

## Академик Андрей Андриеш – основатель школы физики аморфных полупроводников в Молдове

М. Иову, И. Кожокару

*Институт прикладной физики, Молдавский государственный университет,  
г. Кишинев, MD-2028, Молдова*



Двадцать четвертого октября 2023 года, исполнилось 90 лет со дня рождения Андрея Андриеша, человека, посвятившего всю жизнь науке, академика, президента Академии Наук Молдовы (АНМ 1989–2004 гг.), основателя школы физики аморфных полупроводников в Молдове.

Развитие области некристаллических полупроводников в Молдове, особенно стеклообразных халькогенидных полупроводников, стекол, неразрывно связано с именем академика Андрея Андриеша. Халькогенидные стекла открыты в Институте технической физики «А.Ф. Иоффе» в Санкт-Петербурге профессорами Б.Т. Коломицею и Н.А. Горюновой. Будучи аспирантом в этих работах активно участвовал Андрей Андриеш, вернувшись в Молдову (в 1962 году), инициировал изучение этих материалов. Под руководством доктора Андрея Андриеша было начато новое направление в области физики полупроводников и впоследствии формируется *научная школа в области некристаллических полупроводников*.

*Некристаллические полупроводники*, в том числе *халькогенидные стекла*, представляют собой группу материалов с физическими свойствами, отличными от кристаллических полупроводников. В отличие от кристаллического состояния, характеризующегося *отдаленным порядком*, то есть упорядоченной кристаллической структурой, некристаллическое (аморфное) – характеризуется именно его отсут-

ствием. Оставшиеся являются неким порядком на небольшом расстоянии, это *ближний порядок*, определяемый существованием некоторых корреляций в первых сферах атомной координации. Показано, что в халькогенидных стеклах ближний порядок может распространяться на достаточно большие расстояния, и считается, что это новый тип порядка – *промежуточный порядок*. Подобно тому, как ближний и отдаленный порядки важны для физико-химических свойств аморфных и кристаллических материалов, промежуточный – играет существенную роль в определении специфических свойств халькогенидных стекол: фото-структурной анизотропии, обратимых и необратимых оптических изменений, высокой фотопроводимости, низкой проводимости в темноте, прозрачности в широком диапазоне спектра (от видимого до инфракрасного). Первым практическим применением халькогенидных стекол стало использование в качестве светочувствительных элементов в кинескопах (видикон), светочувствительных носителях для печати изображений (копировальные аппараты), оптических компонентах инфракрасной оптики и т.д.

Под руководством академика Андрея Андриеша особое внимание уделялось получению *тонких светочувствительных слоев* из халькогенидных стекол, в том числе на гибких подложках большой площади, необходимых для разработки *неорганических носителей оптической и голографической информации*,

различных элементов и компонентов для оптоэлектроники и фотоники.

Проведенные фундаментальные и прикладные исследования углубили знания об основных физических свойствах халькогенидных стекол. Показано, что спектр локализованных состояний и их энергетическое распределение в халькогенидных стеклах можно модифицировать, изменяя состав материала, технологию производства, температуру, при облучении электромагнитными волнами. Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования переходных процессов дисперсного транспорта электрического заряда, *стационарной и нестационарной фотопроводимости, фотоиндуцированного оптического поглощения*, специфика которых определяется неравновесными носителями заряда и был установлен энергетический спектр состояний, расположенных в запрещенной оптической зоне. Для дисперсного транспорта в некристаллических полупроводниках предложена и развита теоретическая модель *многократного захвата носителей заряда на локализованные состояния*, экспоненциально распределенные в запрещенной оптической зоне, модель, согласующаяся с экспериментальными результатами. Изучение роли локализованных состояний углубило знания о явлении фотоэлектрической памяти, об электрохимических реакциях, о процессах деформации поверхности тонких слоев халькогенидных стекол, стимулируемых светом, электрическим полем, и/или электронными пучками.

Под руководством академика Андрея Андриеша разработана технология и впервые изготовлены *оптические волокна* из халькогенидных стекол. Исследование фотоиндуцированных явлений при распространении лазерного излучения в световодах из халькогенидных стекол позволило разработать датчики деформации и давления, детекторы малоинтенсивного инфракрасного излучения и другие оптоэлектронные устройства. Представленные на различных международных салонах результаты отмечены дипломами и медалями. Проведены исследования по изучению *нелинейно-оптических эффектов* при распространении коротких лазерных импульсов в тонких слоях аморфных полупроводников, продемонстрированы нелинейные явления оптического ограничения и гистерезиса. Совместно с римским университетом «LaSapienza» (проф. М. Бертолотти) исследованы необратимые и обратимые фотоструктурные превращения, нелинейные поглощения и преломление света в тонких слоях халькогенидных стекол при

распространении ультракоротких лазерных импульсов.

Интерес к исследованию халькогенидных стекол стимулировался все более широким применением в хранении, обработке и передаче информации. В этой области, под руководством академика Андриеша, проведены исследования и разработки новых *носителей информации*, в том числе из халькогенидных стекол, для оптической и голографической записи. Эксперименты выполнены на различных фотоносителях из халькогенидных стекол и удалось записать разные типы *голограмм* (радужные, Фурье-голограммы, объемные, с фокусированным изображением) с повышенной голографической эффективностью (до 40%) и большими размерами (до 140 см<sup>2</sup>). Разработан технологический процесс изготовления *матриц для размножения голографических изображений*, используемых в качестве элементов защиты от фальсификации документов и промышленных знаков. Помимо оптической записи голографических решеток, разработана методика записи в слоях халькогенидных стекол *цифровых дифракционных решеток* с использованием электронных пучков. Были записаны решетки различных типов и субмикронных размеров для применения в оптоэлектронике и интегральной оптике.

В последнее время академик Андриеш уделял внимание поискам новых материалов с улучшенными характеристиками для оптоэлектроники, фотоники и солнечной энергетики. Среди них – *нанокompозитные материалы* на основе неорганических и органических соединений и *люминесцентные полимерные нанокompозиты*, допированные координационными соединениями на основе ионов редкоземельных металлов. Понятие нанокompозит включает в себя большое разнообразие моно-, би-, трехмерных систем и аморфных материалов. Усилия в этой области, направлены на создание новых перспективных материалов с контролируемыми физическими и оптическими параметрами с использованием инновационных технологий синтеза.

Научная школа, основанная академиком Андреем Андриеш, успешно развивает тематику, создаются новые научные центры.

В Институте действует *Лаборатория оптоэлектроники* – продолжатель тематики Лаборатории фотоэлектрических свойств полупроводников, основанной академиком Андриеш. Под руководством заведующего лабораторией, доктора хабилитата Михаила Иову, проводятся исследования оптических, фотоэлектрических и структурных свойств халькогенидных стекол

новых составов, а под руководством доктора наук Виктора Верлана – продолжаются исследования полимерных композиционных материалов на основе координативных ионных комплексов редкоземельных элементов с улучшенными люминесцентными свойствами. Эти материалы, фосфоресцирующие в видимой области спектра, предназначены для покрытий светодиодов, солнечных батарей и других применений в оптоэлектронике и солнечной энергетике. Исследования послужили основой: национальных, международных-двусторонних и международных проектов, выполняемых в последнее время Лабораторией оптоэлектроники.

В рамках *Лаборатории материалов для фотовольтаики и фотоники* ИПФ успешно развивается исследовательская группа, занимающаяся разработкой *цифровых методов регистрации дифракционных элементов* – направление, которое появилось в ИПФ в 2008 году по инициативе академика Андрея Андриеша. Группу возглавляет доктор хабилитат Елена Акимова в прошлом аспирантка профессора Андриеша. Разработана и внедрена цифровая технология вакуумного осаждения *многослойных наноструктур* на основе халькогенидных стекол. Использование цифровой голографии и полученных наноструктур привело к открытию беспрецедентного свойства халькогенидных стекол – *одноэтапной прямой записи голограмм* на поверхности халькогенидного стекла, что позволило получить глубокий рельеф поверхности и готовый к использованию оптический элемент. Отказ от операции химического травления стал важным шагом для практического применения. В последнее время продолжают исследования метода *цифровой записи в поляризованном лазерном свете* дифракционных элементов, таких как линзы Френеля, элементы для получения оптических вихрей, которые пользуются большим спросом как элемент *оптических пинцетов*, позволяющих с помощью лазерного излучения манипулировать микроскопическими объектами. Разработка технологий производства *светочувствительных полимеров* со свойствами, близкими к халькогенидным стеклам, также являющейся идеей академика Андрея Андриеша, представляет собой еще одно весьма интересное направление исследования группы. Результаты не заставили себя долго ждать и опубликованы в престижных научных журналах, докладывались на международных конференциях. Группа выполняла национальные и международные проекты, в том числе проект Horizon2020 с участием известных зарубежных

университетов (Штутгарт и Тампере), в проекте финансируемым ЕС, ИПФ являлся координатором.

Первый аспирант академика Андрея Андриеша, Думитру Циуляну, ныне член-корреспондент АМН, основал *Центр исследования аморфных и наноструктурированных материалов при Техническом университете Молдовы*, директором которого является. Научная деятельность центра связана с фундаментальными и прикладными исследованиями в области физики полупроводниковых халькогенидных стекол бинарных и тройных систем, изучением физических свойств, энергетического спектра электронов, их применением в оптоэлектронике, медицине и защите окружающей среды. Экспериментально обнаружено явление *электростимулированных химических превращений* на границе халькогенного стекла с металлами и *электростимулированной деформации поверхности* соответствующей структуры. Выполнены несколько научно-исследовательских проектов, защищены докторские диссертации, опубликованы статьи в национальных и международных научных журналах.

Ученик академика Андриеша, доктор хабилитат Аурелиан Попеску, продолжил изучение халькогенидных стекол в Румынии. На *академической площадке Мэгуреле* научная школа, успешно занималась изучением аморфных полупроводников. Академик Андриеш плодотворно сотрудничал с представителями этой школы – академиком Раду Григоровичем и профессором Михаем Попеску. В Национальном институте оптоэлектроники в Мэгуреле, в группе Аурелиана Попеску созданы *структуры с поверхностным плазмонным резонансом* на основе аморфных халькогенидных материалов, которые представляют возможный переход между фотоникой и наноэлектроникой. Исследования выполнены в рамках нескольких исследовательских проектов, опубликованы более 50 статей, получено более 10 патентов.

По случаю юбилея, авторы выражают дань памяти академику Андрею Андриешу, сделавшего так много для развития физики, в Республике Молдова. Ментор многих ученых-физиков, которые формировались в научной школе физики аморфных полупроводников и выражают искреннюю благодарность своему учителю.

Авторы признательны Думитру Циулеану, Аурелиану Попеску и Владимиру Абашкину за участие в написании статьи.