

ре. С. электронов может наблюдаться при инжекции из материала с меньшим сродством к электрону в материале с большим сродством. Механизм С. иллюстрируется зонной картиной  $p-n$ -перехода в системе GaAs — GaAlAs. На рис. 1 (а) изображена зонная схема гетероперехода  $p$ -GaAs —  $n$ -GaAlAs в состоянии равновесия, на рис. 1 (б) — при приложении напряжения

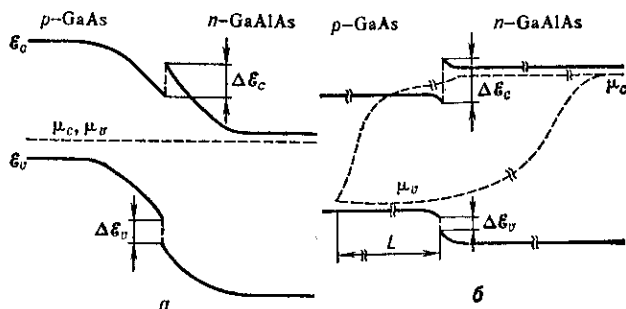


Рис. 1. Зонная схема гетероперехода  $p$ -GaAs,  $n$ -AlGaAs: а — в состоянии равновесия; б — при приложении напряжения в прямом направлении.

ния в пропускном направлении. Изображены линии, отвечающие положению краёв зон ( $\epsilon_c$  и  $\epsilon_v$ ) и положению квазиуровней Ферми ( $\mu_c$  и  $\mu_v$ );  $\Delta\epsilon_c$  и  $\Delta\epsilon_v$  — разрывы зон. Условия квазиравновесия отвечают постоянству квазиуровней Ферми в слое пространственного заряда, поэтому если условия квазиравновесия выполняются, то концентрация электронов в узкозонном GaAs оказывается больше, чем в эмиттере из GaAlAs. Для невырожденных носителей заряда макс. величина коэф. С.  $\chi$  (отношение концентрации инжектиров. носителей к их концентрации в эмиттере) может быть оценена как  $\exp(\Delta\epsilon_c/kT)$ . В рамках диффузионной теории макс. значение  $\chi$  с учётом падения квазиуровня Ферми равно отношению диффузионной длины и длины Дебая  $L/\lambda$ . При инжекции в двойной гетероструктуре, в к-рой тонкий слой узкозонного материала заключён между широкозонными эмиттерами (рис. 2), в выражении для максимального  $\chi$  появляется дополнит.

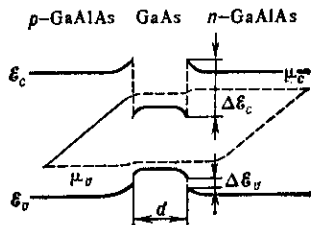


Рис. 2. Двойная гетероструктура в режиме сверхинжекции.

множитель  $L/d$ , где  $d$  — толщина узкозонного слоя, в к-ром происходит рекомбинация. С. может наблюдаться и в плавных гетеропереходах, в к-рых параметры материала непрерывно изменяются с координатой. Гетеропереход может считаться резким, если изменение таких параметров, как ширина запрещённой зоны, сродство к электрону на величину порядка  $kT$ , происходит на расстояниях, меньших длины Дебая, в противном случае в выражении для  $\chi$  дебаевская длина заменяется на характерную полевую длину, совпадающую с расстоянием, на к-ром ширина запрещённой зоны меняется на величину  $kT$ . Поскольку, как правило, дебаевская длина много меньше диффузионной длины, величина  $\chi$  может достигать в реальных гетеропереходах, как плавных, так и резких, весьма больших значений. С. широко используется в гетеротранзисторах и гетеролазерах. В гетеротранзисторах за счёт С. обеспечивается односторонняя инжекция носителей в базу. В гетеролазерах С. позволяет ис-

пользовать в качестве эмиттеров относительно слабо легированные слои с низкими оптич. потерями, что способствует снижению порогового тока гетеролазера и повышению дифференц. кватовой эффективности.

Лит.: Алферов Ж. И., Казаринов Р. Ф., Халфин В. Б., Об одной особенности инжекции в гетеропереходах, «ФТП», 1966, т. 8, № 10, с. 3102; Алферов Ж. И. и др., Инжекционные свойства гетеропереходов  $n$ -Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As —  $p$ -GaAs, «ФТП», 1968, т. 2, в. 7, с. 1016; Казаринов Р. Ф., О предельном снижении пороговой плотности тона инжекционных лазеров с двойной гетероструктурой, «ФТП», 1973, в. 4, с. 763; Казаринов Р. Ф., Суриц Р. А., Сверхинжекция носителей в вариозных  $p-n$ -структурах, «ФТП», 1975, т. 9, в. 1, с. 12; Елисеев П. Г., Введение в физику инжекционных лазеров, М., 1983; Коголкин В. И., Electric and photoelectric properties of heterostructures, в кн.: Semiconductor heterostructures. Physical processes and applications, Moscow, 1989, p. 15—17. В. В. Халфин.

**СВЕРХЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ** (суперлюминесценция) — излучение активной среды, в к-рой создана инверсия населённости уровней энергии без обратной связи. С. наблюдается в активной среде лазера до достижения порога генерации или в направленных, для к-рых усиление на проход меньше потерь. С. отличается от люминесценции суженным спектром и диаграммой направленности, имеющей максимум в направлении макс. длины пути в усиливающей среде; от лазерного излучения — отсутствием модовой структуры, меньшей направленностью и более широким спектром. Явление С. играет вредную роль в многокаскадных лазерных усилителях, т. к. снижает степень инверсии населённости. Для уменьшения С. между каскадами применяют оптич. развязки. В безрезонаторных однопроходных лазерах с большим коэф. усиления, имеющих длину, много большую поперечных размеров активной среды, С. выступает в качестве лазерного излучения. Схемы таких лазеров обсуждаются как одни из возможных путей осуществления рентгеновских и гамма-лазеров.

Э. А. Свириденков.

**СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫЕ РАДИОВОЛНЫ** — электромагнитные волны, диапазон частот к-рых по международному регламенту радиосвязи охватывает область от 30 до 300 Гц (длины волн от 10 до 1 Мм). Распространение радиоволн сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона происходит в волноводном канале, ограниченном поверхностью Земли и ниж. кромкой ионосферы, высота к-рой в зависимости от времени суток и геофиз. условий изменяется от 60 до 90 км. Поскольку длина волны значительно превышает высоту канала, в волноводе Земля — ионосфера распространяется только квази-ТЕМ-волна (см. Волновод металлический). Она имеет 2 осн. составляющие: радиальную (вертикальную) электрич. поля и азимутальную (горизонтальную) магн. поля. Благодаря одномодовому распространению передаваемые сигналы в СНЧ-диапазоне отличаются высокой стабильностью. Затухание СНЧ-радиоволн в волноводе Земля — ионосфера мало и с ростом частоты изменяется от долей дБ/1000 км до единиц дБ/1000 км. Благодаря этому возможна передача радиосигналов на очень большие расстояния, вплоть до кругосветных трасс. При этом напряжённость поля, осциллируя за счёт интерференции волн, заметно возрастает по мере приближения к антиподной точке.

Интерференция кругосветных СНЧ-волн проявляет себя в т. н. шумавовских резонансах, при к-рых на собств. частотах резонатора Земля — ионосфера наблюдается увеличение атм. шумов.

Влияние магн. поля Земли приводит к зависимости фазовой скорости СНЧ-радиоволн и их затухания от направления распространения.

СНЧ-диапазон характеризуется высоким уровнем радиопомех. Естеств. помехи порождаются электрич. разрядами в атмосфере, а искусственные — работой промышленных электроустановок и линиями электропередач. Кроме того, темп. передачи информации из-за узости диапазона оказывается очень низким. Тем не менее большая глубина скин-слоя является столь важ-