

Розділ 6. Оптична бістабільність.

Лекція 6-1(15). Визначення і типи оптичної бістабільності. Оптичні логічні пристрої на основі бістабільності Оптична бістабільність в лазерах. Пасивна оптична бістабільність.

Оптична бістабільність – область сучасних досліджень, що швидко розвивається. Інтерес до неї обумовлений можливостями її практичних застосувань і тими цікавими явищами, що лежать в її основі. Прикладні роботи спрямовані на оптимізацію цих пристроїв. зменшення їх розмірів, часів переключення та потужностей світлових потоків, забезпечення працездатності при кімнатних температурах. Пошук йде як в напрямку вдосконалення нелінійних матеріалів, так і в напрямку найбільш ефективних схемних рішень. Фундаментальні дослідження сконцентровані на поведінці простих бістабільних систем. У багатьох бістабільних пристроях нелінійне середовище розміщено всередині оптичного резонатору подібно тому, як це зроблено в лазерах, але на відміну від останніх пасивні пристрої збуджуються тільки падаючим когерентним випромінюванням. Багато явищ, таких як флуктуації, регенеративні пульсації та оптична турбулентність, можна спостерігати і в пасивних бістабільних системах.

Визначення і типи оптичної бістабільності.

Говорять, що система оптично бістабільна, якщо при одному і тому ж значенні вхідного сигналу I_I в деякій області його зміни вихідний сигнал I_T має два рівня інтенсивності. Так, система, передаточна характеристика якої зображена на **рис. 1**, бістабільна в діапазоні вхідного випромінювання від I_{\downarrow} до I_{\uparrow} . Очевидно, що така система є нелінійною, оскільки I_T неможливо отримати шляхом простого множення на постійне число. Дійсно, якщо I_I заключна між I_{\downarrow} та I_{\uparrow} , то знаючи I_I неможливо визначити I_T . Щоби отримати бістабільний відгук однієї не лінійності системи недостатньо. Необхідний ще зворотний зв'язок, який дозволяє отримати багатозначність нелінійного пропускання, тобто бістабільність. Це і є визначення оптичної бістабільності в вузькому розумінні, яке ілюструється **рис. 1** і буде використовуватися в подальшому. В наведеному визначенні розуміється, що при циклічній зміні вхідної інтенсивності бістабільна система може функціонувати обернено.

Системи, які проявляють гістерезисні властивості в залежності не від інтенсивності світла, а від деяких інших параметрів, тут не розглядаються. Це визначення виключає такі бістабільні системи, які неможливо повернути в вихідний стан лише за рахунок зниження вхідної інтенсивності, наприклад охоронну сигналізацію або систему екранування лазерного пучка, потужність якого достатня, щоби пропалити екран.

Прикладом оптичної бістабільної системи є інтерферометр Фабрі-Перо, що заповнений середовищем з поглинанням, яке насичується (**рис. 2**). Можливість бістабільності в такому нелінійному еталоні впливає з простого аналізу. При низьких рівнях вхідної інтенсивності I_I поглинання знижує добротність резонатору, навіть якщо частота випромінювання ν та частота піку пропускання інтерферометру ν_{FP} співпадають. Тому інтенсивність всередині інтерферометру I_C при $z = 0$ дорівнює I_I помноженої на коефіцієнт пропускання вхідного дзеркала T . Після проходження внутрішньо резонаторного середовища ця інтенсивність дорівнює

$$I_C(L) = e^{-\alpha L} T I_I \quad (1)$$

і тоді інтенсивність випромінювання, яке пройшло, дорівнює

$$I_T = e^{-\alpha L} T^2 I_I \quad (2)$$

Вираз (2) є справедливим, якщо інтенсивність насичення середовища I_S є великою у порівнянні з інтенсивністю всередині резонатору, тобто якщо

$$I_S > T I_I \quad (3)$$

У випадку великих вхідних інтенсивностей, коли середовище проствітлено, добротність інтерферометру є високою і він добре пропускає падаюче випромінювання, тобто $I_T \approx I_I$ та $I_C \approx I_T / T$ (**рис. 3**). Це, очевидно, справедливо при $I_C \gg I_S$, або

$$I_I \gg T I_S \quad (4)$$

Бістабільність можлива при умові, що нерівності (3) та (4) можуть бути задовільне ні для одної і тієї ж самої вхідної інтенсивності. Наприклад, коли $I_I = I_S$, обидві нерівності потребують, щоби T було менше 1. А це завжди має місце.

Прийняті дві класифікації бістабільних систем. Бістабільна система може бути абсорбційною або дисперсійною, але вона може бути суто бістабільною або гібридною. Нелінійний інтерферометр Фабрі-Перо є прикладом абсорбційної власно бістабільної системи. Система є абсорбційною або дисперсійною у відповідності з тим, чи виникає зворотний зв'язок із-за того, що від інтенсивності залежить коефіцієнт поглинання або показник заломлення. Ясно, що такий розділ не є різким, оскільки і абсорбційний і рефракційний механізми можуть бути суттєвими одночасно. Особливо чітка різниця між власною (повністю оптичною) та гібридною (суміш оптики та електроніки). В власно бістабільній системі залежність її характеристик від інтенсивності є результатом безпосередньої взаємодії випромінювання з речовиною. В гібридній - така залежність формується електричним сигналом, що знімається з детектору від світлового потоку який пройшов і що прикладається до внутрішньорезонансної фазової пластини.

Оптичні логічні пристрої на основі бістабільності.

Передача інформаційних сигналів за допомогою світлових пучків, що розповсюджуються по оптичних волокнах, замінює передачу електричних сигналів по дротах. Низька вартість вихідних матеріалів та їх стійкість до агресивних середовищ, а також малі розміри волоконних кабелів, що виробляються та характерні для них низькі втрати стимулюють вдосконалення оптичних систем та їх розвиток. Для високошвидкісних систем, наприклад у випадку передачі мультіплекс них композицій множини повільних сигналів, оптичний зв'язок краще електричного: оптичні імпульси пікосекундної протяжності простіше генерувати та передавати. Для створення повністю оптичних систем обробки інформації не вистачає поки що логічного елементу в якому б один світловий потік або імпульс управляв би іншим. Оптичні бістабільні пристрої характеризуються множиною властивостей, що сприйнятливі для повністю оптичного логічного елементу. Можна сподіватися, що вони виявляться прототипами мініатюрних, низькоенергетичних, субпікосекундних пристроїв, що здатні працювати при кімнатних

температурах. Високі частоти електромагнітних хвиль оптичного діапазону представляють в таких пристроях можливості субпікосекундного переключення та працеспроможності при кімнатних температурах, що недоступно пристроям на основі контактів Джозефсона та напівпровідникової електроніки. Той факт, що в повністю оптичних системах електричні заряди не використовуються взагалі або використовуються тільки в малих по розмірам взаємодіючих з випромінюванням областях, робить їх суттєво більш захищеними від впливу електромагнітних промислових шумів і від електромагнітного випромінювання надсильної потужності (наприклад, від електромагнітного випромінювання ядерних вибухів).

Бістабільні пристрої вже спроможні виконувати основні логічні функції. Продемонстровані двостабільна (**рис. 4**) та багато стабільна (**рис. 5**) оптична пам'ять. Інтенсивність випромінювання, яке пройшло, залежить від попередньої історії інтенсивності на вході, тобто система „пам'ятає”, чи був перевищений або ні особливий пороговий рівень інтенсивності в попередній момент часу. При зміні умов реалізується режим роботи оптичного транзистору, або транфазору (**рис. 6**). В такому режимі можна підсилити малі зміни вхідної інтенсивності або слабкого окремого сигнального пучка. Оптичний дискримінатор пропускає імпульси з інтенсивністю вище порогової і подавляє ті з них, інтенсивність яких нижче порогового рівня (**рис. 7**). Оптичний обмежувач характеризується постійністю інтенсивності вихідного випромінювання (**рис. 8**). Цю його властивість можна використати для обмеження потужності або для зменшення відносного рівня шумів. На **рис. 9** показано оптичне розпізнавання, коли сигнал передається правильно, якщо його величина вище порогового рівня. За допомогою нелінійного еталону можна реалізувати зміну форми імпульсу. Наприклад, на **рис. 10** показано, що еталон, що спочатку добре пропускає випромінювання, внаслідок поглинання енергії нагрівається, його власна частота відстроюється від частоти падаючого випромінювання, і він „закривається” раніше, ніж кінчається імпульс. Іноді при постійному вхідному рівні інтенсивності сигнал, що пройшов, осцилює (**рис. 11**). В результаті ми маємо оптичний генератор імпульсів. Еталон, який розміщено в неперервному пучку і початково відстроєний від частоти падаючого випромінювання, може свипируватися за допомогою імпульсу від іншого лазера. Таким чином можна сформувати

короткий імпульс випромінювання з неперервного сигналу (**рис. 12**). Ці приклади показують, що існуючі бістабільні пристрої мають характеристики, що годні для багатьох повністю оптичних систем перетворення сигналів. Але все ж таки для практичного використання потрібні ефективні, малогабаритні, більш швидкі, та дешеві пристрої, що працюють при кімнатних температурах.

Використання окремого нелінійного еталону Фабрі-Перо для реалізації різних логічних операцій ілюструється **рис. 13**. На цьому рисунку положення піку пропускання еталону показано при відсутності імпульсу на вході (0), при однократній (1) та двократній дії (2). Ідея полягає в тому, що за двома управляючими логічними імпульсами пропускати через еталон зондуєчий сигнал. Добротність еталону повинна бути високою на довжині хвилі зондування, хоча на довжинах хвиль управління може мати місце сильне поглинання. **Рис. 13** пояснює, яким чином при відповідному початковому розладнанні довжин хвиль зондуєчого випромінювання та піку пропускання еталону можуть бути виконані логічні операції. Тим самим показано, що для оптичних логічних операцій робота бістабільних пристроїв у власно бістабільному режимі не обов'язкова. Експериментальна реалізація логічних операцій АБО-НІ, І-НІ, виключаючи АБО, АБО та І з допомогою еталону з проміжним шаром типу квантової над решітки, що працює при кімнатних температурах, показана на **рис. 14**. Еталон складається з 63 шарів арсеніду галію (*GaAs*) товщиною 76 Å та арсеніду галій алюмінію (*AlGaAs*) товщиною 81 Å, що чередуються між собою та заключені між дзеркалами з коефіцієнтом відбивання $\sim 97\%$. Спостерігаємі відгуки еталону подібні до розрахункових. Для досягнення тактової частоти 82 МГц потрібно суттєве зменшення часу життя носіїв. Відповідні розрахунки показують, що пік пропускання еталону може зміщуватися за час ~ 1 пс, і, отже з такою ж швидкістю можуть реалізуватися логічні операції. Пристрій ще не оптимізовано, і потрібна енергія складає лише 3 пДж.

Лазери можуть бути використані для реалізації оптоелектронних логічних операцій. *GaInAsP* лазер на довжині хвилі 1.3 мкм з використанням додаткового зв'язаного резонатору був використаний для демонстрації повного набору логічних операцій: І. АБО, ВИМИКАЮЧЕ АБО, та ІНВЕРСІЯ. Пристрій генерував оптичні вихідні сигнали при електричних на вході з субпікосекундним часом переключення.

Оптична бістабільність в лазерах.

Бістабільність в пасивних системах і оптична бістабільність в активних системах (лазерах) мають багато спільного: в обох випадках для опису використовують зв'язані рівняння Максвела-Блоха з відповідними граничними умовами, тобто розглядається взаємодія випромінювання з нелінійним середовищем при наявності зворотного зв'язку. Але активні системи надто складні: частота лазера може змінюватися або декілька мод можуть збуджуватися одночасно; для створення інверсії населеності потрібно зовнішнє збудження з використанням складного обладнання.

Бістабільний лазер, що складається з інжекційного лазера з резонатором Фабрі-Перо, контакт у якого, що поблизу p - області розділений на дві електрично ізольовані частини канавкою, яка є паралельною відбиваючим бокам кристалу (**рис. 15**). інверсія утворюється в одній з частин інжекцією струму, а на другу частину подано зміщення з тим, щоби незначна частина струму, що інжектується, стікала через контакт, який діє як нелінійний поглинач. Лазер має два стани вихідного сигналу для одного і того ж самого рівня струму і його можна переключити підходящим струмовим або світловим імпульсом. В системах на основі такої геометрії спостерігалися керована струмом бістабільність та пульсації з контрольованою характеристикою насичення поглинання.

Гистерезис вихідного сигналу спостерігали для різних типів конструкцій лазерів. На **рис. 16** показано гистерезис у $He - Ne$ лазері з нелінійною поглинаючою коміркою, що була розміщена всередині резонатору лазера.

Спостерігалися також гистерезисні явища в лазері, у якому вони були обумовлені інтенсивністю падаючого випромінювання. Була використана гібридна дисперсійна система, яка складалася з лазера на барвнику з накачування Ar лазером. Перестроювання було реалізовано електрооптичним двопроменезаломлюючим селектором. Напруга на селекторі зростає із зростанням інтенсивності лазерного потоку, що відокремлюється у мережу зворотного зв'язку. Спостерігалися також мультістабільність, тобто чисельні стійкі стани, диференціальне підсилення 10^4 , коли пучок $He - Ne$ лазера потужністю 2 мкВт керував вихідним випромінюванням лазера потужністю 20 мВт (при цьому було використано підсилення електричного сигналу в мережі зворотного зв'язку. В деяких

бістабільних лазерах в якості змінної, відгук на яку має гістерезисний характер, також може бути інтенсивність падаючого світла.

Пасивна оптична бістабільність.

Пасивний бістабільний пристрій, який було запропоновано Зайделем, показана на **рис. 17**, та гістерезисна петля (тобто бістабільна крива) показана на **рис. 18**.

Такий пристрій можна використовувати у оптичній пам'яті та оптичних системах обробки даних.

Поглинач, що насичується має коефіцієнт поглинання, який зменшується із збільшенням потужності, яку прикладають. Рівні насичення, при яких спостерігається така залежність, та абсолютні величини змін у коефіцієнті затухання, залежать від матеріалу. Відомо багато підходящих матеріалів і вибір конкретних визначається спектральним інтервалом роботи та доступними значеннями інтенсивності сигналу. Зміни поглинання відбуваються, як правило порівняно плавно. Можливість реалізувати стрибкоподібні зміни поглинання поглинач, що насичується, при поміщенні його у резонатор, впливає з аналізу регенеративного процесу, що відбувається у цьому випадку при насиченні поглинання. Дійсно, незначне збільшення потужності падаючого пучка супроводжується слабким зменшенням внутрірезонаторного поглинання, що у свою чергу робить резонатор спроможним акумулювати велику потужність. Це збільшення внутрірезонаторної потужності ще сильніше насичує поглинач і останній знову спроможний зв'язати більше енергії у резонаторі. Процес відбувається кумулятивно, і у кінцевому рахунку зміна рівня потужності всередині резонатору перевищує первинну слабку зміну вхідної потужності. Таким чином, існує порогов рівень, при якому система стає нестійкою і стрибком переходить у інший стан.

Якщо тепер вхідну потужність зменшити від значення вище P_1 , зміна вихідної потужності по своєму характеру буде відрізнятися від зміни вхідного сигналу. Внаслідок високої інтенсивності поля всередині резонатору насичуючийся поглинач 5 підтримується у просвітленому стані, навіть не дивлячись на то, що вхідна потужність зменшується нижче порогового рівня P_1 . Рівень потужності, що відбивається, невеликий, а потужність потоку, який проходить, відповідно, висока. Цей стан пропускання зберігається до тих пір, доки вхідна потужність не впаде нижче порогового рівня P_3 , при якому внутрірезонаторне поле вже неспроможне підтримувати

поглинач, який насичується, у просвітленому стані. Поглинач переходить у стан сильного поглинання, що призводить до переключення резонатору. В результаті стрибком збільшується потужність відбитого і, відповідно, різко зменшується потужність пучка, що проходить.

Секе з співавторами проаналізували інтерферометр Фабрі-Перо, що заповнений насичуючимся поглиначем, і отримали умову для повної абсорбційної бістабільності $\alpha_0 L / T > 8$, де α_0 - максимальне значення коефіцієнта поглинання, L - довжина еталона, T - коефіцієнт пропускання його дзеркал (детально цей аналіз буде розглянуто у наступній лекції). Вони також сформулювали декілька проблем: вплив стоячих хвиль, генерація послідовності імпульсів при неперервному вхідному сигналі, поперечні взаємодії між сусідніми пучками, що може бути використано для паралельного виконання операцій пам'яті та складання. Для експериментів використовувався одномодовий CO_2 лазер, що генерував лінію 10.6 мкм, і резонатор довжиною 2 см, який був заповненим SF_6 при різних тисках. Спостерігалися незначні зміни пропускання, що підрізало хвіст імпульсу, *але тиск абсорбенту не був настільки високим, щоби досягти бістабільної області*. Насичуючийся резонатор був також використаний в якості пасивного резонаторного затвору, що встановлено замість одного з дзеркал лазера. При достатньо високому рівні інтенсивності всередині резонатору пасивний затвор включався, і формував вихідний імпульс довжиною 50 нс (порівняний з часом кругового обходу резонатору лазера, рівного 35 нс).

Деякі з цих ідей отримали подальший розвиток. На **рис. 19** показано використання двох зв'язаних бістабільних пристроїв для формування оптичного триггеру, що може бути включений у такий ж самий спосіб, що і виключений. Якщо I_z близько, але менше I_\uparrow , еталон 6 первинно виключений. Імпульс $I_{Вкл}$ є таким, що $I_z + I_{Вкл}$ перевищує I_\uparrow , може включити пристрій і він може підтримуватися у включеному стані регулюванням сигналу зворотного зв'язку I_R так, щоби $I_R + I_z$ перевищувало I_\downarrow (при виключеному еталоні 22). Тепер Імпульс $I_{Вимкн}$ може включити еталон 22 на час достатній, щоби перервати I_R і тим самим примусити еталон 6 виключитися. Якщо дзеркало 22 є частково пропускаячим, то частина пучка 7 є вихідним сигналом триггеру. Незважаючи на те, що активне виключення

одиначного бістабільного еталону досягається у спеціальній геометрії у більш простий спосіб, важливим є те, що двохелементні схеми такого типу дозволяють реалізувати швидке оптичне переключення без будь-яких особливих умов.

Перше спостереження оптичної бістабільності (в пасивних системах, тобто заповненими не підсилюючим середовищем) було зроблено в експерименті з використанням парів *Na* між дзеркалами плоско паралельного інтерферометру Фабрі-Перо з базою 11 см. Це перше спостереження оптичної бістабільності було пов'язано з нелінійною рефракцією.

Найпростіша картина дисперсійної оптичної бістабільності полягає в наступному. Оптичний резонатор настроєно таким чином, щоби один з його максимумів був дещо зсунутим відносно частоти лазерного випромінювання, щоби пропускання резонатору при малих вхідних інтенсивностях було мало. При цьому більша частина падаючого випромінювання відбивається. Якщо нелінійний доданок до показника заломлення має знак, що підходить до компенсації початкового відстроювання, то при деякому рівні вхідної інтенсивності інтенсивність всередині резонатору стає достатньою, щоби зсунути пік пропускання у напрямку частоти лазерного випромінювання. Цей власний зворотній зв'язок далі збільшує пропускання резонатору, яке у свою чергу призводить до збільшення фазового зсуву і т.п. (див. **рис. 1**). В результаті пристрій переходить у включений стан, пік пропускання резонатору швидко свіпірує через частоту лазерного випромінювання, поки не настає рівновага, при якій пік, що настроєний по іншій (від початкової) бік відносно частоти випромінювання, стабілізується у цьому новому положенні від'ємним зворотним зв'язком. Подальша зміна вхідної інтенсивності призводить лише до дуже незначним змін вихідної, тобто пристрій функціонує як оптичний обмежувач. (Якщо резонатор має декілька порядків пропускання, то при достатній рівнях вхідної потужності реалізується послідовне включення наступних порядків, тобто мультістабільність). У включеному стані резонатор в результаті багатократної інтерференції має високу добротність, що забезпечує велику густину поля всередині. Якщо вхідна інтенсивність зменшується, це внутрішньо резонаторне поле утримує резонатор у включеному стані при менших рівнях вхідної інтенсивності, ніж ті, що були потрібні для включення пристрою (див. знову **рис. 1**). Такий гістерезисний цикл є прямим наслідком зворотного зв'язку.

Наступна лекція буде присвячена стаціонарним моделям оптичної бістабільності.

Література: 6. Х.Гиббс Оптическая бистабильность (управление светом с помощью света), Москва. «Мир» 1988.