

БЛИСКУЧИЙ ПОЧАТОК ТА ПРЕКРАСНЕ ПРОДОВЖЕННЯ (СПОГАДИ КОЛЕГИ ДО 80-РІЧЧЯ АКАДЕМІКА М.С. БРОДИНА)

М.С. СОСКІН

Інститут фізики НАН України
(Просп. Науки, 46, Київ 03028)

©2011

Час невблаганний, ось і Михайло Семенович Бродин вступає до клубу 80-річних співробітників нашого рідного Інституту фізики НАН України. Це стало стимулом для написання моїх коротких спогадів, оскільки ми майже одночасно починали свій науковий шлях. Пам'ятаю, коли наш керівник, академік Антоніна Федорівна Прихотько, після мого вступу до аспірантури запропонувала досліджувати спектри поглинання та дисперсії кристалів нафталіну і 1,2-бензантрацену в широкому температурному інтервалі 20–300 К та вивчити зв'язок між ними. Я оселився в одній кімнаті з Михайлом Семеновичем, де він успішно досліджував екситонне поглинання та дисперсію кристала антрацену і інших кристалів того ж ряду.

Металічні криостати, вперше розроблені у відділі фізики кристалів умільцем В.П. Бабенком та В.С. Медведєвим, що приїхав з Москви, були найкращими у світі. Вони мали спеціальні кварцові вікна для вимірювань у всьому оптичному діапазоні. Вимірювання дисперсії проводили на низькотемпературному мініатюрному інтерферометрі Жамена, який був розроблений академіком АН СРСР І.В. Обреїмовим, першим директором УФТІ (м. Харків). Він повністю розміщувався у широкогорлому криостаті. На фото його з цікавістю розглядає легендарний академік П.Л. Капиця, який відвідав наш Інститут під час Київської низькотемпературної конференції (поряд з ним стоїть його син С.П. Капиця, творець та беззмінний телеведучий ТВ програми “Очевидное – невероятное”, яку він вів протягом 40 років).

У процесі досліджень ми із М.С. Бродиним запропонували деякі вдосконалення оптичного каналу криостата, необхідні для більш зручного проведення кількісних вимірювань дисперсії кристалів. Во-

ни були реалізовані В.П. Бабенком. Ця конструкція описана у нашій спільній публікації за кордоном: V.P. Babenko, M.S. Brodin, M.S. Soskin, ‘*Cryostat for dispersion measurements*’, *Criogenics*, No. 12 (1962). У ті роки це був дуже рідкісний випадок публікації роботи у закордонних журналах (про пов'язані з цим проблемами я розповім пізніше). Тому результати радянських вчених були практично невідомими світовій науковій спільноті, зокрема цикл робіт з молекулярних кристалів.

Обстановка для досліджень у окремій кімнаті була чудова, а форма одягу, особливо у спекотну літню пору, була неформальною.



М.С. Соскін демонструє лауреату Нобелівської премії академіку П.Л. Капиці унікальний низькотемпературний інтерферометр для дослідження дисперсії кристалів при низьких температурах (Київ, 1971 рік)

Як відомо, у класичній електродинаміці існують інтегральні співвідношення Крамерса–Кроніга між дійсною та уявною частинами діелектричної проникливості, які визначають показники заломлення та поглинання (оптичні константи) даного середовища. Важливим прикладом застосування співвідношень Крамерса–Кроніга у фізиці є вираз для дисперсійних співвідношень між дійсною та уявною частинами діелектричної проникливості $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)$, у вигляді

$$\varepsilon'(\omega) - 1 = \frac{1}{\pi} \text{v.p.} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon''(x)}{x - \omega} dx, \quad (1a)$$

та

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{1}{\pi} \text{v.p.} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon'(x) - 1}{x - \omega} dx, \quad (1b)$$

де ω – частота, яка пробігає усі значення, символи v.p. означають головне значення інтеграла.

Таким чином, ці показники не є незалежними один від одного. Виконання співвідношень Крамерса–Кроніга неодноразово перевірялися для різноманітних середовищ у різних агрегатних станах (кристали, рідини, розчини) та при різній температурі. І навіть зроблено висновок, що достатньо виміряти тільки криві поглинання або дисперсії, а криву, якої не вистачає, просто *обчислити* за допомогою співвідношень Крамерса–Кроніга.

На щастя, це виявилось не зовсім так для екситонів у кристалах. Нам з М.С. Бродиним пощастило показати це вперше на прикладі молекулярних кристалів. Для цього співвідношення Крамерса–Кроніга були перетворені так, щоб у них явно фігурували показник заломлення μ та інтегральний коефіцієнт поглинання середовища χ :

$$\mu^2(\omega) - \chi^2(\omega) - 1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{x \mu(x) \chi(x)}{x^2 - \omega^2} dx. \quad (2a)$$

Інтегральне рівняння (2a) не дозволяє у явному вигляді виразити криві дисперсії через спектр поглинання відповідної компоненти поляризованого спектра. Тому для розрахунку зручно перейти від інтеграла до суми гаусових кривих, у які входять значення максимумів поглинання смуг A_i та їх півширина δ_i . Тоді, як показав професор Е.Й. Рашба (лауреат “екситонної” Ленінської премії, про яку я скажу нижче) формула

(2a) набуває вигляду

$$\mu^2(\omega) = 1 + \chi^2(\omega) - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sum_i A_i w\left(\frac{\omega - \omega_i}{\delta_i}\right). \quad (2b)$$

Тут функція $w(z)$, дорівнює

$$w(z) = e^{-z^2} \int_0^z e^{x^2} dx. \quad (2c)$$

Ця функція протабульована, що кардинально полегшує розрахунки.

Першим випробуванням було піддано кристал 1,2-бензантрацену. Виявилось, що при 20 К розмах дисперсійної кривої у $k = 4,4 \pm 0,9$ раза більший, ніж розрахований за співвідношеннями Крамерса–Кроніга! Із підвищенням температури розходження із теорією зменшувалось та зникало при кімнатній температурі.

Ми завжди ділились отриманими результатами і разом їх обговорювали. Тоді Михайло Семенович підняв результати своїх вимірювань, наведені у його кандидатській дисертації. І для нашої спільної радості виявилось, що для антрацену, найбільш актуального молекулярного кристала, порушення співвідношення Крамерса–Кроніга ще більше та досягло 6 ± 1 ! Більше того, навіть при кімнатній температурі $k = 2 \pm 0,4$. Фізика виявленого порушення співвідношень Крамерса–Кроніга пов'язана із просторовою дисперсією екситонів, що, звичайно, не враховувалось при виведенні цих співвідношень у 1926–1927 рр., які ґрунтуються на принципах причинності та *локальності* діелектричних/оптичних констант середовища. Ми показали наші результати академіку А.Ф. Прихотько, яка їх схвалила та підтримала. В результаті з'явилась робота: М.С. Бродин, М.С. Соскин, А.Ф. Прихотько, “*Нарушение соотношений Крамерса–Кронига для молекулярных кристаллов при различных температурах*”, Оптика и спектроскопия, **6**, № 1 (1959), яку є всі підстави вважати однією із етапних для екситонної фізики молекулярних кристалів.

Тут має сенс розповісти про правила публікації робіт у ті роки. Я їх знав напам'ять, оскільки 30 років був головою експертної комісії у нашому Інституті. По-перше, необхідна була відсутність предмета винаходу. Оскільки методики багатьох наших робіт, особливо з нелінійної оптики та квантової електроніки дійсно були оригінальними, то оформлялися свідоцтва про винаходи (у мене, наприклад, їх 49). Для публікації робіт у закордонних журналах потрібно

було показати, що вони не містять принципово нових результатів. Тому і ця робота, яка стала новим прямим доказом просторової дисперсії екситонів, була опублікована у журналі “Оптика и спектроскопия”. На щастя, хороші результати пробивають свою дорогу, хоча і повільно. І коли я у минулому році перевіряв свій індекс цитування, включно із *h-index*, який тепер дорівнює 27, то побачив, що в нього через *півстоліття* після її публікації (!) добралася і ця робота (у посиланні стояли сторінки журналу *вітчизняного* випуску).

Прекрасним формальним завершенням “екситонної епохи” стало присудження колективу із десяти фізиків Ленінської премії (найвищої наукової нагороди в СРСР) за відкриття та дослідження екситонних станів у різних класах твердих тіл. Ядро колективу склали київські фізики: академіки О.С. Давидов і А.Ф. Прихотько. Від ІФ НАНУ премію також одержали М.С. Бродин, В.Л. Броуде, А.Ф. Лубченко. На жаль, на фініші не вистачило місця М.Т. Шпаку, який виявив та дослідив екситонну люмінесценцію молекулярних кристалів.

Звичайно, дослідження екситонних станів у молекулярних кристалах ще продовжувалось декілька років. Але головне вже було зроблено. І тут приспіла квантова електроніка. У минулому році фізики всього світу широко святкували 50-річчя отримання Мейманом генерації на рубіновому лазері, яка стала відправною точкою лазерної ери. Відразу ж стало ясно, що настала епоха оптичної квантової електроніки. Провідні співробітники відділу фізики кристалів М.С. Бродин, В.Л. Броуде та М.Т. Шпак прийняли виклик часу та з ентузіазмом включились у дослідження в цьому напрямку. Академік А.Ф. Прихотько, яка завжди чутливо відкликала на такі виклики часу, організувала невеликий семінар, на якому обговорювались нові лазерні роботи та можливі напрямки наших досліджень, і всіляко їх заохочувала. Було вирішено, що на першому етапі головною *загальною* проблемою ВФК буде реалізація перестроювання частоти генерації. А.Ф. Прихотько ніколи не стримувала співробітників, якщо бачила, що вони починають нові дослідження в актуальних галузях сучасної фізики. Тому в 1965 році із відділу фізики кристалів було виділено три відділи, які, відповідно, були названі відділами нелінійної оптики (ВНО), оптичної квантової електроніки (ВОКЕ) та фотоактивності (ВФА) під керівництвом М.С. Бродина, В.Л. Броуде та М.Т. Шпака. На моє переконання, найбільш поталанило з назвою ВНО (російською мовою ОНО), запропо-

новане М.С. Бродиним, оскільки нелінійна оптика завжди буде актуальною, що й підтвердило життя.

Сформовані на той момент групи М.С. Бродина, В.Л. Броуде та М.Т. Шпака, а потім і вказані відділи, пішли кожен своїм шляхом. Як було показано М.С. Бродиним, в однорідних напівпровідниках генерація проходить за участі тих же екситонів Ванье–Мотта, завдяки їх випромінювальній анігіляції із одночасною емісією поздовжніх оптичних фонових, локалізації екситонів на домішках, міжекситонній взаємодії. М.С. Бродин запропонував для стрибкоподібного перестроювання частоти оптичної генерації використовувати набір змішаних напівпровідників групи A_2B_6 із змінною шириною забороненої зони, а значить, із різними частотами генерації. Набір таких кристалів високої оптичної якості, необхідної для отримання генерації, виростив співробітник Інституту напівпровідників НАНУ Микола Витриховський, а співробітниця ВНО Віолетта Резніченко провела необхідні експерименти, які повністю підтвердили запропоновану ідею.

У відділі ОКЕ були запропоновані дисперсійні резонатори, які дають змогу плавно перестроювати частоту генерації у межах смуги підсилення активного середовища лазера. За допомогою такого призмового дисперсійного резонатора вперше було здійснено перестроювання твердотільного лазера. Вдалося отримати перестроювання частоти генерації лазера на неодимовому склі на 500 см^{-1} . Нарешті, у ВФА реалізували та дослідили перестроювання частоти генерації лазера на нових типах барвників.

Усі ці роботи ІФ АН УРСР були відзначені у 1974 році Державною премією України з приписом “За разработку физических основ управления частотой вынужденного излучения и создание перестраиваемых лазеров”.

Як відомо, наука не стоїть на місці. У 70-х роках у ВОКЕ виникла динамічна голографія (голографія на динамічних ґратках, що записуються у нелінійних середовищах). Нині її успішно розвиває член-кореспондент НАНУ С.Г. Одулов. Були запропоновані та створені лазери на динамічних ґратках із можливістю генерації лазерних променів із оберненням хвильового фронту. Одночасно М.С. Бродин досліджував процеси самовпливу лазерних променів у нелінійних середовищах: самофокусування, самодефокусування та самовикривлення. Було розроблено методи вимірювання відповідних нелінійностей та встановлено механізми виявленого самовпливу.

Одночасно у Росії здійснювалась розробка нових методів перетворення просторової структури світлових променів (ГОІ ім. С.І. Вавілова), а також у Білорусії (ІФ АН Білорусії). Увесь цей цикл робіт відзначено у 1982 році Державною премією СРСР. Із українських вчених було нагороджено М.С. Бродина, мене та С.Г. Одулова. Нині М.С. Бродин є лауреатом *visz* вищих державних премій СРСР та України в галузі науки.

М.С. Бродин продовжує успішно розвивати нові напрямки нелінійної оптики. Розпочато дослідження нелінійних ефектів у острівцевих плівках і т.д. За ці роки М.С. Бродин виховав групу талановитих учнів; серед них член-кореспондент НАНУ І.В. Блонський, д.ф.-м.н. А.А. Борщ та інші.

Під кінець цих спогадів хочу побажати академіку М.С. Бродину довгих років життя та нових творчих перемог.