

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ДВНЗ «ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»**

**ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(М. ВІННИЦЯ, УКРАЇНА)**

**ШТУТГАРТСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(М. ШТУТГАРТ, ФРН)**

**ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ГАМБУРГ-ХАРБУРГ (М. ГАМБУРГ,
ФРН)**

**ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ім.
Г.Є.ПУХОВА НАН УКРАЇНИ**

М А Т Е Р І А Л И

Сьомої міжнародної науково-технічної конференції

"МОДЕЛЮВАННЯ І КОМП'ЮТЕРНА ГРАФІКА"

**18-24 вересня 2017 року
м. Покровськ, м. Київ**

УДК 004.3+004.9+004.2+51.7+519.6+519.7

Публікується згідно з рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 1 від 07.09.2017).

Збірник містить наукові статті співробітників ДонНТУ та інших навчальних і наукових закладів України, які взяли участь у роботі Сьомої міжнародної науково-технічної конференції "Моделювання і комп'ютерна графіка", що проводилась 18-24 вересня 2017 року у ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» у м. Покровську. Публікації висвітлюють результати наукових досліджень і розробок в таких напрямках, як інформатика, чисельні методи, паралельні обчислення, програмування, розробка засобів обчислювальної техніки, дослідження комп'ютерних мереж, машинна графіка і обробка зображень, математичне моделювання в різних галузях. Матеріали збірника призначені для наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, аспірантів та студентів.

Видавець – Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

Конференція проводилась за підтримки:

- гранту Erasmus+ CBHE action 561728-EPP-1-2015-1-ES-EPPKA2-CBHE-JP «GameHub: University-enterprises cooperation in game industry in Ukraine»,
- гранту Tempus 2013-4587-001-001- 544010-TEMPUS-DE-TEMPUS-JPHES TATU – «Trainings in Automation Technologies for Ukraine»,
- компанії QuartSoft,
- компанії PHOENIX CONTACT.

Адреса редакції: 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2, ДонНТУ.

Тел.: (06239) 2-09-38. E-mail: natalia.kostiukova@donntu.edu.ua

З М І С Т

Пленарні доповіді

Зорі С.А., Башков Є.О.	7
ВИСОКОПРОДУКТИВНІ ЗАСОБИ РЕАЛІСТИЧНІ ПРОСТОРОВОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ТРЕХВИМІРОНОЇ КОМП'ЮТЕРОНОЇ ГРАФІКИ	
Колесницький О.К.	20
МОДЕЛЮВАННЯ СПАЙКІНГОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	
Романюк О. Н., Дудник О. О.	26
РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТЕКСТУРУВАННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ФОТОРЕАЛІСТИЧНОГО РЕНДЕРИНГУ	

Секція 1.

Моделювання систем

Гуськова В.Г., Бідюк П.І.	34
ПОБУДОВА СЦЕНАРІЇВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БАЙЄСІВСЬКИХ МЕТОДІВ	
Дмитрієва О.А., Половинка О.Л.	37
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЕ	
Святний В.А., Гуськова Н.Г.	42
ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПРОСТОРОВИХ СТРУКТУР	
Дмитрієва О.А., Дараган Т.Г.	49
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	
Бобилєва О. С., Дмитрієва О. А.	56
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСТРАПОЛЯЦІЙНОГО МЕТОДУ ДОРМАНА- ПРИНСА 5(4) З КЕРУВАННЯМ КРОКУ	
Kovalov S.	59
FUZZY CONTROL ALGORITHM SIMULATION	
Лисенко Г. Л., Кошельна І. В., Бурмакіна О. В.	65
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОГЛИНАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ТРАНСПАРАНТА З ДВОХВИЛЬОВИМ КЕРУВАННЯМ	
Маслова Н.О., Половинка О.Л.	71
ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ОБСЯГІВ ДАНИХ ПРИ РІШЕННІ ЗАДАЧ ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ ЛОГІСТИКИ	

Масюк А.Л., Мирошкин А.Н. МУЛЬТИПЛАТФОРМЕННЫЙ РЕДАКТОР ДВУМЕРНЫХ ГРАФОВ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ В КОНТЕКСТЕ МОДЕЛЬНОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ГРАФОВ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ	78
Фельдман Л.П., Назарова І.А., Гризадубова Я.А., Костін В.І. ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБЧИСЛЕНЬ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНОМУ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧІ КОШІ НА ГРАФІЧНИХ ПРОЦЕСОРАХ ЕКСТРАПОЛЯЦІЙНИМИ МЕТОДАМИ	84
Ануфрієв П. О. ПРОГРАМНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ЛЕКСИКИ АНГЛІЙСЬКОЇ МОВИ	92
Федоров Є.Є., Патрушев В.О., Патрушева О.І. МЕТОД ПРОГНОЗУ ПРИБУТКУ ІНТЕРНЕТ МАГАЗИНУ НА ОСНОВІ ПОВНОЗВ'ЯЗНОЇ ДОВГОКОРОТКОЧАСНОЇ ПАМ'ЯТІ	95
Псьол В. О., Маслова Н. О. АЛГЕБРАЇЧНИЙ АНАЛІЗ ШИФРІВ, ОСНОВАНИХ НА КРИПТОГРАФІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕННЯХ В АЛГЕБРИ ПОЛІВ ГАЛУА	108
Тищенко Г. В., Святний В. А., Бищенко Ю. А. СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ З ВЕБ-РЕСУРСІВ	112

Секція 2.

High Performance Computing (HPC) and Parallel Simulation Technology (ParSimTech)

Resch M. BRINGING TOGETHER HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND DATA ANALYTICS	117
Mangold M., Khlopov D., Lihong Feng L. NONLINEAR MODEL REDUCTION OF POPULATION BALANCE EQUATIONS BY POD-DEIM BASIS CONSTRUCTION	117
Погорілий С.Д., Бойко Ю.В., Сальніков А.О., Слюсар Є.А., Борецький О.Ф. ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ RAINBOW У НАУКОВО- ДОСЛІДНИХ ГРІД-ПРОЕКТАХ	123

Секція 3.

Комп'ютерна графіка та візуалізація в ігрових додатках

Драченко М.Ю., Зорі С.А. ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ БІЛАТЕРАЛЬНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ ВИРШЕННЯ ЗАВДАНЬ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ НА ЗОБРАЖЕННЯХ ЗАСОБАМИ ТЕХНОЛОГІЇ CUDA	130
Глинська К.С. РЕАЛІЗАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У СТРАТЕГІЧНИХ ІГРАХ НА ПРИКЛАДІ ІГРОВОГО ДОДАТКУ «ШАХИ»	136

Дзюбинский А.С., Дмитриева О.А. РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ СИМУЛЯЦИИ ИГРОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ В СРЕДЕ UNITY НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ KINECT	142
Кривенко О.М., Зори С.А. БАЗОВІ ПІДХОДИ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ НАВІГАЦІЇ У ТРЬОХ ВИМІРНИХ ВІДЕОІГРАХ	145
Бищенко Ю. А., Костюкова Н. С., Тищенко Г. В. МЕТОДИ ПОБУДОВИ ВІРТУАЛЬНОГО ПРЕДМЕТНО- ПРОСТОРОВОГО РОЗВИВАЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА	148
Лукін О. Ю., Костюкова Н. С. ЛОГІЧНА ГРА- ГОЛОВОЛОМКА З ВИКОРИСТАННЯМ ДЕДУКТИВНОГО МЕТОДУ ПОШУКУ У БАЗІ ДАНИХ	152
Костюкова Н.С., Башков Є.О., Матрьонін А.А. ІНТЕРАКТИВНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЗВ'ЯЗКІВ У РЕЛЯЦІЙНІЙ БАЗІ ДАНИХ	157
Костюкова Н.С., Назарова І.А., Роговец Є.В. АНАЛІЗ РИНКУ КОМП'ЮТЕРНИХ ІГОР ЗАСОБАМИ ОН-ЛАЙН СИСТЕМ АНАЛІТИКИ	163
Лефтеров М.М. АНАЛІЗ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМІВ, ЩО МОЖУТЬ БУТИ ВИКОРИСТАНІ ДЛЯ ПОБУДОВИ ІГРОВОГО ФІЗИЧНОГО РУШІЯ ДЛЯ ТВЕРДИХ ЧАСТОК	171
Прядка Д. А., Маслова Н.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕДУРНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В КОМП'ЮТЕРНИХ ІГРАХ	176
Nikolskyu A., Bilynskyu Y., Lazarev A., Krasilenko V. COMPUTERIZED SPERM QUALITY ANALYZER	178
Павлов С.В., Ганиш Н.В., Бурденюк І.І., Чернишова Т.А., Поплавська А.А. МЕТОД УЗАГАЛЬНЕНОГО КОНТУРНОГО ПРЕПАРУВАННЯ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ БІОМЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ	183
Павлов С.В., Тимченко Л.І., Бурденюк І.І., Чернишова Т.А., Поплавська А.А. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ УЗАГАЛЬНЕНОГО Q-ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ В ЗАДАЧАХ ОБРОБЛЕННЯ НОРМАЛЬНОГО БІЛОГО ШУМУ	188
Романюк С.О., Безмертний Ю. О., Безмертна Г. В. ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ ПЛАСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ОБЛИЧЧІ ЛЮДИНИ	193
Романюк О. Н, Романюк О. В., Войт Б. Л. АНАЛІЗ ГРАФІЧНОЇ АХІТЕКТУРИ NVIDIA PASCAL	199
Романюк С. О., Вяткин С.И. МЕТОД МНОГОПРОХОДНОГО РЕНДЕРИНГА ОБЪЕМНЫХ ДАНЫХ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ	204
Romanuyuk A. N., Vyatkin S. I. DEFORMABLE INTERACTIVE VOLUME-ORIENTED RENDERING BY PERTURBATION FUNCTIONS	208

Романюк О. Н., Мельник О.В., Стукач О.В. МОДЕЛЮВАННЯ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО РАСТРА НА КВАДРАТНОМУ РАСТРІ	215
Тихонова О.А., Скрипник Т.В. СТВОРЕННЯ ІГРОВОГО ДОДАТКУ ЗАСОБАМИ ГРАФІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА UNITY 3D	219
Філатов І.А., Цололо С.О. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ДЕКОНВОЛЮЦІЇ ВІНЕРА ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ НА МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМАХ	228
Яровий А.А., Пасічник Д.Г., Василічишин Р.А. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ЦИФРОВОЇ КОРЕКЦІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ	234
Шумейко А.К., Башков Є.О. ПРОГРАМНЕ ПІДКЛЮЧЕННЯ СЕНСОРУ KINECT ДО КОНСТРУКТОРУ GAME MAKER	239
Ермолов А.А., Костюкова Н.С. АНАЛІЗ МЕТОДОВ ПОЙСКА НЕЧЕТКИХ ДУБЛІКАТОВ В БАЗЕ ДАННИХ ІЗОБРАЖЕНІЙ	244

Секція 4.

Моделювання систем та об'єктів промислової автоматизації

Воропаєва В.Я. ВИКОРИСТАННЯ TATU SMART LAB У ПІДГОТОВЦІ ТА ПЕРЕПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ З ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ	249
Дікова Ю.Л. СИСТЕМА ПРОГНОЗА СТАНУ ГІРНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ НА БАЗІ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПІДХОДУ	252
Єшан Р.В., Поцєпаєв В.В., Воропаєва В.Я. МОДЕЛЮВАННЯ ВОДОВІДЛИВНОЇ УСТАНОВКИ ЗАСОБАМИ МОБІЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ TATU	258
Поцєпаєв В.В. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАВАНТАЖЕНЬ НА ВИКОНАВЧИХ ОРГАНАХ ВИДОБУВНОГО КОМБАЙНА	263
Тихонова О.А., Скрипник Т.В. СУЧАСНІ ЗАСОБИ НАВІГАЦІЇ У ВИРІШЕННІ КОМЕРЦІЙНИХ ЗАВДАНЬ, ПРОГРАМА "ROUTE"	267
Бєзбожний В.С., Цололо С.О. АВТОНОМНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ ЗАМКАМИ НА ОСНОВІ NFC	274
Новіков В.Г., Цололо С.О. ПЛАТФОРМА РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА ОСНОВІ ARDUINO MEGA 2560	280

УДК 681.3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОГЛИНАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ТРАНСПАРАНТА З ДВОХВИЛЬОВИМ КЕРУВАННЯМ

Г. Л. Лисенко, І. В. Кошельна, О. В. Бурмакіна
Вінницький національний технічний університет

Розглядається математична модель поглинання світлового потоку при проходженні через електроабсорбційні модулятори на основі напівпровідникової структури GaAs з квантовими ямами AlGaAs в залежності від довжини світла та прикладеної напруги.

Поглинання випромінювання напівпровідником транспарантом може змінюватися в залежності від різних факторів, основними з яких є довжина хвилі керуючого випромінювання та величина прикладеної напруги. Ці залежності є основою для здійснення керування транспарантом на напівпровідникових структурах з квантовими ямами (КЯ). Тому отримаємо аналітичний вигляд математичної моделі залежності поглинання випромінювання транспарантом від керуючої довжини хвилі та прикладеної напруги.

Оскільки елементною базою для транспаранта було обрано електроабсорбційні модулятори ОСЕАМ [1], а особливістю їх побудови є те, що вони складається з двох вертикально вирощених один на одному р-і-п-діодів. Верхній р-і-п-діод є фотоприймачем (ФП) фотодіодом для керуючого випромінювання, а нижній - модулятором для інформаційного променя ЕАМ. Тому розглянемо окремо математичні моделі для фотодіода та модулятора (ЕАМ).

З експериментальних даних [1, 2] відомо, що для електроабсорбційних модуляторів на напівпровідникових структурах з КЯ, які використовуються для розробки транспарантів, існують графічні характеристики, що описують залежності коефіцієнта поглинання випромінювання від довжини хвилі та прикладеної напруги. Дані експериментальні результати отримані шляхом вимірювання поглинання випромінювання [3] напівпровідникової структури GaAs з квантовими ямами AlGaAs. Результати цих експериментів наведені на рис.1.

Для ФП керуючого випромінювання, який є р-і-п-діодом, справедливі залежності для струмів, що породжуються електронами і дірками. При освітленні транспаранту на основі ОСЕАМ зі сторони р-області струм, що породжується дірками, визначатиметься для $0 \leq t \leq \tau_1$, як

$$I_p(t) = \frac{qV_{h,satur}}{S} \left[1 - e^{-\alpha(V_{h,satur}(t-\tau_1))} \right], \quad (1)$$

та для $\tau_1 < t \leq \tau_p$ як

$$I_p(t) = \frac{qV_{h,satur}}{S} \left[e^{-\alpha(V_{h,satur}(t-\tau_1))} - e^{-\alpha(V_{h,satur}(\tau_p-\tau_1))} \right], \quad (2)$$

де $\tau_p = (x_1 + x_2) / v_{h,satur}$;

$$\tau_1 = x_1 / v_{h,satur}$$

S – товщина верхнього р-і-п-діода, яка складається з x_1, x_2, x_3 ;

$v_{h,satur}$ – швидкість сатурації дірок;

x_1 – товщина шару, що межує з р-областю;

x_2 – товщина поглинаючого шару, що лежить після шару x_1 .

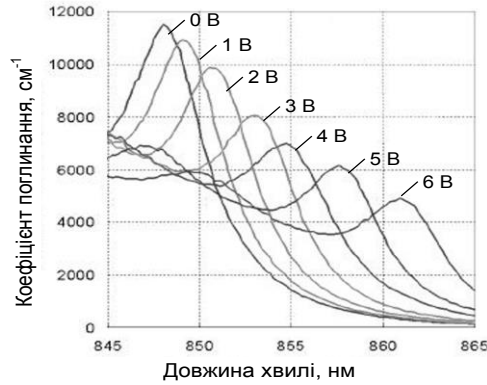


Рисунок 1 - Залежності коефіцієнта поглинання GaAs/AlGaAs при різних прикладених напругах [3]

Аналогічно до (1) і (2), при освітленні транспаранту зі сторони п-області струм для фотопримача, що породжується електронами визначатиметься для $0 \leq t \leq \tau_2$, як

$$I_n(t) = \frac{qV_{e,satur}}{S} \left[1 - e^{-\alpha x_2} \right] \quad (3)$$

та для $\tau_2 < t \leq \tau_n$ як

$$I_n(t) = \frac{qV_{e,satur}}{S} \left[1 - e^{-\alpha(L - v_{e,satur}t - x_1)} \right], \quad (4)$$

де $\tau_2 = x_3 / v_{e,satur}$;

$$\tau_n = (x_2 + x_3) / v_{e,satur}$$

$v_{e,satur}$ - швидкість сатурації електронів;

x_3 – товщина непоглинаючого шару, що лежить після шару x_2 .

Цей час відгуку імпульсу може бути керований будь-яким потоком даних для генерації струму фотодіодного модулятора.

Чутливість ФП описується формулою (5) та залежить від струму як функції від довжини хвилі випромінювання, який протікає через нього [4]

$$S(\lambda^{ctrl}) = \frac{I_{ph}(\lambda^{ctrl})}{P_{in}^{\lambda^{ctrl}}}, \quad (5)$$

де $I_{ph}(\lambda^{ctrl})$ - струм, що протікає через верхній р-і-п-діод;

$P_{in}^{\lambda^{ctrl}}$ – потужність керуючого випромінювання.

Для виведення математичної моделі поглинання інформаційного випромінювання модулятором (нижнім р-і-п-діодом) необхідно застосувати залежність чутливості ЕАМ від поглинання цього випромінювання:

$$S(\lambda, V) = \frac{e \cdot \eta \cdot \lambda}{h \cdot c} [1 - e^{-\alpha(\lambda, V)L}]. \quad (6)$$

Крім того, можна переписати (5) для ЕАМ, щоб оцінити залежність чутливості від струму, що протікає через ЕАМ:

$$S(\lambda, V) = \frac{I_{EAM}(\lambda, V)}{P_{in}^{\lambda}}. \quad (7)$$

Співставивши формули (6) і (7) можливо виявити залежність поглинання інформаційного випромінювання від прикладеної напруги:

$$\frac{I_{EAM}(\lambda, V)}{P_{in}^{\lambda}} = \frac{e \cdot \eta \cdot \lambda}{h \cdot c} [1 - e^{-\alpha(\lambda, V)L}]. \quad (8)$$

З (8) не важко знайти, що

$$e^{-\alpha(\lambda, V)L} = 1 - \frac{I_{EAM}(\lambda, V) \cdot h \cdot c}{P_{in}^{\lambda} \cdot e \cdot \eta \cdot \lambda}. \quad (9)$$

Застосувавши операцію логарифмування до (9), отримаємо модель залежності поглинання від прикладеної напруги та довжини хвилі випромінювання $\alpha(\lambda, V)$

$$\alpha(\lambda, V) = -\frac{1}{L} \ln \left(1 - \frac{I_{EAM}(\lambda, V) h c}{e \eta \lambda P_{in}^{\lambda}} \right), \quad (10)$$

де η – квантова ефективність;

L – довжина модулятора;

P_{in}^{λ} – потужність інформаційного випромінювання;

h – стала Планка;

c – швидкість світла;

e – заряд електрона;

$I_{EAM}(\lambda, V)$ – залежність струму, що протікає через електроабсорбційний модулятор від прикладеної до нього напруги та довжини хвилі інформаційного випромінювання.

Із (10) випливає, що поглинання, яке є функцією довжини хвилі і прикладеної напруги, залежить також і від струму, що проходить через модулятор.

Для перевірки відповідності знайденого аналітичного вигляду математичної моделі (10) експериментальним даним [1, 2] необхідно знати залежність фотоструму, що протікає через електроабсорбційний модулятор, від довжини хвилі та прикладеної напруги.

Залежності фотоструму від довжини хвилі керування та напруги було експериментально досліджено Д. Міллером в роботі [5]. Використовуючи комп'ютерні методи інтерполяції таблично заданих значень та математичні формули полінома Лагранжа, було виведено аналітичні залежності фотоструму від довжини хвилі та прикладеної напруги.

Результат залежності $I_{EAM}(\lambda, V)$ має вигляд

$$I_{EAM}(\lambda, V) = 2 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda \cdot 10^6 - 7 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda \cdot 10^5 + 10^{-6} \cdot \lambda \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot 10^2 - 0,3 \cdot \lambda - 8 \cdot 10^{-4} V + 0,4036. \quad (11)$$

Підставляючи аналітичну залежність фотоструму від довжини хвилі та напруги (2.20) у (2.19), отримаємо остаточний вигляд математичної моделі поглинання випромінювання від довжини хвилі і прикладеної напруги:

$$\alpha(\lambda, V) = -\frac{1}{L} \ln \left(1 - \frac{hc}{e\eta\lambda P_{inc}} \cdot \left[2 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda \cdot 10^6 - 7 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda \cdot 10^5 + 10^{-6} \cdot \lambda \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot 10^2 - 0,3 \cdot \lambda - 8 \cdot 10^{-4} V + 0,4036 \right] \right) \quad (12)$$

Дослідимо математичну модель (12) на зміну довжини хвилі і прикладеної напруги. Зокрема, проаналізуємо, як зміниться поглинання ЕАМ при $\lambda \rightarrow 0$ та $\lambda \rightarrow \infty$. Проте такі записи для λ необхідно уточнити. Оскільки робочою областю довжин хвиль на напівпровідниках є ближній ІЧ діапазон, то обмежимося його межами, оскільки поглинання на інших довжинах хвиль для напівпровідників

не відбуватиметься. Крім того, з експериментальних даних відомо, що не лінійність залежності поглинання від довжини хвилі існує в діапазоні до 0,86 мкм. Тому оберемо це значення як верхню межу.

Вважатимемо, що при $\lambda \rightarrow 0$ маємо $\lambda \rightarrow 0,73$ мкм, а при $\lambda \rightarrow \infty$ маємо $\lambda \rightarrow 0,86$ мкм. Дослідимо чому будуть рівні границі $\lim_{\lambda \rightarrow 0} \alpha(\lambda, V)$ та $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \alpha(\lambda, V)$ при потужності інформаційного сигналу $N \cdot 10^{-3}$ Вт. Отже,

$$\lim_{\substack{\lambda \rightarrow 0 \\ V \rightarrow const}} \alpha(\lambda, V) = \lim_{\substack{\lambda \rightarrow 0.73 \\ V \rightarrow 1B}} \alpha(\lambda, V) = -\frac{1}{3 \cdot 10^{-4}} \ln \left(1 - \frac{0.8489hc}{0.73 \cdot 10^{-3} e \eta P_{in}^\lambda} \right) = N \cdot 10^2$$

З отриманих результатів видно, що для довжини хвилі 0,73 мкм величина поглинутого випромінювання буде недостатньою для здійснення модуляції інформаційного пучка.

Аналогічно, для $\lambda \rightarrow \infty$ справедливо

$$\lim_{\substack{\lambda \rightarrow \infty \\ V \rightarrow const}} \alpha(\lambda, V) = \lim_{\substack{\lambda \rightarrow 0.86 \\ V \rightarrow 1B}} \alpha(\lambda, V) = -\frac{1}{3 \cdot 10^{-4}} \ln \left(1 - \frac{0.8912hc}{0.86 \cdot 10^{-3} e \eta P_{in}^\lambda} \right) = N \cdot 10^2$$

Тобто, і для довжини хвилі 0,86 мкм також величина поглинутого випромінювання буде недостатньою для здійснення модуляції інформаційного пучка.

Дослідимо тепер частинний випадок всередині обраного діапазону 0,73...0,86 мкм. Обчислимо $\lim_{\lambda \rightarrow 848nm} \alpha(\lambda, V)$ при аналогічній вхідній потужності:

$$\lim_{\substack{\lambda \rightarrow 0.848 \\ V \rightarrow 1B}} \alpha(\lambda, V) = -\frac{1}{3 \cdot 10^{-4}} \ln \left(1 - \frac{1.662hc}{0.848 \cdot 10^{-2} e \eta P_{in}^\lambda} \right) = N \cdot 10^4.$$

Отже, видно, що для довжини хвилі 848 нм величина поглинутого випромінювання перевищує попередні результати на 2 порядки і буде достатньою для здійснення модуляції інформаційного пучка. Тому доцільно досліджувати значення поглинутого випромінювання саме в цьому діапазоні.

Аналогічно дослідимо математичну модель (12) при $V \rightarrow 0$ та $V \rightarrow \infty$. Випадок $V \rightarrow \infty$ обмежимо до $V \rightarrow 10$ В. Оскільки напруженість поля напівпровідникових лазерів, що застосовуються в якості джерел випромінювання для ЕАМ, становить $10^4 \dots 10^5$ В/см. Перерахувавши значення напруженості на товщину ЕАМ (яка досягає сотень мікрон), отримаємо $V \rightarrow 10$ В.

Отже, при $V \rightarrow 0$ для аналогічних значень потужності випромінювання маємо

$$\lim_{\substack{\lambda \rightarrow 0.848 \\ V \rightarrow 0}} \alpha(\lambda, V) = -\frac{1}{3 \cdot 10^{-4}} \ln \left(1 - \frac{1.582hc}{0.848 \cdot 10^{-2} e \eta P_{in}^{\lambda}} \right) = N \cdot 10^4.$$

При $V \rightarrow 10$ отримуємо

$$\lim_{\substack{\lambda \rightarrow 0.848 \\ V \rightarrow 10}} \alpha(\lambda, V) = -\frac{1}{3 \cdot 10^{-4}} \ln \left(1 - \frac{0.0862hc}{0.848 \cdot 10^{-2} e \eta P_{in}^{\lambda}} \right) = N \cdot 10^2.$$

З останнього виразу видно, що зі збільшенням прикладеної до модулятора напруги зменшується величина поглинутого випромінювання.

Дослідження математичної моделі (12) показало, що вона неоднаково справедлива для різних значень λ і V . Тому необхідно ввести обмеження для її застосування, які впливають з проведеного аналізу:

- 1) застосування математичної моделі можливе при низьких напругах (від 0 до 10 В);
- 2) адекватність результатів цієї моделі можлива в діапазоні довжин хвиль 0,73 – 0,86 мкм, що впливає з аналізу експериментальних даних [5, 6].

ЛІТЕРАТУРА

1. Vijit Sabnis. Optically-controlled electroabsorption modulators for future generation optical networks// A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stratford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2003. – 166 p.
2. Noah Charles Helman. Optoelectronic modulators for optical interconnects// A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stratford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2005. – 178 p.
3. Bianca Elizabeth Nelson Keller. Wavelength division multiplexed optical interconnects using short pulses// A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2002. - P.48.
4. Gordon Arthur Keller. Optical interconnects to silicon CMOS: integrated optoelectronic modulators and short pulse systems// A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2002. – 182 p.
5. Excitons in resonant coupling of quantum wells/ A.M.Fox, D.A.B.Miller, G.Livescu [and other]// Physical Review B. – 1990/ - Vol.42, №3. – P. 1841-1844.
6. Оптоелектронні напівпровідникові транспаранти для швидкодійних спеціалізованих обчислювачів : монографія / Г. Л. Лисенко, І. В. Мялківська. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 140 с.

Отримано 26.06.2017