

УДК 535.8  
№ держреєстрації 0115U004308  
Інв. №

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г.В. КАРПЕНКА  
(ФМІ)**

79060, м. Львів-60, вул. Наукова, 5  
тел. (032)2633388, факс (032) 2633388

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Директор ФМІ НАН України  
академік НАН України  
З.Т. Назарчук

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р.

**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**

**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

«Розробка принципів побудови та технологічних аспектів створення спектральних приладів нового покоління на основі акустооптичних фільтрів для проведення космічних досліджень»  
Етап 2. “ Технологічні особливості розроблення акусто-оптичних фільтрів для спектральних приладів аерокосмічного базування ”  
*(назва наукової роботи)*

Шифр теми П-102-15

Керівник НДР  
зав. відділу оптико-цифрових систем  
діагностики (№ 5) ФМІ НАН України  
д.т.н., ст.н.с.

\_\_\_\_\_ Л.І.Муравський  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 р.

Львів 2015

**Керівник НДР**

Завідувач відділу № 5, д.т.н., ст.н.с.

Л.І.Муравський

**Відповідальні виконавці,**

Зав. відділу. ЛЦ ІКД НАНУ та ДКАУ, к.т.н.

М.О. Мельник

**Виконавці від ФМІ НАН України**

Ст.н.с. від. № 5, к.т.н., ст.н.с.

Т.І. Вороняк

Н.с. від. № 5, к.т.н.

О.М. Сахарук

Пров. інж. від. № 5

Г.І. Гаськевич

**Виконавці від ЛЦ ІКД НАН та НКА України**

Заст. зав. відділу .

Б.І.Каліта.

Молодший науковий співробітник.

О.С.Сорока

Провідний інженер

В.К. Ліпський

Інженер 1 категорії

Р.М.Мельник

Аспірант

О.Г.Решетка

НДР виконується в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012-2016 рр. та на підставі розпорядження Президії НАН України від 26.03.2015 № 122.

## **1. Доцільність виконання НДР:**

Вирішення великого числа практично важливих задач за допомогою космічних методів є сьогодні стандартною технологічною процедурою. При цьому максимальний обсяг інформації про поверхню і атмосферу Землі реалізується, як правило, шляхом аналізу світлового поля, яке реєструється бортовою оптичною апаратурою.

Існуючі в даний час апаратні засоби для дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) охоплюють практично всі інформаційно важливі області оптичного випромінювання: від ультрафіолетової (УФ) до далекої інфрачервоної (ІЧ). Більшість задач ДЗЗ, що стосуються об'єктів на поверхні Землі, розв'язують за допомогою бортової апаратури, що працює у видимій і короткохвильовій частині ближнього ІЧ діапазонах спектра ( $\approx 0,4 \dots 1,0$  мкм). Проблеми, пов'язані з атмосферою Землі і деякими спеціальними задачами, часто вимагають роботи в більш довгохвильових (середньому ІЧ і далекому ІЧ) спектральних діапазонах.

На даний час одним з важливих і пріоритетних напрямів розвитку засобів і методів дистанційного зондування Земної поверхні є розробка і застосування відеоспектрометрів.

У відеоспектрометрах реалізуються принципи нової наукової дисципліни – зображувальної спектроскопії, у якій крім геометричних використовуються спектральні характеристики об'єктів. Поява відеоспектрометрів пов'язана з розвитком нових технологій, з розробкою матричних приймачів і селективних елементів із високими спектральними та експлуатаційними характеристиками. В результаті відеоспектральної зйомки формується багатовимірне просторово-спектральне зображення, в якому кожна елементарна ділянка зображення, тобто «піксел», характеризується власним спектром. Таке зображення носить назву «куба» інформації, два виміри якого відповідають просторовому зображенню місцевості на площині, а третій – характеризує спектральні властивості зображення.

Спрощена схема відеоспектрометра – цільової апаратури (ЦА) космічного апарату (КА) – являє собою послідовно розміщені на оптичній осі три головні функціональних модулі: формуючий об'єктив (приймає зовнішні світлові сигнали і формує зображення спостережуваних об'єктів на фотоприймачі); оптичний селектор (забезпечує, у необхідних поєднаннях, фільтрацію просторових, амплітудних, спектральних і поляризаційних частот світлового поля); фотоприймач (перетворює прийняті світлові сигнали в електричні). У сукупності це забезпечує реєстрацію геометричних, спектральних і поляризаційних

параметрів спостережуваних об'єктів, характеризуючи тим самим їх інформаційні якості, істотні для споживачів.

Поряд зі складнощами практичної реалізації кожного з перерахованих модулів, особливо значення при нарощуванні практичних можливостей ЦА має оптичний селектор. У більшості випадків саме його функціональні можливості визначають перспективи розвитку бортової реєструючої апаратури для ДЗЗ. Зазвичай, як селективні елементи використовують призми (клиновидний фільтр), дифракційні ґратки, інтерферометри, світлофільтри, в т.ч. рідкокристалічні структури та ПЧМС «ПРИЗ». Всі наведені вище типи оптичних селекторів мають або фіксовані, або перестроювальні з відносно низькою швидкістю спектральні характеристики. Це не дає змоги реалізувати перспективні види ЦА з адаптивними режимами експлуатації, практичне використання яких в даний час зростає. Наявність подібних функцій космічного апарату (КА) дало б можливість забезпечити суттєву економію технічних і фінансових ресурсів при проведенні ДЗЗ.

Для вирішення нових складних завдань, які стоять перед космічною наукою і технікою, можливо із застосуванням оптичних селекторів, що володіють гнучко керованими технічними характеристиками. До таких селекторів слід віднести, насамперед, акустооптичні фільтри (АОФ).

Такий фільтр складається тільки з монокристалічних матеріалів, не має механічно рухомих елементів, керується електронними сигналами і здатний витримувати вельми жорсткі, у тому числі космічні, умови експлуатації. У вирізаний спеціальним чином одновісний кристал вводять акустичну хвилю з частотою десятки і сотні мегагерц. Під її впливом у кристалі формується об'ємна фазова ґратка, на якій дифрагує падаючий під певним (бреггівським) кутом широкосмуговий світловий потік. На виході кристала утворюються три світлові пучки: недифрагований промінь нульового порядку, а також дифраговані монохроматичні пучки плюс першого і мінус першому порядків.

Спектральна інформація про об'єкти міститься в дифрагованих світлових пучках. Під час перебудови частоти і амплітуди акустичної хвилі умова Бреґга для оптичної хвилі змінюється і на виході кристала формуються вузькі спектральні смуги шириною від одиниць до десятків нанометрів. Час їх перемикання – не більше двох-трьох десятків мікросекунд.

Крім вузькосмугової спектральної фільтрації оптичного випромінювання, оптичний селектор на основі АОФ забезпечує високоякісну передачу зображень, сформованих вхідним об'єктивом ЦА (просторову фільтрацію світлових хвиль). Він має також високу світлосилу, співмірну із світлосилою Фур'є-перетворювача (інтерферометра).

Однак тільки цим не вичерпуються переваги подібного типу селектора: обидва дифраговані промені мають взаємно ортогональні площини поляризації. Це дає можливість

реєструвати високоякісні двовимірні зображення в різних спектральних інтервалах за двох поляризацій, як окремо, так і одночасно..

Крім названих переваг оптичного селектора на основі АОФ, слід звернути увагу також на його додаткові можливості, пов'язані з фільтрацією спектральних частот. Так, при одночасному впливі на кристал декількох акустичних хвиль він здатний здійснювати синхронну фільтрацію одного і того ж зображення в декількох спектральних інтервалах при двох поляризаціях. Шляхом цілеспрямованого (дистанційного) вибору спектральних інтервалів і площин поляризації, а також синтезу одержуваних при цьому зображень безпосередньо в площині фотоприймача ЦА, існує можливість здійснювати селекцію в реальному масштабі часу і передавати на Землю тільки необхідні споживачеві параметри зображень. Тим самим може бути створена адаптивно керована ЦА для реалізації технології гнучкої оперативної обробки інформації на борту КА і доставки її споживачам.

Застосування оптичного селектора на основі АОФ у складі перспективної ЦА може істотно розширити функціональні можливості КА для ДЗЗ, підвищити надійність і довговічність роботи бортової апаратури, мінімізувати матеріальні та фінансові витрати як у процесі створення і запуску апаратних засобів, так і на стадії отримання інформації з космосу. Європейське космічне агентство та НАСА успішно використовують бортові відео-спектрометри на основі акустооптичних фільтрів у міжпланетних та навколосемних космічних місіях. Однак через відсутність високоякісних широкоапертурних акустооптичних фільтрів в Україні стримується розвиток нового покоління спектральних приладів як аерокосмічного, так і наземного базування.

**2. Мета роботи:** Розроблення технологічних аспектів виготовлення акустооптичних фільтрів, які складають основу сучасних спектральних приладів аерокосмічного базування і забезпечують компактність, малі масогабарити та енергоємність, високу роздільну здатність та чутливість, надійність, можливість реєструвати декілька ділянок спектра випромінювання одночасно, оперативне переключення з одного діапазону спектра на інший з метою підвищення ефективності наукових космічних досліджень.

**3. Термін виконання 2-го етапу НДР – 2015 р.**

**4. Плановий обсяг коштів на виконання роботи у 2015 р. – 75 тис. грн.**

**5. Основні завдання 2-го етапу НДР:**

1) Огляд літератури щодо акустооптичних фільтрів (АОФ).

- 2) Вибір матеріалів світлозвукопроводу та п'єзоперетворювача для створення АОФ у спектральному діапазоні 0,4-1,0 мкм.
- 3) Розроблення методики розрахунку акустооптичних фільтрів з оптимальними характеристиками для спектральної області 0,4-1,0 мкм.
- 4) Відпрацювання технологічних операцій виготовлення Брегівських комірок для АОФ. Формулювання технологічних особливостей виготовлення АОФ.
- 5) Розроблення принципів схем блока керування АОФ.
- 6) Виготовлення макетного зразка АОФ на діапазон довжин хвиль 0,4 – 1,0 мкм та дослідження його характеристик.

#### **6. Основні наукові результати отримані при виконанні 2-го етапу НДР (2015 р.).**

- 1) Проведено патентний пошук та здійснено аналіз конструктивних і технологічних особливостей створення колінеарних та неколінеарних акустооптичних фільтрів для розробки спектральних приладів нового покоління різного функціонального призначення.
- 2) Проведено аналіз анізотропних властивостей акустооптичних кристалів з метою створення високоефективних колінеарних та неколінеарних АОФ для спектрального діапазону 0,4-1,0 мкм.
- 3) Здійснено вибір матеріалів світлозвукопроводу та п'єзоперетворювача для створення акустооптичних фільтрів у спектральному діапазоні 0,4-1,0 мкм.
- 4) Розроблено методику розрахунків створення АОФ з оптимальними характеристиками для спектральної області 0,4-1,0 мкм, зокрема, здійснено розрахунок параметрів елементів та технічних характеристик електроакустооптичного тракту АОФ з досягненням максимальних акустооптичної ефективності та кутового режиму дифракції.
- 5) Відпрацьовано технологічні операції щодо виготовлення Брегівських комірок АОФ та розроблено технологічну карту, яка включає в себе наступні операції: виготовлення світлозвукопроводу, виготовлення п'єзоперетворювача, нанесення на кристали світлозвукопроводу та п'єзоперетворювача металевих плівок, проведення холодної приварки кристалу п'єзоперетворювача до світлозвукопроводу, нанесення електродів на кристал п'єзоперетворювача, нанесення просвітлювальних плівок на кристал світлозвукопроводу.
- 6) Проведено аналіз схем та елементної бази для системи керування акустооптичними фільтрами. На основі методів розрахунку широкосмугових ланок узгодження з врахуванням мінімізації енергозатрат розроблено принципові схеми блока керування

неколінеарним акустооптичним фільтром для спектрального діапазону 0,4-1,0 мкм. Виготовлено складові елементи експериментального макету системи керування неколінеарним АОФ, а саме – інтерфейс, синтезатор частоти та підсилювач.

- 7) Виготовлено макетний зразок неколінеарного акустооптичного фільтра на основі кристалу парателуриту, який розрахований для роботи в спектральному діапазоні 0,4-1,0 мкм з наступними конструктивними та технічними характеристиками: лінійна апертура – 20×20 мм; кутова апертура – 23,2 град.; діапазон частот електричного сигналу 50-200 МГц; імпеданс – 50.
- 8) Проведено дослідження основних характеристик макетного зразка неколінеарного акустооптичного фільтра на основі кристала парателуриту і отримано наступні результати: максимальна дифракційна ефективність – 85% при потужності звукового сигналу 0,8 Вт; нерівномірність дифракційної ефективності – 20% для спектрального діапазону 0,4 - 0,7 мкм; усереднене спектральне розділення -5 нм для цього ж спектрального діапазону; час спектрального вибору - 25 нс.
- 9) Сформульовано основні вимоги до акустооптичних фільтрів з метою створення спектральних приладів аерокосмічного базування.
- 10) Визначено перелік організацій, які необхідно залучати для кооперації з метою створення конкурентоздатних акустооптичних фільтрів для спектральних приладів нового покоління:
  - НВП «Карат» (м. Львів) – спеціалізується на вирощуванні різного типу кристалів, їх обробці, нанесенні провідних та просвітлюючих плівок, фотолітографії тощо.
  - Підприємство «Елемент-А» (м. Дніпропетровськ) – спеціалізується на вирощуванні акустооптичних кристалів парателуриту, обробці та контролі їх параметрів.
  - Львівський центр ІКД НАНУ та ДКАУ – спеціалізується на системах керування, збору та обробки інформації.

## **7. Для отримання наукових результатів в 2015 р. проведений наступний комплекс робіт:**

- 1) У відділі оптико-цифрових систем діагностики (№ 5) ФМІ НАН України організована оптична лабораторія з вивчення анізотропних властивостей акустооптичних кристалів з метою створення на їх основі високоефективних акустооптичних фільтрів різного функціонального призначення. В даній оптичній лабораторії розроблені методики та оптичні схеми досліджень характеристик акустооптичних фільтрів.

- 2) У Львівському центрі ІКД НАНУ та ДКАУ створена технологічна дільниця нанесення металевих плівок на поверхні кристалів та холодної приварки п'єзоперетворювачів до світлозвукопроводу.
- 3) У Львівському центрі ІКД НАНУ та ДКАУ розроблено програмне забезпечення для керування апаратною функцією неколінеарних акустооптичних фільтрів для двох каналів поляризації для спектрального діапазону 0,4-1,0 мкм.

Враховуючи результативне виконання двох етапів проекту, можна стверджувати, що за умови фінансування наступного етапу будуть реалізовані пріоритетні технічні та технологічні рішення щодо створення вітчизняних конкурентоздатних спектральних приладів нового покоління для проведення наукових космічних досліджень. Фізико-механічний інститут НАН України в кооперації з перерахованими вище організаціями у 2017 році в стані розпочати випуск експериментальної партії акустооптичних фільтрів для спектрального діапазону 0,25 – 1,0 мкм.

## 7. Публікації за 2015 р.

- 1) Mytsyk B.G., Kost' Ya.P., Demyanyshyn N.M., Gaba V.M., Sakharuk O.M. Study of piezo-optic effect of calcium tungstate crystals by the conoscopic method // Optical Materials. – 2015. – V. 39, No 1. – P. 69-73.
- 2) Demyanyshyn N.M., Mytsyk B.G., Kost Y.P., Solskii I.M., Sakharuk O.M. Elasto-optic effect anisotropy in calcium tungstate crystals // Applied Optics. – 2015. – V. 54, No. 9. – P. 2347-2355.
- 3) B. G. Mytsyk, N. M. Demyanyshyn, O.M. Sakharuk. Elasto-optic effect anisotropy in gallium phosphide crystals // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54, Iss. 28, pp. 8546–8553.
- 4) А.О. Бурий, Д.М. Винник, Н.М. Демянишин, Б.Г. Мицик, М.О. Мельник, І.М. Сольський, Р.М. Мельник. Перспективи використання вольфрамату кальцію для акустооптичних пристроїв / VII Українсько-польська науково-практична конференція « Електроніка та інформаційні технології». 2015. Збірник матеріалів. Львів-Чинадієво, Україна, 27-30 серпня , С.48-51.
- 5) Муравський Л.І. Перспективні оптико-цифрові технології діагностики елементів конструкцій та обробки даних дистанційного зондування // 15 наук.-техн. конф. "Створення та модернізація озброєння та військової техніки в сучасних умовах", 17-18 вересня 2015 р., Чернігів.