

вым, и при относительно малой деформации можно достичь (при низких темп-рах) заполнения долин только одного типа за счёт полного опустошения остальных [2].

Перераспределение носителей между долинами можно получить в сильном электрич. поле, направленном под разл. углами к осям долин. При этом носители из равных долин «нагреваются» полем по-разному (см. *Горячие электроны*) и с разл. скоростью покидают «свои» долины, переходя в «чужие». Возникающее переселение долин приводит к большому нелинейным восприимчивостям М. п. в сравнительно слабых электрич. полях. С этим связаны такие эффекты, как анизотропия электропроводности в «греющих» электрич. полях (см. *Сасаки — Шибуйя эффект*), нечётное по H магнитосопротивление (в т. ч. линейное) и чётный по H Холла эффект. С междолинным перераспределением носителей связаны также специфические для М. п. механизмы акустозлектрического эффекта, поглощения звука, электрич. шумов, а также размерные эффекты [3]. Условия междолинного перераспределения, ответственного за большую величину этих эффектов: а) редкие переходы носителей из одной долины в другую по сравнению с внутримолиными переходами; б) слабый энергообмен между носителями из разных долин (по сравнению с их энергообменом с фононами), достигаемый при малой концентрации носителей [4].

М. п. с эквивалентными долинами. К ним относятся три важнейших полупроводника с решёткой алмаза: алмаз, Ge, Si n -типа. В Ge наименее минимумы зоны проводимости находятся на краю зоны Бриллюэна в L -точках (в точках пересечения осей [111] с границей зоны Бриллюэна, рис. 2); в окрестностях этих точек образуется 4 долины (L -долины), причём в пределах зоны Бриллюэна каждая изоэнергетич. поверхность состоит из 8 полуэллипсоидов вращения. В долинах вдоль осей [111] m_x в 19 раз превышает m_l . В алмазе и Si наименее экстремумы зоны проводимости располагаются на осях типа [100] (Δ -осях) сравнительно близко к границе зоны Бриллюэна, но не на ней, наименьшими являются 6 долин, попарно расположенных на осях [100], [010] и [001]. Носители в соосной паре долин ничем не отличаются друг от друга, такая пара долин может рассматриваться как одна с удвоенной плотностью состояний, а рассеяние носителей между долинами пары — как внутримолиное рассеяние.

К М. п. относятся также кристаллы с решёткой сфалерита: электронные BN, GaP, AlSb. Наименшие мини-

водникам относятся GaSb, InP и др. При термодинамич. равновесии все электроны располагаются вблизи дна зоны проводимости (в изотропной Γ -долине). При разогреве носителей электрич. полем происходит междолинное переселение с неравновесным заполнением более высоких долин, где электроны «тяжелее» и, следовательно, плотность состояний больше, чем в Γ -долине. Следствием такого переселения является (в частности) *Ганна эффект*, в основе к-рого лежит N -образный вид статической вольтамперной характеристики (ВАХ) М. п. с неэквивалентными долинами. Падающая ветвь ВАХ обусловлена «потяжелением» электронов и уменьшением их подвижности из-за ухода в верхние долины.

Аналог эффекта Ганна наблюдается также и в М. п. с эквивалентными долинами, где ВАХ при токе в направлении, совпадающем с направлением большой эфф. массы одной из долин ([100] в n -Si и [111] в n -Ge), также имеет падающий участок из-за ухода электронов в эту долину из др. долин, т. к. в них электроны сильнее разогреваются (эффект Рывкина — Кастальского).

Лит.: 1) Цидильковский И. М., Зонная структура полупроводников, М., 1978; 2) Вир Г. Л., Пикус Г. Е., Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках, М., 1972; 3) Рабба Э. И., Грибников Э. С., Кравченко В. Я., Анизотропные размерные эффекты в полупроводниках и полуметаллах, «УФН», 1976, т. 119, с. 3; 4) Гантмахер В. Ф., Левинсон И. В., Рассеяние носителей тона в металлах и полупроводниках, М., 1984; см. также лит. при ст. Полупроводники. Э. С. Грибников.

МНОГОЗАРЯДНЫЕ ИОНЫ (высокоионизованные атомы) — положительно заряженные ионы с большой кратностью ионизации. М. и. участвуют в процессах, протекающих в высокотемпературной лабораторной и астрофиз. плазме.

Специфич. особенности М. и., отличные от свойств нейтральных атомов с таким же числом электронов, объясняются их сильным кулоновским полем. К таким особенностям относятся конечная величина сечений возбуждения М. и. электронами при пороговых значениях энергии (ср. с *возбуждением атома и молекулы*), наличие резонансных пиков на кривой зависимости эфф. сечений от энергии, восстановление правильного порядка заполнения электронных оболочек (у нейтральных многоэлектронных атомов он нарушается; см. *Атом*), наличие линий-спутников в спектрах испускания (см. ниже) и т. д.

Спектроскопич. символ иона z ($z = Z - N + 1$, где Z — заряд ядра иона, N — число электронов в нём) определяет масштаб величин его радиац. и столкновит. характеристик. Так, расстояние между уровнями энергии и *ионизационный потенциал* $\sim z^2$, длины волн спектральных линий $\sim z^{-2}$, потенциал электростатич. взаимодействия электронов с ядром $\sim z$, потенциал *спин-орбитального взаимодействия* $\sim z^4$, радиус иона $r_0 \sim z^{-1}$, *лэмбовский сдвиг* $\sim z^4$, вероятность электрич. дипольного перехода $\sim z^4$.

Эфф. сечения столкновит. процессов также зависят от z . Эти процессы можно характеризовать масштабным фактором z^2 , причём для процессов возбуждения и ионизации электронами $\alpha = -4$, для фотоионизации $\alpha = -2$, перезарядки при столкновении с нейтральными атомами $\alpha = 1$, ионизации нейтральных атомов $\alpha = 2$ и т. д. Т. о., эфф. сечения элементарных процессов с участием М. и. сильно зависят от партнёра по столкновениям и параметра z .

С ростом z существенно возрастает влияние релятивистских и радиац. эффектов на характеристики М. и., а тип связи угловых и спиновых моментов электронов отличается от LS -связи (см. *Связь векторная*): происходит непрерывный переход от LS -связи к jj -связи. Если спин-орбитальное и эл.-статич. взаимодействия одного порядка величины, то имеет место промежуточный тип связи.

В результате появления релятивистских эффектов меняются *отбора правила*, разрешаются переходы, зап-

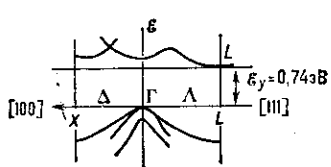


Рис. 2. Зонная структура кубического Ge для различных направлений симметрии.

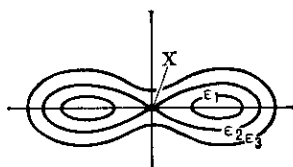


Рис. 3. Изоэнергетические поверхности $\epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ в окрестности точки X зоны Бриллюэна.

муму зоны расположены на Δ -осях [100], однако на границе (или почти на границе) зоны Бриллюэна (X -долины). При расположении минимумов почти на краю зоны (GaP) 2 эллипсоидальные изоэнергетич. поверхности при незначит. возрастании энергии носителей сливаются в одну неэллипсоидальную (рис. 3). Многодолинную структуру имеют также PbS, PbSe, PbTe, где электронные и дырочные долины расположены друг под другом в L -точках, и все *полуметаллы*.

Неэквивалентные долины. Термин «М. п.» применяют также к электронным полупроводникам с дном зоны проводимости ϵ_c при $k = 0$ (в центре зоны Бриллюэна Γ) в случае, когда в сравнительно малом энергетич. удалении от ϵ_c есть более высокие минимумы $\epsilon(p)$ (М. п. с неэквивалентными долинами). К таким полупро-