

**ХИМИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА
И ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Научная школа проф. Я.А.Угая



**THE CHEMISTRY OF SOLIDS
AND SEMICONDUCTORS**

Science school of prof. Y.A.Ugai

Краткая характеристика научной школы



Проф. Угай Я.А.

Основатель и глава школы, профессор кафедры неорганической химии *Угай Яков Александрович*, 1921 года рождения, кандидат химических наук (1947), доктор химических наук (1965, ИОНХ АН СССР), профессор (1966), лауреат Государственной премии СССР в области науки (1981), академик МАН ВШ (1994), Заслуженный деятель науки РФ (1991), Государственный научный стипендиат (2000-2003), Соросовский профессор (1995-1996), Заслуженный Соросовский профессор (с 1998), член редакционной коллегии журнала РАН «Неорганические материалы» (с 1992), главный редактор журнала Минобразования и ВГУ «Конденсированные среды и межфазные границы» (с 1999), председатель докторского диссертационного Совета по химическим наукам ВГУ (с 1991), член ученого Совета университета.

Еще в 1957 году академик А.Ф. Иоффе писал: «Одним из исходных пунктов физики полупроводников становится химия молекулы. Теория должна научиться учитывать физико-химическую природу данного полупроводника» (ЖТФ, 1957). Первая книга по химии полупроводников, посвященная только одной группе полупроводниковых соединений, вышла в свет почти 40 лет тому назад (1963). А за год до выхода указанной книги нами с разрешения Министерства была создана в Воронежском государственном университете первая в СССР (наверняка и в мире) кафедра химии полупроводников. В то время еще абсолютное большинство ученых и специалистов (и в первую очередь зарубежных) считало, что наука о полупроводниках – это монополярная область физиков.

В то же время открытие некристаллических – жидких и твердых аморфных – полупроводников, для которых характерно отсутствие дальнего порядка в расположении частиц, показало, что их свойства в первую очередь определяются строением первой координационной сферы, следовательно, ближним порядком. Другими словами, для некристаллических полупроводников на первый план выдвигается характер химической связи, от которого зависят физико-химические и полупроводниковые свойства этих веществ. Кроме того, даже в те годы, когда основными объектами исследования физики полупроводников были простые вещества типа германия и кремния, теория методов их очистки до ультравысокой чистоты (направленная кристаллизация, зонная плавка и др.) не могла обойтись без химии. Так, ключевое понятие эффективного коэффициента распределения примесей вдоль слитка неразрывно связано с диаграммами состояния систем полупроводник-примесь. А диаграммы состояния лежат в основе физико-химического анализа, являющегося разделом общей химии и химической термодинамики. При

этом неизбежно происходит взаимообогащение смежных наук. Так, получение полупроводниковых веществ ультравысокой чистоты автоматически связано с выращиванием монокристаллов (направленная кристаллизация, зонная плавка и т.д.). А сама же неорганическая химия в то же время переживала свое второе рождение, синтезируя и исследуя вещества особо высокой чистоты в виде монокристаллов. Дело в том, что свойства веществ исключительно чувствительны к примесям, особенно к примесям другой физико-химической природы, чем основное вещество. До полупроводниковой эры химии имели дело в основном с порошками и поликристаллами. А при выращивании монокристаллов автоматически происходит глубокая очистка вещества.

Полупроводниковыми свойствами, помимо простых веществ германия и кремния, обладают бор, селен, йод и α -Sn. Необходимо было сделать шаг вперед и перейти от простых веществ к химическим соединениям, обладающим полупроводниковыми свойствами. А химические соединения – это главный объект химической науки. Таким образом, зарождение новой науки – химии полупроводников – было стимулировано дальнейшим развитием и усовершенствованием физики полупроводников, радио- и микроэлектроники.

К середине 60-х годов нами были сформулированы задачи химии полупроводников (Я.А. Угай. «Введение в химию полупроводников». М. Высшая школа, 1965) применительно не к отдельной группе соединений, а ко всем химическим веществам, обладающим полупроводимостью. В настоящее время химия полупроводников – раздел общей и неорганической химии, в котором изучается взаимосвязь между кристаллохимическим строением полупроводниковых веществ и их физическими (электрическими и оптическими), физико-химическими (термодинамическими и кинетическими) и химическими свойствами (реакционной способностью). А кристаллохимическое строение – это не только порядок химических связей атомов, взаимное влияние последних (химически не связанных), но и пространственная направленность, прочность, длина связей, распределение плотности электронного облака, эффективные заряды на атомах и т.д. Из нашего определения кристаллохимического строения следует, что оно в первую очередь зависит от характера химической связи между атомами, связанными непосредственно друг с другом. По этой причине основу теории кристаллохимического строения составляет учение о химической связи.

Некоторые принципиальные научные результаты, полученные нашей школой по химии полупроводников и твердых тел

1. Доминирующим типом химической связи в полупроводниках является парноэлектронная двухцентровая связь. Наблюдающаяся на практике некоторая доля ионности объясняется поляризацией ковалентной связи. Такое заключение полностью согласуется с зонной структурой энергетического спектра электронов в твердых телах. Согласно зонной модели энергетическая щель между потолком валентной зоны и дном зоны проводимости (ширина запрещенной зоны) в полупроводниках есть величина всегда положительная в противоположность металлам. А энергия, соответствующая ширине запрещенной зоны, точно равна прочности ковалентной связи в полупроводнике.

2. При образовании полупроводниковых соединений главенствующая роль принадлежит анионообразователям – элементам, располагающимся в полудлинной 18-ти клеточной периодической системе правее границы Цинтля. Но среди анионообразователей наилучшими полупроводник-образующими элементами должны быть пниктогены: азот, фосфор, мышьяк, сурьма (за исключением висмута). И не случайно автор с сотрудниками в свое время открыл новые полупроводниковые соединения на основе мышьяка, фосфора и сурьмы (Угай Я.А. и др. ДАН СССР, 1961; ДАН СССР, 1962; ДАН СССР 1963; ДАН СССР, 1965; ЖНХ АН СССР, 1962; Там же, 1962; Там же, 1964).
3. Впервые выявлен характер межатомных связей в важнейших полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$. На основе экспериментальных (преимущественно рентгеноспектральных) данных и теоретических предпосылок предложена новая схема тетраэдрических ковалентных связей в соединениях $A^{III}B^V$ (Угай Я.А., Домашевская Э.П. ДАН СССР, 1964). Из четырех парноэлектронных ковалентных связей (вокруг каждого из атомов A^{III} и B^V образуется полный октет электронов): три связи образованы по обменному механизму, а четвертая – по донорно-акцепторному за счет гибридной неподеленной электронной пары атома B^V . Таким образом, полупроводники $A^{III}B^V$ можно трактовать как координационные соединения, так как в них доминирующую роль играют ковалентные связи донорно-акцепторного происхождения. Для координационных структур, к которым относятся соединения $A^{III}B^V$, осуществление одной из четырех связей за счет координативной связи вполне логично. В то же время такая интерпретация природы межатомных связей в полупроводниках $A^{III}B^V$ расширяет наши традиционные представления о координационных или комплексных соединениях, ибо само определение их в первую очередь связывается с поведением этих веществ в водных растворах. А все полупроводниковые соединения, и в том числе $A^{III}B^V$, в воде, как правило, не растворяются. Тем не менее, в полупроводниках $A^{III}B^V$ в качестве комплексообразователя функционируют атомы A^{III} , а лигандами являются атомы B^V . Это тем более интересно, что аналогичным характером межатомных связей обладают все представители изоэлектронных рядов углерода, кремния, германия и а-олова. Это полупроводники $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ и $A^I B^{VII}$. В этом ряду слева направо закономерно уменьшается число связей, образованных по обменному механизму и соответственно растет число донорно-акцепторных ковалентных связей.
4. Наши исследования металлических, солевых и полупроводниковых систем, а также систем, компонентами которых являются вещества различной физико-химической природы, приводят к заключению о том, что главным и первичным в проблеме растворимости твердых веществ (ограниченные и непрерывные твердые растворы) является характер химических связей взаимодействующих компонентов (Угай Я.А., Гончаров Е.Г. ЖНХ, 1963). С этих позиций становится понятным, почему металлы хорошо растворяются в металлах, соли в солях и т.д.

В этих работах установлена еще одна заслуживающая внимания закономерность: чем меньше растворимость вещества с другим типом химической связи, тем сильнее изменение электрических и оптических свойств твердого раствора, т.е. твердого вещества – растворителя.

Научный коллектив

Перейдем к краткому изложению основных научных результатов отдельных членов научной школы – докторов наук, работавших и работающих в настоящее время в Воронежском государственном университете.

Анохин Валентин Захарович
(1937-1991).

Кандидатскую диссертацию защитил в 1967, докторскую в 1988 (МГУ). Работал профессором (с 1990) кафедры общей и неорганической химии (зав. кафедрой проф. Угай Я.А.).

Профессор В.З. Анохин детально исследовал процесс термического окисления кремния в окисляющей газовой среде, начиная со стадии хемосорбции вплоть до стадии контролируемого диффузией реагентов сквозь пассивную пленку диоксида. Предложен метод формально-кинетического описания, на основании которого построена пространственная кинетическая диаграмма окислительного процесса кремния (Угай Я.А., Анохин В.З., Миттова И.Я., Ховив А.М.). Кроме того, выведено кинетическое уравнение многостадийного процесса термического окисления полупроводников и металлов (Угай Я.А., Анохин В.З., Ховив А.М., Миттова И.Я.).



Проф. Анохин В.З.



Проф. Гончаров Е.Г.

Гончаров Евгений Григорьевич

1933 года рождения, кандидат химических наук (1957), доктор химических наук (1990, МГУ), профессор (1991), заведующий кафедрой общей химии. Заслуженный работник высшей школы (1998), член редколлегии журнала «Конденсированные среды и межфазные границы», член докторского диссертационного Совета химфака, член научного Совета РАН «Термический анализ».

В опубликованных работах Е.Г. Гончарова дается подробный анализ кристаллохимических, физико-химических и электрических свойств полупроводниковых соединений

$A^{IV}B^V$, построены полные фазовые диаграммы систем с участием кремния и германия с одной стороны, фосфора и мышьяка – с другой. Впервые научно интерпретированы свойства $A^{IV}B^V$, связывая механизм образования твердых растворов с положением компонентов в Периодической системе Д.И. Менделеева.

Детально обсуждаются проблемы дефектообразования в полупроводниковых фазах $A^{IV}B^V$ (особенно роль антиструктурных дефектов), проанализированы области гомогенности и изменение нестехиометрии фосфидов и арсенидов в зависимости от температуры.

Тщательное изучение диаграмм состояния, а также физико-химических (особенно тензиметрических!) параметров твердых растворов между фосфором и мышьяком, мышьяком и сурьмой послужили научной основой при синтезе твердых растворов с двумя и большим числом летучих компонентов. Под руководством Гончарова Е.Г. на кафедре общей и неорганической химии были созданы прецизионные методы тензиметрического исследования, что для современной неорганической химии играет неопределимую роль.

Кроме того, профессор Гончаров Е.Г. в течение многих лет на кафедре проводил очень важную научно-организаторскую работу по регулярному выпуску сборников научных трудов сотрудников, аспирантов и студентов ВГУ и работников НПО «Электроника». В течение 1971-1989 было выпущено 11 номеров, средний объем которых 9-10 п.л. Для примера привожу сборник «Полупроводниковые материалы и тонкие пленки на их поверхности». Воронеж, изд-во ВГУ, 1982. – 164 с. (научн. ред. Я.А. Угай; зам. научн. редактора Гончаров Е.Г.).

Миттова Ирина Яковлевна, 1949 года рождения, заведующая кафедрой неорганической химии, кандидат химических наук (1976), доктор химических наук по специальностям 02.00.01 и 02.00.04 (1989, ИОНХ АН СССР), профессор (1991).

Дважды удостоена Государственной научной стипендии (1994-1996 и 2000-2003). Член редколлегии журнала «Конденсированные среды и межфазные границы», член докторского диссертационного Совета по химическим наукам ВГУ.



Проф. Миттова И.Я.

В середине 70-х годов в рамках школы зарождается новое направление – исследование гетерогенных процессов, протекающих на поверхности полупроводников. Первоначально исследования в этом направлении были связаны с созданием диэлектрических оксидных слоев на поверхности кремния. В ходе исследований в этом направлении, развиваемых под руководством Миттовой И.Я., было обнаружено, что контролируемое введение в систему при термическом окислении кремния некоторых обоснованно выбранных

дополнительных компонентов – оксидов, хлоридов, сульфидов – обеспечивает ускоренное формирование слоя SiO_2 при существенно более низких температурах. Была выявлена основная причина ускоренного окисления полупроводника в присутствии дополнительного компонента – непосредственная передача кислорода окисляемому материалу от самого компонента или его оксидных форм, возникающих в окислительной атмосфере. Это явление получило название транзитного взаимодействия (Угай Я.А., Анохин В.З., Миттова И.Я. Неорганические материалы, 1974; Миттова И.Я. и др. ДАН АН СССР, 1987). Возможность или невозможность вводимого соединения к транзитной передаче кислорода является основным термодинамическим критерием его выбора в качестве активатора. Была выявлена роль «катиона» и «аниона» вводимого соединения в формировании общих закономерностей и индивидуальных особенностей процессов ускоренного окисления кремния (Миттова И.Я. и др. Успехи химии. 1991).

Особенно плодотворными оказались развиваемые в рамках этого направления представления применительно к процессам термического окисления полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Собственное термическое окисление бинарных полупроводников осложнено вторичными взаимодействиями. Но введение дополнительных компонентов в систему позволяет радикально изменить механизм процесса, кинетически заблокировав неблагоприятную связывающую стадию за счет протекания новых быстрых реакций, ведущих к накоплению целевых продуктов. Таким образом, речь идет о специфическом химическом стимулировании гетерогенных реакций (Миттова И.Я. Неорганические материалы, 1992). Поэтому это направление получило название «Процессы хемостимулированного окисления полупроводников».

В ходе исследования открыты новые многоканальные гетерогенные реакции на поверхности твердого тела с положительными и отрицательными связями между каналами в открытых тонкопленочных системах, далеких от состояния равновесия. Обнаруженные нелинейные эффекты в таких системах интерпретированы с позиций термодинамического и кинетического сопряжения отдельных стадий (Миттова И.Я. и др. Доклады РАН, 1996; Миттова И.Я. и др. Доклады РАН 1997). В связи с этим расширяются воззрения на природу гетерогенного катализа, рассматривается вопрос о разграничении и пересечении сфер действия сопряженных и каталитических процессов применительно к новым тонкопленочным системам (Миттова И.Я. и др. Доклады РАН, 1991), развиваются представления о химической интерференции и вообще о химическом синергизме в широком смысле. Хемостимулированные процессы открывают принципиально новые возможности тонкого неорганического синтеза пленочных материалов с широкой вариацией состава и функциональных свойств.

Семенова Галина Владимировна, 1953 года рождения, профессор кафедры общей химии, кандидат химических наук (1979), доктор химических наук (1998, ВГУ), профессор (1999), Соросовский доцент (1998), член докторского диссертационного Совета химфака ВГУ.

Основное направление работы – фазовые равновесия и направленный синтез твердых растворов в тройных системах с двумя летучими компонентами.



Проф. Семенова Г.В.

Г.В. Семенова установила, что в тройных системах на основе соединений $A^{IV}B^V$ с анионным замещением (Ge-As-P, Si-As-P) существуют широкие области твердых растворов, а при катионном замещении (Ge-Si-As) их образование затруднено. Это связано с тем, что в соединениях класса $A^{IV}B^V$ большой отпечаток на кристаллохимическое строение фаз накладывает структурный мотив анионообразователя.

При синтезе трехкомпонентных твердых растворов необходимо управлять составом одновременно по двум параметрам: изменяя молярность твердого раствора, можно варьировать такими свойствами как ширина запрещенной зоны, параметр решетки и т.п., а отклонение от стехиометрии позволяет контролировать тип и концентрацию носителей заряда. На основании исследования механизма дефектообразования в твердых растворах $A^{III(IV)}B^{V-x}C^V_x$ выявлено оп-

ределяющее влияние на величину отклонения от стехиометрии антиструктурных дефектов. По сравнению с бинарными соединениями для твердых растворов отклонение от стехиометрии увеличивается. Связывая в единое целое данные о фазовых диаграммах в соответствующих системах с условиями роста кристалла, сформулированы и обоснованы оптимальные условия направленного синтеза целого ряда широко применяемых в полупроводниковой микроэлектронике материалов, в частности твердых растворов типа $A^{III}B^V$ - $C^{III}D^V$; $A^{IV}B^V$ - $A^{IV}C^V$.

Ховив Александр Михайлович, 1956 года рождения, профессор кафедры общей химии, кандидат физико-математических наук (1983), доктор физико-математических наук (1996, ВГУ), профессор (1999). Заместитель главного редактора журнала «Конденсированные среды и межфазные границы», член докторского диссертационного Совета физфака ВГУ.

Основное направление научной работы – лазерно-стимулированное формирование гетероструктур. Сформулированы общие закономерности лазерно-стимулированного формирования структур типа полупроводник-диэлектрик, металл-диэлектрик и металл-полупроводник, заключающиеся в изменении скорости образования оксидных фаз, кинетических и энергетических параметров процесса.



Проф. Ховив А.М.

Механизм лазерного оксидирования проводящих твердых тел при использовании непрерывного излучения ближнего и среднего ИК-диапазонов заключается в электронном и ионном массопереносе через оксидную пленку и послойном формировании оксидных фаз за счет самоорганизации переходных слоев.

Математическая модель лазерно-стимулированного формирования структур типа твердое тело-оксидная пленка основана на представлении о движущемся двумерном источнике диффузии и стоках активных частиц, локализованных соответственно на внутренней и внешней границах раздела.

Яценко Олег Борисович, 1947 года рождения, профессор кафедры неорганической химии, кандидат химических наук (1973), доктор химических наук (1997), профессор (2000), член редколлегии журнала «Конденсированные среды и межфазные границы», член докторского диссертационного Совета по химическим наукам.



Проф. Яценко О.Б.

Главная область научных исследований – синтез и изучение координационных кристаллов и гетероструктур, а также межфазных границ. В тонкопленочных сульфидных системах типа $Pb_{1-x}Cd_xS$ впервые показана аномально большая растворимость по сравнению с объемными образцами. Обнаружен новый эффект отрицательной фотопроводимости, а также нелинейный ход изменения оптической ширины запрещенной зоны от состава твердых растворов.

Разработан метод пульверизации водных растворов на нагретую подложку, позволяющий значительно расширять спектральный диапазон фоточувствительных пленок в системе $PbS-CdS$ и получать слои с заданными оптическими свойствами. Предложена физико-химическая модель взаимодействия сульфидов кадмия и свинца в тонких слоях в высокодисперсном состоянии, позволяющая объяснить обнаруженный комплекс особенностей их свойств, в частности, явления долговременной релаксации фотопроводимости.

Впервые получены кристаллы и пленки $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и $Cd_xHg_{1-x}Te$, в которых, за счет целенаправленной стабилизации уровня Ферми достигнуты концентрации свободных носителей заряда практически равные собственным при $T = 77$ К, в результате чего осуществлен синтез фотопроводящих структур с аномально высокими значениями величины фотопроводимости.

Привлечение студентов и аспирантов к научно-исследовательской работе

Наша научно-педагогическая школа с самого начала поставила стратегическую задачу широкого привлечения студентов и аспирантов к научно-исследо-

вательской работе. В законченных научных разработках, выполненных под руководством профессора или доцента, как правило, участвовали аспиранты и студенты. В настоящее время в рамках научной школы трудятся 4 докторанта и 14 аспирантов.

Кроме того, студенты и аспиранты всегда принимали активное участие (с оплатой) в выполнении научных грантов:

1. Грант (МНФ) Дж. Сороса №NZN000+NZN300 (1994-1996)

An elaboration of phenomenological model of thin films formation on the surface of semiconductors at the heterogeneous multicomponent reactions.

Научный руководитель гранта профессор Миттова И.Я.

Разработка феноменологической модели формирования тонких пленок на поверхности полупроводников в ходе гетерогенных многокомпонентных реакций.

2. Грант Международного научного фонда Дж. Сороса № NZO 000

Title of Research Project: Impurity influence anomalous phenomena, carrier transport and infrared sensitivity of doped PbTe, Pb-Sn-Te and Pb-Sn-Ge-Te epitaxial films on Si substrates.

Научный руководитель гранта профессор Угай Я.А.

Аномальное влияние примесей на явления переноса заряда и чувствительность к инфракрасному излучению легированных эпитаксиальных пленок PbTe, Pb-Sn-Te и Pb-Sn-Ge-Te на Si подложках.

3. Грант «Университеты России – фундаментальные исследования» (Процессы хемостимулированного окисления полупроводников, 1998-2000)

Научный руководитель гранта профессор Миттова И.Я.

4. Грант 4а.

Всероссийской программы «Фундаментальные исследования в области радиотехники и электроники» (Кинетика и механизм процессов формирования многокомпонентных диэлектрических слоев термическим окислением GaAs и InP под воздействием соединений-активаторов, 1996-1997. 4б. Выявление закономерностей формирования многокомпонентных диэлектрических слоев в процессах окисления полупроводниковых соединений, 1998-1999).

Научный руководитель гранта профессор Миттова И.Я.

5. Грант РФФИ №98-03-83157 (1998-2000 гг.)

Теоретическое моделирование физико-химических процессов роста оксидных пленок на поверхности проводящих твердых тел с учетом самоорганизации переходных слоев.

Научный руководитель профессор Ховив А.М.

6. Грант INTAS №930091 (1993-1995 гг.).

Study of semiconductor materials in order to develop the material methods for low cost detection system.

Научный руководитель гранта профессор Угай Я.А.

Изучение полупроводниковых материалов с целью усовершенствования и удешевления детектирующих систем.

В выполнении грантов большое участие принимали Соросовский аспирант Сошников И.М., а также Соросовские студенты Кострюков В.Ф. и Муратов А.А.

Неоценимую помощь студентам и аспирантам в их научной работе оказывали доценты и кандидаты наук нашей научной школы, ныне работающие на кафедрах неорганической и общей химии: Авербах Е.М., Пшестанчик В.Р., Прокин А.Н., Лаврушина С.С., Томина Е.В., Самойлов А.М., Завражнов А.Ю., Морозова А.А., Сушкова Т.П., Семенов В.Н. Особо хочется подчеркнуть помощь со стороны декана химфака доцента Афиногенова Ю.П., который практически не отказывал в финансировании студентов и аспирантов для поездки на конференции и симпозиумы из внебюджетного фонда.

Публикации коллектива научной школы

Коллективом научной школы опубликовано около 500 научных статей в центральной периодической печати (ДАН и РАН, ЖНХ, ЖФХ, ЖНМ, Успехи химии, ЖОХ, ЖПХ, ФТТ, ЖТФ, ФТП, Электрохимия, Электронная техника, Структурная химия, Кинетика и катализ, Поверхность, Изв. АН СССР, серия физическая, Изв. АН СССР, серия химическая), а также зарубежных журналах *Thin Solid Films*, *Journal of Crystal Growth*, *Microelectronic Engineering*, *Semiconductors Science and Technology*, *Material Science Engineering*, *Material Science Revue B.*, *Surface Science* и др., не считая тезисов докладов на международных, союзных и республиканских конференциях.

В опубликованных ~500 (в том числе 63 авторских свидетельств и 2 патента) работах научно-педагогических работников школы в качестве полноправных



Глава научной школы проф. Я.А.Угай. с сотрудниками
обсуждает научно-методические вопросы химии твердого тела

авторов выступали ~350 студентов и аспирантов. За время существования школы кандидатские диссертации защищены: под руководством Угая Я.А. – 70 человек, Е.Г. Гончарова – 12, Миттовой И.Я. – 6, Анохин В.З. – 2. Из общего числа 90 кандидатов наук 8 стали докторами наук (В.З. Анохин, И.Я. Миттова, Е.Г. Гончаров, Э.П. Домашевская, К.Р. Курбанов, О.Б. Яценко, А.М. Ховив, Г.А. Абдурегимов).

Ниже приводим список монографий, справочников, учебных пособий, учебников и заказных статей в энциклопедиях.

1. Кристаллохимические, физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ (справочник). Изд-во стандартов, М. 1973 (Боккий Г.Б., Угай Я.А., Шевченко В.Я. и др.), 207 с.
2. Кристаллохимические проблемы материаловедения полупроводников. М. Наука. 1975 (Шевченко В.Я., Угай Я.А. и др.), 135 с.
3. Угай Я.А., Гончаров Е.Г., Семенова Г.В., Лазарев В.Б. Фазовые равновесия между фосфором, мышьяком, сурьмой и висмутом. М. Наука. 1989. 204 с.
4. В.З. Анохин. Кинетика и механизм термического окисления кремния. Изд-во ВГУ. 1983. 193 с.
5. Е.Г. Гончаров. Полупроводниковые фосфиды и арсениды кремния и германия. Изд-во ВГУ. 1989. 207 с.
6. И.Я. Миттова. Физико-химия термического окисления кремния в присутствии примесей. Изд-во ВГУ. 1987. 196 с.
7. А.М. Ховив. Лазерный метод формирования оксидных пленок на поверхности проводящих твердых тел. Изд-во ВГУ. 1997. 80 с.
8. Я.А. Угай. Введение в химию полупроводников. М. Высшая школа (1-ое изд. 1965. 332 с., 2-ое изд. 1975. 300 с.). Учебные пособия.
9. Я.А. Угай. Общая химия. М. Высшая школа (1-ое изд. 1977. 408 с., 2-ое изд. 1984. 438 с.). Учебники для студентов химических факультетов госуниверситетов.
10. Я.А. Угай. Неорганическая химия. М. Высшая школа. 1989. 463 с. Учебник для студентов ВУЗов, обучающихся по специальности «Химия».
11. В.А. Анохин, Е.Г. Гончаров и др. Практикум по химии и технологии полупроводников (под редакцией проф. Угая). М. Высшая школа. 1978, 191 с. Учебное пособие для студентов химических специальностей ВУЗов.
12. Е.Г. Гончаров, Г.В. Семенова, Я.А. Угай. Химия полупроводников (под редакцией профессора Угая). Изд-во ВГУ. 1995. 271 с. Учебное пособие для студентов химических специальностей ВУЗов.
13. Я.А. Угай. Общая и неорганическая химия. М. Высшая школа. 1997. 524 с. Учебник для студентов ВУЗов, обучающихся по направлению и специальности «Химия».
14. Я.А. Угай. Общая и неорганическая химия. М. Высшая школа. 2000. (Издание 2-ое исправленное). 527 с. Учебник для студентов ВУЗов, обучающихся по направлению и специальности «Химия».

15. Я.А. Угай. Моноксид кремния. Энциклопедия неорганических материалов. Киев. 1977. т. 2. с. 14-15.
16. Я.А. Угай, В.З. Анохин. Полуметаллы. М. Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». Химическая энциклопедия. 1995. т. 4. с. 101-102.
17. Я.А. Угай, В.З. Анохин. Полупроводники. Там же. 1995. т. 4. с. 102-108.
18. Я.А. Угай. Фосфида. Там же. 1998. т. 5. с. 256-258.
19. Я.А. Угай. Фосфины. Там же. 1998. т. 5. с. 263-265.
20. Я.А. Угай. Фосфора галогениды. Там же. 1998. т. 5. с. 285-286.

В заключение следует подчеркнуть, что обобщающие выводы и новые научные концепции, сформулированные в ходе систематических исследований в области химии полупроводников, физико-химической микроэлектроники и химии твердого тела с неизбежностью становятся достоянием всей химической науки. К примеру, ковалентная связь, ответственная за полупроводимость, оказалась универсальным типом межатомной связи, определяющей в основном химическое и кристаллохимическое строение вещества, от которого, в свою очередь, зависят все его свойства (Угай Я.А. «Введение в химию полупроводников», М., 1965).

Эта идея является основополагающей для всей химии, и она проходит красной нитью через учебники Я.А. Угая, предназначенные для студентов химических факультетов государственных университетов. Понятие кристаллохимического строения является превращенной формой учения Бутлерова о химическом строении молекул применительно к координационным кристаллам, к которым относятся полупроводники и подавляющая часть твердых тел. Именно по этой причине в курсах общей и неорганической химии впервые весь фактический материал трактуется на базе Периодического закона Менделеева и закона о химическом строении Бутлерова (см., например, «Общая химия», М., 1977 и 1984).

Таких примеров можно привести много – это нарушение стехиометрического состава, точно установленные области гомогенности соединений и учение о дефектах, микродиаграммы состояния и т.д. (Неорганическая химия, 1989). Даже экспериментальные методы, выработанные в связи с обоснованием и развитием химии полупроводников и физико-химической микроэлектроники, нашли свое отражение в учебной литературе (Практикум по химии и технологии полупроводников, 1978).

Все сказанное выше дает нам право именовать нашу научную школу научно-педагогической школой, ибо она выполняет главную задачу высшей школы (в первую очередь классических университетов), а именно - делает возможным преподавание на основе развития фундаментальной науки. К тому же термины «научные школы» и «научно-педагогические школы» имеют такие же права на существование, как и общепринятые термины «научные кадры» и «научно-педагогические кадры».

Таким образом, наша научная школа наравне с актуальными работами в области фундаментальной химии (Государственная премия СССР, 1981), проде-

лала большую работу в учебно-образовательном плане (см. список учебников и учебных пособий, заказных статей в энциклопедиях). В период перестройки постановлением Коллегии Госкомитета СССР по народному образованию от 22 июня 1989 г. присуждена 2-ая премия (Я.А. Угай) за значительные успехи в перестройке содержания учебно-воспитательного процесса, его обновления в свете современных достижений и перспектив развития науки, техники, культуры, создание спецкурсов по направлениям, определяющим научно-технический и социальный прогресс и выдан соответствующий диплом. Наконец, нельзя не отметить, что на этапе окончательного становления научно-педагогической школы исключительно важную роль сыграли Международный научный фонд Сороса (МНФ) и Международная Соросовская программа образования в области точных наук (ISSEP).