

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**NAPALKOV Sergey Vasilievich** – Candidate of Pedagogical Sciences, Deputy Head of the Center for Management of Research Work of the Arzamas Branch of the UNN, Associate Professor of the Department of Applied Computer Science of the Faculty of Mathematics and Physics of the Arzamas Branch of the UNN

*Circle of research interests:* mathematical education, the use of modern educational technologies, Web-quest technology, productive learning of mathematics.

*Дата надходження рукопису 20.04.2019р.*

УДК 372.853

**НАУМЧИК Павло Іванович** –

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри ІВТ, метрології та фізики  
Чернігівського національного технологічного університету  
ORCID ID 0000-0002-1436-9111  
e-mail: naumchick.pavel@gmail.com

**ОБНОВЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ ШКІЛЬНОЇ ФІЗИКИ У СФЕРІ ВИВЧЕННЯ ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНІКИ**

**Постановка та обґрунтування актуальності проблеми.** У статті 12 Закону України «Про освіту» введено поняття компетентність: «компетентність – динамічна комбінація знань, умінь, навичок, способів мислення, поглядів, цінностей, інших особистих якостей, що визначає здатність особи успішно соціалізуватися, провадити професійну та подальшу навчальну діяльність» [8]. Цим самим Законом для загальної середньої освіти визначено 10 ключових компетентностей для нової української школи. Однією з них є компетентності в природничих науках і технологіях, які передбачають наукове розуміння природи й сучасних технологій, а також здатність застосовувати його в практичній діяльності. Уміння застосовувати науковий метод, спостерігати, аналізувати, формулювати гіпотези, збирати дані, проводити експерименти, аналізувати результати. З огляду на це можна зауважити про необхідність ознайомлення учнів на уроках фізики із сучасною технікою, яка використовується у виробництві й побуті.

Нами вже зверталась увага на те, що шкільна програма й сучасні підручники недостатньо висвітлюють досягнення науки і техніки [7]. Так, у нових шкільних підручниках із фізики часто можна зустріти матеріал про застарілу техніку, яка вже давно не використовується. Одним із прикладів такого навчального матеріалу є квантові генератори.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз шкільних підручників [1; 4; 6; 9] показав, що матеріал, який подається в них про квантові генератори, є безнадійно застарілим. Принцип роботи лазера описують на рубіновому лазері, який уже тривалий час практично не використовується. Проте про принцип роботи напівпровідникового лазера, випромінювання якого широко використовується на виробництві, медицині й побуті у вищезгаданих підручниках взагалі не розглядається.

Зазвичай у технічній літературі [2; 3; 5] і періодичних виданнях можна прочитати про будову і принцип дії напівпровідникових лазерів, але в навчальній програмі і шкільних підручниках, що

претендують на сучасні, описання цих добре відомих пристроїв немає. Більше того, більшість відеороликів у додатку YouTube також розповідають саме про рубіновий лазер, а про напівпровідниковий лазер відеороликів мало і якість їх не найкраща.

**Мета статті.** Ця стаття присвячена проблемі оновлення матеріалу шкільної фізики у сфері вивчення лазерної техніки й лазерного випромінювання. З цією метою коротко розглянута історія створення лазерної техніки. На рівні, доступному для учнів старшої школи, розглянуто будову і принцип дії напівпровідникового лазерного діода. Наведено приклади запитань і розрахункових задач із лазерної техніки.

**Методи дослідження.** У процесі дослідження використані такі методи: аналіз науково-педагогічної літератури та інформаційних джерел із питань лазерної техніки, систематизація та узагальнення результатів із теми дослідження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Коротка історія створення лазера.

Точкою відліку у створенні квантового генератора можна вважати розроблену у 1916 році А. Ейнштейном теорію взаємодії світла з речовиною і створення квантових підсилювачів хвиль. За якою, крім спонтанного поглинання і випромінювання світла атомом, існує ймовірність так званого вимушеного випромінювання, яке відбувається під час взаємодії збуджених атомів речовини з квантами світла.

Експериментально дослідити вимушене випромінювання вдалося у 1928 році вченому Ланденбургу під час дослідження зворотної дисперсії світла.

Спіраючись на теорію Ейнштейна у 1939 році, радянський фізик В. Фабрикант висунув ідею про можливість створення середовища, здатного підсилювати електромагнітне випромінювання, що проходить крізь це середовище. Але на той час розвиток техніки не дозволяв створити квантовий генератор.

У 1951 р. американський фізик Р. Гулд запропонував пристрій підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання. Англійською «Light Amplification Stimulated Emission Radiation» аббревіатурою LASER. Щоправда своє авторство у винаході йому довелося обстоювати через суд.

У 1957 р. радянські вчені А. Прохоров і Н. Басов встановили основні принципи створення генераторів і підсилувачів електромагнітних хвиль оптичного діапазону. У тому ж році американськими вченими Ч. Таунсом і А. Шавловим була опублікована праця, що описувала принцип дії лазера на парах лугів. За що у 1964 р. Ч. Таунс, О. Прохоров та М. Басов отримали нобелівську премію. 16 травня 1960 р. Т. Мейман виготовив перший у світі лазер, робочим тілом якого, є рубін. Цей лазер випромінював червоне когерентне випромінювання з довжиною 690 нм.

У подальшому почали з'являтися нові типи лазерів, робочим тілом яких були різні речовини. Наприклад, у 1960 р. А. Джаван, У. Беннет та Д. Хэррит розробили гелій-неоновий лазер, який і досі використовується.

Найбільш поширений нині напівпровідниковий інжекційний лазер було винайдено у 1962 р. Він безпосередньо перетворював електричний струм у інфрачервоне випромінювання.

Для пояснення принципу дії інжекторного напівпровідникового лазера слід ввести такі поняття, як спонтанне і вимушене випромінювання, інжекція та інверсна заселеність.

#### Спонтанне й вимушене випромінювання

Розрізняють два типи випромінювання: спонтанне і вимушене.

Спонтанне випромінювання виникає внаслідок самовільного квантового переходу атома зі збудженого стану в стан із меншою енергією. Випадковість спонтанних переходів призводить до того, що різні атоми випромінюють незалежно і не синхронно. Тому спонтанне випромінювання ненаправлене, некогерентне, неполяризоване і немонохроматичне.

Вимушені квантові переходи відбуваються під впливом зовнішнього збудження, яким є електромагнітне випромінювання. Імовірність таких переходів пропорційна інтенсивності збудження.

Якщо атом перебуває у збудженому стані  $Wm$  і на нього діє електромагнітне випромінювання з частотою  $\omega m$ , то це випромінювання сприяє переходу атома в нижчий стан. У результаті такого вимушеного переходу атом віддає енергію електромагнітної хвилі, кількість фотонів якої збільшується.

Для вимушеного випромінювання характерно: а) електромагнітний квант, що утворився під час вимушеного випромінювання, збігається за частотою, фазою і площиною поляризації з квантом, що викликав його утворення; б) електромагнітні кванти, що виникли під час вимушеного випромінювання, рухаються в тому ж напрямі, що і падаючі кванти.

#### Інверсна заселеність

Під **інверсною заселеністю** – слід розуміти такий стан фізичної квантово-механічної системи, в якому кількість частинок у збудженому стані перевищує кількість частинок в основному стані. У такій системі можливе утворення вимушеного випромінювання. Утворення інверсії називають накачуванням. Створюють інверсію населеності різними способами.

**Оптичне накачування** – здійснюють впливом на активну речовину електромагнітним випромінюванням.

**Електричне накачування** (електронний удар) – здійснюють електронним ударом, пучком електронів з енергією від кількох десятків електрон-вольт до мегаелектрон-вольт.

**Теплове накачування** – високотемпературне нагрівання речовини з наступним швидким охолодженням.

**Інжекцією неосновних носіїв заряду через р-п - перехід.** Під інжекцією розуміють процес переходу дірок з р-області до п-області р-п переходу, а електронів з п-області до р-області де вони рекомбінують. За певних умов електрон і дірка, перед рекомбінацією, можуть перебувати в одній області простору достатньо довго (до мікросекунд), утворюючи інверсну заселеність.

**Бомбардування високоенергетичних частинками** – на активну речовину спрямовується пучок попередньо прискорених електронів, що викликає збудження й іонізацію активних центрів.

#### Будова інжекційного напівпровідникового лазерного діода

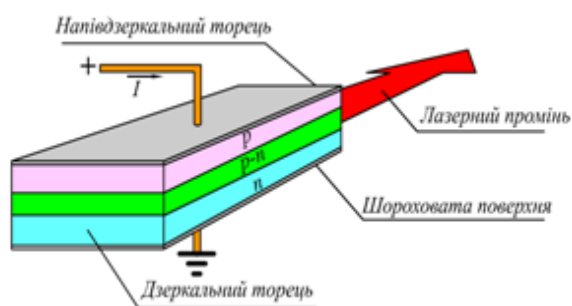


Рис. 1. Будова інжекційного напівпровідникового лазерного діода

Лазерний напівпровідниковий діод (рис. 1) виготовляють із кристалу нітриду галію для цього його легують із двох сторін так, щоб з одного боку вийшла п-область, а з іншого – р-область. Отримують р-п перехід, як і у звичайному діоді, тільки набагато більший за площею. Утворений напівпровідниковий діод ще й виконує функцію оптичного резонатора. Оптичний резонатор складається з двох плоскопаралельних дзеркал, одне з яких частково пропускає випромінювання. Для цього торцеві сторони пластини ретельно полірують до коефіцієнта віддзеркалення фотонів від граней кристала  $\sim 20-40\%$ . У результаті фотон, потрапивши всередину пластини під прямим кутом до полірованих торців, буде багаторазово

відбиватися. Такий резонатор отримав назву «резонатор Фабрі-Перро» названого на честь французьких фізиків Шарля Фабрі і Альфреда Перо, які першими запропонували використати дві частково посріблені скляні пластини для інтерферометра.

#### **Принцип дії інжекційного напівпровідникового лазерного діода**

При прямому включенні діода відбувається інжекція неосновних носіїв заряду, тобто переміщення дірок з р-області до негативного контакту й електронів з n-області до позитивного контакту. Таким чином електрони й дірки рухаються назустріч один одному. Якщо електрон і дірка «зближуються» на відстань, коли можливий тунельний ефект, то вони можуть рекомбінувати з виділенням енергії у вигляді фотона певної довжини хвилі. Завдяки прямому включенню лазерного діода з обох боків активного шару поблизу поверхні виникнуть потенційні бар'єри, де електрони й дірки, перед рекомбінацією, можуть перебувати в одній області простору достатньо довго (до мікросекунд). Що цілком достатньо для виникнення вимушеного випромінювання. Рекомбінація частини електронів із дірками викликає появу фотонів, що приводить до вимушеної рекомбінації майже всіх дірок і електронів, що перебувають в активному шарі діода. Рекомбінація супроводжується випромінюванням квантів світла з однаковою довжиною хвилі, енергія яких практично відповідає ширині забороненої зони. За законами статистики напрямки поширення утворених в активній області діода фотонів, рівновірогідні. Частина квантів, що висвітилися під прямим кутом до плоскопаралельних дзеркал активної зони будуть випромінюються назовні. Інша ж частина – багаторазово відбиватися від відполірованих торців, викликаючи індуковані переходи. Цей процес повторюється багато разів і приводить до лавинного наростання квантів. У результаті, завдяки властивостям індукованого випромінювання, в активній зоні напівпровідника утворюється потужний пучок монохроматичного, когерентного світла, який пройшовши крізь напівпрозоре дзеркало, утворює лазерний промінь. Потужність цього випроміненого променя буде пропорційна прикладеній напрузі.

Та ж частина квантів, яка висвітилась під прямим кутом до плоскопаралельних дзеркал, поглинається в пасивних областях діода.

Рекомбінація електронів і дірок призводять до виникнення струму – струму накачування. Кожен лазер має свій поріг для струму накачування, при перебільшенні якого відбувається генерація лазерного випромінювання. Якщо ж струм накачування менше порогового, лазер працює у світлодіодному режимі.

Слід зауважити, що в загальноосвітній школі програмою з фізики не передбачено вивчення зонної теорії провідності. Тому при поясненні випромінювання лазерного енергію квантів треба пояснювати не шириною забороненої зони, а енергією p-n переходу. І хоча це не зовсім

правильно, проте, на нашу думку, цілком достатнє для пояснення принципу утворення когерентного випромінювання.

#### **Властивості лазерного випромінювання.**

Випромінювання, що створюється звичайними джерелами світла (тепловими, люмінесцентними і т. ін.), відрізняється від лазерного тим, що основний внесок у випромінювання дають спонтанні переходи атомів зі збудженого рівня, тоді як у лазері переважає вимушене випромінювання. Цим пояснюються унікальні особливості лазерного випромінювання. А саме, лазерне випромінювання: когерентне, монохроматичне, високоспрямоване, поляризоване, має велику потужність і може створювати сильний тиск.

Висока спрямованість – для більшості лазерів розбіжність лазерного пучка (кут  $\theta$ ) становить кілька тисячних радіана.

До того ж лазерне випромінювання має властивість багатофотонності. Багатофотонність – це явище, за якого кілька електромагнітних квантів із сумарною енергією  $nh\nu$  поводять себе так, як один квант із частотою  $h(n\nu)$ .

Джерела лазерного випромінювання мають високий ступінь когерентності і монохроматичності. Тому лазери дозволяють реалізовувати значення спектральної густини до  $10^{12}$  Вт/Гц, що в  $10^6$  разів перевищує значення аналогічної величини при термоядерному вибуху. Під спектральною густиною розуміють величину, яка пропорційну середній потужності процесу  $p$  в інтервалі частот  $\Delta\nu$ . Одиниця вимірювання спектральної густини – Вт/Гц. Можливість отримання високих рівнів потужності лазерного випромінювання (до  $10^{12}$  Вт) і зосередження значної енергії в імпульсі (до  $10^4$  Дж) дозволяє викликати багатофотонність і інші нелінійні процеси в середовищі, локальний тепловий нагрів, швидке випаровування, гідродинамічний удар тощо.

Висока монохроматичність дає змогу: 1) проводити спектральний аналіз із роздільною здатністю на багато порядків вищою, ніж роздільна здатність звичайних спектрометрів; 2) здійснювати збудження вибіркових молекул у суміші; 3) застосовувати голографічні й інтерференційні методи когерентної діагностики біооб'єктів.

Для закріплення даного матеріалу можна використати такі завдання.

#### **Закріплення матеріалу.**

##### **Контрольні запитання.**

1. Які явище розуміють під спонтанним і вимушеним випромінюванням?
2. Що розуміють під інверсною заселеністю?
3. Що називають інжекцією неосновних носіїв заряду через p-n – перехід?
4. Які властивості лазерного випромінювання?
5. У чому полягає явище багатофотонності?

##### **Розрахункові задачі.**

**Задача 1.** Напівпровідникові лазери виготовлені на основі алюмінат галію, мають довжину хвилі 445 нм (темно синій колір) працює

при напрузі 3 В і силі струму 2 А. Знайти кількість фотонів, що випромінюється лазером за 1 с.

**Задача 2.** Зважаючи на умови попередньої задачі, встановіть, який тиск спричиняє лазерне випромінювання на абсолютно чорну поверхню, якщо діаметр світної плями 3 мм.

**Задача 3.** За даними умови задачі 1 встановіть, на якій відстані спостерігач зможе побачити промінь лазера, якщо око сприймає світло, коли на сітківку щосекунди потрапляє не менше  $n = 100$  фотонів? Діаметр зіниці  $d = 0,5$  см. Промінь лазера має вигляд конуса з кутом при вершині  $\alpha = 10^{-4}$  радіан.

**Задача 4.** Довжина хвилі лазерної вказівки 650 нм. Чи зможе її випромінювання викликати зовнішній фотоелектр на калію, якщо робота виходу з калію 2,8 еВ? Якщо зможе, то яку максимальну швидкість отримують при цьому фотоелектрони?

**Висновки з дослідження і перспективи подальших розробок.** З огляду на статтю 12 Закону України «Про освіту» необхідно оновити шкільну програму з фізики. І, на нашу думку, однією з таких інновацій повинна бути інформація про напівпровідникові лазери, представлена в цій статті. У сучасних шкільних підручниках з фізики навчальний матеріал про лазерну техніку є безнадійно застарілим і його потрібно оновити. Треба також зауважити про необхідність оновлення матеріалу підручників і з інших розділів, наприклад, таких як випромінювання електромагнітних хвиль, де більш детально пояснити, якими способами в сучасній техніці забезпечують високочастотні коливання зарядів. Бажано оновити і шкільний матеріал із квантової фізики, а саме більш детально розглянути внутрішній фотоелектр, який набув широкого використання в сучасній техніці. І таких прикладів можна навести багато. На наше переконання, такі оновлення сприятимуть більшій зацікавленості учнів під час вивчення предмета «Фізика».

#### СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Бар'яхтар В. Г., Божинова Ф. Я., Кірюхін М. М., Кірюхіна О. О. Фізика. 11 клас. Академічний рівень. Профільний рівень: підручник для загальноосвіт. навч. закл. Харків: Видавництво «Ранок», 2011. 320 с.
2. Грибковский В. П. Полупроводниковые лазеры: учеб. пособие по спец. «Радиофизика и электроника». Минск: Университетское, 1988. 304 с.
3. Датчики: справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012. 624 с.
4. Засекіна Т. М., Засекін Д. О. Фізика: підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (академічний рівень, профільний рівень). Харків: Сидія, 2011. 336 с.
5. Звелто О. Принципы лазеров / пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. 4-е изд. Санкт-Петербург: Лань, 2008. 720 с.
6. Коршак С. В., Ляшенко О. І., Савченко В. Ф. Фізика: 11 кл.: підруч. для загальноосвіт. навч. закл.: рівень стандарту. Київ: Генеза, 2011. 256 с.
7. Наумчик П. І. Сучасна техніка в курсі шкільної фізики. Вісник Чернігівського державного педагогічного

університету ім. Т. Г. Шевченка. Серія: Педагогічні науки. 2004. Вип. 23. С. 85–89.

8. Про освіту: Закон України від 05.09.2017 № 2145-VIII. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19> (дата звернення: 01.03.2019).

9. Сиротюк В. Д., Баштовий В. І. Фізика: підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (рівень стандарту). Харків: Сидія, 2011. 304 с.

#### REFERENCES

1. Baryakhtar, V. G., Bozhinova F. Y., Kiryukhin M. M. and Kiryukhina O. O. (2011). *Phyzyka 11 klas. Akademichnyi riven' . Profil'nyi riven' : pidrychnyk dlya zagalnoosvit. navch. zakl* [Physics. Grade 11. Academic level. Profile level: textbook for general educational institutions]. Publishing House «Ranok», Kharkiv, Ukraine.
2. Gribkovsky, V. P. (1988). *Poluprovodnykovye lazery: ycheb.posobie po spez. «Radiofyzika y elektronika»* [Semiconductor lasers: tutorial on specialty «Radio physics and electronics»]. University, Minsk, Russian.
3. Sharapova, V. M. and Polischuk, E. S. (2012). *Datchyky: spravochnoe posobie* [Sensors: reference manual]. Technosphere, Moscow, Russian.
4. Zasekina, T.,M. and Zasekin, D.,O. (2011). *Phyzyka pidrychnik dlya 11 klasy zagalnoosvit. navch. zakl. (akademichnyi riven', profyl'nyi riven')* [Physics: textbook for 11 grade: academic level, profile level]. Sitsya, Kharkiv, Ukraine.
5. Zvelto, O. (2008). *Prynzyipy lazerov* [Principles of lasers] / per. pod nauch. red. Shmaonova, T.A. Lan', St. Petersburg, Russian.
6. Korshak, E. V., Lyashenko, O. I. and Savchenko, V. F. (2011). *Phyzyka pidrychnik dlya 11 klasy zagalnoosvit. navch. Zakl (standartnyy riven')* [Physics: textbook for 11 grade for general educational institutions (standard level)]. Genesis, Kyiv, Ukraine.
7. Naumchik, P. I. (2004). *Sychasna tehnika v kursy shkilnoi fiziky* [Modern technique in the course of school physics]. *Bulletin of the Chernihiv State Pedagogical University T.G. Shevchenko. Series: Pedagogical Sciences.* № 23, 85–89.
8. About education: Law of Ukraine dated September 5, 2017 No. 2145-VIII, available at: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19> (accessed 24 March 2019).
9. Syrotyuk, V. D. and Bashtovy, V. I. (2011). *Phyzyka pidrychnik dlya 11 klasy zagalnoosvit. navch. zakl.: (riven' standarty)* [Physics: textbook for 11 grade for general educational institutions (standard level)]. Sitsya, Kharkiv, Ukraine.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**НАУМЧИК Павло Іванович** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри ІВТ, метрології та фізики Чернігівського національного технологічного університету.

**Наукові інтереси:** проблеми методики навчання фізики.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**NAUMCHIK Pavlo Ivanovich** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of ICT, Metrology and Physics of Chernihiv National Technological University.

**Circle of research interests:** problems of methodology of teaching physics.

*Дата надходження рукопису 28.03.2019р.*