

высоком уровне возбуждения испытывает сужение спектральной полосы. Этот уровень соответствует условию инверсии населённости квантовых состояний, к-рые участвуют в переходе. При этом краевое спонтанное излучение переходит в вынужденное (стимулированное [3]). Инверсия населённости в полупроводниках происходит, когда расстояние между квазиуровнями Ферми неравновесных электронов и дырок окажется больше ϵ_g . Это же пороговое условие должно быть выполнено в активном слое полупроводникового лазера, когда в нём возникает генерация. Инжекционный лазер (на $p-n$ -переходе) отличается от светодиода тем, что грани кристалла образуют резонатор Фабри — Перо (см. *Оптический резонатор*). Когда порог генерации лазера превышен, то спектральная полоса Р. и. подвергается сужению.

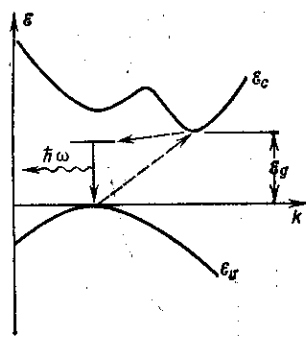


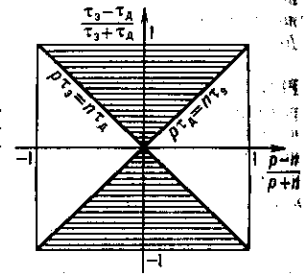
Рис. 3. Зонная диаграмма непрямоугольного полупроводника.

Краевое спонтанное Р. и. GaAs и др. прямоугольных полупроводников может обладать поляризацией. Причина поляризации — спин-орбитальное расщепление валентной зоны. В единичном акте рекомбинации электрона с лёгкой дыркой электрич. вектор излучения E колеблется преим. вдоль направления квазиимпульса k рекомбинирующих частиц. Степень поляризации такого излучения (согласно теории) $\sim 60\%$ [3]. В акте рекомбинации электрона с тяжёлой дыркой E колеблется в плоскости, перпендикулярной k ; степень поляризации при этом $\sim 100\%$. Когда квазиимпульсы носителей распределены изотропно, то поляризация излучения исчезает. Т. к. неравновесные носители, возникающие при пробеге $p-n$ -перехода, распределены по импульсам анизотропно, то Р. и. оказывается поляризованным [4, 5]. Анизотропия импульсного распределения рекомбинирующих носителей возникает и при туннельном просачивании через прямо смещённый $p-n$ -переход. В этих условиях также наблюдается поляризация Р. и. [6].

Лит.: 1) З и С., Физика полупроводниковых приборов, пер. с англ., т. 2, М., 1984; 2) Алферов Ж. И. и др., 100% внутренний квантовый выход излучательной рекомбинации в трехслойных гетероструктурах на основе системы AlAs — GaAs, «ФТП», 1975, т. 9, с. 462; 3) Келдыш Л. В., Константинов О. В., Перель В. И., Эффекты поляризации при межзонном поглощении света в полупроводниках в сильном электрическом поле, «ФТП», 1969, т. 3, с. 1042; 4) Царенков В. В., Гладкий Б. И., Эффект поляризации спонтанного рекомбинационного излучения полупроводника в электрическом поле, «ФТП», 1969, т. 3, с. 1036; 5) Константинов О. В., Перель В. И., Царенков В. В., Причины поляризации спонтанного рекомбинационного излучения полупроводников типа арсенида галлия в электрическом поле, «ФТП», 1969, т. 3, с. 1039; 6) Алферов Ж. И. и др., Диагональное туннелирование и поляризация излучения в гетеропереходах Al_xGa_{1-x}As — GaAs и $p-n$ -переходах в GaAs, «ФТП», 1969, т. 3, с. 1054. О. В. Константинов.

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ — волны концентрации носителей заряда в холодной биполярной плазме полупроводников во внеш. электрич. поле (см. *Плазма твердых тел*). Возникают спонтанно, когда электрич. поле превосходит некое пороговое значение. Р. в. проявляются как колебания тока в образце, к-рому приложено пост. напряжение. Условие существования Р. в. в полупроводнике является наличие как электронов, так и дырок, концентрации к-рых не должны сильно отличаться. Др. условие состоит в том, чтобы времена жизни τ носителей были различными. Оба условия выполняются только при наличии глубоких примесных центров рекомбинации, уровни энергии к-рых располагают в ср. части запрещённой зоны полупроводника. Эти условия иллюстрируются диаграммой (рис.).

Р. в. проявляются в потере устойчивости протекания электрич. тока. Его течение устойчиво лишь в слабых полях. Критич. значение напряжённости поля определяется условием, чтобы дрейфовая длина неравновес-



Области существования рекомбинационных волн заштрихованы; p, n — равновесные концентрации дырок и электронов; τ_n, τ_p — их времена жизни.

ных носителей заряда превосходила их диффузионную длину. С этим и связан механизм самовозбуждения Р. в., заключающийся в том, что избыточные неосновные носители, возникшие благодаря случайной генерации с примесных центров захвата, не рекомбинируют там, где они родились, а уносятся полем вместе с частично нейтрализующими их осн. носителями. Р. в. распространяются в сторону дрейфа более долгоживущих носителей заряда.

Р. в. наблюдались в кристаллах Ge n -типа с примесью Mn и Sb и в кристаллах Si n -типа с примесью Zn и P при темп-рах $T \sim 300$ К в электрич. поле порядка десятков В/см. Период колебаний тока от долей секунды до неск. мкс. Частота и амплитуда Р. в. чувствительны к изменению внеш. условий (темп-ры, магн. поля, освещения, к облучению потоком частиц). Это обуславливает возможности практич. использования Р. в. Созданы прецизионные датчики темп-ры, напряжённости магн. поля, механич. деформаций, мощности эл. магн. и корпускулярного излучений, а также миниатюрные полупроводниковые генераторы и преобразователи.

Лит.: Константинов О. В., Перель В. И., Царенков Г. В., Условия существования медленных и быстрых рекомбинационных волн в полупроводниках, «ФТП», 1967, т. 9, с. 1761; Карпова И. В. и др., Рекомбинационные волны в компенсированном германии, в кн.: Труды IX международной конференции по физике полупроводников, Москва, 23—29 июля 1968 г., т. 2, Л., 1969; Карпова И. В., Перель В. И., Дрейф импульса инжектированных носителей в биполярной плазме полупроводника с ловушками в условиях возбуждения неустойчивости типа рекомбинационных волн, «ФТП», 1976, т. 10, с. 426. О. В. Константинов, Г. В. Царенков.

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ РАДИОЛИНИИ — спектральные линии радиодиапазона, образующиеся при радиач. переходах между высоковозбуждёнными состояниями (*ридберговскими состояниями*) атомов и ионов. Р. р. формируются в разреженной (концентрация электронов $\sim 10^3$ см⁻³) низкотемпературной (электронная темп-ра ≤ 1 эВ) плазме туманностей и межзвёздной среды. В указанных физ. условиях наиб. эфф. механизм заселения высоковозбуждённых атомных уровней — рекомбинации (отсюда назв.). Р. р. регистрируются методами радиоастрономии.

Для обозначения Р. р. указываются символ хим. элемента, главное квантовое число ниж. состояния n и греч. буква (α, β, γ и т. д.), соответствующая разности главных квантовых чисел верх. и ниж. состояний ($\Delta n = 1, 2, 3$ и т. д.). Так, напр., C747 β — линия, образованная при переходе с $n = 747$ на $n = 749$ в атоме углерода.

Возможность наблюдения Р. р. в спектрах диффузных туманностей (зон III) предсказал Н. С. Кардашёв (1959). Р. р. открыты в 1964 в спектре туманности Омега (линия H90 α , $\lambda = 3,4$ см и H104 α , $\lambda = 5,2$ см) независимо двумя группами сов. радиоастрономов. До 1980 Р. р. наблюдались только в излучении (эмиссионные линии), а с 1980 — и в поглощении в направлении радиосточника Кассиопея А. Линии поглощения