



# ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ

Авторы: Ю. П. Тимофеев

---

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ в конденсированных средах, безызлучательная передача энергии электронных возбуждений (вызванных поглощением фотона, воздействием электрич. поля, нагреванием и др.) от одних атомов, ионов, молекул, называемых донорами, к др. атомам, ионам, молекулам, называемым акцепторами. Наблюдается при превышении критич. концентраций доноров (молярная доля обычно более  $10^{-3}$ ) и акцепторов (молярная доля обычно более  $10^{-6}$ ). В этих условиях П. э. происходит за время, соизмеримое со временем жизни возбуждённых состояний излучательных переходов (от  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  с для запрещённых переходов, напр. в ионах РЗЭ, до  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с для разрешённых переходов, напр. в молекулах органич. красителей).

Следствием П. э. является существенное изменение оптич. свойств люминофоров, лазерных кристаллов и стёкол с ионами РЗЭ. К таким изменениям относятся: концентрационное [тушение люминесценции](#), сенсбилизация – повышение интенсивности свечения акцепторов (в т. ч. после прекращения импульсного возбуждения) с одновр. сдвигом излучения в сторону длинноволновой части спектра, антистоксовое преобразование ИК-излучения в видимый свет при суммировании энергии электронных возбуждений двух или более ионов РЗЭ на одном из них. Эффективность П. э. от доноров к акцепторам значительно увеличивается благодаря [миграции энергии](#) к соседним донорам. Так, в листьях растений и др. фотосинтезирующих средах сотни молекул хлорофилла образуют светособирающую антенну, от которой энергия первичных возбуждений передаётся одному и тому же реакционному центру, ответственному за фотохимич. реакции.

Предположение о возможности безызлучательного П. э. возникло в 1920-х гг. при изучении [люминесценции](#) растворов органич. красителей. Для таких сред рос. физики

С. И. [Вавилов](#) и В. Л. Лёвшин развили феноменологич. теорию концентрационного тушения люминесценции без конкретизации механизма П. э. В работах франц. физиков Ж. и Ф. Перренов предложен резонансно-индукционный механизм П. э. (по аналогии с взаимодействием двух электрич. диполей, расположенных на расстояниях, существенно меньших длины волны соответствующего излучения). Вероятность элементарного акта такого переноса определяется формулой Фёрстера – Декстера – Галанина, выведенной на основе классич. и квантовомеханич. теорий. Эта вероятность зависит от соотношения длины волны оптич. излучения доноров и акцепторов, расстояния между ними, характеристик излучательных переходов (их вероятностей, мультипольностей и анизотропии), величины перекрытия оптич. спектров доноров и акцепторов. Совр. микроскопич. теории учитывают наличие разных расстояний между донорами и акцепторами, а также обратный П. э. от акцепторов к донорам и участие фононов в этих процессах. Такие теории позволяют объяснить значит. число экспериментов по наблюдению спектров поглощения и люминесценции разл. сред.

В молекулярных кристаллах (напр., антрацен), а также в полупроводниковых кристаллах (напр., CdS) П. э. может осуществляться экситонами, которые перемещаются на расстояния, превышающие длину волны оптич. излучения, – до 1–2 мкм. В активированных кристаллофосфорах П. э. между центрами излучательной и безызлучательной рекомбинации происходит благодаря диффузии неравновесных носителей заряда: электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. В некоторых средах возможно сосуществование разл. механизмов П. э. Интерес к П. э. в значит. мере обусловлен поиском новых композиционных материалов для светоизлучающих диодов и солнечных батарей, а также для создания искусств. фотосинтезирующих сред. К таким материалам относятся, напр., органич. плёнки с ионами РЗЭ.

## Литература

Лит.: Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. Л., 1977;  
Галанин М. Д. Люминесценция молекул и кристаллов. М., 1999.