

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Шеховцова Олексія Миколайовича «Технології отримання
монокристалів боратів, ванадатів, вольфраматів та молібдатів для
активних елементів лазерів з довжинами хвиль 1,06 і 1,5 мкм»
поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво
електронної техніки

Актуальність теми дисертації

Робота Шеховцова О.М. присвячена актуальній проблемі – розробленню технологій вирощування перспективних оксидних кристалів для лазерів та нелінійної оптики. Інтенсивний розвиток фотоніки, яка визначає розвиток багатьох напрямків в лазерному приладобудуванні, стимулює інтерес до пошуку більш ефективних та вдосконалення характеристик існуючих кристалічних середовищ твердотільних лазерів. Вибір активного середовища для розробки пристроїв лазерної техніки залежить від сукупності фізичних і технологічних характеристик матеріалів, а також від їх вартості, можливості промислового виробництва, токсичності технологічного циклу і стабільності характеристик матеріалу.

Дисертація безумовно є актуальною, оскільки існує велика потреба в нових ефективних активних середовищах лазерів. Слід зазначити, що достатньо гостро ця проблема стоїть для лазерів, які працюють в безпечному для ока людини діапазоні на довжинах хвиль в області 1,5 мкм.

Робота безпосередньо пов'язана з науковими напрямами Інституту монокристалів НАН України та виконувалася автором відповідно до затвердженої тематики Інституту в рамках держбюджетних та конкурсних проектів. Зокрема, Державна цільова науково-технічна програма «Розробка і освоєння мікроелектронних технологій, організація серійного випуску приладів і систем на їх основі на 2008-2011 роки», проект «Створення мікроелектронних приладів для сфери охорони здоров'я, моніторингу (зокрема ядерного) навколишнього природного середовища, запобігання тероризму» (2008-2011, № д/р 0108U004819); цільова програма наукових досліджень ВФТПМ НАНУ «Фундаментальні проблеми створення матеріалів з наперед заданими властивостями, методів їх з'єднання і обробки», проект «Нові лазерні матеріали на основі монокристалів вольфраматів та молібдатів для ВКР-лазерів і монокристалів групи АІВVІ для лазерів середньої ІЧ-області» (2007-2011, № д/р 0107U000859); цільова програма наукових досліджень ВФТПМ НАНУ «Фундаментальні проблеми створення матеріалів

з наперед заданими властивостями, методів їх з'єднання і обробки», проект «Створення нових матеріалів для лазерної та сцинтиляційної техніки на основі кристалів складних оксидів ванадатів та сполук групи АІВVI» (2012-2016, № д/р 0112U000781); проект відомчої тематики НАН України «Монокристали подвійних боратів для лазерів ближнього ІЧ-діапазону з перестроюванням частоти генерації» (2014-2016, № д/р 0114U003154); спільний україно-білоруський проект Державного фонду фундаментальних досліджень України та Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень «Нові моно- та полікристалічні матеріали, активовані іонами РЗЕ для використання в лазерній техніці» (2011-2012, № д/р 0112U003566); спільний україно-білоруський проект Державного фонду фундаментальних досліджень України та Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень «Монокристали складних оксидів: отримання, нелінійно-оптичні властивості та використання в лазерних системах» (2013-2014, № д/р 0113U005249); спільний україно-білоруський проект Державного фонду фундаментальних досліджень України та Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень «Нові лазерні і нелінійно-оптичні середовища на основі кристалів подвійних боратів і твердих розчинів вольфраматів і молібдатів» (2016-2017, № д/р 8116U008103).

В цих роботах здобувач брав участь як виконавець, відповідальний виконавець, керівник тем.

Обґрунтованість наукових положень, висновків, рекомендацій

Автором коректно сформульовані мета і задачі досліджень, а наукові положення та висновки підтверджені результатами експериментів.

Незважаючи на те, що сьогодні існує велика кількість матеріалів, для яких описані лазерні властивості та які можна застосовувати в якості активних середовищ, немає жодного матеріалу, який би задовольнив всі потреби розробників лазерного обладнання. Оскільки, в залежності від вихідної потужності, спектрального діапазону та області застосування лазерного приладу, вимоги до активного середовища можуть бути взаємовиключними.

Тому вибрані автором напрями дослідження, а саме: розроблення технології вирощування кристалів боратів $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Yb,Er}$ ($\text{RE} = \text{Y, Gd}$) для лазерів з довжинами хвиль $\geq 1,5$ мкм; розроблення технології вирощування кристалів подвійних ванадатів із родини мінералу «вітлокіт», які можуть суміщати лазерну генерацію та генерацію другої гармоніки; вдосконалення функціональних характеристик активних елементів ВКР лазерів на основі тетрагональних кристалів вольфраматів і молібдатів;

визначення можливості використання кристалів боратів, отриманих в рамках технологічних заходів по першому напрямку, в сцинтиляційних детекторах нейтронів та визначення можливості використання кристалів в міжнародних проектах по вивченню ядерних реакцій з великим часом напіврозпаду – достатньо обґрунтовані.

Обґрунтованість отриманих результатів підтверджено використанням сучасних методів та прецизійного обладнання для дослідження кристалів, зокрема рентгенівської дифракції високого розділення, нейтронної дифракції, дифракції синхротронного випромінювання, оптичної спектроскопії та інших. Достовірність сформульованих положень підтверджується літературними даними про сучасні уявлення щодо властивостей лазерних оксидних кристалів.

Наукова новизна та достовірність висновків роботи

Наукова новизна одержаних результатів обумовлена напрямами вибраними автором, наукові положення та висновки добре аргументовані. Автором вирішено декілька складних проблем – розроблені технології вирощування методом Чохральського перспективних для лазерної техніки подвійних боратів та ванадатів, вольфраматів та молібдатів. В рамках запропонованих технологічних рішень щодо вирощування кристалів, вирощені кристали та виготовлені елементи для сцинтиляційних болометрів для розв'язання фундаментальних проблем ядерної фізики – дослідження реакцій з великим періодом напіврозпаду.

Розроблена технологія вирощування кристалів боратів $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{VO}_3)_4:\text{Yb,Er}$ ($\text{RE} = \text{Y, Gd}$), виготовлені активні елементи та на їх основі створені макети лазерів з довжиною хвилі 1,53 мкм. З використанням активних елементів цих кристалів лазерна генерація на цій довжині хвилі отримана вперше. Досягнуті параметри цих лазерів достатні для їх практичного використання в у різних галузях та наукових дослідженнях. Автором вперше отримано лазерну генерацію на довжині хвилі 1,06 мкм для кристалів $\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7:\text{Nd}$ та $\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7:\text{Nd}$, які були відомі в літературі. Причому з ККД, що знаходиться на одному рівні з комерційними кристалами ітрій-алюмінієвого гранату $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$ при аналогічному тестуванні. Вперше вирощено ряд нових кристалів $\text{Ca}_3\text{Nd}_2(\text{VO}_3)_4$, $\text{Ca}_9\text{Nd}(\text{VO}_4)_7$, $\text{Ca}_{10}\text{M}(\text{VO}_4)_7$ ($\text{M} = \text{Li, Na, K}$) та $\text{Ca}_{10,5-x}\text{Pb}_x(\text{VO}_4)_7$ ($x=1,8; 3,5; 4,9$) досліджена їх кристалічна структура, дефекти, властивості, показані перспективи використання цих кристалів в лазерній техніці та нелінійній оптиці.

В цілому наукова новизна і висновки роботи логічно базуються на викладеному в дисертації матеріалі та достатньо добре теоретично та експериментально обґрунтовані. Достовірність і обґрунтованість отриманих

автором експериментальних даних підтверджується комплексом використаних сучасних апробованих методів. Сумуючи сказане можна стверджувати, що всі наукові положення та висновки аргументовано та обґрунтовано.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблена технологія отримання нових монокристалів $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{VO}_3)_4:\text{Yb,Er}$ ($\text{RE} = \text{Y, Gd}$) та розроблені макети лазерів з параметрами: довжина хвилі 1,53 мкм, диференціальний ККД 13%, вихідна потужність до 0,5 Вт в режимі безперервної генерації. Ці кристали можуть конкурувати з активними елементами із фосфатного скла, оскільки демонструють близький ККД, а їх теплопровідність вища приблизно на 20%.

До переваг кристалів $\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7:\text{Nd}$ та $\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7:\text{Nd}$ відноситься те, що ККД лазерних елементів на їх основі знаходиться на одному рівні з ККД комерційних кристалів ітрій-алюмінієвого гранату $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$, але їх собівартість значно дешевша за рахунок можливості використання платинових тиглів замість іридієвих. За рахунок нецентросиметричної кристалічної структури і ефективної генерації другої гармоніки можливе використання цих кристалів в лазерах з внутрірезонаторним помноженням частоти.

Технологічні заходи щодо мінімізації випаровування розплаву при вирощуванні кристалів молібдатів і вольфраматів забезпечили отримання кристалів CdWO_4 високої оптичної якості. На їх основі були розроблені сцинтиляційні детектори з підвищеною ефективністю реєстрації γ -випромінювання в діапазоні 30—300 кеВ та можливістю реєстрації нейтронів тим же самим детектором. Сумісно з Інститутом сцинтиляційних матеріалів НАН України (м.Харків) та Інженерним центром «Імпульс» (м.Ніжин) було розроблено портал для місць пересування пасажирських потоків, який суміщає дві функції – радіаційного монітора та металодетектора.

Згідно вимогам до радіоактивної чистоти матеріалів сцинтиляційних болометрів, вирощені монокристали PbMoO_4 і $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{VO}_3)_3$, виготовлені елементи, які впроваджені для використання в фундаментальних міжнародних проектах ядерної фізики по дослідженню ядерних реакцій з великим періодом напіврозпаду. За допомогою кристала $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{VO}_3)_3$ вперше зареєстровано α - розпад ізотопу ^{151}Eu (додаток 7 дисертації).

Оцінка основного змісту дисертації.

Дисертація Шеховцова О.М. є логічно обґрунтованою та завершеною науковою працею, містить нові результати цілеспрямованих досліджень.

Загальний обсяг дисертації 346 сторінок друкованого тексту. Дисертаційна робота містить 5 розділів.

В першому розділі зроблено аналіз властивостей та методів отримання кристалів для лазерів діапазону $\geq 1,5$ мкм. Розглянуті технології та властивості кристалів для лазерів, які суміщають лазерну генерацію та ВКР перетворення. За результатами аналізу сформульовані мета, напрями та задачі дослідження.

В другому розділі представлені результати дослідження властивостей кристалів подвійних ортоборатів $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{Gd}, \text{Nd}$), представлені дані щодо технології їх отримання, дані про вплив умов синтезу шихти та вирощування кристалів на їх хімічний та фазовий склад, оптичну якість. Методами рентгенівської дифракції та дифракції синхротронного випромінювання «білого світла» досліджена кристалічна структура та дефекти в номінально чистих $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{Gd}, \text{Nd}$) кристалах та з домішками Nd та Yb/Er. Визначена причина формування центрів забарвлення в чистих кристалах, вивчені спектрально-кінетичні характеристики кристалів активованих Nd та Yb/Er. Ідентифіковані піки в спектрах КР та досліджена теплопровідність. На основі активних елементів створені нові макети лазерів з діодним накачуванням, які працюють на довжині хвилі 1,53 мкм з ККД лазера 12-13% та вихідною потужністю до 0,5 Вт в режимі безперервної генерації. Для активних елементів виготовлених із кристалів $\text{Ca}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Nd}$ вперше отримана лазерна генерація на довжині хвилі 1,06 мкм при ламповому накачуванні. Для кристала $\text{Ca}_3\text{Gd}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Nd}$ досягнуті параметри генерації, що в декілька разів перевищують опубліковані в літературі при аналогічному тестуванні. Розроблено лабораторний регламент на вирощування монокристалів ортоборатів та виготовлення активних елементів для лазерів с довжинами хвиль $\geq 1,5$ мкм (додаток 1 дисертації).

В третьому розділі приведені дані про розроблення технології кристалів подвійних ортованадатів $\text{Ca}_9\text{RE}(\text{VO}_4)_7$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{La}, \text{Gd}, \text{Nd}$) та $\text{Ca}_{10}\text{M}(\text{VO}_4)_7$ ($\text{M} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) зі структурним типом мінералу «вітлокіт». До переваг цих кристалів належить те, що вони можуть суміщати лазерну генерацію та генерацію другої гармоніки. Методами рентгенівської дифракції та електронної мікроскопії встановлено, що причиною розсіювання лазерного променя в кристалах, яке робить неможливим використання цих кристалів, призводять області збагачені рідкісноземельним катіоном. Концентрація центрів розсіювання в кристалах $\text{Ca}_9\text{RE}(\text{VO}_4)_7$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{La}, \text{Gd}, \text{Nd}$) залежить від іонного радіуса РЗЕ. Було показано, що мінімальне спотворення елементарної комірки подвійних ортованадатів відбувається при мінімальній різниці іонних радіусів катіонів Ca та РЗЕ. При збільшенні різниці

змінюється схема розподілу катіонів РЗЕ по кристалографічним позиціям M1-M5. Методами рентгенівської дифракції та дифракції синхротронного випромінювання досліджена кристалічна структура та встановлені дефекти, характерні для даних кристалів та технології їх отримання. Вивчені перерізи поглинання та люмінесценції кристалів $\text{Ca}_9\text{RE}(\text{VO}_4)_7$ (RE - La, Nd, Gd) і $\text{Ca}_{10}\text{M}(\text{VO}_4)_7$ (M - Li, Na, K) активованих Nd та Yb. Інтерпретовані лінії в спектрах КР, досліджена теплопровідність. Вивчено вплив заміщення ванадатної групи на фосфатну на хімічний склад кристалів, їх кристалічну структуру та властивості. Показано, що для цих систем трансформація решіток може бути досягнута шляхом вирощування кристалів твердих розчинів сполук з однаковими структурами. Вперше методом монокристалльної рентгенівської дифракції досліджена високотемпературна центросиметрична модифікація, яка застабілізована при кімнатній температурі для складу $\text{Ca}_9\text{Y}(\text{VO}_4)_3(\text{PO}_4)_4$. Представлені дані про ефективність генерації другої гармоніки в кристалах $\text{Ca}_9\text{RE}(\text{VO}_4)_7$ (RE – Y, La, Gd), $\text{Ca}_{10}\text{M}(\text{VO}_4)_7$ (M - Li, Na, K) та кристалах твердих розчинів $\text{Ca}_9\text{Y}(\text{VO}_4)_{7-x}(\text{PO}_4)_x$ (x= 1, 3, 4) і $\text{Ca}_{10,5-x}\text{Pb}_x(\text{VO}_4)_7$ (x=1,8; 3,5; 4,9) у порівнянні з кварцовим еталоном. Із кристалів $\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7:\text{Nd}$ та $\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7:\text{Nd}$ виготовлені активні елементи та вперше при ламповому накачуванні отримана лазерна генерація з диференціальним ККД в режимі вільної генерації, що знаходиться на одному рівні з комерційним кристалом $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$.

В четвертому розділі приведені результати вдосконалення технології вирощування та дослідження властивостей перспективних кристалів для ВКР лазерів - кристалів вольфраматів та молібдатів з двовалентними катіонами. Показано, при вирощуванні кристалічної булі з діаметром, максимально можливим для даного тигля, для кристалів SrWO_4 , CaMoO_4 і кристалів твердих розчинів вольфрамату-молібдату свинцю реалізується мінімізація випаровування розплаву. Методами нейтронної та рентгенівської дифракції досліджені точкові дефекти в кристалах PbMoO_4 , PbWO_4 та $\text{PbW}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_4$. Показано, що в номінально чистих кристалах PbMoO_4 , PbWO_4 та $\text{PbW}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_4$ присутні вакансії свинцю. Упорядкування вакансій призводить до утворення областей в кристалі з просторовою групою $I\bar{4}$ на відміну від просторової групи $I4_1/a$ регулярного кристала. В монокристалах твердих розчинів $\text{PbW}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_4$ встановлено існування кисневих вакансій, концентрація яких збільшується з ростом концентрації Мо. Вперше досліджені та ідентифіковані лінії в спектрах КР монокристалів твердих розчинів $\text{PbW}_{0,5}\text{Mo}_{0,5}\text{O}_4$. Для цих кристалів і кристалів SrWO_4 , CaMoO_4

отримано ВКР випромінювання першої, другої і третьої стоксових компонент.

В п'ятому розділі досліджені сцинтиляційні характеристики кристалів боратів – потенціальних матеріалів для нейтронних детекторів. Наведені дані про технологію виготовлення сцинтиляційних приладів на основі кристалів CdWO_4 . Показані особливості використання кристалів для дослідження ядерних реакцій з великим періодом напіврозпаду методом сцинтиляційного болометра. Встановлено, що світловий вихід LY досліджених кристалів LiB_3O_5 , $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, і $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4\text{:Ce}$ (RE-Y, Gd) не перевищує 8% від світлового виходу кристала $\text{Vi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$. Це недостатньо для практичного використання в сцинтиляційних детекторах нейтронів. Розроблено портал для місць пересування пасажирських потоків, якій укомплектовано сцинтиляційними детекторами на основі кристала CdWO_4 з вдосконаленими характеристиками. Портал суміщає дві функції – металодетектора та радіаційного детектора (додаток 3 дисертації). Детектори характеризуються підвищеною ефективністю реєстрації γ - випромінювання в діапазоні 30-300 кеВ і можливістю реєстрації нейтронів тим же самим детектором. Представлені дані про вирощування та властивості кристалів CaMoO_4 , PbWO_4 , PbMoO_4 , $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$ для дослідження методом сцинтиляційного болометра. З використанням радіаційночистих компонентів, в тому числі свинцю археологічного походження, методом Чохральського вирощені монокристали PbMoO_4 і $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$. Виготовлені елементи сцинтиляційних болометрів для використання у фундаментальних міжнародних проектах ядерної фізики по дослідженню ядерних реакцій з великим періодом напіврозпаду. За допомогою кристала $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$ вперше достеменно зареєстровано α -розпад ізотопу ^{151}Eu (додаток 7 дисертації).

Матеріал дисертації наданий досить логічно і обгрунтовано. Кожен з п'яти розділів має свою специфіку, котра у сукупності свідчить про цілісність та завершеність дисертаційної роботи.

Дисертація за обсягом, структурою та рівнем отриманих результатів відповідає вимогам ДАК МОН України до докторських дисертацій. Дослідження виконані на сучасному прецизійному обладнанні з використанням апробованих методик. Отримані експериментальні дані добре узгоджуються з відомими теоретичними моделями та сучасними уявленнями лазерної фізики та сцинтиляційної техніки.

Таким чином, представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яка написана науковою мовою. Зміст дисертації, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають темі роботи.

Повнота викладення у публікаціях

Основні положення дисертації повною мірою висвітлені в 28 статтях у періодичних фахових наукових виданнях, 2 розділах колективних монографій, 7 працях матеріалів конференцій, 15 тезах доповідей на конференціях та 4 патентах України. Дисертація пройшла апробацію у доповідях на багатьох Міжнародних конференціях.

Зміст автореферату відображає основні результати, положення, рекомендації й підсумкові висновки і повністю відповідає змісту дисертаційної роботи. Автореферат оформлений відповідним чином.

Зауваження щодо дисертаційної роботи.

Рецензування текстів дисертаційної роботи та автореферату поставило деякі питання та зауваження:

1. Автор стверджує, що квантовий вихід кристалів $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Er}, \text{Yb}$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{Gd}$) «майже в три рази перевершує відповідні величини, отримані для кристалів $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Er}, \text{Yb}$ і $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Er}, \text{Yb}$ ». В тексті розділу відсутній коментар про вплив цього факту на лазерні характеристики активних елементів виготовлених із цих кристалів. Чому порівняння робиться з даними кристалами?

2. В розділах 2 та 3 автор наводить інформацію про дефектну структуру кристалів подвійних боратів та ванадатів (блочність, некогерентні включення та інші), відповідно, але не нічого не говорить про вплив цих дефектів на лазерні характеристики активних елементів. Доцільно було би додати дані про розподіл домішок та рівномірність розподілу хімічних елементів матриці по довжині активного елемента та висвітлити кореляцію між структурною досконалістю кристала та лазерними характеристиками елемента на його основі.

3. В розділі 5 автор лише констатує факт низького світлового виходу боратних кристалів LiB_3O_5 , $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, і $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Ce}$ ($\text{RE}=\text{Y}, \text{Gd}$), однак не наводить ніяких рекомендацій щодо можливості його підвищення. Відсутній порівняльний аналіз з існуючими аналогами.

4. В розділі 3 автор одночасно використовує дві температурні шкали, Цельсія та Кельвіна. Коректно було би вибрати одну температурну шкалу.

5. В тексті дисертації та автореферату присутні похибки друку, невдалі фрази.

Однак наведені недоліки і зауваження не знижують цінності отриманих результатів і не ставлять під сумнів достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Висновки

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Шеховцова О.М. є завершеною науковою працею, яка виконана на високому науковому рівні та містить нові науково обґрунтовані результати. У дисертації вирішена важлива наукова проблема розробки технологій отримання лазерних та нелінійно-оптичних матеріалів.

Зміст роботи, об'єкт і предмет дослідження, отримані результати відповідають спеціальності, з якої дисертація подана до захисту.

Дисертаційна робота «Технології отримання монокристалів боратів, ванадатів, вольфраматів та молібдатів для активних елементів лазерів з довжинами хвиль 1,06 і 1,5 мкм» за актуальністю теми, науковою новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів повністю **відповідає кваліфікаційним вимогам** щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, що викладені в пунктах 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор Шеховцов Олександр Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Офіційний опонент –
Завідувач відділу
Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний
інститут» НАН України,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

 М.М. Пилипенко

Підпис М.М. Пилипенка засвідчую

ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар
ІНЦ ХФТІ

25 « 11

