



УДК 621.382.3, 621.382.7

VARIBAND TOROIDAL GRAPHENE-ASSISTED IR MODULATOR WITH SUBMICRON APERTURE FOR 6G PHOTONIC LINKS

ІНФРАЧЕРВОНИЙ ВАРІЗОННИЙ ТОРОЇДАЛЬНИЙ МОДУЛЯТОР З ГРАФЕНОВИМ ШАРОМ ТА СУБМІКРОННОЮ АПЕРТУРОЮ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ 6G ФОТОННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

Markolenko P.Yu. / Марколенко П.Ю.

с.т.с., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-5636-5111

Irkha V.I. / Ірха В.І.

ORCID: 0009-0007-0628-5763

с.ph-m.s., as.prof. / к.ф.-м.н., доц.

Kozin O.B. / Козін О.Б.

ORCID: 0009-0000-4525-5953

с.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 У роботі досліджено динамічні характеристики інфрачервоного варизонного оптоелектронного модулятора з тороїдальною гетероструктурою, що доповнена субмікронною апертурною структурою та шаром графену як модуляційним елементом. Проведено аналіз RC-часу, частотної передатної функції та затримки модуляції. Для дослідження електромагнітної взаємодії застосовано FDTD-моделювання з урахуванням хвильоводного з'єднання. Отримано параметри пропускання, відбиття та групової затримки в системах на частотах до 100 ГГц. Представлено порівняльний аналіз зі стандартними модуляторами на основі кремнію та InP.

Ключові слова: варизонний модулятор, графен, 6G, фотоніка, RC-час, FDTD, апертурне структурування, смуга пропускання.

Вступ.

У телекомунікаційних системах нового покоління (6G) очікується використання частот понад 100 ГГц, включаючи ближній інфрачервоний та терагерцовий діапазони. Одним із ключових компонентів таких систем є оптоелектронні модулятори, здатні швидко і точно керувати параметрами світлового сигналу. Проте більшість традиційних модуляторів демонструють обмежену смугу пропускання, велику ємність і значні втрати, що ускладнює їх застосування у високочастотних фотонних інтерфейсах [1].

У роботі запропоновано варизонну тороїдальну геометрію модулятора, яка забезпечує високу просторову однорідність модуляції [2]. Продовжуючи цю



ідею, ми зосереджуємося на динамічних характеристиках пристрою: RC-часі, швидкодії, фазовому відгуку, а також оптичній взаємодії з хвилеводом.

Крім того, ми пропонуємо застосування субмікронної апертурної структури для зменшення паразитної ємності та шару графену як активної модуляційної області. Для комплексного аналізу використовуємо методи частотного та електромагнітного моделювання, включаючи FDTD (Finite-Difference Time-Domain) симуляцію.

Загальний опис ІЧ-модулятора.

Модулятор має кільцеподібну (тороїдальну) структуру, сформовану з гетерошару AlGaAs/GaAs, в якому створено радіальний градієнт ширини забороненої зони $E_g(r)$.

У центральній частині розташовано субмікронну апертуру (отвір діаметром 100 — 450 нм), крізь яку проходить інфрачервоне випромінювання (наприклад, із лазерного джерела або хвилеводу). Вона потрібна для локалізації оптичного поля, зменшення ємності та направляє ІЧ-світло через активний модулюючий шар. Ця зона покрита графеновим шаром, який виступає активною модуляційною областю, з обох боків розташовані електроди для подачі керуючої напруги, рис. 1. При зменшенні ємності між електродами швидкодія зростає.

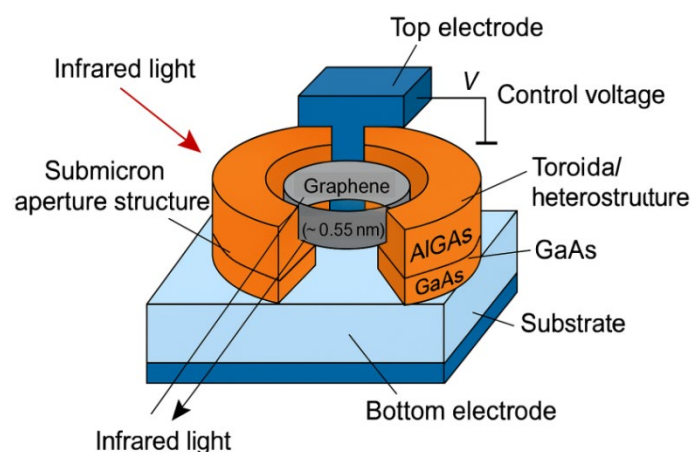


Рисунок 1 – Конструкція ІЧ-модулятора з варизонною гетероструктурою та графеновим шаром



Під дією керуючої напруги змінюється електричний потенціал у графені, що впливає на його здатність поглинати ІЧ-фотони [3]. Таким чином, змінюється рівень пропускання або поглинання світлового сигналу. Використання субмікронної апертури зменшує паразитну ємність, а графен забезпечує високу швидкодію завдяки своїм 2D-властивостям [4].

Модулятор забезпечує глибоку і швидко модуляцію сигналу з низькими втратами, що робить його придатним для фотонних інтегральних схем 6G.

Принцип дії.

Коли на електроди подається керуюча напруга, через гетероструктуру інжектуються неосновні носії заряду (дірки або електрони, залежно від типу).

За рахунок градієнту $E_g(r)$ у тороїдальному шарі виникає варизонне поле $E_v(r)$, яке направляє носії радіально до центру. Це забезпечує самовирівнювання концентрації носіїв в активній зоні.

Крізь зону апертури проходить ІЧ-світло. Світло взаємодіє з матеріалом, де знаходяться інжектвані носії, а також із графеновим шаром, який виступає активним модуляційним елементом, має високий коефіцієнт поглинання, який залежить від хімічного потенціалу (керованого електричною напругою) та дозволяє змінювати коефіцієнт поглинання на частотах до 100 ГГц і вище.

Інфрачервоне випромінювання на виході буде послаблене (або незмінене) в залежності від концентрації носіїв у графені та підлеглому шарі.

Субмікронна апертура концентрує поле, зменшує ємність модулятора, забезпечує високу локальну інтенсивність поля в графені та мінімізує паразитне розсіювання.

Керуючи напругою V , змінюється рівень заповнення графену носіями, положення Фермі-рівня, ефективність поглинання фотонів (через ефект Паулі та міжзонні переходи) [5].

Це дозволяє модулятору діяти як перемикач, або як аналоговий модулятор інтенсивності ІЧ-сигналу.

Поєднання гетероструктури з градієнтом E_g , апертурного структурування та графенового модуляційного шару дозволяє отримати високошвидкісний,



компактний та ефективний ГЧ-модулятор, придатний для фотонних інтегральних схем у мережах 6G [6].

Теоретична модель динаміки.

Варизонна структура з графеновим або іншим 2D-шаром як активною областю, разом із субмікронною апертурою, може бути змодельована як **RC**-ділянка першого порядку, де R — ефективний опір модуляційного шару (наприклад, графену), C — сумарна ємність активної зони, обмеженої апертурою.

Частотна характеристика системи описується передатною функцією:

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}}, \quad (1)$$

де f — частота електричного сигналу модуляції.

Ємність C залежить від площі перекриття та товщини діелектричного шару:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (2)$$

де A — площа апертури (субмікронна: $0,2 \times 0,2 \text{ мкм}^2$), d — товщина бар'єра (50–100 нм), ε — відносна діелектрична проникність.

При використанні апертури діаметром 200 нм ємність модуляційного переходу зменшується в десятки разів, що критично впливає на швидкодію.

Застосування графену дає низку переваг, а саме: швидкість — графен має наносекундну-пікосекундну реакцію; налаштовуваність — оптичні властивості легко змінюються електрично; сумісність — можна інтегрувати з AlGaAs/GaAs, Si, InP; компактність — один атомний шар (ультратонка модуляційна зона) [7].

Графен як 2D-матеріал має надвисоку рухливість носіїв (до $10^4 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$) і низький опір:

$$R_{\text{graphene}} \approx \frac{L}{\sigma W}, \quad (3)$$

де L і W — довжина та ширина провідного каналу, σ — провідність.



Загальний RC-час:

$$\tau = RC + \frac{L^2}{D}, \quad (4)$$

де D — коефіцієнт дифузії носіїв у шарі, L — глибина активної області (0,3 — 0,5 мкм).

Для застосування високочастотної модуляції потрібна достатньо велика смуга. При $R = 150$ Ом — омичний опір модуляційного шару графену, $C = 0,1$ пФ — ємність апертурної зони, отримуємо час, за який модулятор реагує на зміну сигналу $\tau_{RC} = RC = 15$ пс, та частоту до якої модулятор працює ефективно

$$f_{-3\text{ дБ}} = \frac{1}{2\pi\tau} \approx 10,6 \text{ ГГц}.$$

Результати RC-моделювання.

Для оцінки швидкодії оптоелектронного модулятора з графеновим модуляційним шаром проведено аналіз RC-поведінки структури. Струмопровідні властивості графену забезпечують надзвичайно низький питомий опір, що дозволяє знизити R . Водночас, введення субмікронної апертури в центральну частину активної зони модулятора дозволяє в 4–6 разів зменшити ємність C без значної втрати пропускну здатності.

При побудові амплітудно-частотної характеристики видно, що: смуга пропускання становить понад 10 ГГц; ослаблення сигналу не перевищує –3 дБ до частоти ~10,6 ГГц; при збільшенні апертури вдвічі (до 0,2 пФ), RC-обмеження призводить до зменшення граничної частоти до ~5,3 ГГц.

RC-графік у дБ показує, наскільки глибоко та швидко модулятор реагує на зміну частоти керуючого електричного сигналу [7], рис. 2.

Амплітуда модуляційного сигналу

$$A(f)[\text{дБ}] = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{V_{\text{вих}}(f)}{V_{\text{вх}}} \right|. \quad (5)$$

Якщо пристрій ідеальний: $H(f) = 1$, тобто $20 \cdot \log_{10}(1) = 0$ дБ. В разі, коли вихідна амплітуда менша за вхідну (що і є у RC-модулятора): $H(f) < 1$, тобто $20 \cdot \log_{10}(1) < 0$ дБ.

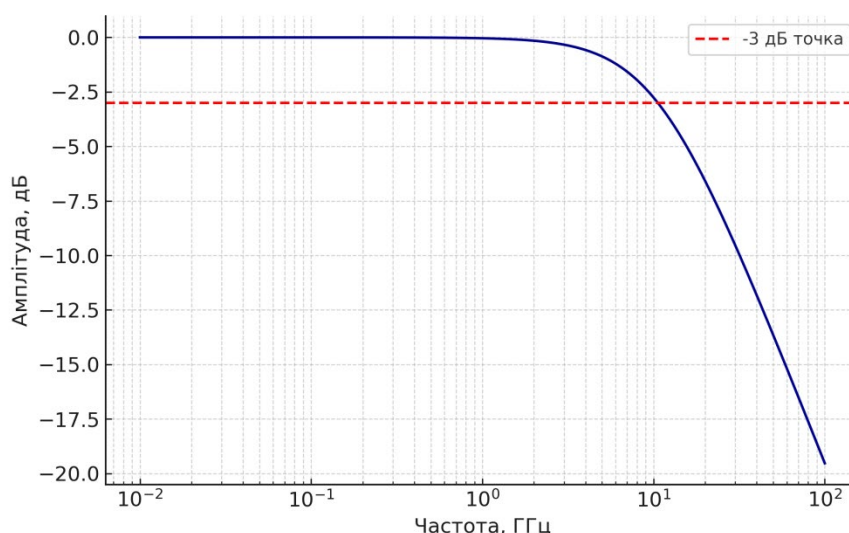


Рисунок 2 – Амплітудно-частотна характеристика RC-модулятора

Типове ослаблення відповідає -3 дБ на граничній частоті — це падіння на 50% по потужності.

Рис. 2 показує падіння амплітуди на рівні -3 дБ на частоті майже 10,6 ГГц, поступове згасання модуляції на частотах більше 30 ГГц.

Тобто такий модулятор може застосуватись в 6G-системах до 20–25 ГГц із апертурним обмеженням.

FDTD-модельовання оптичної взаємодії з хвилеводом.

Для оцінки реального оптичного відгуку варизонного модулятора було проведено моделювання за методом кінцевих різниць у часовій області (FDTD) [8].

Модель включала: тороїдальну апертурну структуру з гетерошаром AlGaAs/GaAs; модуляційний 2D-шар графену товщиною 0,34 нм; хвилевод (Si/SiO₂) шириною 0,5 мкм, висотою 0,22 мкм; довжина хвилі $\lambda_0=1,55$ $\mu\text{м}$ (типова для телекомунікацій), параметри моделювання наведено в табл.1.

Таблиця 1 – Модель та параметри

Область моделювання	3D-простір розміром $2 \times 2 \times 3$ мкм ³
Роздільна здатність сітки	5 нм
Матеріальні параметри	$n_{\text{Si}}=3,47$, $n_{\text{graphene}} = 2,5 + j1,5$
Джерело	ТМ-монохроматична хвиля (з полем E_z)



Результати моделювання.

Пропускання (transmittance): без модуляції $T_0 \approx 87\%$, при подачі керуючої напруги $T_{on} \approx 59\%$.

Глибина модуляції: $\Delta T = \frac{T_{on} - T_0}{T_0} \approx 32\%$.

Відбиття (reflectance) — залишається нижчим за 10%, не перевищує допустимих втрат.

Групова затримка (group delay) — при зміні фазового зсуву в структурі спостерігається затримка імпульсу на $\Delta t \approx 2,3$ пс.

На рис. 3 надано FDTD-пропускання інфрачервоного модулятора на частотах до 100 ГГц.

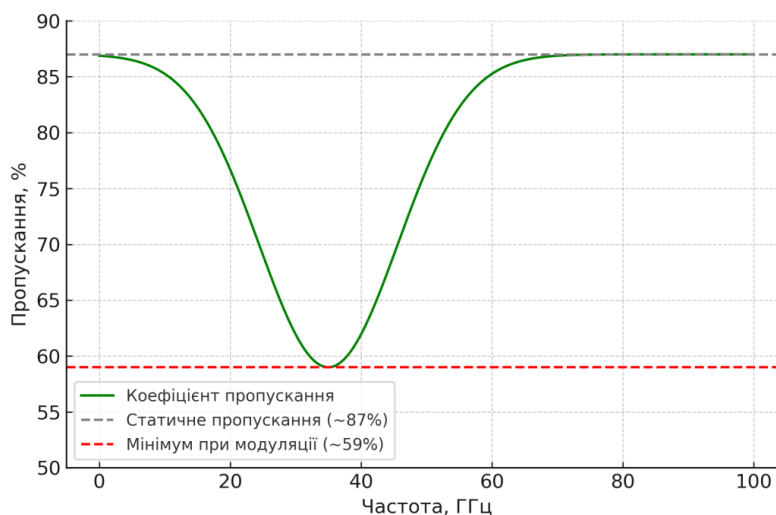


Рисунок 3 – FDTD-пропускання ІЧ-модулятора з графеновим шаром

На рис. 3 видно; максимальне (статичне) пропускання без напруги $\sim 87\%$; мінімальне пропускання при максимальній модуляції $\sim 59\%$; модельна залежність пропускання від частоти з піковим поглинанням в області 30 — 40 ГГц.

Цей графік відображає поведінку модулятора з графеном при різних частотах у середовищі фотонної інтеграції, змодельовану на основі GaAs/AlGaAs та графену у FDTD-сценарії.

Моделювання підтверджує ефективність взаємодії хвилеводу з тороїдальним варизонним модулятором. Навіть при дуже малій активній площі



(апертура $\sim 0,2$ мкм), досягається значна зміна пропускання, а графен забезпечує сильну електрооптичну реакцію.

Порівняльний аналіз зі стандартними модуляторами (Ge, InP).

Для обґрунтування переваг запропонованої структури було проведено порівняльний аналіз з типовими високошвидкісними модуляторами, зокрема:

- Ge-on-Si (германієвий модулятор) — активно використовується у CMOS-сумісних фотонних схемах;
- InP (фосфід індію) — класичне рішення для телекомунікацій у діапазоні 1,3–1,55 мкм.

Таблиця 2 – Порівняння динамічних характеристик

Параметр	Варизонний модулятор (графен та апертура)	Ge-on-Si модулятор	InP-модулятор
Робоча довжина хвилі, мкм	1,55	1,55	1,3 – 1,55
RC-час, пс	15	25 — 40	20 — 30
Смуга пропускання, ГГц	10 — 20	5 — 10	7 — 15
Напруга керування, В	1 — 2	2 — 5	1,5 — 3
Глибина модуляції, %	до 35	до 20	до 25
Однорідність по апертурі	висока (тороїдальна геометрія)	середня	середня
Технологія	AlGaAs/GaAs та Graphene	Ge-on-Si	InP-based
CMOS-сумісність	часткова	повна	обмежена
Площа активної зони, мкм ²	менша за 1	~ 10	~ 8
Вартість реалізації	помірна	низька	висока

Ge-on-Si модулятори відзначаються CMOS-сумісністю, але мають вищу ємність і меншу смугу пропускання.

InP забезпечує високу швидкодію, проте потребує дорогих технологій і складний у виробництві.

Запропонований модулятор демонструє оптимальний компроміс між швидкістю, компактністю, глибиною модуляції та інтеграцією з ФІС (фотонними інтегральними схемами).

Висновки.

У роботі розроблено та змодельовано інфрачервоний оптоелектронний модулятор на основі варизонної гетероструктури з тороїдальною геометрією, доповнений субмікронною апертурною зоною та графеновим модуляційним шаром.



Запропонована архітектура забезпечує значне зменшення паразитної ємності, що дозволяє досягти RC-часу на рівні 15 пс та смуги пропускання понад 10 ГГц — що відповідає вимогам до модуляторів у системах 6G.

FDTD-моделювання продемонструвало глибину модуляції на рівні 32% зі зниженням коефіцієнта пропускання з 87% до 59% при прикладанні керуючої напруги.

У порівнянні з типовими модуляторами на основі Ge-on-Si та InP, запропонований модулятор має менші габарити, кращу глибину модуляції, високу однорідність та хорошу частотну стабільність [9].

Структура поєднується з фотонними інтегральними схемами, може бути реалізована в CMOS-сумісній технології й перспективна для широкого застосування в інфрачервоних телекомунікаційних системах нового покоління.

Література.

1. Luo W., Abbasi S.A., Zhu S., Li X., Ho H.-P., Yuan W. Electrically switchable and tunable infrared light modulator based on functional graphene metasurface // *Nanophotonics*. – 2023. – Vol. 12, No. 9. – P. 1797–1807. DOI: 10.1515/nanoph-2023-0048.
2. Giambra M.A., Sorianello V., Mišeikis V., et al. High-speed double layer graphene electro-absorption modulator on SOI waveguide // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, No. 15. – P. 20145 – 20155. DOI: 10.1364/OE.27.020145.
3. Di Gaspare A., Pogna E. A. A., Salemi L., et al. Tunable, grating-gated, graphene-on-polyimide terahertz modulators // *Advanced Functional Materials*. – 2020. – Vol. 31, No. 10. – Article 2008039. DOI: 10.1002/adfm.202008039.
4. Qiu C., Zeng H., Su Y. Recent progress in graphene-based optical modulators on silicon photonics platforms // *National Science Open*. – 2022. – Vol. 1, No. 3. – Article 20220031. URL.: <https://doi.org/10.1360/nso/20220031>
5. Mylnikov D.A., Kashchenko M., Kapralov K.N., et al. Infrared photodetection in graphene-based heterostructures: bolometric and thermoelectric effects at the tunneling barrier // *npj 2D Materials and Applications*. – 2024. – Vol. 8., No. 1. DOI:



10.1038/s41699-024-00470-z.

6. Sarker D., Nakti P.P., Zubair A. Graphene metamaterials-based plasmon-induced terahertz modulator for high-performance multiband filtering and slow light applications // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32, No. 6. – P. 9442 – 9455. URL.: <https://doi.org/10.1364/OE.516142>.

7. Heidari E., Dalir H., Mokhtari-Koushyar F., et al. Integrated ultra-high-performance graphene optical modulator // *Nanophotonics*. – 2022. – Vol. 11, No. 17. DOI: 10.1515/nanoph-2021-0797.

8. Taflove A., Hagness S. C. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* (3rd ed.) // Artech House. — 2005. DOI: 10.1016/B978-012170960-0/50046-3.

9. Tiberi M., Montanaro A., Wen C., et al. Graphene electro-absorption modulators for energy-efficient and high-speed optical transceivers // *arXiv preprint*. — 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.03281.

Abstract. This work investigates the dynamic characteristics of an infrared variband optoelectronic modulator with a toroidal heterostructure, complemented by a submicron aperture structure and a graphene layer as the modulation element. An analysis of the RC time constant, frequency transfer function, and modulation delay has been carried out. To study the electromagnetic interaction, FDTD modeling with consideration of waveguide coupling was applied. Transmission, reflection, and group delay parameters were obtained for systems operating at frequencies up to 100 GHz. A comparative analysis with standard silicon- and InP-based modulators is presented.

Keywords: variband modulator, graphene, 6G, photonics, RC-time, FDTD, aperture structuring, bandwidth.

Стаття відправлена: 01.08.2025 р.

© Марколенко П.Ю.