

Так как плавные изменения частоты излучения в сантиметровом диапазоне представляют весьма сложную задачу, то практически в условиях опыта меняется не ω , а ω_0 , т. е. плавно меняется постоянное магнитное поле при фиксированной частоте падающего электромагнитного излучения. При этом, когда магнитное поле достигает величины, соответствующей условию $\omega = \omega_0$, наблюдается пик поглощения. Если в материале имеется несколько сортов носителей, то наблюдается несколько пиков.

9.5. СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Представим себе какую-либо систему частиц (например, газ, жидкость, твердое тело), в которой электроны могут находиться в состояниях с двумя энергиями, 1 и 2, при этом возможны два типа переходов.

Переход из нижнего состояния в верхнее требует энергии $\Delta\mathcal{E}$; поэтому такие переходы могут быть осуществлены, если электрон в результате взаимодействия (которое мы называем столкновением) с какой-либо другой частицей (фононом, фотоном или другим электроном) получит необходимую энергию.

Переход из одного состояния в другое в результате взаимодействия с другой частицей называется вынужденным или индуцированным. Таким образом, переходы «снизу — вверх» могут быть только вынужденными.

Переход из верхнего состояния в нижнее не требует затраты энергии, поэтому он может происходить двумя путями: 1) спонтанно (самопроизвольно) и при этом освободившаяся энергия выделится в виде кванта света и 2) вынужденно (индуцированно), т. е. в результате столкновения с какой-либо другой частицей; при этом освободившаяся энергия может также выделиться в виде кванта света, фонона или перейти в кинетическую энергию одной из частиц, участвовавших в столкновении.

Для того чтобы индуцированный переход осуществился под действием кванта света, этот квант должен удовлетворять резонансному условию

$$h\nu = \Delta\mathcal{E}.$$

В результате этого рождается второй фотон с той же частотой, с той же фазой, с тем же направлением движения и поляризации, т. е. неотличимый от первого.

В результате такого индуцированного (или как его также называют стимулированного) перехода энергия электронной системы превращается в энергию излучения, и можно сказать, что имеет место отрицательное поглощение. На этом явлении в принципе могут быть основаны и усиление и генерация электромагнитного излучения. Но для этого необходимо соблюдение двух условий:

— чтобы увеличение энергии электромагнитных колебаний за счет индуцированных переходов превышало бы уменьшение этой энергии за счет всех видов поглощения, т. е. чтобы отрицательное поглощение превалировало над положительным;

— чтобы энергия электронной системы, расходуемая на индуцированное излучение, все время компенсировалась, т. е. каким-то образом все время осуществлялась «подкачка» энергии в электронную систему.

Рассмотрим, как может осуществляться каждое из этих условий.

СОСТОЯНИЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

В тепловом равновесии числа переходов сверху вниз и снизу вверх одинаковы, отношение числа частиц в первом состоянии к числу частиц во втором определяется статистической Ферми:

$$n_1 = \frac{g_1}{e^{\frac{\varepsilon_1 - \mu}{kT}} + 1}, \quad (9.107)$$

$$n_2 = \frac{g_2}{e^{\frac{\varepsilon_2 - \mu}{kT}} + 1}, \quad (9.108)$$

где g_1 и g_2 — «кратность» состояний 1 и 2, т. е. число электронных мест в каждом из этих состояний; согласно (9.107) и (9.108)*)

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{e^{\frac{\varepsilon_2 - \mu}{kT}} + 1}{e^{\frac{\varepsilon_1 - \mu}{kT}} + 1} \frac{g_1}{g_2}. \quad (9.109)$$

*) В дальнейшем мы для простоты будем полагать, что $g_1 = g_2$, и что никаких других состояний у электронов нет. При этих условиях уровень химического потенциала будет проходить посередине между уровнями 1 и 2.

Если электронный газ не вырожден, то статистика Ферми переходит в статистику Больцмана и выражения (9.107) и (9.108) соответственно упрощаются.

Представим теперь, что на нашу систему падает излучение с частотой, удовлетворяющей условию

$$h\nu = \Delta\mathcal{E}. \quad (9.110)$$

Как уже упоминалось, под действием такого излучения возможны два типа переходов:

переход из состояния 1 в состояние 2, связанный с поглощением кванта $h\nu$. Обозначим вероятность такого перехода $B_{1,2}$;

переход из состояния 2 в состояние 1, связанный с испусканием второго кванта (отрицательное поглощение). Обозначим вероятность этого перехода $B_{2,1}$.

Кроме этого, возможны спонтанные переходы из состояния 2 в состояние 1 — $A_{2,1}$.

Эйнштейн вывел соотношения между величинами $B_{2,1}$, $B_{1,2}$ и $A_{2,1}$:

$$B_{2,1} = B_{1,2} \quad (9.111) *$$

и

$$A_{2,1} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{2,1}. \quad (9.112)$$

Общее число ($N_{1,2}$) переходов первого рода ($1 \rightarrow 2$) в 1 сек будет равно произведению числа частиц в первом состоянии n_1 на вероятность такого перехода $B_{1,2}$:

$$N_{1,2}^u = n_1 B_{1,2}; \quad (9.113)$$

соответственно число обратных переходов

$$N_{2,1}^u = n_2 B_{2,1}. \quad (9.114)$$

Так как $B_{2,1} = B_{1,2}$ и в состоянии теплового равновесия $n_1 > n_2$, то $N_{1,2}^u > N_{2,1}^u$, т. е. в состоянии теплового равновесия система поглощала бы электромагнитное излучение, если бы не было спонтанных переходов $N_{2,1}^c$ **).

*) Если $g_1 \neq g_2$, то $g_2 B_{2,1} = g_1 B_{1,2}$.

***) С учетом спонтанных переходов ($N_{2,1}^c$) суммарное $N_{2,1}^u + N_{2,1}^c = N_{1,2}^u$, и благодаря этому соблюдается закон Кирхгофа: твердое тело в термодинамическом равновесии с излучением столько же излучает, сколько поглощает.

Следовательно, для того чтобы наша система могла усиливать или тем более генерировать электромагнитное излучение, надо с помощью какого-то дополнительного источника энергии создать условия, при которых заселенность верхнего уровня будет больше, чем нижнего:

$$n_2 > n_1.$$

Такие состояния получили название состояний с инверсной заселенностью или с отрицательной температурой *) (так как формально $n_2/n_1 > 1$ можно получить, положив в (9.108) $T < 0$).

Если n_2 не только больше чем n_1 , но равно (или близко) к g_2 и $f_2 = n_2/g_2 \approx 1$, а n_1 близко к нулю и $f_1 = n_1/g_1 \approx 0$, то это особенно благоприятно для усиления и генерации колебаний.

Действительно, при этом переходы с поглощением излучения (из первого во второе состояние) невозможны по двум причинам:

1) так как «некому» переходить, все состояния 1 свободны и

2) так как некуда переходить, все состояния 2 заняты; напротив, для возникновения индуцированного излучения при этом создаются самые благоприятные условия.

Напомним, что согласно статистике Ферми при абсолютном нуле температуры все состояния ниже уровня Ферми заняты, а состояния выше уровня Ферми свободны.

В случае, рассмотренном только что, $f_2 = 1$, $f_1 = 0$, мы имеем обратную картину: такое положение называют состоянием отрицательного нуля, его можно формально получить, если в распределении Ферми считать температуру отрицательной величиной, стремящейся к нулю.

В рассматриваемом нами простейшем случае, когда $g_1 = g_2 = g$ и $n_1 + n_2 = g$, условие $n_2 > n_1$ означает, что верхние уровни должны быть заполнены больше чем наполовину, т. е. электроны должны быть там в состоянии по крайней мере частичного вырождения, а низкие уровни должны быть более чем наполовину пусты, т. е. здесь дырки должны быть в состоянии частичного вырождения.

*) Более правильное название — состояний с инверсной (обратной) заселенностью.

Как мы уже упоминали, для того чтобы усиливать электромагнитное излучение, необходимо настолько нарушить тепловое равновесие, чтобы создать состояние с отрицательной температурой, т. е. чтобы заселенность верхних уровней была больше, чем нижних. В принципе в твердом теле можно представить два способа получения состояния с отрицательной температурой.

а) нарушение внутризонного равновесия, т. е. при помощи какого-то источника энергии электроны в полупроводнике или полуметалле переводятся из нижней половины зоны в верхнюю. Но время восстановления внутризонного равновесия очень мало, $\sim 10^{-13}$ сек, это значит, что такой путь создания инверсной заселенности очень невыгоден, так как требует исключительно мощного источника энергии, а в настоящее время просто неосуществим;

б) нарушение межзонного равновесия: при помощи какого-то источника энергии из валентной зоны в свободную перебрасывается количество электронов, необходимое для создания состояния с отрицательной температурой.

Время релаксации для межзонных переходов колеблется от 10^{-3} до 10^{-9} сек, поэтому эта возможность оказывается вполне реальной. Так как установление внутризонного равновесия происходит значительно быстрее (10^{-13} сек), то мы можем считать, что все переброшенные вверх электроны подавляющую часть «своей жизни» находятся в тепловом равновесии, т. е. сосредоточены вблизи нижнего края зоны проводимости; точно так же все дырки сосредоточены вблизи верхнего края валентной зоны.

Следовательно, усиливаться может излучение, энергия кванта которого приблизительно равна ширине запрещенной зоны *).

Для того чтобы осуществлялось необходимое условие для усиления и генерации ($N_{2,1} > N_{1,2}$), число электронов вблизи нижнего края свободной зоны n_2 должно быть больше, чем число электронов вблизи верхнего края заполненной зоны n_1 . Это значит, что нижние состояния в свободной зоне должны быть более чем наполовину заполнены, а верх-

*) Если энергия кванта будет меньше, ее будет недостаточно, чтобы вызвать переход; если она будет намного больше $\Delta\mathcal{E}$, то соответствующие состояния наверху будут пусты, а внизу заполнены, т. е. не будет условий для отрицательного поглощения.

ние состояния в зоне проводимости — более чем наполовину пусты. Иными словами и электроны и дырки должны находиться в вырожденном (по крайней мере частично) состоянии. На рис. 9.1 представлены зависимости энергии от волнового числа для двух вариантов зонной структуры:

а) в первом случае (рис. 9.1, а) минимум зоны проводимости расположен точно над максимумом валентной зоны; в этом случае переход электрона из одной зоны в другую изображается вертикальной стрелкой, такие переходы называются прямыми;

б) во втором случае (рис. 9.1, б) экстремумы зон разделены некоторым расстоянием в k -пространстве и переход изображается наклонной стрелкой; такой переход, связанный с изменением импульса электрона на величину $\Delta p = p_2 - p_1$, не может осуществляться с участием одного только фотона, так как импульс фотона ничтожно мал*). Такой переход, который может осуществляться только с участием фотона и фонона, называется непрямым.

В этом случае вероятности индуцированного излучения и поглощения могут быть неодинаковы, так как для того чтобы перейти в возбужденное состояние, электрон должен поглотить не только фотон, но и фонон; если температура кристалла низка и необходимых фононов не будет в наличии, то такой переход окажется запрещенным законом сохранения импульса.

Таким образом, второй вариант зонной структуры с этой точки зрения более благоприятен для усиления излучения: здесь нет необходимости в том, чтобы и электроны в верхней зоне и дырки в нижней находились в вырожденном состоянии.

Свет может поглощаться не только при межзонных переходах, но и при внутризонных, т. е. свободными носителями.

Для того чтобы кристалл усиливал излучение, суммарная вероятность всех процессов, связанных с поглощением кванта, должна быть меньше, чем вероятность перехода с индуцированным излучением.

Вероятности прямых переходов ($B_{2,1} = B_{1,2}$) относительно велики и значительно превышают вероятность поглощения свободными носителями (так как последнее

*) Импульс фотона $p_\phi = h\nu/c$ очень мал, так как c — скорость света — очень велика.

требует испускания фотона, т. е. эквивалентно тройному столкновению).

При непрямых переходах оба процесса поглощения свободными носителями, и «выгодный» $2 \rightarrow 1$ и «паразитный», связаны с испусканием фотона и могут иметь сравнимые вероятности; в этом случае поэтому необходимо выбрать такой полупроводник, в котором вероятность межзонных переходов больше, чем внутрizonных.

Для получения состояний с инверсной заселенностью могут быть также использованы переходы между примесными уровнями или между одной из зон и примесным уровнем.

СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Выше нами были сформулированы условия, необходимые для усиления излучения: 1) рабочие уровни в кристалле должны быть инверсно заселены и 2) полная интенсивность поглощения падающего излучения должна быть меньше интенсивности индуцированного излучения.

Условия для генерации являются более жесткими, так как в данном случае нет падающего излучения, а генератор должен поддерживать и стабилизировать случайно возникшие в нем колебания.

По сути дела любой генератор с самовозбуждением является усилителем шумов, в данном случае этим шумом является спонтанное излучение.

Для создания условий генерации необходима обратная связь *). В газовых лазерах она осуществляется системой зеркал. В случае твердого лазера зеркалами являются его торцы, которые обрабатываются таким образом, что один из них полностью отражает падающую на него энергию, а другой делается полупрозрачным, таким образом, каждый фотон, попавший в систему, несколько раз отражается от зеркал, а затем либо поглощается, либо выходит из кри-

*) Если лавина индуцированного излучения беспрепятственно пройдет через кристалл, то кристалл «погаснет» почти мгновенно и не сможет служить генератором; для того чтобы стимулированное излучение поддерживалось, коэффициент размножения должен быть настолько больше единицы, чтобы компенсировать все потери. Для этого каждый фотон должен несколько раз пройти кристалл, прежде чем выйти.

стала через полупрозрачный торец. Для того чтобы осуществилось самовозбуждение, необходимо, чтобы каждый фотон, прежде чем поглотиться или выйти из системы, породил второй фотон; при этих условиях фотоны будут саморазмножаться и число их будет расти до тех пор, пока энергия излучения, выходящего из кристалла, не станет равной энергии подкачки. В заключение этого раздела рассмотрим, какими способами может осуществляться подкачка и создаваться и поддерживаться инверсная заселенность.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНВЕРСНОЙ ЗАСЕЛЕННОСТИ

Оптическое возбуждение является одним из основных методов создания состояния с инверсной заселенностью. Недостатком этого метода является низкий коэффициент преобразования, обусловленный широким спектром обычных источников света. При этом большая часть энергии коротковолновых фотонов теряется (переходит в тепло) при переходе носителей на низшие уровни зоны, а длинноволновые фотоны не участвуют в возбуждении.

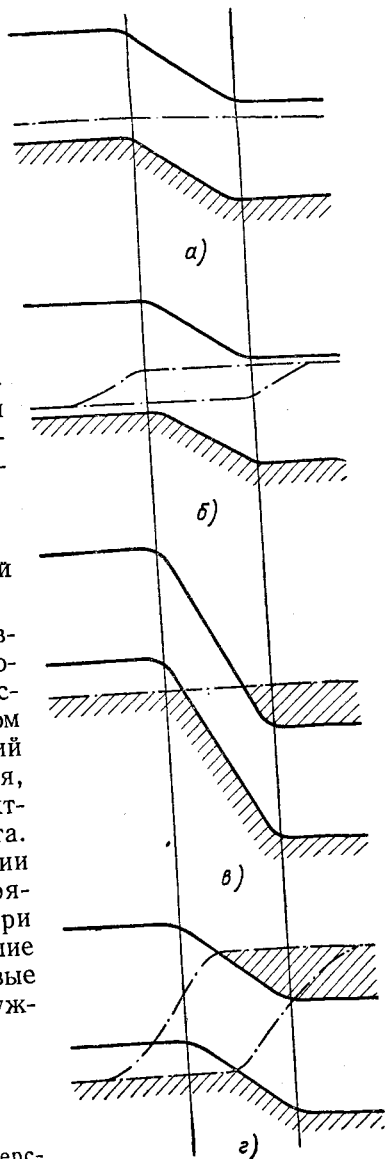


Рис. 9.6. Схема создания инверсной заселенности при помощи $p-n$ перехода.

Таблица интегралов Ферми $F_m(\mu) = \int_0^{\infty} \frac{x^m}{e^{\mu-x} + 1} dx$; $F_m(\mu) = a \cdot 10^b$

μ	$F_{-\frac{1}{2}}$		F_0		$F_{\frac{1}{2}}$		F_1		$F_{\frac{3}{2}}$		F_2		$F_{\frac{5}{2}}$		F_3	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-4	0,3204	-1	0,1815	-1	0,16128	-1	0,0182	0	2,42685	-2	0,0366	0	6,07731	-2	1,0977	-1
-3	0,8526	-1	0,4859	-1	0,43366	-1	0,0492	0	6,56115	-2	0,0990	0	1,64742	-1	2,9780	-1
-2	2,1918	-1	1,2693	-1	1,14588	-1	0,1310	0	1,75800	-1	0,2662	0	4,44554	-1	8,0532	-1
-1	5,2114	-1	3,1326	-1	2,90501	-1	0,3387	0	4,60848	-1	0,7050	0	1,18597	0	2,1598	0
0	1,0722	-1	6,9315	-1	6,78094	-1	0,8225	0	1,15280	0	1,8030	0	3,08259	0	5,6822	0
1	1,8204	0	1,3137	0	1,39638	0	1,8062	0	2,66168	0	4,3120	0	7,62653	0	1,4395	0
2	2,5954	0	2,1270	0	2,50246	0	3,5135	0	5,53725	0	9,4450	0	1,75294	0	3,4304	0
3	3,2852	0	3,0486	0	3,97699	0	6,0957	0	1,03537	1	1,8870	1	3,69321	1	7,5722	1
4	3,8743	0	4,0182	0	5,77073	0	9,6267	0	1,76277	1	3,4592	1	7,13480	1	1,5421	1
5	4,3832	0	5,0067	0	7,83797	0	1,4138	1	2,78024	1	5,8120	1	1,27489	2	2,9094	2
6	4,8338	0	6,0025	0	1,01443	1	1,9642	1	4,12610	1	9,1744	1	2,13098	2	5,1300	2
7	5,2416	0	7,0009	0	1,26646	1	2,6144	1	5,83422	1	1,3736	2	3,36814	2	8,5342	2
8	5,6170	0	8,0003	0	1,53805	1	3,3645	1	7,93526	1	1,9699	2	5,08084	2	1,3512	3
9	5,9674	0	9,0001	0	1,82776	1	4,2145	1	1,04574	2	2,7261	2	7,37087	2	2,0513	3
10	6,2972	0	1,0000	1	2,13445	1	5,1645	1	1,34270	2	3,6623	2	1,03468	3	3,0048	3
11	6,6096	0	1,1000	1	2,45718	1	6,2145	1	1,68688	2	4,7986	2	1,41237	3	4,2687	3
12	6,9076	0	1,2000	1	2,79518	1	7,3645	1	2,08062	2	6,1548	2	1,88225	3	5,9060	3
13	7,1930	0	1,3000	1	3,14775	1	8,6145	1	2,52616	2	7,7510	2	2,45700	3	7,9856	3
14	7,4672	0	1,4000	1	3,51430	1	9,9645	1	3,02564	2	9,6072	2	3,14983	3	1,0592	4
15	7,7314	0	1,5000	1	3,89430	1	1,1415	2	3,58112	2	1,1743	3	3,97448	3	1,3778	4
16	7,9868	0	1,6000	1	4,28730	1	1,2965	2	4,19458	2	1,4180	3	4,94522	3	1,7659	4
17	8,2342	0	1,7000	1	4,69286	1	1,4615	2	4,86794	2	1,6936	3	6,07677	3	2,2318	4
18	8,4744	0	1,8000	1	5,11061	1	1,6365	2	5,60305	2	2,0032	3	7,38433	3	2,7854	4
19	8,7076	0	1,9000	1	5,54019	1	1,8215	2	6,40171	2	2,3488	3	8,88359	3	3,4373	4
20	8,9350	0	2,0000	1	5,98128	1	2,0165	2	7,26568	2	2,7325	3	1,05906	4	4,1985	4

μ	$F_{\frac{7}{2}}$		F_4		$F_{\frac{9}{2}}$		F_6		$F_{\frac{11}{2}}$		F_8		F_7	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-4	2,12877	-1	0,4390	0	9,58334	-1	0,2198	1	5,27190	0	1,3195	1	0,0923	3
-3	5,77852	-1	0,1194	1	2,60317	0	0,5948	1	1,43253	1	0,3582	2	0,2509	3
-2	1,56497	0	0,3234	1	7,06296	0	1,6210	1	3,89035	1	0,9725	2	0,6818	3
-1	4,21325	0	0,8721	1	1,91050	1	0,4383	2	1,05487	2	0,2641	3	0,1852	4
0	4,21837	1	2,3340	1	5,12904	1	0,1183	3	2,84903	2	0,7148	3	0,5020	4
1	2,88313	1	6,0981	1	1,35419	2	0,3151	3	7,62405	2	1,9223	3	1,3597	4
2	7,07645	1	1,2324	2	3,46603	2	0,8174	3	2,00234	3	5,0913	3	3,6422	4
3	1,62566	2	3,6369	2	8,46252	2	2,0404	3	5,09479	3	1,3148	4	9,6007	4
4	3,46758	2	8,1464	2	1,94721	3	4,8738	3	1,23991	4	3,2619	4	2,4514	5
5	6,87309	2	1,6749	3	4,20034	3	1,0821	4	2,86055	4	7,7515	4	6,1153	5
6	1,27353	3	3,2492	3	8,50005	3	2,2763	4	6,23266	4	1,7435	5	1,4515	6
7	2,22342	3	5,9365	3	1,62060	4	4,5161	4	1,28314	5	3,7142	5	3,2837	6
8	3,68668	3	1,0286	4	2,92792	4	8,4889	4	2,50387	5	7,5073	5	7,0728	6
9	5,84734	3	1,7016	4	5,04304	4	1,5198	5	4,65139	5	1,4445	6	1,4522	7
10	8,92629	3	2,7034	4	8,32807	4	2,6052	5	8,26504	5	6,6570	6	2,8499	7
11	1,31835	4	4,1468	4	1,32532	5	4,2967	5	1,41122	6	4,6915	6	5,3628	7
12	1,89204	4	6,1682	4	2,04150	5	6,8481	5	2,32527	6	7,9845	6	9,7103	7
13	2,64816	4	8,9575	4	3,05550	5	1,0588	6	3,71137	6	1,3146	7	1,6975	8
14	3,62572	4	1,2626	5	4,45804	5	1,5934	6	5,75745	6	2,1011	7	2,8744	8
15	4,86842	4	1,7476	5	6,35840	5	2,3406	6	8,70635	6	3,2692	7	4,7278	8
16	6,42490	4	2,3739	5	8,88666	5	3,3645	6	1,28667	7	4,9651	7	7,5740	8
17	8,34884	4	3,1707	5	1,21959	6	4,7429	6	1,86247	7	7,3774	7	1,1846	9
18	1,06992	5	4,1710	5	1,64645	6	6,5692	6	2,64579	7	1,0746	8	1,8125	9
19	1,35402	5	5,4121	5	2,18987	6	8,9541	6	3,69492	7	1,5372	8	2,7183	9
20	1,69419	5	6,9355	5	2,87348	6	1,2028	7	5,08033	7	2,1629	8	4,0026	9

Использование излучения другого лазера для возбуждения полупроводникового лазера могло бы устранить этот недостаток. Однако такой прием, разумеется, может быть использован лишь в исследовательской работе (для отбора полупроводниковых материалов и др.).

Метод возбуждения электронным пучком обладает тем преимуществом, что позволяет подбирать энергию пучка, строго соответствующую энергии возбуждения, что позволяет получать интенсивную заселенность в полупроводниках с различной запрещенной зоной. Недостатком его является то, что к. п. д. при этом не может превышать 40%, так как, как показали расчеты, энергия, идущая на образование электронно-дырочной пары, приблизительно в 3 раза превышает ширину запрещенной зоны.

Наиболее перспективным является метод инъекции неравновесных носителей тока через $p-n$ переход вырожденных полупроводников, так как позволяет получить очень высокий коэффициент преобразования.

На рис. 9.6, *а* представлен обычный $p-n$ переход в равновесном состоянии (обычный в том смысле, что основные носители по обе стороны $p-n$ перехода не вырождены). На рис. 9.6, *б* представлен тот же переход при приложении небольшого напряжения в пропускном направлении. Как видно из рисунка, этого напряжения недостаточно, чтобы создать инверсную заселенность.

На таком переходе инверсная заселенность может быть создана только при напряжении, полностью снимающем потенциальный барьер, однако создать такие условия весьма трудно, так как ток через $p-n$ переход при этом будет очень велик.

На рис. 9.6, *в* и *г* представлены аналогичные схемы для вырожденного $p-n$ перехода. Как видно из рисунка, в этом случае для создания инверсной заселенности достаточно сравнительно небольшого напряжения.

Нетрудно убедиться, что для такой благоприятной ситуации достаточно, чтобы носители находились в вырожденном состоянии хотя бы по одну сторону от $p-n$ перехода.

На этом мы заканчиваем весьма краткое описание принципа действия полупроводниковых лазеров. Теория лазеров довольно подробно изложена в книге Г. Е. Пикуса [31].