

**Тема НДР:** Акустооптичні елементи на основі боратних кристалів для керування випромінюванням в ультрафіолетовому діапазоні спектру

**Виконавець:** Інститут фізичної оптики Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

**Характер НДР:** прикладне дослідження

**Назва бюджетної програми:** "Прикладні дослідження і розробки за напрямами науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ" (КПКВ 2201040).

**Терміни виконання:** початок – 01.01.2009, закінчення – 31.12.2010.

**Керівник НДР:** доктор фіз.-мат. наук, професор Влох Ростислав Орестович

**Отримані наукові і науково-технічні результати, їх наукова новизна та значимість.**

1. Відпрацьована технологія синтезу та росту монокристалів  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  з розмірами, що не перевищували  $12 \times 12 \times 8 \text{ мм}^3$ . Встановлено, що оптична якість монокристалів  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  суттєво залежить від таких ростових режимів, як швидкість витягування, швидкість обертання затравки та швидкість зниження ростової температури. Вперше вирощені монокристали  $\text{KLiB}_4\text{O}_7$ . Відпрацьована технологія синтезу та вирощені монокристали  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  і  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$ . При оптимальних умовах росту і швидкості витягування  $\sim 0,5 \text{ мм/год}$  отримані оптично прозорі монокристали  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  діаметром 25 мм і довжиною 25-30 мм та з огранкою, що відповідає тригональній симетрії кристалу. Вперше розроблена технологія синтезу боратних стекел, складів  $\text{LiKB}_4\text{O}_7$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_6\text{O}_{10}$  та  $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$  і були отримані відповідні стекла. Виготовлено експериментальні зразки акустооптичних комірок з кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  та  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  за допомогою розробленої технології вакуумного дифузійного зварювання п'єзоперетворювачів із звукопроводами.
2. На основі структурних досліджень кристалів  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  методом порошкової дифракції високої роздільної здатності з використанням синхротронного випромінювання були визначені структурні параметри всіх атомів для температур 10–290 К. Досліджена дифракція когерентних нейтронів в порошках  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , а також теплоємність, теплове розширення і діелектричні спектри при низьких температурах в кристалах  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ .
3. Експериментально отримані значення всіх коефіцієнтів матриць еластичних жорсткостей і податливостей, а також значення п'єзооптичних і фотопружних коефіцієнтів кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{KLiB}_4\text{O}_7$ ,  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  і  $\text{PbB}_4\text{O}_7$ . На основі отриманих значень швидкостей акустичних хвиль побудовані поверхні повільностей цих хвиль для кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{KLiB}_4\text{O}_7$ ,  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  і  $\text{PbB}_4\text{O}_7$  та проаналізовані геометрії оптимальних акустооптичних взаємодій. Показано, що коефіцієнт акустооптичної якості кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  може досягати значення  $M_2 = 126 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  у випадку взаємодії з найповільнішою акустичною хвилею при довжині хвилі оптичного

випромінювання 632,8 нм. Показано, що для довжини хвилі оптичного випромінювання 632,8 нм найвище значення коефіцієнта акустооптичної якості для кристалів  $\text{SrB}_4\text{O}_7$ , які є прозорими до 130 нм, становить  $M_2 = 0,36 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ . Проаналізовано акустооптичні властивості кристалів  $\text{KLiB}_4\text{O}_7$ . Показано, що кристали  $\text{KLiB}_4\text{O}_7$  можуть використовуватись як ефективні акустооптичні матеріали.

4. Показано, що в кристалах  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  і  $\text{PbB}_4\text{O}_7$  швидкості акустичних хвиль проявляють малу анізотропію. Встановлено, що швидкості акустичних хвиль у цих кристалах є достатньо високими для помітної акустооптичної ефективності. Проаналізовано ефекти зносу потоку акустичної енергії повздовжньої та поперечної акустичних хвиль, що поширюються в кристалах  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  та  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . Показано, що відхилення напрямку потоку акустичної енергії від напрямку хвильового вектора є нульовим для експериментальних умов, що відповідають найбільшому коефіцієнту акустооптичної якості для випадку взаємодії з найповільнішою акустичною хвилею, що дозволяє отримати ефективну акустооптичну взаємодію. Проаналізовано відхилення потоку енергії акустичної хвиль, які поширюються в кристалах  $\text{KLiB}_4\text{O}_7$ . Показано, що для кристалів  $\text{KLiB}_4\text{O}_7$  відхилення потоку енергії найповільнішої акустичної хвилі від хвильової нормалі становить 7 град для експериментальних умов, що відповідають найбільшому значенню коефіцієнта акустооптичної якості при взаємодії з найповільнішою хвилею.
5. Продемонстрована можливість суттєвого підвищення ефективності акустооптичної дифракції шляхом вибору найповільнішої хвилі в межах акустичної анізотропії для забезпечення взаємодії. На прикладі кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  показано, що коефіцієнт акустооптичної якості може зрости на порядок при забезпеченні акустооптичної взаємодії з найповільнішою хвилею. Отримане значення коефіцієнта акустооптичної якості становить  $M_2 = 126 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  ( $\lambda=632,8 \text{ нм}$ ).
6. Один з основних висновків, який впливає з даних досліджень полягає у тому, що такі характеристики, як високе значення коефіцієнта акустооптичної якості кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$ , їх прозорість в глибокому ультрафіолетовому діапазоні спектру та їх стійкість до потужного лазерного випромінювання відносять ці матеріали до найкращих кристалів для керування потужним оптичним випромінюванням короткохвильового діапазону спектру. Мала анізотропія акустичних швидкостей в кристалах  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  і  $\text{PbB}_4\text{O}_7$  може бути корисною при розробці акустоелектронних пристроїв, так як при цьому не виникає необхідності вибору певного кристалографічного напрямку для вибору певного значення швидкості. Крім того, оскільки час переключення акустооптичних модуляторів пропорційний до часу проходження звукової хвилі через світловий пучок, то акустооптичні пристрої на основі кристалів  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  і  $\text{PbB}_4\text{O}_7$  матимуть високу швидкодію. Також ці

кристали можуть використовуватись як модулятори добротності. завдяки їх високій оптичній стійкості і прозорості в ультрафіолетовій області.

7. Експериментально досліджена дисперсія показників заломлення боратних стекол, складів  $\text{LiKB}_4\text{O}_7$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_6\text{O}_{10}$  та  $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$  у видимій області спектру, а відповідна дисперсія в ультрафіолетовому спектральному діапазоні була отримана на основі екстраполяції співвідношенням Зельмейера. На основі експериментально отриманих швидкостей акустичних хвиль і значень п'єзооптичних коефіцієнтів розраховані коефіцієнти пружної жорсткості та фотопружні константи. Показано, що коефіцієнти акустооптичної якості даних стекол можуть досягати досить високих значень. Зокрема для стекол складу  $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$   $-M_2=(201\pm 104)\times 10^{-15}\text{с}^3/\text{кг}$ , що на два порядки перевищує відповідний коефіцієнт для плавленого кварцу. Експериментальне спостереження акустооптичної дифракції світла підтверджує даний висновок. На основі експериментально досліджених спектрів пропускання показано, що стекла  $\text{LiKB}_4\text{O}_7$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_6\text{O}_{10}$  і  $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$  є прозорими в ультрафіолетовій області спектру аж до довжин хвиль 165–190 нм. Крім цього, виявлено, що дані стекла є стійкими до потужного лазерного випромінювання. Зокрема, поріг руйнування стекол -  $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$  досягає  $24,7\text{ГВт}/\text{см}^2$ . Ці характеристики свідчать про те, що нами виявлені ефективні, недорогі акустооптичні матеріали для керування потужним лазерним випромінюванням в коротко-хвильовій області спектру.
8. Показано що за рахунок дисперсії показників заломлення коефіцієнт акустооптичної якості кристалів  $\text{SrB}_4\text{O}_7$ , який при довжині хвилі оптичного випромінювання  $\lambda=632,8\text{ нм}$  становить  $0,36\times 10^{-15}\text{с}^3/\text{кг}$  для  $\lambda=442\text{ нм}$  становитиме  $0,38\times 10^{-15}\text{с}^3/\text{кг}$ , для  $\lambda=325\text{ нм}$  –  $0,41\times 10^{-15}\text{с}^3/\text{кг}$ , а для  $\lambda=150\text{ нм}$  –  $\sim 10^{-15}\text{с}^3/\text{кг}$ . При цьому для кристалу  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  дифракційна ефективність зростає у 47,3 разів при переході від  $\lambda=632,8\text{ нм}$  до  $\lambda=150\text{ нм}$  і при потужності 1 Вт становитиме 22%. Для кристалів  $\text{PbB}_4\text{O}_7$  теж спостерігатиметься зростання коефіцієнта акустооптичної якості при переході в ультрафіолетову область спектру (для  $\lambda=325\text{ нм}$  - в 1,42 разів у порівнянні з  $\lambda=632,8\text{ нм}$ ).
9. Встановлено, що кристали  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  володіють високим значенням коефіцієнта акустооптичної якості, який в ультрафіолетовій області спектру становить  $127\times 10^{-15}\text{с}^3/\text{кг}$  (при  $\lambda=250\text{ нм}$ ). Таким чином стовідсоткова дифракційна ефективність досягатиметься при потужності акустичного сигналу 0,1 Вт. Експериментально виявлено, що акустооптична дифракційна ефективність кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  суттєво зростає в короткохвильовому діапазоні спектру і при довжині хвилі 325 нм досягає значення  $\sim 75\%$  при акустичній потужності 0,04 Вт. Дана ефективність, практично відповідає повній перекачці оптичної енергії в дифраговані максимуми. Це у свою чергу призведе до 100% глибини модуляції модулятора на основі кристалу  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$ . Крім

цього виявлено, що спектральна поведінка акустооптичної дифракційної ефективності не пов'язана з дисперсією ефективної фотопружної константи, а визначається, в основному, безпосередньою залежністю дифракційної ефективності від довжини хвилі оптичного випромінювання. Показано, що для боратних стекел складу  $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$  при переході в ультрафіолетову область спектру коефіцієнт акустооптичної якості зростатиме і при  $\lambda=325$  нм досягне значення  $\sim 300 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ . При цьому дифракційна ефективність набуде стовідсоткового значення при потужності акустичного сигналу  $\sim 0,1$  Вт.

10. Проведено систематизацію акустооптичних матеріалів на основі їх швидкостей акустичних хвиль і сегнетоеластичних властивостей. Встановлено, що відомі ефективні акустооптичні матеріали володіють сегнетоеластичними властивостями. Завдяки низьким швидкостям акустичних хвиль, спричинених пружною нестабільністю при фазовому переході, пом'якшенню акустичних фононів, аномальній залежності констант пружної жорсткості, коефіцієнт акустооптичної якості цих кристалів може досягати значень порядку  $10^{-10} \text{ с}^3/\text{кг}$  при температурі фазового переходу і  $10^{-12} \text{ с}^3/\text{кг}$  при нормальних умовах. Анізотропія і великі значення фотопружних коефіцієнтів будуть мати вирішальний вплив у акустооптичній взаємодії у випадку майже ізотропних швидкостей акустичних хвиль. Слід зауважити, що ізотропність акустичних швидкостей звичайно не властива для сегнетоеластиків. Прикладом таких кристалів є -  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  і  $\text{PbB}_4\text{O}_7$ . До проаналізованих матеріалів, визначених як сегнетоеластики належать також парателурит та альфа-борат барію.

#### **Отримана науково-методична і (або) науково-технічна продукція.**

- Експериментально та теоретично продемонстровано можливість суттєвого підвищення ефективності акустооптичної дифракції шляхом вибору найповільнішої хвилі в межах акустичною анізотропії для забезпечення взаємодії. На прикладі кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  показано, що коефіцієнт акустооптичної якості може зрости на порядок величини при забезпеченні акустооптичної взаємодії з найповільнішою хвилею. Таким чином запропоновано метод оптимізації акустооптичної взаємодії з метою підвищення її ефективності.
- Встановлено, що високе значення коефіцієнта акустооптичної якості кристалів  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$ , їх прозорість в глибокому ультрафіолетовому діапазоні спектру та їх стійкість до потужного лазерного випромінювання відносить ці матеріали до найкращих кристалів для керування потужним оптичним випромінюванням короткохвильового діапазону. Таким чином запропоновано нові високоефективні кристалічні матеріали для акустооптичного керування випромінюванням короткохвильового діапазону спектру.

- Розроблено практичні рекомендації щодо пошуку ефективних акустооптичних матеріалів. Проведено систематизацію акустооптичних матеріалів на основі їх швидкостей акустичних хвиль і сегнетоеластичних властивостей. Показано, що відомі ефективні акустооптичні матеріали володіють сегнетоеластичними властивостями. Завдяки низьким швидкостям акустичних хвиль, спричинених пружною нестабільністю при фазовому переході, пом'якшенню акустичних фононів, аномальній залежності констант пружної жорсткості, коефіцієнт акустооптичної якості цих кристалів може досягати значень порядку  $10^{-10}$  с<sup>3</sup>/кг при температурі фазового переходу і  $10^{-12}$  с<sup>3</sup>/кг при нормальних умовах.
- Вперше розроблена технологія синтезу боратних стекел, складів LiKB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, Li<sub>2</sub>B<sub>6</sub>O<sub>10</sub> та LiCsB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> і були отримані відповідні стекла. Їх характеристики свідчать про те, що нами виявлені ефективні, недорогі акустооптичні матеріали для керування потужним лазерним випромінюванням в короткохвильовій області спектру.
- Показано що коефіцієнт акустооптичної якості кристалів SrB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> при довжині хвилі 150 нм становить  $\sim 10^{-15}$  с<sup>3</sup>/кг, а відповідна дифракційна ефективність зростає у 47,3 разів при переході від  $\lambda=632,8$  нм до  $\lambda=150$  нм і при потужності 1 Вт становитиме 22%. Таким чином запропоновано нові акустооптичні, кристалічні матеріали для керування випромінюванням у вакуумному ультрафіолеті.

**Відмінні риси і перевага отриманих результатів (продукції) над вітчизняними або зарубіжними аналогами чи прототипами.**

Відповідно до отриманих результатів, запропоновані матеріали для акустооптичного керування потужним лазерним випромінюванням короткохвильового діапазону спектру за характеристиками перевищують відомі аналоги. До матеріалів, які використовуються в даний час для акустооптичного керування ультрафіолетовим випромінюванням відносяться кристали KN<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> та SiO<sub>2</sub>. Їх акустооптичні характеристики наведені в Таблиці. Як видно з Таблиці використання кварцу і дигідрофосфату калію вимагає високих акустичних потужностей і забезпечення додаткових запобіжних заходів таких, як охолодження акустооптичних комірок та герметичність (у випадку KN<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>). Натомість кристали  $\alpha$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> та боратне скло LiCsB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> володіють на два порядки вищими коефіцієнтами акустооптичної якості є прозорими в глибокому ультрафіолетовому діапазоні спектру і володіють значно вищою променевою стійкістю (див Таблицю). Крім цього кристал  $\alpha$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> є негігроскопічним і тому не вимагає додаткового захисту від дії вологи. Низькі керуючі потужності, які є наслідком високої дифракційної ефективності не вимагають використання охолодження акустооптичних елементів. Кристали SrB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> володіють областю прозорості до 130 нм і їх дифракційна ефективність при  $\lambda=150$  нм становитиме 22% при акустичній потужності 1 Вт. Жоден з акустооптичних матеріалів відомих до даного часу

не здатен забезпечити акустооптичну взаємодію в настільки короткохвильовому діапазоні спектру.

**Таблиця**

Параметр	Кристалічний кварц	Кристали $\text{KH}_2\text{PO}_4$	Кристали $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$	Кристали $\text{SrB}_4\text{O}_7$	Боратне скло $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$
Край поглинання, нм	~150	~190	~190	~130	~180
Коефіцієнт акустооптичної якості, $10^{-15} \text{с}^3/\text{кг}$	2,38	~2	127 при $\lambda=250\text{нм}$	1 при $\lambda=150 \text{ нм}$	201±104 при $\lambda=325\text{нм}$
Дифракційна ефективність (%) при керуючій потужності (Вт)	15-20 при 15	15-20 при 15	~100 при 0,1	22 при 1	~100 при ~0,1
Поріг оптичного руйнування, $\text{ГВт}/\text{см}^2$	0,2	17	59		24.7
Додаткові вимоги	охолодження	герметичність			герметичність

#### **Практична цінність результатів та продукції.**

Результати виконання даного проекту можуть бути використаними при розробці приладів для акустооптичного керування оптичним випромінюванням в ультрафіолетовому діапазоні спектру для застосування в оптичній літографії і оптичному зондуванні атмосфери, астрономії, біології, дослідженні стану навколишнього середовища та ін.

Виявленням і розробкою технології отримання порівняно дешевих, ефективних, прозорих в коротко-хвильовій області спектру і радіаційно стійких боратних стекел забезпечується можливість ефективного акустооптичного керування лазерним випромінюванням в ультрафіолетовій ділянці спектру для вищезгаданих цілей. Саме роботи з виготовлення таких акустооптичних елементів є конкурентно спроможними та інвестиційно привабливими.

Результати виконання проекту увійшли у дві докторські дисертаційні роботи. За результатами виконання проекту на даний момент представлена до захисту одна докторська дисертація.

**Бібліографічний перелік монографій, підручників, посібників, наукових статей, інших публікацій, дисертацій, які опубліковано за матеріалами досліджень за період виконання НДР:**

**Патент України:** Адамів В.Т., Бурак Я.В., Теслюк І.М., Мартинюк-Лотоцька І.Ю., Мись О.Г., Влох Р.О. Акустооптичний модулятор. Заявка № а201006403 від 25.05.2010.

**Статті в наукових журналах з встановленим індексом цитування за даними Thomson-Reuters ISI:**

1. Adamiv V., Teslyuk I., Dyachok Ya., Romanyuk G., Krupych O., Mys O., Martynyuk-Lototska I., Burak Ya., Vlokh R. 2010. Synthesis and optical characterisation of  $\text{LiKB}_4\text{O}_7$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_6\text{O}_{10}$  and  $\text{LiCsB}_6\text{O}_{10}$  glasses. *Appl.Optics*, 49: 5360-5365.
2. Martynyuk-Lototska, I., Dudok, T., Mys, O., Vlokh, R. Elastic, piezooptic and acoustooptic properties of  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  and  $\text{PbB}_4\text{O}_7$  crystals. 2009. *Opt.Mater.* 31: 660-667.
3. Martynyuk-Lototska I., Dudok T., Mys O., Romanyuk G. and Vlokh R. 2009. Acoustooptic interaction and photoelastic properties of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  and  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  crystals at the wavelength of 442 nm. *Ukr. J. Phys. Opt.* 10: 218-225
4. Martynyuk-Lototska I., Mys O., Dudok T., Adamiv V., Smirnov Ye., and Vlokh R. 2008. Acousto-optic interaction in  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$  and  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  crystals. *Appl.Optics*, 47: 3446-3454.
5. Vlokh R., Martynyuk-Lototska I. 2009. Ferroelastic crystals as effective acoustooptic materials. *Ukr. J.Phys. Opt.* 10: 89-99.
6. Adamiv V., Burak Y., Teslyuk I. 2009. Low-temperature change of lattice parameters in  $\text{LiKB}_4\text{O}_7$  single crystals. *Phys.Stat.Sol. (B)* 246: 361-363.
7. Adamiv V.T., Burak Ya.V., Teslyuk I.M. 2009. The crystal structure of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  compound in the temperature range 10-290 K. *Journ.All.Comp.* 475: 869-873.
8. Mys O.G. 2008. Obliquity of the acoustic energy flow in acoustooptic alpha –  $\text{BaB}_2\text{O}_4$  and  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  crystals. *Ukr. J. Phys. Opt.* 9: 256-260.
9. Senyshyn A., Schwarz B., Lorenz T., Adamiv V.T., Burak Ya.V., Banys J., Grigalaitis R., Vasylechko L., Ehrenberg H. and Fuess H. 2010. Low-temperature crystal structure, specific heat and dielectric properties of lithium tetraborate  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . *Journ.Appl.Phys.* 108: 093524-9 (9 pages).
10. Mys O.G. 2009. Acoustooptic and acoustic properties of  $\text{KLiB}_4\text{O}_7$  crystals. *Ukr. J. Phys. Opt.* 10: 165-174.

**Кількість штатних співробітників** - 20, кількість сумісників - 1, молодих учених з оплатою - 3, кількість студентів з оплатою - 0, які брали участь у виконанні НДР „Акустооптичні елементи на основі боратних кристалів для керування випромінюванням в ультрафіолетовому діапазоні спектру”.