

Наукова школа О.В.Снітка в Інституті фізики напівпровідників НАН України

Розглянуто історію створення наукової школи О.В.Снітка в галузі фізики поверхні напівпровідників. Відтворено життєвий і творчий шлях керівника школи, характерні риси його наукової та організаційної роботи. Висвітлено наукові результати, одержані в рамках школи О.В.Снітка.

Видатний вчений Олег В'ячеславович Снітко (1928—1990) збагатив науку своїми працями першорядного значення в галузі фізики й техніки напівпровідників і водночас зробив вагомий внесок в організацію наукових досліджень з фізики напівпровідників в Україні, у становлення і розвиток Інституту фізики напівпровідників НАН України. З його діяльністю пов'язано формування нового наукового напрямку — фізики поверхні напівпровідників, що є науковою основою розвитку мікроелектроніки, оптоелектроніки, акустoeлектроніки, вакуумної техніки, елементної бази обчислювальних систем та інших галузей сучасного приладобудування [1—4].

О.В. Снітко розробив оригінальні електрофізичні та оптичні методи дослідження поверхні напівпровідників; розвинув на якісно новому рівні фізичні уявлення про механізм електронних явищ на поверхні напівпровідників; встановив математичні залежності фізичних властивостей поверхні від її фізико-хімічного стану; запропонував електронні моделі границь розділу напівпровідник—вакуум, напівпровідник—реальний чи термічний окис, які дали змогу пояснити основні механізми впливу поверхні на електронні явища в напівпровідниках. Під



О.В.Снітко. 1950-ті роки

керівництвом О.В.Снітка проведено фундаментальні та прикладні дослідження, які дали можливість відкрити й дослідити ряд принципово нових явищ на поверхні, важливих для науки й практики (розмірне перезаселення долин та поперечна анізотропія магнітопровідності в електронному кремнії, ефект фотоелектричної пам'яті та за-

лишкової фотопровідності в арсеніді галію, явище глибокого нерівноважного виснаження в структурах метал—діелектрик—кремній, явище охолодження гарячих електронів на поверхні напівпровідників, ефект взаємодії поверхневих домішок та ін.). Знайдено перспективні шляхи формування тонкошарових структур з унікальними параметрами, які становлять значний інтерес для електронної промисловості. Запропоновано, розроблено і впроваджено оригінальні напівпровідникові датчики фізичних параметрів різного призначення для визначення магнітних полів, тиску, складу газових середовищ тощо [1, арк.91,96].

Роботи О.В. Снітка з фізики поверхневих явищ у напівпровідниках отримали широке визнання наукової громадськості як у нашій країні, так і за кордоном. Організаційна діяльність Олега В'ячеславовича на керівних посадах в Інституті напівпровідників значно сприяла зміцненню провідної ролі інституту в його головному напрямі — оптики та фотоелектроніки напівпровідників [1, арк.80].

О.В. Снітко народився 30 квітня 1928 року в м. Києві у родині військово-службовця. У 1946 році закінчив зі срібною медаллю середню школу. У цьому ж році став студентом фізичного факультету Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка, по закінченні якого в 1951 р. отримав кваліфікацію фізика зі спеціальності «фізика напівпровідників».

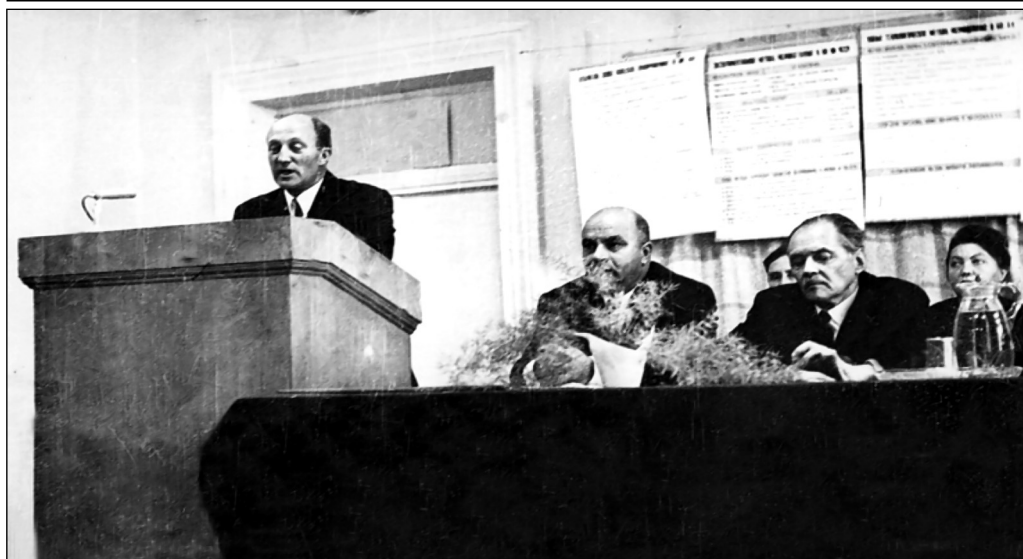
Олег В'ячеславович розпочав трудову діяльність в 1951 році як інженер відділу фізики напівпровідників Інституту фізики АН УРСР. У 1953 р. вступив в аспірантуру Інституту фізики, яку успішно закінчив у 1956 році. У 1956—1960 рр. працював молодшим

та старшим науковим співробітником Інституту фізики.

Починав свою наукову роботу О.В. Снітко у відділі відомого вченого професора В.І.Ляшенка, засновника в Україні нового наукового напрямку — фізики поверхні напівпровідників. Олег В'ячеславович став основним помічником В.І.Ляшенка в Інституті фізики, і йому були доручені актуальні на той час дослідження фотоелектричних процесів на поверхні напівпровідників та в тонких плівках. Серія публікацій О.В. Снітка в центральних журналах та збірниках праць Інституту фізики засвідчила надзвичайно вдумливе ставлення молодого вченого до поставлених проблем. На базі цих досліджень у 1957 році Олег В'ячеславович захистив кандидатську дисертацію на тему «Вплив адсорбції молекул та зовнішнього електричного поля на фотопровідність напівпровідників».

О.В.Снітко був одним з фундаторів Інституту напівпровідників АН УРСР, заснованого 7 жовтня 1960 р. Науково-організаційною базою нового інституту стали два відділи, що ви ділилися з Інституту фізики — це відділ фізики напівпровідників (керівник В.Є. Лашкар'єв) і відділ теоретичної фізики (керівник С.І.Пекар), у тематиці якого переважне місце займали питання теорії напівпровідників та діелектриків. На протязі 1960—1961 рр. в Інституті напівпровідників було створено 8 наукових відділів та лабораторій; одну з них, лабораторію фізики захисту поверхні напівпровідників, очолив кандидат фізико-математичних наук О.В. Снітко [5, с.4].

У початковий період існування Інституту напівпровідників у його складі був один академік АН УРСР (В.Є. Лашкар'єв — перший директор інституту),



Засновники Інституту напівпровідників: О.В.Снітко, С.І.Пекар, В.Є.Лашкар'юв

три доктори і 14 кандидатів наук [5, с. 8]. Спершу інститут розміщався в будинку Інституту фізики; в травні 1962 року він переїхав у новий окремий корпус з усім обладнанням.

З перших днів організації Інституту напівпровідників О.В. Снітко працював у ньому старшим науковим співробітником (1960—1961 рр.) і вченим

секретарем (1961 р.), зав. лабораторією (1961—1962 рр.) та зав. відділом (1962—1967 рр.). З 1967 по 1970 р. він займав посаду заступника директора з наукової роботи, з 1970 по 1990 р. — директора Інституту напівпровідників. У 1970—1980 роках О.В.Снітко очолював відділення інституту «Фізика поверхні напівпровідників» (первинна



Перевезення приладів лабораторії О.В.Снітка у новий корпус

назва — сектор поверхневих та контактних явищ у напівпровідниках), що об'єднувало шість відділів.

У 1969 році О.В. Снітко захистив дисертацію на тему «Дослідження електрофізичних процесів на поверхні кремнія, германія та сульфиду кадмію при різних активних впливах» і здобув вчений ступінь доктора фізико-математичних наук (рішення ВАК від 28.11.1969 р. [1, арк.4]). У 1971 році О.В.Снітка було затверджено у вченому званні професора за спеціальністю «Фізика напівпровідників і діелектриків» (рішення ВАК від 30.04.1969 р. [1, арк.5]). 27 грудня 1973 р. на Загальних зборах АН УРСР О.В.Снітко був обраний членом-кореспондентом АН УРСР зі спеціальності «Фізика напівпровідників»; 28 березня 1985 р. — дійсним членом (академіком) АН УРСР зі спеціальності «Фізика» [1, арк.6–7].

За весь час своєї наукової діяльності О.В.Снітко опублікував понад 300 наукових праць, у тому числі сім монографій; він є автором багатьох авторських свідоцтв, декількох популярних статей про напівпровідники та їх застосування.

Плідну наукову діяльність О.В. Снітко успішно поєднував з науково-організаційною та громадською роботою. Як голова Наукової ради АН УРСР з фізики напівпровідників О.В.Снітко виконував великий обсяг робіт з координації та підвищення ефективності наукових досліджень напівпровідників у різних установах України (близько 40 організацій). Будучи заступником голови секції фізики поверхні напівпровідників Наукової ради АН СРСР з проблеми «Фізика, хімія, механіка поверхні», О.В. Снітко приділяв багато уваги координації робіт з фізики поверхні напівпровідників в СРСР. Водночас він був членом бюро Відділення

фізики та астрономії АН УРСР, Наукової ради АН СРСР з проблеми «Фізика і хімія напівпровідників», секції фізики Комітету по Державним преміям УРСР в галузі науки і техніки; з 1970 року виконував обов'язки заступника академіка-секретаря Відділення фізики АН УРСР. Також О.В. Снітко входив до складу редколегії таких відомих наукових журналів, як «Фізика і техніка напівпровідників», «Поверхня» [1, арк.72,119–120].

О.В. Снітко часто виступав з науковими доповідями на всесоюзних нарадах з фізики напівпровідників: у Ленінграді (1955), Москві (1958), Києві (1960, 1972), Томську (1962), Новосибірську (1965, 1969), Ужгороді (1966, 1970, 1972) та ін., а також на міжнародних конференціях у Празі (1960) та Москві (1968) [1, арк.68]. З метою обміну науковим досвідом і знаннями багаторазово був у службових відрядженнях за кордоном, зокрема у Польщі (1974), Угорщині (1973, 1983), Болгарії (1975, 1982), Чехії (1960, 1979, 1980), Німеччині (1964, 1967), Італії (1976), Англії (1978) [1, арк.114].

О.В. Снітко — лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (1981 р.) та премії ім. акад. К.Д. Синельникова з фізики (1983 р.); він нагороджений двома орденами «Знак Пошани» (1976 р., 1988 р.), медалями «За звитяжну працю» (1970 р.) та «В пам'ять 1500-річчя Києва» (1982 р.)

О.В. Снітко — творець наукової школи в галузі фізики поверхні напівпровідників. Дослідження цієї школи заклали основи сучасних уявлень про сутність електрофізичних, фотоелектричних та оптичних явищ, що відбуваються на поверхні та у приповерхневих шарах напівпровідників.

До складу школи О.В. Снітка входять: члени-кореспонденти НАН Украї-

ни Євген Федорович Венгер, Володимир Сергійович Лисенко, Борис Олексійович Нестеренко; доктори наук Анатолій Васильович Саченко, Юрій Архипович Пасічник, Валерій Арнольдович Тягай, Віктор Євгенович Примаченко, Тамара Миколаївна Ситенко, Алла Іванівна Климовська, Валерій Анатолійович Стерлігов, Геннадій Якович Колбасов, Анатолій Йосифович Шкрєбтій, Юрій Михайлович Ширшов; кандидати наук Євген Петрович Мацас, Віктор Володимирович Міленін, Олег Сергійович Фролов, Віктор Миколайович Бондаренко, Олександр Михайлович Євстигнєєв, Світлана Іллівна Кирилова, Наталія Олександрівна Растрєненко,

Віктор Трохимович Розумнюк, Ігор Олександрович Юрченко та ін.

Наукова школа під керівництвом О.В. Снітка сформувалася у 1960—1970-ті роки. Основу школи склали співробітники десятого відділу Інституту напівпровідників, створеного Олегом В'ячеславовичем у 1962 році на базі очолюваної ним лабораторії фізики захисту поверхні напівпровідників. Спочатку 10-й відділ мав назву відділу «фізики тонкоплівочних напівпровідників», у 1970 р. його було перейменовано у відділ «фізики поверхні напівпровідників». У 1984 році в рамках відділу було створено лабораторію фотоелектричних та оптичних явищ на поверхні напівпровідників; її очолив доктор



10-й відділ Інституту напівпровідників АН УРСР (1970-ті роки) зліва направо, перший ряд: А.В.Саченко, А.І.Климовська, О.В.Снітко, В.Є.Примаченко; другий ряд: Ю.А.Пасічник, Н.Г.Фролова, Е.І.Яшин, Н.О.Петрова, І.П.Тягульський, Н.О.Растрєненко, І.О.Юрченко

фізико-математичних наук, професор А.В.Саченко. Він же був завідувачем відділу № 10 у 1990—1997 роках, після передчасної смерті О.В.Снітка. У 1980-ті роки відділ налічував 15 співробітників: 1 член-кореспондент АН УРСР, 2 доктори і 12 кандидатів наук [5, с.60].

У десятому відділі розпочинали свою наукову роботу такі вчені-фізики: Є.Ф. Венгер, А.І. Климовська, Г.Я. Колбасов, Б.О. Нестеренко, Ю.А. Пасічник, В.Є. Примаченко, А.В. Саченко, В.А. Стерлігов, Ю.М. Ширшов. У 1964 році у відділ прийшов В.А. Тягай, який перед тим захистив кандидатську дисертацію під керівництвом відомого електрохіміка Ю.В. Лєскова. Валерій Арнольдович Тягай дуже плідно працював у відділі О.В. Снітка, потім він захистив дисертацію на звання доктора хімічних наук і став професором.

Структура 10-го відділу відображала характерні особливості школи О.В.Снітка. У відділі існувало вісім наукових груп. У кожній групі був свій чітко визначений напрям досліджень, і з кожною з них О.В. Снітко працював окремо. Групи очолювали учні О.В. Снітка: А.І. Климовська, Б.О. Нестеренко, Ю.А. Пасічник, В.Є. Примаченко, А.В. Саченко, Т.М. Ситенко, В.А. Тягай, О.С. Фролов; вони скеровували роботу решти співробітників відділу, які входили до складу різних груп. Згодом деякі групи переросли в наукові лабораторії та відділи.

Протягом трьох десятиліть (1960—1990) О.В. Снітко разом зі співробітниками 10-го відділу виконав великий обсяг робіт, присвячених вивченню електронних властивостей поверхні напівпровідників. Отримані ними результати становлять значний інтерес для науки і техніки, зокрема для створення тонкоплівкових напівпровідникових приладів.

Важливе значення досліджень, які проводилися під керівництвом О.В. Снітка, відзначається, зокрема, у характеристиці директора ІН АН УРСР від 20.12.1982 р.: «О.В. Снітко на протязі багатьох років здійснює наукове керівництво напрямом по вивченню фізичних явищ на поверхні напівпровідників...

Разом із співробітниками очолюваного ним відділу О.В. Снітко виявив і вивчив ряд принципово нових явищ на поверхні напівпровідників, що мають велике наукове значення, і запропонував шляхи їх практичного використання. Із одержаних результатів як найважливіші необхідно відзначити такі: 1) розроблено комплекс методів дослідження фізичних властивостей поверхні напівпровідників; 2) одержано фундаментальні дані про фізичний механізм електронних та інших явищ на поверхні; 3) запропоновано нові методи обробки поверхні і розроблено нові типи поверхнево-чутливих приладів. Одержані результати мають принципове значення для створення фізичних основ напівпровідникової техніки, зокрема мікроелектроніки...

Науковий колектив, очолюваний О.В.Снітком — один із провідних в СРСР у галузі фізики поверхні напівпровідників.» [1, арк.84, 84зв.]

Основна тематика роботи відділу О.В. Снітка — дослідження електронних, фотоелектричних, оптичних та електрохімічних явищ у напівпровідниках з акцентуванням на вплив властивостей поверхні та меж розділу на ці явища.

Ще до створення 10-го відділу Інституту напівпровідників роботи за вказаною тематикою велися під керівництвом професора В.І. Ляшенка у відділі фізики напівпровідників Ін-

ституту фізики, який був створений у 1944 році. Саме В.І. Ляшенко був першим вітчизняним вченим, який теоретично обґрунтував та експериментально виявив суттєвий вплив поверхневих електронних процесів на перебіг таких явищ, як ефект випрямлення, виникнення фотоелектрорушійних сил (фотоЕРС) та фотопровідності у напівпровідниках. Розпочаті в 1948 році з ініціативи В.І. Ляшенка широкопланові дослідження поверхневих явищ згодом привели до формування важливого самостійного розділу фізики напівпровідників — електроніки поверхні напівпровідників [5, с.61].

Вже на початку 1950-х років було теоретично й експериментально доведено існування поверхневих електронних рівнів та можливість визначення змін топографії цих рівнів з експериментів по адсорбції (В.І. Ляшенко, В.Є. Лашкар'єв та ін.). У перших дослідках вивчалася поверхнева провідність і контактна різниця потенціалів напівпровідників у зв'язку з адсорбцією газів на їх поверхні (В.Є. Лашкар'єв, В.І. Ляшенко). Вперше було виявлено і вивчено вплив адсорбції молекул певних речовин та зовнішнього електричного поля на фотопровідність напівпровідників, її кінетику, перебіг генераційно-рекомбінаційних процесів на поверхні в умовах освітлення; з'ясовано фізичний механізм такого впливу (В.І. Ляшенко, О.В. Снітко, 1952—1957 рр.).

У 1956 році в зв'язку з інтенсивним розвитком транзисторної електроніки в Інституті фізики АН УРСР вперше в СРСР були розпочаті комплексні дослідження електрофізичних властивостей поверхні германію та кремнію. У ході цих досліджень детально вивчався вплив зовнішнього електрич-

ного поля та адсорбції молекул на поверхневі електронні процеси, такі як темнова і фотопровідність, фотоЕРС, поверхнева рекомбінація, конденсаторний фотоэффект. Це дало можливість визначити топографію поверхневих рівнів германію та кремнію.

Вперше було визначено параметри, концентрацію та енергетичне положення поверхневих електронних рівнів, що утворюються при адсорбції. Встановлено існування двох систем електронних рівнів — «повільних» і «швидких»; показано, що поверхневі рівні можуть служити донорами чи акцепторами і виконувати інші функції, властиві домішковим електронним рівням в об'ємі напівпровідника. З'ясовано механізми обміну носіями заряду між зонами в об'ємі напівпровідника та поверхневими рівнями (О.В. Снітко, В.І. Ляшенко, В.Г. Литовченко, В.Є. Примаченко, О.С. Фролов та ін., 1956—1962 рр.). Ці дослідження дали змогу не тільки обґрунтувати фізичну модель поверхні з визначенням необхідного числа параметрів, але й розробити метод зменшення й стабілізації поверхової рекомбінації кремнію, що є суттєвим для розробки напівпровідникових приладів. У результаті проведених досліджень намітилися шляхи управління властивостями поверхні напівпровідників, що є актуальним для тонкоплівкової електроніки, де властивості плівок значною мірою залежать від стану поверхні.

Науковий колектив, сформований В.І. Ляшенком в Інституті фізики, послужив базою для створення двох наукових відділів в Інституті напівпровідників. Крім 10-го відділу, який очолював О.В. Снітко, вивченням поверхневих явищ у напівпровідниках займалися співробітники 9-го відділу під керівництвом В.І. Ляшенка. Цей

відділ спочатку отримав назву відділу «електроніки поверхні напівпровідників»; згодом він був перейменований у відділ «фізичних основ інтегральної електроніки» і його керівником став В.Г. Литовченко.

У перші роки після створення 10-го відділу Інституту напівпровідників, яким керував О.В.Снітко, наукові дослідження цього відділу стосувалися широкого кола об'єктів: не тільки актуальних до цього часу напівпровідників германію та кремнію, але також дво- та багатокомпонентних кристалів CdS, CdSe, CdTe, GaAs, InP, HgCdTe та плівок PbS, PbSe, чутливих до опромінення у широкому діапазоні спектра — від ультрафіолетового до інфрачервоного.

У результаті комплексного дослідження електронних, структурних та хімічних властивостей поверхні напівпровідників було розроблено її фізичну модель, створено теорію нерівноважних процесів у приповерхневій області напівпровідників, вивчено природу поверхневих електронних станів та їх вплив на властивості реальної поверхні, виявлено нові поверхневі явища. Як і раніше в Інституті фізики, акцент робився на дослідженні поверхневих фотоefektів, таких як поверхнева фотопровідність та фотоЕРС, у тому числі при низьких температурах.

У перших роботах співробітників відділу було встановлено і досліджено вплив поверхневих факторів (адсорбція молекул, зовнішнє електричне поле) на електронні властивості вузькозонних напівпровідників, зокрема тонких плівок сульфiда свинцю, які широко використовувались у промисловості. Було з'ясовано механізм поверхневих явищ у цих плівках і встановлено, що окиснення веде до утворення двох типів центрів: акцепторних рівнів, що

визначають темнову провідність, і рівнів прилипання фотоелектронів, що спричиняють фоточутливість. Було показано, що вплив поверхні на фізичні й хімічні шари PbS істотно різний через відмінності в структурі шарів окисла на поверхнях PbS. Вивчено повільну й швидку релаксації провідності шарів в ефекті поля.

У результаті проведених досліджень встановлено, що на поверхні PbS спостерігається збагачення на дірки завдяки великій концентрації акцепторних поверхневих електронних станів. Оптимальні умови для підвищення фоточутливості шарів PbS досягаються зміною вигину зон, за якого значення фотовідповіді зростає, а амплітуда шуму зменшується. Поверхневі властивості й вплив газів середовища визначають нестабільність основних параметрів приймачів інфрачервоного випромінювання на основі шарів PbS.

Експериментальні дані про вплив поверхні на провідність, фотопровідність і шуми шарів було пояснено на підставі запропонованої моделі декількох шарів PbS. Результати цих досліджень дозволили суттєво збільшити чутливість і стабільність фотоопорів на основі шарів PbS (О.В. Снітко, Б.О. Нестеренко, Ю.А. Пасічник, О.С. Фролов, 1961—1965 pp.).

Принципове значення для розвитку фізики напівпровідників мали результати досліджень нерівноважних електрофізичних явищ на поверхні напівпровідників, проведені під керівництвом О.В. Снітка [1, арк.90, 91].

Було розвинуто теорію нерівноважних електронних явищ на поверхні та у приповерхових шарах напівпровідників за наявності освітлення; досліджено енергетичний спектр поверхневих електронів у площині контакту напів-

провідників. Вперше відкрито і детально вивчено ефект поверхневого прилипання нерівноважних носіїв заряду, що полягає в перезарядці поверхневих електронних рівнів під дією освітлення та супроводжується різким збільшенням fotocутливості зразків (В.Г. Литовченко, В.І. Ляшенко, В.Є. Примаченко, О.В. Снітко, 1959—1963 рр.). Відкриття цього явища та його послідовний теоретичний аналіз мають важливе значення для практичного використання поверхнево-чутливих фото ефектів у приладах фотоелектроніки.

Результати цих робіт увійшли в монографію [6], яка була написана у співавторстві зі співробітниками Київського університету та Інституту фізичної хімії АН УРСР і відзначена Державною премією УРСР за 1970 рік.

Велика група робіт співробітників відділу № 10 присвячена розвитку теорії малосигнальних поверхневих фото ефектів в напівпровідниках з урахуванням ефекту поверхневого прилипання. Вивчалися насамперед такі напівпровідники, як кремній при кімнатних температурах та германій при низьких температурах. Було розглянуто їх кінетичні властивості, зокрема кінетику релаксації при включенні чи вимкненні світла. Вперше було отримано самоузгоджені вирази для ефективних часів релаксації фотопровідності, фотоЕРС та фотомагнітного ефекту у випадку існування в приповерхневій області істотних збіднюючих шарів просторового заряду або шару інверсії провідності. Також було доведено обмеженість використання поняття швидкості поверхневої рекомбінації в кінетичних процесах і відкрито ефект зменшення рекомбінації приповерхневим полем (В.О. Зуєв, А.В. Саченко, К.Б. Толпиго, 1964—1967 рр.). Теоретичне до-

слідження нерівноважних електронних явищ на поверхні дозволило запропонувати нові дослідні методи вивчення поверхневих властивостей напівпровідників і визначення їх параметрів. Пізніше у монографії [7] було узагальнено теоретичні та експериментальні роботи в даному напрямку.

Важливою віхою в дослідженні поверхні напівпровідників було відкриття нерівноважного ефекту поля з глибоким (аж до товщини зразка) виснаженням на основні носії заряду в кремнії. Було показано, що швидке прикладення напруги, яка збіднює напівпровідник (кремній) на основні носії заряду, до конденсатора на основі структури метал—діелектрик—напівпровідник (МДН) може привести до різкого зменшення (аж до нуля) провідності кремнієвого зразка на певний проміжок часу. Це пов'язано з тим, що часи генерації неосновних носіїв заряду в кремнії досить великі, особливо при понижених температурах (О.В.Снітко, В.Є. Примаченко, В.В. Міленін, 1965 р.). Вивчення цього явища дозволило встановити нові механізми польового прискорення релаксації поверхневої провідності, вперше визначити параметри електронфоновної взаємодії на поверхні, виявити нові розмірні фізичні ефекти в тонких шарах кремнію.

Ефект глибокого нерівноважного виснаження носіїв зарядів під дією імпульсного електричного поля відразу знайшов широке застосування у фізичних дослідженнях. Дещо пізніше він став використовуватись в електронній промисловості пристворенні напівпровідникових приладів нового класу — так званих ППЗ («прилади з переносом заряду»), принцип дії яких базується на даному ефекті. ППЗ складаються з ланцюжків МДН-конденсаторів; в

основу їх роботи покладено ефект глибокого нерівноважного виснаження з одночасним переміщенням вздовж поверхні інформаційного заряду, який ін'єктуються в один чи декілька МДН-конденсаторів. ППЗ використовуються як системи динамічної пам'яті та обробки інформації, як засоби формування зображення тощо.

Під керівництвом О.В. Снітка у відділі № 10 вперше було досліджено фізичні властивості поверхні широкозонних напівпровідників, таких як CdS (В.Н.Бондаренко, В.А. Тягай, Ю.М. Ширшов). У результаті встановлено існування ефекту нерівноважного виснаження при кімнатній температурі й визначено параметри поверхневих станів. За ці дослідження О.В. Снітко разом з групою вчених Інституту напівпровідників та Інституту фізики АН УРСР був удостоєний Державної премії України 1981 року.

На протязі 1960—1980-х років у відділі № 10 проводилися теоретичні дослідження фотоелектричних та оптичних явищ у напівпровідниках і поверхнево-бар'єрних структурах на їх основі, а також у напівпровідникових приладах (фотодетекторах і фотопетворювачах).

Було побудовано загальну феноменологічну теорію фотоелектричних процесів у приповерхневих шарах біполярних напівпровідників; встановлено схему рекомбінаційних поверхневих процесів у монополярних широкозонних напівпровідниках. Запропоновано єдиний підхід до теоретичного аналізу поверхнево-чутливих фото ефектів у напівпровідниках та МДН-структурах. Відзначальними рисами цього підходу є: врахування непостійності квазірівнів Фермі для електронів та дірок в області просторового заряду (ОПЗ);

самоузгоджений розгляд рекомбінації на поверхні та у приповерхневій ОПЗ; розв'язок нелінійної за освітленням задачі.

Значна увага приділялась у відділі експериментальному вивченню електрофізичних та фотоелектричних процесів у напівпровідниках при криогенних температурах. Зокрема, в групі Т.М. Ситенко були проведені дослідження впливу поверхні на формування остаточної фотопровідності й фотоелектричної пам'яті в монокристалах та епітаксціальних плівок арсеніду галію при низьких температурах (О.В. Снітко, Т.М. Ситенко, І.П. Тягульський, 1972—1977 рр). Розроблено методіку дослідження мілких центрів, яка базується на термостимульованому звільненні заряду в широкому діапазоні температур від 4,2 до 350К (Т.М. Ситенко, В.І. Зименко, В.С. Лисенко).

Теоретичні та експериментальні дослідження фотоелектричних явищ у напівпровідниках підсумовано в монографії [8].

Значну кількість робіт школи О.В. Снітка присвячено комплексному вивченню основної проблеми фізики поверхні напівпровідників — з'ясуванню природи поверхневих електронних центрів. Методом розв'язання вказаної проблеми послужило дослідження впливу екстремально сильних активних чинників на поверхневі властивості напівпровідників (очистка в надвисокому вакуумі, легування домішками, хімічна обробка травниками, вплив сильних електричних полів тощо). У результаті проведеного структурно-морфологічного аналізу було встановлено кількісну залежність різних поверхневих електронних явищ від фізико-хімічного стану поверхні й

одержано принципові висновки про природу поверхневих електронних центрів.

Співробітники 10-го відділу зробили вагомий внесок у вивчення структури, динаміки, електронного спектра та природи поверхневих електронних станів атомарно-чистої поверхні напівпровідників. Експериментальне дослідження поверхні, спеціально очищеної від шару окису і домішок, проводилося О.В. Снітком разом з групою Б.О. Нестеренка у 1960—1970-х роках.

Так, було експериментально одержано атомарно-чисті поверхні германію, кремнію та арсеніду галію; вивчено кристалічну будову та електронну структуру вільних граней атомарно-чистої поверхні. Досліджено широке коло поверхневих явищ в умовах надвисокого вакууму різними методами: ефекту поля, поглинання й відбивання світла, дифракції повільних електронів, електрофізичними методами тощо. Це дозволило встановити модель атомарно-чистої поверхні, основні характеристики поверхневих електронних станів та їх роль у формуванні механізму поверхневої темної та фотопровідності, ефекту поля, оптичних властивостей поверхні тощо.

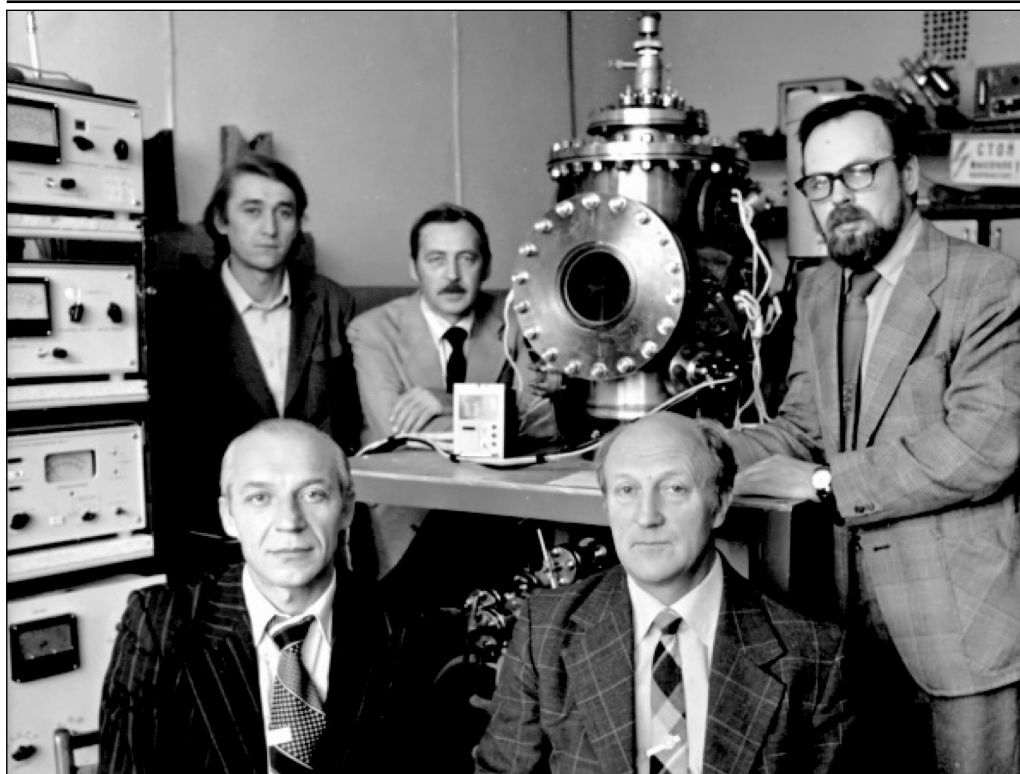
У результаті проведених досліджень було розвинуто теорію поверхневих станів і зроблено однозначний висновок про таммовську природу поверхневих рівнів. З'ясовано мікромеханізм поверхневих електронних явищ, таких як поверхнева дифузія, адсорбція та міграція атомів, і показано їх тісний зв'язок зі структурними та фононними явищами на поверхні. Вперше обґрунтовано наявність локальних рівнів електронів на границі кристал—вакуум і вплив специфіки цієї границі на її термодинамічні характеристики.

У ході досліджень вивчалися фазово-структурні атомні перетворення та динамічні явища, коливання атомів на атомарно-чистій поверхні кремнію і фононний спектр кристалів, термічне розширення поверхневих ґраток. Метод дифракції повільних електронів дав змогу вперше отримати дані про динаміку поверхневої ґратки напівпровідників, зокрема визначити амплітуди коливань поверхневих атомів, анізотропію цих коливань та їх залежність від адсорбції чужерідних атомів. Дослідження відмінності структури й динаміки приповерхневих шарів кристалу від глибинних шарів показали, що періоди кристалічної ґратки на атомарно-чистих поверхнях кремнію відрізняються від періоду кристалічної ґратки в об'ємі кремнію. Було знайдено залежність амплітуди теплових коливань атомів від відстані до поверхні (Б.А. Нестеренко, О.В. Снітко, А.Д. Бородкін, В.А. Зражевський, В.Т. Розумнюк, 1972—1980 pp.).

Одержані в цій галузі результати були пізніше оформлені в двох монографіях [9, 10], одна з яких вийшла російською, друга — англійською мовою. Результати досліджень фазових переходів на поверхнях напівпровідників, проведених Б.О. Нестеренком зі співробітниками, підсумовано в монографії [11].

Крім атомарно-чистої поверхні напівпровідників, у відділі вивчалися властивості «реальної» поверхні — окисленої або легованої домішками металів, які вводяться з розчинів (травників). Одержані результати показали суттєвий вплив поверхневих домішок на електроніку поверхні напівпровідників.

У 1962—1971 роках О.В. Снітко разом з групою В.Є. Примаченка дослідив фізичні властивості реальної поверхні



О.В. Снітко з групою Б.О. Нестеренка

напівпровідникових структур, які використовуються в мікроелектроніці (германію та кремнію). Було показано, що легування поверхні металами надає можливість контрольованого створення поверхневих електронних станів, що в свою чергу дозволяє наперед визначати параметри, тобто керувати властивостями поверхні напівпровідників. Ідея і метод такого управління властивостями поверхні напівпровідників належать О.В. Снітку. У цьому напрямку ним разом з В.Є. Примаченком, В.В. Міленіним, Є.П. Мацасом та С.І. Кириловою був виконаний великий цикл робіт; їх результати підсумовано в монографії [12].

У даному циклі досліджень з використанням широкого комплексу експе-

риментальних засобів вивчалися електрофізичні, фотоелектричні та структурні властивості легованої металами поверхні напівпровідників. Вперше було розроблено метод, встановлено фізичні механізми та основні закономірності поверхневого легування. Знайдено способи зміни у широких межах концентрації поверхневих центрів захоплення носіїв току і центрів рекомбінації. Запропоновано нові методи хімічного та електрохімічного травлення поверхні, які дають можливість одержати геометрично досконалі поверхні кристалів германію, кремнію, JnSb та CdS; розроблено метод електрополірування поверхні з метою отримання високоякісної поверхні кристалів з низькою густиною електронних станів



О.В. Снітко з групою В.Є. Примаченка

(О.В.Снітко, Є.П. Мацас, В.Є. Примаченко). На основі таких кристалів пізніше було створено МДН-прилади, фотоприймачі, високоякісні лазерні екрани для напівпровідникового телебачення. Важливість цих робіт школи О.В. Снітка відзначили такі відомі вчені в галузі фізики поверхні, як В.Л. Бонч-Бруєвич та В.М. Сандомирський (у своїй оглядовій статті, присвяченій 70-річчю з дня народження професора Ф.Ф. Волькенштейна).

У ході досліджень було виявлено, що легування поверхні германію й кремнію домішкою золота з травників на два-чотири порядки збільшує фоточутливість в інфрачервоній (ІЧ) частині спектра. Поверхнева ІЧ фотопро-

відність збільшується при зменшенні температури і частоти модуляції випромінювання та при збільшенні концентрації золота в травнику. Вивчено вплив постійного зовнішнього електричного поля на ІЧ фотопровідність у стаціонарному й нестаціонарному випадках. На основі аналізу кінетики поверхневої ІЧ фотопровідності запропоновано метод визначення перерізів захоплення фотонів при домішковому поглинанні. Обговорено механізм ІЧ фотопровідності, зроблено висновок про монополярність досліджуваної поверхневої фотопровідності кремнію.

Виявлено ефект істотного зростання («спалаху») ІЧ фотопровідності на легованій мікродомішками металів



О.В. Снітко та Ю.А. Пасічник

поверхні кремнію в режимі нерівноважного виснаження. Запропоновано пояснення механізму цього явища, що виникає внаслідок певних змін поверхневих електронних станів. При взаємодії ГЧ випромінювання з мікрозернами металу на поверхні напівпровідника збуджуються поверхневі плазмові поляритони; додавання їх амплітуд до напруги полів біля мікрозерен і шорсткостей викликає збільшення генерації фотонів у зону провідності, що й пояснює аномально великі перерізи захоплення фотонів.

На основі досліджень явища ГЧ фотопровідності було запропоновано новий тип фотоопору і створено елемент довгочасової фотопам'яті з керованим

часом запам'ятовування (О.В. Снітко, Ю.А. Пасічник, 1965—1966).

Одночасно з вивченням легованої металами поверхні напівпровідників у відділі досліджувались властивості реальної поверхні з урахуванням мікрозерен та інших природних відхилень від ідеально гладкої поверхні.

Зокрема, було досліджено вплив геометричної гетерогенності (шорсткості) поверхні на ефект поля в германії та кремнії. Встановлено, що наявність мікрорельєфу поверхні напівпровідників приводить до суттєвого зменшення рухливості ефекта поля, що може бути інтерпретовано як виникнення великої концентрації поверхневих рівнів (О.В. Снітко, О.С. Фролов, 1965—1970 рр.).

Через деякий час було розвинуто загальний метод розрахунку поверхневої електропровідності та поверхневої ємності, який дав змогу врахувати вплив неоднорідностей поверхневого потенціалу, зумовлених наявністю поверхневого рельєфу, вбудованого в діелектрик заряду та флуктуацій об'ємного рівня легування (А.В. Саченко, О.В. Снітко, А.Й. Шкрєбтій, 1981 р).

Цікавий напрямок розвивався О.В. Снітком разом з А.І. Климовською — експериментальне вивчення впливу поверхні на низку класичних розмірних ефектів у напівпровідниках. Зокрема, було досліджено: ефект розмірного магнетоопору на гарячих електронах в германії та кремнії; розмірне перезаселення долин в кремнії в

сильних електричних полях; довжину і поверхневу швидкість міждолинної релаксації; розмірну нестійкість, що викликається перезарядженням поверхневих центрів, та ін. Дослідним шляхом було виявлено нові кінетичні явища, що виникають при порівнянності розмірів образців з дифузійними довжинами. Завдяки цим дослідженням було створено новий тип датчиків магнітного поля і температури (А.І. Климовська, Є.Г. Гуле, Н.А. Прима, О.В. Снітко, 1967—1990 рр.).

Водночас у відділі розвивалася теорія розмірних електронних явищ у напівпровідниках (Н.А. Прима, А.В. Саченко, А.Й. Шкрєбтій) і провадилося зіставлення експериментальних результатів з теоретичними. Важливий



О.В. Снітко з групою А.І. Климовської

цикл робіт присвячено теоретичному вивченню впливу розмірності та поверхні на процеси релаксації та розсіювання електронів (дірок). Було досліджено анізотропію електропровідності та магнітопровідності тонких напівпровідникових плівок, товщина яких менша за дебаївську довжину екранування, в гріючих електричних полях. Встановлено, що розігрів вільних електронів може приводити до реалізації вольт-амперної характеристики з від'ємною диференціальною провідністю (*N*-типу) (З.С. Грибніков, А.В. Саченко, 1966—1974 рр.). Теоретично проаналізовано вплив поверхні на релаксацію кінетичних розмірних явищ; уперше вивчено механізми релаксації по енергії та міждолинної релаксації електронів; отримано вирази для ефективної швидкості міждолинної релаксації та ефективної швидкості поверхневого охолодження в напівпровідниках. Показано, зокрема, що найбільші значення ефективних швидкостей міждолинної релаксації та поверхневого охолодження реалізуються при виснажуючих вигинах зон на поверхні напівпровідників; у той же час при наявності збагачуючих та інверсійних вигинів зон ці значення зменшуються (А.В. Саченко, 1977 р.).

Перспективний науковий напрямок розвивався О.В. Снітком разом з групою, яку очолював В.А. Тягай — експериментальне й теоретичне вивчення електрофізичних та електрохімічних явищ на поверхні напівпровідників, а також на межі розділу напівпровідників з іншими середовищами.

Було досліджено взаємозв'язок електрофізичних і хімічних властивостей контакту напівпровідник—електроліт, вивчено закономірності електровідбивання світла на контакті,

виявлено ефект екситонної інтерференції світла в області приповерхневого бар'єра. На прикладі низки напівпровідників (германій, кремній, CdS) встановлено істотну перебудову зонної структури в шарі приповерхневого об'ємного заряду; побудовано теорію досліджуваних явищ (О.В. Снітко, В.А. Тягай, 1969—1976 рр.).

Також було досліджено електрохімічні явища на межі розділу напівпровідник — розплав, такі як корозія кремнію, окисно-відновлювані процеси на кремнії, анодне розчинення кремнію в алюмохлоридних розплавах. Було показано, що перехід до межі розділу напівпровідник—розплав дозволяє істотно підняти верхню межу температур, тобто істотно підвищити швидкість іонних процесів і, як наслідок, суттєво розширити коло можливих електрохімічних реакцій, перспективних для технології напівпровідників (В.А. Тягай, І.А. Степанова, Ю.М. Ширшов, 1977—1981 рр.).

На поверхні кремнію та двоокису кремнію вивчалась імпульсна адсорбція молекул газів; при цьому особлива увага приділялась аналізу проблем селективності та старіння. Перша з них була вирішена використанням сорбентів та мембран, які встановлюються перед напівпровідниковою поверхнею. Проблему ж старіння було розв'язано вибором імпульсного режиму роботи сенсора у такий спосіб, щоб основну частину часу поверхня напівпровідника знаходилася в добре контрольованих умовах (наприклад в інертному газі) і лише на короткий час приводилася в контакт з молекулами газу. У результаті цих досліджень було створено високочутливі зразки газових датчиків з визначеною селективністю (В.А. Тягай, Ю.М. Ширшов, В.В. Омельчук, 1977—1982 рр.).

Добре відомий цикл робіт, виконаний під керівництвом В.А. Тягая та О.В. Снітка і присвячений дослідженню електромодуляційними методами поглинання та відбивання світла в напівпровідниках.

У ході теоретичних та експериментальних досліджень електрооптичних явищ у приповерхневій області було встановлено механізм електровідбивання та електропоглинання світла в напівпровідниках, визначено ряд параметрів поверхні й з'ясовано структуру дозволених зон (В.А. Тягай, А.М. Євстигнєєв, А.М. Красико). На прикладі ряду напівпровідників (германій, кремній, сульфід кадмію) отримано суттєву перебудову зонної структури в шарі приповерхневого об'ємного заряду (О.В. Снітко, В.А. Тягай). На монокристалах кремнію виявлено лінійний електрооптичний ефект, зумовлений асиметрією квантування й фототунелювання електронів та дірок. Розвиток електрооптичного методу у застосуванні до кристалів $A_{II}B_{VI}$ (типу CdS) дозволив кількісно вивчити ефект Франца—Келдиша і зробити висновки щодо поверхневих властивостей цих кристалів.

Отримані результати дозволили зробити висновок про те, що екситонні ефекти як у непрямозонних (германій, кремній), так і в прямозонних напівпровідниках (група $A_{II}B_{VI}$) проявляються як в електропоглинанні, так і в електровідбиванні не тільки при низьких, але й при високих (аж до кімнатних) температурах. Цей висновок мав принципове значення для встановлення механізму фотоелектричних процесів у напівпровідниках. Пізніше був виявлений новий тип осциляцій електровідбивання, пов'язаний із польовою дисоціацією екситонів.

Крім того, було вивчено закономірності електровідбивання контакту напівпровідник—електроліт і виявлено ефект екситонної інтерференції світла в області приповерхневого бар'єру. Розглянуто вплив поверхні на екситонну люмінесценцію. Запропоновано феноменологічний підхід, який дав змогу врахувати наявність і взаємодію двох підсистем: електронно-діркової і екситонної, а також провести класифікацію граничних випадків, коли можливе розділення означених підсистем. Це випадок низьких рівнів ін'єкції, коли при аналізі електронно-діркової підсистеми можна знехтувати наявністю екситонів; випадок проміжного рівня збудження, коли перенос енергії збудження відбувається по електронно-дірковому каналу, а її релаксація — по екситонному каналу; і випадок високих рівнів ін'єкції, коли і переніс, і релаксація енергії збудження відбуваються по екситонному каналу (А.В. Саченко, В.А. Тягай, О.Г. Кундзич, 1978 р.).

Згадані роботи в галузі модуляційної спектроскопії поверхні напівпровідників провадилися у відділі № 10 наприкінці 1960-х та у 1970-ті роки вперше в СРСР. Результати цього циклу досліджень узагальнено в монографії [13], яка отримала високу оцінку вітчизняних та зарубіжних фахівців; її автори були нагороджені в 1983 році премією ім. К.Д.Синельникова АН УРСР.

Також уперше в СРСР під керівництвом В.А. Тягая у відділі були розпочаті роботи з лазерної голографічної електрохімії напівпровідників (1972). Проведено всебічне дослідження фізичних та фотоелектрохімічних властивостей реакцій на межі поділу напівпровідник—електроліт (зокрема процесу травлення на поверхні сульфід-

ду кадмію). Спостереження проводилися з високою просторовою роздільною здатністю, що дало змогу здійснити голографічну реєстрацію інформації. Була збудована теорія голографічного травлення поверхні напівпровідників, записані голограми на поверхні монокристалів, тонких плівок (таких як CdS, CdSe, GeO), ферроелектричних гранатів тощо. З їх допомогою створені періодичні поверхові ґратки — суперструктури, такі як фокусуюча дифракційна ґратка, квадратна двовимірна ґратка, гексагональні ґратки та інші голографічні оптичні елементи. Продемонстровано можливість запису дифракційних ґраток з просторовою частотою 6170 мм^{-1} (при граничній теоретично можливій частоті інтерференційної картини 6240 мм^{-1}). Встановлено значний вплив рельєфної дифракційної ґратки на процеси генерації світла напівпровідниковими кристалами CdS і запропоновано модель реалізації такого впливу. Показано можливість використання поверхових дифракційних ґраток для створення розподіленого зворотнього зв'язку в хвилеводному лазері, побудованому на основі кристалу CdS (О.В. Снітко, В.А. Тягай, В.А. Стерлігов, Г.Я. Колбасов, 1974—1977 рр.).

Досліджено процеси підсилення світла в активній внаслідок оптичного накачування зоні напівпровідникового кристалу; вперше безпосередньо виміряно підсилення світла власної фотолюмінесценції напівпровідника. Проведено вивчення процесів дзеркального відбивання світла від активної поверхні напівпровідників («активне дзеркало»), що дозволило створити модель активної поверхні напівпровідникового кристалу при оптичній одnofотонній накачці, а також зрозуміти можливості практичного застосування

цих процесів (В.А. Тягай, В.А. Стерлігов, 1976—1980 рр.). Вперше проведено дослідження процесів підсилення та лазерної генерації світла голчатими напівпровідниковими кристалами CdS (В.А. Тягай, В.А. Стерлігов, М.І. Витрихівський, 1977—1981 рр.).

До електрохімічного напрямку робіт відділу № 10 примикає також вивчення анодного окиснення карбіду кремнію, що провадилося з метою розробки низькотемпературного методу нанесення діелектрика. Вперше було виявлено й досліджено світіння поверхні карбіду кремнію й антимоніду індію при анодному окисненні в електроліті, визначено його спектральний склад. Показано, що світіння спричинюється електролюмінесценцією анодного окислу напівпровідника. Запропоновано модель механізму анодного окиснення; створено зонну модель системи електроліт—діелектрик—напівпровідник і на її основі пояснено особливості електролюмінесценції в процесі анодного окиснення SiC. Пояснено особливості електролюмінесценції системи електроліт—SiO_x—карбід кремнію різних політипів. Встановлено вплив електроліту при анодному окисненні на властивості й енергетичне положення рівнів в анодній окисній плівці карбіду кремнію (О.В. Снітко, О.М. Гецько, Ю.А. Пасічник, 1977 р.).

Ще один важливий напрямок робіт відділу — застосування методів інфрачервоної спектроскопії до вивчення властивостей реальної поверхні напівпровідників. Ці роботи були започатковані О.В. Снітком у 1970-ті роки і проводилися під його керівництвом. Спершу було поставлене завдання: дослідити взаємодію ІЧ випромінювання з поверхнею напівпровідників із просторовою неоднорідністю діелектрич-

ної проникності, створюваною різними обробками (термічне й анодне окиснення, травлення, полірування, опромінення тощо).

У ході досліджень було детально вивчено вплив поверхні на інфрачервону фотопровідність та провідність. Досліджено спектри відбиття, люмінесценції й порушеного повного внутрішнього відбивання (ППВВ) у тонких шарах напівпровідників, у двошарових і тришарових системах діелектрик—напівпровідник на основі карбїду кремнію, кремнію та інших напівпровідників. Уперше виявлено і вивчено поверхневі поляритони (ПП) різних типів: звичайні та аномальні. Розроблено методи спектроскопії поверхневих квазічастинок (граничних і хвилеводних поляритонів) з автоматичною реєстрацією спектрів на ЕОМ.

У карбїді кремнію було експериментально виявлено дисперсію поверхневих поляритонів, вивчено поверхневі плазмон-фононні поляритони 6H, 15R, 3C політипів карбїду кремнію і розраховано дисперсійні залежності цих поляритонів при трьох орієнтаціях оптичної осі гексагонального карбїду кремнію щодо поверхні й хвильового вектора. Показано, що експериментальні дисперсійні залежності добре узгоджуються з теоретичними при врахуванні анізотропії ефективної маси електронів й однорідному легуванні приповерхневої області.

Досліджено вплив обробки поверхні та діелектричного покриття на властивості поляритонів. Доведено, що поверхневі обробки істотно змінюють частоту ПП і можуть в 3-4 рази розширювати спектри ППВВ ПП. Вивчення впливу тонких шарів окисла на дисперсію й спектри ППВВ вказало на можливість керувати частотою, загасанням

та просторовою структурою поля поверхневих поляритонів (О.В. Снітко, Ю.А. Пасічник, Є.Ф. Венгер, О.М. Гецько, 1973—1977 pp.).

Трохи пізніше у відділі вивчалось поширення поверхневих електромагнітних хвиль у тришаровій системі із просторовою неоднорідністю діелектричної проникності в третьому шарі. Було з'ясовано вплив параметрів другого шару на просторову структуру полів і дисперсію хвилевидних мод системи. Отримано розв'язок хвильового рівняння для даної системи; знайдено умови прояву граничних хвиль із максимумом амплітуди поля на межі другого й третього середовищ. Показано, що вивчення граничних хвиль відкриває додаткові можливості дослідження поверхневих властивостей напівпровідників.

При дослідженні системи: плівка двоокису кремнію — карбїд кремнію встановлено, що за певних умов у цій системі можуть збуджуватися ПП, які характеризуються випромінюванням енергії у підкладку системи. Визначено області існування й граничні частоти випромінювальних ПП, вивчено їх дисперсію й просторову структуру поля. (О.В. Снітко, Е.Ф. Венгер, С.В. Стрижевський, Ю.А. Пасічник, 1977—1980 pp.).

Наукові результати, отримані у десятому відділі Інституту напівпровідників в 1960—1970-ті роки, узагальнено в колективних монографіях [14, 15], виданих під редакцією О.В.Снітка. Зокрема, результати досліджень поверхневих поляритонів детально описано у главі 8 книги [14]. Вчені, які проводили ці роботи, отримали низку авторських свідоцтв і патентів.

У характеристиці наукової та науково-організаційної діяльності директора ІН АН УРСР О.В. Снітка від

03.06.1977 р. зазначено: «в останні роки у відділі О.В. Снітка на базі сучасних методів дифракції повільних електронів, електрооптичних та розмірних ефектів були проведені фундаментальні дослідження мікромеханізму електронних явищ на поверхні напівпровідників, що дозволило цьому відділу зайняти провідне місце у згаданих питаннях» [1, арк.79].

Крім згаданих напрямків досліджень, у відділі № 10 починаючи з 1976 р. провадилися роботи із синтезу різних напівпровідникових сполук (М.І.Витрихівський). У 1970—1980-ті роки було розроблено фізико-хімічні основи синтезу і вперше синтезовано чотирикомпонентні сполуки типу $A_{II}B_{VI} - C_{II}D_{VI}$, а також створено нові напівмагнітні напівпровідники. У наступний період було запропоновано нові способи створення структур молекулярної електроніки на основі плівок Ленгмюр—Блоджетт (Б.О. Нестеренко, Ю.М. Ширшов, 1985—1993 рр.).

У 1980—1990-ті роки у відділі фізики поверхні напівпровідників продовжувалися традиційні для тематики школи О.В. Снітка дослідження приповерхневого шару та реальної поверхні напівпровідників. Значна увага приділялася дослідженню електрофізичних властивостей полярних напівпровідникових матеріалів, монокристалів, діелектричних і напівпровідникових плівок, дво- і тришарових структур. Водночас із розширенням тематики відділу до кола питань, що розробляються, увійшла теорія фотоперетворення у різних напівпровідникових структурах.

Так, розроблено теорію фотоперетворення в МДН-структурах з тунельно тонким діелектриком, отримано критерії справедливості діодної та дифузійної теорії струмопроходження

в даному випадку. Проаналізовано можливості збільшення коефіцієнту корисної дії (к.к.д.) сонячних елементів на основі МДН-структур з тунельним діелектриком, зокрема роглянуто вплив висоти поверхневого бар'єру та товщини шару діелектрика на величину к.к.д. (А.В. Саченко, О.В. Снітко, І.В. Крупнова, 1980—1982 рр.).

Теоретично змодельовано ефективність фотоперетворення в поверхнево-бар'єрних структурах на основі аморфного гідрогенізованого кремнію, виходячи з дифузійної теорії випрямлення. Показано, що достатньо великий коефіцієнт фотоперетворення в даному випадку може бути досягнутий лише за умови порушення наближення релаксаційного напівпровідника, тобто за умови, коли час максвелівської релаксації стає меншим за рекомбінаційний час (А.В. Саченко, 1984—1985 рр.).

Теоретично та експериментально досліджено закономірності формування фотовідгуку в МДН-структурах з тунельно прозорим діелектриком. Встановлено, що характеристичними часами релаксації в них є час перезарядки ємності ОПЗ напівпровідника або час прольоту неосновних носіїв заряду через ОПЗ за умови, коли ємність діелектрика значно більша за ємність напівпровідника (А.Я. Вуль, С.В. Козирев, А.В. Саченко, 1983—1985 рр.).

Запропоновано новий підхід до розрахунку впливу контактної сітки на послідовний опір та ефективність фотоперетворення кремнієвих сонячних елементів. Зокрема показано, що величина послідовного опору сонячних елементів контролюється ефективною довжиною збирання генерованих світлом електронно-діркових пар в сильно легovanому приповерхневому шарі й визначається рівнем освітленості та

параметрами цього шару (А.В. Саченко, А.Й. Шкретій, 1985 р.)

З метою вивчення властивостей поверхневих поляритонів різних типів у 10-му відділі було виконано низку важливих експериментальних і теоретичних робіт. Зокрема, досліджено імпульсну адсорбцію молекул на поверхні германію і встановлено, що високочастотна дисперсійна гілка змішаних плазмон-фононних ПП арсеніду галію, що має плазмовий характер, локалізована ближче до поверхні та є більш чутливою до структури і складу приповерхневих шарів та рельєфу поверхні матеріалу. На шорсткій поверхні відбувається розщеплення плазмон-фононних ПП на дві гілки: більш глибокий низькочастотний мінімум пов'язаний із ПП межі порушений шар—повітря, а неглибокий високочастотний мінімум — із межею підкладка—порушений шар напівпровідника. Розвиток рельєфу поверхні приводить до довгохвильового зсуву головного й слабкого короткохвильового зрушення додаткового мінімумів неповного внутрішнього відбивання, обумовлених збільшенням ефективної діелектричної проникності навколишнього середовища. Передбачено немотонну залежність граничної частоти ПП від загасання плазмонів у шорсткому шарі (О.В. Снітко, Є.Ф. Венгер., М.Л. Дмитрук, 1988 р.).

Досліджено вплив іонної імплантації на фізичні властивості полярних напівпровідників, отримано вираз для відносного коефіцієнта ППВВ і дисперсійні рівняння поверхневих та хвилеводних поляритонів у тришаровій системі, проведено моделювання поведінки дисперсії й загасання ПП в арсеніді галію й карбіді кремнію залежно від режимів імплантації. По-

казано, що збільшення енергії іонів легуючої домішки й дози імплантації приводить до сильного зсуву спектрів ППВВ і дисперсії плазмон-фононних ПП в область високих частот; у той же час ріст загасання фононів і плазмонів обумовлює низькочастотний зсув спектрів ППВВ і дисперсії ПП. Встановлено, що іонна імплантація змінює силу осцилятора коливань ґратки через деструкцію приповерхневої області кристалу на глибину, яка значно перевищує пробіг іонів (О.В. Снітко, Є.Ф. Венгер, М.Л. Дмитрук, Ю.А. Пасічник, 1988 р.).

Теоретично й експериментально вивчено спектри ППВВ, дисперсію та загасання ПП дельта-легованих шарів арсеніду галію. Показано, що дельта-легування зміщує спектри ППВВ й дисперсію ПП в область високих частот і значно зменшує загасання плазмонів. Установлено зростання рухливості електронів при збільшенні їх поверхневої концентрації, що зумовлено ослабленням перекриття двовимірних підзон внаслідок збільшення міжшарових проміжків (Є.Ф. Венгер., М.Л. Дмитрук, 1989 р.).

Теоретично та експериментально досліджено поверхневі фононні та плазмон-фононні поляритони гексагональних монокристалів ZnO при трьох ортогональних орієнтаціях осі С відносно напрямку поширення ПП. Показано, що поляризація анізотропних ПП оксиду цинку має змішаний характер ЕН-типу, і лише при ортогональних орієнтаціях хвильового вектора ПП відносно оптичної осі С спостерігаються ПП Н-типу. Вперше теоретично визначено області існування поверхневих фононних та плазмон-фононних поляритонів 2-го типу в монокристалах ZnO при орієнтації $K||C$,

ху||С та експериментально отримано їх спектри. Експериментально встановлено, що затухання фононної та плазмової підсистем оксиду цинку дозволяє зареєструвати поверхневі фононні та плазмон-фононні поляритони в околі «точки зупинки», яка в реальних випадках не є особливою точкою. Разом з тим частота поперечного оптичного фонуна при ЕС для ZnO може бути «точкою зупинки» лише у гармонічному наближенні. На даній частоті спостерігається спектр ППВВ ПП змішаного типу, коли генеруються одночасно ПП 1-го і 2-го типів (Є.Ф. Венгер, О.В. Мельничук, Л.Ю. Мельничук, Ю.А. Пасічник, 1994—1997 рр.).

Досліджено коефіцієнти ППВВ s- і p- поляризованого світла двошарової системи діелектрик—напівпровідник у випадку збудження хвилеводних поляритонів (ХП). На основі кількісного аналізу експериментальних і розрахункових спектрів визначено області існування, умови реалізації і вплив поглинання в плівці на властивості ХП E- і H-типів, які збуджуються в ІЧ області й зумовлені часовою дисперсією діелектричної проникності тільки підкладки або плівки і підкладки одночасно. Експериментально виявлено ХП E- і H-типів у двошаровій системі: термічний окисел—карбід кремнію. Показано, що взаємодія електромагнітного випромінювання з оптичними фонами системи змінює просторову структуру поля, області існування й дисперсійні залежності ХП (Є.Ф. Венгер, 1989 р.).

Виявлено й вивчено властивості фононних і плазмон-фононних ПП в шпінелі $MgAl_2O_4$, в одноосних кристалах ZnP_2 , CdP_2 , $ZnSiP_2$ при різних орієнтаціях. Установлено частотні області існування реальних і віртуальних

ПП залежно від напрямку їх поширення щодо оптичної осі кристала. Вперше досліджено сингулярні поверхневі поляритони (СПП) в $ZnSiP_2$. Показано можливість застосування методу ППВВ для виявлення ІЧ коливань ґратки з малою силою осцилятора. Розраховано дисперсійні залежності СПП, показано вплив частоти плазмонів на частотні інтервали та дисперсійні залежності СПП (Є.Ф. Венгер, Ю.А. Пасічник, К.В. Шпортко, 1987—1998 рр.).

Результати згаданих досліджень підсумовано у вигляді монографії [16]. На основі цих робіт у відділі № 10 було розроблено, запатентовано і захищено авторськими свідоцтвами на винаходи низку експериментальних методик, а саме: способи визначення параметрів порушеного приповерхового шару полярних кристалів; способи виміру концентрації носіїв заряду в приповерхневій області напівпровідників; спосіб термообробки монокристалів карбиду кремнію; спосіб модуляції електромагнітного випромінювання та пристрій для його здійснення; спосіб визначення концентрації і рухливості носіїв зарядів у полярних напівпровідникових матеріалах; спосіб визначення напрямку орієнтації оптичної осі оптично-анізотропних полярних напівпровідників; спосіб визначення товщини й діелектричної проникності діелектричних і напівпровідникових плівок та ін.

Очолюючи з 1970 року Інститут напівпровідників, О.В. Снітко уважно стежив за роботою всіх підрозділів інституту. Він докладав багато зусиль до прикладних застосувань результатів наукових досліджень, які виконувалися в інституті. Зокрема, з його ініціативи в Інституті напівпровідників у 1975 році було створено Спеціальне



О.В.Снітко на вченій раді Інституту напівпровідників (1970-ті рр.)

конструкторсько-технологічне бюро (СКТБ) з дослідним виробництвом, де розроблялися і випускалися невеличкими партіями унікальні напівпровідникові прилади. Так, у 1975—1977 роках в СКТБ інституту був налагоджений малосерійний випуск криогенних термометрів з високою чутливістю і стабільністю, які могли працювати в сильних магнітних полях.

Зусиллями О.В. Снітка зміцнились зв'язки Інституту напівпровідників з промисловістю, наукові розробки широко впроваджувались у виробництво. Значно покращилось забезпечення лабораторій експериментальним обладнанням; було закінчено проектування технологічного корпусу інституту.

Інститут напівпровідників одним із перших науково-дослідних установ України організував міжвідомчі та галузеві лабораторії, які виконували роботи для потреб промислових підприємств і використовували виробничу базу цих підприємств для впроваджен-

ня наукових розробок. Перша міжвідомча лабораторія була створена у 1970 році спільно з київським заводом «Точелектроприлад»; у 1977 році в інституті працювали вже три таких лабораторії. Усього під керівництвом О.В.Снітка в Інституті напівпровідників спільно з міністерствами було створено шість галузевих лабораторій для виконання програм з фото- і мікроелектроніки [1, арк.97].

У характеристиці О.В. Снітка, представленій для участі у виборах академіків АН УРСР (1985), підсумовано діяльність Олега В'ячеславовича на посаді директора в такий спосіб: «На протязі останніх 15 років О.В. Снітко є директором Інституту напівпровідників АН УРСР. За цей час здійснено великий комплекс науково-організаційних заходів, які сприяли збільшенню ефективності роботи інституту. ІН АН УРСР перетворився на досить сильний інститут фізико-технічного профілю, виріс кількісно і якісно, зайняв про-

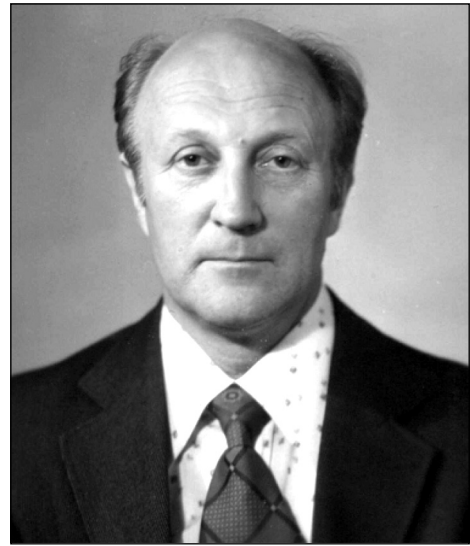
відні позиції у країні по актуальним напрямам фізики напівпровідників. Суттєво посилились зв'язки ІН АН УРСР з промисловістю, зросло число наукових тем, актуальних для народного господарства» [1, арк.88].

У клопотанні від 18.01.1988 р. про присвоєння директору Інституту напівпровідників О.В.Снітку звання «заслужений діяч науки України» зазначено, що протягом 1983—1987 років «економічний ефект від впровадження науково-технічних розробок інституту збільшився вдвічі у порівнянні з попереднім п'ятиріччям і становив 40 млн. крб.; при цьому в секторі “поверхневі та контактні явища в напівпровідниках”, очолюваному О.В. Снітком, одержано економічний ефект у розмірі 8,7 млн. крб.» [1, арк. 97].

У тому ж самому документі вказано, що «успішній діяльності О.В.Снітка на посаді директора інституту значною мірою сприяли такі його особисті якості, як скромність, стриманість і повага до людей» [1, арк. 98].

Відзначальні риси О.В.Снітка як керівника — це людяність, чуйність, уважне ставлення до всіх без винятку співробітників і готовність завжди прийти на допомогу в разі потреби. Перебуваючи на посаді директора, Олег В'ячеславович був доступним не тільки для своїх колег з Інституту напівпровідників, але й для численних вчених з інших установ, які консультувалися з ним з багатьох питань. Будь-хто із співробітників чи гостей, навіть із обслуговуючого персоналу інституту, міг легко потрапити на прийом до директора, поспілкуватися з ним, отримати допомогу або цінну пораду.

Багато уваги О.В.Снітко приділяв вихованню наукової зміни, підвищен-



О.В.Снітко. 1980-ті роки

ню професійного та освітнього рівня своїх учнів. Він регулярно (раз на тиждень) спілкувався з усіма співробітниками свого відділу, при цьому дотримувались принципу поділу на групи. Для кожної групи був призначений свій день тижня (понеділок, вівторок і т.д.); у цей день всі члени групи приходили в кабінет до Олега В'ячеславовича і разом з ним обговорювали результати проведених досліджень, визначали напрямки подальших робіт.

Окрім цих зустрічей, які увійшли в традицію наукової роботи відділу, раз на тиждень провадився загальнофізичний семінар, на якому доповідались наукові роботи й дисертації за тематикою відділу — «фізика поверхні напівпровідників». Участь у семінарі брали співробітники Інституту напівпровідників та інших наукових закладів України, а також гості з усього колишнього Радянського Союзу; тобто семінар 10-го відділу був широко відомим і популярним серед фахівців. З часом він переріс у семінар двох відділів: 10-го і 9-го (приєднався відділ електроні-

ки поверхні напівпровідників під керівництвом В.Г. Литовченка).

Як правило, семінар тривав 2—2,5 години. Основна увага приділялась «науковим оглядам» керівників груп — від 45 хвилин до 1 години: в цих оглядах детально висвітлювалися науковий зміст проблеми, що вирішується в групі, одержані результати та їх значення. Водночас «реферуванню літератури» на семінарі приділялося всього 10—15 хвилин. Відповідальні за підготовку і проведення цієї частини семінару призначалися заздалегідь; в їх обов'язок входило стисле і чітке викладення значного обсягу досить складної інформації з фахових питань.

У рамках школи О.В. Снітка підготували й успішно захистили дисертації 35 кандидатів і 8 докторів наук; першим із учнів Олега В'ячеславовича став доктором Борис Олексієвич Нестеренко у 1977 році [1, арк.101,80]. Більшість учнів О.В. Снітка згодом очолили певні наукові напрямки (Примаченко В.Є., Нестеренко Б.О., Пасічник Ю.А., Венгер Є.Ф., Климовська А.І., Ширшов Ю.М.). Дехто з них очолив відділи, лабораторії та кафедри в інших наукових та учбових закладах. Так, О.С.Фролов став завідувачем лабораторії в НДІ „Мікроприлад”, В.Т. Розумнюк — зав. кафедрою фізики в Білоцерківському сільськогосподарському інституті, А.Й. Шкретій — професором в одному з канадських вузів. Троє учнів О.В. Снітка — Є.Ф. Венгер, Б.О. Нестеренко та В.С. Лисенко — згодом були обрані членами-кореспондентами АН УРСР. Останній з них (В.С. Лисенко) був також учнем В.Г. Литовченка, захистив під його керівництвом кандидатську дисертацію, після чого перейшов працювати у відділення О.В. Снітка.

У вже згаданих клопотанні та характеристичі, датованих 1985 і 1988 р.,

стверджується: «О.В. Снітко сформував визнану у країні школу з фізики поверхні напівпровідників, зробив великий внесок у розвиток і становлення нових наукових напрямів інституту (високотемпературна надпровідність, фізика радіаційних впливів на напівпровідники, фізика надійності виробів електронної техніки)» [1, арк.97].

«Створена О.В. Снітком в ІН АН УРСР наукова школа фахівців з фізики поверхні напівпровідників користується заслуженим авторитетом і входить у число провідних в СРСР. За роки XI п'ятирічки їм тричі присуджувалася Державна премія УРСР в галузі науки і техніки, а впровадження результатів наукових досліджень в електронну промисловість дало економічний ефект понад 5 млн. карбованців» [1, арк.88].

У наш час на офіційному сайті Інституту фізики напівпровідників НАН України можна прочитати такі рядки: «У більшості традиційних для інституту напрямках наукової діяльності склалися та успішно функціонують широко відомі наукові школи під керівництвом провідних вчених, зокрема школа з фізики поверхні і мікроелектроніки; засновники — академік АН УРСР професор О.В. Снітко, доктор фізико-математичних наук професор В.І. Ляшенко, керівник — член-кореспондент НАН України професор В.Г. Литовченко» [17].

Отже, наукова школа О.В.Снітко загальноновизнана; її результати й досягнення добре відомі фахівцям. Нині представники цієї школи успішно продовжують дослідження в галузі фізики поверхні напівпровідників. Традиційну тематику школи О.В. Снітка розвивають сьогодні його учні: Є.Ф. Венгер, В.С. Лисенко, А.В. Саченко, А.І. Климовська, В.А. Стерлігов.

Як і раніше, вивчаються електрофізичні та оптичні явища на поверхні напівпровідників, а також у шаруватих і низьковимірних системах, таких як діелектрик—напівпровідник, метал—діелектрик—напівпровідник, точкові, ниткоподібні та тонкоплівкові гетероструктури, напівпровідникові та діелектричні плівки. Продовжується вивчення фото- та термостимульованих процесів у тонкошарових багатофазних структурах; процесів генерації, рекомбінації та переносу зарядів у шаруватих структурах з приповерхневими дифузійно-польовими бар'єрами тощо. Разом з тим відбувається значне розширення тематики роботи школи завдяки появі нових напрямків досліджень: це фізика поверхні нанорозмірних напівпровідників (із розмірами ≤ 100 нм) та серед-

овищ із нановключеннями; вакуумна наноелектроніка; молекулярна електроніка; вивчення квантово-розмірних наноструктур, таких як квантові надгратки з різними ширинами квантових ям та бар'єрів; та ін. [18].

Згадані дослідження зосереджені сьогодні у відділенні фізики поверхні та мікроелектроніки Інституту напівпровідників, до складу якого входять 4 відділи і 32 співробітника (керівник — В.Г. Литовченко).

Завдяки добре продуманій науковій і кадровій політиці, яку проводив О.В. Снітко у свій час, перебуваючи на посадах заступника директора і директора, в Інституті фізики напівпровідників нині сформовано згуртований науковий колектив, який плідно працює, відповідаючи вимогам часу.

1. Особова справа академіка Снітко Олега В'ячеславовича. — Архів Президії НАН України, ф.№ 281.
2. Олег В'ячеславович Снітко.— К.: Академперіодика, 2008. — (Бібліографія вчених України).
3. Олег В'ячеславович Снітко // Вісн. АН України.— 1990.— №.7.— С.97.
4. In memory of Oleg Vyacheslavovich Snitko (to the 80th Anniversary of his birthday) / Naumovets A.G., Brodyn M.S., Machulin V.G., Lytovchenko V.G., Sachenko A.V. // Ukrainian Journal of Physics.— 2008.— Vol. 53, N 3.— P.296—297.
5. Институт полупроводников / Под ред. О.В.Снитко.— К.: Наук. думка, 1985.— 150 с.
6. Электронные явления на поверхности полупроводников / В.И.Ляшенко, Л.В.Ляшенко, В.Г.Литовченко, И.И.Степко, В.И.Стриха. — К.: Наук.думка, 1968.
7. Зуев В.А. Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах / Зуев В.А., Саченко А.В., Толпыго К.Б. — М.: Сов.радио, 1977.— 256 с.
8. Саченко А.В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников / Саченко А.В., Снитко О.В. — Киев: Наук. думка, 1984.— 231 с.
9. Нестеренко Б.А. Физические свойства атомарно-чистой поверхности полупроводников / Нестеренко Б.А., Снитко О.В. — К.: Наук.думка, 1983.— 264 с.
10. Nesterenko B. Physical Properties of Atomically Clean Semiconductor Surface / Nesterenko B., Snitko O. — Moscow: Nauka Publishers, 1988.
11. Нестеренко Б.А. Фазовые переходы на свободных гранях и межфазных границах в полупроводниках / Нестеренко Б.А., Ляпин В.Г.— К.: Наук. думка, 1990.
12. Примаченко В.Е. Физика легированной металлами поверхности полупроводников / Примаченко В.Е., Снитко О.В. — К.: Наук. думка, 1990.
13. Снитко О.В., Электроотражение света в полупроводниках / Снитко О.В., Тягай В.А. — К.: Наук. думка, 1980.— 302 с.
14. Проблемы физики поверхности полупроводников / Снитко О.В., Саченко В.Е., Примаченко В.Е и др.; под ред. О.В.Снитко.— К.: Наук.думка, 1981.— 332 с.
15. Физические основы полупроводниковой электроники / Снитко О.В., Пекар С.И., Васюк Ф.Т. и др.; под ред. О.В.Снитко. — К.: Наук. думка, 1985.

-
16. Спектроскопія залишкових променів / Снітко О.В., Венгер Е.Ф., Мельничук О.В., Пасічник Ю.А.— К.: Наук. думка, 2001.
17. http://web.isp.kiev.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=23&Itemid=13&lang=uk
18. http://web.isp.kiev.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=28&Itemid=63&lang=uk

Одержано 16.02.2011

А.Н. Глебова, А.В. Саченко

**Научная школа О.В. Снитко в Институте физики
полупроводников НАН Украины**

Рассмотрена история создания научной школы О.В. Снитко в области физики поверхности полупроводников. Воссоздан жизненный и творческий путь руководителя школы, характерные черты его научной и организационной работы. Отражены научные результаты, полученные в рамках школы О.В. Снитко.