

Леонид Степанович Смирнов

к 80-летию со дня рождения (1932–2011)

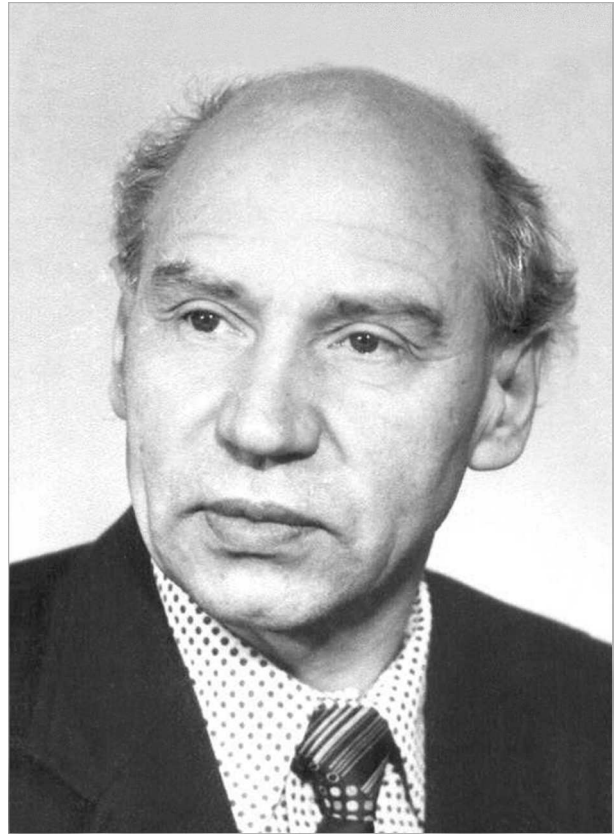
17 января 2012 года исполнилось 80 лет со дня рождения Леонида Степановича Смирнова, доктора физико-математических наук, профессора, лауреата Государственной премии СССР, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР. Он не дожил до своего юбилея 2 месяца.

Л. С. Смирнов родился 17 января 1932 г. в старинном уральском селе Хомутино Челябинской области. Семья была большая и дружная. Связь Л. С. Смирнова с родным селом не прерывалась всю его жизнь. Здесь было начало всему: увлечениям охотой, рыбалкой, поэзией, живописью и, конечно, спортом.

В 1949 г. Л. С. Смирнов поступает в Ленинградский государственный университет, после окончания которого в сентябре 1954 г. он был принят в ФИАН, в лабораторию полупроводников (руководитель — академик Б. М. Вул). В ФИАН он попал в группу, занимающуюся исследованием действия излучений на полупроводники (руководитель — д. ф. м. н. В. С. Вавилов), что и определило его научные интересы на протяжении последующих лет работы в академии наук. Группа занималась разработкой сплавных германиевых транзисторов, вопросами превращения солнечной энергии и энергии радиоактивного распада в электроэнергию. В 1956 г. он был уже младшим научным сотрудником, в 1961 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему: „Действие быстрых электронов на электрофизические свойства германия“.

В конце 50-х годов появились идеи управления свойствами кристаллов путем облучения быстрыми частицами. Первые эксперименты по облучению полупроводников быстрыми частицами привели к интересным и непонятым тогда эффектам. В 1962 г. Л. С. Смирнов принимает предложение А. В. Ржанова о переезде в Новосибирск, где планировалась организация нового института в академгородке. В новом институте (тогда он назывался Институт физики твердого тела и полупроводниковой электроники, а с 1964 г. — Институт физики полупроводников) Леонид Степанович организовал и возглавил лабораторию радиационной физики, успешно проработавшей под его руководством в течение 40 лет.

На протяжении всей своей научной деятельности Л. С. Смирнов развивал представления о реакциях неравновесных точечных дефектов (вакансий и межузельных атомов, вводимых облучением быстрыми частицами) между собой и другими несовершенствами структуры. Гипотеза о подвижности (миграции) элементарных точечных дефектов при комнатной температуре, а также при температурах, используемых при технологических обработках в полупроводниковой электронике, являлась основой постановки многих исследований в радиационной физике полупроводников. Начало было положено



публикацией А. В. Спицына, Л. С. Смирнова „К теории аннигиляции радиационных дефектов“ в журнале „Физика твердого тела“ за 1962 г.

Уже в 1966 г. в лаборатории радиационной физики был закончен цикл исследований, начатый еще в ФИАН, по исследованию процессов ионизации при облучении полупроводников быстрыми частицами. Были определены энергии образования неравновесных электронно-дырочных пар. Их значения для кремния оказались равными 3.9–0.4 эВ, для германия 3.0–0.7 эВ. Показано, что температурные зависимости энергий ионизации незначительны. Эти данные легли в основу построения теории ионизационных потерь в кристаллах и разработки детекторов частиц. Превышение в несколько раз величины энергии образования неравновесных электронно-дырочных пар над с шириной запрещенной зоны естественно было объяснено генерацией горячих носителей и их термализацией при взаимодействии с фононами. В 1969 г. Л. С. Смирнов защитил докторскую диссертацию на тему: „Радиационные эффекты в некоторых полупроводниках“.

В то время актуальной также была проблема определения пороговой энергии смещения атомов из узлов при

облучении материалов быстрыми частицами — энергии образования пары Френкеля: вакансии и межузельного атома. Очевидно, что эта величина являлась ключевой в расчетах любых радиационных воздействий на материалы. Экспериментальные результаты многочисленных работ того времени давали значительный разброс величин пороговой энергии, которые в свою очередь не совпадали с экспериментальными данными по определению энергии активации образования равновесных точечных дефектов.

Постановка достаточно изящных экспериментов по слежению за введением доминирующего комплекса, включающего вакансию (А-центр в кремнии, комплекс вакансия–кислород) позволила решить одну из самых дискуссионных проблем по величине пороговой энергии. Величины пороговой энергии при комнатной температуре для кремния оказались равными 20.4 эВ при ориентации пучка электронов вдоль направления $\langle 111 \rangle$. Оказалось, что пороговые энергии имеют заметную температурную зависимость и слабо зависят от кристаллографической ориентации. Так, в кремнии пороговая энергия уменьшается в два раза при повышении температуры от комнатной до 700°С.

В начале 60-х годов в мире активно начинались работы по реализации красивой идеи, предложенной в 50-х годах и заключающейся в использовании ускорительной техники для введения нужных элементов в полупроводники. Очевидная привлекательность такого метода заключалась в осуществлении легирования полупроводников на необходимую глубину любыми элементами из таблицы Д.И. Менделеева с прецизионным контролем уровня вводимой концентрации элементов. Лаборатория радиационной физики включилась в исследование по ионной имплантации, начав с конструирования и изготовления простых имплантеров. Однако реализация идеи встретила серьезные проблемы, связанные прежде всего с большим количеством дефектов, приходящихся на каждый внедренный элемент. Эти проблемы вызывали обоснованный скептицизм относительно возможности реализации многих предсказываемых достоинств ионной имплантации, особенно у представителей предприятий полупроводниковой электроники. Исходя из практических результатов ионной имплантации, они говорили, что ионная имплантация может служить только как метод создания чистых источников легирующих элементов для последующей диффузионной разгонки в монокристаллический полупроводник из дефектного слоя, нарушенного ионным облучением. Что касается самого дефектного слоя, то его изучение оценивалось как бесперспективное направление. Очевидно, что такая перспектива значительно сужала возможности ионной имплантации, прежде всего в создании легированных слоев с толщиной нанометрового масштаба.

Проведенные исследования в лаборатории Л.С. Смирнова привели к обнаружению эффектов захвата (вбивания) примесных атомов, адсорбированных на поверхности, описанию особенностей диффузии примесей из

слоев, насыщенных радиационными дефектами; доказательству, что вторичные эффекты (реакции в дефектно-примесной подсистеме) доминируют в формировании профилей распределения внедренных примесей по глубине легируемого слоя. Были обнаружены и объяснены эффекты аморфизации и рекристаллизации, эффекты больших доз и импульсной ориентированной кристаллизации. Разработаны основы создания уникальных структур, синтезируемых из ионных пучков, такие как, например, „кремний-на-изоляторе“.

Признание успехов в работе по этой проблеме особенно ярко проявилось на двух Советско-Американских семинарах по ионной имплантации (1977 и 1979 г.), в которых значительное представительство отводилось сотрудникам лаборатории радиационной физики Института физики полупроводников. Впоследствии в 1988 г. Л.С. Смирнову в составе авторов была присуждена Государственная премия СССР за исследование и разработку импульсного (лазерного) отжига разупорядоченных ионной имплантации слоев, приведших к открытию эффекта импульсной ориентированной кристаллизации. В настоящее время технология ионной имплантации является фактически единственной в процессах легирования полупроводников при производстве изделий электронной техники. Импульсный (лазерный) отжиг стал также базовой технологией в создании различных схем и приборов, в частности большеформатных матриц полевых транзисторов, используемых для управления жидкокристаллическими дисплеями при массовом производстве мониторов (телевизоров).

Результатом работы Леонида Степановича и его учеников является направление, родившееся на стыке физики твердого тела, физики и химии полупроводников и атомной физики. Это направление основано на фундаментальных явлениях и базе данных по взаимодействию быстрых частиц с твердым телом. На основе обнаруженных явлений были разработаны методы радиационной модификации и создания метастабильных систем. Практическими приложениями являются: ионная имплантация; ядерное (трансмутационное) легирование материалов; импульсная обработка (перекристаллизация) материалов; ионный синтез; введение активных центров; создание разупорядоченных систем; радиационно-ускоренная диффузия; повышение стабильности материалов и приборов.

Начиная с 1972 г. по инициативе и под руководством Л.С. Смирнова проводились ежегодные Всесоюзные семинары по радиационной физике полупроводников. Семинар стал смотрам достижений за год, проверкой новых идей, обменом планами, знакомством с молодежью, форумом подготовки диссертаций. Активными участниками были специалисты академии наук и вузов из Москвы, Ленинграда, Гатчины, Киева, Обнинска, Тбилиси, Ташкента, Риги, Вильнюса, Красноярска, Томска и, что важно, специалисты отраслевых министерств. Непринужденная, дружеская обстановка, бурные и плодотворные дискуссии, результативные контакты сделали

семинар координационным центром по проблеме радиационной физики полупроводников в стране.

Почти 40 лет Леонид Степанович был членом специализированного Совета по защитах кандидатских и докторских диссертаций Института физики полупроводников, много лет он руководил работой институтского семинара. Под его руководством защищено 36 кандидатских диссертаций, 9 его учеников стали докторами наук. Леонид Степанович является автором около 200 научных статей и 4 монографий. Его книги переведены на разные языки мира. Особой его гордостью было издание монографии „Легирование полупроводников методом ядерных реакций“ на китайском языке.

Леонид Степанович был человеком принципиальным. Он мог поступиться чем-то второстепенным, но для него всегда существовал нравственный барьер, за который он никогда не переходил. Помимо своей профессиональной деятельности Леонид Степанович был очень живым и активным человеком, любил природу, был заядлым охотником, автолюбителем, грибником. Увлекался игрой в теннис и шахматы. Организовывал разные спортивные мероприятия и сам в них участвовал. Память о нем навсегда сохранится в сердцах знавших его людей.

*А. Л. Асеев, А. В. Двуреченский,
И. Г. Неизвестный, Г. А. Качурин,
В. П. Попов, А. А. Гиппиус, В. Н. Мордкович*

*Редколлегия журнала
„Физика и техника полупроводников“*