

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.7

М. А. Філінюк д. т. н., проф.;

С. Є. Швейкіна, асп.

АНАЛІЗ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ЯК ОПТОНЕГАТРОНІВ

Наведено теоретичне обґрунтування застосування ряду світловипромінювальних приладів як оптонегатронних елементів, розроблено класифікацію оптонегатронів, визначено фактори, що впливають на появу від'ємного диференційного опору в світловипромінювальних приладах.

Постановка задачі

Остаточо сформувався молодий та перспективний науковий напрямок, підвалини якого сформовані на стику оптоелектроніки з негatronікою — оптонегатроніка [1]. Використання досягнень оптонегатроніки та проектування електронних пристроїв на базі напівпровідникових приладів, що мають у визначеному режимі від'ємне значення основного диференційного параметра, дозволяє підвищити ефективність, покращити техніко-економічні показники багатьох наявних електронних пристроїв та створювати якісно нові пристрої на оптонегатронній базі.

Постійне розширення елементної бази оптоелектроніки та галузей застосування світловипромінювальних приладів, оптичних квантових генераторів зокрема, дозволяє сформулювати задачу проведення аналізу світловипромінювальних пристроїв із розширеними функціональними можливостями як світловипромінювальних оптонегатронів.

Класифікація оптонегатронів

Відомо [2], що усі відомі на сьогоднішній день оптонегатрони класифікують таким чином:

— за основним диференційним параметром: з від'ємним опором (провідністю), від'ємною індуктивністю та від'ємною ємністю.

— за способом реалізації: фізичні, комбіновані, схемотехнічні аналоги.

— за кількістю електродів: двоелектродні та багатоелектродні

— за видом частотної характеристики: статичні та динамічні.

— за типом вольт-амперної характеристики (ВАХ): ВАХ λ -типу (λ -транзистор, λ -діод), ВАХ S-типу (лавинний транзистор, тиристор, динистор, одноперехідний транзистор та ін.), ВАХ N-типу (діоди Ганна, лавинні прилади, тунельні структури, гетеробіполярні транзистори).

Нещодавні дослідження електролюмінісцентних плівок [3] дозволили авторам розширити наявну класифікацію оптонегатронів, ввівши в неї ВАХ N-S-типу. Представниками оптонегатронів із подібною ВАХ є тонкоплівкові електролюмінісцентні випромінювачі на основі сульфиду цинку, легованого марганцем, виникнення «плавної» S-ділянки на ВАХ яких пов'язана з іонізацією та перезарядкою глибоких донорних центрів, зумовлених вакансіями цинку біля нижньої границі розділу, а ділянка від'ємного диференційного опору (ВДО) N-типу зумовлена об'ємним зарядом поблизу верхнього електрода.

— за здатністю працювати в оптичних режимах: фотоприйому — фотоприймальні оптонегатрони; світловипромінювання — **світловипромінювальні оптонегатрони**; в режимі оптопари — коли випромінювач світла, фотоприймач чи їх комбінація мають від'ємний диференційний опір.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Найпоширенішими з джерел оптичного випромінювання, що знаходять широке застосування в

схемах автоматики, світлових табло, оптронах є лазери, світловипромінювальні діоди, а також аморфні та полікристалеві тонкі плівки.

Але ряд досліджень свідчить, що подібні світловипромінювальні прилади мають ділянки від'ємного диференційного опору на вольт-амперній характеристиці, отже є оптонегатронами.

Так гетероструктури II типу на основі твердих розчинів In(Ga)AsSb, ізоперіодних із підложками InAs та GaSb, та квантово-розмірних структур, які в останні роки активно досліджувалися як структури, перспективні для створення лазерів, що працюють в спектральному діапазоні $\lambda = 3\text{—}5$ мкм [4—6], продемонстрували характеристики, властиві світловипромінювальним оптонегатронам.

В наш час у Фізико-технічному інституті ім. А. Ф. Іоффе проведені дослідження бістабільності інжекційної електролюмінесценції в лазерних подвійних гетероструктурах на основі гетеропереходів II типу $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{AsSb}$ з вузькозонною активною областю та асиметричними розривами зон на гетерограниці [7].

Досліджувані лазерні структури з високим вмістом алюмінію в обмежувальних шарах були вирошені методом рідкофазної епітаксії на підложці p-GaSb з активною областю із шару вузькозонного твердого розчину $\text{In}_{0,93}\text{Ga}_{0,07}\text{As}_{0,82}\text{Sb}_{0,18}$, розміщеного між двома шарами широкозонного твердого розчину $\text{Al}_{0,63}\text{Ga}_{0,37}\text{AsSb}$. Дослідження даної структури в квазістаціонарному режимі живлення імпульсами струму тривалістю 2,5 мс виявило у прямій гілці ВАХ помітну бістабільність струму J від прикладеної напруги U , характеристика має S-подібну форму з ділянкою ВДО та напругою включення $U_{\text{он}} = 3,6$ В (рис. 1а). Слід зазначити, що подібна ВАХ раніше спостерігалась в резонансно-тунельних подвійних гетероструктурах на основі InAs/AlGaSb [8].

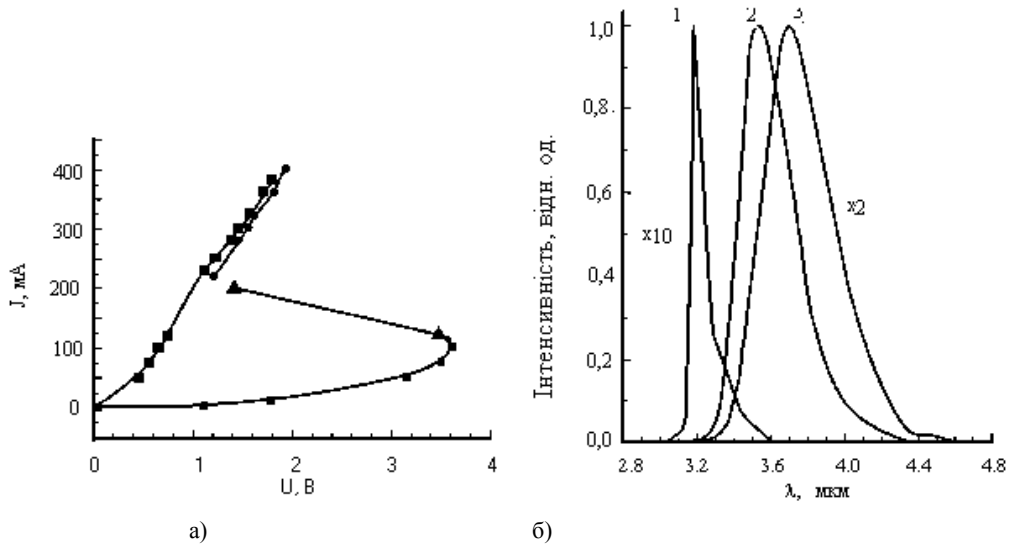


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика подвійної гетероструктури II типу p-AlGaAsSb/p-InGaSb/n-AlGaSb: а) прямую зміщенні; б) спектри електролюмінесценції коли напруга зовнішнього зміщення U : 1 — 1,1 В; 2 — 1,4 В; 3 — 1,8 В; $T = 77$ К.

Як видно з графіка, на першій ділянці прямої гілки ВАХ загальний струм через структуру повільно зростає та при напрузі включення не перевищує 60 мА. Після моменту включення (початок ділянки ВДО, $U = 3,47$ В) починає проявлятися слабка електролюмінесценція. Спектр випромінювання (рис. 1б) містить одну смугу з енергією фотона в максимумі $h\nu_m \cong 370$ еВ ($\lambda_m = 3,34$ мкм) та напівшириною порядку 30 меВ. Зі збільшенням струму керування спостерігається різкий спад напруги на структурі до 1,1 В та поява пороговим чином інтенсивної електролюмінесценції на кінці ділянки ВДО. В спектрі випромінювання при цьому спостерігаються одна вузька смуга з напівшириною 7—10 меВ асиметричної форми із різким короткохвильовим краєм (рис. 1б). Максимум смуги знаходився коли довжина хвилі $\lambda_m = 3,3$ мкм, що відповідає енергії фотона $h\nu_m = 376$ еВ. Слід зазначити, що ця смуга зсунута за енергією майже на 50 меВ порівняно з шириною забороненої зони активної області лазерної структури ($E_g = 0,326$ меВ).

Така бістабільність електролюмінесценції пов'язана з двома різними механізмами випромінювальної рекомбінації в активній області досліджуваної структури. Якщо накладається зовнішнє зміщення, то електролюмінесценція спочатку визначається тунельною інжекцією носіїв та прямою (інтерфейсною) випромінювальною рекомбінацією через гетерограницю електронів із кван-

тової ями. Коли великі значення напруги на структурі, то основний вклад починають вносити випромінювальні переходи в об'ємі активної області. Такі тунельно-інжекційні структури можуть бути використані для створення високоефективних інфрачервоних світловипромінювальних діодів, керованих струмом.

Мезаполоскові ж лазери на основі подвійних гетероструктур InGaSb(Gd)/InAsSbP ($\lambda = 3,0\text{—}3,3$ мкм) із довжиною резонатора 70...150 мкм [9], що мають ВАХ S-типу, є перспективними в галузі діодно-лазерної спектроскопії високого розподілення та газового аналізу, оскільки в діапазоні хвиль $\lambda = 3\text{...}4$ мкм лежать найсильніші смуги поглинання метану, формальдегіду та інших вуглеводнів.

Бістабільні лазери з поверхневою емісією у вертикальних резонаторах знайшли своє застосування у пристроях зчитування інформації з оптичних дисків. Зазвичай в таких системах зчитування інформації окрім лазера як оптичного джерела, використовують окремий зовнішній фотодетектор — для моніторингу променя, відбитого від оптичного диска. Рис. 2 [10] ілюструє схемне вирішення голівки оптичного сенсора поряд із схемою керування. Пристрій має с n-p-n конфігурацію. Нижня частина p-n переходу використовується для зміщення стандартного (дві квантові ями, склад $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$) регіону затвору. Крім того, одиночний зворотно зміщений абсорбер розміром $80\text{-}\text{\AA}$ розташований у верхній «дзеркальній» частині n-p переходу. Довжина резонатора та товщина поглиначи (абсорбера) розроблені таким чином, щоб умови Фабрі-Перо ($\lambda_{\text{FP}} = 959$ нм) резонатора застосовувались із дещо більшою довжиною хвилі, ніж дає абсорбер ($\lambda_{\text{abs}} = 948$ нм).

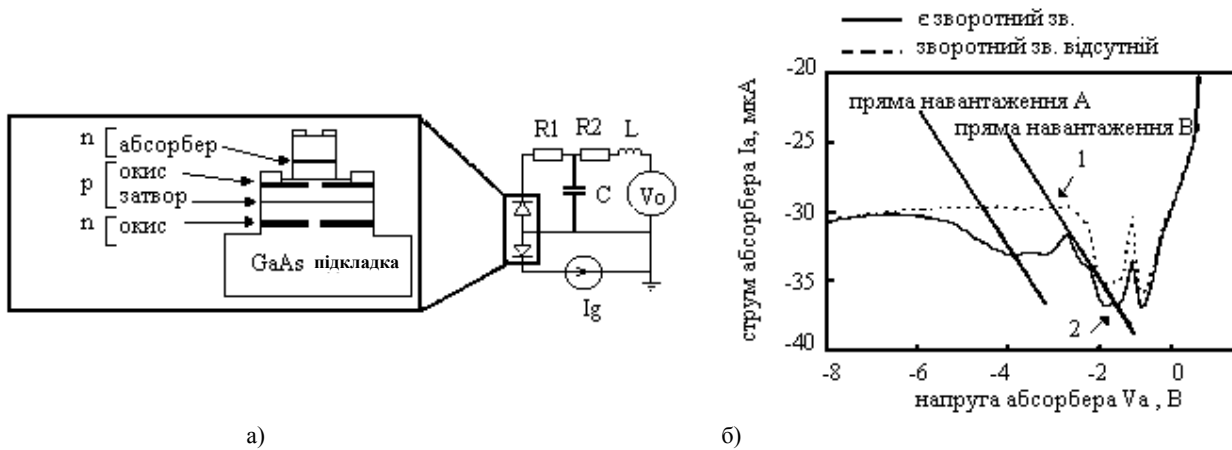


Рис. 2. Схематичне зображення оптичного сенсора із керувальним колом (а) та ВАХ лазера із абсорбером (б)

Оскільки довжина хвилі Фабрі-Перо довшя за довжину хвилі абсорбера, з'являється від'ємний диференційний опір, отже даний пристрій є оптонегатроном.

Це явище пояснюється зміщенням піків абсорбера вздовж довжини хвилі Фабрі-Перо, в зв'язку зі зростанням зворотного зміщення абсорбера V_a [11]. При зміщенні такого приладу, що зумовлює бістабільне оперування, лінія робочого навантаження спадає в режимі ВДО (рис. 2а, пряма навантаження А), а струм поглиначи на 7 мкА більший за наявності оптичного зворотного зв'язку. Якщо ж прилад працює в умовах зміщення поза режимом ВДО, то зміни струму абсорбера не перевищують 3 мкА за наявності зворотного зв'язку (пряма навантаження В на рис. 2б). Таке збільшення струму абсорбера в лазері завдяки наявності від'ємного диференційного опору призводить до збільшення амплітуди коливань контрольованої напруги абсорбера V_a . Подібна гнучкість приладу дозволяє досягати значного підсилення сигналу зчитування, яке було недоступним у звичайних фотодетекторах, що значно підвищує ефективність зчитувального пристрою.

До специфічних оптонегатронних пристроїв також належать діодні лазери видимого та інфрачервоного діапазону, які стали ядром інформаційних технологій, а в іншому кінці спектра — мікрохвильові та радіочастотні — ядром зв'язку та комунікаційних технологій.

Віднедавня задіяною є й терагерцева область між цими двома діапазонами (1—10 ТГц; $1\text{ ТГц} = 10^{12}$ Гц), що відкрило перспективи застосування діодних лазерів такого діапазону в хімічній галузі (хімічне детектування), астрономії, медичному моніторингу [12, 13]. Так, розроблений рядом авторів монолітний лазер терагерцевого діапазону, принцип дії якого оснований на внутрішньорівневих переходах всередині зони провідності напівпровідникової гетероструктури (GaAs/AlGaAs) [14], демонструє властивості оптонегатронів, проявляючи від'ємний диференційний опір коли

густина струму приблизно $850 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

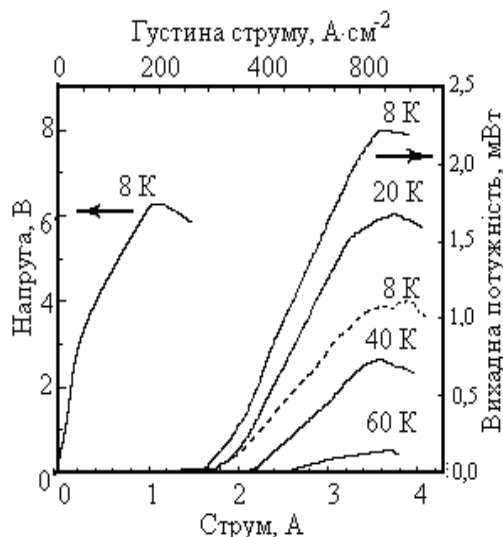


Рис. 3. Люкс-амперні та вольт-амперні характеристики лазера шириною 180 мкм та довжиною 3,1 мм. Дані зареєстровані в імпульсному режимі. При найнижчій температурі пристрій випромінює більше, ніж 2 мВт

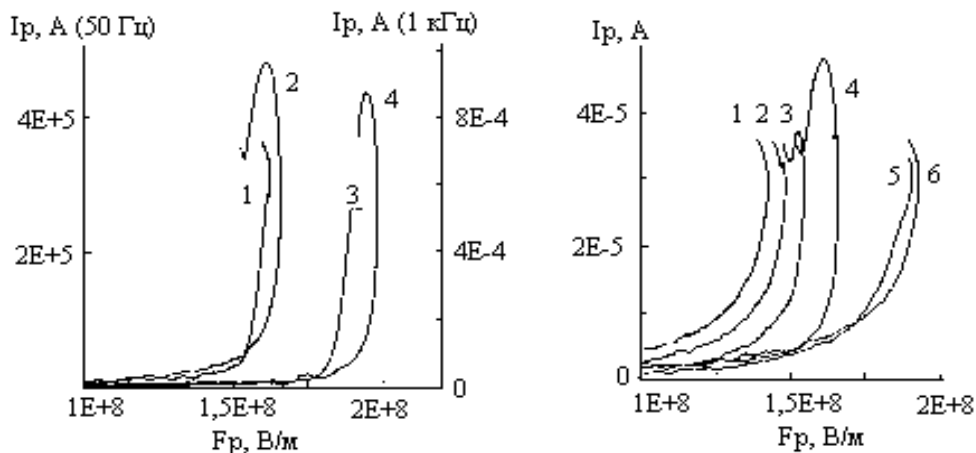
На рис. 3 зображено люкс-амперні та вольт-амперні характеристики такого пристрою. При температурі 8 К пік вихідної потужності перевищує 2 мВт із густиною порогового струму $290 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Це досить низьке значення, що дозволяє здійснення операції при високих робочих циклах (до 10 %).

Покращена структура [14] активної зони лазера поряд із оптимізацією виробництва роблять подібні прилади також перспективним «шляхом» до емісії коливаль, що не згасають та роботи при низьких температурах (температури рідкого азоту).

У якості світловипромінювальних оптоелектронів не менш активно, ніж лазери, використовуються аморфні та полікристалеві тонкі плівки.

Відомо, що на кінетику електролюмінісценції впливає об'ємний заряд в шарі люмінофору [15—17], який може в тому числі призводити до появи ділянки від'ємного диференційного опору S-типу на залежності струму, що протікає через шар люмінофору, в режимі випромінювання тонкоплівкового електролюмінісцентного випромінювача зі структурою метал-діелектрик-напівпровідник (люмінофор-

діелектрик-метал), від середнього поля в цьому шарі [17]. В той же час дані роботи [15] свідчать про існування, у певних умовах збудження люмінофору, на вказаній залежності ділянки ВДО N-



типу (рис. 4).

а) б)
Рис. 4. Залежності струму провідності від середнього поля в шарі люмінофору $I_p(F_p)$

Дані явища можна пояснити таким чином. Використовувана технологія отримання люмінофору приводить до появи дефіциту атомів цинку та надлишків атомів сірки біля нижньої границі розділу люмінофор-діелектрик та, навпаки, до надлишку атомів цинку та дефіциту атомів сірки верхньої границі розділу, виникнення відповідних дефектів структури (вакансії цинку, сірки, цинку між вузлами), різних комплексів та зумовлених ними мілких та глибоких донорних та акцепторних центрів [15—17]. В сильному електричному полі відбувається іонізація та перезарядка цих центрів з утворенням областей об'ємних зарядів біля анода та катода, причому поля цих об'ємних зарядів по-різному взаємодіють із зовнішнім полем, якщо різні полярності першого напівперіоду напруги збудження. Так, поява «плавної» S-ділянки на залежності $I_p(F_p)$ пов'язана, вірогідно, з іонізацією та перезарядкою глибоких донорних центрів, зумовлених вакансіями цинку біля ниж-

ньої границі розділу. Ділянка падіння струму на залежностях з областю ВДО S-типу та ділянка ВДО N-типу зумовлені об'ємним зарядом поблизу верхнього електрода.

Оптонегатронами також є ряд світловипромінювальних діодів, в яких спостерігається ВДО та струмова бістабільність, викликана введенням іонів бору [18]. В діоді при кімнатній температурі спостерігається значна електролюмінесценція на краю зони електронно-діркової рекомбінації кремнію із зовнішньою квантовою ефективністю 0,1%. Залежність загальної інтенсивності електролюмінесценції від інжекційного струму зображена на рисунку 5а.

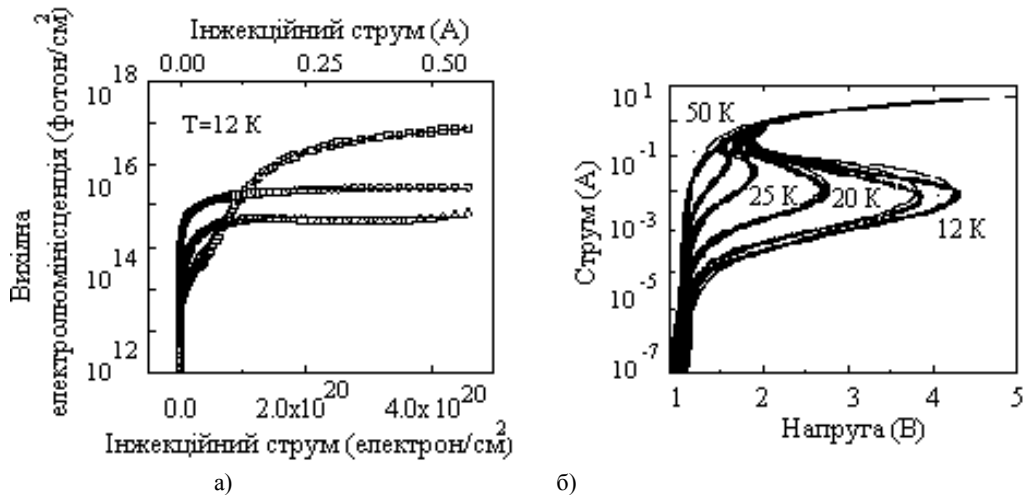


Рис. 5. Залежність електролюмінесценції вихідних фотонів від інжекційного струму для різних піків емісії (а); ВАХ кремнієвого діода при різних температурах (б). Внутрішній рисунок ілюструє температурну залежність інтенсивності електролюмінесценції

ВАХ діода (рис. 5б) ілюструє ділянку ВДО S-типу для температур 12...30 К. Область ВДО починається в стабільному низькострумовому стані та закінчується при високострумовому стабільному стані, коли розпочинається електролюмінесценція.

Висновки

1. Ряд факторів, пов'язаних із процесами розробки та виготовлення світловипромінювальних приладів (введення домішок, опромінення гама-променями [19] та ін.) й механізмами переносу носіїв всередині структури, спричиняють виникнення від'ємного диференційного опору у світловипромінювальних приладах, таких як ОКГ, світловипромінювальних діодах та ін. Даний факт свідчить про те, що такі прилади є оптонегатронами, які працюють у режимі світловипромінювання, що розширює їх функціональні можливості.

2. Як показав проведений аналіз, світловипромінювальні оптонегатрони можуть, окрім ВАХ S- або N-типу, мати характеристику S-N-типу, зумовлену асиметрією напівпровідникової структури, що не є типовим для негатронних приладів. Подібна поведінка характерна для тонкоплівкових електролюмінесцентних випромінювачів. Варто відзначити, що асиметрія напівпровідникової структури спричиняє також суттєве зростання ємності шару люмінофору випромінювачів та призводить до того, що ємність стає від'ємною.

3. Оптонегатронна елементна база є перспективною для прогресу у багатьох галузях.

Так створення оптонегатронів на основі лазерів із $\lambda = 3...5$ мкм важливе для розв'язання задач газового аналізу та екологічного моніторингу, адже в цьому діапазоні лежать смуги поглинання багатьох промислових газів. Такі тунельно-інжекційні структури також можуть бути використані для створення вискоелективних інфрачервоних світловипромінювальних діодів, керованих струмом. Мезаполоскові лазери на основі подвійних гетероструктур InGaSb(Gd)/InAsSbP ($\lambda = 3,0...3,3$ мкм) є перспективними в галузі діодно-лазерної спектроскопії високого розподілення та газового аналізу, оскільки в діапазоні хвиль $\lambda = 3...4$ мкм лежать найсильніші смуги поглинання метану, формальдегіду та інших вуглеводнів. Діодні лазери видимого та інфрачервоного діапазону перспективні для застосування в хімічній галузі (хімічне детектування), астрономії, медичному моніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Філінюк М. А. Оптонегатроніка — історичний шлях розвитку та перспективи // Оптоелектронні інформаційно-енергетичні технології. — 2001. — № 1. — С. 251—259.
2. Філінюк М. А., Швейкіна С. С. Аналіз сучасних досягнень в галузі оптонегатроніки // Вісник Технологічного університету Поділля. — Хмельницький. — 2004. — Т. 1. — № 1. — С. 172—176.
3. Гурин Н. Т., Шляпин А. В., Сабитов О. Ю. Отрицательное дифференциальное сопротивление в тонкопленочных электролюминисцентных излучателях на основе сульфида цинка // Журнал технической физики. — 2001. — Т. 71, № 3. — С. 72—75.
4. Baranov A. N., Imenkov A. N., Sherstnev V. V., Yakovlev Yu. P. 2,7—2,9 μm InAsSb (P)/InAsSbP low threshold diode lasers // Apply Physics Letters. — 1994. — V. 64. — P. 2480—2482.
5. Михайлова М. П., Андреев И. А., Воронина Т. И., Лагунова Т. С., Моисеев К. Д., Яковлев Ю. П. . Электролюминисценция квантово-размерных структур II типа InAs/GaSb // Письма в ЖТФ. — 1998. — Т. 24. — № 12. — С. 50—56.
6. Choi H. K., Turner C. W., Eglash S. J., Liao Z. I. 3.9- μm InAsSb/AlAsSb double-heterostructure diode lasers with high output power and improved temperature characteristics // Apply Physics Letters. — 1994. — V. 65. — P. 2251—2253.
7. Журтанов Б. Е., Моисеев К. Д., Михайлова М. П., Воронина Т. И., Стоянов Н. Д., Яковлев Ю. П. Бистабильность электролюминисценции в двойной гетероструктуре II типа AlGaAsSb/InGaAsSb // Физика и техника полупроводников. — 1999. — Т. 33. — № 3. — С. 357—361.
8. Show D. H., Schulman J. N. Intrinsic current bistability in InAs/Al_xGa_{1-x}Sb resonant tunneling devices // Apply Physics Letters. — 1994. — V. 64. — P. 76—78.
9. Айдаралиев М., Beyer T., Зотова Н. В., Карандашев С. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А., Стусь Н. М., Талалакин Н. Г. Лазеры на основе двойных гетероструктур InGaSb (Gd)/InAsSbP ($\lambda = 3,0—3,3$ мкм) для диодно-лазерной спектроскопии // ФТП. — Т. 34. — № 7. — 2000. — С. 881—885.
10. Lim S. F., Li G. S., Yuen W., and Chang-Hasnain C. J. Vertical-cavity lasers with intracavity resonant detector // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. — 1997. — V. 3. — P. 412—421.
11. Hudgings J. A., Stone R. J., Lim S. F., Li G. S., Yuen W., Lau K. Y. and Chang-Hasnain C. J. The physics of negative differential resistance of an intracavity voltage-controlled absorber an vertical-cavity surface-emitting laser // Appl. Phys. Lett. — 1998. — V. 73. — № 13. — P. 1796—1798.
12. Miles R. E., Harrison P. and Lippens D. (eds). Terahertz Sources and Systems // NATO Science Series II, Kluwer, Dordrecht. — 2001. — V. 27.
13. Han P. Y., Cho G. C. and Zhang X. C. Time-domain transillumination of biological tissue with terahertz pulses // Opt. Lett. — 2000. — Vol. 25. — P. 242—244.
14. Kohler R., Tredicuccl A., Beltram F., Beere H. E., Linfield E. H. and Fausto Rossi. Terahertz semiconductor-heterostructure laser // Nature. — 2002. — Vol. 417. — P. 156—159.
15. Singh V. P., Krishna S. // J. Appl. Phys. — 1991. — Vol. 70. — № 3. — P. 1811—1819.
16. Abu-Dayah A., Kobayashi S., Wager J. F. Internal charge-phosfor field characteristics of alternating-current thin-film electronic devices // Appl. Phys. Lett. — 1993. — Vol. 62. — № 7. — P. 744—746.
17. Neyts K. A., Corlatan D., De Visschere P. et al. // J. Appl. Phys. — 1994. — Vol. 75. — № 10. — P. 5339—5346.
18. Sun J. M., Dekorsy T., Skorupa W., Schmidt B. and Helm M. Current Bistability in Efficient Silicon Light-Emitting Diode // Annual Report IIM, FZR-362. — 2002. — P. 40—42.
19. Manzara V. S., Taratchnyk V. P. About differential resistance of gallium phosphide light diodes // Ukr. Fiz. Journ. — 2002. — № 2. — P. 196—199.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 12.11.04
Рекомендована до друку 6.01.05

Філінюк Микола Антонович — завідувач кафедри, **Швейкіна Світлана Євгенівна** — аспірант.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет.