

НЕГРІЙКО

Анатолій Михайлович —
член-кореспондент НАН
України, завідувач відділу
лазерної спектроскопії Інституту
фізики НАН України

ВОНИ ВІДКРИВАЛИ ЛАЗЕРНУ ЕПОХУ

До 90-річчя академіка НАН України
М.С. Бродина

30 вересня виповнюється 90 років відомому вченому в галузі фізики твердого тіла, нелінійної оптики та квантової електроніки, лауреату Ленінської премії (1966), Державних премій СРСР (1982), УРСР (1974) та України (1994) в галузі науки і техніки, заслуженому діячеві науки і техніки України (1992), повному кавалеру ордена «За заслуги», лауреату премії ім. К.Д. Синельникова НАН України (1998), академіку-секретарю (1990–1998) Відділення фізики і астрономії НАН України, директору (1987–2006) Інституту фізики НАН України (нині — почесному директору), доктору фізико-математичних наук (1963), професору (1968), академіку НАН України (1982) Михайлу Семеновичу Бродину.



Михайло Семенович Бродин

Світова наука знає вчених, які увійшли в історію як автори унікальних, ключових для науки експериментів, знає видатних науковців, які стали лідерами потужних наукових шкіл, відомими організаторами науки, які своїми зусиллями сприяли розвитку і розквіту цілих наукових напрямів та галузей. Академік Михайло Семенович Бродин, безумовно, належить до таких яскравих особистостей і як відомий фізик-експериментатор, який власноруч виконав тонкі фізичні експерименти, що мали ключове значення для формування принципових положень фізики твердого тіла минулого століття, і як науковий лідер, під керівництвом та за безпосередньою участю якого сформувався новий науковий напрям — нелінійна оптика напівпровідників, і як учений, який зробив вагомий внесок у розвиток динамічної голографії — однієї з нових оптичних технологій ХХ ст., створив засади нелінійної оптики наносистем — наночастинок, наноплівкок, квантових точок. Визначні якості М.С. Бродина як вченого, організатора науки, патріота України проявилися під час його багаторічної діяльності на посаді директора Інституту фізики НАН України, академіка-секретаря Відділення фізики і астрономії НАН України, члена Президії НАН України.

Михайло Семенович Бродин народився 30 вересня 1931 р. на Прикарпатті, в с. Сівка-Войнилівська Калуського району

Івано-Франківської області, розташованому над Дністром, приблизно посередині між Рогаатином і Калушем, у сорока кілометрах від Івано-Франківська і в ста кілометрах від Львова, в сільській родині середнього достатку. Землі у батьків було мало, доводилося докладати значних зусиль, щоб утримувати сім'ю та вчити дітей — а їх у родині було четверо. Батько ще юнаком посадив досить великий сад хороших сортів яблук і груш, який з часом став давати непогані врожаї. Проте грошей постійно не вистачало, бракувало їх навіть на скільки-небудь добру одягу чи взуття. Коли малий Михайло навчався в першому класі, то мав одні чоботи на двох із старшою сестрою і завжди з нетерпінням чекав її повернення зі школи, щоб взяти у неї взуття і не спізнитися на другу зміну. Забігаючи наперед, скажемо, що всі діти (крім сестри Ольги, яка рано померла) завдяки зусиллям батьків та власній наполегливості отримали вищу освіту: Марія стала вчителькою, а молодший брат Іван — приладобудівником, доктором наук і професором.

Дитинство та рання юність М.С. Бродина припали на часи радикальних змін суспільного устрою на теренах Прикарпаття, входження Галичини до складу УРСР, встановлення в Західній Україні радянської влади, воєнного лихоліття Другої світової війни та визвольних змагань Української повстанської армії, які з великою гостротою та жертвами проходили саме в тих краях. Можна сказати, що від самого початку свідомого життя юнаку доводилося постійно робити вибір між правдою і обманом, між добром і злом, покладаючись на власний розум, на досвід і традиції громади.

Михайло розпочав свою шкільну науку восени 1937 р. в рідному селі. Викладання велося польською та русинською (так називали тоді українську) мовами. А потім була зміна влади 1939 р., німецька окупація, звільнення від нацистів — можна лише уявити, в яких умовах навчалися школярі в той період. У 1945 р. він закінчив семирічку і продовжив навчання у райцентрі Войнилів. Це був тривожний і складний час на Прикарпатті, роки активного національно-визвольного руху і, відповідно,

широких репресій з боку владної системи. Каральні загони підрозділів НКВС часто влаштували облави по селах, між ними і партизанами-оунівцями траплялися збройні сутички, були жертви. Своїх убитих влада хоронила з почестями, а тіла повстанців привозили в райцентр і виставляли напоказ біля колишнього костюлу, який перетворили на районну пересильну тюрму. Михайлу доводилося ходити до школи повз цей костюл, і жахливі картини боєм відлунювали в його душі.

У 1947 р. після закінчення з відмінними оцінками 9-го класу Михайло, через родинні обставини, продовжив навчання у м. Бурштин. Він закінчив школу зі срібною медаллю, яка давала право на зарахування до університету без вступних іспитів, а отже, у вересні 1948 р. М.С. Бродин став студентом фізико-математичного факультету Львівського університету.

У післявоєнні часи на фізичному відділенні університету рівень викладання був не однаково високим. Якщо математичні дисципліни і теоретичну фізику читали добре, то про базовий курс загальної фізики цього сказати було не можна, наприклад з нього повністю випав розділ ядерної фізики. Однак важливі теоретичні курси, такі як квантова механіка, електродинаміка, статистична фізика, викладали досить сильні фахівці — доценти В. Міліянчук, А. Глауберман, С. Каплан, які згодом стали докторами наук і професорами. Скромними були масштаб і рівень наукових експериментальних досліджень на факультеті. Певні роботи з металофізики і атомної спектроскопії проводилися, а ось дослідження з фізики твердого тіла, зокрема напівпровідників, перебували у зародковому стані.

На третьому курсі студенти-фізики розподілялися по групах за спеціалізаціями. М.С. Бродин обрав оптику і спектроскопію. На початку 5-го курсу директор університетської астрономічної обсерваторії В.Є. Степанов запропонував Михайлу виконати під його керівництвом дипломну роботу, темою якої було визначення

* Тут і далі ми використовуємо неопубліковані спогади М.С. Бродина, люб'язно надані автору.

розподілу температури в поперечному перерізі шнурка дугового розряду. Дослідження пішло успішно, науковий керівник приділяв дипломнику багато уваги і був настільки задоволений результатом, що рекомендував своєму студентові оформити його як наукову статтю. Однак після випускних іспитів потрібно було готуватися до вступу в аспірантуру, і М.С. Бродин постійно відкладав написання статті. Про цю невиконану обіцянку своєму першому науковому керівникові він з жалем згадує і сьогодні.

Під час навчання в університеті у квітні 1952 р. сталася подія, яка мала певні негативні наслідки для М.С. Бродина та його однокурсників. Їхнього товариша, однокласника Михайла по сіківській семирічці, дуже сильного студента і обдаровану людину Богдана Стефанюка заарештували. Забрали його серед ночі, прямо з кімнати, в якій він разом з Михайлом Бродиним і ще двома одногрупниками проживали в гуртожитку на вулиці Герцена. Тієї ж ночі було заарештовано ще двох однокурсників, які мешкали на приватній квартирі. Що їм ставилося у вину, так і не повідомили, та й навіряд чи була якась серйозна причина, але після цього почалося переслідування студентів, які були в близьких стосунках із заарештованими. Особливо дісталось сусідам Богдана Стефанюка по гуртожитку, в тому числі й М.С. Бродину, — мовляв, не розгляділи ворога. Спочатку їх «пропісочили» на комсомольських зборах курсу і винесли просту догану, потім під тиском комсомольського керівництва на факультетських зборах посилили догану до суворой і, врешті-решт, на комітеті комсомолу університету виключили з комсомолу (а варто нагадати, що в ті часи виключення з комсомолу майже автоматично тягло за собою виключення з університету). Інстанцією, що мала затвердити це рішення, був міський комітет комсомолу. На щастя, значною мірою завдяки підтримці однокурсників, після жорсткої «проробки» виключення замінили на сувору догану із занесенням в особову картку, і Михайло Бродин продовжив навчання в університеті.

Проте ці події не минули безслідно для всіх учасників — Б. Стефанюк відбував покарання

в Росії, його було звільнено в 1956 р., проте в Україну він уже не повернувся. Його співмешканців по гуртожитку, зокрема й М.С. Бродина, в університеті розглядали як «проштрафованих». Так, після четвертого курсу групу студентів-оптиків відправили на переддипломну практику в Ленінград, у Державний оптичний інститут, а М.С. Бродина, єдиного з оптиків, у цю групу не включили, хоча він був одним з найуспішніших студентів.

У березні 1953 р. помер Сталін, що привело до помітного послаблення ідеологічного тиску радянської системи. Поступово комсомольсько-партійні ревнителі призабули і про «штрафників». М.С. Бродин закінчив університет з відзнакою, а вчена рада університету рекомендувала його для подальшого навчання в аспірантурі. Перед самими державними іспитами на факультет приїхав з Києва представник Інституту фізики АН УРСР для відбору кандидатів для вступу в аспірантуру. Серед відібраних кандидатур був і Михайло Бродин. 1 листопада 1953 р. М.С. Бродин став аспірантом Інституту фізики АН УРСР, і відтоді розпочався «київський» період його життя і наукової діяльності.

Варто сказати, що повоєнні роки були періодом великого ентузіазму, високої активності, бурхливого розвитку академічної науки. Інститут фізики за своїм складом був молодим, динамічним, навіть його наукові лідери, знані вчені А. Прихотько, П. Борзяк, С. Пекар, В. Лашкарьов, М. Пасічник, були ще в досить молодому віці (найстаршим з них ледве виповнилося 50 років), не кажучи вже про середню і нижчу ланки. Тому життя в стінах Інституту буквально кипіло — робота в лабораторіях до пізнього вечора, гарячі, інколи гострі дискусії на семінарах, знайомство та особисті зустрічі з відомими вченими провідних вітчизняних та зарубіжних наукових центрів, які часто відвідували Інститут і виступали з цікавими доповідями.

Науковим керівником аспіранта М.С. Бродина було призначено члена-кореспондента (пізніше академіка) АН УРСР Антоніну Федорівну Прихотько, яка визначила тему його



На наукових зборах, присвячених 100-річчю від дня народження академіка А.Ф. Прихотько — наукового керівника М.С. Бродина

наукової роботи — низькотемпературні дослідження дисперсійних властивостей деяких молекулярних кристалів в області екситонних смуг у комплексі з вимірюванням інтенсивності екситонного поглинання. Як стало ясно пізніше, саме в характері дисперсії і поглинання світла в області екситонних резонансів за низьких температур спостерігаються яскраво виражені особливості взаємодії світла з кристалом (порушення інтегральних дисперсійних співвідношень Крамерса—Кроніга, виникнення додаткових хвиль, зумовлених просторовою дисперсією, тощо).

Уже в перші роки аспірантури Михайло Семенович провів експерименти з вимірювання дисперсії показника заломлення кристалів поліциклічного ряду — стильбен, дифеніл, толан,

антрацен, спочатку за кімнатної температури, потім за температури рідкого азоту (77 К), а згодом — за температури рідкого водню (20 К). Важливо, що при цьому вимірювалися криві не лише дисперсії, а й поглинання в області найнижчих електронних переходів — саме в цих перших експериментах М.С. Бродина було здійснено перехід від «якісних» вимірювань, коли визначали лише спектральне положення смуг поглинання, до «кількісних», з вимірюванням ходу кривих, що, як пізніше з'ясувалося, дало можливість отримати принципово важливі результати.

Слід зазначити, що поставлені перед М.С. Бродиним експериментальні завдання потребували розроблення та опанування складних, часом унікальних методик. Об'єкти дослідження — молекулярні кристали — мали товщини від десятої частки мікрона, що вимагало хірургічної точності при маніпуляціях з ними, та ще й за кріогенних температур. При цьому дані щодо показника заломлення та поглинання кристала мали бути надійними, що, в свою чергу, потребувало неочевидних модифікацій відомих оптичних методів вимірювання. Для вимірювання дисперсії показників заломлення тоді використовували інтерферометричний метод (з інтерферометром Жамена) і так званий метод Обреїмова, який ґрунтувався на дифракції Френеля на краю пластини. Для експериментів М. Бродин разом з А. Прихотько і В. Медведєвим розробили кріостат, який забезпечував температуру до 20 К і в який було вмонтовано інтерферометр. За даними вимірювань поглинання і дисперсії, проведених у поляризованому світлі, вдалося визначити основні параметри нижніх електронних переходів — сили осциляторів, напрями диполів квантових переходів, форми смуг. Отримані результати лягли в основу кандидатської дисертації Михайла Семеновича «Дослідження поглинання і дисперсії світла в кристалах деяких поліциклічних сполук», яку він успішно захистив у травні 1957 р.

У той період зусилля відділу Антоніни Федорівни були спрямовані на обґрунтування екситонної природи виявлених нею раніше

смуг у низькотемпературних спектрах поглинання молекулярних кристалів (нафталін, бензол та ін.), зокрема на експериментальне підтвердження розвинутої О.С. Давидовим теорії, що пояснювала розщеплення поляризованих смуг, відоме тепер як «давидовське». Саме на цих дослідженнях і зосередився М.С. Бродин після захисту кандидатської. Разом зі співробітниками його наукової групи (С. Марісова, М. Страшнікова, Я. Довгий, А. Крочук) він продовжив поглиблене вивчення особливостей низькотемпературного затухання і дисперсії світла в області екситонних резонансів молекулярних і напівпровідникових кристалів. Особливу увагу приділяли кристалам з сильними дипольно активними екситонними переходами, насамперед антрацену (молекулярний кристал) і сульфиду кадмію (напівпровідник). Антрацен виявився дуже вдалим об'єктом, у якому проявилася низка яскравих особливостей екситонів, їх енергетичної структури, взаємодії екситонів зі світлом і коливаннями кристалічної ґратки.

Як відомо, молекули ароматичних вуглеводнів складаються з шестичленних циклів атомів вуглецю з атомами водню, розташованими на периферії. Прикладами таких сполук є бензол, який має одне бензольне кільце, нафталін, що складається з двох кілець, антрацен — з трьома кільцями. За кімнатної температури бензол — рідина, нафталін і антрацен — тверде тіло, молекулярний кристал, у якому впорядковану ґратку утворюють молекули речовини, що зберігають свою структуру.

Молекула антрацену ($C_{14}H_{10}$) плоска і має симетрію D_{2h} . Кристал антрацену, широкозонний органічний напівпровідник, належить до моноклінної системи C_{2h} . В елементарній комірці з розмірами $a = 8,56 \text{ \AA}$, $b = 6,04 \text{ \AA}$ і $c = 11,6 \text{ \AA}$ ($a \perp b$, моноклінний кут 125°) є дві молекули, розташовані в центрі і в кутку грані ab . Перший електронний перехід ($27\,570 \text{ см}^{-1}$, область ближнього ультрафіолету) належить до інтенсивного дипольного переходу, а отже, у спектрі поглинання кристала антрацену резонансні взаємодії мають відігравати велику роль.

У реальних молекулярних кристалах можливі збуджені стани, які в граничних випадках зводяться або до екситонних, або до локалізованих збуджень. Ці збудження суттєво різняться за своїми властивостями, а тому їх легко розрізнити в експерименті. Так, поглинання, зумовлене народженням екситонів, відображає колективні властивості збуджень, і це передусім проявляється в резонансному розщепленні смуг (давидовське розщеплення), характерній їх поляризації. Дослідженню структури спектра поглинання антрацену було присвячено багато робіт, але, як зазначає О.С. Давидов, «найбільш точні дані були отримані Бродиним і Марісовою, які усунули деякі методичні помилки, характерні для більш ранніх робіт» [1]. Дійсно, в багатьох попередніх експериментах виміряне значення резонансного розщеплення електронного переходу становило 20 см^{-1} , а не 220 см^{-1} , як це мало бути згідно з теоретичними передбаченнями О.С. Давидова.

Як показав М.С. Бродин, причиною невідповідності було недостатнє усунення паразитного випромінювання з поляризацією вздовж а-компоненти, присутність якого призводила до суттєвої деформації форми лінії b-компоненти. Михайло Семенович провів ретельні дослідження з особливими пересторогами щодо чистоти поляризації, які підтвердили наявність резонансного розщеплення в усіх основних смугах поглинання випромінювання з величиною, що відповідала теоретичним оцінкам. Це стало надійним свідченням екситонної природи цього поглинання та підтвердженням передбаченого О.С. Давидовим ще у 1948 р. давидовського розщеплення у спектрах молекулярних кристалів.

Цікавим етапом у науковій діяльності М.С. Бродина було дослідження просторової дисперсії у молекулярних кристалах і так званих додаткових хвиль в області екситонного поглинання. У 1959 р. він разом з А.Ф. Прихотько експериментально виявили аномалію в низькотемпературному екситонному поглинанні кристала антрацену: було показано, що коефіцієнт поглинання основної b-смуги осциляційно змінюється з товщиною кристала [2].

Дослідники виключили всі відомі на той час фактори, що могли спричинити таку поведінку, зокрема й можливу інтерференцію світла при внутрішньому відбитті від граней кристала. Осциляції, як показував експеримент, зменшувалися з підвищенням температури і практично зникали за кімнатної температури. Певний час розумного пояснення цьому ефекту не знаходилося.

Приблизно в той самий час відомий фізик-теоретик Соломон Ісакович Пекар, який очолював теоретичний відділ Інституту фізики, висунув ідею про істотність просторової дисперсії в кристалах поблизу екситонних резонансів [3]. У цих умовах, згідно з гіпотезою С.І. Пекара, в кристалі могло мати місце незвичне, а з точки зору класичної оптики — навіть парадоксальне, явище: при збудженні кристала світлом з частотою, близькою до екситонного резонансу, в кристалі виникають дві хвилі, які мають таку саму частоту й однакову поляризацію, але поширюються в кристалі з різними швидкостями. Він назвав їх додатковими хвилями, а пізніше вони здобули назву «хвилі Пекара».

Ретельний аналіз експериментальних даних М.С. Бродина з урахуванням результатів теорії С.І. Пекара дав змогу стверджувати, що спостережувані осциляції можна пояснити інтерференцією додаткових хвиль, що підтверджувало правильність гіпотези С.І. Пекара. За цими результатами в журналі ЖЕТФ було опубліковано дві статті С.І. Пекара і М.С. Бродина. Наскільки відомо, це був єдиний випадок, коли теоретик С.І. Пекар зробив спільну з експериментатором публікацію [4, 5].

Зазначимо, що теорія додаткових хвиль С.І. Пекара викликала досить гостру дискусію з відомими московськими фізиками-теоретиками (академіки В. Гінзбург, В. Агранович та ін.). У подальшому вона отримала ряд додаткових експериментальних підтверджень не лише в Інституті фізики, а й в інших лабораторіях, зокрема в Ленінградському фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Йоффе, і, зрештою, її було визнано науковою спільнотою, хоча спроби знайти альтернативні пояснення отриманим

М.С. Бродиним результатам здійснювалися і пізніше. Так, О.С. Давидов розвинув теорію поглинання світла тонкими молекулярними кристалами в області екситонних резонансів, яка якісно пояснювала спостережувані експериментальні результати [1].

Варто зауважити, що попри спроби розвинути різні теоретичні підходи до пояснення отриманих М.С. Бродиним експериментальних даних щодо осциляційної залежності поглинання світла від товщини кристала, самі дані ні в кого не викликали сумніву (О.С. Давидов неодноразово підкреслював ґрунтовність та високий рівень експериментальних досліджень М.С. Бродина [1]).

Матеріали про товщинні осциляції інтенсивності поглинання в антрацені, про порушення інтегральних дисперсійних співвідношень Крамерса—Кроніґа в кристалах з екситонним поглинанням та їх трактування на основі ефектів просторової дисперсії було включено в докторську дисертацію М.С. Бродина «Оптичні властивості кристалів в області екситонного поглинання», яку він підготував у 1961 р. і успішно захистив у квітні 1963 р. Офіційні опоненти, визнані авторитети в галузі фізики твердого тіла академік АН СРСР І.В. Обреїмов і академік АН УРСР О.С. Давидов, високо оцінили цю роботу, і після захисту виявилось, що Михайло Семенович став одним з наймолодших докторів наук в Україні.

Дослідження з фізики екситонів, започатковані в Інституті фізики та в Ленінградському фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Йоффе, набули потужного розвитку і стали істотним надбанням фізики твердого тіла. Наприкінці 1965 р. цикл робіт за результатами цих досліджень було висунуто на здобуття Ленінської премії — найвищої в СРСР державної нагороди в галузі науки і техніки. У квітні 1966 р. роботу «Теоретичні і експериментальні дослідження екситонів у кристалах» (авторський колектив: Є. Гросс, Б. Захарченя, А. Каплянський — Фізико-технічний інститут ім. А.Ф. Йоффе АН СРСР, М. Бродин, В. Броуде, О. Давидов, А. Лубченко, А. Прихотько — Інститут фізики АН УРСР, Е. Рашба — Інститут напівпровід-

ників АН УРСР) було удостоєно цієї високої нагороди, а М.С. Бродин став наймолодшим у авторському колективі лауреатом.

Михайло Семенович разом із численними своїми учнями отримав багато нових вагомих результатів, які набувають особливої актуальності з огляду на все ширше використання органічних напівпровідників, у яких багато процесів відбуваються за участю екситонів. Нагадаємо лише деякі з цих результатів.

У тісній співпраці з теоретиками вперше було експериментально спостережено поверхневі екситони, існування яких передбачив В.Й. Сугаков. Він розробив їх теорію, визначив критерії існування і вказав форми прояву в оптичних спектрах кристалів, а М.С. Бродин зі співробітниками здійснив експериментальні спостереження на кристалі антрацену, який виявився найбільш зручним об'єктом для цих досліджень. Було показано, що поверхневі екситони зумовлюють інтерференційні ефекти в спектрі відбиття кристала, характер та інтенсивність яких залежать від фазових співвідношень між поверхневою і об'ємною хвилями, що визначаються їх показниками поглинання і заломлення. Важливо, що було експериментально підтверджено давидовське розщеплення поверхневого стану як надійний доказ його екситонної (колективної) природи.

Дослідження взаємодії екситонів з фотонами та фононами привели М.С. Бродина зі співробітниками до спостереження і дослідження нового типу збуджень кристала, проміжного між вільними поляритонами та автолокалізованими екситонами, які назвали деформуючими поляритонами, оскільки вони супроводжуються пружною деформацією ґратки кристала. Поляритонні уявлення в кристалооптиці, особливості сильних екситонних фотопереходів, зв'язок оптичних характеристик з властивостями поляритонів у кристалах, експериментальні дослідження поляритонних ефектів — усе це було узагальнено в монографії «Поляритони в кристалооптиці», написаній М.С. Бродиним у співавторстві з С.В. Марісовою та Е.М. М'ясніковим [6]. За цикл робіт з виявлення та всебічного дослідження поверх-



Засновник відділу нелінійної оптики академік М.С. Бродин та завідувач відділу доктор фізико-математичних наук М.В. Бондар

невих екситонів та деформуючих поляритонів у молекулярних кристалах у 1998 р. М.С. Бродина було удостоєно премії ім. К.Д. Синельникова НАН України.

М.С. Бродин з учнями виконали також піонерські дослідження екситонних спектрів легованих напівпровідників A_2B_6 і твердих розчинів на їх основі. Ці роботи заклали основи екситонної спектроскопії реальних розупорядкованих напівпровідників. Уперше було показано, що екситони Ваньє—Мотта є елементарними збудженнями, досить чутливими до структурного розупорядкування ґратки. Ці результати широко використовують і сьогодні при вивченні впливу різних домішок та дефектів структури на процеси електрон-діркової взаємодії в напівпровідниках.

На початку 70-х років під керівництвом М.С. Бродина започатковуються дослідження екситонних процесів у напівпровідниках з шаруватою структурою. З урахуванням особливостей властивого таким матеріалам хімічного



Ветерани відділу нелінійної оптики — учні та співавтори багатьох робіт

зв'язку (сильного, іонно-ковалентного, який діє в межах шарового пакету, і слабкого, типу ван-дер-ваальсівського, між сусідніми шаровими пакетами) такі напівпровідники розглядали як перехідний клас матеріалів між раніше досліджуваними в групі М.С. Бродина молекулярними кристалами, в яких реалізуються екситони Френкеля (малого радіуса), та неорганічними напівпровідниками, в яких можливе збудження екситонів Ваньє—Мотта (екситони великого радіуса). Було встановлено важливі закономірності впливу такої структури матеріалів на процеси за участю екситонів, зокрема показано, що шаруватість кристалічної будови проявляється в динамічних екситонних процесах через енергообмін між екситонними і фононними збудженнями. Як наслідок, було виявлено нові механізми екситонного поглинання світла, встановлено роль фононного ангармонізму в спектральних характеристиках екситонних смуг у шаруватих напівпровідниках тощо. Ці нові важливі результати було узагальнено у двох монографіях: «Екситонні процеси в шаруватих кристалах» [7] і «Динамічні ефекти в багатокомпонентному газі квазічастинок» [8].

У 80–90-х роках Михайло Семенович активно займався дослідженнями з нанофізики, а саме з фізики низькорозмірних напівпровідникових структур, які успішно продовжує й сьогодні. Об'єктами досліджень стали елемен-

ти напівпровідникового наносвіту — квантові точки, які іноді називають штучними атомами, маючи на увазі їх квазіатомний дискретний енергетичний спектр, а також квантові нитки та квантові ями. Властивості напівпровідників у цьому новому світі визначаються законами квантової механіки та істотно відрізняються від властивостей масивних твердих тіл: змінюється динаміка атомів ґратки, їх електричні, оптичні та магнітні характеристики.

Для вивчення квантоворозмірних структур М.С. Бродин запропонував оригінальні експериментальні підходи. Так, квантові точки на основі шаруватого прямозонного напівпровідника PbI_2 було створено його нанокapsулюванням у матриці цеоліту. Дослідження властивостей таких точок входять до числа піонерських робіт з цього напрямку.

Для дослідження якості гетерограниць М.С. Бродин разом з учнями використали метод екситонної спектроскопії. Як добре відомо, зокрема й завдяки роботам Михайла Семеновича, властивості композитних квантоворозмірних наноструктур суттєво залежать від будови їх гетерограниць. У реальних структурах вони не є ідеально плоскими. Відхилення від дзеркальності може виникнути внаслідок взаємної дифузії компонентів, що утворюють структуру, або під час технологічного процесу вирощування структури. Екситони, замкнені в межах острівців з подовжніми розмірами, що

перевищують їх власний розмір, відповідають за появу характерних смуг випромінювання, положення яких у спектрі однозначно визначає ширину квантової ями у тій області простору, де відбулася анігіляція екситона. З іншого боку, за шириною екситонної смуги можна робити висновки щодо локальних (атомного масштабу) нерівностей гетерограниці у межах самих острівців. Слід підкреслити, що ці роботи виконано з використанням квантоворозмірних гетероструктур, вирощених новим методом газофазної епітаксії (PAVPE), розробленим українськими технологіями. Створення технології PAVPE значною мірою стимулювалося роботами М.С. Бродина, які забезпечили зворотний зв'язок між якістю квантоворозмірних структур та технологічними умовами їх вирощування.

Фізика екситонів залишилася в колі наукових інтересів Михайла Семеновича на все життя. І сьогодні процеси за участю екситонів є об'єктами досліджень представників наукової школи академіка М.С. Бродина у багатьох наукових установах України та за її межами.

Віддаючи належне роботам, з яких розпочалася наукова діяльність М.С. Бродина, безумовно слід особливо відзначити започаткований ним напрям досліджень, завдяки якому ім'я та науковий авторитет Михайла Семеновича назавжди закріпилися в історії вітчизняної та світової науки, — нелінійна оптика напівпровідників. У 1960 р. Теодор Мейман створив перший лазер, і відтоді у світі розпочалася «лазерна» епоха. Майже відразу вчені оцінили великі перспективи, пов'язані з цим відкриттям. В Інституті фізики, зокрема у відділі А.Ф. Прихотько, жваво обговорювали можливості використання нових джерел потужного когерентного світла для фізики твердого тіла та участь вчених Інституту в лазерній тематиці. З огляду на досвід і вагомі досягнення у спектроскопії молекулярних кристалів розглядали передусім перспективи пошуку нових активних лазерних середовищ для розширення спектрального діапазону лазерного випромінювання.

Наукова група, визнаним лідером якої став молодий доктор наук М.С. Бродин, активно до-

лучилася до лазерної тематики. У 1963 р. вперше в Україні Михайло Семенович започаткував систематичні дослідження з нелінійної оптики конденсованого стану. Вже до середини 60-х років було отримано цікаві оригінальні результати щодо природи та властивостей двофотонного поглинання світла у напівпровідниках A_2B_6 , досліджено лазерну генерацію в цих напівпровідниках при їх двофотонному збудженні, а також спостережено самовплив інтенсивного лазерного випромінювання (самофокусування, самодефокусування) в різних типах кристалів, переважно в напівпровідниках, а пізніше — в полімерних середовищах. Додатковим імпульсом для розвитку цих досліджень стало створення в Інституті спочатку лабораторії, а у 1965 р. — відділу нелінійної оптики, який понад 50 років очолював М.С. Бродин. Роботи наукового колективу під керівництвом Михайла Семеновича швидко здобули визнання світової наукової спільноти.

Перші експерименти стосувалися вивчення закономірності поширення потужного лазерного випромінювання в лужно-галоїдних кристалах (зокрема в NaCl) та лазерної фотопровідності в напівпровідниках (CdS). Наприкінці 60-х років М.С. Бродин з колегами вперше експериментально спостерігали самовикривлення світлових пучків з несиметричним профілем інтенсивності при поширенні сфокусованого потужного лазерного випромінювання в лужно-галоїдних кристалах — новий вид самовпливу в нелінійному середовищі, теоретично передбачений раніше.

У цей період під керівництвом М.С. Бродина розпочалися систематичні дослідження закономірностей поширення інтенсивного лазерного випромінювання в широкозонних напівпровідниках. Виявилося, що явища самовпливу лазерних пучків мають складний характер, який проявляється в конкуренції самофокусування і самодефокусування світла в одному й тому самому середовищі зі зростанням інтенсивності світла. На основі дослідження самовпливу світлових пучків у напівпровідниках було отримано важливі дані про оптичну стійкість напівпровідникових матеріалів до



Учитель та учень. Нелінійні оптики академік М.С. Бродін і доктор фізико-математичних наук А.О. Борщ

дії лазерного випромінювання. Встановлено, що в кристалах з шириною забороненої зони, меншою від подвійної енергії лазерних квантів ($E_g < 2\hbar\omega_L$), спостерігаються лише поверхневі руйнування, оскільки самодефокусування світла перешкоджає виникненню об'ємних руйнувань у цих кристалах навіть при гострому фокусуванні світла в об'єм. І навпаки, в кристалах з шириною забороненої зони, більшою від подвоєної енергії лазерних квантів ($E_g > 2\hbar\omega_L$), руйнування мають об'ємний характер, який починається зі стадії самофокусування світла як основного фактора, що визначає оптичну міцність таких напівпровідників.

Важливим питанням у нелінійній оптиці є природа нелінійної рефракції і її анізотропії в різних класах напівпровідників та органічних полімерів. У роботах М.С. Бродина зі співробітниками досягнуто значних успіхів у дослідженні цієї фундаментальної проблеми. Показано, що нелінійна рефракція напівпровідників суттєво залежить від енергетичної структури кристалів і визначається конкуренцією кількох механізмів нелінійності. Так, у напівпровідниках A_2B_6 основними механізмами нелінійності є нелінійна поляризація зв'язаних електронів та внесок нерівноважних вільних носіїв, тоді як у напівпровідниках A_3B_5 визначальним фактором є конкуренція внеску нерівноважних вільних носіїв та теплової нелінійності, а в напівпровідниках A_4B_4 основним механізмом нелінійної рефракції є насичення

прямих переходів рівноважних вільних електронів між підзонами зони провідності. В органічних полімерах на основі епоксидів з ковалентно зв'язаними барвниками було виявлено специфічні для цих середовищ ізомеризаційний та орієнтаційний механізми нелінійної рефракції.

Піонерські роботи М.С. Бродина з дослідження явищ самовпливу лазерного випромінювання та механізмів нелінійної рефракції в напівпровідниках відіграли вирішальну роль у розвитку та становленні нового наукового напрямку — нелінійної кристалооптики напівпровідників.

Одразу після відкриття лазерів стало зрозуміло, що багато їх застосувань, зокрема спектроскопія конденсованих та газоподібних середовищ, нелінійна оптика, фотохімія, медицина, голографія, локація, зв'язок тощо, потребують лазерних джерел з перебудовою частоти випромінювання у широких межах, передусім у видимій та ближніх УФ- та ІЧ-ділянках спектра, і бажано з плавною зміною частоти вимушеного випромінювання. Створення таких джерел стало одним з першочергових завдань лазерної фізики і техніки.

Для розв'язання цієї проблеми М.С. Бродін запропонував використати потрібні напівпровідникові сполуки A_2B_6 з контрольованою зміною енергетичної структури. Разом зі своїми учнями — співробітниками відділу нелінійної оптики у 1960—1970-х роках він виконав великий цикл досліджень лазерів з оптичною накачкою, в яких активним середовищем були змішані напівпровідникові кристали групи A_2B_6 (сульфід кадмію — селенід кадмію, сульфід цинку — селенід цинку та ін.). В основі зміни частоти генерації таких напівпровідникових лазерів лежить залежність енергетичної структури напівпровідників та спектральної області рекомбінаційного випромінювання від складу кристалів. Набір змішаних однорідних кристалів групи A_2B_6 , таких як $CdSe_xTe_{1-x}$, $Zn_xCd_{1-x}Se$, CdS_xSe_{1-x} , $Zn_xCd_{1-x}S$, дає змогу варіюванням їх складу плавно змінювати ширину забороненої зони E_g в значних межах, які визначаються значеннями E_g крайніх ком-

понент. Для розглянутих тут систем це відповідає змінам E_g від 1,6 до 3,87 еВ. Відповідно, довжина хвилі їх рекомбінаційного випромінювання перекриває спектральну область від ближньої ІЧ до середньої УФ, а створені на основі цих кристалів напівпровідникові лазери мають широку частотну перебудову спектра стимульованого випромінювання. Керувати частотою генерації можна також з використанням різних каналів випромінювальної рекомбінації одних і тих самих зразків при зміні зовнішніх умов, наприклад температури, яка не лише в певних межах регулює величину E_g , а й може змінювати канал генерації.

Було вивчено основні параметри генерації напівпровідникових квантових генераторів, такі як частота випромінювання, умови збудження, коефіцієнт корисної дії, діаграма направленості, а також ретельно досліджено природу (механізм) лазерної генерації. У результаті низькотемпературних вимірювань було встановлено, що змішані напівпровідники характеризуються інтенсивним дипольно активним екситонним поглинанням і екситонні переходи є основними рекомбінаційними переходами. При цьому у спектрі люмінесценції спостерігаються лінії як вільних, так і зв'язаних екситонів, співвідношення між інтенсивностями яких суттєво залежить від температури. Енергія екситонів та спектральне положення ліній крайової люмінесценції плавно змінюються зі зміною складу кристалів.

Для одержання вимушеного випромінювання використовували об'ємні монокристали, вирізані у вигляді прямокутних паралелепіпедів з двома плоскостями паралельними гранями, які утворювали плоский резонатор Фабрі—Перо. Довжина резонатора становила кілька міліметрів. Інверсну населеність створювали двофотонним збудженням випромінювання рубінового (1,78 еВ) або неодимового (1,17 еВ) лазерів. Перевагою двофотонного збудження перед іншими типами збудження є суттєво об'ємний характер накачки, який дає змогу залучати до процесів вимушеного випромінювання значні об'єми кристала та одержувати досить високі інтенсивності генерації. Вперше було встанов-

лено, що лазерна генерація розглянутих систем відбувається на екситонних переходах і є два основних канали генерації залежно від температури: для температур $T > 60$ К — непрямі переходи на вільних екситонах при їх взаємодії з поздовжніми оптичними фононами, а для більш низьких температур ($T < 60$ К) — переважно переходи на зв'язаних екситонах. Участь фононів є принциповою умовою лазерної генерації на вільних екситонах, оскільки інверсна населеність може бути досягнута лише на не-прямих екситонних переходах.

За роботу «Розроблення фізичних основ керування частотою вимушеного випромінювання і створення комплексу лазерів з перебудовою частоти» М.С. Бродину у складі авторського колективу, до якого входили його колега по відділу нелінійної оптики В.Я. Резніченко та інші співробітники Інституту фізики, в 1974 р. було присуджено Державну премію УРСР в галузі науки і техніки.

Дослідження з нелінійної оптики створили підґрунтя для того, що М.С. Бродин та його співробітники змогли зробити істотний внесок у розвиток динамічної голографії. Їм уперше вдалося експериментально довести доцільність використання двофотонного збудження нерівноважних вільних носіїв у напівпровідниках для запису динамічних голограм, що значно розширило область спектральної чутливості голографічних матеріалів. Вони також уперше запропонували використання анізотропії нелінійної рефракції напівпровідників для запису векторних або поляризаційних голограм з високою дифракційною ефективністю, а для підвищення швидкодії динамічних голограм — механізми нелінійності, пов'язані з внутрішньозонною релаксацією рівноважних вільних носіїв у напівпровідниках. Це дозволило реалізувати динамічні голограми з рекордною на той час швидкістю ($t \approx 10^{-12}$ с).

Добре відомі також роботи М.С. Бродина і його співробітників з дослідження ефектів обертання хвильового фронту та оптичної бістабільності. Тут слід відзначити першу експериментальну реалізацію усунення негативного впливу ефектів самофокусування на



Академіки М.С. Бродин,
Я.С. Яцків, Б.Є. Патон,
І.Р. Юхновський,
В.Г. Бар'яхтар

ефективність обертання хвильового фронту при виродженій чотирьоххвильовій взаємодії шляхом геометричного розузгодження хвиль накачки від колінеарного напрямку. Михайлу Семеновичу також уперше вдалося отримати обертання хвильового фронту при виродженій чотирьоххвильовій взаємодії з підсиленням на нелінійності п'ятого порядку по полю.

Крім значного фундаментального внеску, роботи М.С. Бродина з нелінійної оптики та динамічної голографії мають велике практичне значення. На їх основі розроблено та впроваджено нові високоточні методи нелінійної рефрактометрії, за допомогою яких проведено вимірювання коефіцієнтів нелінійної рефракції та їх анізотропії в широкому наборі напівпровідників, полімерів та композитних структур. Запропоновано й експериментально реалізовано оригінальні високоефективні оптичні елементи, зокрема нелінійні лінзи зі змінною фокусною відстанню (до 10^2 діоптрій), дефлектори світла (з кутом сканування до 5°), оптичні логічні елементи та оптичні транзистори — елементи оптичної індустрії майбутнього.

Від початку 1990-х років під керівництвом та за участю М.С. Бродина в Інституті розгорнулися дослідження з фотоакустичної спектроскопії актуальних матеріалів електронної техніки. Було розроблено фізичні основи нових діагностичних засобів для неруйнівного

контролю в режимі товщинного профілювання просторово неоднорідних середовищ, для яких традиційні методи діагностики малоефективні. Досліджувалися механізми фотогенерації звуку залежно від режиму опромінення, здійснювався пошук особливостей реалізації фотоакустичного ефекту в напівпровідникових нанофазах, комплексне вивчення випромінювальних і безвипромінювальних переходів (на основі поєднання люмінесцентної і фотоакустичної спектроскопії) в таких модельних системах, як нанофази CdS, інкорпоровані в цеолітні матриці, пористий кремній, наночастинки Si в SiO_2 та інші актуальні матеріали. Виявлено ефект фотогенерації звуку гігантської інтенсивності і розвинуто теоретичну модель, що пояснює його з позицій реалізації так званого пульсаційного механізму генерації звуку наночастинками. За цикл робіт «Рентгено-фотоакустичні явища в реальних кристалах при комбінованому впливі фізичних полів» М.С. Бродина та його учню, згодом члену-кореспонденту НАН України І.В. Блонському у складі авторського колективу було присуджено Державну премію України в галузі науки і техніки за 1994 р.

Як відзначає сам Михайло Семенович у своїх спогадах, кінець 60-х, 70-ті та 80-ті роки минулого століття були періодом особливо плідної наукової роботи відділу нелінійної

Єднання молодості та досвіду: відділ нелінійної оптики сьогодні



оптики і його особисто. Кількість співробітників відділу тоді досягала 30 осіб, і це були переважно молоді активні науковці, аспіранти. Значні досягнення були з фізики екситонів у молекулярних і напівпровідникових кристалах, зокрема в шаруватих структурах, з нелінійної оптики та лазерної фізики. По суті, у відділі було започатковано і розвинуто напрям нелінійної оптики напівпровідників, видано кілька монографій, у яких узагальнено отримані результати. Багато співробітників відділу успішно захистили кандидатські дисертації, а М. Страшнікова, А. Борщ, І. Блонський, С. Шевель — докторські. У 1972 р. М.С. Бродина було обрано членом-кореспондентом АН УРСР зі спеціальності «фізика твердого тіла (спектроскопія)», а в 1982 р. — академіком АН УРСР. Цього ж, 1982, року колективну роботу вчених Інституту фізики (М.С. Бродина, М.С. Соскіна, С.Г. Одулова), а також науковців з інститутів Москви, Ленінграда, Мінська, Казані «Фізичні основи динамічної голографії та нові методи перетворення просторової структури світлових пучків» було удостоєно Державної премії СРСР у галузі науки і техніки.

Розвитку наукових досліджень у галузі лазерної фізики, лазерного приладобудування і нелінійної оптики в Радянському Союзі приділяли велику увагу. Відразу після створення першого лазера на рубіні в Москві, у ФІАНі,

почали проводити щомісячні семінари (так звані «п'ятниці») з обговорення результатів досліджень у цій галузі. М.С. Бродин регулярно брав у них участь. Коли було створено Наукову раду АН СРСР з проблем квантової електроніки з метою координації досліджень у цій галузі, він увійшов до складу бюро цієї Ради і брав участь у її роботі протягом 70-х і початку 80-х років. Очолював Раду Рем Вікторович Хохлов, молодий доктор наук, згодом академік АН СРСР, відомий учений, інтелігентна людина, який працював у Московському державному університеті і пізніше став його ректором.

Рада започаткувала Всесоюзні наукові конференції з когерентної і нелінійної оптики (КІНО), які регулярно проводилися в різних містах Союзу за участі провідних учених Західної Європи, США, Японії. Дві з таких конференцій відбулися в Києві (в 1968 і 1980 рр.), і в їх організації та проведенні велику роль відіграв Інститут фізики і, зокрема, відділ М.С. Бродина, який при цьому був заступником голови оргкомітету.

Успішна діяльність відділу нелінійної оптики, отримані нові оригінальні результати зробили цей науковий колектив та його лідера відомими у світі. Наукові доповіді за результатами досліджень М.С. Бродина та його колег на міжнародних конференціях незмінно викликали інтерес у фахівців. Михайло Семенович



Розмова академіків. Б.Є. Патон і М.С. Бродин



Академік-секретар Відділення фізики і астрономії у 1990–1998 рр. М.С. Бродин, перший віцепрезидент НАН України академік А.П. Шпак і академік-секретар Відділення фізики і астрономії з 2004 р. В.М. Локтєв

розповідав про результати своїх досліджень на міжнародних форумах у Франції, Німеччині, США, Італії та багатьох інших країнах.

Демонстрацією високого наукового і технологічного рівня досліджень Інституту фізики в галузі голографії стала підготовка експозиції й організація міжнародних виставок художніх голограм із зображеннями унікальних історичних коштовностей, знайдених на території України. На початку 70-х років київські археологи розкопали скіфське золото — славнозвісну пектораль та інші унікальні золоті вироби. Це була дуже цінна знахідка, яка привернула увагу не лише істориків, а й широкої

громадськості світу. Від кількох великих музеїв з різних країн світу надійшли пропозиції організувати у них виставку цих об'єктів. Однак організація таких виставок за кордоном була справою дуже непростною, оскільки страхове забезпечення однієї лише пекторалі становило десятки мільйонів доларів. Тоді науковці Інституту фізики (В.Б. Марков та ін.) запропонували скористатися можливостями голографії — створити якісні голографічні копії відповідних музейних об'єктів і влаштувати виставки не оригіналів, а цих голографічних зображень.

Було виготовлено високоякісні голограми скіфських золотих виробів та інших художніх експонатів українських музеїв, які за їх зоровим сприйняттям були повністю адекватні оригіналам, і у відвідувачів виставки створювалося повне враження живого контакту з артефактом, на відміну від звичних фотографій. Колекція цих голограм прислужилася добрій справі популяризації досягнень культури, науки України, її історії. Виставки було організовано в багатьох країнах світу, і користувалися вони великим успіхом. Ще за часів колишнього СРСР, коли все, що входило до складу Союзу, людиною Західного світу здебільшого сприймалося як Росія, ці виставки давали змогу зосередити увагу західного глядача саме на народів України, на його багатій історії, самобутній культурі, наукових досягненнях.

М.С. Бродин, як директор Інституту і науковець, який працював у галузі голографії, брав активну участь в організації цих виставок і представляв Академію наук України і АН СРСР під час демонстрації унікальних голограм у Великій Британії, Японії, Італії, США. Виставки були помітними культурними подіями і проходили за участю високих посадових осіб приймаючих країн, викликали значний інтерес з боку громадськості та науковців.

Ще з кінця 70-х років М.С. Бродин дедалі більше став займатися науково-організаційною роботою. У 70–80-х роках він був заступником академіка-секретаря Відділення фізики і астрономії АН УРСР. У 1987 р. його було

призначено, а невдовзі обрано директором Інституту фізики. Працював він на цій посаді до 2006 р.

На період директорства Михайла Семеновича припали надзвичайно складні роки зміни суспільного ладу, кризи в економіці, переформування системи управління наукою в країні. Важкий стан економіки України негативно позначився на кадровому потенціалі, матеріальному і технічному забезпеченні Інституту. Практично не оновлювалося наукове обладнання, інфраструктура, багато виробничих приміщень не опалювалися. В середині 90-х років в Інституті неодноразово запроваджувався режим неповної зайнятості. З величезними труднощами дирекції вдалося зберегти верстатний парк, кріогенну лабораторію, виробництво рідкого гелію, було законсервовано електронний прискорювач, кобальтові гамма-установки. Великих кадрових і структурних втрат зазнало інститутське СКТБ — з понад 600 працівників наприкінці 90-х років залишилося близько двох десятків.

Для збереження наукового і кадрового потенціалу, підтримки матеріальної бази доводилося вживати нестандартних, раніше незнаних заходів, використовувати нові можливості, які тоді відкривалися. Широко практикували короточасні візити українських учених (як відомих науковців, так і молодих дослідників) до наукових центрів Європи, Америки, Азії. Позитивними наслідками таких поїздок були принаймні часткове збереження кадрового потенціалу завдяки матеріальній підтримці, участь науковців Інституту у розвитку сучасних напрямів досліджень і, зрештою, благодійна підтримка з боку зарубіжних центрів науковим обладнанням, зокрема завдяки цьому в Інституті з'явилися фур'є- та ІЧ-спектрометри, лазерне обладнання, унікальна атомно-пучкова установка тощо. Важливу роль у підтримці науковців у 90-ті роки відіграли благодійні акції Американського фізичного товариства, Фонду Сороса, тривала й вагома грантова підтримка з боку Українського науково-технічного центру (УНТЦ), міжнародної асоціації INTAS, Фонду цивільних досліджень та розви-



Диплом почесного доктора Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника академіку М.С. Бродину вручає ректор університету членкореспондент НАН України Б.К. Остафійчук



Помаранчева революція. На Майдані виступає академік М.С. Бродин

тку США (CRDF). Тільки у 2000 р. Інститут фізики мав 26 міжнародних грантів, за кількістю яких він був серед лідерів в Україні.

На початку нового тисячоліття ситуація поступово почала поліпшуватися. Незважаючи на всі труднощі, Інститут великою мірою зберіг свій кадровий потенціал і наукові школи, не втратив наукового авторитету у світі.

У 1989 р. М.С. Бродина було призначено виконувачем обов'язків, а у 1990 р. обрано академіком-секретарем Відділення фізики і астрономії АН України. Робота на цьому по-

сту значно розширила коло його діяльності, збагатила діловими контактами з багатьма цікавими людьми, стала для Михайла Семеновича своєрідною школою життя. У Відділенні йому вдалося створити атмосферу діловитості, вимогливості, доброзичливості, демократизму, яка зберігається й донині.

У різні періоди своєї діяльності М.С. Бродин займався викладацькою роботою, вважаючи її дуже важливою справою для науковця. Ще в 60-ті роки після захисту докторської дисертації на запрошення Львівського університету протягом кількох років він читав на фізичному факультеті курс фізики твердого тіла, а в середині 70-х років викладав студентам фізичного факультету Київського університету курс нелінійної оптики. У 1980 р. при радіофізичному факультеті Київського університету було створено спеціальний факультет для підготовки молодих фахівців об'єднання «Арсенал» з лазерної фізики і техніки. М.С. Бродин читав там досить великий курс «Лазери і нелінійна оптика». У 90-х роках він працював за сумісництвом професором у КПІ, а в 1999 р. очолив організовану за його участю кафедру оптичної квантової електроніки, нелінійної оптики і голографії Фізико-технічного навчально-наукового центру НАН України, читав курси з нелінійної оптики. На визнання науково-педагогічних заслуг Михайла Семеновича його було обрано почесним доктором Львівського національного університету імені Івана Франка і Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, почесним професором Національного університету «Чернігівський колегіум» ім. Т.Г. Шевченка.

М.С. Бродин є автором понад 400 наукових праць та 4 монографій, які добре відомі і в Україні, і за її межами (див. бібліографію у [9]). Він створив і нині очолює наукову школу з нелінійної кристалооптики напівпровідників та оптики кристалів з екситонним збудженням. Під його керівництвом захищено понад 40 кандидатських і 8 докторських дисертацій, одного з його учнів обрано членом-кореспондентом НАН України.

Завершуючи розповідь про Михайла Семеновича Бродина, слід відзначити його тверду, послідовну, або, як тепер говорять, державницьку, позицію патріота України у ставленні до всіх подій суспільного й політичного життя. Основи такого ставлення було закладено, мабуть, ще батьками та односельцями з рідного прикарпатського села. Як згадує сам М.С. Бродин, громадянська активність його земляків, рівень національної свідомості, їх зацікавленість зовнішньополітичними подіями в ті міжвоєнні часи, як для села, були досить високими. Додався і власний багатий життєвий досвід, у якому закарбувалися складні періоди суспільного життя та події, свідком яких довелося бути Михайлу Семеновичу. Він живо цікавиться історією України, особливо історією ХХ ст. З проголошенням незалежності України мовою наукових зібрань і спілкування в Інституті фізики стала українська, і прикладом у цьому завжди був його директор академік М.С. Бродин.

Побажаємо ювілярові многая і благає літа, міцного здоров'я, невичерпного натхнення для нових років активного і творчого життя на благо науки, на благо нашої Академії, на славу України.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Davydov A.S. The theory of molecular excitons. *Sov. Phys. Usp.* 1964. 7(2): 145–178. DOI: <https://doi.org/10.1070/PU1964v007n02ABEH003659>
[Давыдов А.С. Теория молекулярных экситонов. *Успехи физических наук*. 1964. Т. 82, № 3. С. 393–448. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0082.196403a.0393>]
2. Brodin M.S., Prihotko A.F. Effect of the thickness of anthracene crystals on their absorption curves at 20 K. *Optika i spektroskopiya*. 1959. 7(1): 132–133. (in Russian).
[Бродин М.С., Прихотько А.Ф. Влияние толщины кристаллов антрацена на их кривые поглощения при 20 К. *Оптика и спектроскопия*. 1959. Т. 7, № 1. С. 32–133.]
3. Pekar S.I. Supplementary light waves in crystals and exciton absorption. *Sov. Phys. Usp.* 1962. 5(3): 515–521. DOI: <https://doi.org/10.1070/PU1962v005n03ABEH003435>
[Пекар С.И. Добавочные световые волны в кристаллах и экситонное поглощение. *Успехи физических наук*. 1962. Т. 77, № 2. С. 303–319. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0077.196206d.0309>]
4. Brodin M.S., Pekar S.I. On an Experimental Demonstration of the Existence of Additional Anomalous Light Waves in a Crystal in the Exciton Absorption Region. *J. Exptl. Theoret. Phys.* 1960. 11(1): 74–81. http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_011_01_0055.pdf
[Бродин М.С., Пекар С.И. К экспериментальному доказательству существования дополнительных аномалий световых волн в кристалле антрацена в области экситонного поглощения. *ЖЭТФ*. 1960. Т. 38, № 1. С. 74–81.]
5. Brodin M.S., Pekar S.I. Additional Anomalous Light Waves in Anthracene in the Exciton Absorption Region. *J. Exptl. Theoret. Phys.* 1960. 11(6): 1373–1375. http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_011_06_1373.pdf
[Бродин М.С., Пекар С.И. Дополнительные аномальные световые волны в антрацене в области экситонного поглощения. *ЖЭТФ*. 1960. Т. 38, № 6. С. 1910–1912.]
6. Brodin M.S., Myasnikov E.N., Marisova S.V. *Polaritons in crystal optics (Polyaritonny v kristallooptike)*. Kiev: Naukova Dumka, 1984. (in Russian).
[Бродин М.С., Мясников Э.Н., Марисова С.В. *Поляритоны в кристаллооптике*. Киев: Наукова думка, 1984.]
7. Brodin M.S., Blonsky I.V. *Exciton processes in layered crystals (Eksitonnyye protsessy v sloistykh kristallakh)*. Kiev: Naukova Dumka, 1986. (in Russian).
[Бродин М.С., Блонский И.В. *Экситонные процессы в слоистых кристаллах*. Киев: Наукова думка, 1986.]
8. Brodin M.S., Blonsky I.V., Nitsovich B.M., Nitsovich V.M. *Dynamic effects in a multicomponent gas of quasiparticles (Dinamicheskiye efekty v mnogokomponentnom gaze kvazichastits)*. Kiev: Naukova Dumka, 1990. (in Russian).
[Бродин М.С., Блонский И.В., Ницович Б.М., Ницович В.М. *Динамические эффекты в многокомпонентном газе квазичастиц*. Киев: Наукова думка, 1990.]
9. *Mykhaylo Semenovich Brodyn*. Biobibliohrafiya vchenykh Ukrayiny. Kyiv, Naukova Dumka, 2001. (in Ukrainian).
[Михайло Семенович Бродин. Біобібліографія вчених України. Київ: Наукова думка, 2001.]

Anatoliy M. Negriyko

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2954-5157>

Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

THEY BEGAN THE LASER AGE

To the 90th anniversary of Academician of NAS of Ukraine M.S. Brodyn

September 30 marks the 90th anniversary of the famous scientist in the field of solid state physics, nonlinear optics and quantum electronics, winner of the Lenin Prize (1966), State Prizes of the USSR (1982), UkrSSR (1974) and Ukraine (1994) in Science and Technology, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine (1992), full holder of the Order of Merit, winner of the K.D. Sinelnikov Prize of the NAS of Ukraine (1998), Academician-Secretary (1990-1998) of the Department of Physics and Astronomy of the NAS of Ukraine, Director (1987-2006) of the Institute of Physics of the NAS of Ukraine (now Honorary Director), Doctor of Physical and Mathematical Sciences (1963), Professor (1968), Academician of the NAS of Ukraine (1982) Mykhailo S. Brodyn.