

8.3. П'єзоелектрики

До п'єзоелектриків відносять діелектрики, які володіють сильно вираженим п'єзоелектричним ефектом.

Прямим п'єзоелектричним ефектом називають явище поляризації діелектрика під дією механічної напруги.

Це явище було відкрито братами Кюрі в 1880 р. Електричний заряд, що виникає на кожній з поверхонь діелектрика, змінюється за лінійним законом залежно від механічних зусиль (рис. 3.25, а):

$$Q=dF; \quad Q/S = dF/S = q_s = P = d\sigma, \quad (8.1)$$

де Q – заряд; d – п'єзомодуль; F – сила; S – площа; q_s – заряд на одиницю площі; P – поляризованість; σ – механічна напруга в перерізі діелектрика.

Таким чином, п'єзомодуль d чисельно дорівнює заряду, що виникає на одиниці поверхні п'єзоелектрика при прикладанні до нього одиниці тиску.

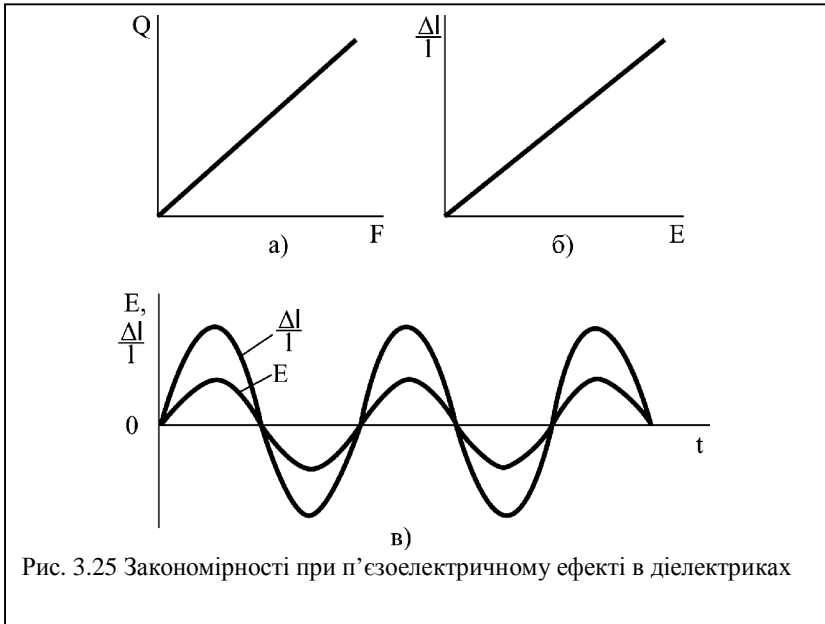


Рис. 3.25 Закономірності при п'єзоелектричному ефекті в діелектриках

Значення п'єзомодуля п'єзоелектриків, що використовуються в практиці складає біля 10^{-10} Кл/Н.

П'єзоелектричний ефект оборотний. При зворотному п'єзоелектричному ефекті відбувається зміна розмірів діелектрика $\Delta l/l$

залежно від напруженості електричного поля E за лінійним законом (рис. 3.25, б):

$$\Delta/l = \delta = dE \quad (8.2)$$

де δ – відносна деформація.

У термодинаміці доводиться, що п'єзомодулі d прямого і зворотного п'єзоefектів для одного і того ж матеріалу рівні між собою.

Деформація п'єзоелектрика залежить від напрямку електричного поля і змінює знак при зміні напрямку останнього. На рис. 3.25, в показано, що при прикладанні до п'єзоелектрика синусоїдальної електричної напруги у ньому виникають синусоїдальні деформації тієї ж частоти. Розрізняють також поздовжній і поперечний п'єзоелектричні ефекти. Під першим розуміють такий ефект, коли виникнення зарядів на протилежних гранях пластинки визначають в тому ж напрямі, в якому були прикладені механічні зусилля, а при зворотному п'єзоелектричному ефекті деформацію вимірюють у напрямі прикладеного електричного поля. При поперечному п'єзоелектричному ефекті виникаючі заряди або деформації вимірюють в напрямі, перпендикулярному напрямку механічних зусиль або електричного поля відповідно.

Слід мати на увазі, що рівняння (8.1) і (8.2) носять лише якісний характер. Реальний опис п'єзоелектричного ефекту виявляється набагато складнішим. Це обумовлено тим, що механічна напруга є тензорною величиною, яка містить в загальному випадку шість незалежних компонентів. Принципова відмінність тензора напруги від векторних характеристик полягає в тому, що на протилежних гранях будь-якого елементарного об'єму компоненти тензора мають протилежний напрям, тоді як складові (проекції) будь-якого вектора в усіх точках елементарного об'єму направлені однаково. П'єзомодуль, що встановлює зв'язок між вектором поляризації і механічною напругою, в порівнянні з останнім є тензором вищого (третього) рангу. Він має 18 незалежних компонентів.

Рівняння прямого і зворотного п'єзоefектів в тензорній формі приймають наступний вигляд:

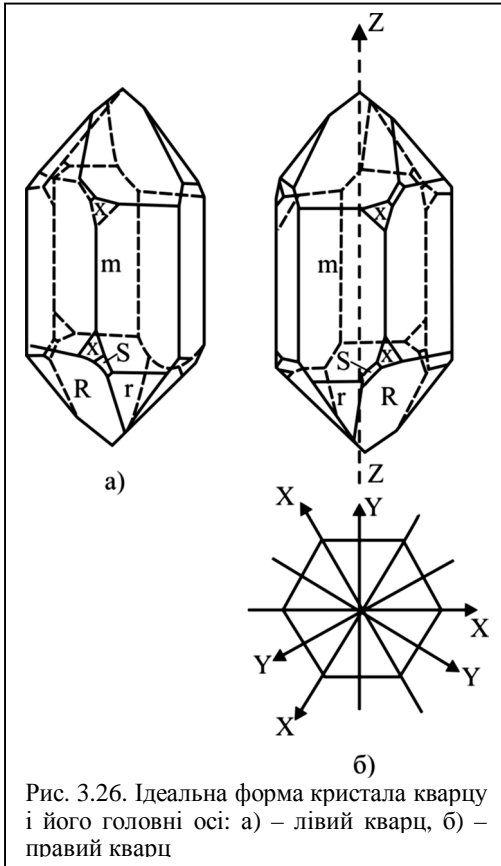
$$P_i = d_{ij}\sigma_j, \quad \delta_j = d_{ij}E_i,$$

де $i = 1, 2, 3$ – компоненти вектора поляризованості; $j = 1, 2, \dots, 6$ – компоненти тензора механічної напруги або деформації.

Симетрія кристала накладає суттєві обмеження на кількість компонентів тензора п'єзомодуля d_{ij} , які відмінні від нуля.

П'єзоefект спостерігається лише в речовинах з гетерополярним хімічним зв'язком, тобто п'єзоелектриками можуть бути або йонні, або сильнополярні діелектрики. Другою необхідною умовою існування

п'єзоэффекту є відсутність центра симетрії в структурі діелектрика. Інша деформація спричиняє симетричне зміщення позитивних і негативних зарядів, і електричний момент не виникає. П'єзоелектриками



можуть бути лише речовини з високим питомим опором. В достатньо провідних середовищах п'єзоелектрична поляризація швидко компенсується вільними носіями заряду. Оскільки будь-який діелектрик володіє деяким струмом витoku, всі застосування п'єзоэффекту пов'язані із швидкоплинними процесами.

Відомо більше тисячі речовин, що володіють п'єзоелектричними властивостями, зокрема – всі сегнетоелектрики. Проте практичне застосування в п'єзотехніці знаходить обмежене коло матеріалів. Серед них одне з важливих місць займає монокристалічний кварц. Це одна з модифікацій двооксиду кремнію. П'єзовластивості існують лише

в β-кварцу, стійкого до температури 573°C. Вище за цю температуру змінюється тип структури, і п'єзовластивості зникають. Великі природні прозорі кристали кварцу одержали назву гірського кришталю. Зазвичай природні кристали мають форму шестигранної призми (рис. 3.26, а), що відображає симетрію внутрішньої будови. У структурі кварцу атоми кремнію розташовуються по гвинтовій лінії, паралельній осі симетрії третього порядку (вісь Z). Гвинтова будова призводить до існування лівих і правих форм, які відрізняються і по

зовнішній огранці кристалів (рис. 3.26, а). У кристалах кварцу прийнято розрізняти три головні осі, що утворюють прямокутну систему координат (рис. 3.26, б): X – електричну вісь, що проходить через вершини шестикутника поперечного перетину (таких осей є три); Y – механічну вісь, перпендикулярну сторонам шестикутника поперечного перетину кристала (таких осей також три); Z – оптичну вісь, що проходить через вершини кристала.

Пластинки, вирізані перпендикулярно оптичній осі Z не володіють п'єзо ефектом. Найбільший заряд створюється в тому випадку, коли пластинка вирізана перпендикулярно до електричної осі X . Якщо заряди на великих гранях пластинки утворюються при дії сили по осі X , то п'єзо ефект називають подовжнім; при цьому п'єзomodуль кварцу $d_{11} = 2,3 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Якщо заряди на тих же гранях виникають внаслідок дії зусиль на бічні грані пластинки, то п'єзо ефект називають поперечним. При зміні сил (що стискають або розтягують) знаки електричних зарядів на гранях змінюються.

Плоскопаралельна полірована кварцова пластинка з електродами і тримач є п'єзоелектричним резонатором, тобто є коливальним контуром з певною резонансною частотою коливань. Остання залежить від товщини пластини і напряму кристалографічного зрізу. Перевагами кварцових резонаторів є малий $tg\delta$ і висока механічна добротність (тобто дуже малі механічні втрати). У кращих кристалах кварцу механічна добротність може скласти 10^6 – 10^7 . Це забезпечує високу частотну вибірковість кварцових резонаторів. Якщо в такому резонаторі збудити коливання на резонансній частоті, то їх загасання відбуватиметься протягом тривалого часу. Кварцовий п'єзоелемент, поставлений у вхідне коло електричного генератора, нав'язує йому власну резонансну частоту. Завдяки високій добротності кварцові резонатори використовуються як фільтри з високою вибірковою здатністю, а також для стабілізації і еталонування частоти генераторів (наприклад, в радіолокаційних станціях, в електронних годинниках і т. п.). Одна з головних вимог до таких п'єзоелементів полягає в мінімальній зміні резонансної частоти при зміні температури. Цій вимозі краще всього задовольняють пластинки спеціальних косих зрізів по відношенню до головних осей.

Внаслідок обмежених запасів природного кварцу основні потреби п'єзотехніки задовольняються штучно вирощуваними кристалами. Їх отримують гідротермальним методом. Кристалізація проходить з водно-лужних розчинів в сталевих автоклавах великої місткості при температурі 350–400°C і тиску порядку 10^8 Па. Із-за малої розчинності

кремнезему у водних розчинах тривалість одного циклу вирощування складає декілька місяців.

Крім кварцу в різних п'єзоперетворювачах застосовують кристали сульфату літію $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, сегнетової солі, дигідрофосфату амонію, а також ніобат і танталат літію. Останні складають значну конкуренцію кварцу, перевершуючи його по добротності в діапазоні високих і надвисоких частот. Для надання п'єзоелектричних властивостей сегнетоелектричні кристали LiNbO_3 і LiTaO_3 переводять в монодомений стан шляхом відпалу в сильному електричному полі при температурі, дещо нижчій за точку Кюрі.

Найбільш широке застосування як п'єзоелектричний матеріал знаходить сегнетоелектрична кераміка. У звичайному стані сегнетокераміка не проявляє п'єзоактивності, оскільки є ізотропним середовищем унаслідок хаотичного розташування окремих кристалічних зерен і поділу їх на домени з різним напрямом спонтанної поляризації. Проте, якщо піддати сегнетокераміку дії сильного електричного поля, то поляризованість доменів отримає переважну орієнтацію в одному напрямі. Після зняття поля зберігається стійка залишкова поляризованість, матеріал стає текстурованим. За своїми властивостями поляризований сегнетокерамічний зразок близький до однодоменного кристала, тобто володіє високою п'єзоактивністю.

Поляризовану сегнетокераміку, призначену для використання в п'єзоелектричних перетворювачах, називають п'єзокерамікою.

П'єзокераміка має перед монокристалами ту перевагу, що з неї можна виготовити активний елемент практично будь-якого розміру і будь-якої форми (наприклад, порожнистий циліндр, що є частиною гідролокатора). Застосування чистого титанату барію обмежується небажаним фазовим переходом при температурі, близькій до кімнатної. У точці фазового переходу відбувається часткова деполіризація кераміки, що істотно знижує п'єзочутливість елементів.

Основним матеріалом для виготовлення п'єзокерамічних елементів є тверді розчини $\text{PbZrO}_3\text{--PbTiO}_3$ (цирконат-титанат свинцю, або скорочено ЦТС). Ця кераміка широко використовується для створення потужних ультразвукових випромінювачів в широкому діапазоні частот для цілей гідроакустики, дефектоскопії, механічної обробки матеріалів. Такі ультразвукові генератори застосовуються також в хімічній промисловості для прискорення різних процесів (емульсифікатори, полімеризатори, стерилізатори та інші) і в напівпровідниковій технології для ефективного відмивання та знежирення напівпровідникових пластин за допомогою ультразвукової ванни. З п'єзокераміки роблять малогабаритні мікрофони, телефони, гучномовці (високочастотні),

слухові апарати, детонатори (для зброї), різні пристрої запалювання в газових системах. П'єзокерамічні елементи можна використовувати як датчики тиску, деформацій, прискорень і вібрацій. Подвійне перетворення енергії (електричної в механічну і навпаки) покладене в основу роботи п'єзореzonансних фільтрів, ліній затримки і п'єзотрансформаторів.

П'єзотрансформатори призначені для отримання високої напруги. Їх звичайно виконують у вигляді пластини або бруска, одна поло-



Рис. 3.27. Схема високовольтного п'єзокерамічного трансформатора (стрілки показують напрям залишкової поляризованості)

вина якого (збудник коливань) поляризується по товщині, а інша (генератор) – по довжині бруска (рис. 3.27). Змінне електричне поле, що підводиться до затискачів збудника, викликає резонансні механічні коливання по довжині бруска. У свою чергу, механічні коливання, що виникають в генераторній частині, призводять до появи вихідної електричної напруги. Трансформатори можуть бути сконструйовані для роботи в діапазоні частот 10–500 кГц. На вищих частотах їх розміри виявляються занадто мініатюрними, а на більш низьких – великими. Коефіцієнт трансформації напруги, пропорційний відношенню $2l/h$, може досягати значень 50 і більше.

П'єзокерамічні трансформатори призначені для газорозрядних приладів, лічильників Гейгера і для генерування високовольтних імпульсів. Перевагами таких джерел живлення є відсутність магнітного поля, простота і надійність конструкції, малі маса і габаритні розміри.

Окрім кераміки ЦТС, для виготовлення різних п'єзоелектричних перетворювачів застосовують керамічні матеріали на основі твердих розчинів $\text{BaNb}_2\text{O}_6\text{--PbNb}_2\text{O}_6$ і $\text{NaNbO}_3\text{--KNbO}_3$. Останні розроблені спеціально для високочастотних перетворювачів (10–40 МГц).

8.4. Піроелектрики

До піроелектриків відносять діелектрики, які володіють сильно вираженим піроелектричним ефектом.

Піроелектричним ефектом називають зміну спонтанної поляризації діелектриків при зміні температури.

Рівняння піроелектричного ефекту записують у вигляді:

$$-dP_{cn} = p dT, \quad (8.3)$$

де P_{cn} – спонтанна поляризованість діелектрика; p – піроелектричний коефіцієнт.

При незмінній температурі спонтанний електричний момент діелектрика компенсується вільними зарядами протилежного знаку за рахунок процесів електропровідності або адсорбції заряджених частинок з навколишньої атмосфери. Зміна спонтанної поляризованості супроводжується звільненням деякого заряду на поверхні діелектрика, завдяки чому в замкнутому колі виникає електричний струм:

$$i = -S dP_{cn} / dt = S p dT / dt, \quad (8.4)$$

де S – поверхня піроелектрика; dT/dt – швидкість зміни температури.

Температурна зміна спонтанної поляризації обумовлена двома основними причинами. З одного боку, підвищення температури порушує впорядкованість в розташуванні елементарних дипольних моментів (первинний або дійсний піроелектричний ефект), а з іншого боку, нагрівання викликає зміну лінійних розмірів діелектрика і п'єзоелектричну поляризацію, обумовлену деформацією (вторинний піроелектричний ефект). Піроелектричний коефіцієнт p враховує обидва ці фактори.

Якість піроелектричного матеріалу прийнято характеризувати приведеним фізичним параметром:

$$R_B = p / (\epsilon c),$$

де ϵ – діелектрична проникність; c – питома об'ємна теплоємність.

Чим більше значення R_B , тим більшу різницю потенціалів можна отримати на зразку при одній і тій же потужності, що поглинається.

Піроелектричними властивостями володіють деякі лінійні діелектрики (наприклад, турмалін, сульфат літію) і всі сегнетоелектричні матеріали. Особливість лінійних піроелектриків полягає в тому, що в них, на відміну від сегнетоелектриків, напрям спонтанної поляризації не може змінюватися за допомогою зовнішнього електричного поля.

Сегнетоелектрики проявляють піроелектричні властивості лише в монодоменизованому стані, для якого характерна однакова орієнтація спонтанної поляризованості всіх доменів. В полідоменизованому зразку сумарна поляризованість дорівнює нулю, і тому піроелектричний ефект відсутній.

Монодоменізація сегнетоелектрика здійснюється шляхом витримки його в постійному електричному полі при температурі дещо нижчій за точку Кюрі. Створення і закріплення монодоменізованого стану в сегнетоелектричних кристалах є однією з найважливіших проблем при використанні їх як піроелектриків.

З термодинамічної теорії сегнетоелектрики витікає наступна залежність спонтанної поляризованості від температури:

$$P_{cn} = A\sqrt{T_K - T}, \quad (8.5)$$

де A – деяка константа для даного матеріалу.

Звідси випливає, що піроелектричний коефіцієнт зростає у міру наближення до температури фазового переходу T_K :

$$p = \frac{dP_{cn}}{dT} = \frac{A}{2\sqrt{T_K - T}}$$

Відмічені закономірності і зміну піроелектричних властивостей ілюструє рис. 3.28. При кімнатній температурі піроелектричний коефі-

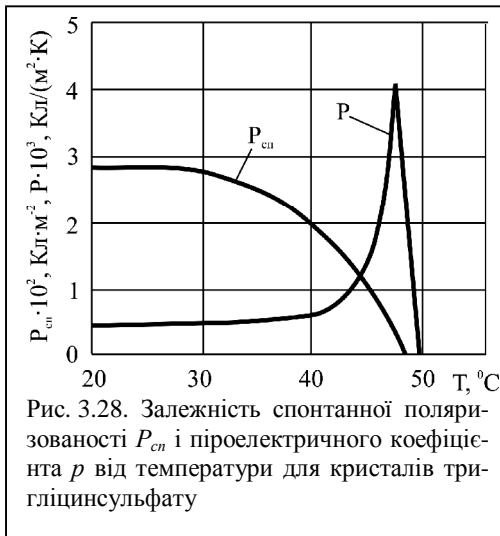


Рис. 3.28. Залежність спонтанної поляризованості P_{cn} і піроелектричного коефіцієнта p від температури для кристалів тригліцинсульфату

цієнт в кристалах тригліцинсульфату (ТГС) складає $360 \text{ мкКл}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Наочне уявлення про цей параметр можна отримати з такого прикладу. Пластинка ТГС, вирізана перпендикулярно до напрямку спонтанної поляризованості, що має товщину 1 мм , при рівномірному нагріві на 1°C набуває електричного заряду $360 \text{ мкКл} \cdot \text{м}^{-2}$, що відповідає різниці потенціалів між її поверхнями близько 1600 В ($U = P\Delta Th/(\epsilon_0\epsilon)$;

$\epsilon = 25$).

Значний піроэффект в сегнетоелектриках використовується для створення теплових датчиків і приймачів променевої енергії, зокрема для реєстрації інфрачервоного НВЧ-випромінювання.

8.5. Електрети

Електретом називають тіло з діелектрика, що тривалий час зберігає поляризацію і створює в просторі, що його оточує, електричне поле, тобто електрет є формальним аналогом постійного магніту.

Термін електрет був запропонований англійським фізиком Хевісайдом в 1896 р, а зразки електретів були вперше виготовлені японським дослідником Єгучі в 1922 р. з охолодженого в сильному електричному полі розплаву полярних діелектриків: пальмового воску і каніфолі. Для уточнення технології отримання такі електрети називають термоелектретами. Термоелектрети здатні створювати електричне поле в навколишньому просторі протягом багатьох місяців і навіть років. Великий інтерес представляють фотоелектрети, що виготовляються з матеріалів, що володіють фотоелектропровідністю (сірка, сульфід кадмію і ін.). При одночасній дії світла і електричного поля фотоелектрети можуть тривалий час зберігати заряди в темноті і швидко розряджаються при освітленні.

Існують й інші способи отримання електретного стану в діелектриках. Наприклад, електроелектрети утворюються при дії на діелектрик тільки електричного поля без нагріву або опромінювання. Поле вибирають настільки великим, що над поверхнею діелектрика виникає газовий розряд (електрична міцність газу нижча, ніж у твердого діелектрика); йони, прискорені полем, бомбардують поверхню діелектрика, створюючи структурні дефекти і утворюючи поверхневий заряд. Електризація діелектрика полегшується при зниженому тиску газу в корон-

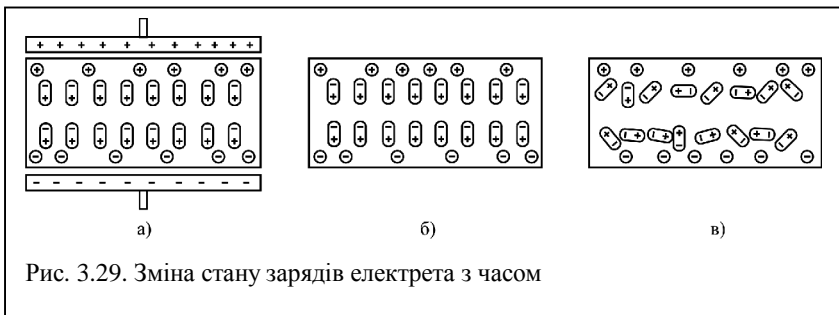


Рис. 3.29. Зміна стану зарядів електрета з часом

ному розряді. Такі електрети називають короноелектретами.

Утворення електретного стану в діелектрику пояснює рис. 3.29. З рис. 3.29, а видно, що на кожній з поверхонь електрета, що знаходиться під поляризуючими електродами, утворюються електричні заряди обох знаків.

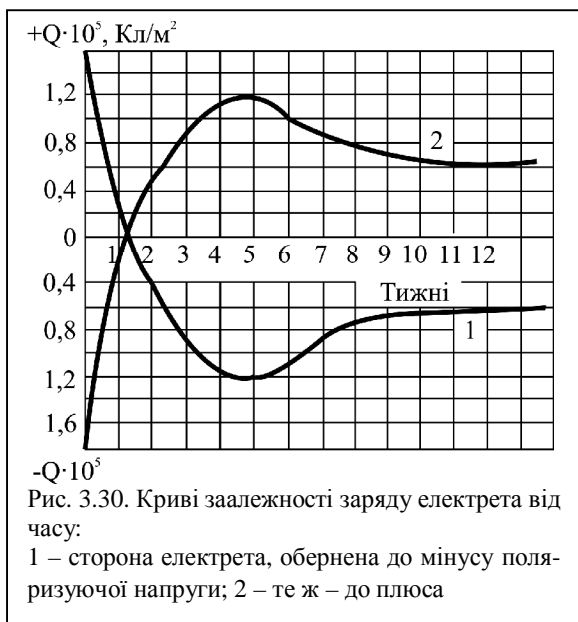
Заряди, що перейшли з поляризуючого електроду або з повітряного зазору на поверхневі пастки твердого діелектрика і мають той же знак заряду, що і на електроді, називають гомозарядами.

Заряди з протилежним знаком полярності електродів, що виникають в електреті за рахунок різних релаксаційних механізмів поляризації, називають гетерозарядами. Різниця гетеро- і гомозарядів визначає результуючий заряд електрета. Переважанням того або іншого заряду пояснюється інверсія його знаку на поверхні електрета з часом.

З рис. 3.29, б видно, що відразу після закінчення поляризації переважає гетерозаряд, а через деякий час, коли тепловий рух дезорієнтує диполі (рис. 3.29, б), переважаючим виявляється гомозаряд. Це явище характеризується кривими (рис. 3.30).

Досліди показують, що гомозаряди зберігаються протягом тривалішого часу в порівнянні з гетерозарядами. Поверхнева густина зарядів, що спостерігається в різних електретів, може складати 10^{-6} – 10^{-4} Кл/м². При напруженості поляризуючого поля $E_{II} < 0,5$ МВ/м, як правило, виявляється тільки гетерозаряд, при $E_{II} > 1$ МВ/м – гомозаряд.

В органічних полярних електретів переважають гетерозаряди, у неорганічних (керамічних) матеріалів і органічних неполярних діелектриків – гомозаряди. У такого відомого неполярного діелектрика, як плівковий фторопласт, існує дуже міцно утримуваний і значний по



величині гомозаряд. Гомозаряд локалізований тільки в поверхневих шарах електрета, тоді як гетерозаряд розподілений по всьому об'єму електрета, що і підтверджує фізичну природу цих зарядів.

Час життя електретів в нормальних умовах може досягати десятків років. Він швидко зменшується з підвищенням температури і

вологості навколишнього середовища. При нагріванні відбувається звільнення носіїв заряду, захоплених пастками, а також нейтралізація об'ємних зарядів за рахунок електропровідності діелектрика. В матеріалах з дуже високим питомим опором релаксація заряду, локалізовано на глибоких пастках, відбувається дуже поволі.

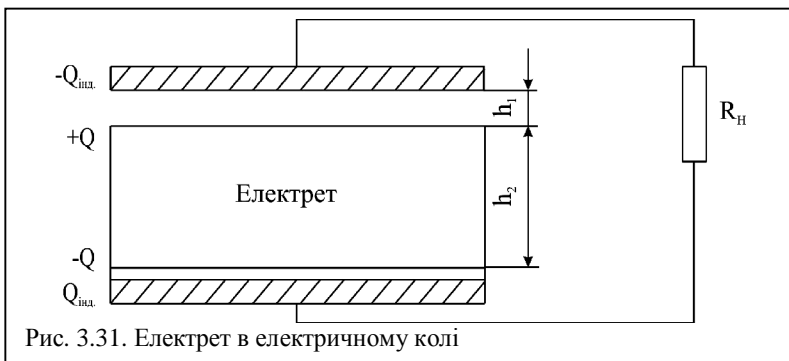
В даний час найбільше практичне застосування знаходять електрети на основі полімерних плівок. В умовах підвищеної вологості найбільш стабільні електрети з політетрафторетилену.

Зазвичай електрет має вид тонкої пластинки або плівки з різномісними зарядами однакової поверхневої густини на протилежних сторонах.

Якщо електрет помістити між металевими обкладками (рис. 3.31), то індукований заряд на них

$$Q_{\text{інд}} = \frac{Q}{\epsilon h_1 / h_2 + 1},$$

де Q – заряд на поверхні електрета; h_1 – зазор між однією з поверхонь електрета і електродом (приймаємо, що зазор між іншою поверхнею і електродом нескінченно малий); h_2 – товщина електрета; ϵ – діелектрична проникність матеріалу електрета.



При зміні зазору h_1 , індукований заряд також змінюється. При періодичній зміні зазору в колі між електродами проходить змінний струм, частота якого рівна частоті зміни зазору. Оскільки внутрішній опір системи електрет – електроди при цьому великий (10^7 – 10^8 Ом), струм не залежить від зовнішнього навантаження, і виходить своєрідний генератор змінного струму

У перетворювачах зазвичай застосовують полімерні плівки товщиною 3–20 мкм, металізовані з одного боку.

Електрети можуть бути використані для виготовлення мікрофонів і телефонів, вимірювання механічних вібрацій, як пиловловлювачі, дозиметри радіації, вимірювачі атмосферного тиску і вологості, електрометри, в електрофотографії і в багатьох інших випадках.

8.6. Рідкі кристали

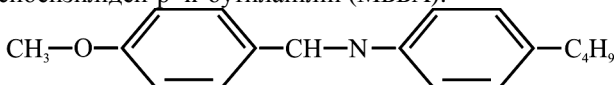
Рідкими кристалами називають такі речовини, які знаходяться в проміжному (мезоморфному) стані між ізотропною рідиною і твердим тілом. З одного боку, вони володіють текучістю, здатністю знаходитися в каплевидному стані, а з іншої – для них характерна анізотропія властивостей і, перш за все, оптична анізотропія.

Слабкі міжмолекулярні сили, що забезпечують упорядковану структуру рідкого кристала, є принциповою основою сильної залежності властивостей від зовнішніх факторів (температури, тиску, електричного поля і ін.). Ця залежність, у свою чергу, відкриває багаті можливості при розробці індикаторних пристроїв різного призначення.

Рідкі кристали були відкриті в 1888 р. австрійським ботаніком Ф. Рейнітцером. Проте широке практичне застосування ці речовини знайшли порівняно недавно. Специфіка рідких кристалів полягає в обмеженому температурному інтервалі існування мезофази (тобто рідкокристалічного стану). Послідовність фазових перетворень при нагріванні речовини можна представити наступною схемою:

тверде тіло → рідкий кристал → ізотропна рідина.

Рідкокристалічний стан утворюють в основному органічні сполуки з подовженою паличкоподібною формою молекул. Значну частину рідких кристалів складають сполуки ароматичного ряду, молекули яких містять бензольні кільця. Прикладом такої речовини служить р-метоксibenзилден-р'-n-бутиланілін (МБА):



В даний час відомо більше 3000 органічних сполук, здатних існувати в мезоморфному стані. Серед них є і такі речовини, у яких температурний інтервал існування мезофази включає кімнатну температуру (у їх числі МБА).

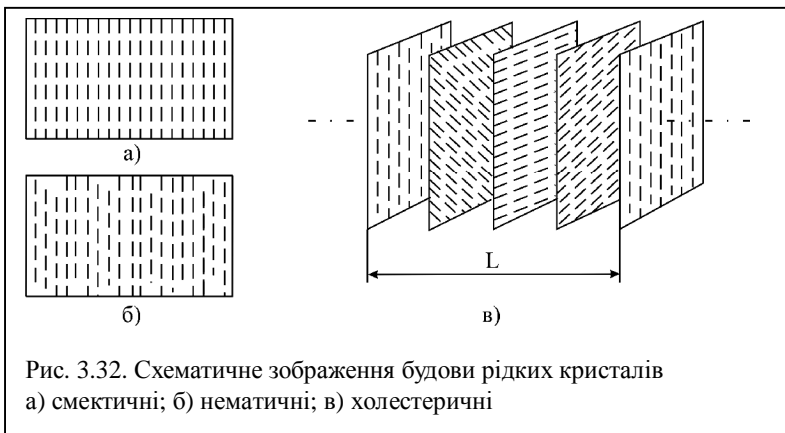
За ознакою загальної симетрії всі рідкі кристали підрозділяються на три види: смектичні, нематичні і холестеричні.

Смектична фаза характеризується шаруватою будовою (рис. 3.32, а). Центри тяжіння видовжених молекул знаходяться в площинах рівновіддалених одна від одної. У кожному шарі молекули орієнтовані паралельно за рахунок пружної дисперсійної взаємодії. Текучість забезпечується лише взаємним ковзанням шарів, тому в'язкість середовища достатньо велика. Из-за високої в'язкості смектичні рідкі кристали не отримали широкого застосування в техніці.

В нематичній фазі довгі осі молекул орієнтовані уздовж одного загального напрямку, який називають нематичним директором. Проте центри тяжіння молекул розташовані безладно, так що виникає симетрія нижчого порядку, ніж у смектичних кристалів (рис. 3.32, б). При такій будові речовини можливе взаємне ковзання молекул вздовж нематичного директора.

Холестерична фаза на молекулярному рівні схожа на нематичну. Проте вся її структура додатково закручена навколо осі, що перпендикулярна молекулярним осям. В результаті виходить шарувата гвинтова структура з кроком спіралі L близько 300 нм (рис. 3.32, в). Така фаза поводить себе по відношенню до падаючого випромінювання подібно до інтерференційного фільтру, тобто світлові промені відбиваються селективно. Явище багато в чому аналогічне дифракції рентгенівських променів на кристалічних ґратках твердих тіл. Проте масштаби тут зовсім інші: оскільки періоди холестеричної спіралі складають сотні нанометрів, довжини хвиль λ_0 , що задовольняють умову Вульфа-Брегга, відповідають видимій області спектра:

$$2L \sin \theta = m \lambda_0,$$



де θ – кут падіння променів; m – порядок дифракційного максимуму.

Якщо плоский шар холестеричного рідкого кристала освітлювати білим світлом, то у відбитому світлі він здаватиметься зафарбованим, причому забарвлення може змінюватися залежно від кута спостереження.

Крок гвинтової спіралі сильно залежить від зовнішніх впливів. При зміні температури змінюється відстань між молекулярними шарами, відповідно змінюється довжина хвилі λ_0 максимального розсіювання при заданому куті спостереження. В результаті виходить кольорний термометр, який знайшов різні застосування. Зміну кольору текстури при зміні температури називають термохромним ефектом.

Якщо холестерична структура освітлюється монохроматичним світлом то при постійному куті спостереження змінюється інтенсивність розсіяного світла. На цьому принципі можливе створення дуже чутливих датчиків температури. Підбираючи різні по складу речовини, можна здійснити вимірювання температури в межах від -40 до 250°C . Температурний діапазон зміни кольору обмежений інтервалом існування мезофази, який можна регулювати, використовуючи багатокомпонентні суміші холестеричних рідких кристалів, в межах від декількох десятків градусів до $0,01^\circ\text{C}$. Таким чином, за допомогою рідкокристалічних індикаторів можна зареєструвати зміни температури в тисячній долі градуса. Колірні термоіндикатори з успіхом застосовуються для цілей технічної і медичної діагностики. Вони дозволяють дуже просто отримати картину теплового поля у вигляді кольорної діаграми. Цей же принцип використовується для візуалізації інфрачервоного випромінювання і поля НВЧ.

Для управління світловим променем і для візуального відображення інформації найбільший практичний інтерес представляють електрооптичні ефекти в нематричних рідких кристалах. Як і в сегнетоелектриках, весь об'єм нематричного рідкого кристала розбивається на невеликі області – домени, що розрізняються напрямом переважної орієнтації, внаслідок чого виникає оптична неоднорідність середовища і спостерігається сильне розсіювання світла. Такий рідкий кристал представляється каламутним як у відбитому, так і прямому світлі. Для практичного використання потрібні тонкі однорідно орієнтовані шари. При цьому розрізняють гомогенну (горизонтальну) і гомеотропну (вертикальну) орієнтації молекул щодо підкладок, які виготовляють зі скла. Потрібна орієнтація досягається спеціальною обробкою поверхні скляних підкладок (травлення, натирання, осадження органічних і неорганічних покриттів і ін.) або введенням поверхнево-активних речовин в мезофазу.

За електричними властивостями нематичні рідкі кристали відносяться до групи полярних діелектриків з невисоким питомим опором ($\rho = 10^6 - 10^{10}$ Ом·м), значення якого можна легко регулювати розчиненням дисоціюючих йонних сполук. Важливими характеристиками нематичних рідких кристалів є оптична і діелектрична анізотропія. Мірою оптичної анізотропії служить різниця $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$, де n_{\parallel} і n_{\perp} – показники заломлення для світлової хвилі, електричний вектор якої паралельний чи перпендикулярний напрямку переважної орієнтації молекул (відповідно, незвичайний і звичайний промінь).

У типових випадках $\Delta n \approx 0,3$, тобто однорідно орієнтовані нематичні структури поведуться подібно до оптично позитивних одноосіньних кристалів.

Мірою діелектричної анізотропії служить величина

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp},$$

де $\epsilon_{\parallel}, \epsilon_{\perp}$ – діелектричні проникності, виміряні вздовж і впоперек напрямку переважної орієнтації молекул.

Відповідно до знаку $\Delta \epsilon$ розрізняють позитивну і негативну діелектричну анізотропію. Позитивна анізотропія проявляється в речовинах, молекули яких мають дипольні моменти, направлені уздовж молекулярних осей. Якщо ж дипольні моменти молекул перпендикулярні їх молекулярним осям, то рідкий кристал володіє негативною діелектричною анізотропією. У сильних електричних полях молекули нематиків з позитивною діелектричною анізотропією приймають гомеотропну

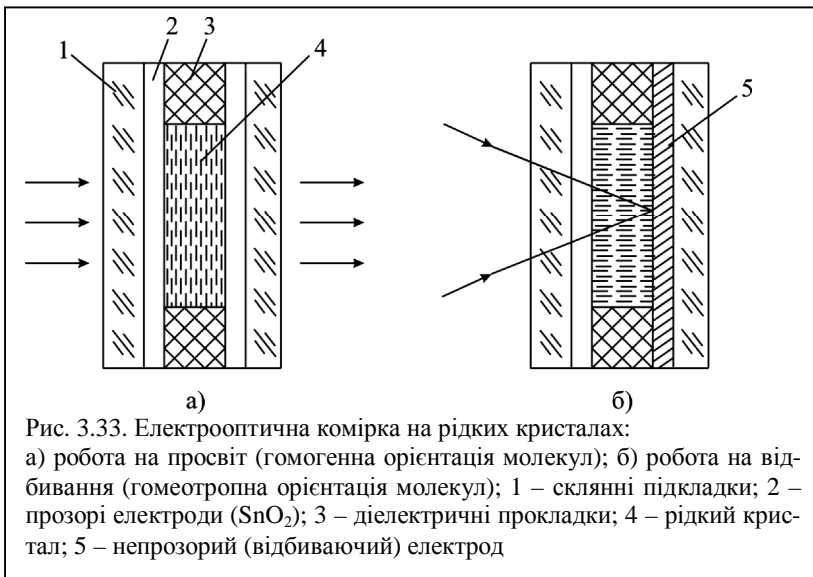


Рис. 3.33. Електрооптична комірка на рідких кристалах:

а) робота на провіт (гомогенна орієнтація молекул); б) робота на відбивання (гомеотропна орієнтація молекул); 1 – склянні підкладки; 2 – прозорі електроди (SnO_2); 3 – діелектричні прокладки; 4 – рідкий кристал; 5 – непрозорий (відбиваючий) електрод

орієнтацію, тобто у напрямі поля. У цих же умовах для нематика з негативною анізотропією характерна гомогенна орієнтація, тобто молекули своїми довгими осями розташовані перпендикулярно до напрямку поля.

Розглянуті властивості нематичних рідких кристалів використовуються в електрооптичних комірках для управління світловим потоком. Конструкція такої комірки схематично показана на рис. 3.33. Між двома скляними пластинами, розділеними діелектричними прокладками, знаходиться шар рідкого кристала завтовшки 5–30 мкм. На внутрішні поверхні підкладок наносяться управляючі електроди. Комірка може працювати як на провіт (рис. 3.33, а), так і в відбиваючому режимі. В останньому випадку один з електродів роблять непрозорим (рис. 3.33, б).

При створенні пристроїв відображення інформації на рідких кристалах найбільш широке застосування знаходять ефект динамічного розсіювання світла і польовий «твіст»-ефект (розкручування нематичної фази).

Динамічне розсіювання світла спостерігається в рідких кристалах з негативною діелектричною анізотропією і невисоким питомим опором (близько 10^6 Ом·м). Початковому стану відповідає гомеотропна орієнтація молекул мезофази. Завдяки внутрішній впорядкованості комірка прозора для падаючого світла. Під дією зовнішньої напруги відбувається поворот диполів (їх електричний момент перпендикулярний довгим осям молекул), і орієнтація змінюється на гомогенну. Од-



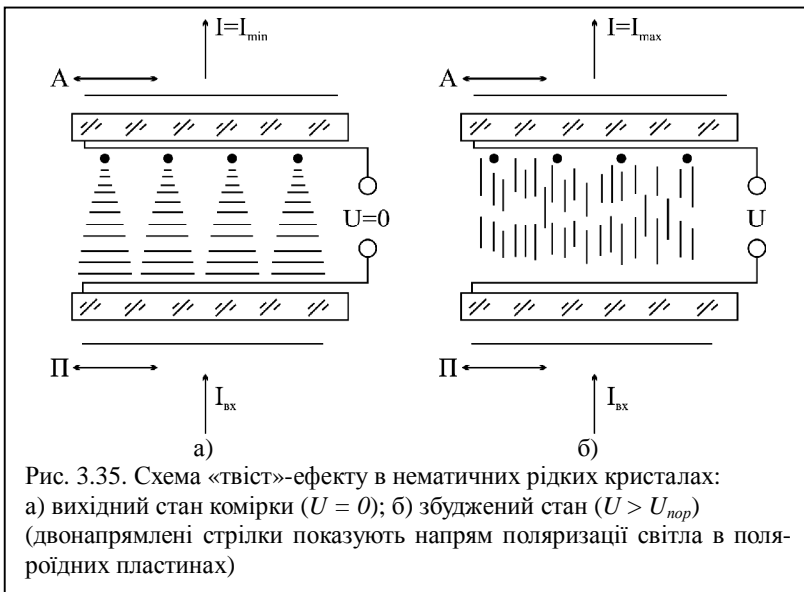
ночасно сильне електричне поле ініціює потік йонів, який порушує впорядковане статичне розташування молекул. При вирівнюванні молекулярних осей по напрямку руху йонів виникають турбулентності в

мезофазі, які призводять до локальних змін показника заломлення, тобто виникають центри, що розсіюють світло. Зовні це виявляється як помутніння комірки. Інтенсивність світлорозсіювання, а відповідно і контрастність оптичного відгуку, посилюються із збільшенням управляючої напруги (рис. 3.34, а). Геометрія знаку що висвічується задається формою електроду. При відключенні поля комірка повертається в початковий прозорий стан.

Ефект динамічного розсіювання світла виявляється як на постійній, так і на змінній напрузі низької частоти (до 10^2 – 10^4 Гц залежно від матеріалу). Електрохімічні реакції між рідкокристалічною речовиною і матеріалом електродів є причиною поступової деградації комірок (втрати контрасту).

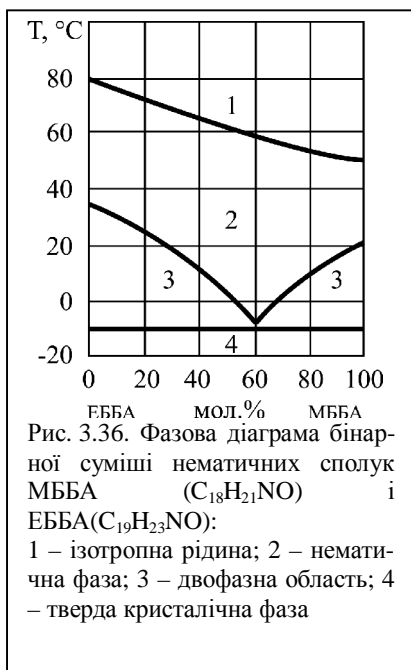
Проте при використанні змінної напруги процеси електролізу вдається значною мірою ослабити і довести термін служби індикаторів до десятків тисяч годин.

Для спостереження польових електрооптичних ефектів необхідно використовувати нематичні рідкі кристали з підвищеним питомим опором (не менше 10^9 Ом·м). Тільки в цьому випадку можна подавити вихрові потоки рідини, що індукуються йонною електропровідністю.



Польовий «твіст»-ефект проявляється в рідких кристалах з позитивною діелектричною анізотропією. Відповідною обробкою підкладок

добиваються гомогенної орієнтації молекул із закручуванням текстури по азимуту на 90° . В результаті шар рідкого кристала стає оптично активним, тобто здатним повертати площину поляризації вхідного світла на чверть оберта. На рис. 3.35, а гомогенна гвинтова структура зображена у вигляді клинів, кожен з яких є сукупністю проєкцій подовжених молекул на площину малюнка. При накладанні зовнішнього поля з напругою, більшою за деяке значення, за рахунок позитивної електричної анізотропії відбувається розкручування спіральної структури і орієнтація молекулярних осей за напрямом поля (рис. 3.35, б). При гомеотропній орієнтації молекул оптична активність текстури зникає, оскільки світло розповсюджується уздовж оптичної осі. Розмішуючи на вході і виході комірки поляроїдні пластини (поляризатор П і аналізатор А), перетворюють модуляцію поляризації світла в амплітудну. Зміною напруги на електродах можна регулювати світлопропускання оптичної комірки (рис. 3.35, б). При паралельному розташуванні поляроїдів області, збуджені полем, володіють максимальним світлопропусканням. У разі схрещених поляроїдів контраст змінюється на протилежний, тобто спостерігач бачить темні (збуджені області) на світлому полі.



Для отримання кольорових зображень в рідкі кристали вводять молекули барвника, які також мають подовжену паличкоподібну форму і орієнтуються паралельно до молекул мезофазі за рахунок пружної дисперсійної взаємодії. Спектр поглинання таких молекул є функцією їх орієнтації щодо напрямку поляризації падаючого світла.

Поглинання максимальне, якщо довгі осі молекул паралельні коливанням електричного вектора світлової хвилі. Зовнішнє поле змінює статичну орієнтацію молекул, відповідно змінюється спектр поглинання лінійно поляризованого світла і обумовлений ним колірний контраст електрооптичного комірки.

Рідкі кристали, які використовуються в індикаторних

пристроях, зазвичай представляють собою суміш двох або декількох сполук. У змішаних системах вдається отримати ширший температурний інтервал існування мезофази. На рис. 3.36 показаний вплив складу бінарної суміші із сполук МББА і ЕББА на зсув температур фазових переходів. Як видно з малюнка, евтектична суміш, що складається з 60% МББА і 40% ЕББА, характеризується найбільш широким температурним діапазоном існування нематичної фази.

Основною областю застосування нематичних рідких кристалів є індикаторні пристрої. До таких пристроїв відносяться дисплеї, великоформатні табло, цифрові індикатори для мікрокомп'ютерів, циферблати електронних годинників і цифрових вимірювальних приладів. Основними перевагами таких індикаторів є: а) хороший контраст при яскравому освітленні; б) низька споживана потужність; в) сумісність з інтегральними схемами за робочими параметрами і конструктивним виконанням; г) порівняно просте у виготовлення і низька вартість.

Відзначимо, що в рідких кристалах для індикації використовується навколишнє світло, завдяки чому їх споживана потужність значно менша, ніж в інших індикаторних пристроях і складає 10^{-4} – 10^{-6} Вт/см². Це на декілька порядків нижче, ніж в світлодіодах, порошкових і плівкових електролюмінофорах, а також в газорозрядних індикаторах. Принциповими недоліками пристроїв на рідких кристалах є невисока швидкодія, а також схильність до електро- і фотохімічного старіння.

8.7. Матеріали для твердотільних лазерів

Лазер* є джерелом оптичного когерентного випромінювання, що характеризується високою спрямованістю і великою густиною енергії.

В основі принципу дії лазерів лежить відкрите А. Ейнштейном явище вимушеного (стимульованого) випромінювання. Воно полягає в практично одночасному випусканні узгоджених за частотою і напрямом електромагнітних хвиль (фотонів) величезною кількістю атомів (або молекул) під дією зовнішнього електромагнітного поля.

Основними елементами лазерів на твердих діелектриках є активне середовище (робоче тіло), оптичний резонатор і система оптичного накачування. Активним середовищем служить кристалічна або склоподібна матриця, в якій рівномірно розподілені активні йони (активатори люмінесценції). Всі процеси поглинання і випромінювання світла

*Light amplification by stimulated emission of radiation – laser.

пов'язані з переходами електронів між рівнями активного йона; при цьому матриця грає пасивну роль. Тип активного йона в основному визначає спектр випромінювання лазера.

Робоче тіло лазера виготовляють, як правило, у вигляді циліндричного стержня, торцеві поверхні якого обробляються з високим ступенем точності. Паралельність торців витримується в межах декількох кутових секунд. Для збудження активних йонів використовується оптичне накачування за допомогою потужних газорозрядних ламп.

З радіотехніки відомо, що необхідною умовою роботи будь-якого генератора є наявність позитивного зворотного зв'язку, тобто частина енергії коливань повинна поступати з виходу генератора на його вхід. У оптичних квантових генераторах (лазерах) позитивний зворотний зв'язок здійснюється резонатором, який зазвичай виконують у вигляді двох плоскопаралельних дзеркал, одне з них напівпрозоре для виведення випромінювання з активного елемента. Дзеркальні поверхні резонатора іноді суміщають з торцями робочого стержня.

Не дивлячись на те, що матриця не бере участі в процесах генерації коливань, багато фізичних властивостей активного середовища визначаються саме матрицею. Тому речовина кристалічної або склоподібної основи повинна задовольняти ряду вимог:

- 1) неактивована матриця повинна бути оптично прозорою як для випромінювання накачування, так і випромінювання активних йонів, що вводяться в матрицю;
- 2) речовина основи повинна володіти високою теплопровідністю, щоб ефективно розсіювати енергію, що виділяється при безвипромінювальних переходах;
- 3) матриця повинна бути оптично однорідною. Механічні напруги, різні мікровключення, межі зерен збільшують порогову потужність генерації, викликають паразитне поглинання і розсіювання енергії. Внаслідок цього збільшується розсіюваність лазерного променя, ослаблюється його інтенсивність;
- 4) матеріал основи повинен володіти високою нагрівостійкістю і механічною міцністю, щоб витримувати теплові перевантаження при високій густині випромінювання накачування і генерації;
- 5) матриця повинна бути стійка до дії ультрафіолетового випромінювання ламп накачування;
- 6) матеріал повинен бути технологічний, тобто доступний для масового виробництва циліндричних стержнів необхідних розмірів. Збільшення розмірів робочого тіла дозволяє підвищити потужність випромінювання лазера;

7) структура кристалічної ґратки матриці повинна допускати введення активатора в заданій концентрації.

Перерахованим вимогам в тій чи іншій мірі задовольняють високотемпературні кисневі сполуки (оксиди, гранати, вольфрамат, молібдати, ніобати, алюмінати, цирконати і ін.), фториди різних металів, а також оксидні і фтороберилантні скла. Основу останніх складає BeF_2 .

Основні вимоги до активатора зводяться до наступного:

1. Йони активатора повинні мати широкі смуги поглинання і вузькі сильні лінії люмінесценції. Чим ширша смуга оптичного поглинання, тим більша частина випромінювання накачування використовується для збудження активних йонів. Проте, чим менша ширина ліній люмінесценції, тим вищі характеристики лазерного випромінювання і тим менша потужність, потрібна для накачування. Бажано також, щоб частота збуджуючого випромінювання не дуже сильно перевищувала частоту лазерного випромінювання. Інакше значна частина енергії, що поглинається, витрачатиметься на нагрів кристалічної ґратки.

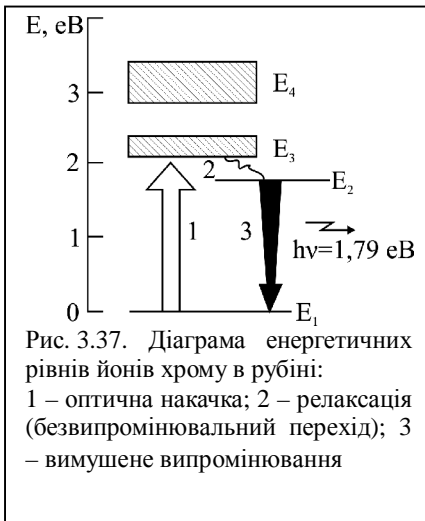
2. Активатор повинен створювати збуджені метастабільні рівні (тобто з великим часом життя), на яких можна накопичити значну кількість електронів. При цьому час життя електронів на метастабільних рівнях повинен визначатися в основному випромінювальними оптичними переходами.

3. Йони активатора повинні вводитися в матрицю без порушення її оптичної однорідності, механічної міцності і термостійкості.

Як активні йони використовуються виключно елементи перехідної групи і рідкісноземельні елементи, що містять внутрішні, незайняті $3d$ - і $4f$ - електронні оболонки. Глибоко розташовані електрони внутрішніх орбіт екрануються зовнішніми оболонками від електростатичної взаємодії з сусідніми йонами кристалічної ґратки. Це призводить до слабого розщеплення внутрішніх рівнів і забезпечує високу монохроматичність випромінювання лазера.

У переважній більшості випадків активування здійснюють тривалентними йонами Nd^{3+} , при цьому в різних матрицях генерація випромінювання спостерігається приблизно в однаковому спектральному діапазоні поблизу $\lambda = 1,06$ мкм.

Одним з найбільш освоєних матеріалів лазерної техніки є рубін. Саме на рубіні в 1960 р. був створений перший твердотільний лазер. Рубінами називають кристали α -корунду (Al_2O_3), в яких частина йонів алюмінію замінена йонами хрому. Кількістю хрому визначається колір рубіна. У лазерній техніці використовують різні рубіни із вмістом Cr_2O_3 близько 0,05 мас. %, що відповідає концентрації $1,6 \cdot 10^{25}$ йонів хрому в одному кубічному метрі. При вмісті оксиду хрому більше



відрізняються від рівнів енергії у вільних атомах хрому із-за дії електростатичного і внутрікристалічного поля.

Рівень E_1 на рис. 3.37 відповідає основному, тобто незбудженому стану хрому. Рівні, розташовані вище, характеризують збуджені стани йонів активатора. Широка смуга E_3 використовується для поглинання випромінювання накачування. Переходи електронів між рівнями E_1 і E_2 відповідальні за генерацію випромінювання в кристалі.

При збудженні зовнішнім світлом електрони з основного стану E_1 переходять в смугу E_3 , а потім за дуже короткий час ($\sim 10^{-8}$ с) безвипромінювальним шляхом переходять на рівень E_2 . Надмірна енергія йде на нагрів кристалічної ґратки. Рівень E_2 є метастабільним, тобто характеризує збуджений стан з чималим часом життя ($\sim 10^{-3}$ с). Це призводить до накопичення електронів на рівні E_2 і створення інверсної населеності, що необхідно для генерації вимушеного випромінювання.

Якщо повернення електрона в основний стан відбувається спонтанно, то різні активні йони випромінюють неодноразомно і незалежно. Тому випромінювані електромагнітні хвилі не узгоджені у фазі. Випадковий характер має не тільки момент випускання але й напрям його поширення. В результаті спонтанне випромінювання виявляється некогерентним і несфокусованим у просторі.

Проте активний йон може перейти в основний стан не спонтанно, а вимушено, під дією електромагнітної хвилі, якщо тільки частота цієї хвилі відповідає частоті переходу ($E_2 - E_1$). Образно кажучи, така

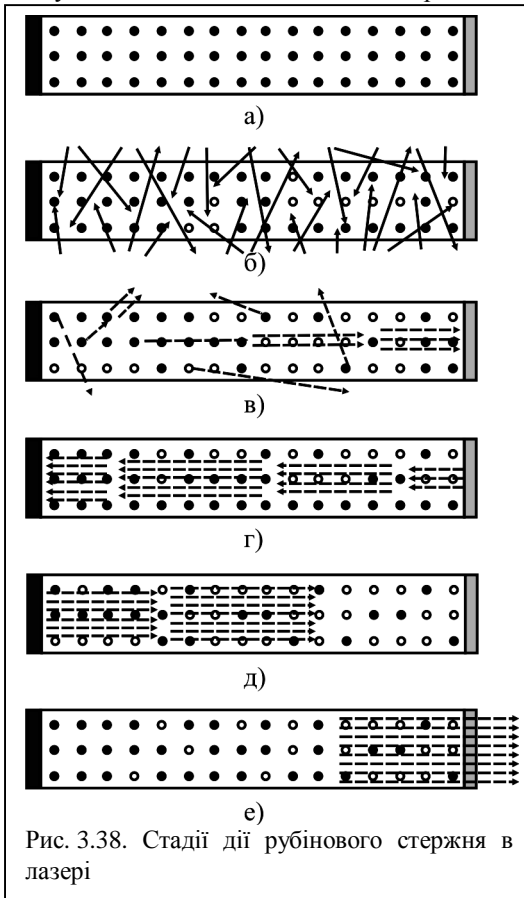
0,5 мас.% рубін набуває червоного забарвлення. Чисті кристали α -корунду оптично прозорі в діапазоні 0,17–6,5 мкм.

Кристал рубіну володіє оптичною анізотропією і має майже кубічну симетрію, дещо спотворену уздовж однієї з просторових діагоналей, в результаті чого дійсна симетрія кристала – ромбоєдрична. Цінними якостями рубіна є високі механічна міцність і теплопровідність.

Йони хрому створюють в широкій забороненій зоні корунду систему енергетичних рівнів (рис. 3.37), які істотно

резонансна хвиля «розгойдує» електрон на метастабільному рівні і прискорює його перехід у стан з меншою енергією. Вірогідність вимушеного переходу пропорційна інтенсивності «вимушуючого» випромінювання. Особливість вимушеного випускання полягає в тому, що випромінюваний при електронному переході новонароджений фотон за своїми параметрах абсолютно невідмінний від первинних фотонів, що викликали перехід: він має ті ж частоту і фазу, той же напрям розповсюдження.

Наочне уявлення про процес генерації когерентного направлено-го випромінювання в активному середовищу дає рис. 3.38. Початковий незбуджений стан йонів активатора показаний чорними точками



(рис. 3.38, а). Під дією випромінювання на-качування (суцільні стрілки на рис. 3.38, б) велика частина йонів переходить в збуджений стан (білі кружки). Повернення йонів активатора в незбуджений стан супроводжується випусканням фотонів (пунктирні стрілки на рис. 3.38, в). Плоско-паралельні дзеркала резонатора виділяють тільки ті типи електромагнітних хвиль, напрям розповсюдження яких співпадає з віссю резонатора (рис. 3.38, г). Хвилі, що розповсюджуються під кутом до осі резонатора, швидко покидають кристал, не отримавши достатнього підсилення. Навпаки, фотони, що рухаються вздовж оптичної

осі резонатора, відбиваючись на дзеркалах, можуть багато разів проходити через активне середовище (рис. 3.38, д). Достатньо випромінитись одному (первинному) фотону вздовж осі резонатора, щоб виникла ціла лінія аналогічних фотонів за рахунок вимушеного переходу збуджених йонів активатора в нормальний стан. Коли підсилення стає досить великим, а накопичена енергія значною, когерентне випромінювання виходить з кристала через напівпрозоре дзеркало резонатора у вигляді гостронаправленого світлового імпульсу (рис. 3.38, е).

Подвійне перетворення енергії (електрика – світло – когерентне випромінювання) практично виключає досягнення високого коефіцієнта корисної дії твердотільних лазерів. Положення ускладнюється й тим, що джерела накачування мають розмитий спектр і збудження активних йонів відбувається лише в невеликій частині цього спектра.

Штучні кристали рубіна зазвичай вирощують в печах за методом Вернейля. За цим методом ретельно розмелений порошок оксиду алюмінію з добавкою Cr_2O_3 поволі падає в полум'я воднево-кисневого пальника. Окремі частинки порошку, проходячи через полум'я, розплавляються і потім кристалізуються на кристалі приманки, розміщеному зовні полум'я. Отриману заготовку відпалюють, а потім обробляють, надаючи їй необхідні форми і розміри. Високоякісні кристали рубіну можуть бути отримані і методом витягування з розплаву.

Поряд з рубіном найважливішим матеріалом лазерної техніки є ітрію-алюмінієвий гранат, в кристалічній ґратці якого частина йонів ітрію замінена йонами неодиму (скорочений запис ІАГ: Nd^{3+}). Низька порогова енергія збудження при кімнатній температурі, висока механічна міцність і хороша теплопровідність дають можливість застосовувати цей матеріал в лазерах, що працюють в безперервному і високочастотному режимах. Вельми важливі високі експлуатаційні характеристики ІАГ: Nd^{3+} -лазера: температурна і радіаційна стійкість. Кристали ІАГ оптично ізотропні і прозорі в спектральному діапазоні 0,2–4 мкм.

Оскільки в спектрі ІАГ: Nd^{3+} відсутні широкі смуги поглинання, то для збільшення ефективності оптичного накачування зазвичай використовують ефект сенсibilізації. Як сенсibilізатор вводять йони Cr^{3+} . В гранатовій матриці спостерігається достатньо висока розчинність як рідкісноземельних елементів, так і елементів перехідної групи. Енергія накачування, поглинена в широких смугах сенсibilізуючого йона Cr^{3+} , резонансним безвипромінювальним шляхом передається активним йонам Nd^{3+} . Сенсibilізація дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії до 5–7% і довести потужність у безперервному режимі генерації до сотень ват. За потужністю випромінювання і значенням коефіцієнта корисної дії лазерів ІАГ: $\text{Nd}^{3+} + \text{Cr}^{3+}$ конкурують з потужними лазерами

на вуглекислому газі, відрізняючись від останніх значно меншими габаритами і зручнішою для практичного застосування довжиною хвилі випромінювання.

Лазери знаходять застосування в системах оптичної локації, в телебаченні, голографії, інформаційно-вимірювальній техніці і медицині.

Література

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1990. – 306 с.
2. Материалы микроэлектронной техники. Под ред. В.М. Андреева. – М.: Радио и связь, 1989. – 350 с.
3. Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А. Материалы электронной техники. Задачи и вопросы. – СПб.: Лань, 2003. – 208 с.
4. Ван-Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение / Пер. с англ. О.А. Алексеева. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Пер. с англ. под ред. А.А. Гусева. – М.: Наука, 1978. – 792 с.

Питання для самоперевірки

1. Які діелектрики називають активними? У чому відмінність вимог до активних і пасивних діелектриків?
2. Яка електрична впорядкованість властива сегнетоелектрикам?
3. Як пояснити діелектричний гістерезис і нелінійність залежності заряду від напруги в сегнетоелектриках?
4. Що таке початкова, реверсивна і ефективна діелектричні проникності?
5. Що називають сегнетоелектричною точкою Кюрі?
6. Який мікроскопічний механізм спонтанної поляризації титанату барію?
7. Назвіть найбільш важливі застосування сегнетоелектриків. На яких властивостях матеріалів ґрунтуються ці застосування?
8. Що таке прямий і зворотний p^2 зоефект? У яких діелектриках можна спостерігати ці явища?
9. Від яких чинників залежать p^2 зоелектричні властивості сегнетоелектричної кераміки. У чому переваги p^2 зокераміки перед монокристалічними p^2 зоелектриками?
10. Що таке піроелектричний ефект? Які застосування піроелектриків вам відомі?

11. Яка природа електретного стану в діелектриках? Що таке гомо- і гетерозаряд?
12. У чому відмінність між рідким станом речовини і «рідким кристалом»?
13. Як класифікуються рідкі кристали за видом симетрії? Які з них знаходять найбільш широке застосування в електронній техніці і для яких цілей?
14. Які основні вимоги пред'являються до діелектрика як лазерного матеріалу? Які елементи і чому найчастіше використовуються як активатори люмінесценції в твердотільних лазерах?