

Д.М. Заячук¹, С.І. Круковський², І.О. Мрихін¹, О.І. Іжнін², Д.Л. Вознюк³

Особливості одержання лазерних структур GaAs / AlGaAs методом РФЕ під впливом Yb

¹Національний університет "Львівська Політехніка"

вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, E-mail: zayachuk@polynet.lviv.ua

²Науково-виробниче підприємство "Карат", Львів, Україна

³Львівський національний університет ім. І. Франка, Львів, Україна

Проведено дослідження можливостей сукупного використання ізовалентного заміщення атомів у металічній підгратці й домішок рідкісноземельних елементів при створенні лазерних структур на основі арсеніду галію в технології РФЕ. При відпрацюванні технологічних режимів отримання методом РФЕ епітаксійних шарів на основі GaAs, легованих ітербієм, виявлено ефект підсилення гетеруючої дії ітербію в присутності алюмінію. Ефект полягає в тому, що при сукупному додаванні в галієві розчини-розплави Al та Yb концентрація вільних електронів у шарах AlGaAs, що кристалізуються з легованих розплавів, зменшується тим інтенсивнішим, чим більший вміст алюмінію у вихідній шихті. Для твердих розчинів $Al_xGa_{1-x}As$ складів $x = 0,1$ і $0,3$ визначені оптимальні концентраційні діапазони домішки ітербію в розчині-розплаві, які забезпечують рівень електрофізичних параметрів шарів, необхідний для створення на їх основі лазерних структур.

Ключові слова: рідинно-фазна епітаксія, арсенід галію, тверді розчини, домішки, рідкісноземельні елементи, подвійні гетероструктури, лазерна генерація.

Стаття поступила до редакції 05.11.2005; прийнята до друку 15.11.2005.

Вступ

Арсенід галію і його тверді розчини вже протягом тривалого часу є одними із базових напівпровідникових матеріалів для створення різноманітних лазерних структур. Для вирощування таких структур використовуються практично всі основні епітаксійні методи, серед яких молекулярно-променева, МОС гідридна, хлоридна, газо- та рідинно-фазна епітаксії. Останній метод, зокрема, дозволяє відносно просто і ефективно використовувати широкий діапазон домішок для цілеспрямованого керування параметрами нарощуваних епітаксійних шарів, відпрацьовувати модельні лазерні структури, механізми впливу на їх параметри тощо.

Одним з основних факторів, що визначають якість лазерних структур, їх деградаційну стійкість і надійність, є кількість і природа фонових домішок, які потрапляють в епітаксійні шари у процесі їх нарощування [1]. Зниження концентрації фонових домішок нижче рівня 10^{16} см^{-3} , особливо в активному шарі лазерної структури, є однією з найголовніших вимог до технології її отримання.

Ефективним інструментом впливу на рівень фонових домішок і власних точкових дефектів в

епітаксійних шарах GaAs, нарощуваних з розплавів, є використання у цьому процесі домішок рідкісноземельних елементів (РЗЕ) [2]. При цьому, однак, концентрація таких домішок у розплаві не повинна перевищувати деяку критичну величину, інакше почне проявляється її негативний вплив на морфологію поверхні та дефектність шарів, що кристалізуються. Це явище є характерним для різних матеріалів A^3B^5 і різних домішок РЗЕ [3-4]. Головною причиною такого негативного впливу є утворення сполук РЗЕ з фоновими домішками, і особливо з киснем. У процесі кристалізації ці сполуки або потрапляють в епітаксійний шар, порушуючи його структурну досконалість, або ж, скупчуючись на фронті кристалізації, порушують однорідність процесів масоперенесення ростових елементів до поверхні шару, що кристалізується [5].

З іншого боку рівнем концентрації фонових домішок і власних точкових дефектів в епітаксійних шарах GaAs можна ефективно керувати за допомогою впливу ізовалентних елементів, зокрема такого активного, як алюміній [6,7]. В той же час у літературі явно недостатньо даних щодо дослідження можливостей сукупного використання рідкісноземельних і ізовалентних елементів при створенні лазерних структур на основі арсеніду

галію. В даній роботі ця проблема вивчається на основі досліджень змін електрофізичних і структурних властивостей епітаксійних шарів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ з різним вмістом алюмінію під дією домішки ітербію. Ефективність сукупного впливу Yb і Al на параметри епітаксійних шарів на основі GaAs перевіряється по величині порогового струму для отримання лазерної генерації на модельній лазерній подвійній гетероструктурі (ПГС) $\text{n-Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As} / \text{p-Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As} / \text{p-Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$.

Метою роботи є встановлення оптимальних співвідношень між Al та Yb в розчині-розплаві галію, при яких отримані епітаксійні шари твердих розчинів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ характеризуються якнайнижчим рівнем концентрації неконтрольованих домішок, дзеркальною морфологією поверхні та придатні для створення лазерних структур.

I. Методика експерименту

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити дві основні задачі. Перша задача полягала в тому, щоби встановити закономірності зміни концентрації вільних носіїв заряду і морфології поверхні шарів під впливом легуючої домішки ітербію в твердих розчинах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ різного складу. Такі залежності є важливими для цілеспрямованого вибору оптимальних технологічних режимів нарощування активних і емітерних шарів лазерної структури, які би дозволяли максимально очищати їх від неконтрольованих домішок, одночасно не спричиняючи порушень структурної досконалості шарів.

Друга задача полягала в тому, щоби, створивши на основі $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ просту ПГС, отримати в рамках пропонованого технологічного підходу лазерну генерацію, як критерій його ефективності. Вибір ПГС в контексті задачі, яка вирішується, зумовлений кількома чинниками. Як відомо, така структура може забезпечувати значення порогового струму лазерної генерації на рівні кількох kA/cm^2 , що є цілком задовільним значенням для досліджень і практичного використання. З іншого боку простота структури спрощує технологію її виготовлення і покращує відтворюваність результатів, а також обмежує кількість факторів, що впливають на кінцевий результат, а отже дозволяє безпосередньо оцінити вплив тих із них, які становлять інтерес для дослідження. Крім того, результати, отримані на простій ПГС, можна безпосередньо використати при проектуванні і виготовленні більш складних лазерних структур.

II. Результати експериментів та їх обговорення

Залежності концентрації носіїв заряду в епітаксійних шарах GaAs, $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ та $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$, вирощених в діапазоні температур 630–580 °C із галієвих розчинів-розплавів, легованих ітербієм,

приведені на рис. 1,а. На рис. 1,б приведені залежності рухливості електронів від концентрації ітербію у розплаві галію для тих же серій зразків.

Для всіх серій зразків спостерігається зменшення концентрації електронів зі збільшенням концентрації ітербію в розплаві галію і при певних критичних її значеннях, різних для зразків різного складу кристалічної матриці, тип провідності шарів змінюється з електронного на дірковий, тобто спостерігається інверсія типу провідності. Особливістю досліджуваних залежностей концентрації носіїв заряду у шарах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ різного складу від кількості ітербію у розплаві галію є те, що інверсія типу їх провідності відбувається при тим менших концентраціях ітербію у розплаві галію, чим більше в ньому алюмінію. При цьому, як видно з наведених на рис. 1,а даних, очищення шарів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ від сторонніх неконтрольованих домішок під впливом Yb відбувається тим ефективніше, і, відповідно, концентрація вільних носіїв заряду в шарах є тим нижчою, чим більшим є вміст Al у вихідному розчині-розплаві. Так, мінімальне значення концентрації електронів, якого вдалося

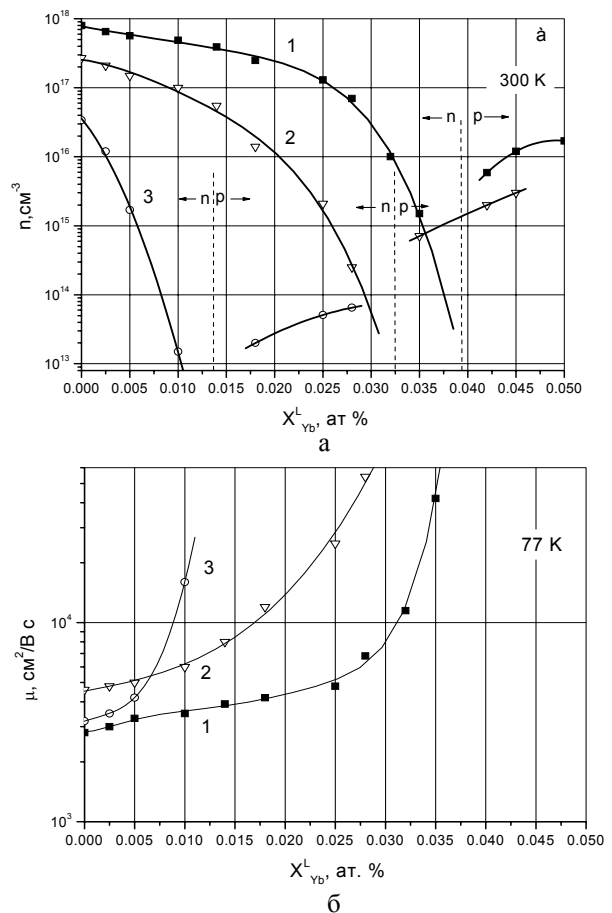


Рис. 1 Залежність концентрації і рухливості носіїв заряду в шарах GaAs (1), $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ (2) і $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ (3), вирощених з галієвих розчинів-розплавів, легованих ітербієм при фіксованих концентраціях алюмінію в розчині-розплаві: 1 – $x_{\text{Al}}^{\text{L}} = 0$; 2 – $x_{\text{Al}}^{\text{L}} = 1,5 \cdot 10^{-2}$ ат%; 3 – $x_{\text{Al}}^{\text{L}} = 5,7 \cdot 10^{-2}$ ат%.

досягти під впливом домішки Yb в GaAs, становить величину порядку $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ – $2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а в $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ – $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Таким чином, при відпрацюванні технологічних режимів отримання методом РФЕ епітаксійних шарів на основі GaAs, легованих ітербієм, нами був встановлений ефект підсилення гетеруючої дії ітербію в присутності алюмінію. Цей ефект полягає в тому, що при одночасному додаванні в галієвий розплав Al та Yb концентрація електронів у шарах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ зменшується тим сильніше, чим більший вміст алюмінію в складі твердого розчину.

Зменшення концентрації електронів у шарах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, вирощених під впливом домішки Yb при невеликих концентраціях Al в розплаві ($x_{\text{Al}}^L \leq 1,5 \cdot 10^{-2}$ ат. %), супроводжується значним збільшенням їх рухливості при фіксованій концентрації Yb N_{Yb} . Причиною такої зміни значення рухливості є те, що при заданому N_{Yb} концентрація електронів є значно нижчою в $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$, ніж в GaAs. Подальше збільшення вмісту Al в складі твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ до $x = 0,3$ приводить до додаткового зменшення концентрації електронів в епітаксійному шарі, але конкуруючий вплив величини ефективної маси електронів, яка зростає із-за збільшення ширини забороненої зони матеріалу, приводить до різних змін у рухливості електронів в залежності від N_{Yb} . При малих значеннях N_{Yb} домінує вплив збільшення ефективної маси і рухливість зменшується, а поблизу точки інверсії домінує вже вплив зміни концентрації вільних носіїв заряду і рухливість збільшується.

Ефект підсилення гетеруючої дії Yb в присутності Al може бути корисним при отриманні лазерних гетероструктур в системі GaAs/AlGaAs, тому що очистка епітаксійних шарів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ від неконтрольованих домішок при зростанні x відбувається при значно менших концентраціях ітербію в розплаві галію. А це дозволяє запобігати перевищенню концентрацією Yb тієї критичної величини, яка призводить до погіршення морфології плівок внаслідок входження в шар мікрочленин рідкісноземельного елемента або продуктів його взаємодії із фоновими домішками.

Встановлені нами закономірності змін

концентрації вільних носіїв заряду та їх рухливості в твердих розчинах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ різного складу під впливом легуючої домішки ітербію дозволили вибрати оптимальні значення концентрації Yb в розплавах галію для нарощування якісних епітаксійних шарів для лазерної ПГС. Для $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ вони знаходяться в інтервалі 0,025–0,027 ат. %, а для шарів $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ – в інтервалі 0,005–0,01 ат. %.

Для забезпечення необхідного рівня концентрації дірок при вирощуванні активного шару $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ лазерної ПГС вихідний розплав легувався, крім ітербію, також акцепторною домішкою Mg. Великий коефіцієнт входження Mg ($\sim 0,2$) не дає можливості контролювати і відтворювати отримувати концентрацію дірок на рівні $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, необхідну для формування емітерного шару, тому при вирощуванні p- $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$ як акцепторна домішка використовувався Ge. Концентрації магнію та германію в розплавах галію становили 0,058 ат. % та 0,097 ат. % відповідно.

Необхідно зазначити, що використання Mg як домішки в процесі РФЕ шарів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ вимагає певної обережності. При відпрацюванні технології нарощування досліджуваних шарів, легованих Mg, була помічена можливість погіршення морфології епітаксійного шару, коли концентрації Mg в розплаві перевищує деяке критичне значення. Проте, таке погіршення спостерігалось при значно нижчих температурах формування поверхні епітаксійного шару ніж ті, які ми використовували для нарощування ПГС. Тому воно не створювало перешкод для формування активного шару структури. Але воно може створювати певні труднощі при нарощуванні методом РФЕ легованих Mg шарів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ нанометрового масштабу, яке вимагає температур кристалізації, нижчих від 500 °C. Вигляд поверхні епітаксійних шарів $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$, легованих Mg, ілюструють фотографії, наведені на рис. 2. Критична концентрація Mg в розплаві, при якій з'являються дефекти, залежить від складу нарощуваного твердого розчину. Для наведеного на рис. 2 складу $x = 0,1$, наприклад, критична концентрація знаходиться у проміжку 0,014÷0,03 ат. %.

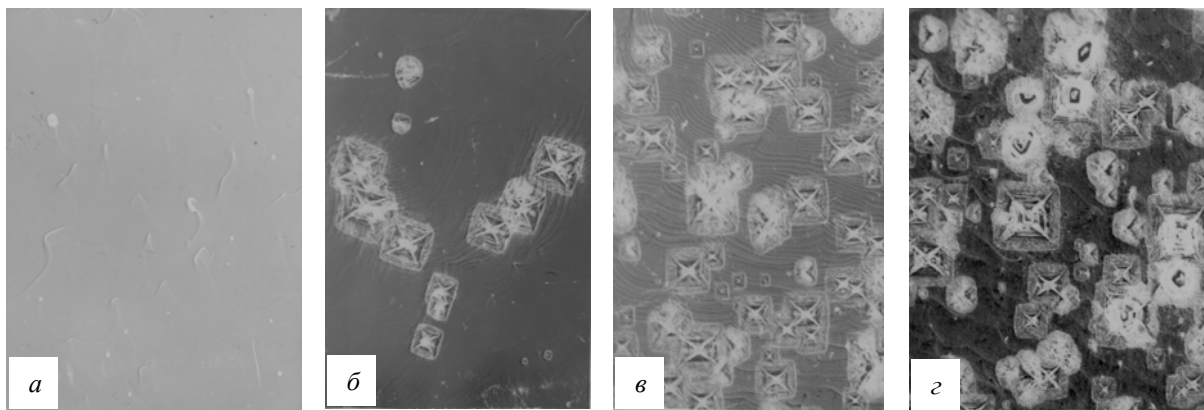


Рис. 2. Морфологія поверхні епітаксійних шарів $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}:\text{Mg}$ при її формуванні при температурах, нижчих 500 °C при вирощуванні з розчинів-розплавів галію, легованих домішкою Mg. x_{Mg}^L , ат. %:

а) 0.014; б) 0.03; в) 0.07; г) 0.1.

Спектри випромінювання лазерного чіпа на основі гетероструктури $n\text{-Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As} / p\text{-Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As} / p\text{-Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$, виміряні при кімнатній температурі при різних струмах накачки, показані на рис. 3. Чітко видно перехід структури у режим лазерної генерації, який супроводжується характерним звуженням лінії генерації. Після переходу в режим лазерної генерації при збільшенні струму накачки в спектрі з'являються нові моди, про що свідчить збільшення напівширини спектру (недостатня роздільна здатність спектрофотометра не дала змоги спостерігати окремі повздовжні моди).

На вставці зображена залежність інтенсивності випромінювання створеної ПГС від струму накачки. З цієї залежності був визначений пороговий струм, який становив величину порядку 4 кА/см^2 . Реалізація лазерної генерації на виготовленій тестовій ПГС, а також значення порогового струму, яке знаходиться в межах величин, типових для таких простих ПГС, свідчить, що використання встановленого ефекту підсилення гетеруючої дії домішки Yb алюмінієм дозволяє значно спростити технологічний процес вирощування гетероструктур на основі арсеніду галію, придатних для практичного створення лазерних діодів.

Висновки

Встановлено ефект підсилення гетеруючої дії ітербію в присутності алюмінію при вирощуванні методом РФЕ епітаксійних шарів GaAs і AlGaAs з галієвих розчинів-розплавів, легованих ітербієм. Ефект проявляється в тому, що при одночасному додаванні в галієвий розплав Al та Yb концентрація вільних електронів у шарах AlGaAs зменшується тим сильніше, чим більший вміст алюмінію у вихідному розчині-розплаві, а їх рухливість зростає. Для твердих розчинів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ з $x = 0,1$ і $0,3$ визначені оптимальні концентраційні діапазони домішки

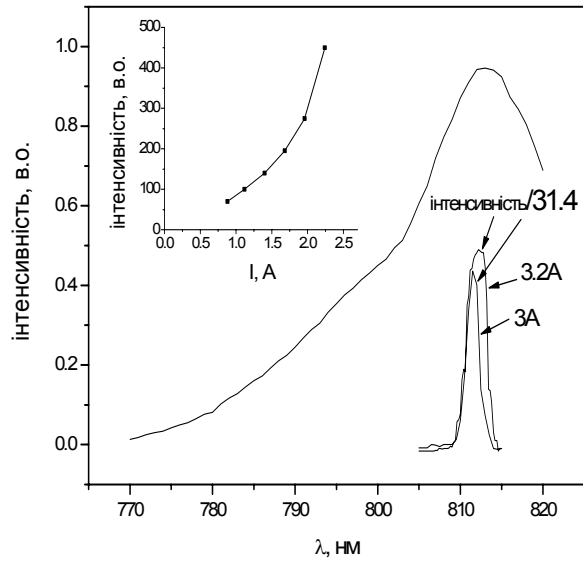


Рис. 3. Спектр електролюмінесценції подвійної гетероструктури $n\text{-Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As} / p\text{-Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As} / p\text{-Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$ при різних струмах накачки (роздільна здатність спектрофотометра 2 nm). На вставці – залежність інтенсивності випромінювання гетероструктури від струму накачки.

ітербію в розчині-розплаві, які забезпечують рівень електрофізичних параметрів шарів, необхідний для створення лазерних гетероструктур. Ефективність розробленого способу гетерування, який значно спрощує технологію отримання активних і хвилевідних шарів напівпровідникових лазерів, підтверджені шляхом реалізації модельної лазерної подвійної гетероструктури $n\text{-Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As} / p\text{-Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As} / p\text{-Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$, пороговий струм якої лежить в межах, типових для ПГС GaAs/AlGaAs такої архітектури.

- [1] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах*. М.: Мир, (1981).
- [2] L-B Chang, Y-T Wang, Y-C Cheng, T-W Shong, E-K Lin. Praseodymium added GaAs liquid phase epitaxy and its Schottky diode application // *J. Crystal Growth*, **198-199**, pp. 1092-1097 (1999).
- [3] А.Т. Гореленок, А.В. Каманин, Н.М. Шмидт. Редкоземельные элементы в технологии соединений АІІІВV и приборов на их основе // *ФТП*, **37**(8). сс. 922-940 (2003).
- [4] В.Ф. Мастеров, Л.Ф. Захаренков. Редкоземельные элементы в полупроводниках АІІІВV // *ФТП*, **24**(4), сс. 610-630 (1990).
- [5] M.Ch. Wu and Ch.M. Chiu. Very high purity InP layer grown by liquid-phase epitaxy using erbium gettering // *J. Appl. Phys.*, **73**, pp. 468-470 (1993).
- [6] S. Kondo, T. Amano, H. Nagai. High purity LPE growth of InGaAs by adding Al to melt // *J. Crystal Growth*, **64**, pp. 433-440 (1983).
- [7] Г.Н. Семенова, Т.Г. Крыштаб, В.П. Кладько, С.И. Круковский, А.В. Свительский. Свойства эпитаксиальных слоев GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ полученных жидкофазной эпитаксией из галлиевого расплава с добавкой Yb // *Неорганические материалы*, **32**(8), сс. 916-919 (1996).

D.M. Zayachuk¹, S.I. Krukovsky², I.O. Mrykhin¹, O.I. Izhnin², D.L. Voznyuk³

Peculiarities Making of GaAs / AlGaAs Laser Structures by LPE Method under Yb Influence

¹*Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera St, Lviv, 79013,
Ukraine, E-mail: zayachuk@polynet.lviv.ua*

²*Scientific Research Company "Carat", Lviv, Ukraine*

³*Ivan Franko Lviv National University, Lviv, Ukraine*

Potential of combined using of isovalent substitution of atoms in metal sublattice and rare earth impurities for making laser structures on the base of GaAs by LPE method is investigated. Effect of amplification of ytterbium gettering action by aluminium presence in the process of GaAs based epitaxial layers growing is revealed. The effect consists in intensification of decreasing of free carrier concentration in *AlGaAs* grown by LPE method under influence of Yb impurity when Al concentration in initial melt-solution increases. Optimal concentration ranges of ytterbium impurity in initial melt-solution for growing of $Al_xGa_{1-x}As$ with $x = 0,1$ і $0,3$, which ensure suitable for making of laser structures level of electro physical parameters, are determined.