



УКРАЇНА

(19) UA (11) 35809 (13) A

(51) 6 H01S3/025, 3/085

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ЛАЗЕР ЗІ ЗМІННОЮ ДОВЖИНОЮ ХВИЛІ ВИПРОМІНЮВАННЯ СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

(21) 98105519

(22) 20.10.1998

(24) 16.04.2001

(33) UA

(46) 16.04.2001, Бюл. № 3, 2001 р.

(72) Васько Федір Трохимович, Венгер Евген Федорович, Гасан-Заде Салім Гюльзаєвич, Старий Сергій Васильович, Стріха Максим Віталійович, Шепельський Георгій Анатолійович

(73) Інститут фізики напівпровідників Національної академії наук України

(57) Напівпровідниковий лазер зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону, активний елемент якого є одночасно резонатором і являє собою напівпровідниковий монокристал з паралельними робочими поверхнями та омичними контактами, який відрізняється тим, що активний елемент виконано з монокристалу безщільного напівпровідника у формі прямокутного паралелепіпеда, до якого за допомогою пуансонів накладається одновісний пружний стиск, при цьому певному значенню стиску відповідає визначена довжина хвилі випромінювання.

Винахід відноситься до напівпровідникових лазерних приладів і може бути застосований як джерело лазерного випромінювання субміліметрового діапазону як в експериментальній фізиці, так і в вимірювальній техніці. Значний спектральний діапазон випромінювання пропонованого лазера дозволяє замінювати декілька випромінювачів з фіксованими довжинами хвилі або вузькими спектральними діапазонами, які використовуються в субміліметровій спектроскопії напівпровідникових матеріалів для виявлення наявності та аналізу домішок, а також в газовому аналізі.

Відомі напівпровідникові лазери, які працюють в різних ділянках субміліметрового діапазону випромінювання (цей діапазон інколи ще називають в літературі далеким інфрачервоним - ДІЧ або терагерцовим - THz). Активний елемент таких лазерів, звісно ж, виконано з напівпровідника і він може одночасно бути й оптичним резонатором, або розташовуватись в зовнішньому резонаторі. Остання конструкція вкрай рідко застосовується на практиці. Під дією зовнішніх сил (наприклад, магнітного поля) енергетична структура матеріалу активного елемента змінюється таким чином, що найбільш вірогідними стають рекомбінаційні випромінювальні переходи з вищих енергетичних рівнів на нижчі, а потім або одночасно певним збудженням створюється інвертований розподіл вільних носіїв струму між енергетичними рівнями. Стимульоване лазерне випромінювання має пороговий характер і виникає тоді, коли інтенсивність випромінювальних переходів перевищить витрати на поглинання в об'ємі активного елемента. Напів-

провідникові лазери відрізняються лише за фізичними принципами створення інвертованого стану в напівпровідникових активних елементах (від'ємні маси, циклотронний резонанс, електропольове та оптичне збудження та ін.) і основними механізмами випромінювальної рекомбінації носіїв (переходи на мілкі домішки, циклотронне та гальмове випромінювання, міжпідзонні переходи та ін.). Останнім часом в субміліметрових лазерах найчастіше використовують інвертований розподіл гарячих носіїв в об'ємі напівпровідника (див.: Андронов Л.А. Горячие электроны в полупроводниках и субмиллиметровые волны // ФТП. - 1987. - Т. 21. - Вып. 7. - С. 1153-1187). Найпоширенішим напівпровідниковим матеріалом для активних елементів субміліметрових лазерів є монокристали германію - Ge р-типу провідності (див.: Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Стафеев В.И. Длинноволновое стимулированное излучение из дырочного германия в ЕЛН полях // ФТП. - 1987. - Т. 21. - Вып. 7. - С. 1271-1277; Иванов Ю.Л., Васильев Ю.Б. Субмиллиметровое излучение горячих дырок германия в поперечном магнитном поле // Письма ЖТФ, 1983. - Т. 9. - Вып. 10. - С. 617-620). В обох цих субміліметрових лазерах активний елемент є одночасно й резонатором і розташований всередині напівпровідного соленоїду, тобто в сильному магнітному полі. Але якщо в першому випадку випромінювання отримується за рахунок випромінювальних переходів між підзонами валентної зони р-Ge, то в другому завдяки переходам між квантовими рівнями Ландау, які утворено сильним магнітним полем. Інвертований стан в обох випадках створю-

ється електропольовим збудженням. Треба зазначити, що всі існуючі напівпровідникові лазери субміліметрового діапазону працюють в імпульсному режимі і при низьких температурах (найчастіше при температурі рідкого гелію).

Найближчим за технічним рішенням до пропонуваного є напівпровідниковий лазер зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону, активний елемент якого є одночасно оптичним резонатором і являє собою напівпровідниковий монокристал германію (Ge р-типу) з паралельними робочими поверхнями і омичними контактами, які нанесені на нього і використовуються для подавання імпульсів електричного струму, що забезпечують електропольове збудження і інвертований розподіл гарячих носіїв струму (див.: Gornik. E., Rosskopf V., W. Heiss V. Tunable Lasers and Detectors in the FIR, Infrared Phys. Technol., 1995, v. 36, n. 1, pp. 113-122). В цьому лазері активний елемент розташований в магнітному полі надпровідного соленоїда, а випромінювальні рекомбінаційні переходи відбуваються між квантовими рівнями Ландау, які утворені магнітним полем соленоїда. Технічні характеристики цього лазера: активний елемент - Ge р-типу з концентрацією акцепторів $N_A = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ і розмірами $5 \times 7 \times 25 \text{ мм}^3$ розташований в надпровідному соленоїді з напруженістю магнітного поля $H \leq 45 \text{ кЕ}$; робоча температура $4,2 \text{ К}$; інвертований стан гарячих електронів забезпечується електричними імпульсами напругою $U \leq 10000 \text{ В}$ з тривалістю $\leq 1 \text{ мкс}$ і частотою повторення приблизно 3 Гц , при цьому в об'ємі активного елемента виникає електричне поле напруженості $E \leq 3500 \text{ В/см}$; спектральний діапазон випромінювання $120\text{-}150 \text{ мкм}$; потужність випромінювання в імпульсі $P \approx 100 \text{ мВт}$.

Цьому лазеру притаманні такі ж самі головні недоліки, що і всім відомим напівпровідниковим лазерам субміліметрового діапазону, а саме:

активний елемент має відносно великі розміри (об'єм становить $200\text{-}1000 \text{ мм}^3$), що накладає додаткові більш жорсткі вимоги до напівпровідникового матеріалу;

для необхідної перебудови енергетичного спектру, на основі якого може бути створений інвертований стан носіїв заряду, активний елемент треба розташовувати в достатньо сильному магнітному полі з напруженістю до 45 кЕ . Такі магнітні поля досягаються лише в надпровідних соленоїдах, які мають значні розміри і потребують потужних джерел струму (до $20\text{-}30 \text{ А}$), до того ж, ці джерела повинні бути стабільними за часом;

для електропольового збудження і розігріву носіїв застосовуються високовольтні електричні імпульси напругою до 10000 В , які можуть забезпечувати в об'ємі активного елемента електричні поля напруженості до 3500 В/см . Створення таких імпульсів потребує спеціальних потужних генераторів. Крім того, для забезпечення технічної безпеки як самих пристроїв так і технічного персоналу необхідно застосовувати запобіжні заходи безпеки (підсилювати надійність електричної ізоляції, збільшувати відстані і т.ін.);

наявність значних імпульсів струму в об'ємі активного елемента лазера. потребує також застосування суттєвого екранування, щоб запобігти

електромагнітним "наведенням" на досліджуваному об'єкті;

значні розміри надпровідного соленоїда та наявність сильного магнітного поля, а також великі імпульсні електричні поля в об'ємі напівпровідникового активного елементу не дозволяють розташовувати досліджуваний об'єкт понизу випромінювача, тобто потребують значних відстаней або складної каналізації випромінювання, останнє, як відомо, суттєво (на $1\text{-}2$ порядки) послаблює потужність випромінювання. Натомість при дослідженні напівпровідникових матеріалів для виявлення наявності домішок і їх аналізу зручно розташовувати зразок, що досліджується, поблизу джерела випромінювання, оскільки такі дослідження також виконують при низьких температурах (коли домішки не іонізовані).

В основу винаходу поставлено завдання створити напівпровідниковий лазер зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону шляхом виготовлення його активного елемента з безщільного напівпровідника у формі прямокутного паралелепіпеда та накладання на нього одновісного пружного стиску за допомогою пуансонів, забезпечити розширення спектрального діапазону випромінювання, зменшення розмірів активного елемента, суттєве спрощення конструкції і зменшення енергоспоживання з одночасним підвищенням рівня технічної безпеки його застосування.

Зазначена задача вирішується тим, що напівпровідниковий лазер зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону вміщує активний елемент, який є одночасно оптичним резонатором і виконаний з монокристалу безщільного напівпровідника у формі прямокутного паралелепіпеда і до нього за допомогою спеціальних пуансонів накладається одновісний пружний стиск, при цьому, певному значенню стиску відповідає визначена довжина хвилі випромінювання.

Пропонована конструкція напівпровідникового лазера зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону дозволяє значно розширити спектральний діапазон випромінювання, зменшити розміри активного елемента і, тим самим, послабити вимоги до застосованого напівпровідникового матеріалу, суттєво спростити конструкцію і зменшити енергоспоживання за рахунок: повної відмови від магнітного поля і тим самим від надпровідного соленоїда та заміни спеціального потужного генератора високовольтних імпульсів на звичайний серійний генератор, оскільки потребує застосування імпульсів менших за напругою на 2 порядки, що одночасно підвищує рівень технічної безпеки застосування лазера.

Напівпровідниковий лазер зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону, що пропонується, ілюструється кресленням. На фігурі схематично зображено конструкцію напівпровідникового лазера зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону, що вміщує активний елемент 1, який виконано з монокристалу безщільного напівпровідника у формі прямокутного паралелепіпеда та має омичні кільцеві контакти 2. За допомогою пуансонів 3, що складаються з плоскопаралельних пластин із відпаленої міді 4 та сапфіру 5, до активного елемента

1 накладається одновісний пружний стиск P . Електричні імпульси подаються на контакти 2 від звичайного стандартного генератора 6.

Пропонований напівпровідниковий лазер зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону функціонує наступним чином. Одновісний пружний стиск P за допомогою пуансонів 3, що складаються з мідних 4 та сапфірових 5 пластин, накладається до активного елементу 1, що виконано з безщілинного напівпровідника, і докорінно змінює його енергетичну структуру та притаманні йому власні механізми рекомбінації, при цьому значно зростає вірогідність випромінювальних рекомбінаційних переходів. Через омичні контакти 2 до активного елементу і подаються від стандартного генератора 6 імпульси струму, що утворюють в об'ємі активного елементу електричне поле E (електропольове збудження) і, врешті-решт, забезпечують розігрів носіїв та їх інвертований розподіл. Активний елемент 1 виконано у формі прямокутного паралелепіпеда і він є широкополосним резонатором для електромагнітних хвиль субміліметрового діапазону. Починаючи з деяких значень P і E , коли інтенсивність випромінювальних рекомбінаційних переходів перевищить витрати на поглинання в об'ємі активного елементу, виникає стимульоване випромінювання субміліметрового діапазону і при подальшому підвищенні стиску змінюється довжина хвилі випромінювання, при цьому певному значенню стиску відповідає визначена довжина хвилі випромінювання, а його потужність практично не змінюється.

Даний напівпровідниковий лазер зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону має такі переваги порівняно з аналогами та прототипом: розширюється спектральний діапазон випромінювання; значно зменшується об'єм активного елементу; підвищується надійність пристрою за рахунок суттєвого спрощення конструкції (відсутність надпровідного магніту, який є достатньо технічно складним пристроєм з суттєвими розмірами); немає потреби в спеціальному потужно-

му високовольтному імпульсному генераторі; зменшується питоме енергоспоживання, тому що не потрібні потужні джерела живлення для надпровідного магніту та генератора; підвищується безпечність технічної експлуатації пристрою - лазера; є змога розташовувати досліджуваний об'єкт поблизу (на відстані декількох мм) випромінювача, тому що відсутнє сильне магнітне поле і застосовано значно менші за напругою (на 2 порядки) електричні імпульси; відпадає потреба в застосуванні складних заходів для екранування досліджуваного об'єкту від електромагнітних "наведень".

Винахід ілюструється прикладами.

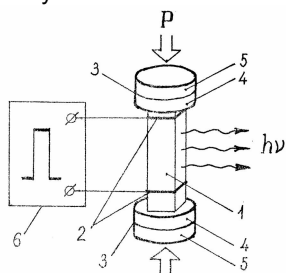
Приклад 1. Напівпровідниковий лазер зі змінною довжиною хвилі випромінювання субміліметрового діапазону, активний елемент якого виконано з монокристалу безщілинного напівпровідника $Cd_xHg_{1-x}Te$ (із складом $x=0,14$ та $N_A-N_D=1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) у формі прямокутного паралелепіпеда з розмірами $0,8 \times 0,8 \times 9,0 \text{ мм}^3$ (об'єм приблизно 7 мм^3). Паралельність граней не гірше $1,5'$. Активний елемент має кільцеві омичні контакти, що нанесені по периметру вузького перерізу на відстані 7 мм . Через електричні контакти від стандартного генератора надходять імпульси напругою $U \leq 40$ в з тривалістю ≤ 1 мкс та частотою повторення ≤ 3 Гц, які і забезпечують в активному об'ємі електричне поле напруженістю $E \approx 60 \text{ В/см}$. Вздовж довгої грані до активного елементу прикладається одновісний пружний стиск $P \leq 3,5$ кбар.

Робоча температура $4,2 \text{ К}$.

Потужність випромінювання в імпульси $P \approx 200 \text{ мВт}$.

Спектральний діапазон випромінювання $70\text{--}150 \text{ мкм}$.

Приклад 2. Матеріал активного елементу $Cd_xHg_{1-x}Te$ з $x=0,12$ та $N_A-N_D=1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Розміри $0,7 \times 0,8 \times 6,0 \text{ мм}^3$. Відстань між контактами приблизно 6 мм . Паралельність граней не гірше $30'$. Потужність випромінювання в імпульси $P \approx 450 \text{ мВт}$. Інші параметри такі ж, як і в прикладі 1.



Фіг.

ДП "Український інститут промислової власності" (Укрпатент)
Україна, 01133, Київ-133, бульв. Лесі Українки, 26
(044) 295-81-42, 295-61-97

Підписано до друку _____ 2001 р. Формат 60x84 1/8.
Обсяг _____ обл.-вид. арк. Тираж 50 прим. Зам. _____

УкрІНТЕІ, 03680, Київ-39 МСП, вул. Горького, 180.
(044) 268-25-22