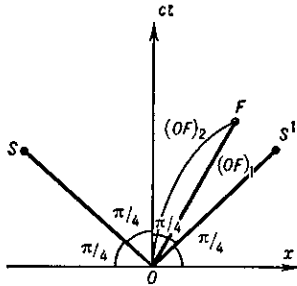


на области абс. будущего, абс. прошлого и абс. удалённого по отношению к событию, изображаемому точкой в вершине конуса.

М. л. свободных частиц (как массивных, так и безмассовых) в п.-в. Минковского изображаются прямыми, напр. для массивной частицы $x^\mu = u^\mu s$, где u^μ — постоянная 4-скорость. Частицы, движущиеся под действием внеш. сил, будут изображаться искривлёнными М. л. (рис.). Прямая, соединяющая две точки, разделённые времениподобным интервалом в п.-в.

Мировые линии в пространстве-времени Минковского, описывающие одномерное движение вдоль оси x . $(OF)_1$ и $(OF)_2$ — отрезки мировой линии массивной частицы, движущейся свободно (индекс 1) и под действием сил (индекс 2); прямая мировая линия (OF) отвечает максимальному значению «длины»



$\int_0^F ds$ в пространстве Минковского

между точками O и F ; OS и OS' — отрезки мировых линий безмассовых частиц (световых лучей); совокупность таких мировых линий для движения в трёх пространственных измерениях образует световой конус.

Минковского, имеет макс. длину по сравнению с искривлёнными М. л. Действительно, выбирая инерц. систему отсчёта, в k -рой частица, описываемая данной прямой, покоится, найдём, что длина отрезка прямой равна (умноженному на c) промежутку времени частицы, измеряемому по неподвижным часам, k -рый всегда больше промежутка времени, измеренного по движущимся часам.

В общей теории относительности М. л. свободных частиц изображаются *геодезическими линиями* в искривлённом п.-в., описывающем данное гравитац. поле. В псевдоримановом пространстве (сигнатуры — 2) времениподобные геодезические также являются кривыми макс. длины и, как и прямые в п.-в. Минковского, характеризуются тем, что касат. вектор к ним переносится параллельно вдоль М. л. Для безмассовых частиц М. л. являются изотропными геодезическими в рассматриваемом искривлённом п.-в. Изучение положения изотропных геодезических в искривлённом п.-в. важно для понимания его причинной структуры, оно лежит также в основе алгебраич. классификации полей тяготения по А. З. Петрову (см. *Тяготение*). М. л. частиц, испытывающих, помимо гравитационных, воздействий сил иной природы, изображаются кривыми в псевдоримановом пространстве общей теории относительности, отличными от геодезич. линий.

Лит. см. при ст. *Относительности теория*, *Тяготение*, Д. В. Гальцов.

МЛЁЧНЫЙ ПУТЬ — 1) Галактика. 2) Светлая полоса на ночном небе — проекция на небесную сферу удалённых (от Солнца) звёзд Галактики, близких к её плоскости. Повыш. яркость этой полосы обусловлена повыш. концентрацией звёзд в плоскости Галактики.

МНИМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ — оптич. изображение предмета, создаваемое расходящимся пучком лучей, прошедшим оптич. систему, если мысленно продолжить их в обратном направлении до пересечения. М. и., в отличие от действительного, нельзя получить на экране или фотоплёнке. Для того чтобы расходящийся пучок световых лучей превратил в сходящийся, нужно на их пути поместить собирающую оптич. систему. В частности, такой системой является глаз человека, изображение в этом случае получается на сетчатке. Простейший пример М. и. — изображение предмета в плоском зеркале. Подробнее см. *Изображение оптическое*.

МНОГОДОЛИННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ — полупроводники с гл. экстремумом энергетич. зоны (дном зоны проводимости \mathcal{E}_c или вершиной валентной зоны \mathcal{E}_v), расположенным в точке импульсного простран-

ства с $k \neq 0$ (см. *Зонная теория*). В этом случае существует не один, а неск. эквивалентных экстремумов, причём *изоэнергетич. поверхности*, построенные вблизи них, — эллипсоиды, переходящие друг в друга при преобразованиях симметрии *Бриллюэна зоны*. Окрестности эквивалентных экстремумов с эллипсоидальными *изоэнергетич. поверхностями* получили назв. *долин* и *н. Энергетич. спектр* такого полупроводника наз. *многодолинным*. Эллипсоидам соответствует *анизотропный закон дисперсии* носителей заряда $\mathcal{E}(p)$, записанный в осях эллипсоида:

$$\mathcal{E}^{\alpha}(p) = \frac{1}{2} \left(\frac{p_x^2}{m_x^2} + \frac{p_y^2}{m_y^2} + \frac{p_z^2}{m_z^2} \right), \quad (1)$$

где квазиимпульс $p = \hbar k$ отсчитывается от экстремума α -й долины, а $m_{x,y,z}^{-1}$ — гл. значения тензора обратной *эффективной массы* в долине. Если экстремумы расположены на осях симметрии 3-го и 4-го порядков зоны Бриллюэна, то две из трёх масс совпадают. При этом *изоэнергетич. поверхности* — эллипсоиды вращения с осями вращения, совпадающими с осями симметрии кристалла (рис. 1). Общая *изоэнергетич. поверхность* $\mathcal{E}(p) = \text{const}$ — совокупность эллипсоидов.

В состоянии термодинамич. равновесия носители заряда распределены поровну между долинами; поэтому в М. п. неск. (по числу долин) типов носителей. Они имеют одинаковые минимумы (или максимумы) энергии и в этом смысле эквивалентны. Однако *эфф. массы* и, следовательно, *подвижности* при данном направлении движения носителей различны для разных долин [1].

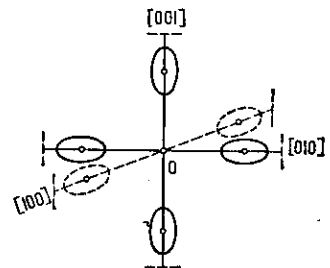


Рис. 1. *Изоэнергетические поверхности электронов в зоне Бриллюэна для Si*; пункт O — граница зоны Бриллюэна.

Анизотропия подвижности не нарушает симметрии равновесных электроч., магн., эл.-механич. и др. свойств кристалла, т. к. они определяются суммарным вкладом всех эквивалентных долин. Напр., в кристаллах кубич. сингонии электропроводность и постоянная Холла в слабых полях изотропны.

Анизотропные свойства носителей в долинах проявляются при исследовании *циклотронного резонанса*, частота k -рого $\omega_c = eH/m_c$, где H — напряжённость магн. поля, e — заряд электрона, m_c — *циклотронная эфф. масса*, определяемая в случае эллипсоидальных *изоэнергетич. поверхностей* соотношением

$$\left(\frac{1}{m_c} \right)^2 = \frac{\cos^2 \theta}{m_x^2} + \frac{\sin^2 \theta}{m_1 m_1}, \quad (2)$$

где m_x — продольная эфф. масса (вдоль оси эллипсоида), m_1 — поперечная масса, θ — угол между осью и H . Т. к. угол θ для разл. долин разный, то ω_c в разных долинах также различны.

Др. способ идентификации анизотропии носителей в долинах даёт анизотропия *магнетосопротивления*. В случае изотропного закона дисперсии носителей поперечное магнетосопротивление изотропно, а продольное отсутствует. В М. п. они оба отличны от 0 и анизотропны, причём характер анизотропии зависит от расположения долин в зоне Бриллюэна.

Междолинное перераспределение носителей. Эквивалентность долин может быть нарушена внеш. воздействием, напр. одностороннее сжатие кристалла вызывает разл. энергетич. смещение эквивалентных максимумов. В результате энергия носителей в одних долинах увеличивается, в других уменьшается. При этом равновесное заполнение долин становится *неодинако-*