

53(048)

## ДОСТИЖЕНИЯ ФИЗИКИ В АЗЕРБАЙДЖАНЕ

*Г. Б. Абдуллаев*

Истоки научной мысли в Азербайджане уходят в далекое прошлое. Исследования показывают, что в период первой государственности на территории Азербайджана Манны в IX—XII веках до нашей эры уманеев, была своя письменность. В северном Азербайджане письменность на основе албанского алфавита была создана в V веке. Впоследствии в Азербайджане была принята арабская письменность. Это дало возможность широкого приобщения к достижениям науки, литературы и культуры того времени. Так, в XI веке в Азербайджане творят Хабиб Тебризи, философ Бахманяр, астроном Фазиль Фариэддин Ширвани, водчий Аджеми и др.

В XIII веке в Азербайджане творит Мухаммед Насиреддин Туси, основоположник сферической тригонометрии, в 1259 году создавший всемирно известную Марагинскую обсерваторию.

Дальнейшее развитие научная мысль в Азербайджане получает в трудах ученых философов и мыслителей, таких, как А. Бакиханов, М. Ф. Ахундов, Г. Зардаби.

В 1919 г. открывается Азербайджанский государственный университет, а затем Политехнический институт.

В 20-х годах под руководством К. Д. Синельникова, И. В. Курчатова, В. П. Жузе, А. Г. Алфимова были начаты работы по электролизу в твердых телах, по магнетизму, по изучению тепловых свойств нефтяных продуктов.

После создания Азербайджанского отделения Закавказского филиала АН СССР (1932 г.) и Азербайджанского филиала АН СССР (1935 г.) были развиты исследования по физическим свойствам нефти, молекулярной физике, спектроскопии, тепловым и электрическим свойствам полупроводников. В этот период академик А. Ф. Иоффе предпринял ряд мер по обеспечению сектора физики АзОЗФАН научным оборудованием и определению направления исследований в республике.

В 1945 г. была организована Академия наук Азербайджанской ССР и Институт физики и математики, создание которых предопределило дальнейшее развитие фундаментальных и прикладных исследований.

Четыре научных направления определяют развитие физических исследований в Азербайджане: физика твердого тела, радиофизика, ядерная физика и физико-технические проблемы энергетики.

Значительный успех достигнут в физике полупроводников, прогресс которой оказывает заметное влияние на развитие в Азербайджане новых нетрадиционных отраслей техники — микроэлектроники, вычислительной техники, космического медицинского, биологического и геофизического приборостроения и т. д.

Одним из первых полупроводниковых материалов, используемых в технике, является селен, физические свойства которого изучались учеными Азербайджана.

Широким фронтом в республике проводятся работы по получению селена, новых бинарных, тройных и более сложных халькогенидов и комплексному изучению их физических свойств.

Глубокие исследования селена позволили установить, что физические процессы, происходящие в селене и приборах на его основе, связаны со структурными особенностями селена, чистотой и спецификой его кристаллизации. Учеными Института физики АН Азерб.ССР было показано, что при учете реальной полимерной структуры размазывания границ зон,

вызванного неупорядоченностью в структуре, а также взаимодействия примесей между собой и атомами основной решетки удается объяснить практически все физические и физико-химические процессы, наблюдаемые в различных модификациях селена.

Среди большого класса материалов, получаемых и исследуемых учеными республики, особое место занимают полупроводниковые соединения с сильно анизотропным типом структуры кристаллической решетки — слоистые ( $\epsilon = \text{GaSe}, \text{GaS}, \text{InSe}, \text{GaTe}$ ) и цепочечные ( $\text{TlSe}, \text{TlS}, \text{InTe}, \text{Tl In Se}_2, \text{Tl Ga Te}_2, \text{Tl In Te}_2$ ) кристаллы группы  $A^3B^6$  и слоистые халькогениды на их основе (соединения группы  $A^3B^3C_2^6$  —  $\text{TlGaS}_2, \text{TlGaSe}_2, \text{TlInS}_2$ ).

Интерес к исследованию физических свойств этих соединений обусловлен особенностями их кристаллического строения.

В решетках таких соединений в пределах каждого слоя преобладает прочная химическая связь ковалентного, ионного или смешанного типа, в то время как между соседними слоями наиболее значительной является слабая ван-дер-ваальсовская связь.

Слоистые полупроводники привлекли наше внимание в связи с поиском двумерных состояний в реальных кристаллах. Наличие слабых межслоевых связей позволяет уподобить слои как изолированные гигантские двумерные квазимолекулы и рассматривать физические свойства кристалла, описывая его симметрией слоя. Это позволяет уподобить кристаллы типично молекулярному, а межслоевую связь рассматривать как некое возмущение, приводящее к расщеплению внутрислоевых состояний (к примеру, фононных) на число компонент, кратных числу слоев в элементарной ячейке (давыдовские дублеты).

Первым слоистым материалом, свойства которого были изучены в республике, явился селенид галлия, элементарная ячейка которого состоит из четырех подслоев атомов, чередующихся в последовательности анион—катион—катион—анион.

Исследования электронного спектра  $\epsilon\text{-GaSe}$  были начаты с измерений эффекта Фарадея в области экситонного поглощения в слабых полях в ориентации  $E \perp C$ . Были определены времена релаксации, соответствующие экситонному уровню, получены значения эффективных  $g$ -факторов, а также значения  $g$ -факторов валентной зоны и зоны проводимости. Изучена (методом «крюков» Рождественского) дисперсия показателя преломления вблизи первой экситонной линии поглощения и установлено, что вблизи этой линии имеет место аномальная дисперсия.

Успехи достигнуты и в исследованиях, связанных с установлением связи структуры слоистых и цепочечных полупроводников с их оптическими и нелинейными свойствами.

В спектрах люминесценции и фотопроводимости  $\epsilon\text{-GaSe}$  обнаружены особенности, связанные с возбужденными состояниями прямых свободных экситонов. Впервые показано, что зарегистрированная при 2К и плотностях оптического возбуждения  $p < 1 \text{ кВт/см}^2$  горячая люминесценция обусловлена рассеянием свободных экситонов на дефектах решетки. Результаты экспериментальных данных об экситонных состояниях слоистых кристаллов группы  $A^3B^6$  анализированы на основе теории анизотропных (в предельном случае «двумерных») экситонов Ванье. Показано, что спектр экситонных состояний при  $K = 0$  полностью описывается «трехмерной» сериальной зависимостью. В кристаллах  $\epsilon\text{-GaSe}$  впервые обнаружено и исследовано расщепление экситонных спектров поглощения и люминесценции, позволившее установить, что дублетный характер экситонных спектров является спектральным проявлением слабого взаимодействия между слоями.

Комплексными теоретическими и экспериментальными исследованиями селенида галлия было показано, что несмотря на сильную анизотропию кристаллической структуры (слоистость) и механических свойств в этом соединении не реализуются двумерные состояния.

Продолжая поиски двумерных состояний в реальных кристаллах, были предсказаны и получены новые слоистые кристаллы, изолированный слой которых при толщинах, меньших, чем у GaSe, содержит большее число атомных плоскостей с ионным характером связи между слоями.

Исследования электронных спектров сложных халькогенидов группы  $A^3B^3C_2^6$  с ионным характером связи между слоями позволили экспериментально обнаружить в них двумерные электронные состояния на краю зоны.

Выявлены особенности оптических свойств и колебательных спектров, обусловленные сильной анизотропией кристаллической структуры слоистых и цепочечных кристаллов. Проводятся работы, связанные с влиянием гидростатического давления на спектры комбинационного рассеяния света (КРС) и спектры фундаментального поглощения. Установлено, что спектр оптических фононов слоистых и цепочечных кристаллов групп  $A^3B^6$ ,  $A^3B^3C_2^6$  характеризуется наличием низкоэнергетических межслоевых (межцепочечных) фононов, обладающих значениями модовых параметров Грюнайзена, на порядок-два превышающими значения модовых параметров Грюнайзена для внутрислоевых (внутрицепочечных) колебаний. Показано, что гидростатическое давление приводит к увеличению анизотропии упругих констант взаимодействия в слоистых кристаллах группы  $A^3B^6$ .

Выполнен цикл экспериментов по ИК спектроскопии слоистых и цепочечных кристаллов группы  $A^3B^6$ . В этих соединениях был обнаружен, исследован и объяснен эффект неортогонального падения возбуждающего света на поверхность в экспериментах по ИК отражению в полосе остаточных лучей. Было показано, что тонкая структура спектров отражения не связана с давидовским расщеплением ИК активных фононов, а возникает в результате не строго нормального падения света на кристалл.

В тройных халькогенидах группы  $A^3B^3C_2^6$  обнаружены фазовые переходы под гидростатическим давлением. Установлена природа переходов.

Исследования колебательных спектров методами оптической спектроскопии и методами оптической спектроскопии под давлением позволили провести однозначную идентификацию различных политипов слоистых соединений, результаты которой согласуются с данными рентгеноструктурного анализа. К примеру, было установлено, что кристаллы селенида галлия, выращенные методом Бриджмена, обладают нецентросимметричной пространственной группой  $D_{3h}^{1/2}$ .

Исследованы электрические и фотоэлектрические свойства слоистых полупроводников группы  $A^3B^6$  в сильных электрических полях (до  $10^6$  В/см). Обнаружен и объяснен эффект переключения вдоль и поперек слоев. В результате созданы переключающие приборы, работающие в широкой области температур.

Впервые в этих соединениях обнаружены электрелетный и фотоэлектрелетный эффекты, позволяющие формирование потенциального рельефа изображения и создание устройств для получения видеосигнала.

Получены сверхтонкие монокристаллические пленки слоистых соединений толщиной менее 100 Å. Экспериментально показано, что в тонких пленках селенида галлия при толщинах менее 50 Å имеет место увеличение энергии связи экситона, что находит свое объяснение в рамках модели увеличения кулоновского взаимодействия в тонких пленках.

Физические свойства слоистых соединений изучаются также методами мёсбауэровской спектроскопии. Измеряя величину среднеквадратичного

смещения мёссбауэровских атомов, введенных в кристалл в виде примесей, в зависимости от угла, образованного направлением  $\gamma$ -кванта относительно кристаллографических осей, была изучена анизотропия химических связей в кристаллах  $\varepsilon$ -GaSe и GaS. Исследования в области температур 4,2—300 К позволили установить, что мёссбауэровские спектры  $\text{Ga}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{S}$  представляют собой дублет, отношение интенсивностей компонент которого с температурой изменяется. С понижением температуры асимметрия уменьшается, что характерно для эффекта Гольданского — Корягина, обусловленного анизотропией химических связей.

Интересные результаты получены при исследовании фазообразования и кинетики фазового превращения в тонких пленках полупроводников. Впервые в нашей стране в Институте физики АН Азерб. ССР был освоен метод кинематической электронографии.

Система коллективного использования вычислительной техники Института физики с успехом применяется учеными республики при расчетах энергетических спектров слоистых и других кристаллов с помощью ЭВМ типа ЕС.

Проведен цикл теоретических и экспериментальных работ по узкозонным полупроводникам ( $\text{HgCdTe}$ ,  $\text{PbSnTe}$ ,  $\text{Ag}_2\text{Te}$  и др.). Эти исследования были стимулированы в основном применением указанных материалов в ИК технике.

Успешное развитие фундаментальных исследований в области физики твердого тела стимулировало развитие работ в республике по полупроводниковой и квантовой электронике, с использованием в качестве активных сред слоистых кристаллов.

Впервые в  $\varepsilon$ -GaSe был получен режим генерации при «продольной» (относительно оси  $C$ ) и «поперечной» накачке электронным пучком. Эти результаты показали принципиальную возможность создания квантового генератора в геометрии «излучающее зеркало». Обнаружено смещение максимума спектра вынужденного излучения в длинноволновую область спектра при увеличении плотности тока накачки, которое связывается с экситон-экситонными столкновениями.

В 1972 г. группой сотрудников Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР и Института физики АН Азерб. ССР впервые была показана возможность использования кристаллов  $\varepsilon$ -GaSe в качестве эффективного нелинейного оптического материала. В  $\varepsilon$ -GaSe было экспериментально осуществлено преобразование излучения  $\text{CO}$ - и  $\text{CO}_2$ -лазеров в диапазон чувствительности фотокатода ЭОПа при смешении с излучением лазера на  $\text{YAG} : \text{Nd}^{3+}$  и снят на фотопленку преобразованный спектр генерации  $\text{CO}_2$ -лазера.

В Институте физики разработано устройство скоростного вывода 16-ти разрядной буквенно-цифровой информации на обычную сухую бумагу, использующее стандартные красители и имеющее скорость печати 100 строк в секунду. Построено программное обеспечение для управления работой разработанного устройства.

Выявлены также возможности практического применения слоистых кристаллов группы  $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}_2$ . В этих соединениях обнаружен пьезофоторезистивный эффект, т. е. повышение чувствительности проводимости к деформации при лазерном возбуждении. Созданы детекторы рентгеновского излучения, отличающиеся высокой чувствительностью (до 1 мкА/р·мин), малой инерционностью ( $10^{-2}$ с).

Наряду с соединениями с сильной анизотропией кристаллического строения изучаются и сильно-вырожденные полупроводники группы  $\text{A}^1\text{BV}^1$  с некоторой долей ионной проводимости. В туннельных МДП-структурах на их основе обнаружено поляризационно-зависимое многостабильное переключе-

ние с памятью, обусловленное обратимой модуляцией туннельного барьера подвижными ионами. На основе этого эффекта создано репрограммируемое постоянное запоминающее устройство емкостью 4 К.

Ученые республики получают и исследуют также магнитные полупроводники (аналоги  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ ), дефектные полуторные сульфиды и селениды галлия и индия, полуметаллы (As, Sb и их твердые растворы), Ge, Si, Se, Te, термоэлектрические материалы, композиционные материалы полупроводник-металл (типа  $\text{InSb} - \text{NiSb}$ ) и др. На основе этих соединений на опытном производстве Института физики изготавливаются различные термоэлектрические приборы и устройства.

Получили развитие исследования в области газовой радиоспектроскопии молекул. Предсказано и экспериментально доказано существование ранее неизвестных инфраслабых внутримолекулярных водородных связей; создан и внедрен комплекс программ для ЭВМ класса ЕС с целью автоматизации процессов расшифровки МВ вращательных спектров, определения спектроскопических, электрических, структурных параметров и конформационных характеристик многоатомных молекул.

В области ядерной физики совместно с ОИЯИ (г. Дубна) и ИФВЭ (г. Серпухов) проводятся исследования по взаимодействию адронов и антинейтрино с ядрами. Установлен механизм рождения кумулятивных протонов и выделен их вклад в различных кинематических областях.

В решениях XXVI съезда КПСС большое внимание уделено развитию порошковой металлургии в нашей стране. В числе 41 целевых комплексных научно-технических программ XI пятилетки, охватывающих решение актуальных задач первостепенной государственной важности, — программа по порошковой металлургии.

Важное место порошковой металлургии отведено также в решениях XXX съезда КП Азербайджана.

Учеными нашей республики в содружестве с Институтом проблем материаловедения АН УССР проводятся исследования по обработке технологии распыления металлов с целью получения порошков определенного состава. Методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза изготавливаются порошки тугоплавких соединений Nb,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , AlN,  $\text{B}_4\text{C}$ , TiC и др. Из порошков карбида титана получают абразивные пасты, используемые взамен остродефицитных алмазных паст. Организовано производство нитрида бора (вюрцита), изделия из которого заменяют алмазный инструмент, на основе нитрида кремния получена партия тиглей для плавки благородных и тугоплавких металлов.

Все эти достижения являются ярким выражением великого содружества физиков Азербайджана с учеными нашей многонациональной страны.