

ELEKTR MAYDONIDA DIELEKTRIKLAR. DIELEKTRIKLARNING QUTBLANISHI. QUTBLANISH VEKTORI

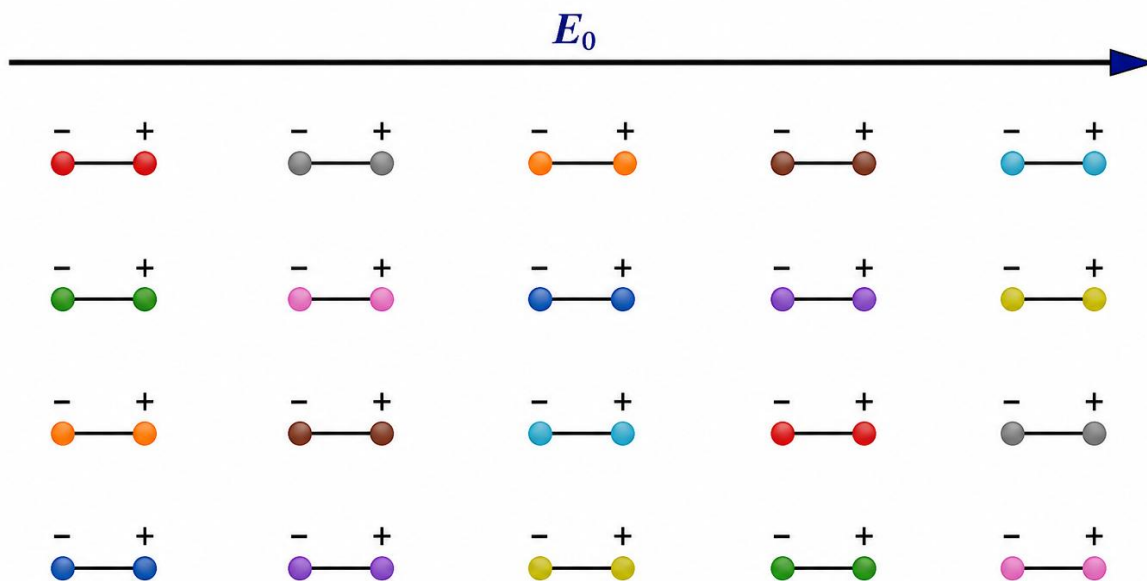
Elektrostatik maydonda dielektrik muhitning mikroskopik va makroskopik tavsifi

Dielektriklar elektr tokini metallardek erkin tashuvchi zaryadlar hisobiga o'tkazmaydigan, biroq tashqi elektr maydon ta'sirida ichki zaryad tuzilishi o'zgaradigan moddalar hisoblanadi. Elektr maydon dielektrik atomlari va molekulalaridagi musbat hamda manfiy zaryad markazlarini nisbatan siljitadi yoki mavjud dipol momentlarini ma'lum yo'nalishda tartiblaydi. Natijada qutblanish hodisasi yuz beradi. Dielektrikning makroskopik qutblanish darajasi qutblanish vektori P orqali tavsiflanadi. Ushbu tushunchalar elektr siljish vektori D , dielektrik singdiruvchanlik ϵ , bog'langan zaryadlar va kondensator sig'imining o'zgarishini ilmiy asosda tushuntirish uchun zarur.

Darsning maqsadi

Talabalarda dielektriklarning molekulyar tuzilishi, qutbli va qutbsiz molekulalar, elektron, ion va orientatsion qutblanish mexanizmlari, dipol momenti, qutblanish vektori, dielektrik qabul qiluvchanlik va bog'langan zaryadlar o'rtasidagi bog'lanish haqida yaxlit ilmiy tasavvur shakllantirish.

Tashqi maydonda dielektrikning qutblanishi



- Tashqi elektr maydon E_0 dielektrikdagi qutbli molekulalarni ma'lum yo'nalishga buradi (qutblaydi).
- Har bir molekulaning manfiy uchi ($-$) maydonga qarshi tomonga, musbat uchi ($+$) maydon yo'nalishiga qarab joylashadi.
- Natijada dielektrikning ichida natijaviy qutblanish P vektori maydon yo'nalishiga mos ravishda paydo bo'ladi.

1-rasm. Tashqi elektr maydonda dielektrik dipollarining qutblanishi

Tashqi E_0 maydon ta'sirida musbat va manfiy zaryad markazlari qarama-qarshi yo'nalishlarda juda kichik masofaga siljiydi. Ko'plab mikroskopik dipollarning natijaviy ta'siri makroskopik P vektorini hosil qiladi.

1. Dielektriklarning fizik tabiati

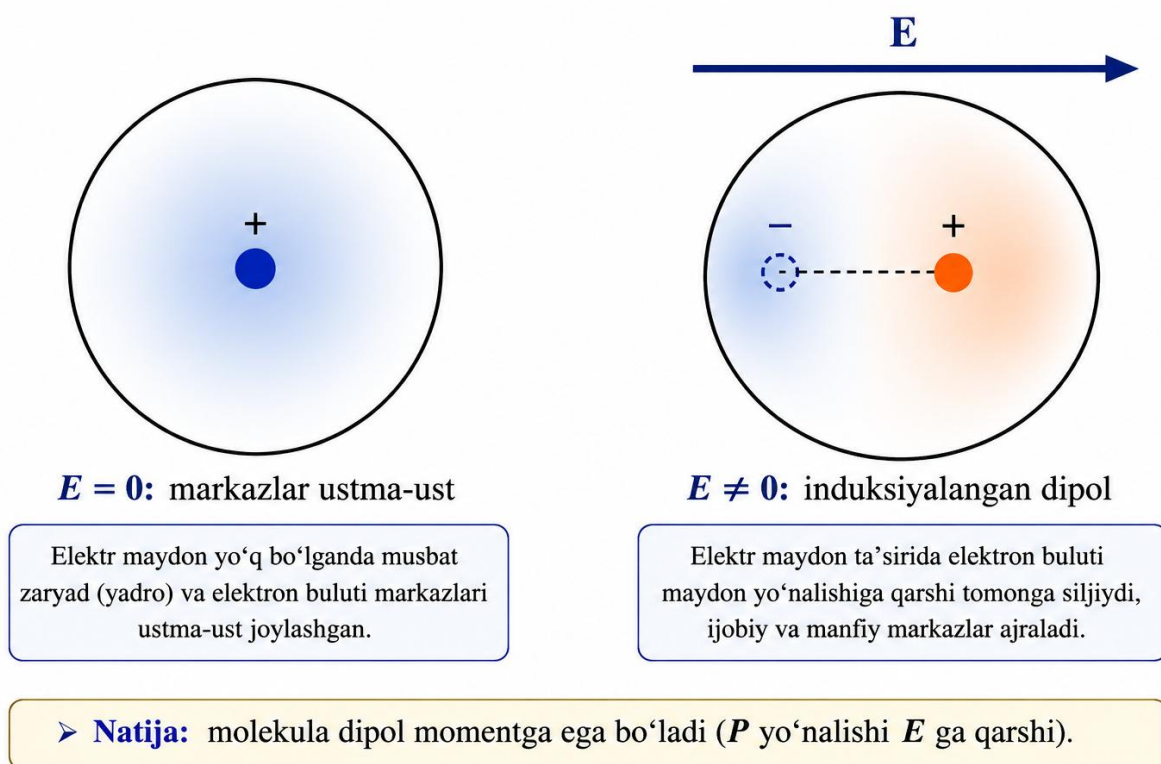
Dielektriklarda zaryadlar atom yoki molekullarga bog'langan bo'lib, odatdagi elektr maydonlarda butun namuna bo'ylab erkin ko'cha olmaydi. Shu sababli tashqi elektr maydon qo'yilganda o'tkazgichlardagidek $E=0$ holat yuzaga kelmaydi. Aksincha, bog'langan zaryadlarning mikroskopik siljishi tashqi maydonga qarshi yo'nalgan ichki qutblanish maydonini hosil qiladi va natijaviy elektr maydon kamayadi.

Dielektrik turi	Molekulyar xususiyat	Maydondagi asosiy jarayon
Qutbsiz	$E=0$ da doimiy dipol momenti yo'q	Induksiyalangan dipol hosil bo'ladi
Qutbli	Doimiy dipol momenti mavjud	Dipollar qisman E bo'yicha orientatsiyalanadi
Ion kristall	Musbat va manfiy ionlar panjarasi	Ion ostpanjaralari nisbiy siljiydi

Qutbsiz molekula

Qutbsiz atom yoki molekulada tashqi maydon bo'lmaganda musbat yadro zaryadi markazi bilan elektron bulutining manfiy zaryad markazi ustma-ust tushadi. E maydon qo'yilganda elektron buluti yadroga nisbatan ozgina siljiydi va induksiyalangan elektr dipol momenti paydo bo'ladi.

Qutbsiz molekulada elektron bulutining deformatsiyasi



2-rasm. Qutbsiz zarrachada induksiyalangan dipol momentining hosil bo'lishi

$$\vec{p} = q \vec{l}$$

Bu yerda q — dipol zaryadining moduli, l vektori manfiy zaryaddan musbat zaryadga yo'nalgan. SI tizimida dipol momentining birligi $C \cdot m$.

2. Dielektrik qutblanishining asosiy mexanizmlari

Qutblanishning fizik mexanizmi moddaning tuzilishiga va elektr maydon chastotasiga bog'liq. Elektrostatik yoki past chastotali maydonlarda elektron, ion va orientatsion qutblanishlar eng muhim hisoblanadi.

Mexanizm	Mohiyati	Xos obyekt
Elektron qutblanish	Elektron bulutining yadroga nisbatan siljishi	Barcha atom va molekulalar
Ion qutblanish	Musbat/manfiy ion ostpanjaralarining siljishi	Ion kristallar
Orientatsion qutblanish	Doimiy dipollarning E bo'yicha qisman tartiblanishi	Qutbli molekulalar
Fazalararo qutblanish	Zaryadlarning chegaralarda to'planishi	Geterogen dielektriklar

Elektron qutblanish

Kuchsiz maydonlarda induksiyalangan dipol momenti E ga taxminan proporsional:

$$\vec{p}_{\text{ind}} = \alpha \vec{E}$$

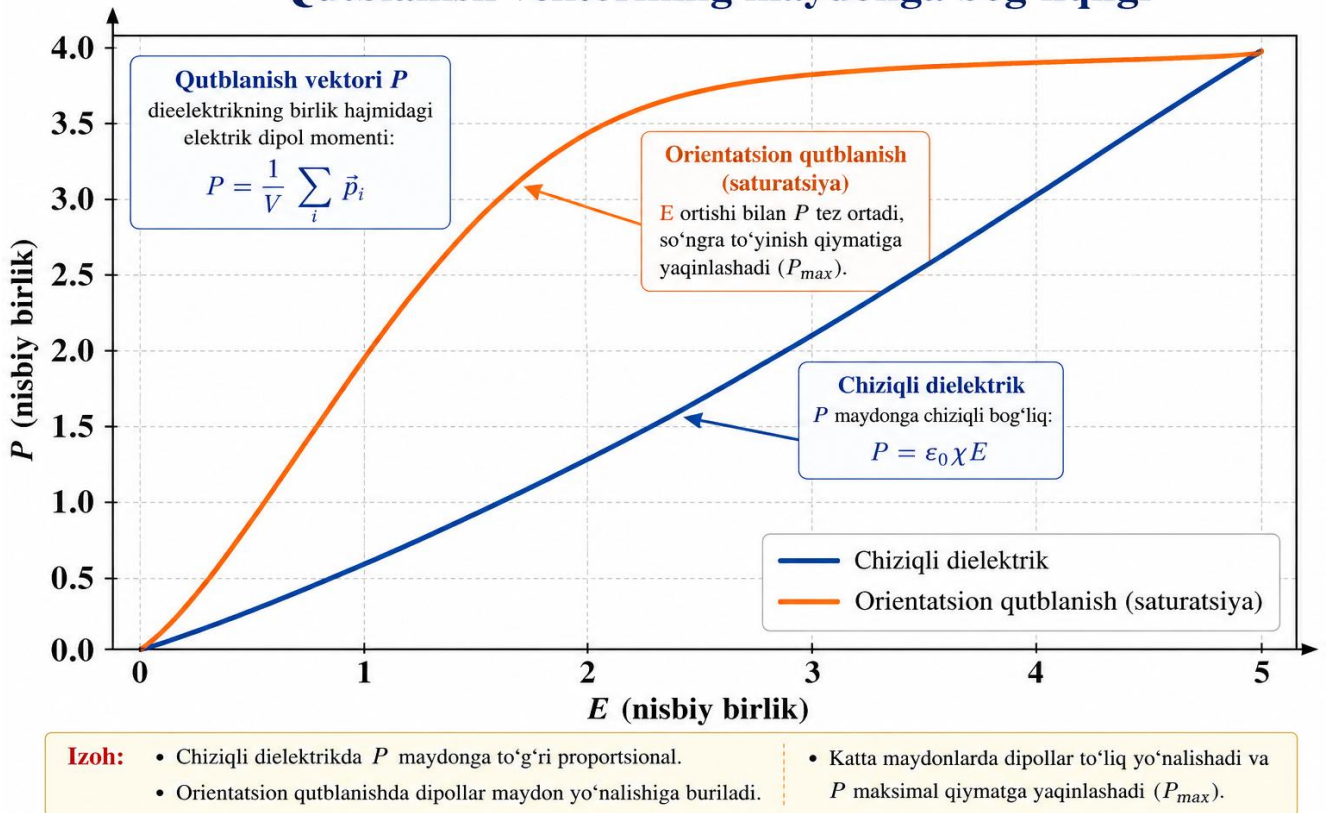
α — zarrachaning elektr qutblanuvchanligi. Maydon kuchayishi bilan elektron buluti deformatsiyasi ortadi, biroq juda kuchli maydonlarda chiziqli model buzilishi va elektr teshilish sodir bo'lishi mumkin.

Orientatsion qutblanish

Qutbli molekulalar $E=0$ da ham po doimiy dipol momentiga ega. Issiqlik harakati dipollarni tartibsizlashtiradi, elektr maydon esa ularni o'z yo'nalishiga burishga intiladi. Shuning uchun qutblanish maydon kuchi bilan ortadi, harorat oshishi bilan esa odatda kamayadi.

Kuchsiz maydon va yetarlicha yuqori haroratda orientatsion qutblanishning E ga bog'lanishi deyarli chiziqli, kuchli maydonlarda esa dipollarning ko'pchiligi yo'nalib bo'lgach saturatsiya yuz beradi.

Qutblanish vektorining maydonga bog'liqligi



3-rasm. Chiziqli va saturatsiyalanuvchi qutblanishning sifat grafigi

3. Qutblanish vektori P

Makroskopik dielektrikning qutblanish holatini alohida molekulalarning dipol momentlari orqali emas, balki birlik hajmga to'g'ri keladigan natijaviy dipol momenti bilan ifodalash qulay. Qutblanish vektori P shunday aniqlanadi:

$$\vec{P} = (1/\Delta V) \sum \vec{p}_i$$

Cheksiz kichik makroskopik hajm limitida P fazoning funksiyasiga aylanadi. Uning SI birligi C/m^2 . Bir jinsli izotrop chiziqli dielektrikda P elektr maydon bilan bir yo'nalishda va unga proporsional:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$$

χ_e — dielektrik qabul qiluvchanlik, o'lchamsiz kattalik. Nisbiy dielektrik singdiruvchanlik bilan bog'lanish:

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e$$

Shundan $P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E$. Bu formula chiziqli, izotrop va bir jinsli muhit uchun amal qiladi.

1-misol

$\epsilon_r = 5$ bo'lgan chiziqli dielektrikda $E = 2 \times 10^4$ V/m. Qutblanish vektori moduli:

$$P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E$$

$$P = 8.854 \times 10^{-12} \cdot 4 \cdot 2 \times 10^4 \approx 7.08 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$$

Demak, birlik hajmga to'g'ri keladigan dipol momentining makroskopik o'lchovi $7.08 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ ga teng.

4. Bog‘langan qutblanish zaryadlari

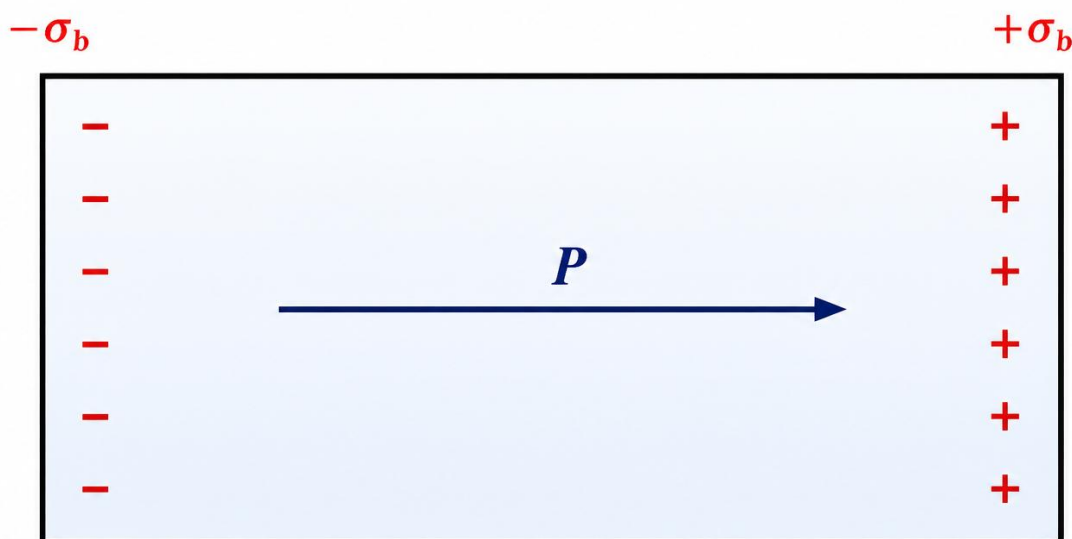
Dielektrik qutblanganda moddaning umumiy elektr zaryadi o‘zgarmasligi mumkin, ammo musbat va manfiy bog‘langan zaryadlar fazoda ozgina ajraladi. Natijada dielektrik sirtida va P bir jinsli bo‘lmagan hollarda hajmida bog‘langan zaryadlar paydo bo‘ladi.

$$\sigma_b = \vec{P} \cdot \vec{n}$$

$$\rho_b = -\nabla \cdot \vec{P}$$

σ_b — bog‘langan sirt zaryad zichligi, ρ_b — bog‘langan hajmiy zaryad zichligi. Bir jinsli P ga ega tekis plastinkada hajmiy bog‘langan zaryad nol, qarama-qarshi sirlarda esa $\pm P$ ga teng sirt zaryadlari yuzaga keladi.

Bir jinsli qutblangan dielektrikdagi bog‘langan sirt zaryadlari



- Dielektrik bir jinsli qutblanganda, uning chap sirtida bog‘langan zaryad zichligi $-\sigma_b$, o‘ng sirtida esa $+\sigma_b$ hosil bo‘ladi.
- P – qutblanish vektori; musbat bog‘langan sirt zaryadlari qutblanish yo‘nalishiga mos keladi.

4-rasm. Bir jinsli qutblangan dielektrikda bog‘langan sirt zaryadlari

2-misol

Bir jinsli dielektrik $P=4 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$ qiymat bilan sirt normaliga parallel qutblangan. P chiqayotgan sirt uchun $\sigma_b=+4 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$, qarama-qarshi sirt uchun $\sigma_b=-4 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$.

Agar $P(x)=ax \text{ e}_x$ va $a=3 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ bo‘lsa, $\rho_b=-dP_x/dx=-a=-3 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$. Bu misol qutblanishning fazoviy notekisligi hajmiy bog‘langan zaryad manbaini hosil qilishini ko‘rsatadi.

5. Dielektrikdagi E , P va D vektorlarining bog‘lanishi

Dielektrikda umumiy elektr maydon erkin va bog‘langan zaryadlarning birgalikdagi ta’siri bilan aniqlanadi. Hisoblashni soddalashtirish uchun elektr siljish vektori D kiritiladi:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

Chiziqli izotrop dielektrik uchun $\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$ bo'lgani sababli:

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E}$$

D vektori uchun Gauss qonuni erkin zaryadlar orqali yoziladi:

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q_{\text{erkin}}$$

Kattalik	Fizik mazmun	SI birligi
E	Natijaviy elektr maydon kuchlanganligi	V/m yoki N/C
P	Birlik hajmdagi dipol momenti	C/m ²
D	Erkin zaryadlar bilan qulay bog'langan siljish vektori	C/m ²
χ_e	Dielektrik qabul qiluvchanlik	O'lchamsiz
ϵ_r	Nisbiy dielektrik singdiruvchanlik	O'lchamsiz

3-misol

$\epsilon_r = 3$, $E = 5 \times 10^4$ V/m bo'lsa, $D = \epsilon_0 \epsilon_r E \approx 1.33 \times 10^{-6}$ C/m². $P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E \approx 8.85 \times 10^{-7}$ C/m².
Tekshiruv: $\epsilon_0 E + P \approx 4.43 \times 10^{-7} + 8.85 \times 10^{-7} = 1.33 \times 10^{-6}$ C/m².

6. Dielektrik elektr maydonni qanday kamaytiradi?

Erkin zaryadlar hosil qilgan tashqi maydon E_0 dielektrikni qutblantiradi. Bog'langan sirt zaryadlari esa E_0 ga qarshi yo'nalgan qutblanish maydoni E_p ni hosil qiladi. Natijada dielektrik ichidagi maydon $E = E_0 + E_p$ bo'lib, ko'pincha vakuumdagi qiymatdan kichik bo'ladi.

Cheksiz yassi kondensator erkin zaryad zichligi $\pm \sigma_f$ bilan zaryadlangan va oraliq to'liq chiziqli dielektrik bilan to'ldirilgan bo'lsa:

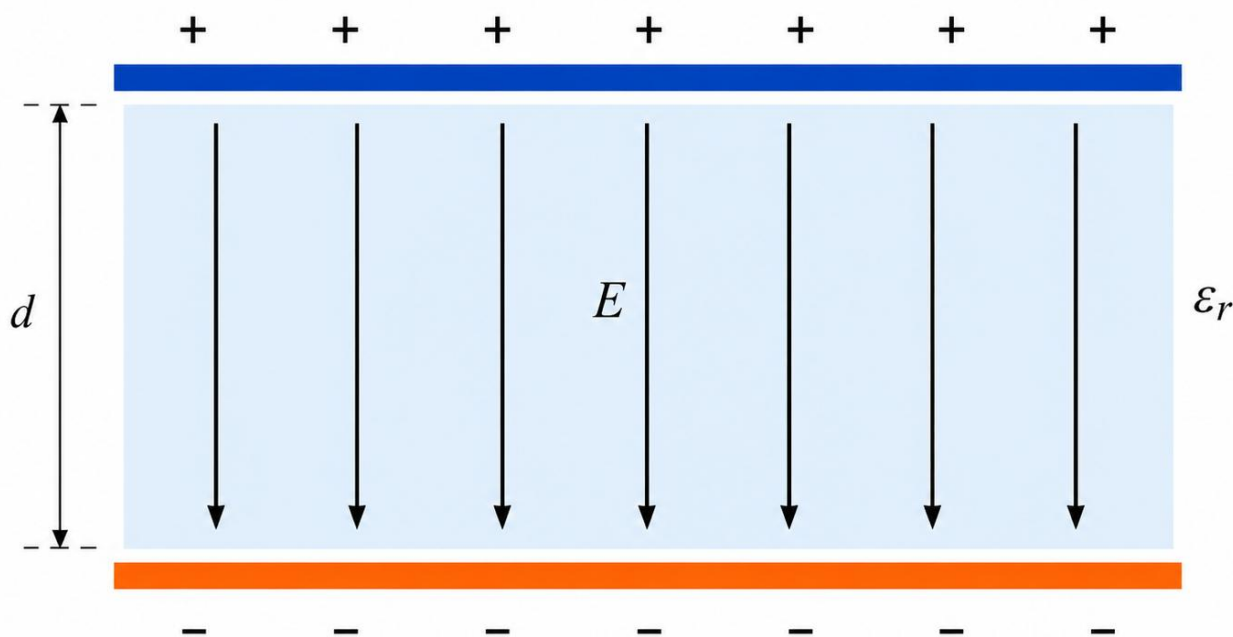
$$\vec{D} = \sigma_f$$

$$\vec{E} = \vec{D} / \epsilon = \sigma_f / (\epsilon_0 \epsilon_r)$$

Vakuumda $E_0 = \sigma_f / \epsilon_0$ bo'lganligi uchun, erkin zaryad doimiy holatda:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 / \epsilon_r$$

Dielektrik bilan to'ldirilgan yassi kondensator



- Yuqori plastina: musbat zaryadlangan (+)
- Pastki plastina: manfiy zaryadlangan (−)

- Dielektrik: nisbiy dielektrik singdiruvchanlik ϵ_r
- E – elektr maydon kuchlanganligi (bir jinsli)
- d – plastinalar oralig'i (masofa)

5-rasm. Dielektrik bilan to'ldirilgan yassi kondensator

4-misol

Vakuumdagi $E_0 = 6 \times 10^5 \text{ V/m}$ bo'lgan, manbadan uzilgan yassi kondensator orasiga $\epsilon_r = 4$ dielektrik to'liq kiritildi. Q erkin zaryad o'zgarmaydi. Shuning uchun:

$$E = E_0/4 = 1.5 \times 10^5 \text{ V/m}$$

Plastinalar oralig'i o'zgarmasa, $U = Ed$ ham 4 marta kamayadi; sig'im esa ϵ_r marta ortadi.

7. Qutblanish va kondensator sig'imi

Yassi kondensatorning vakuumdagi sig'imi $C_0 = \epsilon_0 S/d$. Oraliq to'liq ϵ_r dielektrik bilan to'ldirilganda:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S/d = \epsilon_r C_0$$

Sig'imning ortishi qutblanish bilan bevosita bog'liq. Bog'langan zaryadlar erkin zaryadlar maydonini qisman kompensatsiyalaydi. Berilgan Q da potentsiallar farqi kamayadi; $C = Q/U$ bo'lgani uchun sig'im ortadi.

5-misol

$S = 0.015 \text{ m}^2$, $d = 0.50 \text{ mm}$ yassi kondensator vakuumda:

$$C_0 = \epsilon_0 S/d \approx 2.66 \times 10^{-10} \text{ F} = 266 \text{ pF}$$

$\epsilon_r = 6$ dielektrik kiritilsa:

$$C = 6C_0 \approx 1.59 \times 10^{-9} \text{ F} = 1.59 \text{ nF}$$

Manbaga ulangan va uzilgan kondensatorni farqlash

Holat	Doimiy kattalik	Dielektrik kiritilganda
Manbadan uzilgan	$Q = \text{const}$	$C \uparrow, U \downarrow, E \downarrow$
Kuchlanish manbaiga ulangan	$U = \text{const}$	$C \uparrow, Q \uparrow$; ideal to'liq to'ldirishda $E = U/d \text{ const}$

Bu farq darsda alohida ta'kidlanishi kerak. 'Dielektrik maydonni ϵ_r marta kamaytiradi' degan jumla faqat erkin zaryad yoki D doimiy bo'lgan tegishli geometriyada to'g'ridan-to'g'ri qo'llanadi. U doimiy saqlansa, manba qo'shimcha erkin zaryad yetkazib beradi.

8. Masala yechish algoritmi va metodik tavsiyalar

Bosqich	Amal
1	Dielektrik qutbli, qutbsiz yoki ion tabiatli ekanini aniqlash.
2	Berilgan E , ϵ_r , χ_e , P yoki D kattaliklarini ajratish.
3	Chiziqli izotrop muhit bo'lsa $P = \epsilon_0 \chi_e E$ va $\epsilon_r = 1 + \chi_e$ dan foydalanish.
4	Bog'langan zaryad so'ralsa $\sigma_b = P \cdot n$ yoki $\rho_b = -\nabla \cdot P$ ni qo'llash.
5	Erkin zaryadlar bilan ishlaganda $D = \epsilon_0 E + P$ va $\oint D \cdot dS = Q_{\text{erkin}}$ dan foydalanish.
6	Kondensatorda manba ulanganmi yoki uzilganmi — albatta aniqlash.
7	Natijaning yo'nalishi, birligi va fizik ma'nosini tekshirish.

6-misol: kompleks bog'lanish

Chiziqli dielektrikda $\chi_e = 2.5$ va $E = 8 \times 10^3 \text{ V/m}$. $\epsilon_r = 1 + \chi_e = 3.5$. Qutblanish:

$$P = \epsilon_0 \chi_e E \approx 8.854 \times 10^{-12} \cdot 2.5 \cdot 8 \times 10^3 \approx 1.77 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$$

Siljish vektori $D = \epsilon_0 \epsilon_r E \approx 2.48 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$. Shu bilan birga $\epsilon_0 E + P \approx 7.08 \times 10^{-8} + 1.77 \times 10^{-7} \approx 2.48 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$.

Muammoli savollar

Nima sababdan dielektrikda E odatda nol bo'lmaydi? Qutbsiz molekulada dipol momenti qanday paydo bo'ladi? Qutbli molekullarning to'liq yo'nalishiga issiqlik harakati qanday to'sqinlik qiladi? P va D ning birliklari bir xil bo'lsa ham, fizik mazmuni nimasi bilan farq qiladi? Bir jinsli P uchun nima sababdan $\rho_b = 0$, lekin sirtlarda σ_b mavjud?

Ko'p uchraydigan xatolar

P ni alohida molekulaning dipol momenti p bilan aralashtirish; ϵ va ϵ_r ni bir xil kattalik deb olish; $D = \epsilon E$ formulasini har qanday nochiqli yoki anizotrop muhitga

avtomatik qo‘llash; σ_b bilan erkin sirt zaryadini aralashtirish; kondensatorda Q yoki U ning qaysi biri doimiyligini tekshirmasdan E ning o‘zgarishini baholash.

9. Asosiy formulalar, mustahkamlash va xulosa

Formula	Mazmuni
$p = ql$	Elektr dipol momenti
$P = (1/\Delta V) \sum p_i$	Qutblanish vektori
$P = \epsilon_0 \chi_e E$	Chiziqli izotrop dielektrik
$\epsilon_r = 1 + \chi_e$	Singdiruvchanlik va qabul qiluvchanlik
$\sigma_b = P \cdot n$	Bog‘langan sirt zaryadi
$\rho_b = -\nabla \cdot P$	Bog‘langan hajmiy zaryad
$D = \epsilon_0 E + P$	Elektr siljish vektori
$D = \epsilon_0 \epsilon_r E$	Chiziqli izotrop muhit
$C = \epsilon_r C_0$	To‘liq dielektrik kiritilgan kondensator

Mustaqil yechish uchun masalalar

1. $\epsilon_r = 4.5$ dielektrikda $E = 3 \times 10^4$ V/m. χ_e va P ni toping.
2. $P = 6 \times 10^{-6}$ C/m² vektor sirt normaliga 60° burchak ostida yo‘nalgan. σ_b ni hisoblang.
3. $P(x) = kx e_x$, $k = 2 \times 10^{-4}$ C/m³. Hajmiy bog‘langan zaryad zichligini toping.
4. $\epsilon_r = 2.5$ va $E = 10^5$ V/m bo‘lsa D ni aniqlang.
5. Vakuumdagi $C_0 = 40$ pF kondensator $\epsilon_r = 7$ dielektrik bilan to‘liq to‘ldirildi. Yangi sig‘imni toping.
6. Manbadan uzilgan kondensatorda $\epsilon_r = 5$ dielektrik kiritilganda E va U qanday o‘zgarishini izohlang.

Xulosa

Dielektriklarning elektr maydondagi asosiy javobi qutblanish hodisasidir. Tashqi elektr maydon qutbsiz zarrachalarda induksiyalangan dipol momenti hosil qiladi, qutbli molekulalarda mavjud dipollarni qisman orientatsiyalaydi, ion kristallarda esa qarama-qarshi ion ostpanjaralarini nisbiy siljitadi. Makroskopik qutblanish P vektori orqali tavsiflanadi va chiziqli izotrop muhitda $P = \epsilon_0 \chi_e E$ munosabatiga bo‘ysunadi. Qutblanish natijasida $\sigma_b = P \cdot n$ va $\rho_b = -\nabla \cdot P$ bog‘langan zaryadlar yuzaga keladi. $D = \epsilon_0 E + P$ munosabati esa erkin zaryadlar bilan maydonni qulay bog‘laydi. Dielektrikning kondensator sig‘imini oshirishi ham aynan qutblanishning makroskopik natijasidir. Ushbu tushunchalar elektrostatikadan elektromagnit maydon nazariyasi va moddalar elektrodinamikasiga o‘tishda fundamental ilmiy asos hisoblanadi.

Tavsiya etiladigan adabiyotlar

1. Griffiths D. J. Introduction to Electrodynamics. Cambridge University Press.
2. Jackson J. D. Classical Electrodynamics. Wiley.
3. Young H. D., Freedman R. A. University Physics with Modern Physics. Pearson.
4. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics. Wiley.