

ординат компонентами  $\varepsilon^{i_1, \dots, i_n} = \varepsilon_{i_1, \dots, i_n} = \varepsilon(i_1, i_2, \dots, i_n)$ . При помощи Л.-Ч. с. можно описать, напр., соответствие между ковариантным тензором  $T$  валентности  $k < n$  и контравариантным псевдотензором  $A$  валентности  $n-k$ :  $\varepsilon^{i_1, \dots, i_n} T_{i_1 \dots i_k} = k! A^{i_{k+1} \dots i_n}$ . Напр., в 3-мерном евклидовом пространстве векторное произведение векторов  $a$  и  $b$  равно  $[ab]_l = \varepsilon_{lkl} a_i b_k$ .

**ЛЁВШИНА ПРАВИЛО** (зеркальной симметрии правило) лю м и н е с ц е н ц и и — правило расположения линий поглощения и люминесценции. Подробнее см. в ст. Степанова универсальное соотношение.

**ЛЕГИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ** — дозированное введение в полупроводник примесей или структурных дефектов с целью изменения их электрич. свойств. Наиб. распространено примесное Л. п. Электрич. свойства легированных полупроводников зависят от природы и концентрации вводимых примесей. Для получения полупроводников с электронной проводимостью ( $n$ -типа) с изменяющейся в широких пределах концентрацией электронов проводимости обычно используют донорные примеси, образующие «мелкие» энергетич. уровни в запрещённой зоне вблизи дна зоны проводимости  $\varepsilon_c$ . Для получения полупроводников с дырочной проводимостью ( $p$ -типа) вводятся акцепторные примеси, образующие уровни вблизи потолка  $\varepsilon_v$  валентной зоны. Атомы таких примесей при комнатной тем-ре (300 K) практически полностью ионизованы (энергия ионизации  $\leq 0,05$  эВ), так что их концентрация определяет концентрацию осн. носителей заряда, к-рая связана с проводимостью  $\sigma$  полупроводника соотношением

$$\sigma_n = e \mu_n n \quad (1)$$

для электронного типа проводимости и

$$\sigma_p = e \mu_p p \quad (2)$$

для дырочного типа проводимости. Здесь  $n$  — концентрация электронов;  $p$  — концентрация дырок;  $e$  — заряд электрона;  $\mu_n, \mu_p$  — подвижности электронов и дырок (см. Полупроводниковые материалы).

Для Ge и Si донорами служат элементы подгруппы Va периодич. системы элементов (P, As, Sb), акцепторами — элементы подгруппы IIIa (B, Al, Ga). Для полупроводников типа  $A^{III}B^V$  доноры — элементы подгруппы VIa (S, Se, Te), а также Sn. Акцепторы — элементы подгруппы IIa (Be, Mg, Zn, Cd). Примеси Si и Ge в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$  в зависимости от условий получения кристаллов и эпитаксиальных слоёв могут проявлять как донорные, так и акцепторные свойства. В полупроводниках типа  $A^{II}B^{VI}$  и  $A^{IV}B^{VI}$  тип и величина проводимости обычно регулируются отклонением от стехиометрич. состава, обеспечивающим заданную концентрацию собственных точечных дефектов (вакансии, межузельные атомы).

Перечисленные примеси, как правило, образуют в полупроводниках твёрдые растворы замещения и обладают высокой растворимостью ( $10^{18}$ — $10^{20}$  ат/см<sup>3</sup>) в широком интервале тем-р. Растворимость их носит ретроградный характер и достигает максимума в Ge при 700—900 °C, в Si — при 1200—1350 °C, в GaAs — при 1100—1200 °C. Эти примеси имеют малые сечения захвата носителей, являются малоэффективными центрами рекомбинации и поэтому слабо влияют на время жизни носителей.

Примеси тяжёлых и благородных металлов (Fe, Ni, Cr, Nb, W, Cu, Ag, Au и др.) образуют «глубокие» уровни в запрещённой зоне, имеют большие сечения захвата носителей и являются эффективными центрами рекомбинации, что приводит к значит. снижению времени жизни носителей. Эти примеси обладают малой и ярко выраженной ретроградной растворимостью. Их используют для получения полупроводников с

малым временем жизни носителей или с высоким удельным сопротивлением, достигаемым за счёт компенсации мелких энергетич. уровней противоположной природы. Последнее часто применяют для получения полупроводящих кристаллов широкозонных соединений  $A^{III}B^V$  (GaAs, GaP, InP, используют примеси Fe, Ni, Cr). Основные характеристики наиболее распространённых примесей в важнейших полупроводниках даны в табл.

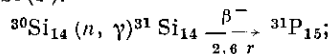
**Методы легирования.** Л. п. обычно осуществляют непосредственно в процессах выращивания монокристаллов и эпитаксиальных структур. Примесь вводится в расплав, раствор или газовую фазу. Расчёт необходимого содержания примеси требует знания количественной связи между её концентрацией и свойствами полупроводника и свойств примеси: коэф. распределения  $K$  между фазами, упругости паров и скорости испарения в широком интервале тем-р, растворимости в твёрдой фазе и т. д.

При Л. п. необходимо равномерное распределение примеси в объёме кристалла или по толщине эпитаксиального слоя. При направленной кристаллизации из расплава равномерное распределение примеси по длине слитка достигается поддержанием постоянной её концентрации в расплаве (за счёт его подпитки) либо программированным изменением коэф. распределения примеси. Последнее достигается изменением параметров процесса роста. Повысить однородность распределения примесей в монокристаллах можно воздействуя на расплав магн. полем. Магн. поле, приложенное к проводящему расплаву, ведёт к возникновению пондеромоторных сил. Последние резко снижают интенсивность конвекции и связанные с ней флуктуации тем-ры и концентрации примесей. В результате однородность кристалла повышается. Однородного распределения при эпитаксии из жидкой фазы достигают кристаллизацией при пост. тем-ре; в случае газовой эпитаксии, обеспечивая пост. концентрацию примеси в газовой фазе над подложкой.

**Радиационное легирование.** Доноры и акцепторы могут возникать в результате ядерных реакций. Наиб. важны реакции под действием тепловых нейтронов, к-рые обладают большой проникающей способностью. Это обеспечивает однородность распределения примесей. Концентрация примесей, образующихся в результате нейтронного облучения, определяется соотношением

$$N_{np} = N_0 \sigma C \phi t, \quad (3)$$

где  $N_0$  — кол-во атомов в единице объёма полупроводника,  $\sigma$  — сечение поглощения тепловых нейтронов,  $C$  — содержание нуклида в естеств. смеси (в %),  $\phi$  — плотность потока нейтронов,  $t$  — время облучения. Этот метод обеспечивает контролируемое введение примеси и равномерное её распределение. Однако в процессе облучения в кристалле образуются радиационные дефекты, для устранения к-рых необходим последующий высокотемпературный отжиг (кроме того, появляется наведённая радиоактивность, требующая достаточно длит. выдержки образцов после облучения). Л. п. методом облучения тепловыми нейтронами используется, напр., для получения высокоомных монокристаллов Si(P):



метод перспективен для легирования GaAs и др.

**Диффузионный метод.** При создании структур с  $p$ - $n$ -переходами используется диффузионное введение примеси. Профиль распределения концентрации примеси при диффузии имеет вид плавной кривой, характер к-рой определяется: тем-рой и временем проведения процесса, толщиной слоя, из к-рого осуществляется диффузия, концентрацией и формой нахождения примеси в источнике, а также её электрич. зарядом и возможностью взаимодействия с сопутствующими