

АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621.382.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРСЕНІДУ ІНДІЯ

Саурова Т. А., Шпиченко В. С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: saurowa-ee@iit.kpi.ua; shpichenko-ee25@iit.kpi.ua

Перспективним матеріалом при створенні високоефективних електронних та оптоелектронних приладів є арсенід індію. Високий рівень дослідженості властивостей InAs дозволить прогнозувати потенційні можливості його застосування, а також багатокомпонентних напівпровідників на його основі. Актуальною є задача дослідження властивостей InAs у режимі сильного електричного поля. У науково-технічних джерелах слабо представлені дані щодо імпульсних властивостей арсеніду індію в режимі сильного електричного поля. Метою роботи є дослідження поле-швидкісної залежності у імпульсному режимі сильного електричного поля та аналіз реакції на зміну його амплітуди, тривалості, фронту.

Методом релаксаційних рівнянь проведено аналіз поле-швидкісної характеристики в режимі сильного електричного поля. У статичному режимі сильного поля максимальне значення дрейфової швидкості становило $3 \cdot 10^5$ м/с (при амплітуді поля 2 кВ/см), на ділянці насичення – $0.9 \cdot 10^5$ м/с.

Аналіз поле-швидкісної залежності при імпульсному режимі сильного електричного поля показав: зі збільшенням амплітуди поля максимальне значення дрейфової швидкості зростає, тривалість «сплеску» скорочується. Полям 5 – 30 кВ/см відповідає зростання максимального значення швидкості у 2.7 – 8 разів. Просторовий розподіл дрейфової швидкості дав оцінку середньої дрейфової швидкості і відстані, що проходять носії заряду при різних значеннях поля.

Збільшення тривалості фронту імпульсу поля викликало запізнення перехідних процесів. При 12 кВ/см < E додатково відбувається зменшення максимальної швидкості.

Тривалість імпульсу сильного електричного поля істотно впливає тільки при значеннях, менших часу формування максимуму дрейфової швидкості. Такі значення тривалості імпульсу призводять до зниження швидкості дрейфу та релаксаційних процесів.

Порівняння поле-швидкісних залежностей в імпульсному режимі сильного поля показало: максимальне значення дрейфової швидкості електронів InAs перевищує відповідні значення: GaAs, InP – у кілька разів; GaN – на порядок. Тривалість «сплеску» дрейфової швидкості для InAs децю вища, ніж у GaAs, InP, GaN. Проведено оцінку верхніх граничних частот матеріалу, таких, що можуть досягати сотень гігагерц.

Ключові слова: арсенід індію; дрейфова швидкість; імпульсні властивості; метод релаксаційних рівнянь.

Вступ. Постановка проблеми

При створенні напівпровідникових приладів актуальною є задача підвищення частотних параметрів та швидкодії. Вирішенню цієї задачі сприяють досягнення технологій мікроелектроніки, застосування нових напівпровідникових матеріалів. Нові можливості відкриває технологія вирощування багатокомпонентних напівпровідникових матеріалів. Багатокомпонентні напівпровідники приваблюють розробників приладів можливістю зміни властивостей матеріалу, які визначаються молярним складом; часткою вкладу його складових. Перспективним матеріалом при створенні високоефективних електронних та оптоелектронних приладів є арсенід індію InAs [1 – 3]. Високий рівень дослідженості властивостей InAs дозволить прогнозувати потенційні можливості його застосування, а також багатокомпонентних

напівпровідників на його основі (GaInAs, AlInAs, InNAs, InPAs, ...).

Дослідження електричних, теплових, механічних, оптичних властивостей арсеніду індію представлені у науковій літературі з 70-х років минулого століття [1]. У [4] проведено аналіз процесів розсіювання для типових видів домішкового та фононного механізмів, моделювання температурної залежності дрейфової рухливості електронів у «слабкому» електричному полі. Актуальною є задача дослідження властивостей InAs у режимі сильного електричного поля. У науково-технічних джерелах [1, 5, 6] слабо представлені дані щодо імпульсних властивостей арсеніду індію в режимі сильного електричного поля. Метою роботи є дослідження поле-швидкісної залежності у імпульсному режимі сильного елект-

ричного поля та аналіз реакції на зміну його амплітуди, тривалості, фронту.

Основна частина

Чисельне моделювання проведено методом релаксаційних рівнянь [7]. Ряд досліджень [8 – 10], виконаних з використанням методики, в основу якої покладено релаксаційні рівняння збереження імпульсу, енергії та концентрації, показують її «велику

часову економічність та достатню інформативність порівняно з методом Монте-Карло». При цьому спостерігається добра відповідність між результатами, отриманими методами релаксаційних рівнянь та Монте-Карло. Теоретичне дослідження проведемо на основі набору вихідних параметрів моделювання (табл.1), якому відповідає узгодження розрахованої температурної залежності слабопольової дрейфової рухливості з експериментальними результатами [4].

Таблиця 1. Вихідні параметри моделювання

		InAs
Відносна діелектрична проникність:	статична	15.15
	високочастотна	12.3
Густина, 10^3 кг/м ³		5.667
Швидкість звуку (поздовжня), 10^3 м/с		4.2
Акустичний деформаційний потенціал, еВ		5.8
Константа міждолинного зв'язку, 10^{10} еВ/м		3
Енергія оптичних фононів, меВ		29
Енергія міждолинних фононів, меВ		23.2
Міждолинна Γ -L відстань, еВ		0.73
Ефективна маса густини станів: Γ -долини		$0.022m_0$
L-долини		$0.29m_0$

Розрахунки виконані на основі дводолинної моделі [7, 11]:

$$\begin{cases} \frac{dT_e}{dt} = \frac{T_e - T}{\tau_E(T_e)} + \frac{m^* \mu^2 E^2}{3k_B \tau_E(T_e)} \left(\frac{2\tau_p(T_e)}{\tau_p(T_e)} - 1 \right), \\ \frac{dv}{dt} = \frac{eE(t)}{m^*} - \frac{v}{\tau_p(T_e)}, \\ \frac{db_{\Gamma}}{dt} = -b_{\Gamma}(T_e) \cdot \lambda_{\Gamma L}(T_e) + b_L(T_e) \cdot \lambda_{L\Gamma}(T_e), \end{cases}$$

де T_e – електронна температура, T – температура кристалічної ґратки, m^* – омічна маса, μ – рухливість електрона, E – напруженість електричного поля, τ_E – час релаксації енергії, k_B – постійна Больцмана, τ_p – час релаксації імпульсу, v – дрейфова швидкість, e – заряд електрону, b_{Γ} , b_L – заселеності долин, $\lambda_{\Gamma L}$, $\lambda_{L\Gamma}$ – швидкості міждолинного розсіювання.

Система рівнянь вирішувалася за допомогою комп'ютерної програми Mathcad; методом Рунге-Кутта 4-го порядку для кожної долини з подальшим усередненням результатів. Розрахована поле-швидкісна залежність представлена на рис. 1.а. Результат чисельного експерименту зіставлено з експериментальними даними [12] (рис. 1.б).

Отримано добру відповідність розрахованої залежності $v(E)$ експериментальним даним. Деяка різниця, що спостерігається між розрахованою і виміряною $v(E)$, може бути пов'язана з тим, що

для низки вихідних параметрів моделювання в науково-технічних джерелах є значення, що істотно різняться, а також є деяка невизначеність в умовах експериментів.

Розрахована поле-швидкісна характеристика $v(E)$ арсеніду індію відповідає статичному режиму електричного поля. За величиною напруженості електричного поля $v(E)$ має характерні особливості: при $E < 1.6$ кВ/см (слабке поле) – лінійна залежність; при $E > 12$ кВ/см – спостерігається ділянка насичення дрейфової швидкості; найбільшому значенню v ($3.03 \cdot 10^5$ м/с) відповідає величина критичного поля $E_{кр}$ (1.98 кВ/см).

Порівнюючи статичну поле-швидкісну характеристику арсеніду індію з відповідними найбільш застосовуваному в електроніці напівпровіднику з групи сполук $A^{III}B^V$ – арсеніду галію та перспективним матеріалам – фосфіду індію та нітриду галію, відзначимо: арсенід індію має найбільше значення дрейфової швидкості та найменшу величину критичного поля [7, 9, 13].

Проведені дослідження, необхідні на етапі розробки напівпровідникових приладів та пристроїв – моделювання при імпульсному режимі електричного поля. Відомо, що при імпульсному режимі електричного поля при $E_{кр} < E$ спостерігається явище «сплеску» дрейфової швидкості; значного зростання максимального значення v (порівняно зі стаціонарним режимом). Беручи до уваги характерні особливості отриманої поле-швидкісної залежності, чисельний експеримент при імпульсному

режимі проведено при напруженості електричного поля: 5 кВ/см, 15 кВ/см, 30 кВ/см, 70 кВ/см і 100 кВ/см. Значення амплітуд поля 70 кВ/см та 100 кВ/см вибрано для зручності проведення порівняльного аналізу напівпровідникових матеріалів. Слід уточнити, що для матеріалу, що розглядається,

дводинна модель при таких значеннях поля дозволила лише оцінити перехідні процеси.

Результати моделювання реакції на стрибкоподібне збільшення амплітуди електричного поля представлені для дрейфової швидкості, часів релаксації імпульсу та енергії, електронної температури, заселеності Г-долини (рис. 2).

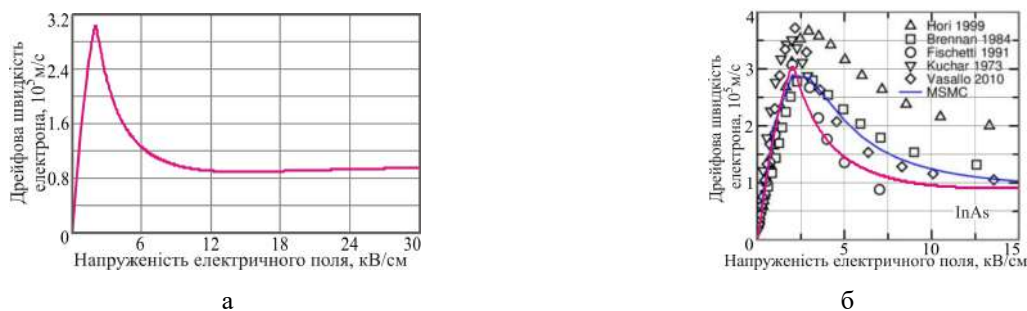


Рис. 1. Поле-швидкісна характеристика арсеніду індію: результати чисельного експерименту (а); зіставлення результату моделювання з експериментальними даними [12] (б)

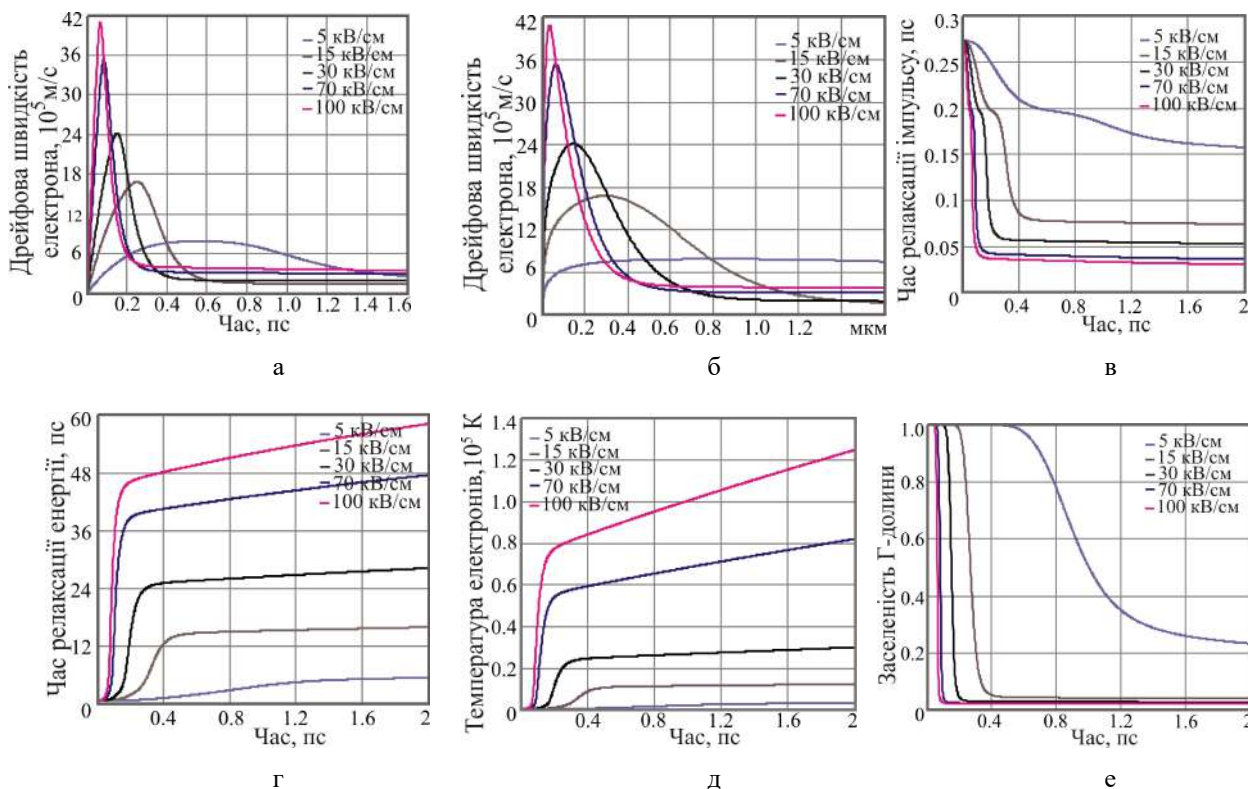


Рис. 2. Реакції на стрибкоподібне збільшення амплітуди електричного поля: дрейфової швидкості (а, б); часів релаксації імпульсу (в) та енергії (г); електронної температури (д); заселеності Г-долини (е)

Стрибкоподібне збільшення амплітуди електричного поля призвело до «сплеску» – короткочасного збільшення – дрейфової швидкості. При амплітудах поля у діапазоні 5 кВ/см – 30 кВ/см отримано збільшення максимального значення дрейфової швидкості в 2.7 – 8 разів. Оціночне перевищення v при 100 кВ/см становить близько 13 разів.

Значне зростання v триває порядку часу релаксації імпульсу, при якому електрон рухається без процесів розсіювання з прискоренням eE/m^* . Результати моделювання показують, що балістичний рух електрона супроводжується розігрівом електронного газу. Таким чином, створюються умови переходу електронів у верхню долину. Спад «сплеску» ви-

кликаний зростанням заселеності L-долин, яким відповідає на порядок більша величина маси носіїв заряду. Перехідний процес «сплеску» дрейфової швидкості завершується усталеним станом; v відповідає значенню у статичному режимі електричного поля.

Розрахунок просторового розподілу дрейфової швидкості $v(x)$ (рис. 2,б) виконано з використанням співвідношення

$$x(t) = \int_0^t v(t) dt.$$

Результат чисельного експерименту (рис. 2, б) показує: зі зростанням амплітуди електричного поля скорочується довжина «балістичного пробігу» електронів.

У роботі проведено дослідження впливу тривалості переднього фронту імпульсу поля. Результати моделювання представлені на рис. 3.

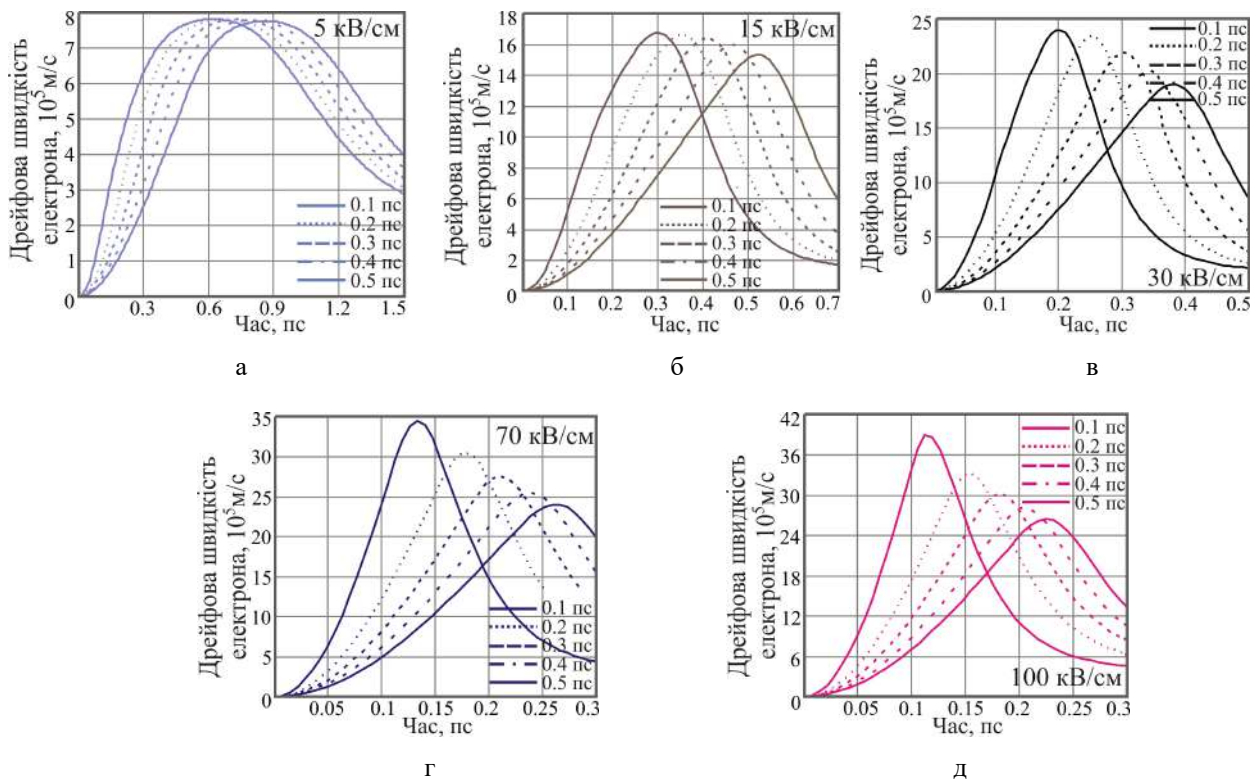


Рис. 3. Динамічна реакція поле-швидкісної характеристики на вплив імпульсу електричного поля з різною тривалістю переднього фронту (0.1 пс – 0.5 пс) та амплітудами: 5 кВ/см (а), 15 кВ/см (б), 30 кВ/см (в), 70 кВ/см (г), 100 кВ/см (д)

З результатів чисельного експерименту, що представлені на рис. 3, можна відзначити першу особливість динамічного відгуку на більш повільне зростання сильного електричного поля: поява запізнення всіх перехідних процесів. Друга особливість: при $12 \text{ кВ/см} < E$, що відповідає початку ділянки насичення статичної $v(E)$, додатково відбувається зменшення максимального значення v . З подальшим збільшенням амплітуди поля тенденція зниження «сплеску» v посилюється.

Реакції на дію імпульсу сильного електричного поля різної тривалості представлено на рис. 4.

З результатів чисельного експерименту випливає, що тривалість імпульсу сильного електричного поля впливає на пікове значення v і швидкість релаксацийних процесів тільки за умови, коли величина

набуває значення, меншого за час формування сплеску дрейфової швидкості. Так, динамічний відгук на дію імпульсу тривалістю 0.1 пс призвів до збільшення часу релаксації імпульсу, створюючи умови для балістичного зростання дрейфової швидкості. Однак суттєве зниження електронної температури призводить до зменшення пікового значення v .

Для зручності порівняння імпульсних властивостей арсеніду індію на рис. 5 представлені реакції на стрибкоподібне збільшення амплітуди електричного поля трьох напівпровідників; GaAs, InP, GaN.

Максимальне значення дрейфової швидкості електронів InAs перевищує відповідні значення: GaAs, InP – у кілька разів; GaN – на порядок. Тривалість «сплеску» дрейфової швидкості для InAs дещо вища, ніж у GaAs, InP, GaN.

При розробці приладів береться до уваги частотна характеристика матеріалів. Оцінку граничної частоти виконаємо на основі методу, запропонованого в [10], який «полягає в аналізі Фур'є-спектра імпульсної реакції швидкості дрейфу носіїв у напів-

провіднику». «Враховуючи явище «сплеску» швидкості дрейфу, найбільш високочастотні Фур'є-компоненти виявляються на передньому фронті перехідного процесу». Результати чисельного експерименту наведено на рис. 6.

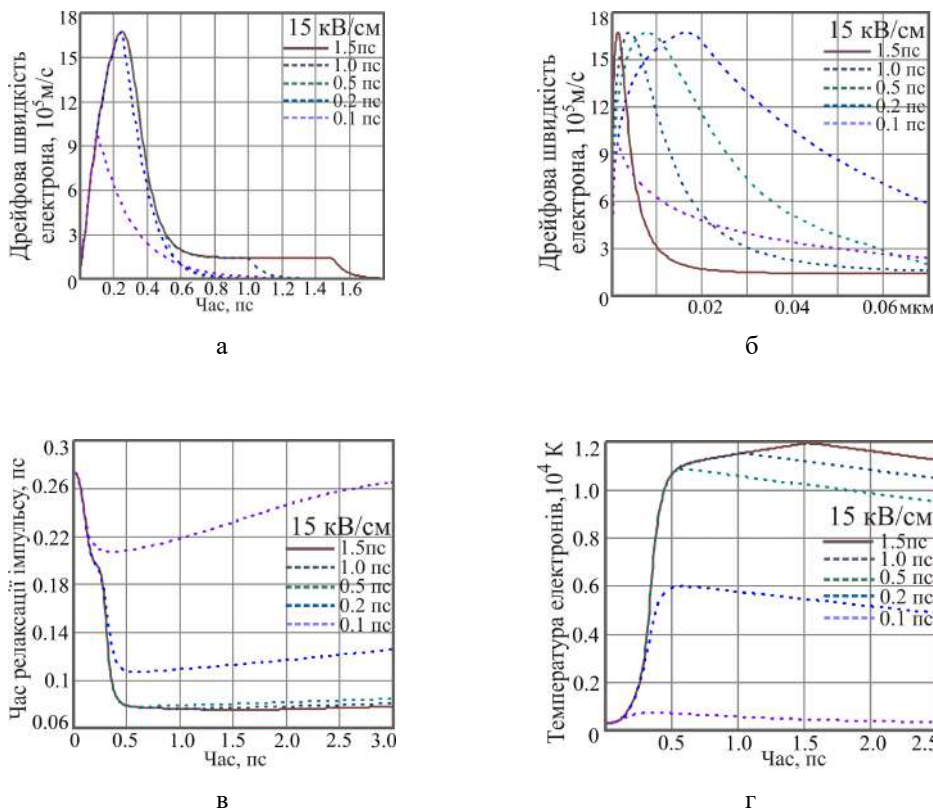


Рис. 4. Реакція на імпульс сильного електричного поля різної тривалості (0.1 пс – 1.5 пс): дрейфової швидкості (а, б); часу релаксації імпульсу (в), температури електронів (г)

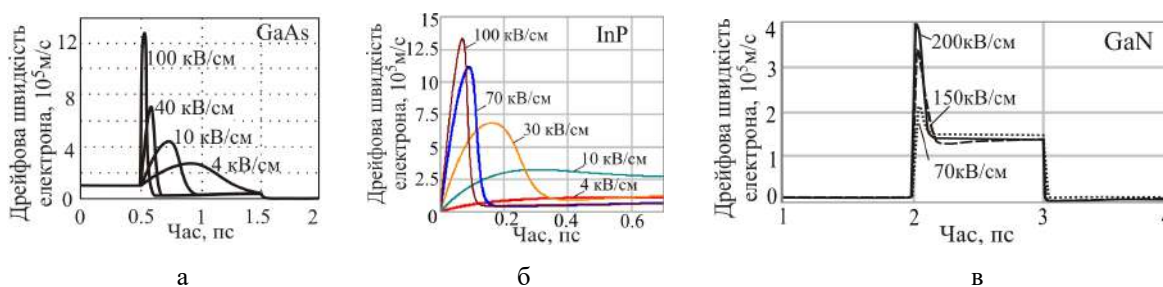


Рис. 5. Реакції на стрибкоподібне збільшення амплітуди електричного поля: арсенід галію [7] (а); фосфід індію [9] (б), нітрид галію [13] (в)

Спостерігається залежність спектральної густини дрейфової швидкості від амплітуди імпульсу електричного поля. Значення граничної частоти визначається за «лінійною апроксимацією нахилу у високочастотній області»; по «точці перетину апроксимуючої частини з віссю абсцис» [10].

Для амплітуд поля (5, 15, 30, 70, 100) кВ/см отримано відповідні значення граничних частот: (400; 300; 500; 800; 950) ГГц.

Висновки

Методом релаксаційних рівнянь проведено аналіз поле-швидкісної характеристики в режимі

сильного електричного поля.

У статичному режимі сильного поля максимальне значення дрейфової швидкості становило $3 \cdot 10^5$ м/с (при амплітуді поля 2 кВ/см), на ділянці насичення – $0,9 \cdot 10^5$ м/с.

Аналіз поле-швидкісної залежності при імпульсному режимі сильного електричного поля показав: зі збільшенням амплітуди поля максимальне значення дрейфової швидкості зростає, тривалість «сплеску» скорочується. Полям 5 – 30 кВ/см відповідає зростання максимального значення швидкості у 2,7 – 8 разів. Просторовий розподіл дрейфової швидкості дав оцінку середньої дрейфової швидкості та відстані, що проходять носії заряду при різних значеннях поля.

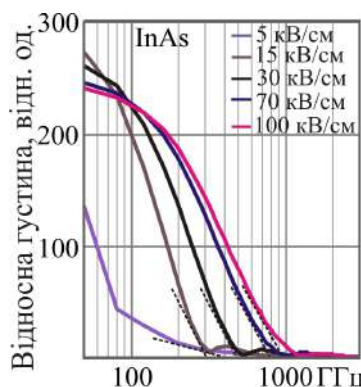


Рис. 6. Спектральна густина дрейфової швидкості електронів арсеніду індію при різних амплітудах імпульсу електричного поля

Збільшення тривалості фронту імпульсу поля викликало запізнення перехідних процесів. При $12 \text{ кВ/см} < E$ додатково відбувається зменшення максимальної швидкості.

Тривалість імпульсу сильного електричного поля істотно впливає тільки при значеннях, менших часу формування максимуму дрейфової швидкості. Такі значення тривалості імпульсу призводять до зниження швидкості дрейфу та релаксаційних процесів.

Порівняння поле-швидкісних залежностей в імпульсному режимі сильного поля показало: максимальне значення дрейфової швидкості електронів InAs перевищує відповідні значення: GaAs, InP – у кілька разів; GaN – на порядок. Тривалість «сплеску» дрейфової швидкості для InAs дещо вища, ніж у GaAs, InP, GaN.

Проведено оцінку верхніх граничних частот матеріалу, що можуть досягати сотень гігерц.

Література

- [1] Ioffe Physico-Technical Institute, "New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties". Режим доступу: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InAs/>
- [2] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, L. R. Ram-Mohan, *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 11, pp. 5815–5875, 2001
- [3] Н. В. Зотова, Н. Д. Ильинская, С. А. Карандашев, Б. А. Матвеев, М. А. Ременный, Н. М. Стусь, «Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия», *Физика и техника полупроводников*, том 42, вып. 6, с. 64–657, 2008.
- [4] Т.А. Саурова, О. В. Семеновська, О. О. Шевчук, «Дослідження дрейфової рухливості електронів в арсеніді індію», *Вісник НТУУ "КПІ", серія приладобудування*, Вип. 58(2), с. 41–47, 2019. DOI: 10.20535/1970.58(2).2019.189478
- [5] Adachi Sadao, *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009. 400 p. DOI: 10.1002/9780470744383
- [6] J. Chu, R.P. Devaty, E.C. Fernandes da Silva, J. Gutowski, B. Hönerlage, F. Matsukura, K. Sebald, T. Voss. *Semiconductors New Data and Updates for III-V, II-VI and I-VII Compounds*, Berlin: Springer-Verlag, 2010. 502 p. DOI: 10.1007/978-3-540-92140-0
- [7] В. О. Москалюк, В. І. Тимофеев, А. В. Федяй, *Надшвидкодійні прилади електроніки*, Київ: Політехніка, 2014, 528 с.
- [8] I. Baida, V. Moskaliuk, «Alloy scattering relaxation time simulation», *on International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, September 11–15, 2017. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095398
- [9] Т. Саурова, Д. Кuzmenko, «Research of impulse properties of indium phosphide», *BULLETIN of Kyiv Polytechnic Institute. Series INSTRUMENT MAKING*, vol. 54(2), pp. 49–52, 2017. DOI: 10.20535/1970.54(2).2017.119530
- [10] К. В. Куликов, В. О. Москалюк, В. О. Тимофеев, «Моделирование динамических vlastивостей III-нитридов в сильных электрических полях», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol.1, no. 5 (109), pp. 37–52, 2021. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225733
- [11] Т. А. Саурова, В. О. Борс, «Властивості арсеніду алюмінію-галію в імпульсному режимі електричного поля», *Вісник НТУУ "КПІ", серія приладобудування*, Вип. 57(1), с. 49–55, 2019. DOI: 10.20535/1970.57(1).2019.172023
- [12] E. Caruso, A. Pin, P. Palestri, L. Selmi, «On the electron velocity-field relation in ultra-thin films of III–V compound semiconductors for advanced CMOS technology nodes», *on Joint International EUROSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSOI–ULIS)*, Athens, Greece, April 3–5, pp. 124–128, 2017. DOI 10.1109/ULIS.2017.7962587
- [13] К. В. Куликов, «Всплеск дрейфовой скорости носителей в нитриде галлия». н.-техн. сб. «Электроника и связь» (ISSN 1811-4512), тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии», Часть 2, с. 28–31, 2009.

УДК 621.382.3

T. Saurova, V. Shpichenko*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine***RESEARCH OF THE INDIUM ARSENIDE IMPULSE PROPERTIES**

Indium arsenide is a promising material for creation of high-performance electronic and optoelectronic devices. A high level of knowledge of indium arsenide properties will make it possible to predict the potential possibilities of its application, as well as multicomponent semiconductors based on it. The problem of studying the properties of InAs in the regime of a strong electric field is relevant.

In scientific and technical sources, data on the impulse properties of indium arsenide in the regime of a strong electric field are poorly presented. The purpose of the work is to study the field-velocity dependence in the pulsed mode of a strong electric field and to analyze the response to changes in its amplitude, pulse duration, and leading edge duration.

The method of relaxation equations was used to analyze the field-velocity characteristic in the regime of a strong electric field. In the electric field static regime, the highest value of the drift velocity was $3 \cdot 10^5$ m/s (with a field amplitude of 2 kV/cm), in the saturation section it was $0.9 \cdot 10^5$ m/s.

An analysis of the field-velocity dependence in the pulsed mode of a strong electric field showed that with an increase in the field amplitude, the maximum value of the drift velocity increases, and the duration of the "overshoot" shortens. Fields of 5–30 kV/cm correspond to an increase in the highest velocity value by a factor of 2.7–8. The spatial distribution of the drift velocity gave an estimate of the average velocity and distance traveled by charge carriers at different field values.

An increase in the duration of the leading edge duration of the field pulse caused a delay in transient processes. At $12 \text{ kV/cm} < E$, the peak value of the drift velocity additionally decreases. The duration of a strong electric field pulse has a significant effect only at values less than the formation time of the drift velocity maximum. Such values of the pulse duration lead to a decrease in the rate of drift and relaxation processes.

Comparison of the field-velocity dependences in the high-field pulsed mode showed that the maximum value of the drift velocity of InAs electrons exceeds the corresponding values: GaAs, InP – by several times; GaN - an order of magnitude. The duration of the "overshoot" of the drift velocity for InAs is somewhat longer than for GaAs, InP, GaN.

Key words: indium arsenide; drift velocity; impulse properties; method of relaxation equations.

*Надійшла до редакції
02 серпня 2022 року*

*Рецензовано
04 вересня 2022 року*



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).