



УДК 621.382.3, 621.382.7

ENERGY-EFFICIENT IR MODULATOR WITH SELF-FOCUSING CARRIER DISTRIBUTION IN TOROIDAL GEOMETRY FOR 6G COMMUNICATION SYSTEMS

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ІЧ-МОДУЛЯТОР З САМОФОКУСУЮЧИМ РОЗПОДІЛОМ
НОСІЇВ У ТОРОЇДАЛЬНІЙ ГЕОМЕТРІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 6G

Markolenko P.Yu. / Марколенко П.Ю.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-5636-5111

Irkha V.I. / Ірха В.І.

ORCID: 0009-0007-0628-5763

c.ph-m.s., as.prof. / к.ф.-м.н., доц.

Kozin O.B. / Козін О.Б.

ORCID: 0009-0000-4525-5953

c.ph-m.s., as.prof. / к.ф.-м.н., доц.

State University of Intellectual Technology and Communication,

Odessa, Kuznechna 1, 65023

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку,

Одеса, вул. Кузнєчна 1, 65023

Анотація. Представлено аналітичний огляд сучасного стану та перспектив розвитку інфрачервоних оптоелектронних модуляторів, орієнтованих на використання у фотонних системах зв'язку шостого покоління (6G). Запропоновано нову архітектуру ІЧ-модулятора з тороїдальною варизонною гетероструктурою та радіальним розподілом ширини забороненої зони, що забезпечує рівномірну модуляцію завдяки самовирівнюванню інжектованих носіїв заряду. Проведено математичне моделювання розподілу носіїв заряду та аналіз впливу конструктивних параметрів на глибину та стабільність модуляції. Наведено результати чисельного аналізу, порівняння з класичними структурами та перспективи інтеграції в фотонні інтегральні схеми (ФІС).

Ключові слова: оптоелектроніка, ІЧ-модулятор, варизонне поле, тороїдальна структура, 6G, гетероструктура.

Вступ.

Зростаючі вимоги до швидкості та енергоефективності у сучасних телекомунікаційних системах стимулюють розвиток нових типів високошвидкісних, малогабаритних, енергоефективних оптичних модуляторів, що здатні працювати у інфрачервоному діапазоні. Технології шостого покоління зв'язку (6G) потребують інтегрованих рішень на основі фотоніки, де модулятори відіграють ключову роль в обробці сигналів, вони орієнтовані на використання спектра терагерцового та ближнього інфрачервоного діапазонів. У таких системах особливого значення набувають оптоелектронні модулятори, здатні ефективно змінювати параметри оптичного сигналу.



Оптоелектронний модулятор виконує функцію активного елемента, який змінює інтенсивність, поляризацію або фазу світлової хвилі у відповідь на керуючий електричний сигнал. Ідеальний модулятор повинен поєднувати такі характеристики, як висока швидкість, мала напруга керування, висока глибина та однорідність модуляції, сумісність з фотонними інтегральними схемами [1–3].

Класичні модулятори на основі об'ємних напівпровідникових кристалів з *p-n*-переходами демонструють низку обмежень, пов'язаних з неоднорідним розподілом інжектованих носіїв заряду, великими габаритами та високим енергоспоживанням [4, 5]. У цьому контексті актуальним є пошук нових геометричних та матеріальних рішень, здатних забезпечити просторову однорідність та високу швидкість. В роботі запропоновано використання варизонних гетероструктур з тороїдальною топологією, які формують внутрішнє електричне поле для вирівнювання носіїв заряду та забезпечують однорідну модуляцію ІЧ-випромінювання [1, 6, 7].

Аналіз стану проблеми.

На сьогодні існує кілька основних типів оптичних модуляторів, що використовуються в інфрачервоному діапазоні:

- електрооптичні (на основі ефекту Поккельса або Керра);
- магнітооптичні (ефект Фарадея);
- акустооптичні (деформація кристалу хвилею);
- теплові та плазмонні модулятори;
- на основі поглинання носіями заряду — інжекція носіїв у напівпровідник.

Найбільш придатними для фотонної інтеграції є останні, які базуються на інжекції носіїв у напівпровідникові області, оскільки це дозволяє керувати світлом без складних структур чи зовнішніх полів, а також є відносно простим у реалізації на напівпровідникових матеріалах (GaAs, InP, GeSn тощо).

Основним недоліком таких пристроїв є просторово неоднорідний розподіл глибини модуляції по перерізу світлового пучка, особливо у структурах з широкою апертурою.



Це зумовлено нерівномірним розподілом концентрації інжекттованих носіїв заряду, яка, згідно з експоненціальним законом, зменшується зі збільшенням відстані від p - n -переходу.

Класичні підходи для подолання цієї проблеми це:

- модифікація геометрії кристалу (наприклад, трапецеїдальна або призматична форми);
- створення додаткових полів (дрейфових, магнітних);
- використання резонансних ефектів (квантові ями, точки).

Однак жоден із запропонованих методів не дає повного вирішення проблеми просторової неоднорідності модуляції у пристроях з широкою апертурою. Тому потрібні нові архітектури, здатні забезпечити природне вирівнювання інжекції.

Новизна дослідження.

У цьому дослідженні запропоновано нове рішення, що включає:

1. Тороїдальну геометрію оптоелектронного модулятора з кільцевим p - n -переходом, яка забезпечує симетричний розподіл інжекції носіїв навколо центра пристрою [1, 8].
2. Радіальний градієнт ширини забороненої зони $E_g(r)$ для створення у матеріалі варизонного електричного поля без зовнішнього джерела [4, 5, 9].
3. Самовирівнювання концентрації інжекттованих носіїв шляхом поєднання дрейфу, дифузії та внутрішнього поля, що забезпечує однорідну модуляцію навіть при великій апертурі світлового пучка.
4. Математичну модель, яка враховує радіальну симетрію, варизонне поле та температурні впливи.

Ці інновації дають змогу створити компактні, низьковольтні, енергоефективні модулятори, які можуть бути легко інтегровані у фотонні інтегральні схеми для систем 6G та інших високошвидкісних платформ.

Конструкція модулятора.

Запропонована конструкція модулятора базується на тороїдальній



гетероструктурі типу AlGaAs/GaAs або InGaAs/InP, у якій відбувається радіальне зменшення ширини забороненої зони від периферії до центру. Це досягається за допомогою градієнта складу легуючих елементів, тобто контрольованого варіювання вмісту легуючих компонентів у матеріалі (наприклад, вмісту Al в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).

На зовнішній периферії кристалу створюється кільцевий p - n -перехід, а в центральній частині — омичний контакт, що підключається до джерела керуючої напруги, рис. 1. Таким чином, інжекція неосновних носіїв заряду (наприклад, дірок) відбувається рівномірно по кільцю, а варизонне поле $E_v(r)$ спрямовує їх радіально до центру.

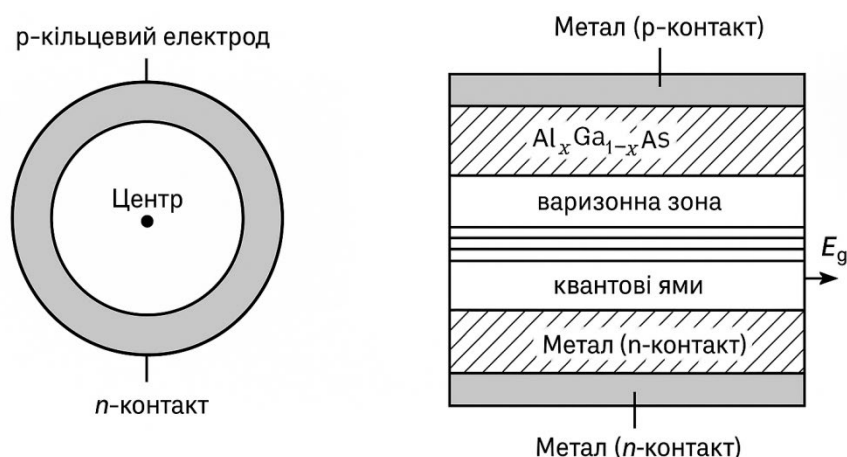


Рисунок 1 – Конструкція ІЧ-модулятора з варизонною гетероструктурою

Переваги такої конструкції:

- симетричність інжекції;
- рівномірна модуляція по площі апертури, по всьому перерізу оптичного пучка;
- компактність пристрою (радіус $\sim 10\text{--}50$ мкм);
- зниження втрат завдяки усуненню неоднорідності поглинання;
- можливість CMOS-інтеграції;
- зменшення робочої напруги;
- можливість масштабування для багатоканальних фотонних інтегральних схем (ФІС) [3].



Математичне обґрунтування.

Тороїдальна структура ІЧ-модулятора передбачає створення радіального градієнта ширини забороненої зони $E_g(r)$, який зумовлює варизонне електричне поле $E_v(r)$. Це поле сприяє вирівнюванню розподілу інжектованих неосновних носіїв заряду в активній області, підвищуючи однорідність модуляції світлового потоку [5, 7, 8].

Ширина забороненої зони змінюється за лінійним законом:

$$E_g(r) = E_{g0} - \Delta E_g \cdot \frac{r}{R}, \quad (1)$$

де: E_{g0} — ширина забороненої зони на периферії, ΔE_g — зміна ширини забороненої зони (0,2 — 0,3 еВ), $r \in [0, R]$ — радіус від центра до периферії пристрою, R — зовнішній радіус тороїдальної структури.

Внутрішнє варизонне електричне поле $E_v(r)$, яке виникає за рахунок градієнта енергетичної щільності, визначається виразом:

$$E_v(r) = \frac{1}{q} \cdot \frac{dE_g(r)}{dr}, \quad (2)$$

де q — елементарний заряд електрона.

Це поле є сталим за модулем у межах структури при лінійному профілі зменшення ширини забороненої зони від E_{g0} до $E_{g0} - \Delta E_g$, що є додатковою перевагою для створення рівномірного потоку носіїв заряду:

$$E_v = \frac{\Delta E_g}{qR}. \quad (3)$$

Це електричне поле не змінюється в межах радіального перерізу.

Розподіл концентрації носіїв у варизонному модуляторі описується рівнянням неперервності з урахуванням дрейфу та дифузії.

Носії заряду під дією цього поля рівномірно рухаються до центру. Рівняння неперервності набуває вигляду:

$$\frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dp}{dr} - \frac{p}{L_p^2} + \frac{\mu_p E_v}{D_p} \cdot \frac{dp}{dr} = 0, \quad (4)$$

або з урахуванням впливу 88-ри зонного поля:



$$\frac{dp(r)}{dr} = \left(\frac{1}{L_p} - \frac{q\mu_p E_v}{D_p} \right) \cdot p(r), \quad (5)$$

де $p(r)$ — концентрація неосновних носіїв на відстані r , $L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$ — дифузійна довжина для дірок, D_p та μ_p — коефіцієнт дифузії та мобільність дірок відповідно, τ_p — середній час життя носіїв [9, 10].

Звідки:

$$p(r) = p(0) \cdot \exp \left[\left(\frac{1}{L_p} - \frac{q\mu_p E_v}{D_p} \right) \cdot r \right]. \quad (6)$$

Для досягнення максимальної однорідності модуляції необхідно, щоб просторовий градієнт концентрації був мінімальним, тобто, щоб забезпечити практично рівномірний розподіл $p(r)$ в межах $r \in [0, R]$ необхідно виконати умову:

$$\left| \frac{dp}{dr} \right| \approx 0, \quad (7)$$

тобто

$$\frac{1}{L_p} \approx \frac{q\mu_p E_v}{D_p}, \quad E_v^{opt} = \frac{D_p}{q\mu_p L_p}. \quad (8)$$

У запропонованій гетероструктурі AlGaAs/GaAs реалізується радіальний градієнт ширини забороненої зони $E_g(r)$, що формує варизонне електричне поле $E_v(r)$, направлене від периферії до центру тороїда.

Для такої структури радіальний градієнт забороненої зони $\frac{dE_g(r)}{dr}$

знаходиться типово в межах від 0,25 до 1eВ/мкм, тому:

$$E_v^{opt} \approx (1,5 - 7) \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{см}}. \quad (9)$$

Результати моделювання та порівняльний аналіз.

Математичне та чисельне моделювання підтвердило ефективність використання варизонного поля для вирівнювання розподілу носіїв заряду в тороїдальній структурі [3–5].



На рис. 2 показана залежність $E_g(r)$ для різних профілів градієнтів ширини забороненої зони.

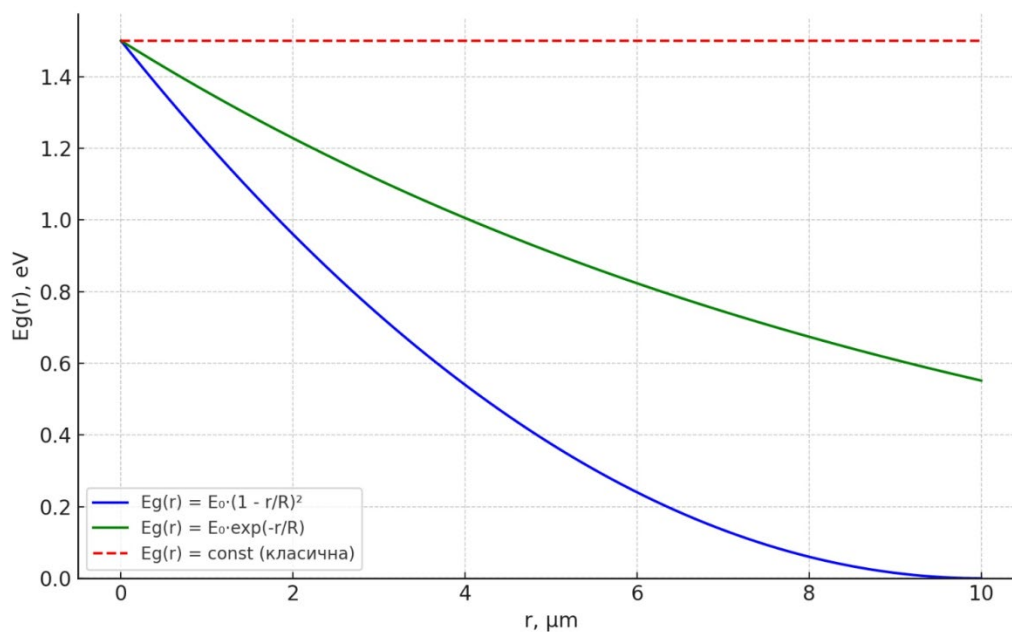


Рисунок 2 – Класичний та варизонний профілі ширини забороненої зони

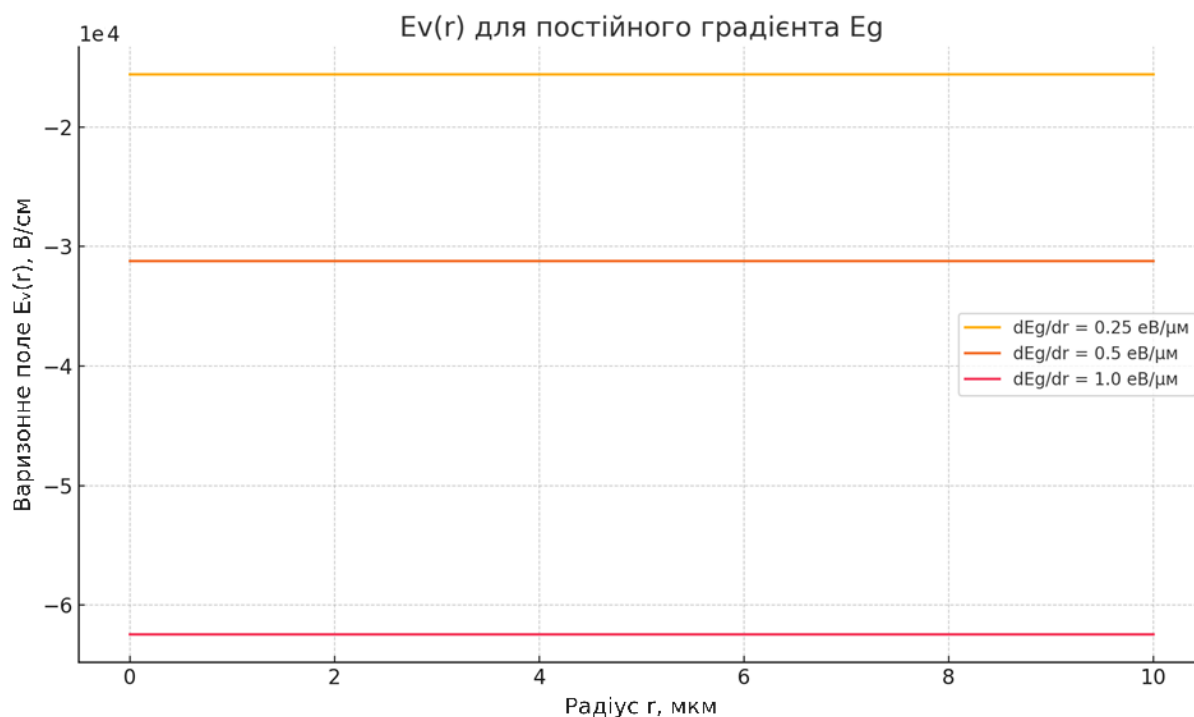


Рисунок 3 – Варизонне (градієнтне) електричне поле, яке виникає в напівпровіднику для різних сталих значень градієнту E_g



На рис. 3 показана залежність $E_v(r)$ у випадку, коли градієнт ширини забороненої зони $\frac{dE_g(r)}{dr}$ є постійним (тобто однаковим у всій структурі по радіусу) [5].

Цей графік допомагає підібрати такі геометричні та матеріальні параметри, щоб забезпечити оптимальну швидкодію носіїв у модуляторі, адже саме поле E_v впливає на дрейфову складову швидкості та рівномірність заповнення апертури.

На рис. 4 показана залежність $E_v(r)$ у випадку, коли залежність $E_g(r)$ є нелінійною.

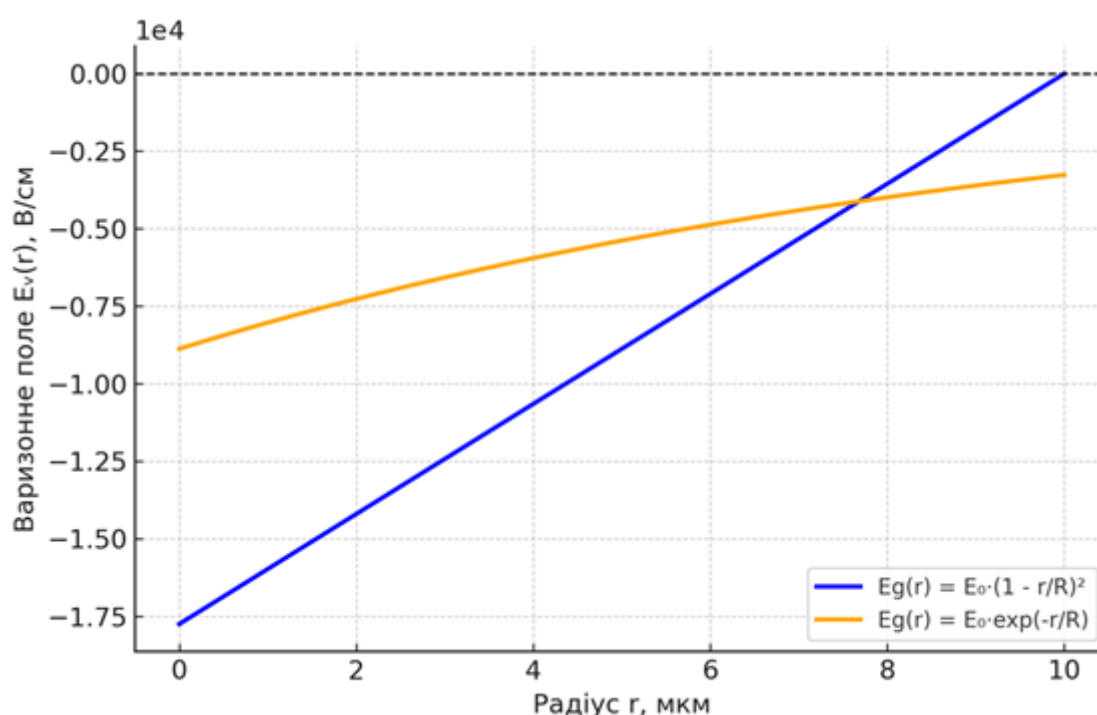


Рисунок 4 – Варизонне (градієнтне) електричне поле, яке виникає в напівпровіднику при нелінійних профілях E_g

Це забезпечує: направлений дрейф носіїв до центральної апертури, однорідність розподілу концентрації у зоні модуляції; зниження дифузійної складової часу відгуку.

На рис. 5 показано порівняння $p(r)/p(0)$ у звичайній та в тороїдальній варизонній структурах при оптимальному полі. Це підтверджує гіпотезу щодо покращення однорідності модуляції, що особливо важливо для широких пучків і масивних джерел світла.

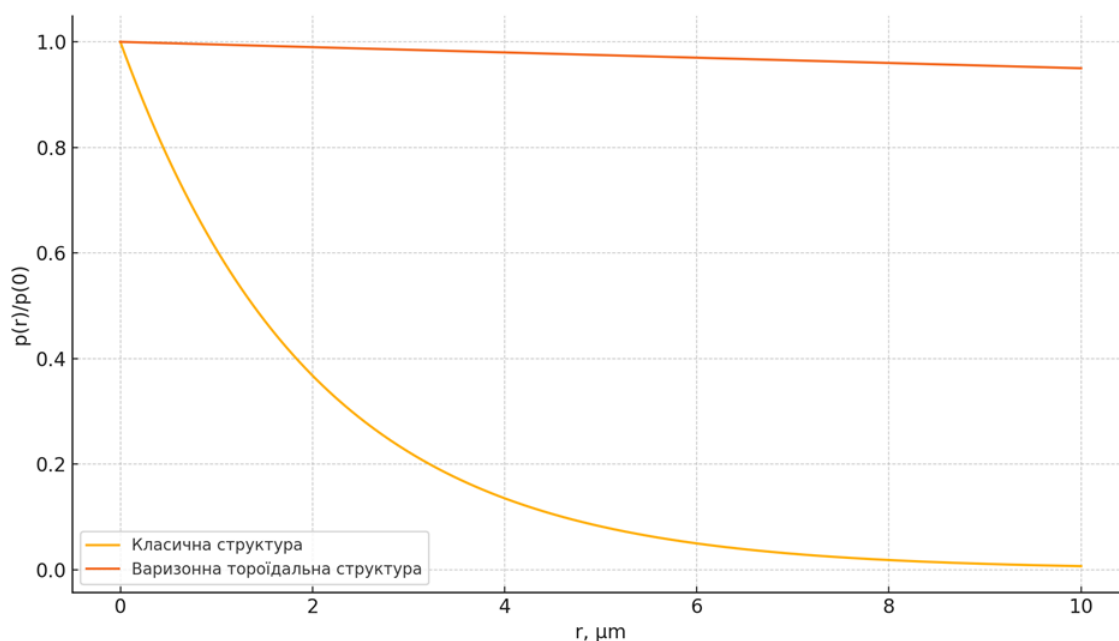


Рисунок 5 – Нормалізований розподіл концентрації дірок у напівпровіднику відносно центра структури

При моделюванні профілю концентрації дірок $p(r)/p(0)$ у діапазоні $r \in [0; 10 \text{ } \mu\text{m}]$ встановлено, що:

- у класичній прямокутній структурі спостерігається спад концентрації $p(r)$ на 30–50% від центра до краю;
- у варизонній тороїдальній структурі цей спад не перевищує 8%, а в разі оптимізації менш ніж 5%.

В умовах правильно підбраного градієнта $\frac{dE_g(r)}{dr}$, для $R=10 \text{ } \mu\text{m}$, коливання концентрації не перевищує 5%, що забезпечує глибоку та однорідну модуляцію світлового пучка.

Порівняльні характеристики структур, та можливість їх використання в системах 6G [2, 7] наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця ефективності

Параметр	Прямокутна структура	Варизонна тороїдальна структура
Однорідність модуляції	15–30% (низька)	більше 90% (висока)
Глибина модуляції	до 20%	до 45%
Робоча напруга	4–6 В	2,5–3 В



Швидкодія	до 10 ГГц	до 40 ГГц
CMOS-сумісність	обмежена	повна
Придатність до інтеграції в ФІС	обмежена	висока

Інтеграція в фотонні системи.

Така структура дає змогу ефективно інтегрувати модулятор у фотонні інтегральні схеми (ФІС), оскільки:

- її компактність (діаметр менш ніж 50 мкм) дозволяє вбудовування у багатоканальні мультиплексори;
- радіальна симетрія мінімізує паразитні втрати у хвилеводах;
- технологія сумісна з CMOS-платформами за рахунок використання AlGaAs або кремнієвих шарів;
- варизонний профіль можна формувати під час MOCVD/MBE-епітаксії на етапі зростання шару.

Очікується, що такі модулятори можуть знайти застосування в оптичних комутаторах, селективних ІЧ-фільтрах, системах лазерного датування (LiDAR), 6G-передавачах і приймачах для короткодистанційного зв'язку.

Висновки.

Варизонна тороїдальна структура, що запропонована дозволяє кардинально зменшити неоднорідність модуляції, підвищити швидкодію і зменшити робочі напруги в порівнянні з класичними модуляторами. Це відкриває перспективу її використання в системах інфрачервоного зв'язку 6G, фотонних мережах на чипі, мультиплексорах, сенсорних масивах і гібридній оптиці [11, 12].

Запропоновано нову архітектуру ІЧ-модулятора з тороїдальною варизонною гетероструктурою, що забезпечує самовирівнювання інжекттованих носіїв.

Математичне моделювання підтвердило зменшення неоднорідності модуляції до 5% по площі, що майже в 6 разів краще за класичні рішення [2 –4].

Отримані результати демонструють високу потенційну ефективність пристрою для застосування в системах 6G, фотонних модулях і



мініатюризованих сенсорах.

Структура придатна для виробництва з використанням сучасних технологій (MBE, MOCVD), що відкриває можливість її серійного виготовлення.

Література.

1. Xia F.t., Wang D., Cao J. et al. Vertical barrier heterostructures for reliable and high-performance self-powered infrared detection // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024. Vol. 16, No. 35. P. 46548–46559. DOI: 10.1021/acsami.4c04447.
2. Niu Z., Zhang B., Zhang Y. et al. Solid-state terahertz circuits for 6G: A review // *Chinese Journal of Electronics*. 2025. Vol. 34, No. 2. P. 373–400. DOI: 10.23919/cje.2023.00.279.
3. Herrmann E., Gao Hua, Huang Zhixiang et al. Modulators for mid-infrared and terahertz light // *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 128. No. 14. DOI: 10.1063/5.0025032.
4. Rogalski A., Hu W., Wang F., Martyniuk P. Performance of low-dimensional solid room-temperature photodetectors—critical view // *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 18. Art. 4522. DOI: 10.3390/ma17184522.
5. Malerba M, Pirotta S., Aubin G. et al. Ultrafast (10 GHz) mid-IR modulator based on ultra-fast electrical switching of the light-matter coupling // *Applied Physics Letters*. 2024. Vol. 125, Art. 041101. DOI: 10.48550/arXiv.2406.18097.
6. Phuong V. Pham, Srikrishna Chanakya Bodepudi, Khurram Shehzad et al. 2D Heterostructures for Ubiquitous Electronics and Optoelectronics: Principles, Opportunities, and Challenges // *Chemical Reviews*. 2022. Vol. 121, No. 6., P. 6514–6613. DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00735
7. Arif I. Inamdar, Hemanth Kumar Bangolla, Kuan-Fu Ho et al. Band Gap Engineering, Dark Conductivity, and Photoconductive Properties of Semiconductive Self-Assembled Rhenium Nanotube by Structural Topology Modification // *ACS Applied Electronic Materials* 2025. Vol. 7. No. 1. P. 533–541. DOI: 10.1021/acsaelm.4c02012
8. Perera A.G., Lao Y., Jabegu T., Lei S. Status of extended threshold wavelength



split-off band IR detectors and quantum material-based extension for room-temperature operation // *Micromachines*. 2025. Vol. 16, No. 3. Art. 286. DOI: 10.3390/mi16030286.

9. Шарапов В.М., Поліщук Е.С. та ін. Датчики. Черкаси: Брама-Україна. 2008. 1072 с.

10. Вікулін І.М., Назаренко О.А. Електронні датчики. Одеса: ДУІТЗ, 2023. 152 с.

11. Xi Z., et al. Advances in defect modulation strategies of InSb CQDs for IR photodetection // *Journal of Materials Chemistry A*. 2025. Vol. 13. P. 7055–7072. DOI: 10.1039/D4TA08486A.

12. Xi Y., Zhou Y., Cao X. *et al.* Broadband all-optical THz modulator based on Bi₂Te₃/Si heterostructure driven by UV-visible light // *Micromachines*. 2023. Vol. 14, No. 6, Art. 1237. DOI: 10.3390/mi14061237.

Abstract. *Presents an analytical overview of the current state and development prospects of infrared optoelectronic modulators designed for use in sixth-generation (6G) photonic communication systems. A novel architecture of an IR modulator is proposed, based on a toroidal variband heterostructure with a radial bandgap distribution that ensures uniform modulation through self-leveling of the injected charge carriers. Mathematical modeling of carrier distribution and analysis of the influence of structural parameters on modulation depth and stability have been carried out. The paper provides numerical analysis results, a comparison with classical structures, and outlines the prospects for integration into photonic integrated circuits (PICs).*

Keywords: *optoelectronics, IR modulator, variband field, toroidal structure, 6G, heterostructure.*

Стаття відправлена: 17.07.2025 р.

© Марколенко П.Ю.