

УДК 621.375.826

С.В. Манжеліївський

Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В МАШИНОБУДУВАННІ

Розглянуто класифікацію джерел лазерного випромінювання в залежності від типу активного середовища. Наведено основні сфери застосування та параметри найбільш розповсюджених типів технологічних лазерів.

Ключові слова: технологічні лазери, лазерне випромінювання, світловий потік, довжина хвилі, розбіжність лазерного випромінювання.

Рассмотрена классификация источников лазерного излучения в зависимости от типа активной среды. Приведены основные области применения и параметры наиболее распространенных типов технологических лазеров.

Ключевые слова: технологические лазеры, лазерное излучение, световой поток, длина волны, расходимость лазерного излучения.

Reviewed classification sources laser radiation, depending on the type active environment. Describes the main areas of application and settings the most common types of material-working laser.

Keywords: material-working lasers, laser emission, luminous flux, wavelength, laser beam intensity divergence angle.

Джерела лазерного випромінювання в наш час знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості, медицині, екології, сільському господарстві, наукових та космічних дослідженнях. В машинобудуванні промислова обробка матеріалів стала однією зі сфер найбільш широкого застосування лазерів, особливо після появи джерел випромінювання високої потужності. Використання лазерного випромінювання найбільш продуктивне у разі обробки матеріалів, які погано піддаються традиційним видам обробки (тугоплавкі, тверді, крихкі, хімічно активні, різнорідні та інші), а також обробки

© С.В. Манжеліївський, 2014

зразків у важкодоступних місцях, у випадку складних і прецизійних формах швів, перерізів. Окрім цього лазери використовуються при зварюванні, термообробці поверхонь, обробці тонких металевих і неметалевих плівок під час виготовлення інтегральних схем, у діагностиці.

Для захисту від лазерного випромінювання в промисловості застосовують металеві та азбестові листи, кам'яні або цегляні стінки. У зв'язку зі збільшенням потужності лазерних технологічних комплексів такі захисні споруди не завжди здатні забезпечити відповідний рівень безпеки на

підприємстві, що спричиняє проблему пошуку більш ефективних засобів захисту. З метою вирішення цього питання перед усім необхідно визначитись з характеристиками джерел лазерного випромінювання, які застосовуються в промисловості, та особливостями їх випромінювання, чому й присвячена дана стаття.

Характеристики лазерного випромінювання насамперед залежать від джерела, а саме – від активного середовища, в якому генерується промінь. Різноманітність властивостей активних речовин призводить до великої кількості ймовірних механізмів отримання інверсії заселеності та вимагає різноманітних способів збудження активного середовища.

Залежно від типу активного середовища лазери можна розподілити на газові, рідинні, твердотілі та напівпровідникові (формально вони теж є твердотілими, проте традиційно їх вирізняють в окрему групу, оскільки вони мають інший механізм накачки) [1, 2]. Розглянемо детальніше цю класифікацію.

1. Газові лазери

Газові лазери, в яких у якості активного середовища використовуються газоподібні речовини, мають низку особливостей. Ці середовища прозорі в широкому спектральному діапазоні, тому можлива генерація лазерного випромінювання від вакуумної ультрафіолетової зони до далекої інфрачервоної зони спектра. Оскільки гази у порівнянні з конденсованими середовищами більш однорідні, це дозволяє легше досягати дифракційну межу розбіжності. Розширення спектральних ліній у газах при малій щільності визначається головним чином доплеровським розширенням, що забезпечує меншу ширину лінії, ніж у конденсованих середовищах, внаслідок чого, газові лазери мають підвищену монохроматичність і направленість випромінювання. Крім того, в цих лазерах об'єм активної речовини можливо збільшити, оскільки в них легко забезпечити відведення тепла шляхом видалення гарячого газу із зони взаємодії, внаслідок чого, може бути отримана висока потужність.

Найбільш поширеним методом створення інверсивної заселеності є газорозрядний. Він використовується для отримання як безперервної, так і імпульсної генерації. Електричний розряд може бути як самостійним, так і несамоствійним (наприклад, з передіонізацією ультрафіолетовим випромінюванням, рентгенівським випромінюванням, електронним пучком тощо).

Для отримання великих вихідних потужностей використовують газодинамічний метод накачки, за якого інверсія заселеності створюється в системі коливальних рівнів енергії молекул газу шляхом адіабатичного охолодження нагрітих газових мас, що рухаються з надзвуковою швидкістю (крізь надзвукове сопло). При хімічному збудженні інверсія заселеності виникає в наслідок хімічних реакцій, при яких виникають збуджені атоми, молекули, радикали. Можливе також сполучення хімічного та газодинамічного методів збудження. Одним з різновидів хімічного збудження є фотодисоційний спосіб накачки.

Оптична накачка в газових лазерах може бути ефективною, за умови монохроматичного джерела оптичного випромінювання. Ця вимога зумовлена малою щільністю газоподібних активних середовищ та вузькістю їх резонансних ліній поглинання.

Газові лазери, в свою чергу, у залежності від складу та властивостей активного середовища можна розподілити наступним чином:

1. Лазери на нейтральних атомах (атомарні лазери).

Активним середовищем атомарних лазерів є інертні гази та їх суміші (характерний представник – He-Ne-лазер), а також пари деяких металів (лазери на парах Cu, Au, Pb тощо). Спосіб збудження газорозрядний. За структурою лазерних рівнів атомарні лазери на парах металів також називаються лазерами на самообмежених переходах.

2. Іонні лазери.

В іонних лазерах лазерна генерація виникає на переходах між енергетичними рівнями одно- або багаторазово заряджених іонів інертних газів (характерний представник – Ar^+ -лазер) або металів (характерний представник – He-Cd-лазер).

3. Молекулярні лазери.

До молекулярних лазерів належать лазери, активним середовищем яких є молекулярні гази. В молекулах генерація може здійснюватися на електронно-коливальних переходах поміж різними електронними станами (наприклад, N_2 -лазер, ексимерні лазери), на коливально-обертальних переходах у межах одного електронного стану (CO_2 -, CO-лазери) та на обертальних переходах одного й того ж коливального стану (наприклад, H_2O -, HCN-, CH_3OH -лазери).

Ексимерні лазери, що є різновидом молекулярних, широко застосовують у виробництві напівпровідників. Основу активного середовища цих лазерів складають ексимери – молекули-дімери (ArF , KrF , $XeCl$ та інші), стійкі тільки у збудженому електронному стані. Накачка ексимерних лазерів може здійснюватися також електронним або протонним пучками, а передіонізація – електронним пучком, ультрафіолетовим або рентгенівським випромінюванням.

Газорозрядні CO_2 -лазери – це клас лазерів, які відрізняються поміж собою за способом прокачування, збудження та охолодження робочої суміші [3]:

– CO_2 -лазери з дифузійним охолодженням робочої суміші (з повільним повздовжнім прокачуванням);

– CO_2 -лазери з конвективним охолодженням робочої суміші (із швидким повздовжнім або поперечним прокачуванням);

– імпульсні електророзрядні CO_2 -лазери, до них відносять лазери типу лазерів з дифузійним охолодженням, але з імпульсним джерелом живлення, лазери атмосферного тиску з поперечним розрядом – ТЕА-лазери (від англ. Transversely Excited Atmospheric), імпульсно-періодичні лазери;

– газодинамічні CO_2 -лазери;

– хвилевидні CO_2 -лазери з високочастотним збудженням.

У деяких типах CO_2 -лазерів може застосовуватися накачка електронним пучком, а також передіонізація ультрафіолетовим випромінюванням.

До молекулярних лазерів на коливально-обертальних переходах відносяться й хімічні лазери (HF-, DF-, HCl-, CO-, CO₂- та інші).

У лазерах на обертальних переходах молекул отримати інверсію населеностей за допомогою електричного розряду важко. Тому накачка зазвичай здійснюється селективно монохроматичним лазерним випромінюванням [2].

II. Твердотілі лазери

Активним середовищем твердотілих лазерів є кристалічні або аморфні речовини, в матриці яких рівномірно розподілені іони домішкових елементів: перехідних металів, рідкоземельних елементів, актинідів. На переходах між енергетичними рівнями цих іонів і виникає лазерна генерація. В таких лазерах застосовується оптична накачка. Кристалічні та аморфні матриці повинні бути прозорими для випромінювання, мати високу механічну та фотохімічну стійкість та хорошу теплопровідність. Найбільш поширеними серед твердотілих лазерів є лазери на іттрієво-алюмінієвому гранаті Y₃Al₅O₁₂, активованим неодимом Nd³⁺ (Nd:YAG-лазери). До твердотілих лазерів відносяться також лазери на центрах фарбування (F-центрах), наприклад, в кристалах LiF. Найбільш перспективним є лазер на олександриті (Cr³⁺: BeAl₂O₄) [2, 4].

III. Рідинні лазери

Активним середовищем рідинних лазерів зазвичай є розчини органічних барвників у воді, метиловому або етиловому спиртах, толуолі, бензолі та інших розчинниках, а також металоорганічні або неорганічні рідини, активовані іонами рідкоземельних елементів. Ці лазери поєднують в собі властивості твердотілих і газових лазерів: велика концентрація активних часток, висока оптична однорідність, відведення тепла за рахунок циркуляції робочої рідини. Основною їх перевагою є можливість плавної перебудови довжини хвилі генерації в достатньо широкому діапазоні спектра. Накачка лазерів на барвниках – оптична (лампова або лазерна з використанням випромінювання азотних, ексимерних, аргонових та інших лазерів, а також різних гармонік випромінювання Nd:YAG-лазерів) [2].

IV. Напівпровідникові лазери

Інверсія заселеності у напівпровідникових лазерах створюється на переходах між станами в електронних енергетичних зонах напівпровідникового кристала, а не між дискретними рівнями енергії. Ці енергетичні зони виникають внаслідок розщеплення рівнів енергії валентних електронів атомів, що є складовими кристалічної решітки, в сильному просторово-періодичному внутрішньокристалічному полі власних атомів кристала.

Основним способом накачки в напівпровідникових лазерах є інжекція через *p-n*-перехід або гетероперехід, яка дозволяє здійснити безпосередньо перетворення електричної енергії у лазерне випромінювання (інжекційний лазер). Іншими способами накачки служить електричне пробиття (стрімерні лазери), електронна накачка, оптична накачка.

Характерними особливостями напівпровідникових лазерів є компактність, високий коефіцієнт корисної дії, широкий діапазон довжин хвиль генерації, плавна перебудова довжини хвилі генерації, мало інерційність, простота конструкції [2].

У сучасному машинобудуванні лазери знайшли своє застосування у промисловій обробці матеріалів, мікроелектроніці та діагностиці. Типи технологічних лазерів, які в найбільшій мірі задовольняють вимогам, що ставляться в процесі здійсненні лазерної обробки, та умовам промислової експлуатації перш за все за рівнем потужності випромінювання, оптичної якості лазерного пучка, ресурсу роботи, а також економічності виготовлення наведені нижче.

Під час промислової обробки матеріалів для різання, зварювання та паяння, термообробки застосовують газорозрядні CO₂-лазери та твердотілі Nd:YAG-лазери безперервної дії; для отримання отворів – імпульсні або імпульсно-періодичні CO₂-лазери та імпульсні твердотілі Nd:YAG-лазери; для маркування – газорозрядні CO₂-лазери, твердотілі Nd:YAG-лазери, а також різноманітні іонні та молекулярні ексимерні лазери [5-7].

Таблиця 1

Основні параметри найбільш розповсюджених типів технологічних лазерів з безперервним режимом генерації [1, 2]

Тип лазера		Активне середовище	λ , мкм	θ , мрад	P , Вт
Газові лазери					
Атомарний	–	He–Ne	0,543	~0,9	$2 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$
			0,633	0,3÷4,0	до $5 \cdot 10^{-2}$
			1,150	0,6÷1,2	0,001÷0,015
			1,523	0,6÷2,2	0,008÷0,015
			3,390	0,9÷2,8	0,001÷0,022
Іонний	На іонах інертних газів	Ar ⁺	0,33÷0,53	0,4÷3,0	0,01÷20
		Kr ⁺	0,35÷0,68	0,5÷1,2	0,15÷6
	На іонах металів	He–Cd	0,325	0,5÷3,0	0,001÷0,012
			0,442	0,5÷3,0	0,003÷0,08
Молекулярний	–	CO ₂	3,5	–	<10
			9 ÷ 11	0,5÷10,0	1÷150
			10,6	1,0÷25,0	3÷15000
		CO	5÷6,5	3,0÷8,0	2÷20
Твердотілі лазери					
–	–	Nd:YAG	1,06	1,3÷30,0	0,001÷1200
		Nd:YAG (2 ω)	0,53	1,0÷5,0	0,05÷4
		Nd:YAG (3 ω)	0,355	0,2÷1,2	0,075
		F-центри	1,45÷1,56	1,5÷2,5	~0,1
			2,3÷3,45	1,5÷2,5	0,001÷0,15

Рідинні лазери					
–	На барвниках	Різноманітні барвники	0,29÷1	–	0,01÷6
Напівпровідникові лазери					
–	–	GaAlAs	0,75÷0,9	0,3÷0,7	0,002÷0,5
		InGaAsP	1,1÷1,6	0,1÷0,7	$5 \cdot 10^{-6} \div 0,05$
		Солі Pb	2,7÷30	0,4÷0,9	<0,05

У мікроелектроніці для відпалу напівпровідників застосовують газорозрядні CO₂-лазери, твердотілі Nd:YAG, Nd-скло та рубінові лазери; для осадження плівок – імпульсні CO₂-лазери, твердотілі рубінові, а також різноманітні іонні та молекулярні ексимерні лазери; для легування – газорозрядні CO₂-лазери та твердотілі Nd:YAG-лазери безперервної дії, а також іонні; для травлення – імпульсні CO₂-лазери, іонні та молекулярні ексимерні лазери; для усунення дефектів інтегральних схем – імпульсні твердотілі Nd:YAG та молекулярні ексимерні лазери; для скрайбування – газорозрядні CO₂-лазери, імпульсні твердотілі Nd:YAG та молекулярні ексимерні [2, 5, 6].

У діагностиці для проведення інтерферометрії застосовують атомарні He–Ne та іонні He–Cd лазери; у спектроскопії – газорозрядні CO₂-лазери безперервної дії, іонні та молекулярні ексимерні лазери, атомарні He–Ne та іонні He–Cd лазери, твердотілі Nd:YAG та на F-центрах, рідинні на барвниках, напівпровідникові лазери [2, 4].

Основні характеристики перерахованих типів лазерів наведені в таблицях 1 і 2, а саме: значення довжини хвилі (λ), розбіжності випромінювання (θ), потужності випромінювання (P) – для джерел лазерного випромінювання з безперервним режимом генерації; довжини хвилі (λ), тривалості імпульсу (τ), частоти імпульсів (f), розбіжності випромінювання (θ), енергії в імпульсі (E_{imp}) – з імпульсним режимом генерації.

Таблиця 2

Основні параметри найбільш розповсюджених типів технологічних лазерів з імпульсним режимом генерації [1, 2]

Тип лазера	Активне середовище	λ , мкм	τ , мкс	f , Гц	θ , мрад	E_{imp} , Дж	
Газові лазери							
Іонний	На іонах інертних газів	Ar ⁺	0,33÷0,53	$<1,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^6 \div 2,5 \cdot 10^8$	0,4÷3	$8 \cdot 10^{-9} \div 1,5 \cdot 10^{-6}$
		Kr ⁺	0,35÷0,68	$<1,2 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^7$	–	$8 \cdot 10^{-9}$

		Xe ⁺	0,49÷0,54	0,5÷1	1÷30	3	$3 \cdot 10^{-4} \div 6 \cdot 10^{-4}$
Молекулярний	–	CO	5,00÷6,50	1÷1000	1÷1000	3÷8	$8 \cdot 10^{-3} \div 4 \cdot 10^{-2}$
	Ексімерний	F ₂	0,16	$6 \cdot 10^{-3} \div 0,01$	1÷100	3÷10	0,01÷0,03
		ArF	0,19	0,01÷0,03	1÷1200	<0,2÷10	$1,5 \cdot 10^{-2} \div 1$

Тип лазера		Активне середовище	λ , мкм	τ , мкс	f , Гц	θ , мрад	E_{imp} , Дж
		KrCl	0,22	$5 \cdot 10^{-3} \div 6 \cdot 10^{-3}$	10÷140	1÷7	0,2÷0,25
		KrF	0,25	$3 \cdot 10^{-5} \div 1,2$	0,02÷1200	0,1÷10	0,02÷15
		XeCl	0,31	$4 \cdot 10^{-5} \div 0,25$	1÷1200	0,1÷10	0,0002÷2
		XeF	0,35	$1,2 \cdot 10^{-3} \div 1,2$	0,02÷1200	0,2÷7	$2 \cdot 10^{-4} \div 10$

Твердотілі лазери

–	–	Nd:YAG	1,06	$10^{-5} \div 10^{-4}$	$1 \div 10^8$	<1,3÷30	$10^{-4} \div 120$
		Nd:YAG (2 ω)	0,53	$10^{-4} \div 0,5$	$1 \div 5 \cdot 10^4$	1÷5	$2 \cdot 10^{-5} \div 0,4$
		Nd:YAG (3 ω)	0,36	$10^{-4} \div 1,6 \cdot 10^{-2}$	1÷50	0,2÷1,2	$1,2 \cdot 10^{-3} \div 0,18$
		Nd:YAG (4 ω)	0,27	$10^{-4} \div 1,5 \cdot 10^{-2}$	1÷50	0,3÷1,5	$6 \cdot 10^{-4} \div 8,5 \cdot 10^{-2}$
		Nd-скло	1,06	$3 \cdot 10^{-3} \div 2000$	0,02÷120	0,3÷7	0,3÷400
		Nd-скло (2 ω)	0,53	$10^{-4} \div 0,015$	0,02÷1	0,3÷1	0,2÷20
		Nd-скло (3 ω)	0,36	$3 \cdot 10^{-3} \div 1,5 \cdot 10^{-2}$	0,02÷1	0,3÷1	0,08÷8
		Nd-скло (4 ω)	0,27	$3 \cdot 10^{-3} \div 1,5 \cdot 10^{-2}$	0,02÷1	0,3÷1	0,04÷4
		Рубін	0,69	$2,5 \cdot 10^{-2} \div 3000$	0,02÷120	0,3÷7	0,03÷400
		Рубін (2 ω)	0,35	0,025	0,1÷1	1÷3	0,1÷0,3
		F-центри	1,45÷1,56	$2 \cdot 10^{-5}$	10^8	1,5÷2,5	$\sim 10^{-9}$

Рідинні лазери

–	На барвниках	Різноманітні барвники	0,19÷5	$<10^{-6} \div 400$	$0,07 \div 10^8$	–	$10^{-9} \div 400$
---	--------------	-----------------------	--------	---------------------	------------------	---	--------------------

Напівпровідникові лазери

–	–	GaAlAs	0,75÷0,9	$5 \cdot 10^{-5} \div 0,2$	$0,002 \div 10^9$	<0,3÷40°	$1,5 \cdot 10^{-8} \div 2 \cdot 10^{-3}$
		InGaAsP	1,1÷1,6	$3 \cdot 10^{-4} \div 1$	$10^3 \div 10^9$	0,1÷40°	$4 \cdot 10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-3}$
		Солі Pb	2,7÷30	$10^{-4} \div 1$	10^4	2÷50°	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$

Таким чином, в роботі розглянуто класифікацію джерел лазерного випромінювання в залежності від типу активного середовища, наведено основні параметри найбільш розповсюджених типів технологічних лазерів, а саме: довжину хвилі, розбіжність і потужність випромінювання, тривалість та частоту імпульсів, енергію в імпульсі, які слід ураховувати під час формулювання завдання на створення певного захисного покриття.

Бібліографічні посилання

1. Звелто, О. Принципы лазеров: пер. с англ. – 3-е перераб. и доп. изд. О.Звелто. – М.: Мир, 1990. – 560 с.
2. Технологические лазеры: справочник в 2-х томах, Т.1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Г.А. Абильситов, В.С. Голубев, В.Г. Гонтарь и др./ Под общ. ред. Г.А. Абильситова. – М.: Машиностроение, 1991. – 432 с.
3. Абильситов, Г.А. Лазерная технология и технологические лазеры / Г.А. Абильситов, В.С. Голубев. // Вестник Академии наук СССР / М.: Наука, 1982. – Вып. 2. – С.37-43.
4. Крылов, К.И. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении / К.И. Крылов, В.Т. Прокопенко, А.С. Митрофанов. – Л.: Машиностроение, 1978. – 336 с.
5. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
6. Водоватов Ф.Ф. Лазеры в технологии / Ф.Ф.Водоватов, А.А.Чельный, В.П.Вейко, М.Н.Либенсон // под ред. М.Ф.Стельмаха. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.
7. Джур, Є.О. Інструменти та методи спеціальної розмірної обробки: навч. посіб. / Є.О.Джур, Д.І.Шевчук, О.В.Бондаренко. С.В.Манжеліівський. – Д.: Інновація, 2011. – 74 с.

Надійшла до редколегії 15.06.2014