

## **До історії створення відділу радіоспектроскопії**

О.А.Бугай

Відділ радіоспектроскопії в Інституті напівпровідників АН УРСР був заснований у 1960 році і проіснував до 2003 року. Відділ був створений Михайлом Федоровичем Дейгеном, який був його керівником до 1977 року. М.Ф. Дейген помер у віці 59 років від невиліковної хвороби. Михайло Федорович був видатним вченим і яскравою особистістю. Він створив Київську школу радіоспектроскопії і вів семінар, що став видатним явищем у масштабах всієї країни. Він виховав кілька десятків учнів, які стали відомими вченими і продовжували розвиток започаткованих Михайлом Федоровичем наукових напрямків.

Після М.Ф.Дейгена відділом з 1978 до 1994 року керував його учень О.А.Бугай.

У 1994 році відділ був реструктуризований, більша його частина продовжувала працювати у відділі радіоспектроскопії під керівництвом Ю.Г. Семенова, менша частина його перейшла до нового відділу фізичних проблем ретроспективної дозиметрії (прикладні застосування радіоспектроскопії), керівником якого став О.А.Бугай. Відділ радіоспектроскопії проіснував до 2003 року, коли був розформований, а його співробітники перейшли до інших відділів Інституту. Відділ фізичних проблем ретроспективної дозиметрії, що займався прикладними аспектами ЕПР спектроскопії, а саме, ЕПР дозиметрією (ретроспективною та еталонною), був розформований у 2007 році, а його співробітники переведені у інший відділ інституту. Така доля відділу, мабуть, логічна. Якщо спочатку основним завданням був розвиток методик, і це завдання об'єднувало співробітників, то далі, коли методики почали працювати, почалося розмежування по застосуванню спектроскопії до різних фізичних задач, іноді далеких одна від одної. Після розформування відділу співробітники, відповідно до своїх конкретних тематик і інтересів, розійшлися по 6 різних наукових відділах Інституту.

Треба також відзначити, що на нестабільність відділу вплинув значний відтік кваліфікованих співробітників за кордон. Серед них можна згадати докторів наук І.М. Зарицького, І.Н. Гейфмана, В.Г. Грачова, В. Віхніна, Ю.Г. Семенова, В.О. Стефановича та кандидата наук О. Неймарк.

Створення відділу радіоспектроскопії в Інституті напівпровідників М.Ф. Дейгеном, виникнення Київської наукової школи радіоспектроскопії М.Ф.Дейгена, розвиток наукових досліджень у відділі та основні наукові ре-

зультати, а також біографічні дані М.Ф.Дейгена, робота його учнів після його передчасної смерті детально викладені у колективній 2-томній монографії, що підготували та опублікували його учні з нагоди 80-річчя з дня його народження [1].

Дублювати матеріали колективної монографії, викладені загалом більш ніж на 550 сторінках, мабуть, недоцільно. Але можна доповнити їх спогадами учасників процесу створення відділу радіоспектроскопії, учнів М.Ф.Дейгена. Звичайно, спогади про події 50-річної давнини є суб'єктивними (як і взагалі людська історія та аналіз подій минулого, написані конкретно людиною). Ці спогади, мабуть, цікаві, перш за все, для самого автора та, можливо, для дуже обмеженого кола осіб, причетних до подій.

Початок історії відділу можна віднести, мабуть, до 1956 року, коли Михайло Федорович Дейген задумав та виконав перше своє дослідження в галузі радіоспектроскопії: «К теории спин-электронного резонанса на F-центрах в ионных кристаллах» що була опублікована у журналі «Оптика и спектроскопия» [2]. У тому ж у 1956 році він сформулював тему з радіоспектроскопії для свого молодого аспіранта Олександра Броніславовича Ройцина. Початок роботи М.Ф.Дейгена в галузі радіоспектроскопії співпав у часі з виникненням ідеї створення Інституту напівпровідників на базі відділу напівпровідників Інституту фізики АН УРСР. Керівником відділу був академік В.Є.Лашкарьов. Відділ тільки-но закінчив розробку перших в СРСР германієвих транзисторів, його рейтинг був дуже високий, і створення нового Інституту напівпровідників на чолі з В.Є.Лашкарьовим, в епоху бурхливого розвитку напівпровідникової електроніки в світі, було логічним кроком.

В 1956-57 роках почалася практична робота з підготовки до створення нового інституту, визначення його тематики і структури, і актуальна у той час методика радіоспектроскопії була визнана необхідною складовою нового інституту, а М.Ф.Дейген, талановитий молодий фізик-теоретик, один з видатних учнів Соломона Ісааковича Пекара, що вже зробив перші кроки в галузі радіоспектроскопії, одержав запрошення від В.Є.Лашкарьова очолити новий відділ радіоспектроскопії, підібрати кадри та розробити наукову програму досліджень.

Період з 1956 року, коли почалася практична робота в галузі радіоспектроскопії, до 1960 року, коли офіційно був утворений відділ радіоспектроскопії, і є предметом цієї статті. Саме робота у цей період і заклала наукові підвалини та методологію наступної роботи лабораторії протягом більш ніж сорока років.

Зараз, з висоти набутого досвіду за більш ніж 50 минулих років, здається цікавим розглянути історичну та суспільну обстановку, за якої відбувалися події.

50-ті—60-ті роки минулого століття були періодом бурхливого інтенсивного росту Академії наук УРСР, коли кількість наукових установ збільшилася у рази. Це явище і його причини заслуговують на увагу істориків.

Нині, розглядаючи історію створення Інституту напівпровідників і його підрозділу, відділу радіоспектроскопії, не можна не враховувати, що вони створювалися у Києві, в Українській Радянській Соціалістичній Республіці, що входила до складу Радянського Союзу. Радянський Союз був, як ми тепер знаємо, тоталітарною державою. Розвиток науки в тоталітарній державі підпорядковується зовсім іншим, ніж в демократичних країнах, факторам – згадаймо всім відомі тепер обставини розвитку ядерних технологій, ракетної техніки, космонавтики, з одного боку, і кібернетики, генетики і навіть квантової хімії, з іншого боку. Організація науки, умови її функціонування, принципи фінансування, відбір актуальної тематики та ефективність наукових досліджень в Радянському Союзі різко відрізнялись від тодішніх демократичних країн і від сучасної демократичної України. Але ж і зараз наука в Україні суттєво відрізняється від розвинених країн. В чому ж справа? Мабуть, це фактори, які тепер делікатно називають «притаманними для посттоталітарних молодих демократій».

Фактори, що впливають на науку, можна прослідкувати на організації конкретних лабораторій і досліджень.

Мені здається, що в 50-ті—60-ті роки при організації чисельних нових інститутів певну роль грав такий фактор, як відносно невеликі капіталовкладення: відносно низька собівартість капітального будівництва, пов'язана з низькою заробітною платою будівельників та низька заробітна плата самих працівників Академії (все в порівнянні з розвиненими країнами). В той же час, на прикладі створення Інституту напівпровідників, можна бачити, що кошти на придбання сучасного (на той час) наукового обладнання, навіть того, що вже тоді виготовлялось в СРСР, були незначними, робилася ставка на самостійне виготовлення наукового обладнання. Придбання сучасного обладнання закордонного виробництва взагалі не передбачалось. Іншим важливим фактором була майбутня участь у оборонній тематиці. Звичайно, при створенні нових підрозділів важливою була впливовість лідера-організатора та членів його команди у Президії Академії наук та у ЦК Компартії УРСР.

Взагалі ж діяльність і роль центральних органів та місцевих осередків Комуністичної партії у наукових організаціях та вищих учбових закладах досі не висвітлена навіть у художній літературі. Старше покоління науковців пам'ятає обов'язкові щомісячні загальноінститутські партійні збори де треба було, зокрема, займатися критикою (начальства) та самокритикою, обговорювати стан політико-просвітньої роботи, рішення пленумів ЦК, іноді навіть обговорювати особисті скандальні справи членів партії з точки зору «морального облика». Але це вже окрема тема.

Що стосується радіоспектроскопії, то видається цікавим розглянути загальний науково-історичний контекст та передумови, на тлі яких створювалася нова лабораторія радіоспектроскопії для дослідження напівпровідників, проаналізувати методологічні підходи та конкретні обставини створення лабораторії та загалом Київської школи радіоспектроскопії, тобто ретроспективу того, що свого часу не до кінця усвідомлювалось. Це тим більше цікаво в зв'язку з тим, що події відбувалися за часів існування Радянського Союзу, в умовах холодної війни, що накладало, так би мовити, «рамкові умови» на всі події і кроки, зокрема значний обсяг оборонної тематики, жорсткий контроль спецвідділу («відділ №1») Інституту, контроль партійного бюро, жорсткі обмеження на контакти і зв'язки з технологічно більш розвиненим Заходом, з науковцями розвинених країн, можливості публікацій в провідних наукових журналах і т.п. Звичайно, подібний аналіз є суб'єктивним, тому і назва статті сформульована «До історії...»

### **Зовнішні чинники – наукові передумови**

Вперше в світі явище електронного парамагнітного резонансу експериментально спостерігалось Євгеном Костянтинівичем Завойським у лабораторії Казанського університету у 1944 році [3].

Піонерська робота Є.К.Завойського започаткувала Казанську школу радіоспектроскопії, засновниками та видатними провідниками якої були також С.А.Альтшулер та Б.М.Козирєв. Уже в 1961 році Альтшулер і Козирєв опублікували монографію, що узагальнювала більше 1100 робіт, виконаних Казанською школою та за кордоном з 1944 -1960 рр [4]. У Москві у цей же період працювали давно встановлені школи радіоспектроскопії А.М.Прохорова у ФІАНі (одним з прикладів є [5]) та Воєводського у Інституті хімічної фізики [6].

Велике враження на наукову громадськість та суттєвий вплив на роз-

виток радіоспектроскопії справили праці Басова і Прохорова (1954 рік) із розробки квантових підсилювачів [7]. Зокрема, були розроблені так звані «мазери» (Microwave Amplification by Stimulated Radiation), надчутливі підсилювачі сигналів мікрохвильового діапазону з надзвичайно низьким рівнем власних шумів, що відразу знайшли застосування у радіолокації та радіоастрономії. Робота мазера ґрунтується на використанні енергетичних рівнів домішок парамагнітних іонів хрому у корунді (рубіні), які були детально досліджені методом ЕПР в лабораторії А.М.Прохорова [8]. За свої роботи Басов і Прохоров одержали Нобелівську премію, а дослідники в галузі радіоспектроскопії отримали вагомий аргумент на підтримку важливості їх тематики.

За кордоном на цей період були виконані визначні дослідження з радіоспектроскопії напівпровідників і діелектриків, які вплинули на формування тематики лабораторії і були використані як зразки на підтримку ідеї її створення. Зокрема, були виконані детальні дослідження спектрів ЕПР домішок з глибокими рівнями енергії (огляд [9] узагальнює дані більш ніж 250 публікацій того часу) та неглибокими рівнями енергії у кремнії (збірник [10], виданий у Москві у 1962 р., містить переклади на російську мову 18 найважливіших робіт, опублікованих до 1960 р). Було розроблено метод подвійного електронно-ядерного резонансу (ПЕЯР) та проведено класичні дослідження домішок неглибоких донорних центрів у кремнії американським дослідником Г.Фехером [11]. Дослідження ПЕЯР F-центрів у лужно-галоїдних кристалах виконав німецький дослідник Зайдель [12].

За 1960 рік були опубліковані монографії, що узагальнювали дослідження в галузі ЕПР у хімії [13] та фізиці твердого тіла [14].

Таким чином, новий відділ радіоспектроскопії створювався через 16 років після відкриття явища ЕПР, в епоху розквіту досліджень з радіоспектроскопії у СРСР та у світі, і були ознаки того, що ця епоха закінчується. Так, серед фахівців побутувала легенда, що А.М.Прохоров, один з піонерів радіоспектроскопії, творець знаменитого МАЗЕРА, Нобелівський лауреат, у своїй лабораторії у Москві поставив вимогу співробітникам припинити ці дослідження і своїми руками, молотком (!), розбивав старі радіоспектрометри, які, на його думку, тільки відволікали наукових співробітників від більш актуальних на той час досліджень, зокрема, лазерів (зараз ми бачимо, що ці дії мали сенс).

### **Внутрішні чинники – вплив київських наукових шкіл**

На стиль роботи наукових співробітників, що належать до певної

наукової школи, впливають традиції цієї школи.

Лабораторія радіоспектроскопії створювалася Михайлом Федоровичем Дейгеном, який був учнем видатного фізика-теоретика С.І.Пекара, у відділі напівпровідників, яким керував видатний фізик В.Є.Лашкарьов,

Таким чином, створювана лабораторія радіоспектроскопії мусила відчувати вплив двох видатних наукових шкіл.

### **Школа В.Є.Лашкарьова**

Інститут напівпровідників створювався на базі відділу напівпровідників Інституту фізики, його засновником був В.Є.Лашкарьов, видатний вчений, як казали його колеги - «фізик від бога», представник школи А.Ф.Йоффе, який, в свою чергу, пройшов школу видатних європейських фізиків.

Наукова школа В.Є.Лашкарьова - це явище в науковому житті України, яке ще не знайшло належного висвітлення і для його опису потрібні монографії. У цій невеликій статті я звертаю увагу тільки на одне питання. Однією з важливих особливостей цієї школи того періоду (ця властивість є ключовою для розуміння, з моєї точки зору, певних подій) було вміння дослідника зробити все наукове обладнання своїми руками (або, принаймні, проект і креслення і вже самому збирати і налагоджувати його). Це відбилося, зокрема, в спеціальному лабораторному практикумі кафедри напівпровідників Київського університету, яку в 50-ті роки заснував і очолював В.Є.Лашкарьов. Робота практикуму починалася з того, що студент виготовляв зразки напівпровідникового матеріалу закису міді для своїх подальших досліджень на досить примітивному і саморобному обладнанні самостійно (!). Далі проводилися дослідження напівпровідникових властивостей матеріалу на вимірювальних пристроях, які студент збирав і калібрував також своїми руками.

Тому зрозуміло, що у відділі напівпровідників Інституту фізики у 1953-56 рр., коли у США вже були винайдені транзистори, виникла задача створити вітчизняні аналоги. Було налагоджено весь цикл виготовлення германієвих транзисторів: були спроектовані і виготовлені установки для вирощування германієвих монокристалів з розплавленого германію, розроблено технології вирощування досконалих монокристалів, налагоджено дослідження напівпровідникових властивостей германію, розроблено технології виготовлення самих транзисторів і виготовлені достатньо великі партії транзисторів; було налагоджено вимірювання їх характеристик і виготовлення навіть приладів на їх основі. Ця задача була блискуче вирішена і її



виконання було видатним зразком злагодженої колективної роботи великої кількості фахівців різного профілю заради вирішення спільної наукової задачі, а організація цієї роботи є видатним зразком наукового менеджменту.

Коли виникла ідея створення Інституту напівпровідників то, безумовно, передбачалось, що лабораторії різного профілю будуть також злагоджено працювати заради вирішення ще більш складних наукових задач (однією з таких задач могла б бути технологія вирощування монокристалів кремнію та створення напівпровідникових елементів на його основі). Пізніше, коли Інститут уже працював, закиди на необхідність єдиної для всього Інституту задачі ще довго лунали на вчених радах та наукових зборах і семінарах.

Якщо повернутися до більш вузької теми даної статті, то хочу відмітити, що з точки зору методології організації нових напрямків наукових досліджень, школа В.Є.Лашкарьова передбачала, зокрема, максимально самостійне виготовлення експериментального фізичного обладнання.

### **Школа С.І.Пекара**

Школа С.І.Пекара налічує десятки яскравих особистостей, і ця стаття аж ніяк не претендує на будь-яке її висвітлення. Тут я тільки вказую на те, що М.Ф.Дейген був одним із блискучих учнів і соратників С.І.Пекара. Однією з ключових особливостей стилю школи С.І.Пекара і його видатних учнів, зокрема тих, кого я добре знав - К.Б.Толпиго, Е.І.Рашбу і М.Ф.Дейгена - була здатність розглядати будь-яку фізичну проблему «ab ovo», глибоке знання основ фізики і блискуче володіння математичним апаратом. Завдяки цим якостям, а також такій рисі характеру, яку можна назвати особистою харизмою, Михайло Федорович Дейген був лідером будь-яких наукових дискусій і досліджень.

Однією з особливостей школи С.І.Пекара була самостійність. Багатом відомий афоризм Л.Д.Ландау про школу теоретичної фізики С.І.Пекара: «у Києві відбулося самозародження теоретичної фізики».

### **Наукові передумови**

Вже за кілька років до офіційного створення відділу радіоспектроскопії, тобто до 1960 р., Михайло Федорович Дейген разом із своїми учнями і колегами виконує ряд теоретичних досліджень в галузі ЕПР спектроскопії. Ці роботи заслуговують на окрему увагу, бо вони були зародком наступних масштабних, вже комплексних, експериментально-теоретичних досліджень



М.Ф. Дейген (ліворуч) та Л.Д. Ландау (праворуч)



М.Ф.Дейген та О.А.Бугай на 16 конгресі AMPERE у Бухаресті у 1970р. Зліва на знімку —  
піонер радіоспектроскопії С.А.Альтшулер.



майбутньої лабораторії.

**1957 рік.**

Першу роботу на тему радіоспектроскопії Михайло Федорович Дейген опублікував у 1957 році разом із своїм учнем Леонідом Абрамовичем Шульманом [1], ідеї цієї роботи розвинуті далі у публікації [15]. У цій роботі виконано розрахунки надтонкої взаємодії електрона F-центру із спінами ядер катіонів, що оточують аніонну вакансію у кристалічній ґратці і показано, що саме ця взаємодія визначає форму і ширину лінії ЕПР F-центрів у лужно-галоїдних кристалах. Ця робота є ключовою у зв'язку з тим, що саме дослідження спектрів ЕПР і ПЕЯР F-центрів у лужно-галоїдних кристалах в подальшому виявились найбільш яскравими досягненнями (звісно, з моєї точки зору) майбутнього відділу радіоспектроскопії.

**1958 рік.**

Разом з Майєю Давидівною Глінчук виконано теоретичне дослідження спектрів ЕПР надмалих часток галоїдного металу (тепер їх назвали б наночастками) у лужно-галоїдному монокристалі NaCl [16].

Разом з Віленом Яковичем Зевіним виконано дослідження кутової залежності надтонкої структури F-центру від орієнтації кристалу у зовнішньому магнітному полі [17].

Разом з Олександром Броніславовичем Ройциним виконано перше теоретичне дослідження ПЕЯР F-центрів та домішкових атомів у змішаних кристалах [18].

Разом з Соломоном Ісааковичем Пекарем розрахована надтонка взаємодія та ЕПР у поляронах та екситонах [19].

У журналі «Известия АН СССР» Михайло Федорович публікує оглядову роботу про ЕПР домішкових центрів у іонних кристалах [20].

**1959 рік.**

Разом з О.Б.Ройциним виконано теоретичне дослідження з ЕПР F-центрів у статичних магнітних полях довільної величини [21].

**1960 рік.**

Разом з О.Б.Ройциним виконано теоретичне дослідження форми та температурної залежності ліній ЕПР локальних електронних центрів у кристалах [22].

Разом з В.Я.Зевіним виконано теоретичне дослідження спін-ґраткової релаксації локальних електронних центрів у неметалічних кристалах [23].

Ключовими словами і фразами в цьому списку є:

- F-центри в лужно-галоїдних кристалах;
- ЕПР F-центрів;
- ПЕЯР F-центрів;
- Надтонка взаємодія;
- Форма і ширина лінії ЕПР;
- Кутова залежність;
- Температурна залежність;
- Спін-граткова релаксація.

Протягом всіх наступних 50 років ці слова в різних комбінаціях будуть повторюватися у сотнях наукових публікацій школи Михайла Федоровича (звичайно, будуть додані і багато нових визначень).

Таким чином, у 1956-59 роках Михайло Федорович Дейген намітив основні напрямки майбутніх експериментально-теоретичних досліджень відділу радіоспектроскопії та своїх чисельних учнів.

### **Матеріально-технічні передумови**

Інститут фізики був створений у 50-х роках минулого століття в епоху, коли відбувався перехід від «традиційного» стилю підготовки і виконання експериментальних досліджень до «сучасного». Перший передбачав виготовлення наукових пристроїв самими фізиками-експериментаторами. Звичайно, елементи, такі як, наприклад, оптичні лінзи, призми, вакуумні електронні радіолампи, електронні генератори і підсилювачі, вимірювальні прилади і т.п., виготовляли фахівці або навіть промисловість. Але комбінація цих елементів була справою рук експериментаторів. У 50-ті роки експериментатори самостійно виготовляли навіть скляні ртутні високовакуумні насоси! У відділі напівпровідників навіть надскладна механічна система вирощування монокристалів германію у високому вакуумі була виготовлена самостійно співробітниками В.Є.Лашкарьова.

З іншого боку, 50-ті роки минулого століття стали періодом бурхливого розвитку наукового приладобудування, особливо у США, Європі та Японії. В цей період вже серійно виготовлялися оптичні спектрометри, все більш складні прилади для контролю продукції військових електронних пристроїв. Розвиток ядерних технологій суттєво прискорив цей процес, бо побудова, наприклад, прискорювачів елементарних частинок та реакторів потребувала розподілу праці: одна група фахівців проектувала прискорювач,

інша його будувала, наступна група була необхідна для його експлуатації, експерименти готували фізики-експериментатори, що знаються на фізиці елементарних часток, і нарешті, аналіз результатів експериментів проводили фізики-теоретики (дивись, наприклад, відомий фільм тих часів «Дев'ять днів одного года» із І. Смоктуновським у головній ролі).

Для оптимізації процесу підготовки експериментів у Інституті фізики того часу функціонував «Експериментально-виробничий відділ», майстерня широкого профілю з досить великим набором механічного та електротехнічного обладнання, з складовною майстернею, оптико-шліфувальною майстернею, майстернею для виготовлення кріостатів та ін. Був навіть радіотехнічний відділ, який міг виготовити трансформатори, які були необхідні для блоків живлення пристроїв на радіолампах. В штаті цього підрозділу працювали висококваліфіковані майстри. Будь-який науковий співробітник, навіть студент-дипломник (а я особисто це робив), міг замовити деталі своєї експериментальної установки і одержати їх протягом одного-двох тижнів. Але проект установки, монтаж, налагоджування робив сам експериментатор.

На час створення Інституту напівпровідників в СРСР вже існувало наукове приладобудування, наприклад, оптичні спектрометри виготовлялися на великих оптико-механічних підприємствах Ленінграда.

В цей же час, що особливо цікаво з точки зору автора, в СРСР почалося виробництво першого спектрометра ЕПР типу РЕ-1301 на дослідному виробництві Інституту хімічної фізики у Москві. Цей прилад побудований на елементній базі вакуумних електронних ламп і відзначався високою чутливістю, простотою і надійністю. Досить сказати, що він досі продовжує працювати в багатьох лабораторіях (наприклад, в Інституті фізики). Його ціна тоді була досить високою, що не дозволяло багатьом його придбати.

В новоствореному Інституті напівпровідників, на зразок Інституту фізики, був створений досить потужний Науково-виробничий відділ (керівник — Микола Васильович Козлов, з яким я мало не щодня спілкувався), що полегшував створювати нові методики. Крім того, майже кожен експериментальний відділ мав свій слюсарний підрозділ. Фізики-експериментатори відділу радіоспектроскопії з вдячністю згадують своїх майстрів-механіків — Михайла Приходька, Миколу Зарайського, Бориса Захарченка, які допомагали робити «залізо» для нових методик.

## **Організація експериментальної групи..**

Відділ радіоспектроскопії напівпровідників з самого початку був задуманий М.Ф.Дейгеном як теоретико-експериментальний, такий, у якому гармонійно поєднується робота фізиків-теоретиків і фізиків-експериментаторів. Першим кандидатом на роботу у відділі радіоспектроскопії напівпровідників як теоретик був аспірант О.Б.Ройцин, що вже з 1956 р. працював під керівництвом самого М.Ф.Дейгена в новій галузі. У 1957 році Михайло Федорович вирішив створити експериментальну групу. На роль фізика-експериментатора М.Ф.Дейген у 1957 р запросив мене, тоді молодого фахівця, що в 1956 році закінчив радіофізичний факультет по кафедрі «Фізика напівпровідників» і одержав призначення на роботу в Інститут фізики у відділ В.Є.Лашкарьова, де до цього виконав дипломну роботу, і разом з О.Г.Міселюком і В.Є.Косенком досліджував дифузію домішок групи заліза у германії і за 1956-57 рр. встиг опублікувати кілька наукових статей у провідних журналах. На відміну від О.Б.Ройцина, я не мав досвіду роботи в галузі радіоспектроскопії. Не мав і належної підготовки в галузі радіоелектроніки, що було суттєво для самостійного створення спектрометра ЕПР. Проте робота з розвитку експериментальної методики ЕПР була розпочата вже в другій половині 1957 року. На той час А.Ф.Прихотько, керівник відділу оптики в Інституті фізики, теж зацікавилася радіоспектроскопією і доручила своєму старшому науковому співробітнику Святославу Захаровичу Шульзі зайнятися розробкою цієї методики у своєму відділі. М.Ф.Дейген і А.Ф.Прихотько вирішили об'єднати свої зусилля, і тому деякий час я і С.З. Шульга працювали разом, і для початку практичної роботи нам створили робоче місце в одній із лабораторних кімнат відділу оптики. Наше співробітництво продовжувалося кілька місяців, протягом яких ми зрозуміли, що для вирішення задач обох відділів потрібні дещо відмінні методики і тому далі продовжували роботу окремо.

Завдання, сформульоване М.Ф.Дейгеном для експериментаторів: створення обладнання і методики для спостереження і вивчення спектрів ЕПР в напівпровідниках.

Коротке співробітництво з С.З.Шульгою і подальша самостійна праця з літературою дозволили мені сформулювати конструкцію спектрометра ЕПР, придатного для дослідження спектрів ЕПР парамагнітних центрів у неметалічних кристалах і напівпровідниках.

Що необхідно було зробити.

1. Джерело мікрохвильового радіовипромінювання з частотою біля 9 ГГц, яке, в свою чергу складалось з клістрона, стабілізованого джерела живлення та блока автоматичної стабілізації частоти по робочому резонатору.
2. Хвилеводну систему з основними частинами: набір хвилеводів, атенюатор, регулятор фази, циркулятор, детекторна секція з мало шумним детектором.
3. Робочий резонатор високої добротності з регулюванням частоти, система вводу високочастотної модуляції магнітного поля всередину резонатора, регулювання зв'язку хвилевода з резонатором.
4. Великий електромагніт, який має забезпечувати магнітне поле 3500 Гс і можливість розгортки на кількасот Гс, модуляцію магнітного поля на частоті 50 Гц, високу просторову однорідність магнітного поля за рахунок великого діаметра наконечників (не менше 200 мм).
5. Стабілізоване з точністю  $10^{-5}$  потужне джерело живлення електромагніта, з регулюванням величини магнітного поля та можливістю лінійної розгортки з різними амплітудами та швидкостями.
6. Досить потужний стабілізований генератор на частоту 400-500 кГц.
7. Попередній підсилювач сигналу з низьким рівнем шумів на частоті модуляції магнітного поля.
8. Основний підсилювач з великим регульованим коефіцієнтом підсилення.
9. Фазочутливий детектор.
10. Прилади для спостереження самого сигналу: осцилограф та самописець.
11. Кріостати для роботи з напівпровідниками при температурах від рідкого азоту до рідкого гелію.
12. Робочі резонатори для роботи в кріостатах.
13. Високостабільні джерела живлення електронного обладнання.

Чи можливо було одному співробітнику у «розумні» терміни виконати цю програму «з нуля»? Тепер я бачу, що ні. Мій науковий керівник, талановитий теоретик, не мав уявлення про експериментальний бік радіоспектроскопії, не відвідав вже існуючі відомі лабораторії у Казані і Москві і вважав, що одного молодого співробітника для початку досить.

А чи була потреба «з нуля» створювати складний спектрометр високого класу для дослідження напівпровідників, здатний працювати при над-



низьких температурах? В часи, коли вже серійно виготовлявся спектрометр ЕПР РЕ-1301?

Керівництво відділу напівпровідників (де починалася ця робота) і М.Ф.Дейген не зробили простого кроку: запозичення на той час вже існуючого у країні досвіду з експериментальних досліджень в галузі ЕПР. Можливо, М.Ф.Дейгену якось незручно було звертатись до Альтшулера чи Прохорова з проханням взяти мене на стажування. А вже про стажування у відомих європейських чи американських центрах в ті часи не могло бути й мови, це не залежало від керівника лабораторії і навіть Інституту.

Але керівництво зробило свій вибір (думаю, несвідомо), дало команду, і робота восени 1957 року почалася.

Я ж, погоджуючись зайнятися цією справою, не мав досвіду, не бачив навіть «живого» спектрометра ЕПР. Але було бажання працювати, була енергія.

Для початку роботи не було нічого. Треба було придбати електронні, надвисокочастотні і електротехнічні елементи, розробити схеми приладів, виготовити шасі, змонтувати і спаяти електроніку і налагодити її. Треба було забезпечити злагоджену роботу багатьох електронних блоків. Треба було виготовити електромагніт, налагодити робочі резонатори, спроектувати і замовити кріостати. Придбати стандартні прилади для налагодження радіоелектроніки....

У мене були дуже обмежені знання і досвід в галузі радіоелектроніки. Звичайно, брак досвіду змусив звернутися до фахівців. Хтось порадив звернутись за консультацією із якогось конкретного питання до молодого радіоінженера, що тоді працював у підрозділі забезпечення роботи циклотрону, Михайла Олександровича Рубана. Той дав корисні поради. Після першої консультації відбулось ще кілька, і вже М.А.Рубан зацікавився моєю роботою. Робота у штаті циклотрона виявилась для нього нецікавою, він все частіше приходив у мою кімнату, і нарешті я поговорив з М.Ф.Дейгеном і попросив його домовитися про переведення М.Ф.Рубана у нашу групу. У тому ж таки 1958 році, але трохи пізніше, до нашої групи приєднався молодий фахівець Валентин Михайлович Маєвський, який за моєю рекомендацією був запрошений М.Ф.Дейгеном і також був переведений із іншого підрозділу.

Таким чином, у експериментальній групі ЕПР спектроскопії, над створенням методики ЕПР спектроскопії до моменту організації у 1960 році відділу радіоспектроскопії в складі Інституту напівпровідників, працювали 3 співробітники.

Розробка спектрометра ЕПР продовжувалась протягом 4 років (1957-1960). Був виготовлений спектрометр з високочастотною модуляцією магнітного поля (на частоті 425 кгц), з пристойною чутливістю, але здатний працювати лише при кімнатній температурі. Тому для перших досліджень були вибрані F-центри в лужно-галоїдних кристалах. Перші оригінальні наукові результати були отримані у 1961 році. Доповідь «ЭПР некоторых центров окраски в щелочно-галоидных кристаллах», у якій були представлені перші спостереження центрів фарбування у лужно-галоїдних кристалах, була прочитана у липні 1961 р. на 2-й Всесоюзній нараді «Физика щелочно-галоидных кристаллов», її авторами були М.А.Рубан, А.А.Шаталов та О.А.Бугай [24].

На цьому я завершую свою розповідь про початкову стадію створення відділу радіоспектроскопії. У 1960 році був створений Інститут напівпровідників і в його складі відділ радіоспектроскопії. Прийшло багато нових молодих співробітників, роботи інтенсифікувались та розширились. Ця стадія існування відділу добре описана у колективній монографії [1], на яку я посилався з самого початку.

## Література

1. Радиоспектроскопия конденсированных сред (коллективная монография в двух частях). - Киев, 1998.
2. М.Ф.Дейген, Л.А.Шульман. К теории спин-электронного резонанса на F-центрах в ионных кристаллах. Оптика и спектроскопия, т.3, №1, с.21, (1957).
3. E.Zavoisky. Spin-magnetic resonance in paramagnetics, J.Phys., v.9, №3, 1945.
4. С.А.Альтшулер, Б.М.Козырев. Электронный парамагнитный резонанс. - М., 1961.
5. Л.С.Корниенко, А.М.Прохоров. ЭПР ионов железа в корунде. ЖЭТФ, т.33, с.85, 1957.
6. Л.А.Блюменфельд, В.В.Воеводский, А.Г.Семенов. Электронный парамагнитный резонанс в химии. Новосибирск. 1962.
7. Н.Г.Басов, А.М.Прохоров. Квантовые усилители. УФН, т.57, №3, с.485, 1955.
8. Г.М.Зверев, Л.С.Корниенко, А.А.Маненков, А.М.Прохоров. Применение рубина в квантовых усилителях. ЖЭТФ, том 34, с.1660, 1958.
9. G.Ludwig, H.Woodbury. Electron Spin Resonance in Semicinductors. Solid

- State Physics. Vol.13, NY-London, 1962.
10. Электронный спиновый резонанс в полупроводниках. - Москва, 1962.
  11. G.Feher. Electron nuclear double resonance of donors in silicium. Phys. Rev.,v.114, p.1219, 1959.
  12. H.Seidel.Electronen-kern-doppelresonanz von F-zentren in alkalihalogenid-kristallen. Z.Phys., v.165, №2, s.218. 1961.
  13. D.Ingram. Free radicals and EPR. - London, 1958.
  14. W.Low. Paramagnetic resonance in solids. - NewYork & London. 1960.
  15. М.Ф.Дейген. Теория парамагнитного резонанса F-центров в ионных кристаллах. ЖЭТФ, т.33, №3, с.773, (1957).
  16. М.Д.Глинчук, М.Ф.Дейген. Спин-электронный резонанс в стехиометрическом избытке металла в кристаллах типа NaCl. ЖТФ, т.28, №9, с.1981, (1958).
  17. М.Ф.Дейген, В.Я.Зевин. Зависимость сверхтонкой структуры F-центра от ориентации кристалла во внешнем магнитном поле. ЖЭТФ, т.34, №5, с.1142, (1958).
  18. М.Ф.Дейген, О.Б.Ройцин. Подвійний парамагнітний резонанс введених у кристал атомів і F-центрів у змішаних кристалах. УФЖ, т.3, №4, с.440, (1958).
  19. М.Ф.Дейген, С.И.Пекар. Сверхтонкое взаимодействие и спин-электронный резонанс в поляронах и экситонах. ЖЭТФ, т.34, №3, с.684, (1958).
  20. М.Ф.Дейген. Парамагнитный резонанс примесных центров в ионных кристаллах. Известия АН СССР, т.22, №11, с.1341, (1958).
  21. М.Ф.Дейген, А.Б.Ройцин. Парамагнитный резонанс F-центров в статических магнитных полях произвольной величины. ЖЭТФ, т.36, №1, с.176, (1959).
  22. М.Ф.Дейген, А.Б.Ройцин. Форма и температурная зависимость линий спин-электронного резонанса локальных электронных центров в кристаллах. ЖЭТФ, т.32, №2, с.489, (1960).
  23. М.Ф.Дейген, В.Я.Зевин. Спин-решеточная релаксация локальных электронных центров в неметаллических кристаллах. ЖЭТФ, т.39, №4(10), с.1126, (1960).
  24. А.А.Бугай, М.А.Рубан, А.А.Шаталов. Физика щелочно-галогидных кристаллов. Труды 2-го Всесоюзного совещания, Рига, 19-24 июня 1961 г. с.432 - 435. - Рига, 1962.