

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ШКОЛЬНОМ ПРЕПОДАВАНИИ

*В любой отрасли техники используются свойства твердого тела: механические, тепловые, электрические, магнитные, оптические и т. д. Все большее применение в технике находят кристаллы. в статье приведены примеры изложения некоторых направлений.*

Монокристаллы ряда элементов и многих химических веществ обладают замечательными механическими, электрическими, магнитными и оптическими свойствами. Так, например, алмаз тверже любого другого минерала, встречающегося на Земле. Кристаллы кварца и слюды обладают рядом электрических свойств, обеспечивающих им широкое применение в технике. Кристаллы флюорита, турмалина, исландского шпата, рубина и многие другие находят применение при изготовлении оптических приборов. К сожалению, в природе монокристаллы большинства веществ без трещин, загрязнений и других дефектов встречаются редко. Это привело к тому, что многие кристаллы на протяжении тысячелетий люди называют драгоценными камнями, алмаз, рубин, сапфир, аметист и другие драгоценные камни долгое время ценились людьми очень высоко в основном не за особые механические или другие физические свойства, а лишь из-за своей редкости. Развитие науки и техники привело к тому, что многие драгоценные камни или просто редко встречающиеся в природе кристаллы стали очень нужными для изготовления деталей приборов и машин, для выполнения научных исследований.

Потребность во многих кристаллах возросла настолько, что удовлетворить ее за счет расширения масштабов выработки старых природных месторождений оказалось невозможно. Кроме того, для многих отраслей техники и особенно для выполнения научных исследований все чаще требуются монокристаллы очень высокой химической чистоты с совершенной кристаллической структурой. Кристаллы, встречающиеся в природе, этим требованиям не удовлетворяют, так как они растут в условиях, весьма далеких от идеальных. Таким образом, возникла задача разработки технологии искусственного изготовления монокристаллов многих элементов и химических соединений. Разработка сравнительно простого способа изготовления "драгоценного камня" приводит к тому, что он перестает быть драгоценным. Объясняется это тем, что большинство драгоценных камней является кристаллами широко распространенных в природе химических элементов и соединений. Так, алмаз - это кристалл углерода, рубин и сапфир - кристаллы окиси алюминия с различными примесями.

Применения кристаллов в науке и технике так многочисленны и разнообразны, что их трудно перечислить. Поэтому ограничимся несколькими примерами. Самый твердый и самый редкий из природных минералов - алмаз. За всю историю человечества его добыто всего около 150 т, хотя в мировой алмазодобывающей промышленности сейчас работает почти миллион человек. Сегодня алмаз, в первую очередь, камень-работник, а не камень-украшение. Около 80% всех добываемых природных алмазов и все искусственные алмазы используются в промышленности. Роль алмазов в современной технике так велика, что, по подсчетам американских экономистов, прекращение применения алмазов привело бы к уменьшению мощности промышленности США вдвое. Примерно 80% применяемых в технике алмазов идет на заточку инструментов и резцов - "сверхтвердых сплавов". Алмазы служат опорными камнями (подшипниками) в хронометрах высшего класса для морских судов и в других особо точных навигационных приборах. На алмазных подшипниках не обнаруживается никаких следов износа даже после 25 000 000 оборотов.

Несколько уступая алмазу по твердости, соревнуется с ним по разнообразию технических применений рубин - благородный корунд, окись алюминия  $Al_2O_3$  с красящей

примесью окиси хрома. Мировое производство искусственных рубинов превышает 100 т. в год. Из 1 кг синтетического рубина удастся изготовить около 40 000 опорных камней для часов. Незаменимыми оказались рубиновые стержни на фабриках по изготовлению тканей из химического волокна. На изготовление 1 м ткани из искусственного волокна требуется израсходовать сотни тысяч метров волокна. Нитеводители из самого твердого стекла изнашиваются за несколько дней при протяжке через них искусственного волокна, агатовые способны работать до двух месяцев, рубиновые нитеводители оказываются практически вечными.

Новая область для широкого применения рубинов в научных исследованиях и в технике открылась с изобретением рубинового лазера - прибора, в котором рубиновый стержень служит мощным источником света, испускаемого в виде тонкого светового луча. Исключительная роль выпала на долю кристаллов в современной электронике. Большинство полупроводниковых электронных приборов изготовлено из кристаллов германия или кремния.

*Пьезоэлектрические и пирозлектрические свойства.* В Индии и на Цейлоне с древних времен было известно, что кристаллы турмалина, положенные в горячую золу, сначала притягивали, а затем отталкивали частицы золы. Это явление стало известно в Европе в 1703 г., когда голландские купцы привезли кристаллы турмалина с Цейлона. Карл Линней в 1747 г. дал турмалину научное название: электрический камень (*tapis electricus*). Позже это явление было названо пирозлектричеством. Оно заключается в появлении электрических напряжений на гранях кристалла при нагревании.

Проявления пьезоэлектрических свойств кристаллов впервые были установлены в 1880 г. Сущность этого явления заключается в том, что если к граням таких кристаллов подвести электрическое напряжение, кристаллы деформируются: сжимаются или растягиваются. И наоборот, если сжимать или растягивать пьезокристалл, на его гранях возникают электрические напряжения. Как правило, все пирозлектрические кристаллы являются пьезоэлектриками, но не все пьезоэлектрики обладают пирозлектрическими свойствами. Среди замечательных минералов основными пьезоэлектриками являются монокристаллы кварца и турмалина. Из многочисленных кристаллографических модификаций кварца в качестве пьезоэлектрика используется чаще всего низкотемпературный  $\alpha$ -кварц, устойчивый до температуры 573°C.

Пьезоэлектрические и пирозлектрические свойства кристаллов используются в технике уже много лет. Одно из применений пьезоэлектриков известно буквально каждому. Это звукопередатчики в старых проигрывателях, которые превращают механические колебания иглы на грамподкладной пластинке в электрические токи, которые затем усиливаются и подаются на динамик. На аналогичной основе пьезоэлектрические свойства кристаллов используются в ультразвуковой гидроакустике, дефектоскопии, при изучении свойств газов, жидкостей и твердых тел, для измерения давлений и вибраций, при изготовлении стабилизаторов и фильтров радиочастот. В последнее время пьезокристаллы используются для работы лампы-вспышки при фотографировании. По замыслу и расчетам изобретателя при механическом ударе по кристаллу выделяется количество энергии, достаточное для вспышки электрической лампочки.

Современные технические требования к пьезокристаллам очень высоки: требуется, чтобы в кристалле был участок размером не менее 12x12x1,5 мм без всяких дефектов, трещинок, включений и т. д. Поскольку в природных кристаллах редко удастся найти подобные участки, в технике все более и более используются искусственные кристаллы кварца и других минералов.

*Оптические свойства.* Из различных оптических свойств замечательных минералов в технике ценятся почти те же самые, которые определяют использование этих минералов в качестве украшений: прозрачность, двупреломление, поляризующие свойства и т. д. Многие из нас хорошо знают искусственное "горное солнце" - аппарат, широко применяемый в медицине. При включении этот аппарат излучает удивительный

ультрафиолетовый свет. Лампа в аппарате сделана не из обычного стекла, а из кварцевого, которое в отличие от обычного пропускает инфракрасную, а особенно ультрафиолетовую части спектра света. Эти лучи поистине являются целебными, а кроме того, придают загар человеческой коже.

Применение кварцевой лампы не ограничивается только медициной. Она используется в органической химии, минералогии и других отраслях для изучения веществ в ультрафиолетовых лучах. Даже филателисты при изучении марок прибегают к помощи этой лампы: она позволяет отличать фальшивые марки от настоящих. Кварц употребляется в технике и для других целей. Чистые бездефектные кристаллы горного хрусталя идут на изготовление призм, спектрографов, поляризующих пластинок.

Другим замечательным минералом, применяемым в оптике, является флюорит. Это чистые прозрачные бесцветные или слабо окрашенные кристаллы. Их ценными свойствами являются изотропность, незначительная дисперсия, низкий коэффициент преломления и, так же как у горного хрусталя, высокая способность пропускать инфракрасные и ультрафиолетовые лучи. Флюорит используется для изготовления линз телескопов и микроскопов, для изготовления призм спектрографов и в других оптических приборах. Самое большое значение имеет использование оптических свойств замечательных минералов, связанное с изобретением лазера - оптического квантового генератора. Слово "лазер" представляет собой сокращение английских слов Light amplification by stimulated emission of radiation: усиление света при вынужденном излучении. Принцип работы лазера достаточно сложен, для генерации электромагнитного излучения в нем используется энергия, которая возникает при переходе атомов или электронов из одного энергетического состояния в другое. Первый лазер был создан в 1960 г. на рубине, в котором незначительная часть ионов  $Al_3$  была замещена ионами хрома. Этот лазер излучал яркий свет с длиной волны 694,3 нм. С помощью рубинового лазера было проведено точное определение (локация) расстояния от Земли до Луны. Затраты энергии при этом не превышали энергии сгорания десятка спичек.

В настоящее время применение лазеров в технике все более расширяется. Они используются для изучения физики плазмы, при хирургических операциях, в телевидении для съемки и передачи изображения, для сверления и сварки металлов и т.д. И хотя в последнее время появились лазеры и на других веществах, например, газовые или полупроводниковые лазеры, минерал рубин по-прежнему остается одним из наиболее употребительных материалов. Преимущества рубина заключаются в его выдающихся механических свойствах: в его твердости, теплоупорности и устойчивости в сильно агрессивных условиях. Из других кристаллических веществ для лазеров используются алюминиево-иттриевые гранаты, флюорит и ряд других, преимущественно искусственных, кристаллов.

Области применения минералов все более расширяются, дальнейшее развитие науки продолжает выявлять в них все новые и новые свойства. Рубиновые стекла в иллюминаторах и приборах космических кораблей, световоды из горного хрусталя, позволяющие практически мгновенно передавать с помощью лазерного луча громадное количество информации, алмазы в качестве детекторов ядерных излучений, даже простое перечисление показывает, что замечательные минералы находятся на самом переднем крае науки и техники. Рост потребления минералов не обеспечивается природными месторождениями, поэтому все более и более расширяется синтез минералов, их искусственное производство на заводах.

За последние несколько лет в мировое сознание быстро вошло краткое слово с большим потенциалом. Это слово - «нано». Приставка «нано» - означает одну миллиардную. Один нанометр равен  $1/1000000000$  метра. Нанонаука – это изучение фундаментальных принципов молекулярных структур, по меньшей мере один размер которых равен от 1 до 100 нанометров. Данные элементы называются *наноструктурами*.

*Нанотехнология* – это применение данных наноструктур в полезных наноскопических устройствах.

Кристаллы, подобные соли, сделаны из ионов и называются ионными. Кристаллы, сделанные из атомов, называются атомными, а сделанные из молекул, – молекулярными. Таким образом, соль (хлорид натрия) – это ионный кристалл, а сахар (сахароза,  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) – это молекулярный кристалл. Кристаллы можно выращивать из раствора, используя кристаллы–зародыши, что включает помещение небольшого кристалла в место, где есть больше составляющих его материалов, после чего этим компонентам разрешают имитировать схему маленького кристалла, или зародыша. Кремниевые блоки, используемые для создания микрочипов, создаются, или «выращиваются», именно таким образом.

Разумно выбирая кристаллы – зародыши и условия роста, можно сделать так, чтобы кристаллы имели необычные формы. Чарльз Либер и его группа в Гарвардском университете использовали наноразмерные кристаллы для выращивания длинных, стержнеподобных кристаллов углеродных нанотрубок, таких структур, как фосфид иридия или арсенид галлия, и таких атомных кристаллов, как кремний. Данные нанопровода имеют поразительные проводящие свойства, а также используются во многих областях оптики и электроники.

Для сборки наноструктур используются некоторые совсем новые полумолекулярные компоновочные блоки. Двумя такими наноструктурами являются углеродные нанотрубки и наностержни, которые можно сделать из кремния, других полупроводников, металлов или даже диэлектриков.

Все знают графит как черный материал в карандашах. Наночученые очень интересуются ими, поскольку при скручивании в трубку такие сетки имеют удивительные свойства. Такие цилиндры графита называются углеродными нанотрубками. *Нанотрубки* – это один из первых наноразмерных структур, построенных на молекулярном уровне, и они демонстрируют действительно захватывающие физические и электрические свойства.

Оценки специалистов относительно того, насколько прочной может быть углеродная нанотрубка, расходятся, но лабораторные исследования уже показали, что их предел прочности при растяжении может в 60 раз превышать значения для высококачественной стали. Многие ученые утверждают, что нанотрубки – это не только прочнейшие материалы из когда-либо созданных, они входят в число прочнейших материалов, которые вообще можно создать. Нанотрубки не только имеют указанную прочность, но они к тому же еще легкие и гибкие.

Физические свойства нанотрубок достаточно поразительны, но их электрические свойства могут оказаться даже еще более захватывающим. Изучая форму нанотрубки, ученые предсказали, что электроны могут проноситься по трубке, как по проводнику. Нанотрубки ведут себя подобно сверхпроводникам, проводя электричество без сопротивления. Опыты других ученых показали, что нанотрубки ведут себя как полупроводники. Существующая теория утверждает, что нанотрубки могут действовать либо как сверхпроводники, либо как полупроводники, в зависимости от точных пропорций трубки и того, какие материалы, кроме углерода, введены в матрицу трубы.

Не все нанотрубки сделаны из углерода. Кремниевые нанотрубки также широко распространены, хотя неуглеродные трубки называются нанопроводами. Разносторонние электрические свойства данных нанотрубок и нанопроводов в настоящее время изучаются для получения наноскопических электронных устройств.

С середины прошлого века в астрономии стал применяться фотографический метод регистрации излучения. В настоящее время он занимает ведущее место в оптических методах астрономии. Длительные экспозиции на высокочувствительных пластинках позволяют получать фотографии очень слабых объектов, в том числе таких, которые практически недоступны для визуального наблюдения. В отличие от глаза, фотографическая эмульсия способна к длительному накоплению светового эффекта.

Очень важным свойством фотографии является панорамность: одновременно регистрируется сложное изображение, которое может состоять из очень большого числа элементов. Существенно, наконец, что информация, которая получается фотографическим методом, не зависит от свойств глаза наблюдателя, как это имеет место при визуальных наблюдениях. Фотографическое изображение, полученное однажды, сохраняется как угодно долго, и его можно изучать в лабораторных условиях. Фотографическая эмульсия состоит из зерен галоидного серебра ( $\text{AgBr}$ ,  $\text{AgCl}$  и др.; в различных сортах эмульсии применяются разные соли), взвешенных в желатине. Под действием света в зернах эмульсии протекают сложные фотохимические процессы, в результате которых выделяется металлическое серебро. Чем больше света поглотилось данным участком эмульсии, тем больше выделяется серебра, область спектра 3000-5000 Е называют иногда фотографической (аналогично визуальной, 3900-7600 Е). Чтобы сделать эмульсию чувствительной к желтым и красным лучам, в нее вводят органические красители – сенсibilизаторы, расширяющие область спектральной чувствительности. Панхроматические эмульсии – это сенсibilизированные эмульсии, чувствительные до 6500 - 7000 Е (в зависимости от сорта). Кривые спектральной чувствительности различных эмульсий широко применяются в астрономической и обычной фотографии. Значительно реже встречаются инфрахроматические эмульсии, чувствительные к инфракрасным лучам до 9000 Е, иногда и до 13000 Е. Звезды на фотографиях выходят в виде кружков. Чем ярче звезда, тем большего диаметра получается кружочек при данной экспозиции. Различие в диаметрах фотографических изображений звезд является чисто фотографическим эффектом и никак не связан с их истинными угловыми диаметрами. Научной обработке подвергаются, как правило, только сами негативы, так как при перепечатке искажается заключенная в них информация.

В астрономии используются как стеклянные пластинки, так и пленки. Пластинки предпочтительнее в тех случаях, когда по негативам изучается относительное положение объектов. Сравнивая между собой фотографии одной и той же части неба, полученные в разные дни, месяцы и годы, можно судить об изменениях, которые в этой области произошли. Так, смещение малых планет и комет (когда они находятся далеко от Солнца и хвост еще не заметен) среди звезд легко обнаруживается при сравнении негативов, полученных с интервалом в несколько суток.

Собственные движения звезд, а также отдельных сгустков межзвездного вещества в газовых туманностях изучаются по фотографиям, полученным через большие интервалы времени, иногда достигающие многие десятилетия. Изменение блеска переменных звезд, вспышки новых или сверхновых звезд тоже легко обнаруживаются при сравнении негативов, полученных в разные моменты времени. Для исследования подобных изменений используются специальные приборы – стереокомпаратор и блинк-микроскоп. Стереокомпаратор служит для обнаружения перемещений. Он представляет собой своего рода стереоскоп. Обе пластинки, снятые в разное время, располагаются так, что исследователь видит их изображения совмещенными. Если какая-либо звезда заметно сместилась, она «выскочит» из картинной плоскости. Блинк-микроскоп отличается от стереокомпаратора тем, что специальной заслонкой можно закрывать либо одно, либо другое изображение. Если эту заслонку быстро колебать, то можно сравнивать не только положения, но и величины изображений звезд на обеих пластинках. Изменение положения или изменение звездной величины при этом легко обнаруживаются.

Точные измерения положения звезд на пластинках производятся на координатных измерительных приборах. Почернение негатива приблизительно определяется произведением освещенности  $E$  на продолжительность экспозиции  $t$ . Этот закон называется *законом взаимозаместимости*. Он выполняется более или менее хорошо лишь в ограниченном интервале освещенности, для каждого сорта эмульсии, при которых он наиболее эффективен. В частности, очень чувствительные кино- и фотопленки, предназначенные для коротких экспозиций, не пригодны для длительных, применяемые в

астрономии. Фотография позволяет проводить фотометрические исследования астрономических объектов, т.е. определять количество, их яркость и звездную величину. Для этого необходимо знать зависимость почернения негатива от освещенности – провести калибровку негатива. Чтобы измерить степень почернения, надо пропустить сквозь негатив световой пучок, интенсивность которого регистрируется. Чтобы построить характеристическую кривую, на эмульсию впечатывается изображение нескольких (обычно порядка п) площадок, освещенность которых находится в известном отношении. Эта операция называется *калибровкой* негатива. Зная характеристическую кривую, можно сравнивать освещенности, соответствующие различным точкам негатива, и в случае протяженных объектов, таких как туманности или планеты, построить их щофоты. Этого достаточно для относительной фотометрии (т.е. измерения отношения яркости и блеска).

Для абсолютной фотометрии (т.е. измерения абсолютных значений яркости и блеска) необходимо провести, кроме калибровки, еще и стандартизацию. Для стандартизации надо впечатать на эмульсию изображение площадки с известной яркостью (для протяженных источников) или иметь на негативе звезды с известными звездными величинами. При относительной фотометрии точечных объектов калибровка делается обычно по звездам с известным блеском. Для измерения почернения негатива применяются фотоэлектрические микрофотометры. В этих приборах интенсивность светового пучка, прошедшего сквозь негатив, измеряется фотоэлементом. Главный недостаток фотографической пластинки приемника излучения – это нелинейная зависимость почернения от освещенности. Кроме того, почернение зависит от условий обработки. В результате точность фотометрических измерений, производимых фотографическим методом, обычно не превышает 5-7 %.

Развитие физики твердого тела и достижения в области твердотельной технологии обеспечили возможность промышленного изготовления стабильных фотоприемников, пригодных для эксплуатации в инфракрасной бортовой оптико-электронной аппаратуре. Успехи в этих областях знаний позволили создать в последние годы линейки и матрицы приемников с высокой плотностью чувствительных элементов. Для формирования выходного сигнала аппаратуры необходимо поочередно измерить электрические сигналы, поступающие с каждого элемента линейки. Можно сказать, должно быть обеспечено последовательное подключение электрических проводников от отдельных элементов к общему выходу. Путем такого «опроса» чувствительных площадок, расположенных в ряд, вырабатывается электрический сигнал, соответствующий одной строке изображения. Процесс переключения электрических цепей чувствительных элементов в аппаратуре осуществляется специальным электронным переключателем последовательного действия. В итоге линейка приемников обеспечивает строчное сканирование изображения электронным, а не механическим способом. В новейших наиболее перспективных образцах инфракрасной аппаратуры все чаще используются твердотельные схемы, обеспечивающие прием и обработку сигнала с линейки или матрицы в одном устройстве.

Первых два коротких сообщения группы американских исследователей об этой новой идее в области физики твердого тела и об ее экспериментальной проверке появились в 1970 году. Приборы с *зарядовой связью* – так был назван этот класс устройств – привлекали к себе чрезвычайный интерес и за прошедшие после их изобретения годы нашли самое широкое применение в устройствах формирования изображений в вычислительной технике, в устройствах отображения информации. С точки зрения физики приборы с зарядовой связью интересны тем, что электрический сигнал в них представлен не током или напряжением, а электрическим зарядом. Прибор с зарядовой связью представляет собой линейку электродов на изолирующей основе. Нанесенной на поверхность тонкой пластины полупроводника. Обычно под металлическими электродами расположен изолирующий слой окисла  $\text{SiO}_2$ , а в качестве полупроводникового материала

используется Si. В результате образуется как бы сэндвич: металл – окисел – полупроводник. В приборах с зарядовой связью появляется возможность, подавая напряжение на металлические электроды, воздействовать через изолятор на положение энергетического уровня, сдвигая его вниз от горизонтальной линии в местах расположения электродов. В итоге на границе раздела Si - SiO<sub>2</sub> энергетическая диаграмма будет представлять собой не ровную, а холмистую поверхность, на которой впадины будут расположены под теми электродами, к которым приложено напряжение. Для наглядности впадины этого рельефа на энергетической диаграмме представляют в виде ямы с плоским дном и вертикальными стенками.

### **Литература**

1. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи/ Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Д. Вильямс», 2004. -240 с.
2. Крутский А.Н., Косихина О.С. Психодидактика: новые технологии в преподавании физики // Первое сентября. Физика. -2005.
3. Меркулов Д. Магия жидких кристаллов. // Наука и жизнь, № 12, 2004, с. 126-128.
4. Мааткеримов Н.О. Теоретические основы нормирования процесса обучения молекулярной физике. – Каракол: Педагогика, 2002, 120 с.