

1. Общие принципы работы поляризационных и измерительных приборов

1.1. Призма Николя и поляризатор

Призма Николя (или просто **николь**) и родственные ей поляризующие устройства используют известный из курса оптики эффект *двойного лучепреломления* в анизотропных кристаллах. Такие кристаллы имеют некоторое выделенное направление, которое называется **оптической осью кристалла**. Эффект двойного лучепреломления заключается в том, что падающий на кристалл пучок света пространственно разделяется на два линейно поляризованных пучка. Векторы поляризации обоих пучков (совпадающие с направлением векторов электрического поля в световой волне) перпендикулярны друг другу.

Призма Николя схематически изображена на рис. 1. Она состоит из двух кристаллов исландского шпата (CaCO_3), разделенных прослойкой канадского бальзама. Коллимированный пучок света падает на переднюю грань призмы. Внутри призмы пучок разделяется на два. Пучок или луч, поляризованный перпендикулярно плоскости рис. 1, называется **обыкновенным лучом** и обозначается символом «*o*». Оставшийся луч поляризован в плоскости рисунка. Он носит название **необыкновенного луча** и обозначается символом «*e*». Пучок необыкновенных лучей *AE* проходит сквозь слой канадского бальзама и выходит через заднюю грань призмы. Пучок обыкновенных лучей *AO* испытывает полное внутреннее отражение на границе раздела «исландский шпат — канадский бальзам» и выходит через боковую поверхность призмы. Таким образом пучки света с различной поляризацией оказываются пространственно разделенными. Далее мы всегда будем пренебрегать отражением света от граней призмы и поглощением света внутри призмы Николя. Мы предполагаем, что во всех обсуждаемых ниже «мысленных экспериментах» призма абсолютно разделяет в пространстве необыкновенный и обыкновенный лучи, каждый из которых обладает 100%-й поляризацией.

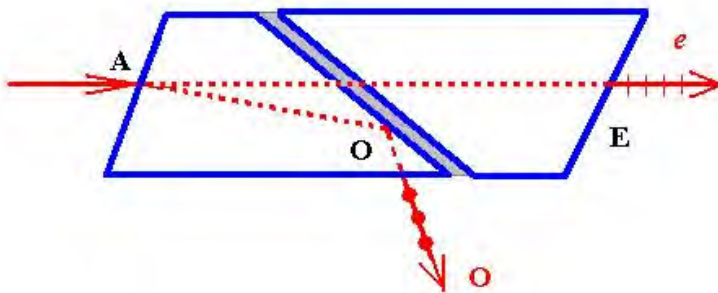


Рис. 1: Схематическое изображение призмы Николя. Оптическая ось призмы лежит в плоскости рисунка. Обыкновенный луч «*o*» поляризован перпендикулярно плоскости рисунка. Обыкновенный луч испытывает полное внутреннее отражение от границы раздела «исландский шпат — канадский бальзам» (серая прослойка на рисунке) и выходит из боковой грани призмы. Необыкновенный луч «*e*» поляризован параллельно плоскости рисунка. Этот луч проходит границу раздела без отражения и выходит из торцевой грани призмы Николя

Имеется широкий класс кристаллов, (к ним относится, например, кристалл турмалина), в которых при малой толщине кристалла (~ 1 мм) обыкновенный луч поглощается практически полностью, а необыкновенный поглощается слабо. Подобные кристаллы называются **поляризаторами**. Если на поляризатор, выполненный из кристалла турмалина, падает пучок света, то из поляризатора выходит пучок, линейно поляризованный вдоль оптической оси турмалина.

Основными характеристиками светового пучка являются спектр и интенсивность входящих в него волн. Чтобы не усложнять и без того непростые рассуждения, ниже всегда будем полагать, что все световые пучки строго монохроматичны и обладают частотой, лежащей в области видимого света. Для упрощения дальнейших рассуждений будем считать, что интенсивность моно-

хроматической волны в точности равна квадрату модуля электрического вектора⁶.

Задача. Пусть на идеальный поляризатор падает монохроматический пучок света интенсивности I_0 , линейно поляризованный под углом α к оптической оси поляризатора. Показать, что интенсивность прошедшего пучка I связана с I_0 соотношением

$$I = I_0 \cos^2 \alpha.$$

1.2. Наблюдатель, макроприбор и микромир

Человек — житель макромира. Его тело содержит порядка 10^{29} микрочастиц. В основном это электроны, протоны и нейтроны. Все органы чувств человека, при помощи которых он воспринимает информацию об окружающем мире, рассчитаны на макроскопические воздействия. Поэтому жаждущий нового знания человек (по-научному он называется **наблюдателем**) может исследовать микромир только при помощи приборов, конечный элемент которых отображает информацию в *макроскопических понятиях*, например, в виде отклонения стрелки на шкале амперметра или появления сигнала на экране осциллографа. В квантовой теории измерительные приборы, обладающие указанным выше свойством, носят название **макроприборов**.

Следовательно, *наблюдатель может исследовать микромир только при помощи макроприборов и выражать результаты измерения различных физических свойств микрообъектов исключительно в виде непротиворечивого сочетания макроскопических понятий*. Но что значит — исследовать микромир при помощи макроприборов? Если призвать на помощь аналогию, то это примерно то же самое, что играть на бильярде при помощи карьерных экскаваторов (см. рис. 2). Пока сделаешь один удачный удар, раздавишь несметное

⁶В стандартных курсах оптики доказывается, что имеет место не точное равенство, а лишь пропорциональность. Однако отсутствие коэффициента пропорциональности никак не скажется на всех приводимых ниже рассуждениях.



Рис. 2: Возможно, читатели этой книги никогда не видели карьерный экскаватор. Для примера приведем фотографию экскаватора ЭКГ-12 производства Уральского завода тяжелого машиностроения (УЗТМ). Ширина гусеницы этого экскаватора около двух метров, а в ковше без особого труда могут поместиться несколько бильярдных столов

число шаров и поломаешь огромное число столов! Представляется интуитивно вполне понятным, что в процессе измерения макроскопическим прибором *любой* микросистемы исходное (или **начальное**) состояние микросистемы *необратимо разрушается*⁷. И микросистема случайным образом переходит в **конечное** состояние, которое, вообще говоря, должно зависеть от того, какая физическая характеристика микросистемы измерялась. Поэтому можно предпо-

⁷На самом деле, в этом месте интуиция нас подводит. В последние лет двадцать идет активное изучение так называемых «мягких» или «неразрушающих» измерений, которые не приводят к существенным изменениям состояния микросистемы. Однако глубокое понимание процедуры «мягких» измерений возможно только после построения квантовой теории с измерениями, разрушающими исходное состояние. Только такие «жесткие» измерения будут изучаться в настоящей главе.

ложить, что в отличие от детерминистической классической физики, где влиянием измерения на измеряемый объект можно пренебречь, физика микромира должна строиться как принципиально вероятностная теория.

Классические аналогии квантовых явлений *всегда* содержат изрядную долю лукавства. Вдумчивый читатель, надеемся, заметил, что аналогия с бильярдом и карьерными экскаваторами не полностью отражает суть измерения микросистемы макроприбором. Если после экскаватора столы и шары уже непригодны к дальнейшему использованию, то квантовая система после измерения переходит в другое состояние, над которым, в свою очередь, можно проводить новые измерения при помощи любых подходящих макроприборов.

Поскольку взаимодействие макроприбора с микросистемой необратимо разрушает состояние последней, то для получения информации о начальном состоянии микросистемы квантовая парадигма требует проведения серии измерений над большим числом микросистем, которые находятся в одинаковых начальных состояниях⁸. Каждое измерение дает небольшую порцию информации о начальном состоянии микросистемы. Относительно полная информация появляется у наблюдателя после большого числа измерений. Совокупности одинаково приготовленных микросистем получили название **квантовых ансамблей**. Возможность приготовления квантовых ансамблей макроскопическими средствами представляется априори не очевидной. Мы полагаем подобную возможность осуществимой. В параграфе 5.2 будут представлены аргументы в пользу этой точки зрения.

В качестве измерительных приборов в «мысленных экспериментах» этого раздела будут выступать фотоэлектронные умножители (ФЭУ), преобразующие интенсивность падающего света в электрический ток, и цифровые амперметры, дающие наблюдателю информацию о силе тока в макроскопических терминах (наборе цифр в окошечке амперметра). Будем полагать ФЭУ и амперметры идеальными. Это значит, что у ФЭУ отсутствует темновой ток и во

⁸Обычно говорят о *специально приготовленных* микросистемах, которые находятся в одинаковых начальных состояниях.

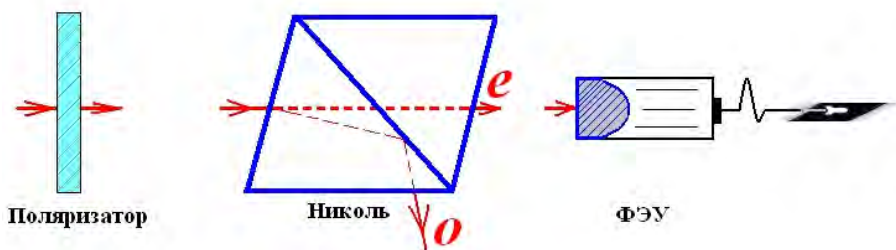


Рис. 3: Условные обозначения поляризатора (слева), призмы Николя (в центре) и ФЭУ (справа), которые будут использоваться при описании «мысленных экспериментов»

всех измерениях сохраняется прямая пропорциональность между током на выходе ФЭУ и интенсивностью падающего света, то есть $J_{\text{ФЭУ}} \sim I$. Амперметры обладают абсолютной чувствительностью к сигналу ФЭУ и полной нечувствительностью к любым иным паразитным токам. Условные обозначения призмы Николя, поляризатора и ФЭУ представлены на рис. 3.