

MAHALLIY KERAMIK BIRIKMA O`LCHAMLARINI ELEKTR
MAYDONGA BOG`LANISHINI O`RGANISH NATIJALARI

X.O.Qo'chqarov, A.A.Xalimirzayev, X.Normirzayeva

Namangan davlat universiteti

akramholmirzayev925@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqola keramik birikmalar o`lchamlarining geometrik o`zgarishi va ularning maydon kattaligi orasidagi bog`lanishi murakkab tarzda bo`lib, u maydon ta`sirida modda ichida bir nasha jarayonlarni bir vaqtda yuz berishi bilan bog`liq ekanligini o`rganishga, ularning geometrik masshtablari o`zgarishini maydon bo`yicha chiziqli tarzda ro`y beradiganlari nanotexnologik taraqqiyotni avtomatlashtirish tizimida o`ta ahamiyatli hisoblanishini isbotlashga qaratilgan.

Kalit so`zlar: p`yezoelektrik effekt, kvarts kristalli, kompensatsiya, maydon kuchlanganligi, p`yezoelektrik modul, mexanik kuchlanish, segnetoelektrik, elektrostriksiya effekti.

Аннотация: в данной статье исследуется сложная взаимосвязь между геометрическими изменениями размеров керамических соединений и величиной их площади. Показано, что эта зависимость обусловлена одновременным протеканием в веществе нескольких процессов под воздействием внешнего поля. Обосновывается, что изменения геометрических масштабов, происходящие линейно в зависимости от напряжённости поля, имеют исключительно важное значение для систем автоматизации технологических процессов в области нанотехнологий.

Ключевые слова: пьезоэлектрический эффект, кварцевый кристалл, компенсация, напряженность поля, пьезоэлектрический модуль, механическая напряженность, сегнетоэлектрик, эффект электрострикции.

Annotation: this article investigates the complex relationship between the geometric changes in the dimensions of ceramic compounds and the magnitude of their surface area. It is shown that this relationship is associated with the simultaneous occurrence of several processes within the material under the influence of an external field. The study demonstrates that geometric scale variations exhibiting a linear dependence on the field strength are of critical importance for the automation systems used in the advancement of nanotechnology.

Key words: piezoelectric effect; quartz crystal; compensation; electric field strength; piezoelectric coefficient; mechanical stress; ferroelectric material; electrostriction effect.

Kirish

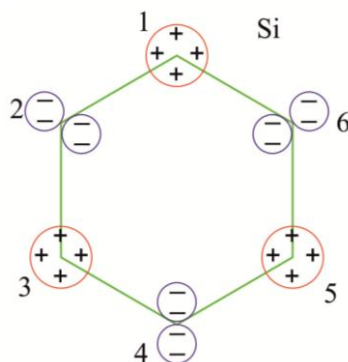
Dolzarblik: bugungi kunda nanotexnologiya qurilmalarini yaratishda sirtida hosil qilinadigan turli operatsiyalarni, ya'ni sirtga u yoki bu xildagi atomlarni yotqizish, joylashtirishda mexanik manipulyatorlar koordinatalarini o'zgarishi muhim ahamiyatga ega. P'yezoelementlarni maydonda chiziqli o'lchamlarini o'zgarish intervalini orttirish, uning qo'llanish imkoniyatlarini keskin ortishi mumkinligi, bundayin ishlarning dolzarbligini belgilaydi.

Ishning maqsadi: maydon ta'sirida o'zining geometrik o'lchamini kuchlanishga mos holda chiziqli o'zgartiradigan keramik p'yezoelementlar hozirgi kunda juda kichik – 10-100Å oraligida o'zgaradi xolos[1-5]. Ishning maqsadi mahalliy ashyolar asosida chiziqli o'zgarish oraligini oshirish va uning qo'llanish imkoniyatlarini kengaytirishga qaratildi.

Odatda har qanday moddaga elektr maydon berilsa, u modda maydonga nisbatan o'z aks sadosini turlicha ifoda etadi. Ya'ni, ba'zi bir moddalar tuzilishi jihatidan maydonga ko'proq strukturaviy siljishlarga uchrasa, ba'zilariga maydon ta'siri bilinmasligi mumkin[6-8]. Ma'lumki, dielektriklar metallarga nisbatan elektr maydonida o'z xususiyatlarini o'zgartirishga moyil bo'ladilar. Ularning bunday xossalari zamonaviy nanotexnologiyada muhim o'rin tutishi mumkin. Shu bois ham yuqorida aytib o'tilgan xossalarga ega moddalarni o'rganish, ularning turli xossalarni tadqiq qilish katta ahamiyat kasb etmoqda. Maqola mualliflari ana shu yo'nalishdagi izlanishlari natijalarini bayon etishmoqda.

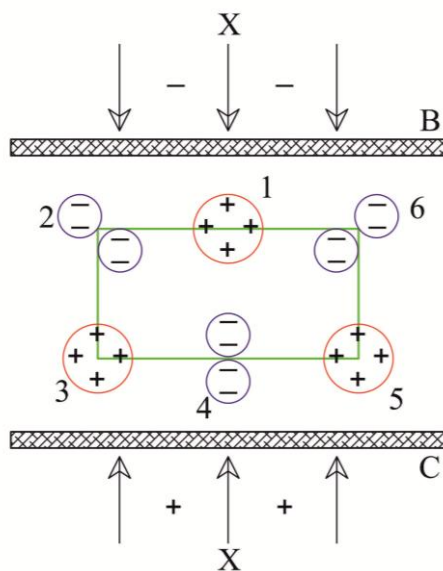
Asosiy qism

Kristallga mexanik ta'sir etganda uning yon tomonlarida elektr maydoni hosil bo'lishi mumkin. Bunday effektni p'yezoelektrik effekt deb yuritiladi. Bularning fizik mohiyatini tushunish uchun eng sodda holda kvarts kristallini olib ko'raylik. Rentgenli struktura tahlili ko'rsatadiki, kvarts atomlarining joylashishini taxminan oltiqirrali katakchada kremniy va kislorod(SiO₂) atomlari joylashadi deb qarash mumkin. Quyidagi 1-rasmda shunday ko'rinishdagi katakcha keltirilgan:



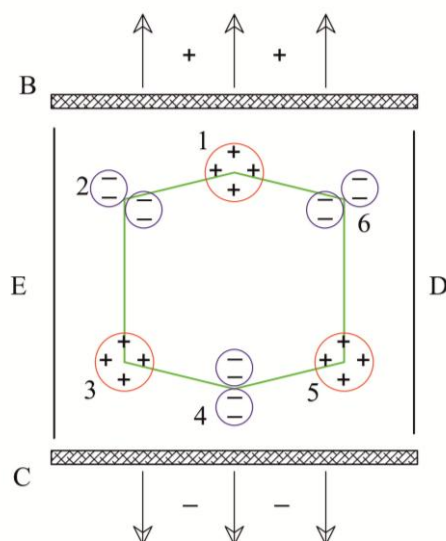
1-rasm. Kremniy va kislorod atomlarining kvarts kristallida joylashuvi.

Har bir kremniy atomi to'rtta elementar musbat zaryadga ega bo'lsa, har bir kislorod atomi ikkitadan manfiy elementar zaryadga ega. Katakcha strukturasi shundayki, har bir atom zaryadi o'zaro muvozanatlashib, umumiy katak zaryadi neytral bo'ladi. Endi shunday yacheyka - katakchani siqishga uchratsak, masalan X o'qi bo'ylab quyidagi 2-rasmdagidek siqilsa, 1 raqamdagi kremniy atomi ichkariga siljib kislorod atomlari orasida qoladi[9-12].



2-rasm. SiO₂ kristallni X o'qi bo'ylab siqilgandagi holat.

3 va 5 kremniy atomlari orasida esa, kislorod atomlari qoladi. SHularning evaziga qarama-qarshi B va C sirtlarda musbat va manfiy zaryadlar yuzaga keladi. X o'qi bo'ylab yuzaga kelgan bundayin holni bo'ylama p'yezoelektrik effekt deb yuritiladi. Agarda SiO₂ kristall X o'qiga perpendikulyar yo'nalishda siqilsa unda 3 kremniy atomi va 2 kislorod atomi, shuningdek 6 kislorod atomi va 5 kremniy atomi ichkariga bir xilda kirib qoladi va xuddi quyidagi 3-rasmdagidek ko'rinishga o'tadi:



3-rasm. SiO₂ kristallni X o'qiga perpendikulyar yo'nalishda siqilgandagi holat.

D va E sirtlar zaryadlanmaydi, chunki zaryadlar o'zaro kompensatsiyalanib neytrallashadi. B va C sirtlarda esa yana zaryadlar hosil bo'ladi, lekin X yo'nalishdagiga nisbatan qarama-qarshi ishorali bo'ladi. Chunki endi kremniy va kislorod ionlari katakcha ichidan tashqariga siljiydi, natijada ko'ndalang p'yezoeffekt ro'y berdi. Yani, siqish o'qi bo'ylab zaryadlar yuzaga kelmasdan o'qqa perpendikulyar yo'nalishda yuzaga keladi. Shuning uchun ham uni ko'ndalang p'yezoeffekt deb yuritiladi. Endi siqishni to'xtatib, shu kristallni masalan X o'qi bo'ylab siqilsa zaryadlar ishorasi qarama-qarshi tomonga o'zgaradi. Z o'qi bo'ylab mexanik kuch bilan ta'sir etsak, unda zaryadlarni simmetrik bo'lmagan holatdagi siljishi ro'y beradi. Shuning uchun bunda p'yezoeffekt ro'y bermaydi. Huddi shu katakcha modelidan foydalanib, p'yezoeffektga teskari bo'lgan effektini, ya'ni elektrostriktsiyani ham ko'rish mumkin[13-15]. Agar B va C sirtlar orasida tashqi elektr maydon kuchlanganligini X o'qiga parallel qilib qo'yilsa, ya'ni X o'qiga maydon kuchlanganligi parallel bo'lsa, 3-rasmdagi kabi kristall X o'qi bo'ylab uzayadi va unga perpendikulyar yo'nalishda atomlar yig'ilib qoladi. Endi elektrostriktsiyani hosil bo'lganini bilish uchun sirt ustiga yupqa suyuqlik, masalan transformator moyi surtilib, yupqa qatlam moy ko'rinishini hosil qilinadi. So'ngra unga ma'lum chastotadagi o'zgaruvchan elektromagnit maydon bilan ta'sir ettirsak, uning yetarli darajadagi intensivligi ortganda, moyli sirtida titrash yuz berayotganini ko'rish mumkin. P'yezoelektrik moddalar tabiatda ikki xil holda, ya'ni monokristall va polikristall holatda bo'lib, ularning eng muhim xususiyatlaridan biri, yuqorida ko'rsatganimizdek

mexanik ta'sir natijasida qutblanib, elektr maydon hosil qilishidir. Ular orasidagi bog'lanishni eng umumiy holda qutblanish va mexanik kuchlanish sifatida quyidagicha yozish mumkin:

$$P_i = d_{ix} \cdot T_x \quad (1)$$

Bu erda d_{ix} -proportsionallik koeffitsienti, yoki p'yezoelektrik modul deyiladi, T_x -mexanik kuchlanish, P_i -qutblanish. Endi teskari effekt uchun quyidagini yozish mumkin:

$$X_k = d_{ki} \cdot E_i \quad (2)$$

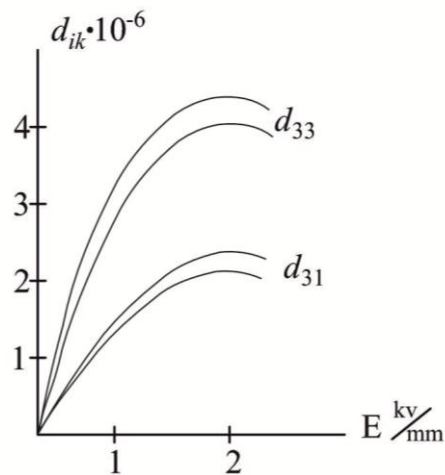
By yerda X_k -mexanik kuchlanish komponentasi, E_i -elektr maydon kuchlanganligi. Monokristallardan ko'pincha kvarts mineralini uchratish mumkin. Kvarts o'zining kimyoviy tarkibi bilan suvsiz SiO_2 birikmasini tashkil etadi. Kvartsni ishlov berish jarayonida turlicha maqsadlarga tayyorlash mumkin. Ko'pincha rezonatorlarda keng foydalaniladi[16-18].

Ulardan tashqari turmalin kristalli bo'lib, uning kimyoviy tarkibi Al, B, SiO_2 lardan iborat va tarkibiga yana natriy, kaliy, litiy aralashmalari kirib qolishi mumkin. Boshqa bir xilining kimyoviy tarkibi vinooksidli kaliy hisoblanadi. Ulardan yuqori asllikka ega rezonatorlar tayyorlashda foydalaniladi.

Texnik maqsadlarda ko'proq qutbli bo'lmagan p'yezoelektrik teksturalar ishlatiladi. Maksimal p'yezoelektrik effektiga erishish ushun uni tayyorlagandan so'ng yetilishi uchun bir nasha kun kutish kerak. Ularni tayyorlashda segnetoelektrik teksturalar turlicha yo'nalishda bo'lib qolishini va ularni magnit, elektr va temperaturali ta'sir yo'li bilan kuchliroq effektga ega holda tayyorlash mumkin.

Ulardan ikkitasi mexanik kuchlanish ta'sirida sirtlarda hosil bo'lgan elektrostatik zaryadlarni bildirsa, uchinchisi p'yezomodul urunma bo'ylab ta'sir ostidagi ro'y bergan zaryadlarni bildiradi. P'yezoelektrik effektning fizik tabiati qutblanish rejimiga, vaqtiga va atrof temperaturasiga sezilarli bog'liq bo'ladi. Ba_2TiO_3 keramikaning p'yezomodulini kuchlanishga va temperaturaga bog'lanishini o'rganilgan natijalar 4-rasmda aks ettirilgan.

Keramikani qutblantiruvchi maydon kattaligi 1,5 dan 2 kV/m orasida bo'lganida, p'yezomodul o'zining stabil qiymatiga erishib, qayta ortmaydi. Qutblantiruvchi kuchlanishni ushlab turish vaqti kam ahamiyat kasb etsada, u p'yezomodul qiymatini turg'un bo'lib qolishida ahamiyatli. Agarda shu ishlarni Kyuri nuqtasidan yuqori-



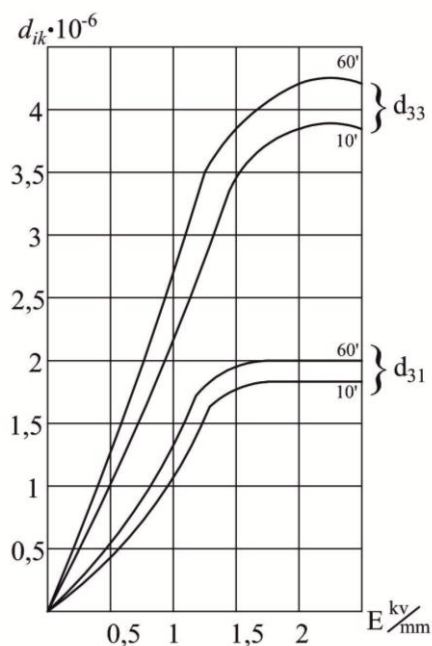
4-rasm. Ba₂TiO₃ keramikaning p'yezomodulini kuchlanishga va temperaturaga bog'lanishi.

roq temperaturada bajarib, so`ngra xona temperaturasiga qadar sovitilsa, effekt ancha kuchli kuzatiladi. P'ezoelektrik effektini vaqt bo'yicha turg'un saqlanishi ham juda muhim ahamiyatga ega bo'lib, tajriba yo'li bilan aniqlanishicha, dastlabki 7-8 kun ichida avvalgi qiymatiga nisbatan p'yezomodulni 75-80% qiymati qoladi va uzoq muddat shunday saqlanib turadi. P'ezoelektrik kristalda p'ezoelektrik keramikani bir afzalligi shundaki, ularni tashqi maydonda qutblangunga qadar anizotrop bo'lib, qutblanish yo'nalishini istagan holda berilishi mumkin va p'ezoelektrik yo'nalish oldindan berilgan bo'lmay bizning xohishimiz bilan aniqlanadi. Shuning uchun ham keramik materiallardan tayyorlangan elementlarda turli xil tebranishlar, hatto disk va silindrda radial tebranishlarni ham hisobga olish mumkin[19-20].

Odatda keramik qotishmalar tayyorlashni turlicha usulda bajarish mumkin. Lekin p'ezoelektrik effektga ega bo'ladigan holga keltirish ancha murakkab jarayon. Haqiqatdan ham keramikada p'ezoelektrik teksturaga ega uchli domenlar aralashmasi bo'lishi muhim ahamiyatga ega bo'lib, aksariyat hollarda mahalliy minerallar tolachalarga ega hatto oddiy fanerli selluloza tolasi ham uchli ignacha domen rolini o'ynay olar ekan. Shuning ushun ham keramik qotishmalarni tayyorlashda uning p'ezoelektrik effektini kuzatilmay qolishidan uncha xavfsiraslik kerak. Lekin p'ezoelektrik effekt olish texnologiyasini hozirgi kunda aniq ko'rsatmasi bo'lmasada, uni keramik birikmalardan topilish ehtimoli yo'q emas. Odatda an'anaviy tarzda bunday birikmalar mineral tuzlar kukunlariga turli dielektrik moddalarni aralashtirib, silikatli qorishmani presslash yo'li bilan hosil qilinadi. Ba'zi hollarda qorishmani suyuq holda aralashtirib qatlamlar olish bilan tayyorlanadi. Ko'p hollarda

aralashmani qizdirib pishiriladi.

Ma'lumki, markaziy simmetriyaga ega bo'lgan strukturalarda zaryadlar hosil bo'lsa, hech qanday bir jinsli deformatsiya kuchi kristaldagi ichki muvozanat kuchini buza olmaydi. Shuning uchun markaziy simmetriyaga ega bo'lmagan srukturalardagina p'yezoelektrik effekt yuzaga kelishi mumkin. P'yezoelektrik effektga ega kristallar tabiatda juda ko'p emas. Ular asosan tabiiy mineral tuzlar birikmalaridan tashkil topgan bo'lib, tarkibida SiO_2 , TiO_2 , SaTiO_2 , PTiO_2 BaTiO_2 kabi moddalarda ko'proq uchraydi. Bulardan tashqari, keramikali polikristall strukturaga ega p'yezoelektrik ham texnologiyada ko'p ishlatiladi. Keramikalar odatda qutbli va qutbsiz bo'ladi. Qutbsizlar mexanik ta'sir ostida yoki kuchli elektr manbaida qutblantirish mumkin. Odatda keramik birikmaga temperaturani oshirib yuqori maydon bilan ta'sir etilsa, tashqi maydon ta'sirida domenlar o'z yo'nalishidan tashqi maydon



5-rasm. BaTiO_2 uchun d_i ni maydon kuchlanganlikka tajribada aniqlangan bog'lanishi.

yo'nalishi bo'ylab o'zgaradi va natijada ichki maydon hosil qiladi, tashqi maydonni olib tashlangandan so'ng ham domenlar o'zgargan holda qolib ketishi mumkin. P'yezoeffektga ega bo'lib qolgan va bunday keramik birikmalarni p'yezomodilini tashqi maydon kuchlanganligiga bog'lanishini aniqlash katta ahamiyatga ega. Chunki (1) formuladagi P_i qutblanish darajasi d_i kattalikka bog'liq. Buni BaTiO_2 uchun tajribada aniqlangan bog'lanishi 5-rasmda keltirilgan[21-22].

5-rasmdan ko'rinadiki, p'yezomodul qiymatining tashqi maydonga

bog'lanishi chiziqli bo'lmagan holda ro'y beradi. Shuning uchun ularni uzoq muddat maydon ostida ushlab turilsa, p'yezomodul qiymatini atom birligiga erishishi mumkin. Aytish kerakki, p'yezokeramikaga yuqori maydon qo'yilganga qadar barcha yo'nalishlarda bir xil xususiyatga ega bo'lsa, maydon qo'yilgandan so'ng qutblanib anizotrop holga o'tib qoladi. Maydon yo'nalishidagi o'qqa parallel bo'lsa, maydon qo'yilgandan so'ng shu yo'nalish tanlangan bo'lib qoladi. Aytish joizki, tabiiy kvars va turmalin kristallaridan farqli o'laroq, keramik birikmalardan tayyorlangan p'yezoelementlarda ixtiyoriy tarzda va ko'rinishda tebranishlar qo'zg'alishi mumkin. Yuqoridagi BaTiO₂ keramik birikma uchun p'yezomodulni temperaturaga bog'lanishi tekshirilganda fazoviy o'tish nuqtasida o'zgarish kuzatilgan.

Bulardan tashqari p'yezokeramik moddalarni tashqi o'zgarmas maydonga joylashtirsak, unda elektrostruksiya effekti ham kuzatilib, namunaning geometrik o'lchamlari o'zgarishi ro'y beradi. Namunaning geometrik o'zgarishini tashqi elektr maydoniga bog'lanishini o'rganilsa, juda ko'p birikmalarda juda ham kichik maydon oralig'ida chiziqli o'zgarish yuzaga kelishi kuzatilgan. Lekin ayrim keramik birikmalarni tashqi maydon ta'sirida o'z geometrik o'lshamlarini chiziqli o'zgartirishi juda kichik oraliqda kuzatiladi. Bunday xususiyatga ega bo'lgan materiallar juda noyob va amaliyotda katta e'tiborga ega. Shuning uchun doimo elektrostruksiya effektiga ega materiallarni tashqi maydonga bog'liq holda o'zgarishini o'rganish juda kerakli ishlardan sanaladi. Ushbu ishda biz mahalliy ashyolardan keramik birikma tayyorlab kuchlanish ta'sirida geometrik o'lchamlarini o'zgarishini o'rgandik. Namunani tayyorlashda oddiy chig'anoq qobig'ini maydalab, unga mis oksidi kukuni va tuxum po'chog'i kukunidan aralashtirib suyuq selikat yelimida qorib ingichka trubka ko'rinishiga keltirib pechda toblandi. O'lchov ishlarini bajarishda ko'prik sxemasidagi sig'im o'zgarishidan geometrik o'lcham o'zgarishini aniqlanadi. Buning uchun quyidagicha mulohaza kiritiladi. Agar ko'prik sxemasida kondensatorlardan iborat yelkalar qo'yilsa va bir tomon qoplamasiga keramik birikmadan tayyorlangan namunani yopishtirib qo'yilsa, ma'lum chastotadagi kuchlanish qiymatida ular o'zaro kompensatsiyalanadi. Endi keramika uchlariga kuchlanish berilsa, geometrik o'lcham o'zgarishi evaziga sig'im o'zgarishi ro'y beradi deb faraz qilinadi va qayta muvozanatga keltirish bilan sig'im o'zgarishi topiladi. Ulardan uzunlikni o'zgarishini quyidagi formula orqali hisoblanadi. Ko'prik muvozanatda turibdi deb namunaga beriladigan kuchlanishni $U=0$ deymiz. 6-rasmdan ko'ramizki bu holda namuna ulangan kondensator ma'lum qiymatga- C_0 ega bo'ladi.

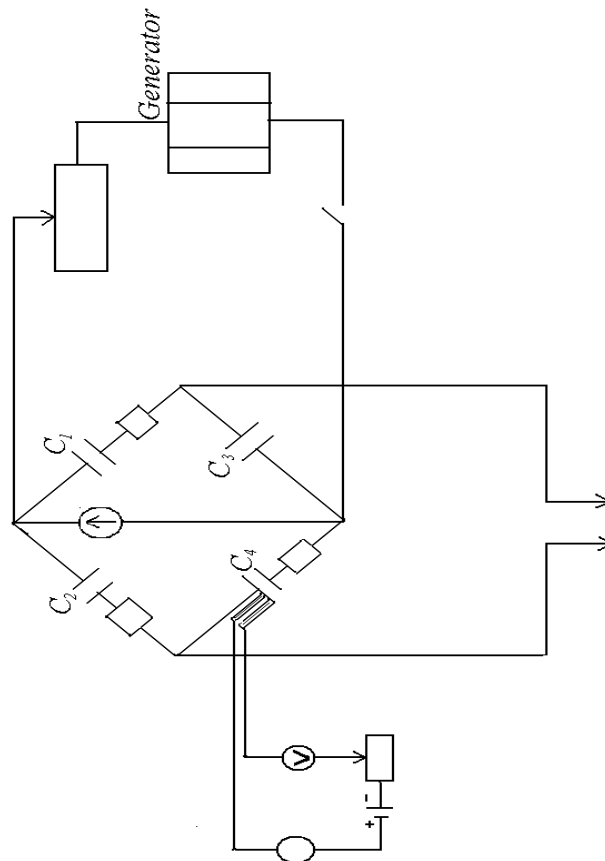
Bizga ma'lumki, yassi kondensatorning sig'imi $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ ga teng. Most sxemasi orqali $U_0=0$ da

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d_0} \quad (3)$$

dastlabki muvozanat holatni topamiz, bundan

$$d_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{C_0} \quad (3a)$$

ga teng.



6-rasm. Kondensator sig'imini o'zgarishini aniqlovchi qurilma.

Endi namunaga kuchlanish beramiz, $U \neq 0$ va $U > 0$ bo'lsa

$$C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d_x} \quad (4)$$

ga sig'im o'zgaradi va

$$d_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{C_x} \quad (4a)$$

bo'ladi.

Kuchlanish U berilganda kondensator orasidagi namunaning geometrik o'lchami o'zgarishi sababli sig'im o'zgarishi ro'y beradi va kondensatorning sig'imi muvozanatdagi C_0 dan C_x ga o'zgaradi. Uning o'zgarishini kompensatsiya usuli orqali aniqlaymiz:

$$\Delta d = d_x - d_0 = \epsilon_0 \epsilon S \left(\frac{1}{C_x} - \frac{1}{C_0} \right) \quad (5)$$

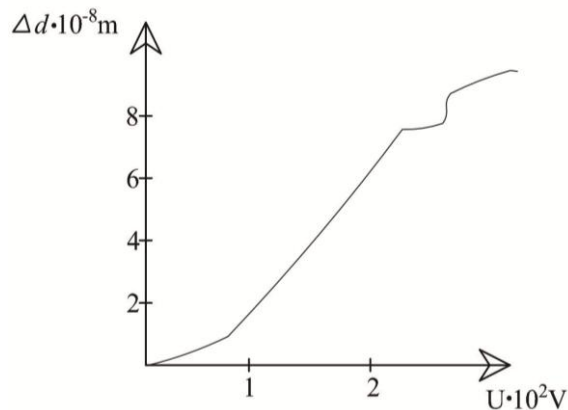
$C = \frac{Q}{U}$ ekanligidan, o'lcham o'zgarishini quyidagicha yozamiz:

$$\Delta d = d_x - d_0 = \varepsilon_0 \varepsilon S \left(\frac{U_x}{C_x} - \frac{U_0}{C_0} \right) \quad (6)$$

Dastlabki $U_0=0$ bo'lgani ushun

$$\Delta d = \varepsilon_0 \varepsilon S \frac{U_x}{C_x} \quad (7)$$

bo'ladi. Δd mkm larda aniqlanadi.



7-rasm. Maydon ta'sirida keramik qotishmani chiziqli kengayishi.

7-rasmdan ko`rinadiki, agar kondensator yuzasi aniq bo`lsa, berilgan kuchlanishning qiymati orqali kondensator qoplamalari orasidagi masofaning o`zgarishini topish mumkin ekan. Qoplamalar orasidagi masofa esa na`munaga kuchlanish berilganda na`munaning geometrik o`lchamini o`zgartiradi. Shunday qilib olingan keramik qotishmalarni maydonga mos holda o`zgarishi 7-rasmdagi grafikda keltirilgan.

Aytish kerakki, biz ko`rib o`tgan ko`prikni kompensatsiya usuli p`yezokeramikani qutblanishi juda kichikligi evaziga geometrik o`lchamlarini o`zgarishi juda ham sezilarli bo`lavermaydi. Shuning uchun generatordan chiqarilgan aniq chastotali signallardan foydaniladi. Aniqlikni oshirish maqsadida yuqori chastotali signallardan foydaniladi.

Yuqorida moddalarning maydon ta'sirida geometrik o`zgarishi haqidagi ma`lumotlar asosida quyidagi xulosalarga kelish mumkin.

1. Nanotexnologiya asriga kirib kelinayotgan bugungi kunda moddalarning xususiyatlaridan amaliy foydalanishda eng kichik masshtabdagi o`zgaruvchi parametrlarni aniqlash juda dolzarb hisoblanadi.

2. Elektr maydon orqali moddalarning geometriyasini o`zgartirishda modda tarkibi va strukturasi o`ta ahamiyatli ekan. Shuning uchun turli

tarkibdagi moddalarni sinab ko'rish foydalidir.

3. Geometrik o'zgarishni o'lchamlari va maydon kattaligi orasidagi bog'lanish murakkab tarzda bo'lib, u maydon ta'sirida modda ichida bir necha jarayonlarni bir vaqtda yuz berishi bilan bog'liq. Ularning geometrik masshtablari o'zgarishini maydon bo'yicha chiziqli tarzda ro'y beradiganlari nanotexnologik taraqqiyotni avtomatlashtirish tizimida o'ta ahamiyatli hisoblanadi.

4. O'zgaruvchan parametrlarni o'ta kichik masshtablarda ro'y beradigan sharoitlarda sezgirligi yuqori bo'lgan qurilmalar talab etiladi. Bugungi kunda shunday qurilmalarni takomillash turlarini yaratish zarur.

P'yezoelektrik materiallar xususiyatlaridan amaliy foydalanish uchun ularni turli tashqi parametrlar ta'siridagi o'zgarishini aniq amaliy bog'lanishlarni topishga erishilsa qo'llanish sohasi o'ta keng diapazonda bo'lishiga erishiladi.

Adabiyotlar:

1. Ray S.S., Okamoto M. Polymer nanocomposites: A review. Progress in Polymer Science, 2003.
2. Mittal V. Polymer Nanocomposites: Synthesis, Characterization and Modeling. Wiley, 2012.
3. Callister W.D., Rethwisch D. Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley, 2014.
4. Coleman M.M., Painter P.C. Fundamentals of Polymer Science. CRC Press, 1997.
5. Osswald T.A., Menges G. Materials Science of Polymers for Engineers. Hanser, 2012.
6. Baker M.J., Trevisan J., Bassan P. Using FTIR spectroscopy to characterize biological materials. Nature Protocols, 2014.
7. Vasanthan N., Salem D.R. FTIR spectroscopic characterization of structural changes in polyamide-6 fibers. Journal of Polymer Science, 2001.
8. Paul D.R., Robeson L.M. Polymer nanotechnology: Nanocomposites. Polymer, 2008.
9. Vasile C., Pascu M. Practical Guide to Polymeric Nanocomposites. Smithers Rapra, 2005.
10. Wang K., Chen L., Wu J. Preparation of PA6 nanocomposites and their mechanical properties. PolymerEngineering&Science, 2003.
11. Tjong S.C. Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites. Materials Science and Engineering R, 2006.

12. Fu S., Feng X., Lauke B., Mai Y.W. Effects of particle size and interface adhesion on composite properties. *CompositesPart B*, 2008.
13. Liu P., Wu T., Li X. Polyamide-6 nanocomposites reinforced with nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 2006.
14. Fornes T.D., Paul D.R. Crystallization behavior of nylon-6 nanocomposites. *Polymer*, 2003.
15. Hussain F., Hojjati M., Okamoto M. Review of polymer-matrix nanocomposites. *Journal of Composite Materials*, 2006.
16. Zhang H., Zhang Z. Structural analysis of polymer nanocomposites by FTIR. *Spectro chimica Acta Part A*, 2012.
17. Santana da Silva F. et al. Polyamide-6/MWCNT nanocomposites for antistatic applications. *Journal of Polymer Research*, 2024.
18. Vasilev C., Mihailescu M. FTIR analysis of polyamide-6 nanocomposites. *Polymer Testing*, 2011.
19. Li Y., Shimizu H. Improvement of mechanical properties of PA6 nanocomposites. *Polymer*, 2007.
20. Zhang X., Wang Y. FTIR investigation of PA6 composites. *Spectroscopy Letters*, 2010.
21. Becker O., Varley R., Simon G. Morphology and mechanical properties of polymer nanocomposites. *Polymer*, 2003.
22. М.Лайний. А.Гласс. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. Мир. Москва. 1981.