

О. Балабан¹, Р. Буклів¹, А. Данилов¹, Б. Венгрин¹, Д. Винник¹, В. Гайдучок²,
А. Андрущак¹

Вплив обробки поверхні монокристалічного Ge на його фотопровідність і фотомодуляцію випромінювання частотою 0,13 ТГц

¹Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, bohdan.y.venhryn@lpnu.ua

²Науково-виробниче підприємство «Електрон-Карат», Львів, Україна

Досліджено вплив механічної обробки, іонного та хімічного травлення поверхні монокристалічного германію на його фотопровідність та можливість фотомодуляції в терагерцовій ділянці спектру. Визначено відносні зміни електропровідності матеріалу під впливом освітлення лазерним випромінюванням з довжиною хвилі 660 нм при різних потужностях опромінення. Створено установку для дослідження фотомодуляційних властивостей германію на частоті 0,13 ТГц і виявлено різке збільшення поглинання такого електромагнітного випромінювання навіть при малих потужностях освітлення.

Ключові слова: напівпровідники, монокристалічний германій, хімічне травлення поверхні, фотопровідність, терагерцове випромінювання, фотомодуляція.

Подано до друку 28.05.2025; прийнято до редакції 29.10.2025.

Вступ

Сучасний розвиток та використання терагерцових (ТГц) технологій [1] стимулює дослідження методів контролю та керування терагерцовим випромінюванням, його модуляцію, сканування, тощо. Поляризація, керування напрямком, фокусування ТГц променя, а також виготовлення ТГц резонаторів є ключовими технологіями, що забезпечують функціонування систем ТГц комунікацій та ТГц зображення з кодовою апертурою. Комплексні огляди методів модуляції ТГц та суб-ТГц випромінювання на частотах понад 100 ГГц, включаючи оптичні, електронні та теплові модулятори, наведено у [2–5]. Оптичні модулятори ТГц випромінювання викликають значну увагу через їхню відносну простоту, можливість реалізації керування потоками випромінювання без необхідності перетворення сигналів у електричні, високу швидкість передачі інформації, широку смугу пропускання цих сигналів і незначне споживання

енергії [6–8]. Модуляція ТГц випромінювання в цьому випадку здійснюється впливом оптичного джерела світла за рахунок зміни фотопровідності матеріалу, який використовується для модуляції [9, 10]. Як правило для виготовлення ТГц модуляторів використовуються напівпровідникові матеріали. Світлове випромінювання з енергією, яка перевищує ширину забороненої зони напівпровідника, генерує в ньому нерівноважні носії заряду, що приводить до зміни фотопровідності. Густина фотоіндукованих нерівноважних носіїв залежить від інтенсивності падаючого оптичного випромінювання. Пропускання терагерцової хвилі через фотозбуджену напівпровідникову пластинку вираховується згідно із формулами Френеля і визначається кутом падіння хвилі, комплексним показником заломлення n і товщиною матеріалу. Очевидно, що під дією світла комплексний показник заломлення напівпровідника змінюється, а, отже, змінюється і пропускання ТГц хвиль через нього. Ефективність модуляції обмежується низкою факторів, зокрема умовами

роботи та властивостями використаного матеріалу. Одним із перспективних матеріалів для фотомодуляції ТГц випромінювання є кристалічний германій [11, 12]. Висока концентрація фотогенерованих носіїв заряду та значна глибина модуляції у зразках Ge порівняно з Si та GaAs зумовлені більшим коефіцієнтом оптичного поглинання на довжині хвилі збудження, вищим коефіцієнтом дифузії носіїв заряду та довшим часом їхнього життя. Вплив товщини досліджуваного зразка на глибину фотомодуляції, а також густини потужності та частотного діапазону освітлення, вже було досліджено теоретично [11]. Натомість експериментальні дані щодо реакції Ge на оптичне збудження, особливо з урахуванням ефектів, зумовлених обробкою поверхні Ge, залишаються не з'ясованими. Оскільки стан поверхні кристалічного германію суттєво впливає на його фотопровідність [13], а, отже, призводить до зміни пропускання терагерцового випромінювання, тому в цій роботі було досліджено вплив обробки поверхні зразків монокристалічного германію на його фотопровідність та фотомодуляцію ним електромагнітного випромінювання з частотою $f = 0,13$ ТГц.

I. Матеріали та методи

1.1. Матеріали

Для проведення досліджень використовувалися зразки монокристалічного германію діаметром $d = 30$ мм і товщиною $h = 0,5$ мм. Товщину зразка вимірювали приладом Logitech CG10 Contact Gauge (Великобританія). Електрофізичні параметри вимірювали на установці HMS-3000 (Hall Measurement System, Франція). Результати вимірювань наведені в Табл. 1.

Таблиця 1.

Електрофізичні параметри монокристалічного Ge

Питомий опір, ρ , Ом·см	60,5
Рівноважна концентрація носіїв, N_e , см ⁻³	$3,54 \cdot 10^{13}$
Рухливість, μ , см ² /В·с	$2,91 \cdot 10^3$
Тип провідності	n

1.2. Методи

1.2.1. Хімічне та іонне травлення

Робочі поверхні зразків були механічно шліфовані та поліровані. Хімічне травлення проводили в розчині такого складу: 95 см³ 1%-ого КОН та 75 см³ 60%-ого H₂O₂ з рН = 7÷8. Процес травлення контролювали за зміною товщини і маси пластинки залежно від часу травлення. Швидкість хімічного травлення механічно обробленого зразка Ge визначали так: на зразок Ge посередині наносили смужку фоторезисту ФП-383. Ширина смужки становила 4 мм. Фоторезист задублювали 45 хвилин при температурі 120°C. Перед нанесенням фоторезисту поверхню зразка Ge знежирювали ацетоном. Потім зразок піддавали односторонньому травленню тривалістю від 1 хв до 25 хв. Після завершення травлення фоторезист видаляли концентрованим розчином ацетону і за допомогою

профілометра Dektak A визначали зміну нерівностей поверхні на межі розділу між захищеною фоторезистом та протравленою поверхнею (рис. 1). Виміряна швидкість травлення становила 70 нм/хв.

Підготовку поверхні зразків Ge проводили також з допомогою іонного травлення аргонем впродовж 15 хвилин. Іонне травлення здійснювали на установці вакуумного напилення Torr International Inc.

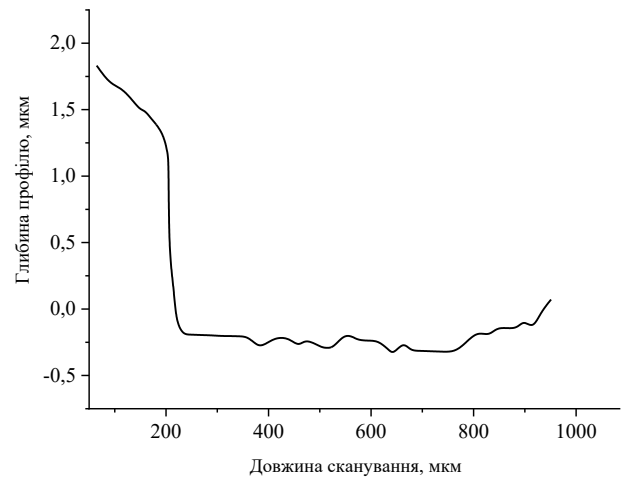


Рис. 1. Зміна товщини поверхні зразка германію на межі розділу між поверхнею, захищеною фоторезистом, і протравленою поверхнею. Час хімічного травлення становив 25 хв.

1.2.2. Фотопровідність

Фотопровідність усіх зразків і механічно оброблених, і тих, що зазнали хімічного, а також іонного травлення, виміряли з допомогою імпедансного спектрометра Autolab (Metrohm Autolab B.V., Нідерланди) за кімнатної температури. Вимірювання здійснювалося в діапазоні частот 10^{-2} до 10^6 Гц, амплітуда сигналу становила 5мВ. Для вимірювання було задано 99 точок. Контакти на поверхні матеріалу напилювали у вигляді прямокутників. Засвітку зразків здійснювали лазером з довжиною хвилі $\lambda = 660$ нм та потужністю 32 мВт (діаметр пучка становив 2 мм) без та з використанням нейтральних фільтрів з оптичною густиною: 0,3; 0,64 та 1, а також в темряві.

1.2.3. Фотомодуляція

Для дослідження фотомодуляції ТГц випромінювання запропоновано вимірювальну установку, наведену на рис. 2.

Випромінювач (передавач) ТГц випромінювання на частоті $f = 0,13$ ТГц був побудований на кремнієвому двопрілітному лавинному діоді, встановленому в камері генератора. Рівень потужності передавача становив не менше 10 мВт. Активний елемент – діод встановлювався в камеру генератора, розраховану на роботу в ТГц діапазоні частот. Камера містить хвильовідні елементи для узгодження імпедансу активного елемента та його живлення від джерела постійного струму. Вона механічно кріпиться до фланця хвильоводу за стандартом UG-387/UM, який містить канал хвильоводу WR-07 (1,65x0,83) мм і розташований на

передній панелі пристрою. Рупорна антена, механічно закріплена на вихідному фланці передавача, формує діаграму спрямованості, і випромінює сигнал передавача. Ширина діаграм спрямованості рупорів на рівні половинної потужності становила не більше 10° , а підсилення – не менше 25 дБ.

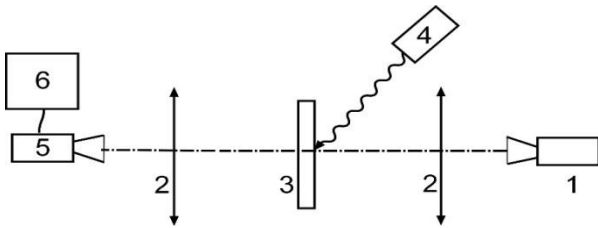


Рис. 2. Установка для дослідження фотомодуляції ТГц випромінювання на частоті $f=0,13$ ТГц. 1 – передавач з рупорною антеною, 2 – тefлонові лінзи, 3 – фотопровідний матеріал, 4 – SOLIS-565D - High-Power LED (Thorlabs, США). 5 – приймач з рупорною антеною, 6 – осцилограф Tektronix TDS 3052.

Приймач складався з детектора, підсилювача відеосигналу та рупорної антени. Корисний сигнал, прийнятий рупорною антеною, через проміжний вхідний фланець, який відповідає стандарту UG-387/UM та має хвилевідний канал WR-07 (1.65x0.83) мм, потрапляв у камеру детектора, детектувався, далі підсилювався та передавався для індикації. Детектор побудований на GaAs діоді Шотткі з низьким рівнем власного шуму, встановленим у хвилевідній камері детектора. Це забезпечувало узгодження опору діода з хвилеводом в робочому діапазоні частот і вивід сигналу. Підключений підсилювач відеосигналу забезпечував динамічний діапазон не менше 20 дБ і рівень вихідного сигналу не менше 100 мВ. Вихідний опір підсилювача відеосигналу становив 1 кОм.

Максимум випромінювання для лампи Solis – 565 D фірми Thor Labs припадав на довжину хвилі $\lambda = 565$ нм. Потужність випромінювання лампи змінювалася в межах від $0,05$ Вт/см² до $0,67$ Вт/см². Випромінювання лампи модулювалося у вигляді прямокутних імпульсів освітлення з тривалістю 1 мс та інтервалом між імпульсами 360 мс (рис.3).

Вимірювання зміни пропускання зразками Ge електромагнітного випромінювання з частотою $f=0,13$ ТГц під дією світлового випромінювання різної потужності (модуляція ТГц випромінювання) проводилася за такою методикою. За допомогою осцилографа міряли:

- сигнал на увімкненому приймачі ТГц випромінювання без потрапляння на нього електромагнітного випромінювання (нульовий рівень);
- сигнал на приймачі за потрапляння на нього електромагнітного випромінювання з частотою $f=0,13$ ТГц, який передається через повітря (U_a);
- сигнал на приймачі за потрапляння на нього електромагнітного випромінювання з частотою $f=0,13$ ТГц, яке пройшло через зразок Ge (U_s);
- сигнал на приймачі за потрапляння на нього електромагнітного випромінювання з частотою $f=0,13$ ТГц і проходженні через освітлений

імпульсним оптичним випромінюванням зразок Ge.

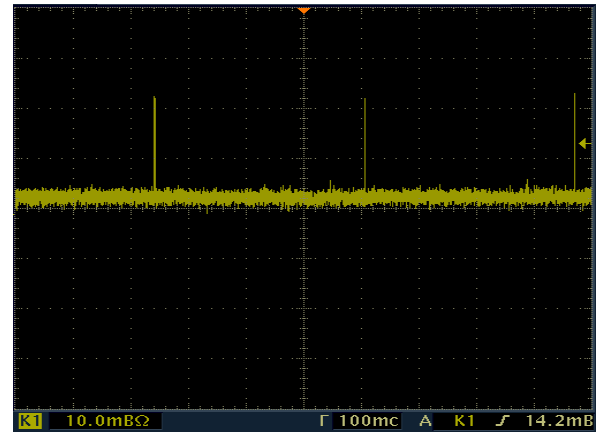


Рис. 3. Модуляція випромінювання лампи Solis-565 D.

Початкове пропускання зразка розраховували за співвідношенням: $T=U_s/U_a$. Останнім етапом є розрахунок пропускання для всіх точок записаного сигналу та побудова графіків $T=f(P_i)$, де P_i – густина потужності оптичного випромінювання, що падає на зразок Ge.

II. Результати досліджень та їх обговорення

2.1. Фотопровідність

Як механічно оброблені зразки, так і зразки, що зазнали (після механічного полірування) іонного травлення при засвітці з максимальною потужністю зміни провідності не виявили. Зміна електропровідних властивостей хімічно протравленого зразка Ge при засвітці представлена на рис. 4а у вигляді частотних залежностей дійсної $\text{Re } Z(f)$ (рис. 4а) частини імпедансу, відносної зміни фотопровідності (рис. 4б), а також діаграм Найквіста (рис. 4в).

Як і очікувалося, на низьких частотах $<10^3$ Гц (рис. 4а) спостерігається наявність делокалізованих носіїв заряду у Ge, що підтверджується частотною незалежністю провідності матеріалу. З ростом частоти провідність зростає, оскільки за вищих частот (в околі 10^4 Гц) внесок у провідність роблять перескоки носіїв заряду по локалізованих станах поблизу рівня Фермі [14]. Причому стрімкіший ріст провідності з частотою (вище 10^4 Гц) спостерігається під час вимірювання у темряві, адже, в цьому випадку не проявляється стимуляція освітлення, яка робить більший внесок у провідність, порівняно з перескоками, що і відображається на кривих 2-5 рисунку 4а. Результати досліджень, представлені на рис. 4а, свідчать про значний фоторезистивний ефект навіть за використання фільтрів, які послаблюють потужність засвітки. Розрахунок відносної зміни фотопровідності здійснений за формулою:

$$\delta \text{ReG}(f) = \frac{\text{ReG}_i(f) - \text{ReG}_0(f)}{\text{ReG}_0(f)}, \quad (1)$$

де f – частота, $\text{ReG}_0(f)$, $\text{ReG}_i(f)$ – дійсні частини

провідності, визначені з дійсної частини комплексного імпедансу, виміряного в темряві та при опроміненні лазером, відповідно. Результати представлено на рис. 4б. Як і очікувалося: зі зменшенням оптичної густини фільтрів (зі збільшенням густини потужності світлового сигналу) відносна зміна фотопровідності зростає у 3 рази. Найбільше її значення становить $\approx 5,5$ разів і отримане під час вимірювання без фільтрів. Лазер із довжиною хвилі $\lambda = 660$ нм має енергію фотонів $\approx 1,88$ еВ, що значно перевищує ширину забороненої зони германію $E_g \approx 0,66$ еВ. Таким чином, значний фоторезистивний ефект у германії реалізується в основному за рахунок генерації значної кількості носіїв заряду та їх високої рухливості.

Під час освітлення зразків відбувається незначне зменшення $\delta \text{Re}Z(f)$ за високих частот, пов'язане зі внеском перескокової провідності (криві 3, 4, 5) та з домінуванням бар'єрних і поляризаційних процесів. Діаграма Найквіста (рис. 4в) на комплексній площині представляє дійсну $\text{Re}Z(f)$ та уявну $\text{Im}Z(f)$ частину годографу імпедансу. Форма годографів імпедансу відповідає вищезазначеним висновкам та вказує на зростання провідності матеріалу зі збільшенням питомої потужності. Беручи до уваги природу матеріалу, а також форму годографів, очевидно, що для опису процесів проходження струму потрібно

використати модель Войта [15], що складається з двох $R||C$ ланок. Кожна з них моделює скінченну провідність із відповідною сталою часу.

2.2. Фотомодуляція ТГц випромінювання.

Пропускання ТГц випромінювання з частотою $f = 0,13$ ТГц, модульованого імпульсами світлового випромінювання, через попереднього шліфований і полірований, а потім хімічно протравлений зразок Ge, представлено на рис. 5. Із рис. 5 видно, що вже при засвітці випромінюванням з $P = 0,33$ Вт/см² пропускання ТГц випромінювання цим зразком Ge знижується практично до нуля. Також видно, що час модуляції ТГц хвилі складає ~ 2 мс. Цей час складається із часу безпосередньої модуляції терагерцової хвилі ~ 1 мс і часу повернення зразка до початкового (перед освітленням) стану ~ 1 мс.

Крім того, нами також було вивчено вплив шліфованої, а потім хімічно протравленої поверхні зразка германію на фотомодуляцію ТГц випромінювання з частотою $f = 0,13$ ТГц. Фотомодуляція ТГц випромінювання з частотою $f = 0,13$ ТГц при його падінні на поверхню зразка наведена на рис. 6.

Видно, що модуляція ТГц випромінювання є дещо слабшою, але в той же час змінюється швидкість модуляції. Ефективність терагерцового модулятора

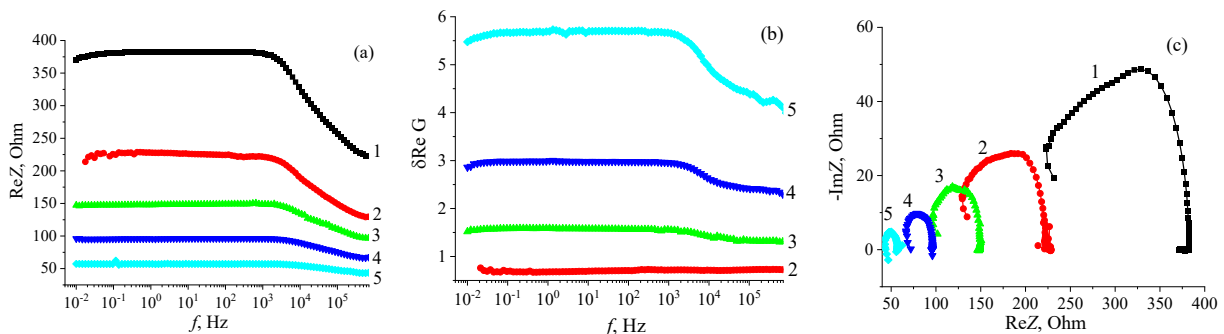


Рис. 4. Частотна залежність дійсної частини $\text{Re}Z$ комплексного імпедансу (а) хімічно травленого зразка Ge, відносної зміни фотопровідності (б), а також діаграма Найквіста (в), зняті в темряві (1) та при освітленні ($\lambda = 660$ нм, 32 мВт) із використанням нейтральних фільтрів з оптичною густиною: 1(2); 0,64(3); 0,3(4) та без них (5).

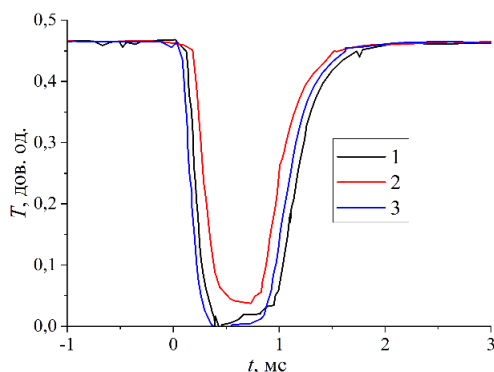


Рис. 5. Пропускання ТГц випромінювання з частотою $f = 0,13$ ТГц попереднього шліфованим і полірованим, а потім хімічно протравленим зразком Ge за різних густин потужності засвітки (1 – $P = 0,12$ Вт/см², 2 – $P = 0,33$ Вт/см², 3 – $P = 0,67$ Вт/см²).

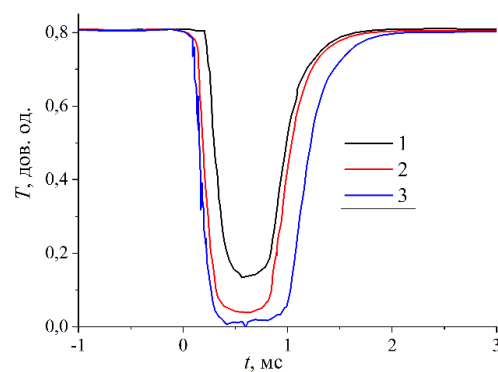


Рис. 6. Фотомодуляція ТГц випромінювання з частотою $f = 0,13$ ТГц при його падінні на шліфовану та хімічно протравлену поверхню за різних густин потужності засвітки (1 – $P = 0,12$ Вт/см², 2 – $P = 0,33$ Вт/см², 3 – $P = 0,67$ Вт/см²).

характеризується глибиною модуляції MF , яка визначається як [16]:

$$MF = \frac{T_0 - T_i}{T_0}, \quad (2)$$

де T_0 – коефіцієнт пропускання ТГц випромінювання за відсутності оптичної засвітки, T_i – коефіцієнт пропускання за різних інтенсивностей оптичної засвітки.

У випадку хімічно протравленого зразка зі шліфованою та полірованою поверхнею (див. рис. 5, 6) глибина модуляції рівна 100% для двох потужностей $P = 0,33$ Вт/см² та $P = 0,67$ Вт/см². Для хімічно протравленого зразка Ge зі шліфованою поверхнею (див. рис. 6) глибина модуляції також була близькою до 100%, але лише для $P = 0,67$ Вт/см². Отримані результати перевершують дані оптичної модуляції ТГц хвилі за $f = 0,34$ ТГц як монокристалічного Ge, так і модифікованого нанострижнями золота [17].

Висновки

Хімічне травлення поверхні монокристалічного Ge в розчині 95 см³ 1%-ого КОН та 75 см³ 60%-ого H₂O₂ з рН = 7÷8 спричиняє фоторезистивний ефект та ефективну фотомодуляцію цим зразком терагерцового випромінювання, на відміну від шліфування, полірування чи протравлення іонами Ag. Таке хімічне травлення поверхні Ge призводить до значної фотогенерації носіїв заряду, при якій відносна зміна фотопровідності нелінійно зростає приблизно у

5,5 разів при засвітці оптичним випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda = 660$ нм та потужністю 32 мВт (діаметром пучка 2 мм). Це дозволяє забезпечити 100% глибину модуляції ТГц випромінювання з частотою $f = 0,13$ ТГц, що було нами експериментально підтверджено на створеній установці. З метою виявлення оптимальних параметрів фотомодуляторів ТГц випромінювання на основі монокристалічного Ge необхідні подальші дослідження впливу товщини зразків, а також інших хімічних травників на параметри таких оптично-керованих модуляторів.

Подяка:

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2021.01/0410).

Балабан О. – к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства;

Буклів Р. – к.т.н., доц., доцент кафедри хімії та технології неорганічних речовин;

Данилов А. – старший викладач кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства;

Венгрин Б. – к.ф.-м.н., доц., доцент кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства;

Винник Д. – молодший науковий співробітник;

Гайдучок В. – к.т.н., завідувач відділу Фізики росту оксидів кристалів Науково-виробничого підприємства «Електрон-Карат»;

Андрущак А. – д.т.н., проф., професор кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства.

- [1] T. M. Narytnyk, A. V. Yermakov, S. O. Bondarchuk, D. S. Valchuk, *Analysis of terahertz technologies and their application for creating innovative developments*, Problems of Telecommunications, 1, 50 (2017); http://nbuv.gov.ua/UJRN/prtel_2017_1_8.
- [2] M. Rahm, J.S. Li, W.J. Padilla, *THz wave modulators: A brief review on different modulation techniques*, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 34(1), 1 (2013); <https://doi.org/10.1007/s10762-012-9946-2>.
- [3] S. Guan, J. Cheng, S. Chang, *Recent progress of terahertz spatial light modulators: materials, principles and applications*, Micromachines, 13, 1637 (2022); <https://doi.org/10.3390/mi13101637>.
- [4] P. Gopalan, B. Sensale-Rodriguez, *2D Materials for Terahertz Modulation*, Advanced Optical Materials, 1900550 (2019); <https://doi.org/10.1002/adom.201900550>.
- [5] Z. Wang, J. Qiao, S. Zhao, S. Wang, C. He, X. Tao, S. Wang, *Recent progress in terahertz modulation using photonic structures based on two-dimensional materials*, InfoMat, 3(10), 1110 (2021); <https://doi.org/10.1002/inf2.12236>.
- [6] D. A. B. Miller, *Energy consumption in optical modulators for interconnects*, Optics Express, 20(102), A293 (2012); <https://doi.org/10.1364/oe.20.00a293>.
- [7] Q. Guo, Z. Qin, Z. Wang, Y.-X. Weng, X. Liu, G. Xie, J. Qiu, *Broadly tunable plasmons in doped oxide nanoparticles for ultrafast and broadband mid-infrared all-optical switching*, ACS Nano, 12 (12), 12770 (2018); <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b07866>.
- [8] M. Ono, M. Hata, M. Tsunekawa, K. Nozaki, H. Sumikura, H. Chiba, M. Notomi, *Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides*, Nat Photonics, 14 (1), 37 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0547-7>.
- [9] J. Sobolewski, Y. Yashchyshyn, D. Vynnyk, V. Haiduchok, N. Andrushchuk, *Investigation of optically controlled millimeter wave coplanar waveguide photoconductive device*, Acta Physica Polonica A, 141 (4), 420 (2022); <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.141.420>.
- [10] N. Andrushchak, D. Vynnyk, M. Melnyk, P. Bajurko, J. Sobolewski, V. Haiduchok, D. Kushnir, A. Andrushchak, Y. Yashchyshyn, *Impact of optical illumination on transmission of subterahertz electromagnetic waves by Bi₁₂GeO₂₀ crystals*, Acta Physica Polonica A, 141 (4), 415 (2022); <https://doi.org/10.12693/aphyspolA.141.415>.

- [11] A. Kannegulla, Md. I. B. Shams, L. Liu, L.-J. Cheng, *Photo-induced spatial modulation of THz waves: opportunities and limitations*, Optics Express, 23 (25), 32098 (2015); <https://doi.org/10.1364/OE.23.032098>.
- [12] Y. Li, D. Zhang, Y. Liao, Q. Wen, Z. Zhong, T. Wen, *Interface engineered germanium for infrared THz modulation*, Optical Materials, 111, 110659 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110659>.
- [13] G.P. Peka, B.I. Strikha, *Surface and contact phenomena in semiconductors* (Lybid, Kyiv, 1992).
- [14] M. Pollak, T.H. Geballe, *Low-frequency conductivity due to hopping processes in silicon*, Phys. Rev, 122(6), 1742 (1961); <https://doi.org/10.1103/PhysRev.122.1742>.
- [15] J.R. McDonald, *Impedance spectroscopy and its use in analyzing the steady-state response of solid and liquid electrolytes*, Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, 223(1-2), 25 (1987); [https://doi.org/10.1016/0022-0728\(87\)85249-X](https://doi.org/10.1016/0022-0728(87)85249-X).
- [16] I.R. Hooper, N.E. Grant, L.E. Barr, S. M. Hornett, J. D. Murphy, E. Hendry, *High efficiency photomodulators for millimeter wave and THz radiation*. Scientific Reports, 9, 18304 (2019); <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54011-6>.
- [17] Y. Li, D. Zhang, Y. Liao, Q. Wen, Z. Zhong, T. Wen, *Interface engineered germanium for infrared THz modulation*, 111, 110659 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110659>.

O. Balaban¹, R. Bukliv¹, A. Danylov¹, B. Venhryn¹, D. Vynnyk¹, V. Haiduchok²,
A. Andrushchak¹

Effect of Surface Treatment of Single-Crystalline Ge on Its Photoconductivity and Photomodulation of Radiation with frequency of 0.13 THz

¹Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, bohdan.y.venhryn@lpnu.ua

²«Electron-Carat» Scientific-Research Company, Ukraine

The influence of mechanical processing as well as ion and chemical surface etching of single-crystal germanium on its photoconductivity and photomodulation properties in the terahertz spectral region was investigated. Relative changes in the conductivity of the material under laser illumination at a wavelength of 660 nm and various irradiation powers were determined. A setup was developed for studying the photomodulation properties of germanium at a frequency of 0.13 THz, and a pronounced increase in the absorption of terahertz radiation was revealed even at low illumination powers.

Keywords: Semiconductors, Single-crystal Germanium, Chemical surface etching, Photoconductivity, Terahertz radiation, Photomodulation.