

частиц $\mu = \sin^2 \varphi$ сколь угодно мал в соответствии с (4), высокий кпд достигим при $v_\varphi = \text{const}$ в постоянном магн. поле.

На возможность получения коротких волн путём доплеровского преобразования частоты излучения предварительно сформированных из ступок колеблющихся частиц впервые указали В. Л. Гинзбург и Г. Моц (Н. Motz) (кон. 40-х — нач. 50-х гг.). Однако предложение о получении таким способом вынужденного излучения было сформулировано позднее, уже после развития теории вынужденного излучения в системах классич. электронных осцилляторов и реализации основанных на этом принципе слабобореливистских электронных мазеров. Впервые ЛСЭ в ИК-диапазоне реализованы в США Дж. Мейди (J. Madey) с сотрудниками на базе Станфордского линейного ускорителя электронов в 1976—77.

Лит.: Реливистская высокочастотная электроника, Горький, 1979; Генераторы когерентного излучения на свободных электронах. Сб. ст.; пер. с англ., М., 1983; Маршалл Т., Лазеры на свободных электронах, пер. с англ., М., 1987. В. Л. Братман, И. С. Гинзбург.

ЛАЗЕРЫ НА ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ (ЛЦО) — лазеры, в к-рых активной средой служат ионные кристаллы с центрами окраски. Под воздействием ионизирующих излучений (γ -лучей, электронов высокой энергии, рентг. лучей, нейтронов) либо при нагреве в парах щелочных или щелочноземельных металлов в оптически прозрачных, бесцветных кристаллах возникают вакансии, локализуемые на себе за счёт кулоновского притяжения

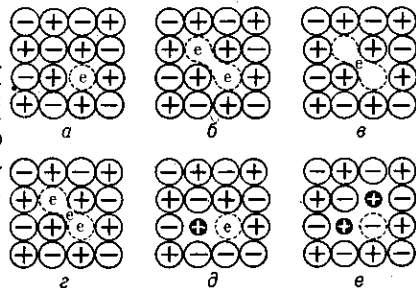


Рис. 1. Центры окраски в щелочно-галогидных кристаллах: а) F -центр; б) F_2 -центр; в) F_2^+ -центр; г) F_2^- -центр; д) F_A -центр; е) F_B -центр; примесные ионы — чёрные кружки.

электроны. Связанные системы положительно заряженных вакансий и электронов наз. электронными центрами окраски, т. к. их присутствие в кристалле обуславливает его окрашивание — возникновение полос поглощения и излучения в оптич. диапазоне. Центры окраски могут эффективно поглощать и испускать кванты света, т. е. являются рабочими центрами активных сред перестраиваемых лазеров. По принципу действия и характеристикам ЛЦО подобны лазерам на красителях.

Наиб. простым центром окраски является F -центр — вакансия аниона (отрицательно заряженного иона в двухатомном ионном кристалле), захватившая один электрон e^- (рис. 1, а). Все центры, на к-рых получена лазерная генерация, являются производными от F -центров. Так, F_2 -центр представляет собой пару соседних F -центров, сильно связанных друг с другом (рис. 1, б); при потере F_2 -центром одного электрона образуется F_2^+ -центр (рис. 1, в), при захвате — F_2^- -центр (рис. 1, г). Если в решётку кристалла (матрицу) введены примеси, замесившие нек-рые из катионов (чёрные кружки), то F -центр, рядом с к-рым расположен примесный катион (напр., Li^+ вместо K^+ в решётке KCl), обозначают индексом A (напр., F_A , рис. 1, д), а центр, рядом с к-рым расположились 2 примесных катиона (рис. 1, е), — индексом B .

Спектральное положение электронно-колебат. полос поглощения и люминесценции центров зависит от типа центров и параметров матрицы. Выбором кристалла для одних и тех же центров можно смещать диапазон генерируемых длин волн λ , перекрывая область от 2,2 до

3,3 мкм для F_A и F_B (рис. 2) и от 0,82 до 2 мкм для F_2^+ (рис. 3). Создание комплексов квазимолекулярных центров F_2 и F_2^+ , ассоциированных с примесями одно- и двухвалентных металлов, вводимых в матрицу, также позволяет сдвигать полосы поглощения и люминес-

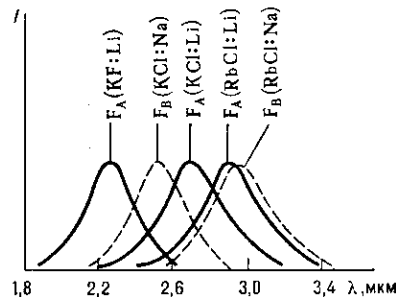


Рис. 2. Зависимость полос люминесценции центров F_A и F_B от вида матрицы (I — интенсивность излучения); с увеличением постоянной решётки полосы сдвигаются в сторону больших λ .

ценции (на 10^3 \AA), ещё более расширяя область перестройки λ .

ЛЦО действуют по схеме, к-рую можно свести к четырёхуровневой (рис. 4). Накачка идёт в широкой полосе электронно-колебат. спектра (переход $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2$) шириной 1500—2500 \AA . Далее за время $t \sim$

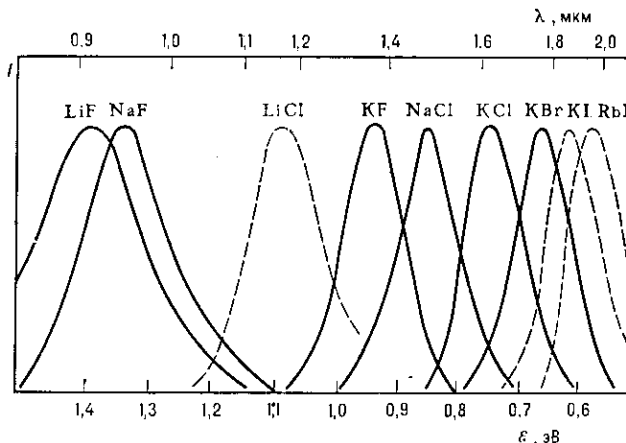


Рис. 3. То же для F_2^+ -центров.

$\sim 10^{-12} - 10^{-13}$ с идёт безызлучательная релаксация по колебат. подуровням ($\epsilon_2 \rightarrow \epsilon_3$). Затем следует излучат. переход в широкой полосе ($\epsilon_3 \rightarrow \epsilon_4$, с сечением $\sim 10^{-17} \text{ см}^2$ и вероятностью $10^7 - 10^8 \text{ с}^{-1}$) и опять быстрая безызлучательная релаксация вниз по колебат. подуровням основного состояния ($\epsilon_4 \rightarrow \epsilon_1$).

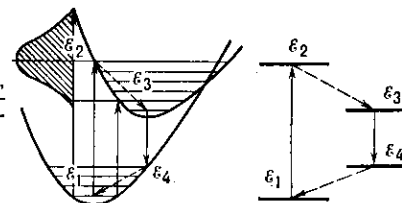


Рис. 4. Схема уровней, иллюстрирующая лазерное действие центров окраски.

Различают низко- и высокотемпературные ЛЦО. Так, для квазимолекулярных F_A - и F_B -центров величина кванта тепловых потерь (стоксов сдвиг) в неск. раз превосходит энергию излучат. перехода, что вызывает увеличение с ростом T вероятности безызлучательных релаксационных переходов $\epsilon_3 \rightarrow \epsilon_4$ и падение квантового выхода люминесценции и накладывает ограничение на рабочую темп-ру лазера ($T < 200 \text{ K}$). Напротив, малые по сравнению с энергиями излучат. переходов величины кванта тепловых потерь для квазимолекулярных цент-