora, pač pa spremeni predznak pri obratu časa:

$$\vec{M} \rightarrow -\vec{M}, \quad \vec{t} \rightarrow -\vec{t}, \quad (3)$$

$$\vec{M} \rightarrow \vec{M}, \quad \vec{r} \rightarrow -\vec{r}. \quad (4)$$

Magnetoelektrični sistem opišemo z Landauovo teorijo [4], kjer prosto energijo $F(\vec{E}, \vec{H})$ razvijemo po potencah zunanjega magnetnega ($\vec{H}$) in električnega ($\vec{E}$) polja. Tu je treba omeniti, da imata $\vec{H}$ in $\vec{E}$ enaki simetriji kot $\vec{M}$ in $\vec{P}$, to je, $\vec{H}$ je aksialni, $\vec{E}$ pa polarni vektor.

Prosto energijo izrazimo kot

$$\begin{aligned} -F(\vec{E}, \vec{H}) = & \frac{1}{2}\epsilon_0 \sum_{i,j} \epsilon_{ij} E_i E_j + \frac{1}{2}\mu_0 \sum_{i,j} \mu_{ij} H_i H_j + \sum_{i,j} \alpha_{ij} E_i H_j + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i,j,k} \beta_{ijk} E_i H_j H_k + \frac{1}{2} \sum_{i,j,k} \gamma_{ijk} H_i E_j E_k + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

Prva dva člena na desni opisujeta običajni odziv sistema nasproti električnemu in magnetnemu polju. Tretji člen opisuje linearno magnetoelektrično sklopitev, $\alpha_{ij}(T)$. Členi β_{ijk} in γ_{ijk} so tenzorji tretjega reda, ki opisujejo magnetoelektrične koeficiente višjega (kvadratičnega) reda. Magnetoelektrične efekte dobimo v obliki $P_i(H_j)$ in $M_i(E_j)$. Prvi izraz dobimo z odvajanjem F po E_i in postavitvijo $E_i = 0$. Podobno dobimo drugi izraz $M_i(E_j)$.

Velja:

$$P_i = \sum_j \alpha_{ij} H_j + \frac{1}{2} \sum_{j,k} \beta_{ijk} H_j H_k + \dots \quad (6)$$

in

$$\mu_0 M_i = \sum_j \alpha_{ji} E_j + \frac{1}{2} \sum_{j,k} \gamma_{ijk} E_j E_k. \quad (7)$$

Kristal, ki je hkrati feromagneten in feroelektričen, ima običajno velik linearni magnetoelektrični koeficient. To sledi iz dejstva, da imajo feromagnetiki običajno velik μ_{ij} , feroelektriki pa velik ϵ_{ij} . Velikost linearnega magnetoelektričnega koeficienta pa je omejena z

$$\alpha_{ij}^2 \leq \sum_{i,j} \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_{ij} \mu_{ij}, \quad (8)$$

to je z velikostjo elementov ϵ_{ij} in μ_{ij} diagonaliziranih tenzorjev ϵ_{ij} in μ_{ij} .

Omeniti je treba, da sta spremembi električne polarizacije zaradi magnetnega polja in magnetizaciji zaradi električnega polja enako veliki:

$$\alpha = \left(\frac{\delta P}{\delta H} \right)_E = \mu_0 \left(\frac{\delta M}{\delta E} \right)_H. \quad (9)$$

Ker imata vektorja $\vec{P}$ in $\vec{M}$ različni simetriji, so sistemi z od nič različnim magnetoelektričnim koeficientom dokaj redki [7]. Tako obstaja le nekaj magnetnih točkovnih grup, kjer je linearni magnetoelektrični koeficient različen od nič.

Magnetoelektrične sisteme lahko opišemo s pomočjo magnetnih točkovnih grup. Magnetoelektrični efekt v načelu najdemo v 69 točkovnih grupah, od katerih je zaradi dodatnih omejitev le 58 zares magnetoelektričnih [8].

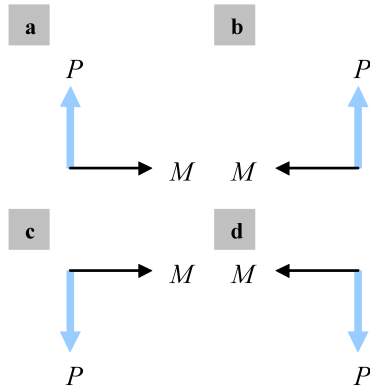
Z mikroskopskega stališča je redkost magnetoelektrikov posledica nasprotujočih si zahtev za obstoj feroelektričnosti in obstoj feromagnetizma. Medtem ko nastanek feroelektričnosti zahteva premik kationa iz centralne lege, kar je možno v primeru praznih d-orbital, nastanek feromagnetizma v perovskitnih oksidih zahteva delno polne d-orbitale. Feroelektričnost in feromagnetizem tako lahko koeksistirata v eni fazi le, če so ioni, ki se premaknejo s centra in tvorijo električne dipole, drugačni od tistih, ki so nosilci magnetnih lastnosti. Omeniti je treba, da morajo biti feroelektriki izolatorji, saj v nasprotnem primeru gibljivi naboji „zasenčijo“ električno polarizacijo. To povzroča dodatno omejitev za obstoj magnetoelektrikov, saj je večina feromagnetov kovinskih, medtem ko je večina magnetnih izolatorjev antiferomagnetov.

Doslej najbolj raziskani magnetoelektriki so perovskiti na osnovi Bi in heksagonalni manganiki, npr. YMnO_3 in TbMnO_3 . BiFeO_3 je feroelektričen pod $T_c = 820^\circ\text{C}$ in šibko feromagneten pod $T_N = 643\text{ K}$. Sistem je v osnovi antiferomagneten, vendar simetrija dopušča šibek feromagnetizem zaradi rahlega upogiba pod mrežnih magnetizacij [6, 7]. Na antiferomagnetni red je superponirana spiralna struktura, kjer antiferomagnetna os rotira po kristalu. Kristal je tako inkomenzurabilno moduliran z valovno dolžino $\lambda = 620\text{ Å}$.

Omeniti je tudi treba, da je uspelo integrirati BiFeO_3 s silicijem, kar je pomembno za Si-CMOS elektroniko.

Magnetoelektriki kažejo izjemno potencialno uporabnost [9] v spintroniki [10], kjer namesto električnega naboja (kot v konvencionalni elektroniki) manipuliramo elektronske spine. Prav tako so pomembni za detekcijo majhnih magnetnih polj, kjer lahko nadomestijo SQUID-e (superconducting quantum interference devices), pri tem pa so ME detektorji znatno cenejši. Med najpomembnejše uporabe ME štejemo razvoj nove generacije spominskih elementov, kjer informacijo lahko vpišemo električno, beremo pa jo magnetno. ME spominski elementi v principu obstajajo iz štirih stanj: $(+P, +M)$, $(+P, -M)$, $(-P, +M)$ in $(-P, -M)$ (slika 1).

Z električnim poljem lahko med drugim preidemo iz stanja $(+P, +M)$ v stanje $(+P, -M)$, kar pri konvencionalnih spominskih elementih ni možno. ME spominski elementi omogočajo kombinacijo najbližjih lastnosti FERAM (ferroelectric random access memories) in MRAM (magnetic random access memories). Tako imamo tu poleg visoke gostote informacij tudi hiter električni vpis podatkov pri nizki moči ter nedestruktivno magnetno branje



Slika 1. Štiri stanja multiferoičnega reda (a–d). Električna polarizacija P in magnetizacija M lahko zavzameta štiri nekolinearna stanja v magnetoelektričnem kristalu.

podatkov.

Magnetoelektrični sistemi odpirajo vrsto novih možnosti za uporabo in pomenijo pomemben korak za študij tako feromagnetnih kot tudi feroelektričnih sistemov.

LITERATURA

- [1] P. Curie, *Sur la symétrie dans les phénomènes physiques: Symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique*, J. Physique **3** (1894), str. 393–415.
- [2] P. Debye, *Bemerkung zu einigen neuen Versuchen über einen magneto-elektrischen Richteffekt*, Z. Phys. **36** (1926), str. 300–301.
- [3] M. Fiebig, *Revival of the magnetoelectric effect*, J. Phys. D **38** (2005), str. R1–R30.
- [4] G. A. Smolenskii in I. E. Chupis, *Ferroelectromagnets*, Sov. Phys. Usp. **25** (1982), str. 475–493.
- [5] N. A. Spaldin in M. Fiebig, *The renaissance of magnetoelectric multiferroics*, Science **309** (2005), str. 391–392.
- [6] W. Eerenstein, N. D. Mathur in J. Scott, *Multiferroic and magnetoelectric materials*, Nature **44** (2006), str. 759–765.
- [7] N. A. Hill, *Why are there so few magnetic ferroelectrics?*, J. Phys. Chem. B **104** (2000), str. 6694–6709.
- [8] V. Shubnikov, *Symmetry and Antisymmetry of Finite Figures*, USSR Academy of Sciences, Moskva, 1951.
- [9] C. Binek in B. Doudin, *Magnetoelectronics with magnetoelectrics*, J. Phys. Cond. Mat. **17** (2005), str. L39–L44.
- [10] M. Gajek et al., *Spin filtering through ferromagnetic BiMnO_3 tunnel barriers*, Phys. Rev. B **72** (2005), 020406.