

Переходы между разл. электр. подзонами наблюдаются по резонансному поглощению излучения в дальнем ИК-диапазоне. При высоких концентрациях носителей в И. с. n_s , т. е. при $i \gg 1$, а также для И. с. с большой протяжённостью в глубь полупроводника уровни ϵ_i сближаются до расстояния, к-рое меньше их собств. ширины или kT , и свойства И. с. становятся классическими.

Электроны в И. с., если заселена только ниж. подзона $i=0$, ведут себя как идеальный двумерный электронный газ; плотность состояний в i -й подзоне на единичный интервал энергии (рис. 1, б):

$$D(\epsilon) = \begin{cases} \frac{g_v m^*}{\pi \hbar^2} & \text{при } \epsilon > \epsilon_0, \\ 0 & \text{при } \epsilon < \epsilon_0. \end{cases}$$

Здесь ϵ_0 — дно подзоны, g_v — число эквивалентных энергетич. зон в импульсном пространстве. Для И. с. в кристаллографич. плоскости (100) p-Si $g_v=2$, для И. с. в p-GaAs $g_v=1$. При малых поверхностных концентрациях n_s , когда заполнена лишь осн. подзона ($i=0$):

$$n_s = \frac{g_v m^*}{\pi \hbar^2} \epsilon_F.$$

Прямое доказательство двумерности электронного газа в тонких И. с. было впервые получено в экспериментах А. Б. Фаулера (А. В. Fowler), Фэнга (Fang), Хауарда (Howard) и Стайлса (Stiles), обнаруживших в 1966 квантовые осцилляции магнитосопротивления И. с. в Si, периодичные по концентрации, с периодом, зависящим только от нормальной компоненты H (см. Шубникова — де Хааза эффект, Квантовые осцилляции в магнитном поле).

Кулоновское взаимодействие носителей в И. с. характеризуется отношением потенциальной энергии $e^2(\pi n_s)^{1/2}$ к ср. кинетической, к-рая при низких темп-рах для носителей в И. с. равна энергии нулевых колебаний $\pi n_s \hbar^2 / 2m^*$. Предсказывалось, что при малых концентрациях носителей в И. с. возможен фазовый переход в упорядоченное состояние (см. Вигнеровский кристалл). Эксперим. сведений о возникновении в И. с. вигнеровской кристаллизации пока (1987) не получено.

Применение. И. с. является осн. элементом полевого МДП-транзистора, запоминающих устройств и др. приборов микроэлектроники. На мн. характеристики И. с., в частности на электропроводность, существенно влияет рассеяние носителей заряд. примесями, фононами и шероховатостью поверхности полупроводника. И. с. служит также важным объектом исследований свойств двумерных проводников. Осн. физ. явления, изучаемые в И. с.: активационное поведение электропроводности (см. Андерсоновская локализация), отрицательное магнитосопротивление (см. Магнитосопротивление), эффект Шубникова — де Хааза, циклотронный резонанс и др.

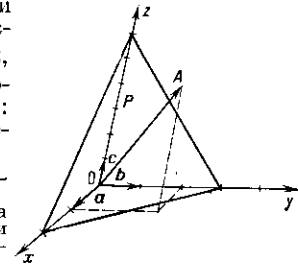
Лит.: Ando T., Fowler A. B., Stern F., Electronic properties of two-dimensional systems, «Revs Mod. Phys.», 1982, в. 54, р. 437; см. также лит. при ст. Контактные явления в полупроводниках. З. С. Грибников, В. М. Пудалов.

ИНВЕРСИЯ НАСЕЛЁННОСТЕЙ (от лат. inversio — переворачивание, перестановка) — неравновесное состояние вещества, при к-ром для составляющих его частиц (атомов, молекул и т. п.) для к.-л. пары уровней энергии выполняется неравенство: $N_2/g_2 > N_1/g_1$, где N_2 и N_1 — населённости верх. и ниж. уровней энергии, g_2 и g_1 — их кратности вырождения (см. Уровни энергии). В обычных условиях (при тепловом равновесии) на верх. уровне энергии находится меньше частиц, чем на нижнем (см. Больцмановское распределение), и неравенство не выполняется. И. н. — необходимое условие генерации и усиления эл.-магн. колебаний во всех устройствах квантовой электроники.

ИНДЕКСЫ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ — три целых числа, определяющие расположение в пространстве граней и атомных плоскостей кристалла (и н д е к-

сы Миллера), а также направлений в кристалле и его рёбер (индексы Вейса) относительно кристаллографич. осей. Прямая и параллельное ей ребро, определяемые индексами Вейса p_1, p_2, p_3 (обозначаются $[p_1 p_2 p_3]$), проходит из начала координат O в точку A , определяемую вектором $p_1 a + p_2 b + p_3 c$, где a, b, c — периоды решётки (на рис. прямая OA определяется индексами Вейса [124]).

Кристаллографич. плоскость отсекает на осях координат, построенных на векторах a, b, c , отрезки $p_1 a, p_2 b, p_3 c$ (p_1, p_2, p_3 — целые числа); целочисл. обратные отношения $1/p_1 : 1/p_2 : 1/p_3 = h : k : l$ определяют индексы Миллера (hkl) данной плоскости. Напр., для плоскостей P на рис. $p_1=2, p_2=3, p_3=6$; обратные отношения этих величин $1/2 : 1/3 : 1/6$ можно привести к це-



Прямая OA с индексами Вейса [124] и плоскость P с индексами Миллера (321); Ox, Oy, Oz — кристаллографические осн.

лым числом; $6/2 : 6/3 : 6/6 = 3 : 2 : 1$, т. е. плоскость P определяется миллеровскими индексами (321).

Равенство нулю одного или двух индексов Миллера означает, что плоскости параллельны одной или двум кристаллографич. осям. Отрицат. значения индексов Миллера соответствуют плоскостям, пересекающим оси координат в отрицат. направлениях. Совокупность симметричных граней одной простой формы кристалла обозначается $\{h k l\}$. При дифракции рентгеновских лучей индексы h, k, l отражающей плоскости характеризуют одновременно положение дифракционного максимума (рефлекса) в обратной решётке.

Лит. см. при ст. Кристаллография. Б. К. Вайнштейн.
ИНДЕТЕРМИНИЗМ (от лат. in- — приставка, означающая отрицание, и детерминизм) — отрицание объективной связи событий, приводящее к отрицанию причинности как всеобщего принципа. В совр. физике возрождение индетерминистских концепций связано с открытием статистич. характера поведения отд. объектов микромира, даваемого квантовой механикой. В действительности открытие статистич. закономерностей знаменует переход к более глубокому отражению объективных связей в природе, когда присущая природе необходимость выступает в тесной взаимосвязи со случайностью. Т. о., статистич. характер законов микромира не означает отсутствия причинности, а выражает новую, более высокую форму детерминизма. Связь состояний во всех статистич. теориях по-прежнему носит однозначный характер. См. Причинность.

Г. Я. Мякишев.
ИНДЕФИНИТНАЯ МЕТРИКА (от лат. indefinitus — неопределённый) — обобщение скалярного произведения, когда на него не накладывается условие положит. определённости. В конечномерном векторном пространстве индефинитное скалярное произведение в координатной записи даётся ф-лой $(xy) = \sum_{i,j} g_{ij} x^i y^j$ (в случае комплексного пространства,* означает комплексное сопряжение) или $(xy) = \sum_{i,j} g_{ij} x^i y^j$ (в случае веществ. пространства); здесь $g = \{g_{ij}\}$ — невырожденная эрмитова матрица (в комплексном случае) или невырожденная веществ. симметричная матрица (в веществ. случае). Веществ. пространства с И. м. наз. также псевдоевклидовыми пространствами; важнейшим физ. примером является Минковского пространство-время (пространство-время спец. теории относительности). Псевдориманова геометрия (построенная по типу римановой, но с И. м.) лежит в основе матем. аппарата общей теории относительности (теории тяготения Эйнштейна — Гиль-