



Рис. 2. Полупроводники, используемые в полупроводниковых лазерах, и спектральные диапазоны излучения.

продольный, так и поперечный вариант геометрии накачки. П. л. с электронно-лучевой накачкой помимо активного элемента (мишени) включает в себя электронную пушку. Особенностью лазеров с такой накачкой является возможность быстрого изменения конфигурации накачки, напр. сканирования со скоростями, обеспечивающими воспроизведение телевиз. изображения (лазерное проект. телевидение).

Физический механизм. Рабочие уровни в П. л. обычно принадлежат энергетич. зонам, т. е. областям сплошного спектра энергетич. состояний, а активными частицами лазерной среды являются свободные носители заряда. Накачка обеспечивает поступление избыточных электронов в зону проводимости и избыточных дырок в валентную зону (напр., оптич. накачка порождает избыточные пары носителей — электронов и дырок — за счёт межзонного поглощения; см. в ст. *Полупроводники*). Время свободного пробега носителя обычно мало (10^{-13} — 10^{-12} с) вследствие быстрых процессов внутризонной релаксации носителей (в частности, электрон-электронных столкновений, рассеяния на фононах и примесях и т. п.). В результате неравновесные носители могут «термализоваться», т. е. перейти на более низкие энергетич. уровни в пределах своей зоны, распределившись по энергии \mathcal{E} в соответствии с ф-цией распределения Ферми для электронов f_n и дырок f_p (см. Ферми — Дирака распределение):

$$f_n = \left(1 + \exp \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_F^n}{kT}\right)^{-1}; \quad f_p = \left(1 + \exp \frac{\mathcal{E}_F^p - \mathcal{E}}{kT}\right)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь T — абс. темп-ра, \mathcal{E}_F^n и \mathcal{E}_F^p — т. н. квазиуровни Ферми. Образно говоря, электроны «скатываются» к «дну» зоны проводимости \mathcal{E}_c , а дырки «всплывают» к «потолку» валентной зоны \mathcal{E}_v раньше, чем рекомбинируют между собой. Время жизни избыточных носителей, ограниченное рекомбинацией, само по себе довольно мало (10^{-8} — 10^{-9} с), однако оно существенно превышает время свободного пробега и время, необходимое для термализации носителей. Это справедливо и в том случае, когда используется накачка активной среды быстрыми электронами, исходная энергия к-рых составляет 10^4 — 10^5 эВ. Электроны накачки порождают лавину вторичных неравновесных электронов и дырок, термализующихся к краям своих зон. Время релаксации электронов большой энергии также очень мало из-за возможности расхода энергии на ионизацию (порождение вторичных пар) и на генерацию ВЧ-фононов.

Состояние возбуждённой полупроводниковой среды, при к-ром имеется избыток концентрации носителей, распределённых, однако, в осн. в соответствии с фермиевскими ф-циями f_n и f_p , называют квазиравновесным, подчёркивая тем самым энергетич. равновесность внутри каждой зоны при отсутствии равновесия между зонами.

Мерой отклонения от равновесия концентрации носителей при квазиравновесии служит разность квазиуровней Ферми $\Delta F = \mathcal{E}_F^n - \mathcal{E}_F^p$. Вынужденные излучат. переходы преобладают над переходами с поглощением, если вероятность заполнения электронами верхних рабочих уровней превышает вероятность заполнения ими ниж. уровней. Это условие сводится к следующему неравенству:

$$f_n(\mathcal{E} + h\nu) > 1 - f_p(\mathcal{E}), \quad (3)$$

где \mathcal{E} — энергия ниж. состояния (в валентной зоне), $\mathcal{E} + h\nu$ — энергия верх. состояния (в зоне проводимости); величина $1 - f_p(\mathcal{E})$ представляет собой вероятность заполнения соответствующего состояния электроном. С учётом (2) для квазиравновесия условие (3) может быть выражено в виде

$$\Delta F > h\nu, \quad (4)$$

и поскольку для межзонного перехода $h\nu \geq \mathcal{E}_g$, то одновременно выполняется условие

$$\Delta F > \mathcal{E}_g. \quad (5)$$

Неравенство (5) является условием инверсии для межзонных переходов. Инверсия населённости может быть получена и для переходов между зоной и примесным уровнем или примесными зонами в легиров. полупроводниках, и даже между дискретными уровнями примесного центра (напр., П. л. на внутрицентровом переходе в InP , легированном Fe , работающий на длине волны 2,7 μm при 2 К). Созданы также излучатели когерентного дальнего ИК-излучения, работающие при низкой темп-ре в режиме коротких