

20 лютого цього року в Києві перед великою науковою аудиторією виступив з нобелівською лекцією відомий російський фізик академік Жорес Іванович Алфьоров, який разом з американцями Г. Кремером і Д. Кілбі став лауреатом Нобелівської премії з фізики 2000 р. Фізикою напівпровідників і квантовою електронікою вчений займається вже 40 років. Нині він є віце-президентом РАН і очолює Санкт-Петербурзький фізико-технічний інститут ім. А. Ф. Іоффе.

Друкуємо прочитану в Києві нобелівську лекцію Ж. І. Алфьорова з незначними скороченнями.

Ж. АЛФЬОРОВ

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ

У ХХ столітті фізика стала по-справжньому елементом загальної культури людства. Зокрема, значення квантової фізики далеко не обмежується безпосередньо тими практичними результатами, які вона дала для технологічної сфери і техніки, а також для розвитку фізичних досліджень. Квантова фізика у ХХ ст. стала методологією пізнання.

У середині і в другій половині ХХ століття у галузі квантової фізики були зроблені видатні відкриття, які значною мірою вплинули не тільки на науково-технічний прогрес, а й на соціальні структури суспільства. І серед них я б поставив на перше місце відкриття Дж. Бардіном, У. Браттейном і У. Шоклі транзисторів. А поруч поставив би одне з найвидатніших досягнень — формулювання лазерно-мазерного принципу. Відкриття транзистора увінчало лаврами нобелівських лауреатів — американських фізиків. Але ми з гордістю можемо говорити, що тут є і величезний внесок радянської науки.

Я вже кілька разів повторюю у своїх виступах, що не можу забути своєї першої участі у роботі міжнародної наукової конференції в Празі у 1960 р. Її відкривав чудовою розповіддю про історію досліджень у галузі фізики напівпровідників А. Ф. Іоффе. А закривав конференцію один з найвидатніших фізиків сучасності, єдиний двічі нобелівський лауреат в історії фізики Джон Бардін. Другу Нобелівську премію він одержав за теорію надпровідності (Дж. Бардін, Л. Купер, Дж. Шріффер, 1972 р.). Виступаючи тоді, у 1960 р. на конференції, Дж. Бардін підкреслив, що за своєю природою наука інтернаціональна. Це чудово знають учені, але це постійно треба пояснювати суспільству, оскільки суспільство в цілому часто замикається у національних межах і гадає, що наука також національна. «Наука інтернаціональна за своєю природою і такою ж є фізика напівпровідників, — сказав Джон Бардін. — Вона була створена передусім Моттом і Вілсоном в Англії, Вагнером і Шотткі у Німеччині, Іоффе і Френкелем у Радянському Союзі».

Внесок наших фізиків у відкриття транзисторів був, безумовно, величезним. Борис Васильович Курчатов, брат І. В. Курчатова, і В. П. Жузе у 1931 р. опублікували роботу про експериментальне дослідження домішкової і власної провідності у закису міді. Це була перша робота, де формулювалися принципи домішкової і власної провідності у напівпровідниках.

Іоффе і Френкель у 1931 р. опублікували роботу щодо тунельного ефекту, пояснюючи ефект спрямлення тунельними явищами у напівпровідниках. І то була перша робота у цій галузі. Френкель у 1931 р. запропонував екситон, який був відкритий експериментально у 1951 р.

Я часто згадую свою першу зустріч з В.Є.Лашкарьовим, коли він завітав до нашої лабораторії у 1953 р. Вадим Євгенович як фізик сформувався у Фізико-технічному інституті і багато зробив для розвитку фізики напівпровідників в Україні.

Ще одну Нобелівську премію за розробку лазерно-мазерного принципу поділили Ч. Таунс, М. Басов і О. Прохоров. Безумовно, ці два відкриття — транзисторів і лазерно-мазерного принципу — стали основою, корінням, зернами, з яких виросло передусім сучасне дерево інформаційних технологій і багато чого іншого, аж до лазерної зброї.

Сучасні інформаційні технології спричинили не тільки істотні зміни в техніці та різних галузях знань. Я пам'ятаю, як один з видатних американських спеціалістів з мікроелектроніки професор Зі (нині він працює на Тайвані), виступаючи у 1982 р. на Міжнародній конференції з твердотільних приладів у Токіо, у доповіді «Перспективи субмікронної літографії» говорив про те, які зміни спричинили напівпровідникові технології у соціальній структурі суспільства США та й в усьому світі. Саме завдяки розвиткові інформаційних технологій ми ввійшли у постіндустріальне, інформаційне суспільство. У США починаючи з 1955 р. найчисленнішу групу працюючого населення становлять люди, що збирають, обробляють і використовують інформацію. У 1970 р. їх кількість досягла 50 % від усіх працюючих, і ця цифра не змінюється вже протягом понад 30 років. Сталося це завдяки розвиткові мікроелектроніки, інформаційних технологій.

Після присудження мені Нобелівської премії наша преса часто писала, що Алфьоров одержав премію за роботи 30-річної давності, які велися у радянські часи, і таке інше. Справді, роботи, за які мені присуджена Нобелівська премія, виконані наприкінці 60-х — на початку 70-х років. Але Джек Кілбі одержав Нобелівську премію за патент на інтегральну схему 1958 р., а дослідження Герберта Кремера, що стали теоретичною основою цієї роботи, проведені в середині 50-х — на початку 60-х років. Однак нікому не спадає на думку говорити, що у США після цього напівпровідникової науки не було. Вона залишилася і в нас. І я з гордістю можу сказати, що, незважаючи на дуже важкі умови, лабораторія Фізико-технічного інституту продовжує посідати провідне місце у світі у галузі фізики напівпровідників.

А тепер спинюся безпосередньо на тих роботах, які становлять основу «нобелівського циклу». 2000 року Нобелівську премію одержали автори робіт з двох основних напрямів електронної напівпровідникової компонентної бази інформаційних технологій. Джек Кілбі — за винахід інтегральних схем. Я не говоритиму про це багато, оскільки інтегральні кремнієві схеми, кремнієва мікроелектроніка — стовпова дорога розвитку сучасної мікроелектроніки. То був визначний крок. Адже створення транзистора означало появу приладу, енергетично вигіднішого, ніж вакуумні лампи, приладу, який зробив можливою мініатюризацію. Кілбі першим здогадався, що треба принципово інакше розв'язувати цю задачу. Коли ми маємо у кристалі транзисторну структуру на основі *p-n*-переходів, то можемо їх використати як елементи ємності і робоче тіло напівпровідника, створюючи таким чином інтегральні R-C-ланцюги. І те, що здається сьогодні тривіальним, насправді було нетривіальною і непростою ідеєю, коли Кілбі її запропонував.

Звичайно, за цей час мікроелектроніка здолала гігантський шлях розвитку. Перші інтегральні схеми, зроблені Кілбі на основі германію і лише пізніше реалізовані ним на

основі кремнію (колишній співробітник Кілбі Нойс, який помер у 1990 р. і тому не зміг розділити успіх свого колеги, майже відразу запропонував схеми на основі унікальних властивостей двоокису кремнію), мали два транзистори і два R-C-ланцюги, а їхня площа становила кілька квадратних сантиметрів. Сьогоднішні ж інтегральні схеми — це 10 млн. транзисторів на такій самій площі. Протягом тривалого часу щороку подвоювалася кількість компонентів інтегральних схем. Сьогодні цей проміжок часу трохи подовжився: кількість компонентів інтегральних схем подвоюється кожні півтора року.

Другий напрям, за який одержали Нобелівську премію професор Кремер і я, — це дослідження напівпровідникових гетероструктур, насамперед використовуваних у швидкісній та оптоволоконній електроніці. Це зовсім інший напрям фізики напівпровідників, який сформувався на початку 60-х років.

Напівпровідникові гетероструктури виникли на ґрунті вивчення деяких фундаментальних явищ. Йдеться про те, що можна тим чи іншим способом створювати напівпровідникові структури, де за координатою змінюються хімічний склад і всі головні властивості напівпровідника. Ця ідеологія досить стара. Шоклі у 1948 р. у своєму першому транзисторному патенті запропонував використати так званий широкозонний емітер, що давав змогу реалізувати однобічну інжекцію електронів у транзисторі. Інкєкційні властивості такого широкозонного емітера розглядалися Кремером у його роботах наприкінці 50-х років. Він досліджував також структури, де змінюються ширина забороненої зони і хімічний склад напівпровідника, а електрони рухаються під впливом нових сил — сил квазіелектричних полів, що виникають у цьому випадку. Тут можна зовсім по-новому керувати потоками електронів.

На початку 60-х років ми розглянули так званий ефект надінжекції, довівши теоретично, що можна інжектувати у вузькозонний напівпровідник практично необмежену концентрацію електронів і дірок, яка на багато порядків перевищує їхню рівноважну концентрацію в емітері. Цей ефект надінжекції у принципі давав змогу по-новому керувати властивостями багатьох напівпровідникових приладів.

Дуже важливою була пропозиція, сформульована у Фізико-технічному інституті Казариним і мною практично одночасно з Гербертом Кремером у США. Це сталося після появи напівпровідникових лазерів. Я поставив би напівпровідникові лазери як електронну компоненту поруч з транзистором у напівпровідниковій електроніці, оскільки вони потенційно відразу багато що змінили у цій галузі. Можна сказати так: лазер на *p-n*-переході, реалізуючи принципову ідею одержання лазерної дії у напівпровідниках, потребував для практичної роботи глибокого охолодження рідкими газами. Через це не можна було скористатися з потенційних переваг напівпровідникових лазерів.

Одразу ж після появи перших робіт у цій галузі Кремер і ми запропонували подвійну гетероструктуру. Йдеться ось про що: коли ми робимо «сендвіч», в якому вузькозонний напівпровідник розташований між двома широкозонними, то завдяки ефекту надінжекції можна одержувати інверсну заселеність, необхідну для лазерної дії. При цьому не потрібне легування великої концентрації домішок, а вся електронно-діркова плазма міститься у потенціальних бар'єрах у цьому вузькозонному шарі. Згодом я довів, що оскільки, як правило, показник заломлення вузькозонних напівпровідників набагато більший, ніж у широкозонних, то тут реалізується не тільки електронне обмеження потенціальними бар'єрами, а й високоефективний плоский діелектричний світловий хвилевід. Саме ефекти електронного і оптичного обмеження, як нам одразу стало ясно, є вирішальними для поліпшення властивостей і параметрів напівпровідникових лазерів.

Слід сказати, що ідеї ці під час їх народження не викликали особливої протидії. Вчені говорили лише про те, що їх не можна реалізувати, оскільки існують фундаментальні труднощі. Мовляв, періоди ґратки напівпровідника пов'язані певним чином з шириною забороненої зони і одержати структури, зістиковані за параметрами ґратки з позитивними властивостями на межі поділу, практично неможливо. Пам'ятаю, як один з відомих фахівців у галузі фізики напівпровідників і напівпровідникової технології Джекоб Панков у 1964 р. у Парижі, коли я з ним обговорював ці ідеї на конференції з фізики напівпровідників, сказав мені: «Жорес, забудь про них. Це паперовий патент, який ніколи не буде реалізовано».

І треба сказати, що приблизно перші три з половиною — чотири роки були дуже важкими: ми обрали не той шлях. Але від самого початку не викликало сумніву, що два матеріали, котрі ми обрали, — арсенід галію та арсенід алюмінію, — є саме тими компонентами, на основі яких можна будувати ідеальні гетероструктури. Їхні періоди ґратки дуже близькі, вони утворюють безперервний ряд твердих розчинів. Усе як годиться. Але арсенід алюмінію розкладався на повітрі, це нестабільний матеріал. Незважаючи на те, що він був відкритий ще у 1915 р., його властивості ще не вдалося повністю вивчити через складність самого процесу досліджень.

Ми витратили кілька років на дослідження гетероструктур миш'як—галій—фосфор і не одержали позитивних результатів. І от якось Дмитро Миколайович Третьяков, який працював у моїй тоді невеликій групі, зять видатного радянського вченого, чудового спеціаліста з хімії напівпровідників Ніни Олександрівни Горюнової, розповів мені, що в столі одного з її співробітників Саші Борщевського тривалий час лежать дрібні полікристалічні зразки твердих розчинів галій—алюміній—миш'як і з ними нічого не відбувається. Стало очевидним, що твердий розчин галій—алюміній—миш'як стабілізує властивості цієї сполуки і придатний для практичного застосування.

Далі події розвивалися дуже швидко. У 1967 р. ми практично розробили технології вирощування гетероструктур галій—алюміній—миш'як і дуже пишалися, підготувавши свою першу публікацію. Але в цей же час з'явилася праця американців Вудла і Рубрехта. І дослідження ще пришвидшилися.

Як ми часом жартували з Гербертом Кремером, початок 70-х років — це поява світової карти гетероструктур. Але через 15 років ця карта виглядала зовсім інакше. А нині кількість ідеальних гетероструктур зростає нескінченно. Нинішня карта відрізняється від першої, як нинішні географічні карти від Магелланової.

Для нас було очевидним, що найважливіша проблема, яку слід розв'язати, — це створення лазерів, здатних працювати за кімнатних температур. Ми, правда, не знали, що вони набудуть такого широкого застосування, зокрема як «гопочки» у лазерних дисках. Перший напівпровідниковий лазер, який працював за кімнатної температури, мав довжину хвилі 0,78 мікрона, що повністю відповідає довжині хвилі лазерів, використовуваних нині як «голочки». Ми про це тоді не знали, а обрали видиму область довжин хвиль для демонстрації, оскільки треба було показати лазер начальству (тоді теж існувала проблема фінансування досліджень) і для демонстрації видимий лазер привабливіший, ніж інфрачервоний. Ми вже тоді розуміли, що треба неодмінно розвивати технологію напівпровідникових лазерів і що майбутня галузь їх застосування — системи волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Гарні ідеї народжуються майже одночасно. На початку 70-х років на американській фірмі «Корнінг глас» були вперше одержані скло-кварцові волокна з малими оптичними

втратами. Коли з'явився наш перший лазер, що працював за кімнатної температури, я розповів про нього на міжнародній конференції у США. І почалося змагання з американцями: хто перший зробить лазер, здатний працювати у безперервному режимі за кімнатної температури. Нам вдалося обігнати американців усього на місяць. Саме з цього приладу розпочався розвиток волоконно-оптичних систем зв'язку. Нині нашу планету оперізує, по-моєму, близько 100 млн. км волокна, на якому працюють напівпровідникові лазери. Сьогодні це одна з напівпровідникових компонент, яка найбурхливіше розвивається. Річний обсяг продажу лазерних волоконно-оптичних систем зв'язку становить 60 %.

Існує друга важлива галузь застосування напівпровідникових лазерів. Минуло 15 років від дня запуску станції «Мир», а вона мала працювати на орбіті всього 5 років. На жаль, найближчим часом вона припинить своє існування, хоча ми з О. М. Прохоровим та М. Г. Басовим і надіслали листа нашому президентові з проханням зберегти «Мир». Усі 15 років на станції працювали сонячні батареї на основі гетероструктур галій—алюміній—миш'як. Ці батареї ми створили ще у 1969 р. І коли американські колеги у 1972—1973 рр. публікували свої перші статті, у нас технологія одержання сонячних батарей уже була передана на НВО «Квант». І у 1977 р. ці батареї працювали на перших розвідувальних супутниках. Зрозуміло, вони набагато дорожчі за кремнієві, але мають істотно більший к.к.д., а також вищу радіаційну стійкість. Тобто строк їх функціонування у космосі набагато триваліший.

Після одержання безперервного режиму роботи напівпровідникових лазерів стався світовий сплеск інтересу до них. І дослідження у цій галузі почали розвиватися у багатьох лабораторіях світу. У 1969—1970 рр. в СРСР була лише наша лабораторія у Фізтеху, а також лабораторії на «Полюсі» і на «Кванті», куди ми передавали нашу технологію. У США працювала аналогічна лабораторія Мортон—Паніша у фірмі «Белл телефон» і Генрі Крісселя у фірмі «RCI». А у 1971—1972 рр. вже десятки лабораторій у Японії, Великобританії, Франції, Польщі, Бразилії почали досліджувати гетероструктури.

У 1980 р. з'явилася дуже важлива праця Мемура в Японії, а також Лінка із співавторами у Франції. Вони практично одночасно створили хем-транзистор — транзистор із підвищеною електронною рухливістю на основі одиначної гетероструктури. Цей тип транзистора став головним для космічних телекомунікаційних систем, для систем зв'язку із супутниками тощо. А біполярний транзистор на гетероструктурах використовується як один з компонентів мобільного телефонного зв'язку.

Наприкінці 70-х років на основі, як ми їх нині називаємо, класичних гетероструктур, тобто на ґрунті фундаментальних фізичних явищ, були створені прилади практично для всієї напівпровідникової електроніки. І справді, оптоелектроніка — як випромінювальна (лазери, фотодіоди, радіоприймачі, сонячні батареї), так і надшвидкодіюча на хем-транзисторах і біполярних транзисторах — стала основою для розвитку цих галузей.

Наприкінці 1960-х — на початку 1970-х років наші стосунки з «Белл телефон» були рідкісним прикладом відкритого, дружнього змагання двох лабораторій, які належали до двох антагоністичних таборів.

У 1985 р. Халсі намалював дерево гетероструктур, яке я доповнив. Воно демонструвало, звідки вирости гетероструктури (з технологій і з фізики) і які гігантські зміни викликали в усій сучасній мікроелектроніці. Гетероструктури дуже збагатили фізику твердого тіла, фізику напівпровідників. І сталося це насамперед завдяки розвитку багатьма видатними вченими і у нас у країні, і за кордоном концепції подвійної гетероструктури при

зменшенні реальних розмірів вузькозонного напівпровідника, а також внаслідок використання ідеальних гетероструктур. У 1974 р. Дінгл у фірмі «Белл телефон» провів блискучі експерименти, довівши, що у подвійній гетероструктурі, коли товщина середнього активного шару порівнянна з довжиною хвилі електрона в кристалі, виникають нові ефекти і змінюється характер залежності щільності станів від енергії. Щільність станів різко зростає, набуваючи ступінчастого характеру. То був початок досліджень структур із зниженою розмірністю електронного газу. Тут електрони можуть рухатися тільки у площині. Рух у цьому напрямі утруднений, але то звичайний стан для подвійної гетероструктури. Та завдяки мінімальному розмірові, порівнянному з довжиною хвилі електрона, тут виникають уже квантово-розмірні ефекти, квантово-розмірні стани.

Наступний етап — реалізація ідеї подвійної гетероструктури, коли вузькозонний напівпровідник являє собою дріт, оточений вузькозонним матеріалом. Це приводить до повної зміни залежності щільності станів від енергії. І, нарешті, ще один етап — поява квантових точок, коли вузькозонний напівпровідник являє собою кластер з десятків, а часом і сотень атомів. Це, по суті, модель штучного атома, який ми можемо сконструювати у широкозонній напівпровідниковій матриці і вивчати його властивості.

Дослідження квантових «ям» для напівпровідникових лазерів дали змогу дуже швидко одержати надзвичайно високий к.к.д. У 1984—1985 рр. у нашій лабораторії був досягнутий досі, на жаль, неперевершений к.к.д. напівпровідникового лазера — 66 %.

Якщо говорити про дослідження квантоворозмірних явищ у так званих надгратках, що дали змогу зовсім інакше підходити до конструювання приладів, до вивчення багатьох явищ у напівпровідникових кристалах, то тут піонером був і залишається академік Л. В. Келдиш. Розглядаючи у 1962 р. енергетичний спектр кристала у сильних ультразвукових полях на поверхні, він дійшов висновку про виникнення енергетичного спектра, еквівалентного створенню періодичних неоднорідностей у кристалі, які одержали назву надграток. Практична ідея їхньої реалізації належить Ісакі і Цуї (1970 р.). А сьогодні ці компоненти — важливий елемент багатьох чисто фізичних досліджень і практичних застосувань. Надгратки дають змогу керувати енергетичною зоною у кристалі, створюючи оптимальну конструкцію хвилеводу у напівпровідникових лазерах. Досягається найнижча щільність струму у напівпровідникових лазерах.

Дослідження квантових «ям» і надграток дали змогу поліпшити параметри напівпровідникових приладів. Були присуджені дві Нобелівські премії — за 1985 р. Клаусу фон Кліцингу (квантовий холл-ефект) і за 1998 р. — Л. Штормеру, Д. Цуї і Р. Лафліну (дробний квантовий холл-ефект). Ідеться про дослідження властивостей одиничних квантових «ям» у гетероструктурах, що дали можливість відкрити унікальні фізичні явища. Для пояснення дробного квантового холл-ефекту довелося залучити модель дробного заряду для квантової електричної рідини, що «працює» за низьких температур і сильних магнітних полів в одиничних гетероструктурах.

Історію розвитку напівпровідникової лазерної техніки можна розглядати як історію зміни порогової густини струму. Коли з'явилися лазери, вони за кімнатної температури згорали раніше, ніж починали нормально працювати. Класичні гетероструктури дали змогу знизити густину струму на два порядки. Їхня подальша оптимізація забезпечила ще деяке зниження. Внаслідок впливу квантових «ям» і надграток густина струму знизилася ще більш як на порядок. І от з'являється технологія квантових точок — нова надзвичайно цікава галузь напівпровідників. Вона розвивалася завдяки спільним дослідженням нашої лабораторії і лабораторії професора Бімберга у Технічному університеті в Берліні. Сфера застосування напівпровідникових лазерів надзвичайно розширилась. Вони й нині

залишаються найстарішим напівпровідниковим приладом, який весь час перебуває у центрі досліджень фізиків.

Про квантові дроти і квантові точки поки що можна сказати небагато. Це стосується і фундаментальних фізичних явищ, і застосування фізичних приладів, передусім для напівпровідникових лазерів. Все-таки ця галузь фізики і технології напівпровідників істотно молодша за інші, а технологічно набагато складніша.

Років двадцять тому мене запросила у США фірма «Амока». Тоді нафтові компанії організовували у себе дослідні центри і лабораторії з оптоелектроніки, фотоніки, напівпровідникових технологій (було б добре, якби й наші аналогічні компанії цим зайнялися). І фірма «Амока» мала під Чикаго великий центр з оптоелектроніки. Туди мене й запросили виступити з доповіддю. Тоді низькорозмірні структури тільки-но починали досліджувати. Квантові «ями» ще не зробили свого внеску у напівпровідникову і лазерну техніку. А квантові дроти і квантові точки взагалі ще не вивчалися, про них тільки починали думати. Але й сьогодні, коли пройдено великий шлях у розвитку фізики напівпровідників, напівпровідникової технології, я б не змінив жодного слова у висновках щодо практичного застосування напівпровідникової техніки, зроблених 20 років тому. Ось ці висновки: напівпровідникові гетероструктури — це новий вид напівпровідникових матеріалів — дорогих, хімічно і технологічно складних, але найефективніших. Сучасна оптоелектроніка — це передусім застосування гетероструктур. І при цьому лазерна подвійна гетероструктура була і залишається ключовим приладом сучасної оптоелектроніки.

Розвиток високошвидкісної мікроелектроніки пов'язаний передусім з використанням гетероструктур. Останні 20 років це підтвердили. Високотемпературна високошвидкісна силова електроніка — нова галузь застосування гетероструктур. Сьогодні карбід кремнію і гетероструктури, що його використовують, — широкозонні напівпровідники на нітридах — дедалі ширше застосовуються для створення силових напівпровідникових швидкодіючих приладів.

У сонячній енергетиці гетероструктури — найдорожчі фотоелементи, але разом з тим і найдешевші джерела електрики, оскільки в цьому випадку ми можемо ефективно використовувати концентрацію сонячної енергії.

У лекції 20-річної давності я висловив думку, що у XXI ст. гетероструктури в електроніці, як і в живій природі, залишать лише 1 % для гомоструктур. Але віце-президент компанії «Амока» підійшов до мене і зауважив: «Це можна сказати в Чикаго, а в Каліфорнії вам така заява дорого коштуватиме». Гадаю, що в Росії, Україні і Білорусі я можу спокійно говорити про таке майбутнє гетероструктур.



Хліб-сіль — дорогому гостю. Ж. І. Алфьорова вітають на кордоні Київської і Черкаської областей під час його поїздки до с. Хильки, де загинув і похований у братській могилі його брат, який брав участь у Корсунь-Шевченківській операції 1944 року. Автор фото — академік НАН України А. Г. Наумовець.



Вінок на могилу брата. Справа наліво: Ж. І. Алфьоров; академік-секретар Відділення фізики і астрономії НАН України академік НАН України А. Г. Наумовець; генеральний директор концерну <Наука> С.Ю.Ларкін.