

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск,
Республика Беларусь

Стратегической задачей курса физики в техническом вузе является фундаментальная подготовка будущих инженеров и исследователей на базе физических принципов, имеющих общенаучное и междисциплинарное значение. О такого рода принципах речь идет в частности в работах [1,2]. В данном сообщении рассматривается принцип когерентности, используемый для описания кооперативных явлений как в классических, так и в квантовых системах.

Понятие когерентности, определяющее согласованное протекание во времени нескольких колебательных или волновых процессов, возникло в классической теории колебаний для описания явлений интерференции и дифракции. На современном этапе это понятие вышло за рамки одного раздела физики, превратившись в общенаучное. Согласно классической теории когерентности при суперпозиции двух или нескольких колебаний (волн), разность фаз которых остается постоянной, возникает явление интерференции. Для наблюдения интерференции света (электромагнитного поля в оптической области спектра) необходимо обеспечить сложение волн от одного источника либо делением волнового фронта (например, с помощью схемы Юнга) либо делением амплитуды (интерферометр Майкельсона). При этом интерференционная картина, образованная светом от обычных источников, имеет свои временные и пространственные границы, обусловленные немонахроматичностью и неточечностью источника, определяющие соответственно временную и пространственную составляющие когерентности.

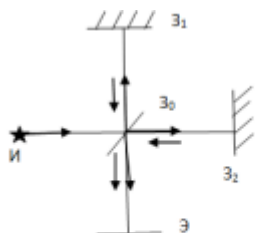


Рис. 1

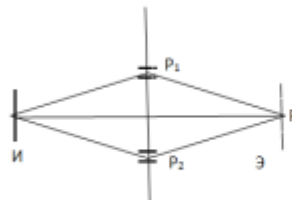


Рис. 2

Интерференционная картина, возникающая вследствие временной когерентности двух волн, наблюдается в интерферометре Майкельсона (рис. 1). Свет от точечного источника И делится полупрозрачным зеркалом 30 на две волны. Отраженные от зеркал 31 и 32 волны соединяются, имея разность хода $c\Delta t$ (c — скорость света). Интерференция наблюдается при условии $\Delta\omega \Delta t \ll 1$, где $\Delta\omega$ — ширина спектрального интервала. Максимальное значение Δt — время когерентности, а соответствующая ему оптическая длина пути — длина когерентности. В реальных волнах амплитуда и фаза меняются не только в направлении распространения, но и в перпендикулярной плоскости. Интерференционная картина, обусловленная пространственной когерентностью, наблюдается в интерферометре Юнга (рис. 2). Для появления интерференционных полос на экране Э от протяженного источника И максимальное расстояние P_1P_2 , называемое радиусом когерентности $r_{\text{ког}}$, должно определяться выражением $r_{\text{ког}} \leq \lambda/\phi$, где ϕ — относительный угловой размер источника (отношение геометрического размера источника к расстоянию до него). Произведение длины временной когерентности на площадь круга, радиус которого равен радиусу когерентности, называется объемом когерентности. Экспериментально степень когерентности оценивается контрастностью интерференционных полос, то есть β соотношением максимумов и минимумов интенсивности I : $(I_{\text{max}} - I_{\text{min}})/(I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$. Тепловые источники света с

некоррелированно излучающими атомами и молекулами имеют невысокую степень когерентности.

Ситуация существенно изменилась с появлением квантовых генераторов когерентного электромагнитного излучения, в основе действия которых лежит корреляция элементарных излучателей. Эта корреляция возникает за счет явления индуцированного излучения, которое когерентно (находится в фазе) с падающим излучением, что и обуславливает синхронизацию излучателей. Если индуцированный процесс преобладает над процессом поглощения, излучение будет усиливаться. Очевидно, усиливающая (активная) среда должна быть неравновесной. Чтобы усилитель превратить в генератор, необходимо ввести положительную обратную связь. В лазере активную среду помещают в резонатор – систему зеркал, одно из которых делается частично прозрачным. Лазерное излучение обладает очень высокой степенью когерентности – объем когерентности в 10^{17} раз превышает соответствующий объем от лучшего нелазерного источника той же интенсивности. С когерентностью связаны и другие замечательные свойства лазерного излучения: направленность, обусловленная генерацией только волн, распространяющихся вдоль оси резонатора; высокая монохроматичность определяемая усилением волн определенной частоты, соответствующей собственному колебанию (моду) резонатора; высокая мощность излучения, испускаемого с поверхности источника в единичный телесный угол, на несколько порядков превосходящая этот показатель обычных источников. Эти свойства находят широкое применение в науке, медицине, технологии, коммуникациях и других областях, где требуются высокая точность измерений и контроля. Когерентная оптика обеспечила качественно новые решения в записи, преобразовании, обработке и передаче информации. Важнейшая роль здесь принадлежит голографии. Голографический метод представляет собой двухступенчатый процесс формирования изображения, в котором регистрируется интерференционная картина, создаваемая рассеянным исследуемым объектом излучением и когерентным фоном опорной волны. Зарегистрированное на фотоносителе изображение называется голограммой. Пропуская через голограмму опорную волну, можно полностью восстановить изображение объекта. При голографической записи используется практически вся информация о структуре света, пришедшего от объекта, т.е. распределение амплитуд, фаз, поляризации, что и обеспечивает уникальные свойства голограмм.

Когерентные эффекты в физике не исчерпываются когерентными свойствами излучения. С созданием квантовой механики стало ясно, что волновые свойства присущи не только излучению, но и веществу. Любой частице вещества ставится в соответствие волна де Бройля, длина которой выражается через массу m , скорость v частицы и постоянную Планка h : $\lambda = h/mv$. В основе квантовой механики лежит понятие волновой функции (или ψ - функции), квадрат модуля которой задает вероятность нахождения частицы в определенной точке пространства (или в определенном энергетическом состоянии). Наличие волновых свойств у вещества позволяет поставить вопрос о его когерентности, то есть о синхронизации фаз ψ - функций отдельных частиц, атомов или молекул, находящихся в суперпозиции состояний. Когерентные состояния квантовой системы представляются такими волновыми пакетами, которые максимально адекватны классической картине движения: в соотношении неопределенностей Гейзенберга произведение неопределенностей координаты и импульса достигает минимума, то есть когерентные состояния - это квантовые состояния, максимально близкие к классическим.

Изучение когерентных свойств вещества началось с явления сверхпроводимости, носящего коллективный (или кооперативный) характер. Сверхпроводимость обусловлена взаимодействием электронов с кристаллической решеткой, сопровождающееся образованием связанных пар электронов с противоположными спинами – куперовских пар. В результате для всей совокупности электронов образуется единое состояние, характеризующееся фазовой 62

когерентностью, Согласованное движение куперовских пар, имеющих одинаковую фазу, и представляет собой сверхпроводящий ток.

В 1962 г. английский физик Б.Д. Джозефсон предсказал два новых эффекта, связанных с фазовыми соотношениями. Он рассмотрел два сверхпроводника со своими фазами ϕ_1 и ϕ_2 , разделенных тонким (1 нм) слоем диэлектрика (переход или контакт Джозефсона). Согласно законам квантовой механики через такой переход может туннелировать сверхпроводящий ток. Это явление получило название стационарного эффекта Джозефсона. Важно отметить, что в этом эффекте такое макроскопическое явление как электрический ток обусловлено квантовой характеристикой - фазой ψ -функции. Если к контакту приложить постоянное напряжение, то через него потечет переменный сверхпроводящий ток, генерирующий электромагнитные волны – в этом заключается нестационарный эффект Джозефсона. Частота излучения ν связана с величиной напряжения U на переходе соотношением: $\nu = 2eU/h$, в котором заряд ($2e$) соответствует заряду куперовской пары. Фазовые соотношения, когерентность играют принципиальную роль в эффектах Джозефсона. Так экспериментально наблюдалась интерференция токов, проходящих через два параллельно включенных перехода. Это явление оказывается аналогом интерференции оптических волн от двух щелей. Здесь интерференция обусловлена различием в фазах, с которыми сливаются сверхпроводящие токи, пришедшие по двум разным путям. Зависимость критического тока, протекающего через переход, от величины внешнего магнитного поля позволяет использовать интерферометры на базе эффекта Джозефсона (СКВИДы) для чрезвычайно точного измерения слабых магнитных полей (до 10^{-13} Тл). Такие интерферометры широко используются в науке и технике, в частности, для целей медицинской диагностики, так как электрические токи в живых организмах генерируют очень слабые магнитные поля.

Таким образом, измерительная техника, принцип действия которой основан на когерентных явлениях, обеспечивает самую высокую точность измерений, что делает ее использование неотъемлемой частью инженерного проектирования. Кроме того, понимание когерентных эффектов необходимо для разработки таких перспективных систем, как квантовые коммуникационные системы или квантовые компьютеры, где принцип когерентности играет ключевую роль, и других технологий будущего.

Список литературы

1. Савилова Ю. И. О принципе Ле Шателье-Брауна в курсе физики технического ВУЗа/С. В. Родин, Ю. И. Савилова // материалы XIII Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 25-26 марта 2021 г. / Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина – Мозырь, 2021 – С. 59-60;
2. Савилова Ю. И. Принцип наименьшего действия в курсе физики технического ВУЗа/С. В. Родин, Ю. И. Савилова // Физика в учреждениях общего среднего и высшего образования: традиции и инновации: сборник материалов Республиканской научно-методической конференции, Брест, 14-15 октября 2021 года / Брестский государственный технический университет – Брест, 2021 – С. 63-6