

образуются в холодных ($T = 20-100$ К) областях СИ с концентрацией электронов $0,1-1$ см $^{-3}$. Ширины Р. р. с $n > 100$ оказались в резком противоречии с теорией штарковского уширения спектральных линий в плазме, что дало толчок к пересмотру теории. Лишь в результате почти 20-летних усилий по улучшению теории и совершенствованию методов наблюдения удалось достичь согласия между теоретич. и наблюдаемыми ширинами Р. р. высших порядков.

Условия, при к-рых могут наблюдаться Р. р., довольно жёсткие: с одной стороны, концентрация частиц в среде должна быть достаточно малой, иначе эффекты *уширения спектральных линий* давлением размоют линии и сделают их ненаблюдаемыми, с др. стороны — число высоковозбуждённых атомов на луче зрения должно быть достаточно велико. Такие условия выполняются только в очень протяжённых и разреженных космич. объектах (туманностях и межзвёздной среде). Зарегистрированы Р. р. H, He, C, Si и, возможно, нек-рых др. элементов в диапазоне длин волн от неск. миллиметров до 20 м с главными квантовыми числами от 30 до 747. Соответствующие им атомы достигают макроскопич. размеров (до 0,1 мм). Структура высоковозбуждённых состояний атомов водородоподобна. Частоты Р. р. вычисляются по ф-ле Ридберга. Вследствие *изотопического сдвига* Р. р. H и He наблюдаются раздельно. Линия обильного в межзвёздной среде углерода и более тяжёлых элементов сливаются в одну бленду (полосу). С ростом n и Δl интенсивность Р. р. резко падает. Наблюдались Р. р. вплоть до $\Delta l = 6$.

В разреж. плазме туманностей и межзвёздной среде населённость атомных уровней отклоняется от термодинамически равновесной. В радиодиапазоне $h\nu \ll kT$, поэтому даже слабое отклонение населённостей уровней от термодинамически равновесной может приводить к заметному мааерному эффекту в Р. р.

Р. р. — важный диагностич. инструмент совр. астрофизики. Радиоизлучение не поглощается пылевым компонентом межзвёздной среды, поэтому в радиодиапазоне Галактика в осн. прозрачна. Это позволяет наблюдать в Р. р. очень удалённые объекты, к-рые из-за *межзвёздного поглощения* не наблюдаются в оптич. диапазоне. Р. р. позволяют также исследовать динамику ионизов. водорода в Галактике, темп-ру, содержание гелия и др. характеристики зон НII. Р. р. также обнаружены в спектрах др. галактик.

Лит.: Каплан С. А., Пикельнер С. Б., Физика межзвёздной среды, М., 1979; Radio recombination lines, ed. by P. A. Shaver, Dordrecht, 1980; см. также лит. при ст. Ридберговские состояния.

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ЦЕНТРЫ — дефекты или примесные атомы (ионы) в кристаллич. решётке, на к-рых происходит рекомбинация электронно-дырочной пары (см. *Рекомбинация носителей заряда*). Процесс осуществляется путём последоват. захвата электрона и дырки центром. Энергетич. уровни Р. ц. лежат в запрещённой зоне, и центр обменивается носителями заряда с зоной проводимости (c) и валентной дырочной зоной (v) посредством процессов термич. испускания электронов из заполненного Р. ц. в зону c (с вероятностью в единицу времени g_a) и дырки из пустого Р. ц. в зону v (с вероятностью g_d), а также обратных процессов захвата свободного электрона на пустой Р. ц. (вероятность K_a) и свободной дырки на заполненный Р. ц. (K_d). Величины g_a, g_d, K_a, K_d определяются сечениями захвата электрона и дырки σ_a, σ_d , их тепловыми скоростями v_a, v_d , энергетич. расположением \mathcal{E} уровня Р. ц. и краёв зон ($\mathcal{E}_c, \mathcal{E}_v$), кратности вырождения уровня Р. ц. γ , статистич. факторами s и v -зон (N_c, N_v). Они являются ф-циями темп-ры T и концентраций свободных электронов n и дырок p (при отсутствии вырождения):

$$K_a = \sigma_a \bar{v}_a; \quad K_d = \sigma_d \bar{v}_d / p;$$

$$g_a = \sigma_a \bar{v}_a \gamma N_c \exp \{-(\mathcal{E}_c - \mathcal{E})/kT\};$$

$$g_d = \sigma_d \bar{v}_d \gamma^{-1} N_v \exp \{(\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_v)/kT\}.$$

Для Р. ц. справедливы соотношения

$$K_d \gg g_a, \quad K_a \gg g_d,$$

т. е. заполненный электроном Р. ц. со значительно большей вероятностью захватывает дырку, чем испускает электрон в зону c , тогда как пустой — с большей вероятностью захватывает электрон, чем испускает дырку в зону v .

При др. соотношениях между величинами K_d, K_a и g_a, g_d дефекты и примесные атомы будут играть роль центров прилипания (ловушек) электронов ($g_a \gg K_d, K_a \gg g_d$), центров прилипания дырок ($g_d \gg K_a, K_d \gg g_a$) или центров генерации носителей (если $g_a \gg K_d, g_d \gg K_a$). Если захват хотя бы одного из носителей заряда центром происходит с излучением фотона, уносящего осн. часть выделяющейся энергии, то он наз. центром излучательной рекомбинации (ЦИР) или центром свечения (люминесценции). Др. часть энергии может выделяться в виде фононов. В разных ЦИР излучат. процесс реализуется разл. путями: а) при захвате свободного носителя из c - или v -зоны непосредственно в осн. состояние центра; соответствующие сече-

ния излучат. захвата $\sigma_a^{\text{изл.}}$, $\sigma_d^{\text{изл.}}$ лежат обычно в пределах $10^{-18}-10^{-20}$ см 2 ; б) при переходе носителя, захваченного на мелкий возбуждённый уровень ЦИР, в осн. состояние; в) при т. н. в н у т р и ц е н т р о в о м п е р е х о д е захваченного носителя между находящимися в запрещённой зоне уровнями внутр. электронной оболочки глубокого Р. ц. (напр., 3d-оболочки атома переходного металла или 4f-оболочки редкоземельного атома); г) при т. н. т у н н е л ь н о м м е ж ц е н т р о в о м п е р е х о д е носителей между уровнями близко расположенных донора и акцептора, составляющих единый Р. ц.

Захват каждого из носителей центром безызлучательной рекомбинации (ЦБР) происходит с передачей всей выделившейся энергии решётке либо непосредственно в виде фононов (многофононная безызлучат. рекомбинация), либо сначала другому свободному или связанному носителю, к-рый затем отдаёт эту энергию решётке (о ж е - р е к о м б и н а ц и я). Связанный носитель может находиться либо на том же (многозарядном) центре, либо на соседнем. Так, излучат. захват свободного электрона глубоким акцептором А может быть подавлен безызлучат. захватом, если в решётке вблизи А (на расстоянии, достигающем десятков А) находится заполненный (глубокий) донор D. Выделяющаяся энергия уносится электроном донора, эмитируемым в c -зону. Такая донорно-акцепторная пара может рассматриваться как оже-центр безызлучат. рекомбинации.

Уровни центров многофононной безызлучат. рекомбинации обычно расположены вблизи середины запрещённой зоны, их положение зависит от зарядового состояния центра, причём электрон-фононное взаимодействие в центре сильное. Такими центрами могут быть как точечные, так и протяжённые *дефекты*, напр. крупные кластеры, включения др. фазы, *дислокации*.

При наличии у Р. ц. неск. метастабильных «конфигураций» (ориентаций, расстояний между компонентами центра и т. д.), соответствующих разл. минимумам полной энергии, рекомбинация носителей может сопровождаться на Р. ц. его переходом между метастабильными состояниями.

Лит.: Смит Р., Полупроводники, пер. с англ., 2 изд., М., 1982; Коварский В. А., Кинетика безызлучательных процессов, Киев, 1968; Landsberg P. T., Adams M. J., Radiative and auger processes in semiconductors, «J. of Luminescence», 1973, в. 7, р. 3; Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г., Физика полупроводников, М., 1977; Миллис А., Примеси с глубокими уровнями в полупроводни-