

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ЛАЗЕРНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОНІЦІ: ФОРМУВАННЯ  
ТОПОЛОГІЇ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ**

Магістрант гр. ЕПм.-91н



В.С. Доценко

Науковий керівник,  
канд. фіз.-мат. наук, доцент



І.М. Пазуха

Зав. кафедри ЕЗПФ,  
д-р фіз.-мат. наук, професор



І.Ю. Проценко

Суми – 2021



## РЕФЕРАТ

Об'єктом досліджень були лазерні прилади і системи в електроніці, що використовуються при формуванні топології елементної бази та обробка матеріалів.

Мета даної роботи полягає у вивченні фізичних принципів роботи лазерних пристроїв та систем, що використовуються в електроніці для формування топологію та елементарної бази, а також при обробці матеріалів. Розробка лабораторного стенду бази Arduino Uno для лазерного гравірування.

В якості основного елемента в приладах гравірування застосовуються лазер, потужністю від 250 мВт до 5,5 Вт. Від потужності лазера залежить як якість зображення так і глибина контуру гравірування і спроможність лазера гравірувати на різних матеріалах. Наприклад, лазери потужністю від 250 мВт до 1 Вт більш підходять для гравірування дерева, аніж металу або пластмаси.

Робота викладена на 40 сторінках, включає в себе 21 рисунок, використано 39 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ЛАЗЕР, ЛАЗЕРНЕ ГРАВІРУВАННЯ, ARDUINO UNO, ПРОМИСЛОВІСТЬ.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1. ЛАЗЕРНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОНІЦІ</b> .....	6
1.1 Принципи генерації лазерного випромінювання.....	6
1.2 Класифікація лазерів.....	8
<b>РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ОРБЦІ МЕТАЛІВ</b> .....	10
2.1 Лазерні механічні операції термообробки металів.....	10
2.2 Типи лазерів, що використовуються у лазерно-гравіювального обладнанні.....	19
<b>РОЗДІЛ 3. ПРИЛАД ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГРАВІРУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА БАЗІ ARDUINO UNO</b> .....	27
3.1 Компоненти приладу .....	27
3.2 Підключення приладу та характеристика компонентів.....	27
3.3 Програмування та характеристика програми.....	33
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	35
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	36

## ВСТУП

Нові винаходи постійно приходять в наше життя. В першу чергу вони з'являються в сфері виробництва, щоб максимально спростити і прискорити виробничі процеси. Жодна галузь не обходить ще більш досконалі інноваційні технології.

Однією з новинок, яка завоювала багато сфер діяльності, стало застосування лазерного обладнання. Воно багато в чому універсально і може бути застосовано для багатьох виробництв, зокрема, і для легкої промисловості.

Відразу ж після появи лазерного обладнання та початку дослідження взаємодії лазерного променя з різними матеріалами стало відомо, що цей інструмент може знайти широке застосування в різноманітних промислових технологічних процесах. Справа в тому, що лазерний імпульс несе в собі величезний запас енергії. При попаданні подібного променя на поверхню матеріалу він викликає миттєвий розігрів цієї поверхні аж до випаровування навіть у дуже тугоплавкого матеріалу.

Даний процес дозволяє скоротити трудомісткість операцій розкрою і отримати з високою точністю складні контури деталей і малюнки. Технологічно непрості елементи одягу або малюнка можуть виконуватися в лічені секунди. Лазерний промінь є ідеальним інструментом, який забезпечить гладкий і точний зріз.

Мета даної роботи полягає у вивченні фізичних принципів роботи лазерних пристроїв та систем, що використовуються в електроніці для формування топології та елементарної бази, а також при обробці матеріалів. Розробка лабораторного стенду бази Arduino Uno для лазерного гравірування.

Результати роботи були представлені на науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕМ :: 2021».

## РОЗДІЛ 1

### ЛАЗЕРНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОНІЦІ

Лазер це пристрій для генерування або підсилення монохроматичного світла, створення вузького пучка світла, здатного поширюватися на великі відстані без розсіювання і створювати винятково велику густину потужності випромінювання при фокусуванні ( $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> для високоенергетичних лазерів). Інша назва лазера — оптичний квантовий генератор. Слово «лазер» або «laser» походить від перших букв фрази англійською мовою «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», або «посилення світла в результаті змушеного випромінювання» [1-3].

#### 1.1 Принципи генерації лазерного випромінювання

Принцип дії лазера ґрунтується на вимушеному випромінюванні фотонів світла при впливі зовнішнього електромагнітного поля. Як відомо ще зі шкільного курсу фізики, будова атома має планетарну модель (за Резерфордом), згідно з якою навколо позитивно зарядженого ядра з певних енергетичних орбітах обертаються негативно заряджені електрони - подібно до планет навколо сонця. Кожній орбіті відповідає певне значення енергії електрона. При збудженому стані електрони розміщуються на низьких енергетичних рівнях, що зумовлено мінімальною затратою енергії, і можуть тільки поглинати випромінювання, яке на них потрапляє. При впливі випромінювання на атом, він отримує додаткову порцію енергії, що провокує перехід електронів (одного або декількох) на більш високі енергетичні рівні атома, тобто електрон переходить в збуджений стан. Енергія поглинається строго визначеними порціями - квантами. Збуджений атом прагне знову повернутися до стану спокою, і віддає зайву енергію, випромінюючи її теж строго визначеними порціями. При цьому електрони повертаються на початкові енергетичні рівні. Утворені кванти або фотони світла мають

енергію рівну різниці енергій двох задіяних рівнів. Таким чином відбувається вимушене випромінювання [1-4].

Атом в збудженому стані може сам випромінювати енергію, а може випромінювати і при впливі зовнішнього випромінювання. Характерно, що квант, який випромінюється і квант, який викликав випромінювання схожі між собою. Ця характеристика визначає те, що довжина хвилі індукованого (викликаного) випромінювання дорівнює хвилі, яка викликала це випромінювання. Разом, вимушене випромінювання буде збільшуватися зі зростанням кількості електронів, які перескочили на верхні енергетичні рівні.

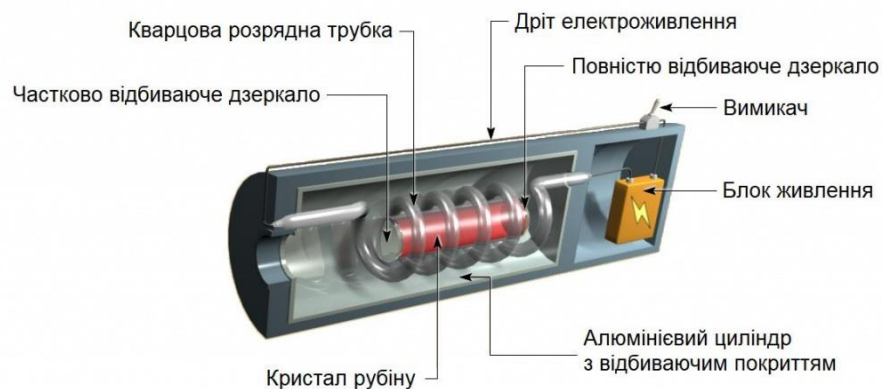


Рисунок 1.1 – Будова лазера у розрізі [4]

Також, бувають інверсні системи атомів, в яких електрони зосереджуються на більш високих енергетичних рівнях. У таких системах атомів процес випромінювання квантів домінує над процесом поглинання. Інверсні системи атомів і застосовують для конструювання оптичних квантових генераторів (лазерів). Активна речовина (середя) розміщується в оптичному резонаторі що складається з двох паралельно розміщених високоякісних дзеркал, які розміщені по обидва боки активної речовини. Випроменені кванти, потрапляючи всередину і неодноразово відбиваючись від дзеркал, безліч разів перерізають активна речовина, викликаючи тим самим виникненню аналогічних квантів за допомогою випромінювання

атомів, де електрони перебувають на далеких орбітах. Активне середовище може бути з різних матеріалів, будь-якого агрегатного стану і вибір її визначається від того, які характеристики вимагаються від лазера. Саме від активної середовища залежать основні характеристики лазерів - потужність і діапазон [1-4].

Ефект лазера (лазерна генерація) може виникнути тільки в тому випадку, коли число атомів у збудженому стані перевищує число атомів в стані спокою. Середу з такими характеристиками, можна підготувати, накачавши її додатковою енергією з певного зовнішнього джерела. Ця операція так і називається - накачування. Саме від способу накачування і розрізняються лазери за типами. Накачування може здійснюватися при впливі електромагнітного випромінювання, електричного струму, електричного розряду, пучка релятивістських електронів, а також хімічної реакції. Вид використовуваної енергії залежить від того, яка саме застосовується активна (робоча) вівторок.

Виходячи з усього вище написаного, можна визначити три основні частини конструкції, які має в своєму складі будь-якої лазер: активне робоче середовище; джерело енергії або система накачування; пристрій для посилення випромінюваного світла - система дзеркал (оптичний резонатор).

Надалі розглянемо види лазерів на прикладі обладнання у якому вони використовуються [1-4].

## **1.2 Класифікація лазерів**

В даний час є багато різновидів лазерів, що істотно відрізняються один від одного. Залежно від характеристик лазери можуть бути розподілені наступним чином:

За принципом агрегатного стану активної речовини: твердотільні; рідинні; газові лазери; лазери на вільних електронах.





Рисунок 1.2 – SSP-ST-532-FN  
твердотільний лазер [7]



Рисунок 1.3 – Діодний лазер  
фірми FLAGMAN [37]

За величиною випромінюваної потужності: малопотужні (від  $10^{-3}$  до декількох Вт); середньої потужності ( $10^3 - 10^5$  Вт); високопотужні (понад 106 Вт - десятки МВт). За способом накачки: лазери з оптичним накачуванням; лазери з електронно-променевою накачкою; газорядні лазери; діодні лазери; хімічні лазери; лазери з ядерною накачкою; лазери з порушенням сонячною енергією. За довжиною хвилі: субміліметрові; інфрачервоні; видимі; ультрафіолетові; рентгенівські. За режимом роботи: імпульсний; безперервний. За якістю випромінювання: одномодові (вузькополосні); багатомодові (широкополосні) [5, 6].

## РОЗДІЛ 2

### ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ОРБЦІ МЕТАЛІВ

Використання лазерів на ітрій-алюмінієвому гранаті для часткового видалення тонкої металевої плівки, нанесеної на підкладку з кристалічного кварцу, дозволяє здійснити підгонку частотної смуги пропускання кварцового фільтру.

Прикладом цього може служити підгонка акустичного фільтра для телефонних систем зв'язку типу мультиплекс з тонкоплівковими електродами Cr-Cu-Au товщиною 14 мкм осадження на підкладку з кристалічного кварцу.

Між головними електродами фільтра поміщені додаткові допоміжні електроди, які прорізаються пучком сфокусованого лазерного випромінювання для регулювання величини сполучення між головними електродами, що дозволяє підігнати смугу пропускання фільтра з точністю близько 1% [10, 16].

#### 2.1 Лазерні механічні операції термообробки металів

**Конденсація тонких плівок.** Енергія сфокусованого пучка лазерного випромінювання може бути використана для локального випаровування матеріалу при конденсації тонких плівок. лазерний пучок вводиться в вакуумну камеру через прозоре віконце і направляється на випаровуваний матеріал.

Експериментальні роботи з конденсації тонких плівок пластини на кварцовою підкладці, проводилися з використанням лазерів на неодимовому склі безперервної дії.

Тонкі плівки вуглецю, кремнію, карбиду кремнію на електрокорудній підкладці, а також тонкі плівки  $Al_2O_3$  на кремнії конденсують із застосуванням  $CO_2$  лазерів безперервної дії [10-11].

**Нагрів та плавлення матеріалу у виробництві монокристалів та виготовлення напівпровідникових діодів.** Пучок випромінювання CO<sub>2</sub> лазера безперервної дії потужністю 250-300 Вт використовували для плавлення матеріалів при вирощуванні і зонного очищення монокристалів рубіна і сапфіра. Отримано значне підвищення якості кристалів і зменшення ступеня забруднення на два порядки.

За допомогою пучка лазерного випромінювання обробляють леговані напівпровідникові матеріали, використовувані для виготовлення діодів [10].

**Видалення ізоляції з електричних проводів.** Сфокусований пучок випромінювання CO<sub>2</sub> лазера або лазера на ітрій алюмінієвому гранаті використовують також для видалення ізоляції електричних проводів без пошкодження провідника або металевого екрану. В основу таких застосувань покладено велику різницю поглинання лазерного випромінювання ізоляції (синтетичні або натуральні органічні матеріали) в порівнянні з металами. Ізоляція передається лазерним пучком, потім механічно знімається. [10]

**Лазерне свердління отворів та лазерне різання металів.** Свердління отворів полягає у видаленні локально розплавленого матеріалу під впливом пучка сфокусованого лазерного випромінювання великої щільності потужності. Зазвичай, для цього використовують імпульсні твердотільні лазери рубінові або неодимові з енергією імпульсу 10 - 20 МДж, що працюють з частотою імпульсів до декількох десятків герц. Тривалість імпульсів - кількості мікросекунд. Залежно від енергії імпульсів і розмірів отвори його можна обробляти використовуючи один або кілька імпульсів [10, 12].

Отвори, одержувані за допомогою пучків лазерного випромінювання, мають круглу форму, шорстку бічну поверхню і конусовидний перетин в глибину. Збіжність конуса поздовжнього перетину отвору залежить від глибини отвору, діаметра вихідного отвору, а також числа і постачання використаного лазерних імпульсів. Коли чистота поверхні отвори дуже важлива, лазерне свердління є попередньою операцією, після якої отвір

необхідно піддавати іншим видам обробки. Вихідні діаметри отворів рівні 10-3000 мкм в залежності від виду і товщини матеріалу, а також параметрів пучка випромінювання.[10,12]

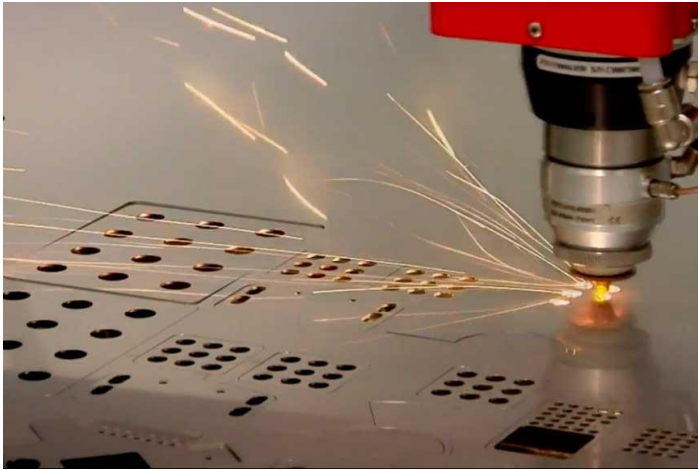


Рисунок 2.1 – Приклад лазерного свердління металу [38]

Також, промислове застосування в техніці лазерної обробки отворів - виготовлення алмазних фільтрів для виробництва тонкого дроту, а також виготовлення рубінових і сапфірових годинникових каменів. Для обробки отворів в алмазних фільтрах використовують імпульсні твердотільні лазери, найчастіше, рубінові або ітрієво-алюмінієвий гранат, рідше застосовують лазери на неодимовому склі вільно генеруючі багатомодовий пучок випромінювання.

Отвори в алмазних фільтрах мають складну форму: вхідний конус, звуження, вихідний конус. Мінімальний діаметр звуження 10 мкм, повна глибина отвори 1-3 мм. Отримання тонкого отвори вимагає значного числа (до декількох тисяч) лазерних імпульсів випромінювання з невеликою енергією (щоб уникнути мікротріщин в алмазі). Вся операція складається з декількох фаз, як показано на рисунку 2.1, а тривалість операції досягає декількох хвилин.

На рисунку 2.1 зазначено : а) освіту початкової лунки; один імпульс з енергією 1 Дж, сфокусований в місце контакту алмазної і поглинає пластин; б) перевертання кристала, збільшення вхідного конуса; 50-100 імпульсів з

енергією 0.5- 2 Дж частотою 1 Гц, алмаз обертається зі швидкістю 10-20 об / хв; в) калібрування і чистове обробка вхідного конуса ультразвуковим методом; г) свердління робочого каналу, 1-2 імпульсу з енергією 0,3-0,5 Дж; д) обробка вхідного конуса; е) калібрування і чистове обробка вихідного конуса ультразвуковим методом; 1-алмаз; 2 поглинає пластина; 3-лазерний пучок; 4-зона поглинання; 5-початкова лунка; 6-вхідний (мастильний) конус; 7-звуження (робочий канал); 8-вихідний конус.

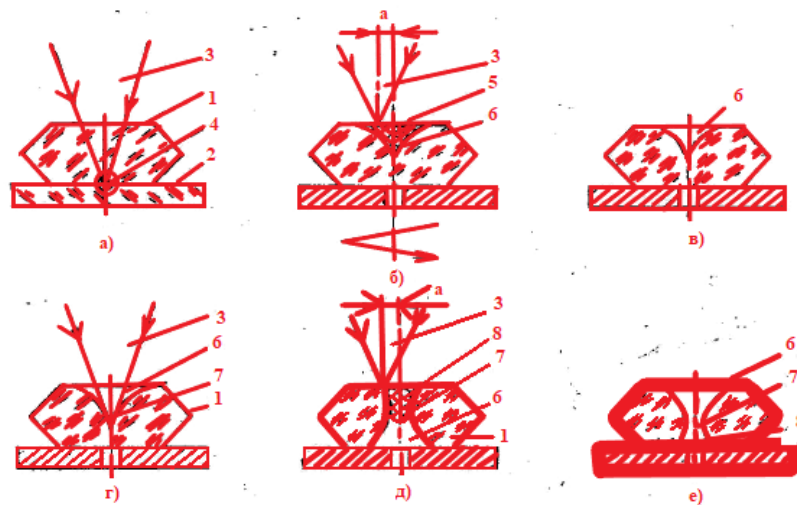


Рисунок 2.2 - Послідовні фази свердління отвору в алмазній філь'єрі лазерною установкою «Квант 9» [10]

Час отримання отвору в алмазному філь'єрі лазерним методом скорочується в порівнянні зі свердлінням механічними методами приблизно в 100 разів. Для початку процесу обробки необхідно локальне збільшення поглинання лазерного випромінювання в місці фокусування пучка. Для цієї мети оброблювану поверхню локально покривають тонким шаром графіту. Інша успішне застосування техніки лазерного свердління – отримання отворів з дуже маленьким прохідним діаметром, наприклад, в діафрагмі оптичного просторового фільтра, свердління отворів в екранах пропускають лазерний пучок.

Для різання матеріалів в приладобудуванні найчастіше використовують CO<sub>2</sub> лазери і лазери на ітрій алюмінієвому гранаті. У приладобудуванні розрізняють:

- 1) різка тонких і товстих плівок матеріалу без пошкодження підкладки, на яку вони нанесені (зазвичай металеві та вуглецеві плівки, товщиною не більше 20 мкм, нанесені на діелектричні підкладки);
- 2) плиткове скрайбування матеріалів, наприклад кераміки або напівпровідників в електронних технологіях;
- 3) різання металів і інших матеріалів великої товщини при їх обробленні на заготовки.[10,12]

**Технологічні операції зварювання матеріалів лазерним випромінюванням.** Для точкового зварювання металів застосовують головним чином імпульсні твердотільні лазери: рубінові, на ітрій алюмінієвому гранаті, неодимовому склі. Параметри і режими генерації цих лазерів наступні: тривалість імпульсу до 10 мс, найчастіше 1-5 мс; енергія імпульсу до 50 Дж, найчастіше 1-10 Дж; частота повторення імпульсів до 100 Гц. Для зварювання жароміцних матеріалів застосовують імпульсні CO<sub>2</sub>-лазери з середньою потужністю випромінювання 100 Вт, тривалість імпульсу випромінювання 10-1000 мкс, частота проходження імпульсів 100 Гц. перевагою лазерної зварювання є: безконтактний вплив, що забезпечує високу чистоту шва; мала тривалість впливу; мала область зони впливу.

При використанні зазначених лазерів можливе отримання точкових сварних з'єднань різних металів, тонких проводів і напівпровідникових елементів з деякими діелектриками, а так же тонких металевих плівок, нанесених на діелектричну підкладку. Діаметри сварних точок складають 0,1-0,6 мм, глибина проварки металу 0,03-0,5 мм. Виконання ряду сварних точок дозволяє отримати герметичний зварений шов. Зварювана дрiт має діаметр 0,05-0,5 мм, а товщина зварюються місць не перевищує 0,5-2 мм. Сварка лазерним випромінюванням дозволяє отримати електричні і механічні (кріпильні) з'єднання. умовою отримання високоякісного з'єднання є

хороший термічний і механічний контакт елементів перед зварюванням та використання різноманітних енергій і тривалості імпульсу при максимальній фокусуванні лазерного випромінювання. Сварка тонкого дроту складніше через малу поверхні термічного і механічного контакту між дротом і площиною підкладки або інший дроту [10, 13].

Проте, не всі метали вдається добре зварити за допомогою лазерного випромінювання. Це залежить від термічних і структурних властивостей зварювальних металів. Наприклад, цинк, алюміній, олово, тантал, вольфрам взагалі важко зварюються в відміну від платини, паладію, золота, м'якої сталі або нікелю.

Для безперервної лазерного зварювання так само як і для різання використовують лазери безперервної дії великої потужності. Як правило це газові CO<sub>2</sub>-лазери потужністю 0,2-2 кВт, а так само лазери на ітрій алюмінієвому гранаті потужністю 1 кВт. Використовувана потужність випромінювання дозволяє зварювати метали і сплави з малим коефіцієнтом температуропровідності (0,06-0,25 см<sup>2</sup>/с), тобто в основному корозійностійкі і м'які сталі, титан, тантал і сплави заліза, титану, нікелю з максимальною товщиною до 50 мм [10, 13].

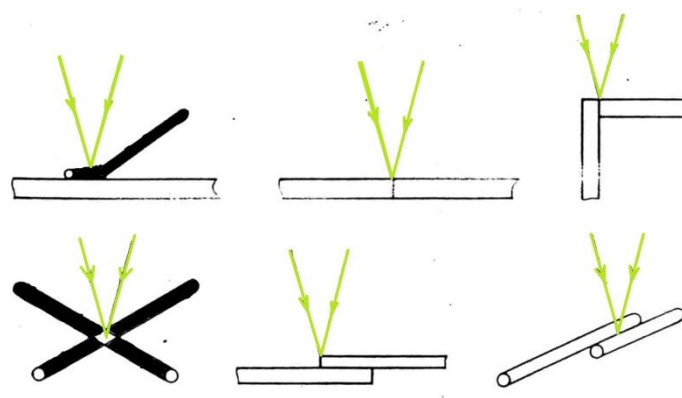


Рисунок 2.3 - Приклади розташування елементів (дроту і пластини) при точковому зварюванні лазером [10]

Для запобігання окислення розплавленого при зварюванні металу і видалення шару випарувався металу в місце зварювання підводиться через сопло струмінь стисненого газу (зазвичай аргон або гелій). Витрата газу при цьому становить близько  $0,4 \text{ м}^3/\text{год}$ . щільність потужності сфокусованого випромінювання  $\text{CO}_2$ -лазера застосовується для безперервного зварювання становить  $10^6\text{-}10^7 \text{ Вт/см}^2$  при діаметрі плями близько  $0,5 \text{ мм}$ . У цьому діапазоні щільності потужності вже відбувається сильне випаровування розплавленого металу. тиск парів досить велике, щоб не допустити негайного заливання лунки розплавленим металом, а й занадто мало для утворення хмари над місцем зварювання яке поглинало б і розсіювало лазерне випромінювання. Це забезпечує глибоке проникнення лазерного випромінювання в лунку шляхом його багаторазового відбиття від стінок. Нижче на рис. 2.4 показані форми найчастіше використовуваних лазерних швів.[10, 13, 14].

Після переміщення лазерного пучка лунка заповнюється рідким металом який поступово твердне. Типова довжина зварного шва близько  $10 \text{ см}$ . Оптимальний підбір параметрів зварювання дозволяє отримати відношення глибини шва до ширини як  $10: 1$ . Наприклад, стикового шов двох пластин зі сталі товщиною  $3,8 \text{ мм}$  зварених лазерним пучком потужністю  $90 \text{ кВт}$  зі швидкістю  $50 \text{ мм/с}$  має ширину на верху  $4 \text{ мм}$ , а внизу близько  $1,5 \text{ мм}$ . У діапазоні малих і середніх потужностей глибина шва лінійно залежить від потужності лазера і експоненційно від швидкості зварювання. Для великих потужностей залежність глибини шва від потужності випромінювання

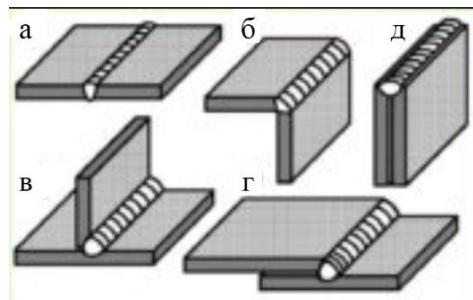


Рисунок 2.4 - Найчастіше використані види безперервних лазерних швів: а) стикового; б) кутовий; г)в напустку; д) по кромці [10]



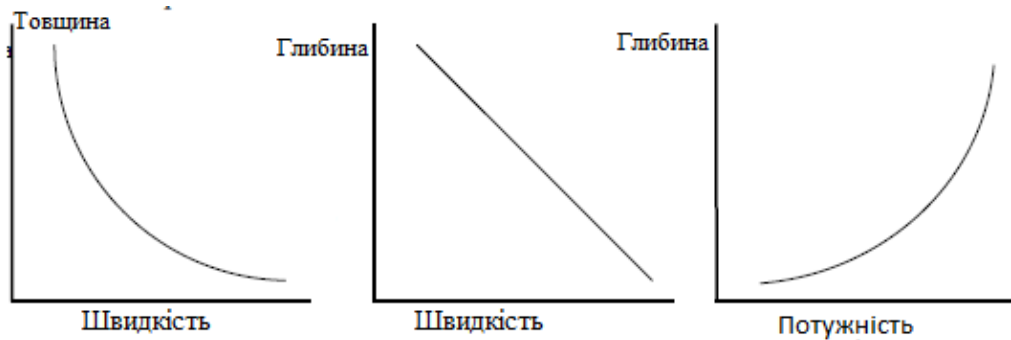


Рисунок 2.5 - Залежність глибини шва від потужності випромінювання описується статистичною залежністю [10]

описується статичною залежністю, що показано нижче на рис. 2.5. Залежно від потужності випромінювання необхідні глибини провару і властивостей зварюються швидкість лазерного зварювання коливається в межах 0,2-10 м/хв. [10, 13, 14].

Основні переваги лазерного зварювання перед зварюванням електронним пучком: зварювання в атмосфері повітря або захисного газу без вакууму; відсутність рентгенівського випромінювання; простота автоматизації процесу; більш низька вартість обладнання; більш низька вартість експлуатації. Міцність лазерних швів близька до міцності зварювальних матеріалів.[10, 13, 14]

**Лазерні механічні операції термообробки матеріалів.** Поверхнєве загартування має на меті збільшення твердості на поверхні і в біляповерхного шарі без значної деформації і окислення матеріалу. Для цієї метою використовують CO<sub>2</sub> лазери безперервної дії потужністю 1-10 кВт. Такі операції застосовують для гартування деталей зі сталі. Поглинання несфокусованого або малосфокусованого отримання лазера викликає почне збільшення температури поверхні сталі. Для збільшення поглинання випромінювання CO<sub>2</sub> лазера ( $\lambda = 10.6$  мкм), використовують покриття гартує поверхні шаром графіту. Температура гартує сталі повинна складати 800-900 °С, причому температура поверхні не повинна перевищувати 1200 °С. Наприклад, при щільності потужності, що поглинається випромінювання

близько  $8 \text{ кВт/см}^2$  в біляповерхньому шарі товщиною 0,5 мм досягається температура  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 0,05 сек.[10]

Припинення дії лазерного випромінювання або переміщення пучка в інше місце викликає різке зниження температури металу.

Лазерне плавлення поверхні металів виконують із застосуванням газових  $\text{CO}_2$  лазерів безперервної дії для металів без домішок або покриттів, а також покритих додатковими компонентами: хромом, графітом, кобальтом в вигляді порошків. Мета оплавлення - локальні зміни структури і властивостей певної ділянки поверхні, наприклад підвищення твердості, корозійної стійкості і т.п. Ця операція здійснюється в атмосфері нейтрального захисного газу.

Оплавлення поверхні без домішок або покриттів виконується на глибину 10 мкм за допомогою переміщення фокусованого пучка випромінювання з поверхневої густини потужності  $10^4\text{-}10^7 \text{ Вт/см}^2$  плавлення біляповерхневого шару, після припинення лазерного пучка, його затвердіння викликає утворення аморфних, квазістекловидних або ультрамікрокрісталічних структур.

Лазерний пучок, форма якого визначена маскою з вирізаними літерами або цифрами, проєкціюють зменшене зображення маски на маркувальну поверхню, що дозволяє локально видалити невеликий шар матеріалу у формі обраної букви або цифри. Для цієї мети в ПС застосовують імпульсні, рубінові або неодимові лазери з великою енергією імпульсу - близько 20 Дж. Гідність лазерного маркування - безконтактний вплив і відсутність деформацій і напружень в маркується матеріалі. При дослідженнях, проведених з рубіновим і неодимовим лазерами, маркування поверхні крем'яних пластин, пралень елементи магнітних головок. Висота наносяться знаків близько 1мм, а глибина ерозії матеріалу становить 10-20 мкм для кремінної поверхні і 2 мкм для феритній поверхні. Загальна тривалість маркування однієї кремнієвої пластини з семизначним числом становить 12 сек., а час маркування феритній поверхні 1-й цифрою – 1 с [10, 17].

Марковані знаки можна наносити на металеві, напівпровідникові, керамічні, пластикові та інші поверхні. промислово досягнуто розміри знаків 0,2-30 мм, поле запису 50 на 50 мм, швидкість маркування 2-0,1 с/знак, в залежності від величини і форми знаків (його площі) [10, 17].

## 2.2 Типи лазерів, що використовуються у лазерно-гравіювального обладнанні

**Волоконний лазер.** Волоконне обладнання - це різновид твердотільного обладнання для генерації високотемпературного випромінювання. Промінь, створюваний верстатами подібного типу, має довжину хвилі 1,064 мкм і відрізняється вкрай малим кутом розбіжності, високою потужністю, когерентністю, монохроматичністю. [15,18-20]



Рисунок 2.6 – Комплект до волоконного лазера [19]

Переважною сферою використання волоконних пристроїв є різка та гравіювання широкої групи металів і їх сплавів, а також обробка кераміки, каменю і деяких видів пластиків [15, 18-20].

Апарати лазерного різання на основі оптоволокна володіють максимальною кількістю виробничих переваг, чим і обумовлений той факт, що саме такі верстати можна зустріти сьогодні в більшості цехів дерево-, металообробки та інших промислових підприємств. В першу чергу необхідно згадати такі пункти, як:

- дуже висока потужність, багаторазово перевершує цей параметр у вуглекислотних лазерів. Для порівняння: максимальна потужність CO<sub>2</sub>-трубки не перевищує 200 Вт, в той час як середній показник волоконного пристрою становить 1000 Вт, а для деяких моделей навіть 10000 Вт не є межею (не так давно компанія IPG Photonics випустила багатомодовий волоконний апарат по металу потужністю 100 кВт);

- вкрай малий діаметр світлового плями при максимальній фокусуванні, завдяки чому інтенсивність випромінювання в зоні різку в 100 разів вище при її однаковій потужності з газовим лазером;

- крім типових для лазерного обладнання операцій з різання й гравірування, волокнування використовуються для зварювання металів і буріння отворів в звичайному і армованому бетоні;

- відсутність необхідності в придбанні великого асортименту інструментів для різних видів діяльності - лазер однаково успішно і з незмінною точністю справляється з різкою, зварюванням, гравіруванням, маркуванням і свердлінням. Крім того, єдиний універсальний інструмент економить не тільки фінанси, але і час, витрачений на обробку зразків;

- швидкість переміщення променя, сформованого волоконним верстатом, може досягати 12000 мм / с, тоді як для газового обладнання 700 мм / с є межею;

- малу вагу, компактність і, як наслідок, мобільність;
- відсутність витратних компонентів;
- дуже тривалий експлуатаційний період, який може доходити до 20 років (середня цифра становить 10-11 років).

Робота волоконного верстата заснована на використанні найтонших по діаметру ниток кварцу (400-600 мкм), що мають яскраво виражений відбивний ефект. Обов'язковою супутнім компонентом виступають напівпровідникові діоди, які накачують оптичний елемент енергією. Для стабільної роботи і виключення вірогідності ушкоджень волокно укладено в полімерну оболонку і зовнішнє захисне покриття. Потужність верстата

залежить від кількості доданих ламп (одна або кілька) і протяжності волоконного кабелю, середня довжина якого становить 20-40 м, а в окремих випадках може доходити до 100 м [15, 18-20].

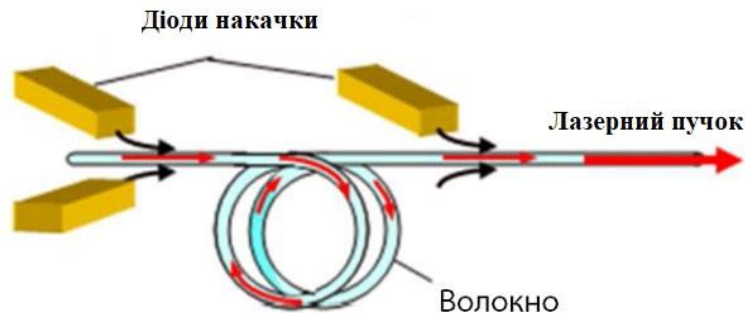


Рисунок 2.7 – Блок-схема волоконного лазера [20]

У самому волокні є кілька хвилеводів, один з яких (центральний, діаметром всього 6-12 мкм) має легуючих покриття, а інші є провідниками випромінювання, що надходить від діодів. Поступово насичуючись світлом від діодів, другорядні хвилеводи передають енергію в основний, приводячи волоконну середу (найбільш часто використовуваний тип покриття в промислових волоконних апаратів) в активний стан.

Для зручності зберігання, волоконний кабель скручують в бухту і укладають між зажимами, встановленими на кришці лазерної шафи.

Для поліпшення характеристик променя і збільшення його потужності на початку і кінці волоконного кабелю встановлюються відображаючі дзеркала (звичайне і напівпрозоре). Крім цього на крайні ділянки легованої ітербієм серцевини наносять насічки, формуючи дифракційну решітку, яка також називається бреггівською. Такий метод дозволяє регулювати довжину імпульсу і когерентність випромінювання.

При включенні волоконного устаткування загоряються діодні лампи і починається процес накачування волокна, після чого можна запускати програму обробки, закладену попередньо в пам'ять верстата або запущену через приєднаний до нього комп'ютер. Промінь, що виходить з одного з

кінців кабелю, падає на фокусуються лінзу, встановлену на рухомий лазерної голівці, і передається з її допомогою на поверхню матеріалу [15, 18-20].

**Лазер CO<sub>2</sub>.** CO<sub>2</sub> лазер або, по-іншому, вуглекислий лазер є одним з найпродуктивніших і потужних обладнань з випромінюванням безперервного характеру. Його широко використовують в різних сферах при роботі з різними матеріалами.

CO<sub>2</sub> лазер - зовсім недавній винахід, але вже по праву вважається одним з найпотужніших видів лазерів. З цієї причини багато хто вважає, що це обладнання має дуже високу вартість, але це не так.

Вуглекислий газ є одним з компонентів газової суміші, яка використовується в лазері. Енергія проходить шлях від системи накачування через газоподібну суміш і посилюється на виході резонатором. Завдяки такому пристрою, ККД обладнання може досягати 20% [21-23].

Існує кілька видів верстатів, що використовують вуглекислий газ, які мають своє призначення:

- Лазерний гравер CO<sub>2</sub>. Такий верстат дозволяє виконувати точне й чітке гравіювання на дерев'яних, пластикових, скляних, кам'яних і інших матеріалах.
- Верстат для різання. Устаткування цього типу виконує роботу з різання різних матеріалів, включаючи дерево, оргскло тощо.
- Маркери. Верстати цього типу наносять чітке зображення на ті ж матеріали, що і лазерний гравер CO<sub>2</sub>, а крім того можуть виконувати роботи з різання.

Всі вуглекислі лазери використовуються в легкій промисловості, медицині, поліграфії і інших галузях. Особливо варто відзначити застосування цього виду лазерів у військових технологіях, а саме в далекомірах прицілів [21-24].



Рисунок 2.8 – Фракційний CO<sub>2</sub> лазер, що застосовується у медицині [24]

Даний вид лазерів має свої переваги. В першу чергу, варто відзначити високу продуктивність лазерного обладнання на вуглекислому газі. Крім цього, CO<sub>2</sub> лазер, має цілий ряд переваг, серед яких виділяють наступні:

- висока швидкість роботи.
- можливість роботи з легко деформуються матеріалами. CO<sub>2</sub> лазер робить будь-які операції з тонкими матеріалами без ризику їх пошкодження.
- висока точність. Лазерний гравер CO<sub>2</sub> дозволяє дуже швидко виконувати ювелірну роботу для будь-яких виробів.
- відсутність необхідності подальшої обробки зрізів. CO<sub>2</sub> лазер виконує роботу акуратно, залишаючи рівний і гладкий зріз.
- робота з широким асортиментом матеріалів. Лазерні верстати дозволяють працювати з деревом, папером, склом, тканиною, полімерами та іншими матеріалами.
- Найголовніше - це повна автоматизація всіх робочих процесів за встановленою програмою.
- Поряд з вищеописаними перевагами, покупка такого устаткування відрізняється швидкою окупністю [21-24].

**Твердотільні лазери.** У твердотільних лазерах генерація випромінювання відбувається в твердому активному елементі, в якості якого використовують стрижні з кристалу штучного рубіна, скла з присадкою рідкоземельного елемента неодиму, алюмоітрієвого граната з добавкою неодиму.

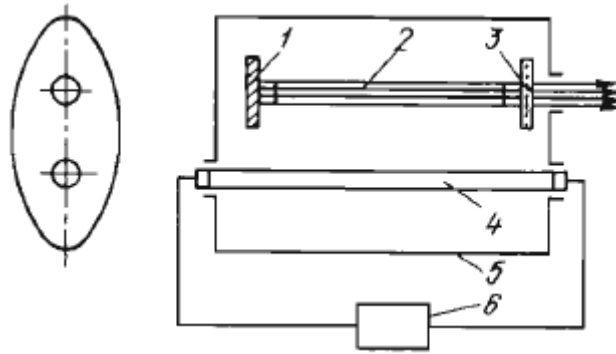


Рисунок 2.9 - Принципова схема твердотільного лазера [26]

Принцип дії: твердий активний елемент 2 розміщують в резонаторі між двома дзеркалами 1 і 3. Дзеркало 1 повністю відображає все падаюче на нього випромінювання, а дзеркало 3 є напівпрозорим. Оптичне накачування активного середовища здійснюється енергією газорозрядної лампи-спалаху 4 з джерелом живлення 6. Для отримання більш ефективного опромінення лампу 4 разом з активним елементом 2 поміщають в кожух 5, на внутрішню поверхню якого нанесено покриття, що відбиває типу срібла, золота та ін. Кожух 5 має еліптичну форму, а лампа і кристал розміщуються в фокусах еліпса [25-28].

Цим досягаються умови рівномірного і інтенсивного освітлення кристала. Твердотільний лазер з активними елементами у вигляді рубінового стрижня зазвичай працює в імпульсно-періодичному режимі випромінювання з тривалістю імпульсів  $10^{-3} \dots 10^{-9}$  с на довжині хвилі 0,69 мкм. Енергія випромінювання в імпульсі  $10^{-10} - 10^{-3}$  Дж при максимальній частоті повторення імпульсів 210 Гц.

Твердотільні лазери з використанням неодиму генерують випромінювання за схемою, дещо відмінною від схеми аналогічного процесу в лазері з рубіном. Генерація випромінювання в них створюється за чотирирівневої системи, яка більш прийнятна для ефективного отримання лазерного випромінювання.



Твердотільні лазери на склі з неодимом і на гранаті з неодимом генерують випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм і характеризуються високою потужністю випромінювання в імпульсі при імпульсно-періодичному режимі генерації. Частотний режим твердотільних неодимових лазерів змінюється в широких межах: 0,05 Гц. .. 50 кГц. При низьких частотах (0,1 .. 1 Гц) ці лазери здатні генерувати енергію в десятки джоулів в імпульсі при тривалості імпульсу близько 100 мкс [25-28].



Рисунок 2.10 - Зелений імпульсний твердотільний лазер [29]

Відмінною особливістю твердотільних лазерів на АІГ: Nd є можливість генерації випромінювання не тільки в імпульсно-періодичному, але і в безперервному режимі. Потужність безперервної генерації сучасних лазерів на АІГ: Nd досягає 0,5 - 2,0 кВт і вище. Електрооптичний ККД твердотільних лазерів з використанням лампового накачування активних елементів 1 - 3%.

Останні роки характеризуються високими темпами виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт в області твердотільних лазерів, рівень потужності випромінювання яких вже досяг 6-9 кВт.

В даний час в США, Західній Європі, Японії на ринку технологічних лазерів за темпами зростання обсягів продажів потужні твердотільні технологічні лазери стоять на першому місці [25-28].

Дуже перспективні розробки нових систем збудження активних елементів, коли замість ламп використовуються діоди. Це так звані твердотільні лазери з діодним накачуванням.

Конструкція такого лазера стає більш компактною і надійною в експлуатації, забезпечує високий ресурс роботи і значне підвищення електрооптичних ККД до 10% і вище. В даний час освоєно промисловий випуск твердотільних лазерів з діодним накачуванням в широкому діапазоні потужностей: від декількох ватів до декількох кіловат.

Твердотільні (АІГ: Nd)-технологічні лазери мають більш коротку довжину хвилі випромінювання (1,06 мкм) на відміну від CO<sub>2</sub>-лазера (10,6 мкм). Це дає можливість застосовувати для фокусування лінзи з простого оптичного скла, в той час як для CO<sub>2</sub>-лазера потрібні лінзи з таких дефіцитних матеріалів, як арсенід галію, германій, селенід цинку і ін.[28-28]

## РОЗДІЛ 3

### ПРИЛАД ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГРАВІРУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА БАЗІ ARDUINO UNO

В останні роки спостерігається тенденція на виготовлення будь – який станків за допомогою підручних матеріалів. Це тенденція не обійшла й галузь лазерної обробки матеріалів. У вільному доступі вже в наявності декілька десятків схем і відповідно компонентів для виготовлення власного лазерного граверу. Всі вони різняться за формою, розмірами на типом схеми Arduino для контролю й управління заданого приладу. У цьому розділі буде представлено одну з таких схем у «Міні» варіанті.

#### 3.1 Компоненти приладу

Для розробки лабораторного стенду було обрано схему підключення приладу через CNC Shield і спосіб підключення за яким буде використано «по – максимуму» підручних засобів. Для складання приладу було обрано наступні компоненти: DVD/CD «каретки» з шаговими двигунами × 2 шт.; корпус з блоку живлення × 1 шт.; нижня частина корпусу та пластмасовий тримач з DVD/CD приводу × 1 шт.; лазер на 1000 мВт × 1 шт.; плата Arduino Uno × 1 шт.; Плата CNC Shield × 1 шт.; драйвер шагового двигуна a4988 × 2 шт.; Блок живлення периферійний на 12В 5А × 1 шт; резистор на 10 кОм × 1 шт.; резистор на 47 Ом × 1 шт.; транзистор irfz44n × 1 шт. Також, для кріплення були застосовані два блоки с передньої панелі системного блоку, гайки, болти, шайби та комутаційні дроти. Зовнішній вигляд лабораторного стенду без підкладки представлено на рисунку 3.1

#### 3.2 Підключення приладу та характеристика компонентів

Схема підключення приладу представлена на рисунку 3.2. На блок живлення подаємо напругу 220 В шляхом підключення його штекеру з

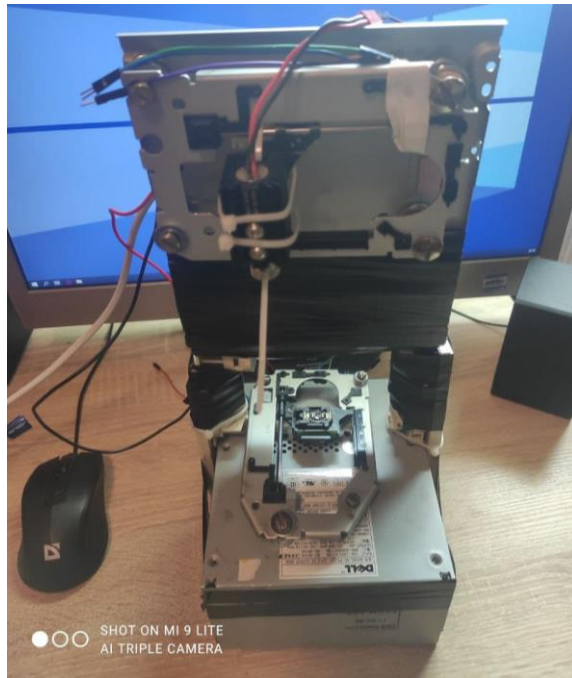


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд лабораторного стану без підкладки

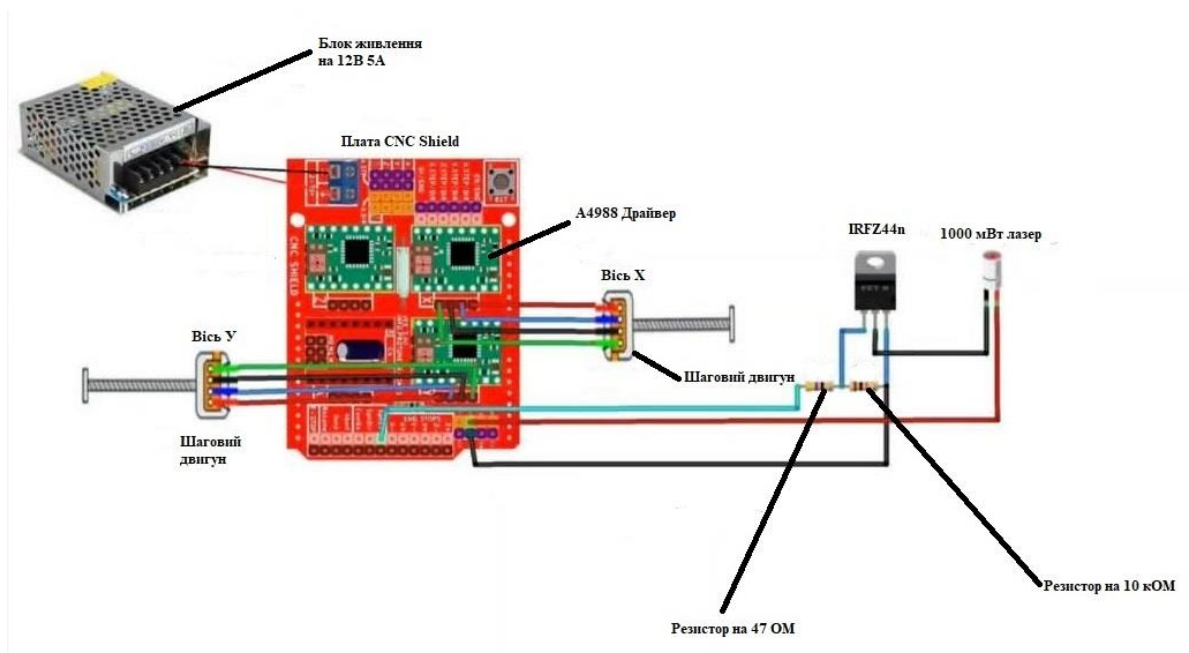


Рисунок 3.2 – Схема підключення приладу

Arduino Uno - це пристрій на основі мікроконтролера ATmega328 (datasheet) (рис. 3.3). У його склад входить все необхідне для зручної роботи з мікро контролером: 14 цифрових входів / виходів (з них 6 можуть використовуватися в якості ШІМ-виходів), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для всерединісхемного програмування (ICSP) і кнопка скидання. Для початку роботи з приладом досить просто подати живлення від AC / DC-адаптера або батарейки, або підключити його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю.

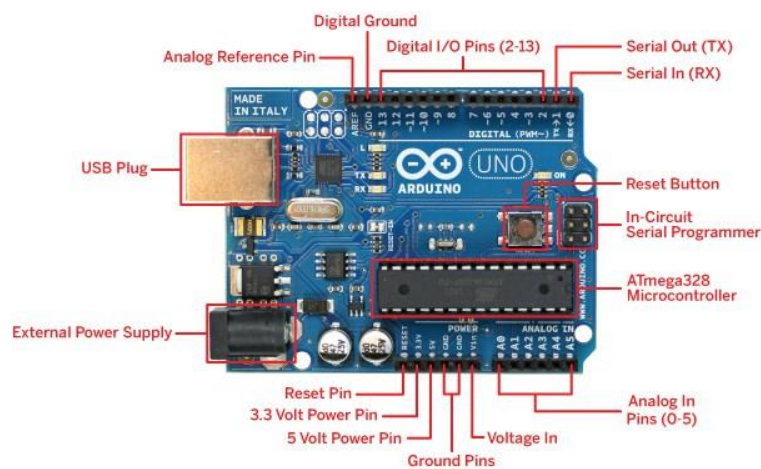


Рисунок 3.3 – Схема пінів підключення плати Arduino Uno [31]

На відміну від всіх попередніх плат Ардуіно, Uno в якості перетворювача інтерфейсів USB-UART використовує мікроконтролер ATmega16U2 (ATmega8U2 до версії R2) замість мікросхеми FTDI. На платі Arduino Uno версії R2 для спрощення процесу оновлення прошивки доданий резистор, що підтягує до землі лінію HWB мікроконтролера 8U2.

Зміни на платі версії R3 перераховані нижче:

- Терморегулятори 1.0: додані висновки SDA і SCL (біля виведення AREF), а також два нових виведення, розташованих біля виведення RESET. Перший - IOREF - дозволяє платам розширення підлаштуватися під робочу напругу Ардуіно. Даний висновок передбачений для сумісності плат розширення як з 5В-Ардуіно на базі мікроконтролерів AVR, так і з

3.3В-платами Arduino Due. Другий висновок ні до чого не приєднаний і зарезервованій для майбутніх цілей.

- Покращена стійкість ланцюга скидання.
- Мікроконтролер ATmega8U2 замінений на ATmega16U2.
- "Uno" (в перекладі з італійської - "один") названий з нагоди майбутнього випуску Arduino 1.0. Спільно з Arduino 1.0 дані пристрої будуть базовими версіями Ардуіно. Uno - еталонна модель платформи Arduino і є останньою в серії USB-плат; для порівняння з попередніми версіями, см. список плат Arduino.

Основні характеристики: мікроконтролер ATmega328, робоча напруга 5 В, напруга живлення (рекомендований) 7-12В, напруга живлення (граничне) 6-20 В, цифрові входи / виходи 14 (з них 6 можуть використовуватися в якості ШІМ-виходів), аналогові входи – 6, максимальний струм одного виведення 40 мА, максимальний вихідний струм виводу 3.3В - 50 мА, Flash-пам'ять 32 КБ (ATmega328), з яких 0.5 КБ використовуються загрузчиком, SRAM 2 КБ (ATmega328), EEPROM 1 КБ (ATmega328), тактова частота 16 МГц.

Arduino Uno може бути живиться від USB або від зовнішнього джерела живлення - тип джерела вибирається автоматично. В якості зовнішнього джерела живлення (НЕ USB) може використовуватися мережевий AC / DC-адаптер або акумулятор / батарея. Штекер адаптера (діаметр - 2.1мм, центральний контакт - позитивний) необхідно вставити у відповідний роз'єм живлення на платі. У разі живлення від акумулятора / батареї, її проводу необхідно під'єднати до висновків Gnd і Vin роз'єму POWER.

Напруга зовнішнього джерела живлення може бути в межах від 6 до 20 В. Однак, зменшення напруги живлення нижче 7В призводить до зменшення напруги на виводі 5V, що може стати причиною нестабільної роботи пристрою. Використання напруги більше 12В може призводити до перегріву стабілізатора напруги і виходу плати з ладу. З огляду на це,

рекомендується використовувати джерело живлення з напругою в діапазоні від 7 до 12В.[30, 31]

CNC Shield v3.00 - це плата, що дозволяє створити недорогий контролер для 3D принтерів, фрезерних, гравірувальних і лазерних ЧПУ верстатів, і інших пристроїв, що вимагають управління декількома кроковими двигунами. Плата сумісна з драйверами A4988 і DRV8825.

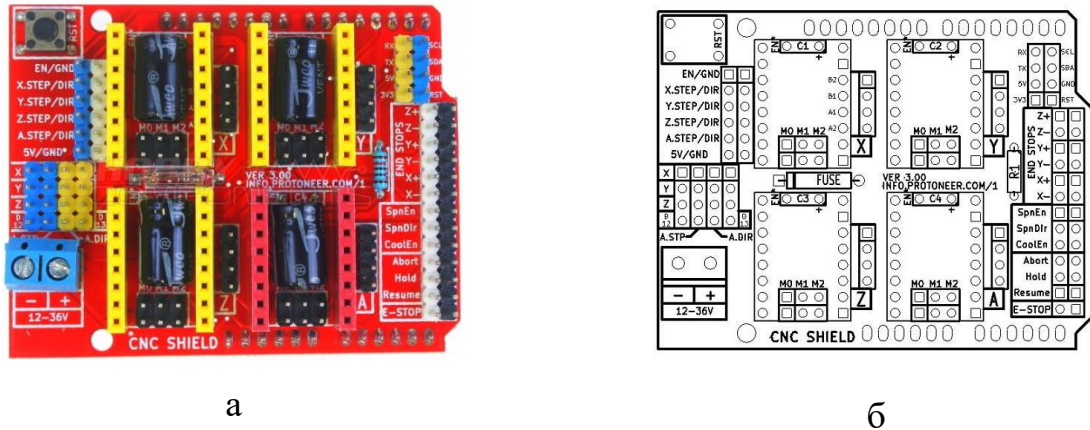


Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) плати CNC Shield [32]

Рекомендована програма для управління за допомогою Arduino UNO - GRBL, що дозволяє управляти пристроєм G-кодом. Для зручності використання на платі розведені контакти для установки різних режимів мікрошага, роз'єми для підключення кінцевиків, моторів, керуючих кнопок і управління шпинделем [32, 33]. Shield розрахований на роботу з двигунами при напрузі від 12 до 36 В і струмом до 2.2 А (для DRV8825). Зовнішній вигляд плати у зібраному варіанті з Arduino Uno представлено на рисунку 3.5.

Після того, як відбулося підключення плати Shield встановлюємо по три перемички під драйверами(для отримання роздільної здатності 1/16) та встановлюємо два драйвери A4988. Крокові двигуни являють собою електромеханічні пристрої, завданням яких є перетворення електричних імпульсів в переміщення валу двигуна на певний кут. Перевагами крокових двигунів в порівнянні з простими є:

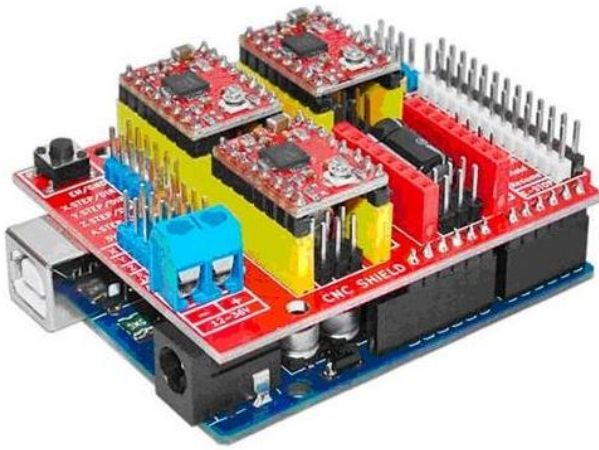


Рисунок 3.5 – Плата Arduino Uno з CNC Shield та драйверами A4988 [33]

- Висока точність позиціонування і повторюваності - якісні ШД мають точність не гірше 2,5% від величини кроку, при цьому дана помилка не накопичується при наступних кроках;
- Шаговий двигун може швидко стартувати, зупинятися і виконувати реверс;
- Чіткий взаємозв'язок кута повороту ротора від кількості вхідних імпульсів (в штатних режимах роботи) дозволяє виконувати позиціонування без застосування зворотного зв'язку;
- Крокові двигуни забезпечують отримання наднизьких швидкостей обертання валу без використання редуктора;
- Крокові двигуни працюють в широкому діапазоні швидкостей, оскільки швидкість безпосередньо залежить від кількості вхідних імпульсів.

Крокові двигуни застосовуються там, де потрібна висока точність переміщень. Приклади використання - принтери, факси і копіювальні машини, верстати з ЧПУ, 3D-принтери. Для керування шаговими двигунами використовують спеціальні пристрої - драйвери крокових двигунів. Популярний драйвер шагового двигуна A4988 працює від напруги 8 - 35 В і може забезпечити струм до 1 А на фазу без радіатора. Модуль A4988 має захист від перевантаження і перегріву. Одним з параметрів шагових двигунів є кількість кроків на один оборот 360 °. Наприклад, для шагових двигунів Nema17 це 200 кроків на оборот, тобто 1 крок дорівнює 1.8 °. Драйвер A4988



дозволяє збільшити це значення за рахунок можливості управління проміжними кроками і має п'ять режимів мікрошагу (1 (повний), 1/2, 1/4, 1/8 і 1/16) [34].

Після встановлення драйверу підключаємо плату CNC до блоку живлення всі інші компоненти підключаємо так, як показано на рисунку 3.2 та підключаємо через дрiт microUSB для подальшого програмування.

### 3.3 Програмування та характеристика програми

Для контролю роботи лазера було обрано програму Venbox Laser Engraver. Це програма для управління лазерним гравером. За допомогою неї ви можете налаштувати роботу лазера, задавати його хід (кроки, інтервал і т. Д.), Додати на ескіз різні елементи і багато іншого.

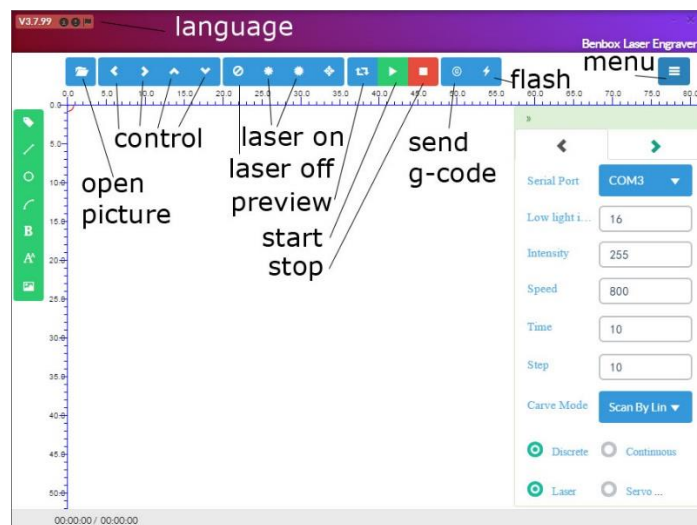


Рисунок 3.6 – Інтерфейс програми Venbox Laser Engraver

Інтерфейс Venbox Laser Engraver є вікно перегляду з панелями інструментів по краях і зверху. Вгорі знаходиться основна панель, звідки можна запустити або зупинити процес запису. Зліва є невеликий редактор, за допомогою якого можна змістити центр осей, намалювати різні фігури (коло, криві і прямі лінії і т.д.), додати текст. Ви можете як намалювати власний

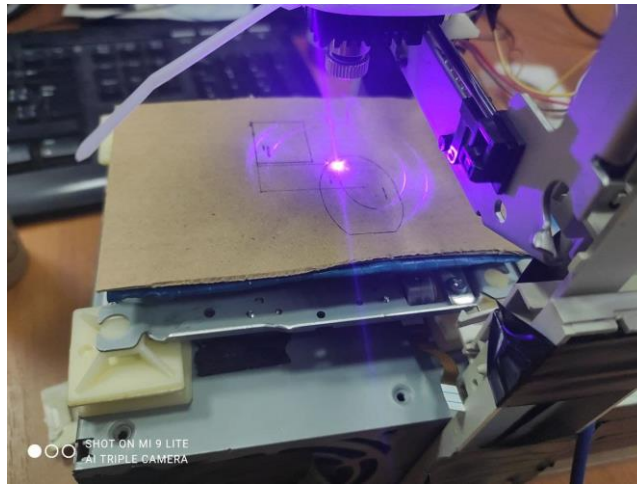


Рисунок 3.7 – Приклад гравірування пристроєм на базі Arduino

Щоб налаштувати роботу лазера, важливо скористатися правою панеллю інструментів. Тут вказується спосіб запису, час, інтервал, кількість кроків, інтенсивність, а також порт, до якого підключений гравер. Лазер може випалювати двома способами - по рядках та фігурно. [35, 36].

Особливості програми: налаштування роботи лазерного гравера; виставлення різних параметрів (швидкість, час тощо); підтримка G-кодів (достатньо скопіювати або прописати вручну інструкцію, і лазер буде по ній працювати [35,36]); можливість імпорту зображення; кілька типів запису; підтримка Windows XP і вище.

Після завантаження програми натискаємо в панелі інструментів кнопку «Update firmware» обираємо порт та файл прошивки .hex(який попередня завантажили з інтернету для гравірування за допомогою шагових двигунів з DVD/CD ромів). Далі завантажуюємо необхідний малюнок і натискаємо кнопку «Start». Головним нюансом роботи з даними лазерами є наявність спеціальних окулярів для захисту очей від попадання лазера. Після натиску клавіші «Start» лазер почне свою роботу, яка може тривати до декількох годин. Після закінчення ми отримаємо трафарет (рис. 3.7)

## ВИСНОВКИ

1. Лазер це генератор електромагнітних випромінювань оптичного діапазону, робота якого полягає у використанні вимушених випромінювань, принцип дії якого базується на властивості атома (складної квантової системи) випромінювати фотони при переході із збудженого стану в основний (з меншою енергією).

2. Проаналізовано класифікацію лазерів за принципом агрегатного стану активної речовини, за величиною випромінюваної потужності, за способом накачки, за довжиною хвилі та за режимом роботи .

3. Розглянуто основні види лазерів, які використовуються у промисловості такі, як волоконний лазер, твердотільний, діодний та вуглекислий лазер, виділено їх переваги такі як у випадку CO<sub>2</sub> - висока швидкість роботи, робота з широким асортиментом матеріалів. Для порівняння: максимальна потужність CO<sub>2</sub>-трубки не перевищує 200 Вт, в той час як середній показник волоконного пристрою становить 1000 Вт, а для деяких моделей навіть 10000 Вт не є межею.

4. Лазерні верстати дозволяють працювати з деревом, папером, склом, тканиною, полімерами та іншими матеріалами, а у випадку волоконного лазера - дуже висока потужність, багаторазово перевершує цей параметр у вуглекислотних лазерів.

5. Розглянуто пристрої на базі Arduino UNO. Проаналізовано їх складові такі, як крокові двигуни, які бувають як з DVD або CD приводів так й спеціалізовані, драйвери шагових двигунів, плати розширення CNC Shield та безпосередньо лазери, їх потужність та вивчено характеристики.

6. Зібрано пристрій на базі Arduino Uno і протестовано його в практичних умовах, було проведено тести на таких поверхнях, як картон, дерево, пластмаса та фанера. Встановлено, що даний тип лазера більш підходить до гравірування на тонких поверхнях, якщо обирати більш товсту поверхню, то потрібно ставити більший час затримки.



**СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Печалов А. Принцип дії лазерів. Основні види. [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://mirstankov.com/princip-raboty-lazera-osnovnye-vidy-lazerov/>. Дата доступу: 01.05.2021
2. Воробченко О. Лазер та його застосування [Електронний ресурс] – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.slideshare.net/olehvorobchenko/ss-33386449> Дата доступу: 01.05.2021
3. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Навчальний посібник // О.К. Шуайбов, І.І. Опачко, І.Е. Качер, М.П. Чучман, - Ужгород. Ужгородський національний університет, фізичний та інженерно-фізичний факультети. 2009. - с.238. Дата доступу: 01.05.2021
4. Що таке лазер? [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: [https://seltokphotonics.com/info/articles/shcho\\_take\\_lazer/](https://seltokphotonics.com/info/articles/shcho_take_lazer/). Дата доступу: 01.05.2021
5. Класифікація лазерів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://cordon.in.ua/content/Laser\\_types.php](http://cordon.in.ua/content/Laser_types.php). Дата доступу: 01.05.2021
6. Основні типи лазерів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ukrdoc.com.ua/text/980/index-1.html?page=39>. Дата доступу: 01.05.2021
7. Лазери у промисловості [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://altlaser.com/lazery-v-promyshlennosti/>. Дата доступу: 01.05.2021
8. Лазерна установка «Квант-9» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bse.sci-lib.com/particle014187.html>. Дата доступу: 01.05.2021
9. Застосування лазерів у промисловості [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: [https://piloramservis.ru/useful\\_tips/594/](https://piloramservis.ru/useful_tips/594/).

10. Лазерні технології та обладнання в виробництві приладів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://kafvp.kpi.ua/?page\\_id=3416](https://kafvp.kpi.ua/?page_id=3416). Дата доступу: 02.05.2021
11. Імпульсне лазерне осадження тонких плівок та нанорозмірних структур для активних середовищ лазерів [Електронний ресурс]. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <http://tekhnosfera.com/impulsnoe-lazernoe-napylenie-tonkih-plenok-i-nanorazmernih-struktur-dlya-aktivnyh-sred-lazerov>. Дата доступу: 02.05.2021
12. Лазерне свердління металів і інших матеріалів [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://slesario.ru/metalli-i-splavi/lazernoe-sverlenie-metalliv-i-drugich-materialov.html#:~:text=Лазерное%20сверление%20-%20это%20бесстружечная%20технология,частичное%20испарение%20материала%20этой%20заготовки>. Дата доступу: 02.05.2021
13. Лазерна сварка [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://lasercwm.com/blog/lazersvarka>. Дата доступу: 02.05.2021
14. Лазерне зварювання: надійний спосіб з'єднання металевих елементів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ils-mark.ru/technologies/lazernaya-svarka/>. Дата доступу: 02.05.2021
15. Як влаштований волоконний лазер [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://infolaser.ru/stati/kak-ustroen-volokonnyj-lazer/>. Дата доступу: 05.05.2021
16. Перспективи застосування лазерних технологій у виробництві легкої промисловості [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://лазер.рф/2018/02/15/7024/> Дата доступу: 05.05.2021
17. Застосування лазерних технологій обробки матеріалів в ювелірній галузі [Електронний ресурс]. – 2000. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.newlaser.ru/article/jeweler.php#:~:text=Лазерные%20технологии%20обработки%20материалов%20широко,применения%20лазеров%20в%20ювелирной%20отрасли> Дата доступу: 05.05.2021

18. Три основних типи лазерів [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://wood-masters.com.ua/ua/articles/152.html>. Дата доступу: 05.05.2021
19. МініМаркер 2 - M10/M20/M30/M50 [Електронний ресурс] – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.newlaser.ru/laser/lc/minimarker2.php>. Дата доступу: 05.05.2021
20. Як працює волоконний лазер [Електронний ресурс] – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://infolaser.ru/stati/kak-rabotaet-volokonnyj-lazer/>. Дата доступу: 05.05.2021
21. Переваги використання CO<sub>2</sub> лазерів [Електронний ресурс] – 2018 – Режим доступу до ресурсу: <https://www.stroibaza.ru/articles/one.php?id=9722>. Дата доступу: 05.05.2021
22. Принцип роботи вуглекислого (CO<sub>2</sub>) лазера [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://platinumlaser.com.ua/oborudovanie/co2-dot-laser/>. Дата доступу: 05.05.2021
23. Різноманітність і види лазерних верстатів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://front-sign.ru/index.php/poleznie-stati/itemlist/category/171-raznoobrazie-i-vidyi-lazernyih-stankov>. Дата доступу: 05.05.2021
24. ADSS Fractional CO2 Laser Skin Resurfacing Beauty Equipment (Fg 500) [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://adsschina.en.made-in-china.com/product/vMznFhClSqrD/China-ADSS-Fractional-CO2-Laser-Skin-Resurfacing-Beauty-Equipment-Fg-500-.html>. Дата доступу: 05.05.2021
25. Жукова М. Твердотільний лазер [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://photonica.pro/2018/05/26/tverdotelnyj-lazer/>. Дата доступу: 06.05.2021

26. Твердотільний лазер [Електронний ресурс] – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://weldzone.info/technology/lazernaya-svarka/855-tverdotelnye-lazery/> Дата доступу: 06.05.2021
27. Технологічні лазери вчора, сьогодні і завтра [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.informdom.com/metallrobrabotka/2015/2/tehnologicheskie-lazery-vchera-segodnya-i-zavtra.html>. Дата доступу: 06.05.2021
28. Загальна характеристика і особливості твердотільних лазерів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.teh-lib.ru/koe/tverdotelnye-lazery.html>. Дата доступу: 06.05.2021
29. Model DTL-419QT [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.laser-export.com/prod/419.html>.. Дата доступу: 06.05.2021
30. Arduino Uno [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno>. Дата доступу: 06.05.2021
31. Arduino UNO R3, Pin Diagram, Specification and Applications [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.elprocus.com/what-is-arduino-uno-r3-pin-diagram-specification-and-applications/>. Дата доступу: 06.05.2021
32. Arduino Compatible CNC Shield Instructions [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.zyltech.com/arduino-cnc-shield-instructions/> Дата доступу: 06.05.2021
33. Arduino UNO + Arduino CNC Shield V3.0+A4988 Installation Guide [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://osoyoo.com/2017/04/07/arduino-uno-cnc-shield-v3-0-a4988/>. Дата доступу: 06.05.2021
34. How To Control a Stepper Motor with A4988 Driver and Arduino [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу:



- <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/how-to-control-stepper-motor-with-a4988-driver-and-arduino/>. Дата доступу: 08.05.2021
35. Laser Engraver Update for XY-Plotter V2.0 [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://learn.makeblock.com/en/laser-engraver-update-for-xy-plotter-v2-0/>. Дата доступу: 08.05.2021
36. Benbox Laser Engraver 3.7 99 [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://besplatnye-programmy.com/raznoe-sistema/1660-upravlenie-lazernym-graverom-benbox-laser-engraver.html>. Дата доступу: 08.05.2021
37. Діодні лазери [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://epilasers.ru/diodnye-lazery-dlya-epilyacii/>. Дата доступу: 08.05.2021
38. Приклад лазерного свердління металу [Електронний ресурс] – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://protochka.su/wp-content/uploads/2019/12/4-4.jpg>. Дата доступу: 08.05.2021
39. Лазерний гравер що можна робити [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://schemy.ru/info/lazernyj-graver-hto-mozhno-delat/>. Дата доступу: 08.05.2021