

РОЗДІЛ II

Теоретична фізика

УДК 539.104:537.311.33:621.315.5

П. П. Трохимчук – кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри теоретичної та математичної фізики
Волинського національного університету
імені Лесі Українки

Проблема Хакена в лазерній світловій динаміці та релаксаційна оптика

*Роботу виконано на кафедрі теоретичної
та математичної фізики ВНУ ім. Лесі Українки*

Наведено результати аналізу проблеми зриву лазерної генерації та хаотизації лазерного випромінювання (проблема Хакена) для твердотільних лазерів і показано, що ці явища пов'язані зі структурними незворотними змінами, що відбуваються в активному середовищі та які можна пояснити методами релаксаційної оптики.

Ключові слова: проблема Хакена, зрив лазерної генерації, хаотизація лазерного випромінювання, релаксаційна оптика, підпорогове дефектоутворення, рекристалізація, випромінювальна релаксація, безвипромінювальна релаксація.

Трохимчук П. П. Проблема Хакена в лазерной световой динамике и релаксационная оптика.

Наводятся результаты анализа проблемы срыва лазерной генерации и хаотизации лазерного излучения (проблема Хакена) для твердотельных лазеров и показывается, что эти явления связаны со структурными необратимыми изменениями, которые происходят в активной среде и какие можно объяснить методами релаксационной оптики.

Ключевые слова: проблема Хакена, срыв лазерной генерации, хаотизация лазерного излучения, релаксационная оптика, подпороговое дефектообразование, рекристаллизация, излучательная релаксация, безизлучательная релаксация.

Trokhimchuck P. P. Haken Problem in Laser Light Dynamics and Relaxed Optics. Results over of analysis of problem of blowing off lasing and chaotization of laser radiation (Haken problem) are brought for solid state lasers and it is shown that these phenomena are related to the structural irreversible changes, that take place in a lasant, and can be explained by the methods of Relaxed Optics.

Key words: Haken problem, blowing off lasing, chaotization of laser radiation, Relaxed Optics, undethreshold defectable, recrystallization, radiate relaxation, nonradiative relaxation.

Постановка наукової проблеми та її значення. Проблема надійності роботи твердотільних лазерів, включаючи напівпровідникові, є однією з центральних проблем сучасної фізики лазерів та квантової електроніки [3; 11]. Якщо широко розглядати цю проблему, то вона стосується процесів зміни структури активного лазерного середовища, в тому числі процесів дефектоутворення та рекристалізації, що призводять до зриву генерації та хаотизації лазерного випромінювання. У більш вузькому сенсі це просто зрив генерації та хаотизація лазерного випромінювання за допомогою методів нелінійної динаміки, які явно не враховують структурних змін активного середовища [11]. Ці методи не дають змоги виявити та оцінити мікроскопічні механізми відповідних процесів.

Для системного пояснення процесів незворотної взаємодії оптичного випромінювання з твердими тілами створили новий розділ фізики – релаксаційна оптика [15]. Тому для розв'язку проблеми Хакена доцільно було б застосувати методи, які створенні саме в релаксаційній оптиці. На нашу думку, для пояснення цих явищ з мікроскопічної точки зору найбільш підходить метод поетапного каскадного збудження відповідних хімічних зв'язків опроміненого кристала в режимі

насичення збудження [8; 9; 15]. Особливо ефективний цей метод для пояснення незворотної взаємодії оптичного випромінювання з твердими тілами в області власного поглинання твердого тіла. Тому **мета** цієї роботи – показати, що метод каскадного збудження хімічних зв'язків у режимі насичення збудження є варіантом розв'язку проблеми Хакена з мікроскопічної точки зору.

Виклад основного матеріалу дослідження й обґрунтування отриманих результатів. Слід зазначити, що проблема надійності роботи лазерів існує вже давно, вона виникла майже відразу після того, як з'явилася потреба їх серійного виробництва. Оскільки на початку розвитку квантової електроніки найбільш потужними були рубінові та неодимові лазери, які працюють на домішковому поглинанні, то проблему старіння лазерних кристалів пов'язували з нагрівом. Напівпровідникові лазери в основному працюють в області власного поглинання. Оскільки концентрація домішок, що відповідають за лазерний ефект, у рубінових та неодимових лазерів становить 10^{16} – 10^{18} см⁻³, то ці лазери мають питому потужність значно меншу, ніж напівпровідникові (концентрація центрів випромінювання 10^{21} – 10^{23} см⁻³). Проблема деградації цих лазерів, як правило, пов'язували також із нагрівом. Однак з'ясували, що при збільшенні рівня оптичної накачки в напівпровідникових лазерах зривається генерація, а при подальшому збільшенні рівня оптичної накачки проходить хаотизація лазерного випромінювання, з'являються лінії та смуги випромінювання, які не збігаються з основною лінією випромінювання лазера.

Вперше на цю проблему, виходячи з більш широких фізичних міркувань (не лише термодинамічних), звернув увагу Г. Хакен, який застосував для моделювання цієї проблеми методи нелінійної динаміки та показав принципову можливість її використання для моделювання таких процесів. Тому цілком заслужено цю проблему слід назвати проблемою Хакена.

Однак методи нелінійної динаміки не дають змоги встановити мікроскопічну природу проблеми Хакена. Вони лише дозволяють визначити закономірності появи нелінійних сингулярностей, які можна пов'язати з тим чи іншим процесом.

Подібні проблеми виникають під час створення лазерних технологій модифікації твердого тіла. Однак там акцентують увагу насамперед на фазових структурних перетвореннях, що проходять в опромінену матеріалі [15]. Цілком зрозуміло, що проблема Хакена є проблемою і релаксаційної оптики. Саме з технологічних проблем використання лазерного випромінювання виникла релаксаційна оптика, яка базується на кінетичній класифікації відповідних явищ [15].

Однією з характерних ознак лазерного випромінювання є резонансне насичення збудження відповідних центрів (рівнів) поглинання випромінювання та відповідна випромінювальна резонансна релаксація (це і є, умовно кажучи, лазерний ефект). При лазерному легуванні [8; 9; 15] ми повинні також враховувати насичення збудження, але тут потрібно розглядати умови, які приводять до безвипромінювальної релаксації.

На рисунку 1 наведено результати щодо стійкості утворених дефектів та зв'язаних із ними донорних центрів в антимоніді індію після опромінення наносекундними імпульсами рубінового лазера залежно від густини енергії опромінення [15].

Для пояснення явищ взаємодії імпульсного випромінювання рубінового лазера (тривалість імпульса 20 нс) з антимонідом індію (рис. 1) використано двовимірну ґратку сфалериту [8; 15].

Розроблено модель, що базується на насиченні збудження відповідного типу зв'язків [8; 9; 15].

Так, в антимоніді індію насичення збудження першого зв'язку (ширина забороненої зони) обумовлює інтенсивну люмінесценцію (оптична накачка напівпровідникового лазера) [5; 8], насичення збудження двох зв'язків призводить до максимального дефектоутворення опроміненого шару (це можна сформулювати як критерій підпорогового дефектоутворення для цього режиму опромінення) [8; 15]. При одночасному каскадному збудженні всіх трьох хімічних зв'язків відбувається «гідродинамізація» опроміненого шару: загальна кількість дефектів зменшується, а максимум розподілу переміщується в глибину опроміненого матеріалу [8; 15]. При подальшому збільшенні густини енергії опромінення до 0,22–0,26 Дж/см² в опроміненій області антимоніду індію, окрім сфалериту, виявлено ще структурні фази вюртциту та тригональної сингонії [8; 15]. При збільшенні густини енергії опромінення до 0,3 Дж/см² спостерігаємо видиме руйнування поверхні напівпровідника. Отже, в запропонованій моделі з єдиної точки зору можна описати всю сукупність

процесів (зворотних та незворотних), що проходять при опроміненні антимоніду індію наносекундними імпульсами рубінового лазера.

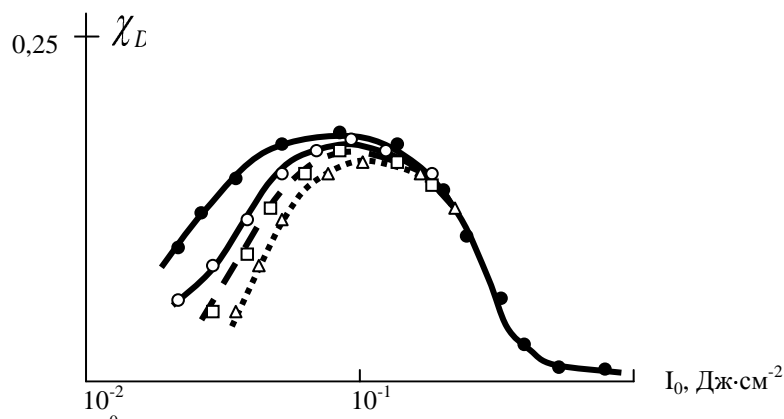


Рис. 1. Динаміка поведінки дефектів в InSb після опромінення імпульсами рубінового лазера: ● – 2–4 год після опромінення; ○ – 48 год після опромінення; □ – тиждень після опромінення; ◆ – два тижні після опромінення

Задовільний збіг експериментальних та теоретичних результатів пояснюється тим, що час життя нерівноважних носіїв в антимоніді індію – $\sim 10^{-7}$ с, а час опромінення – 20 нс [8; 15]. Процеси перевипромінювання характерні лише для насичення збудження першого зв'язку (лазерний ефект) та всіх трьох зв'язків (хаотизація лазерного випромінювання).

При більш довготривалому опроміненні того ж антимоніду індію (значно більшим від часу життя нерівноважних носіїв) процеси перевипромінювання відіграють важливу роль і є визначальними на всіх стадіях взаємодії випромінювання з антимонідом індію. Про співвідношення випромінювальної та безвипромінювальної релаксації можна твердити, зважаючи на експериментальні результати опромінення антимоніду індію одиночними імпульсами рубінового лазера тривалістю 5–6 нс та серіями імпульсів неодимового лазера (тривалість одного імпульсу 10 нс, довжина хвилі 1,06 мкм) [1; 15]. На рисунку 2 наведено профілі розподілу донорних центрів в InSb залежно від режиму опромінення [1; 15].

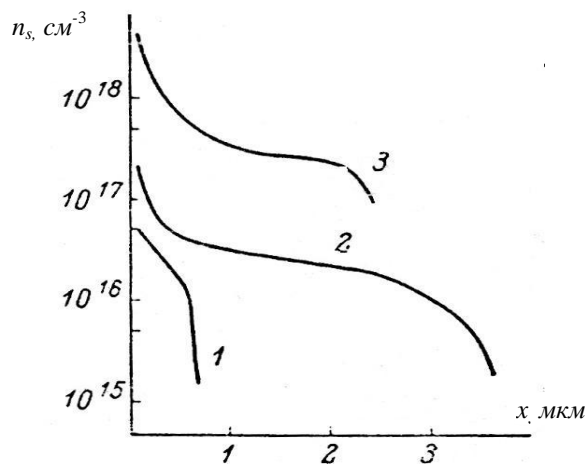


Рис. 2. Профілі об'ємного розподілу електронів після лазерного опромінення. 1, 2 – рубіновий лазер; 3 – YAG:Nd (неодимовий) лазер. Густина енергії в імпульсі, Дж/см²: 1 – 5; 2 – 40

Слід зазначити, що при опроміненні антимоніду індію одиночними імпульсами рубінового лазера тривалістю 20 нс при густині енергії опромінення 0,07–0,1 Дж/см² профілі розподілу донорних центрів збігаються із законом поглинання світла [6; 10; 15] і по нахилу кривих можна

визначити коефіцієнт власного поглинання для випромінювання рубінового лазера. Окрім того, концентрація донорних центрів на 2–4 порядки вища, ніж для результатів наведених на рисунку 2. З форми кривих 2 та 3 рисунку 2 видно, що в приповерхневій області нахил профілів розподілу донорних центрів відповідає власному поглинанню з довжиною хвилі рубінового лазера, а «хвости» профілів – поглинанню випромінювання з довжиною хвилі, що рівна ширині забороненої зони кристала. З огляду на ці міркування, а також на те, що для утворення значно менших незворотних змін в опромінену кристалі густина енергії опромінення мілісекундними імпульсами від 40 до 500 разів більша, ніж при опроміненні наносекундними імпульсами, можна зробити припущення, що при мілісекундному режимі опромінення, крім процесів утворення донорних центрів, відбуваються процеси перевипромінювання і основна частина енергії опромінення витрачається на оптичну «рубінову» накачку лазерного випромінювання з довжиною хвилі, що дорівнює ширині забороненої зони кристала. Цей ефект ще відомий із нелінійної оптики як ефект дроблення кванта випромінювання, в цьому випадку число дроблення рівне
$$\frac{h\nu_{\text{Ruby laser}}}{h\nu_{\text{Band gap}}} = 1,78eV / 0,18eV \cong 10.$$

Відповідно до проблеми Хакена при опроміненні антимоніду індію мілісекундними імпульсами проходить частковий зрив лазерної генерації, що призводить до появи донорних центрів. При цьому значну роль в утворенні донорних центрів, на відміну від моноімпульсного наносекундного режиму опромінення в області «хвостів» кривих 2 та 3 рисунку 2, відіграють процеси багатofотонного поглинання (10–11 фотонів) випромінювання з енергією кванта, що рівна ширині забороненої зони кристала. Такий ефект можна розглядати і як новий ефект підпорогового дефектоутворення [2; 4].

Цей підхід був використаний і для оцінки процесів незворотної взаємодії з кремнієм та германієм [9; 15]. Як відомо, кремній має чотири кристалографічні модифікації з координаційними числами 8, 6, 4 та 3 (рис. 3) [13; 14]. На відміну від антимоніду індію, Si та Ge – непрямоzonні кристали, тому енергія мінімального хімічного зв'язку не збігається з шириною забороненої зони кристала. Перехід між структурами з різними координаційними числами (від більших до менших) визначали з урахуванням розриву відповідного числа зв'язків, що відповідає зміні координаційного числа. Це дає змогу передбачити отримання різних кристалографічних модифікацій кремнію та германію з кристалографічної модифікації алмазу.

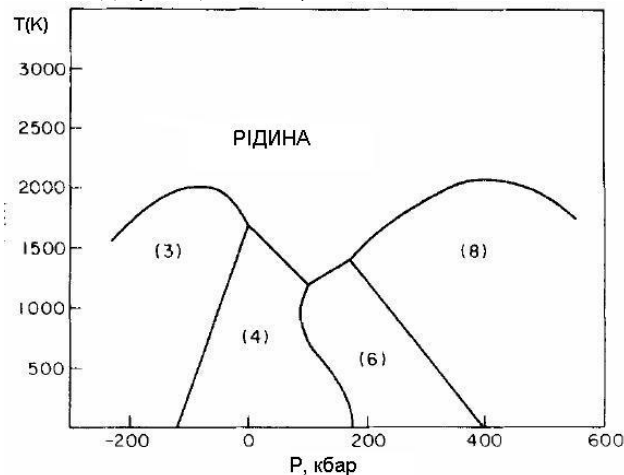


Рис. 3. Схематична фазова діаграма Si(CN). Вказано координаційні числа (CN) різних фаз [8; 9]

При опроміненні ж аморфного кремнію та германію випромінюванням, що не «руйнує» кристалічних зв'язків, ми можемо отримати різні кристалографічні модифікації цих матеріалів (залежно від інтенсивності опромінення), що підтверджується експериментом. Слід зазначити, що коефіцієнт поглинання аморфного кремнію при опроміненні неодимовим лазером на 3–4 порядки більший, ніж для кристалічного кремнію [5].

Доцільно також було б дослідити тут і процеси випромінювальної релаксації, які мали б приводити до лазерного ефекту, коли число збуджених зв'язків менше принаймні на одиницю від того числа, що необхідне для переходу від однієї кристалографічної модифікації до іншої при опроміненні кристалів та до хаотизації лазерного випромінювання при опроміненні аморфних кремнію та германію.

Слід зазначити, що при лазерному опроміненні кристалів ми повинні враховувати й часові режими опромінення, а також те, що при опроміненні іонно-імплантованих шарів антимоніду індію, КРТ, $Pb_xSn_{1-x}Te$ імпульсами рубінового лазера можливі як ефекти перевипромінювання від 10 до кількохсот, так і додаткове лазерно-індуковане дефектоутворення, що не призводить до активації імплантованої домішки, це підтверджується експериментальними даними [15]. Опромінення іонно-імплантованих шарів кремнію цими ж лазерами призводить і до відновлення кристалічної структури, і до активації впровадженої домішки. Причому ефект не залежить від часового режиму опромінення.

Наведені методи моделювання з успіхом можна використати для опису оптичних явищ у фоторефрактивних середовищах [7], діелектриках [12], а також при розрахунку надійності роботи елементів оптоелектронних систем [16].

Отже, при розгляді проблеми Хакена для напівпровідників ми повинні використовувати кристалохімічні представлення, тому що в цьому разі ми маємо справу з процесами фазових змін та трансформацій опроміненого матеріалу. Тому методи релаксаційної оптики з успіхом використовують для розв'язку проблеми Хакена.

Висновки.

1. Сформульовано проблему Хакена для лазерної світлодинаміки.
2. Проаналізовано проблему Хакена для твердотільних, в т.ч. напівпровідникових, лазерів.
3. Наведено результати моделювання процесів незворотної взаємодії лазерного випромінювання з напівпровідниками (антимонід індію, кремнію, германію, КРТ та $Pb_xSn_{1-x}Te$) методами релаксаційної оптики (метод каскадного збудження хімічних зв'язків у режимі насичення).
4. Показано, що методи нелінійної динаміки, які використовують для опису цієї проблеми, не дають змоги описати мікроскопічні механізми цих явищ.
5. Показано, що для опису мікроскопічних механізмів проблеми Хакена для твердотільних лазерів доцільно використовувати метод каскадного збудження хімічних зв'язків у режимі насичення.

Список використаної літератури

1. Богатырев В. А. Получение низкоомных p-слоев на антимониде индия после лазерного облучения / В. А. Богатырев, Г. А. Качурин // Физика и техника полупроводников. – 1977. – Т.11. – №1. – С.100–102.
2. Вавилов В. С. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках / В. С. Вавилов, А. Е. Кив, О. Р. Ниязова. – М. : Наука, 1981. – 388 с.
3. Грибковский В. П. Полупроводниковые лазеры / В. П. Грибковский. – Минск : Университетское, 1988. – 312 с.
4. Джафаров Т. Д. Фотостимулированные атомные процессы в полупроводниках. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.
5. Коротеев Н. И. Физика мощного лазерного излучения / Н. И. Коротеев, И. Л. Шумай. – М. : Наука, 1991. – 312 с.
6. Лазерный отжиг полупроводниковых соединений элементов $A_{III}B_V$ / Л. Н. Курбатов и др. // ДАН СССР. – 1983. – Т. 268. – Вып. 3. – С. 594–597.
7. Милославский В. К. Нелинейная оптика / В. К. Милославский. – Харьков : Изд-во ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. – 312 с.
8. Трохимчук П. П. Проблема насиченості збудження в квантовій електроніці та релаксаційній оптиці / П. П. Трохимчук // Вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. – 2010. – №18. – С. 72–82.
9. Трохимчук П. П. Проблема насиченості збудження в квантовій електроніці та релаксаційній оптиці. Структурний підхід / П. П. Трохимчук // Вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. – 2010. – № 29. – С. 56–60.
10. Трохимчук П. П. Радіаційна фізика твердого тіла. – Луцьк : РВВ «Вежа» Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки, 2007. – 394 с.
11. Хакен Г. Лазерная светодинамика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1988. – 350 с.
12. Boyd R. W. Nonlinear optics / Boyd R. W. – Amsterdam a.o. : Academic Press, 2003. – 578 p.
13. Philips J. C. Metastable honeycomb model of laser annealing / J. C. Philips // Journal of Applied Physics. – 1981. – No.12. – Vol. 52. – P. 7397–7402.
14. Pistorius C.W.F.T. Phase relations and structures of solids at high pressures / C.W.F.T. Pistorius // Progress in Solid State Chemistry. – 1976. – Vol. 11. – No.1. – P. 1–151.
15. Trokhimchuck P. P. Foundations of Relaxed Optics / P. P. Trokhimchuck. – Lutsk : Editorial department, 2011. – 627 p.
16. Ziętek B. Optoelektronika / Ziętek B. – Toruń : Wydawnictwo uniwersytetu Nikolaja Kopernika, 2005. – 615 s.

Статтю подано до редколегії
12.05.2011 р.