

Рис. 2. Оже-рекомбинация, при которой энергия уносится дыркой, которая за спиново отщепленной валентной зоны v , переносится в зону тяжёлых дырок v_1 ; s — зона проводимости.

Безызлучательная Р. через примесные центры описывается статистич. теорией Шокли — Рида. Изменения концентрации электронов и дырок в зонах и на примесях-ловушках определяется системой ур-ний, в к-рые входят концентрации ловушек, свободных (N) и занятых (M) электронами ($N + M$ — полная концентрация ловушек), коэф. захвата на ловушки электронов (γ_e) и дырок (γ_d). Число актов в 1 с в 1 см³ можно по аналогии с (1), (2) записать в виде

$$r_e = \gamma_e n N; \quad r_d = \gamma_d p N. \quad (3)$$

Для количеств. описания безызлучат. процессов наряду с коэф. захвата γ_e , γ_d и сечениями захвата на ловушки σ_e , σ_d вводят времена жизни носителей по отношению к захвату на ловушки τ_e и τ_d :

$$\tau_e^{-1} = \gamma_e N = \sigma_e \langle v_e \rangle N; \quad \tau_d^{-1} = \gamma_d M = \sigma_d \langle v_d \rangle M. \quad (4)$$

Здесь $\langle v_e \rangle$, $\langle v_d \rangle$ — ср. тепловые скорости носителей. В простейшем случае ловушек одного типа в сильнолегиров. полупроводниках τ совпадает с временем жизни по отношению к захвату на ловушки неосновных носителей. Так, в полупроводниках p -типа

$$\tau^{-1} \approx \tau_e^{-1} = \sigma_e \langle v_e \rangle N.$$

Сечение захвата на примесные центры может изменяться в зависимости от темп-ры и типа примеси в пределах от 10⁻¹² см² (притягивающие центры, $T \approx 4,2$ К) до 10⁻²² см² (отталкивающие центры, $T = 300$ К).

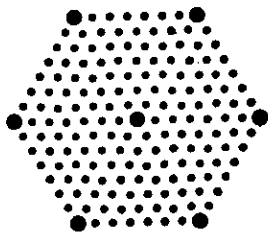
Исследование рекомбинац. процессов в полупроводниках позволяет определить коэф. и сечения Р. и их зависимости от T , электр. полей и параметров полупроводника.

Лит.: Landsberg P. T., Adams M. J., Radiative and Auger processes in semiconductors, «J. of Luminescence», 1973, v. 7, p. 3; Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г., Физика полупроводников, М., 1977; Абакумов В. Н., Перель В. И., Ясевич И. Н., Захват носителей вярда на притягивающие центры в полупроводниках, «ФТП», 1978, т. 12, с. 3. В. Н. Абакумов, И. Н. Ясевич.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ — образование на чистых поверхностях монокристаллов структур, элементарная ячейка к-рых имеет период, отличающийся от периода в объёме кристалла (в параллельных поверхности плоскостях) и обычно превышающий его в неск. раз. Развитие техники сверхвысокого вакуума (давление $p \approx 10^{-7}$ Па) позволило наблюдать атомарно-чистую, свободную от примесей поверхность, полученную сколом и сохраняющуюся неизменной в течение неск. ч.

Большинство исследований выполняется методом дифракции медленных электронов (ДМЭ) [1] или фотоэмиссионными методами [2]. В методе ДМЭ электроны с

Рис. 1. Схема электронограммы от поверхности кремния (111). Интенсивные пятна — рефлексы от объёма кристалла; слабые рефлексы, расположенные на расстоянии $1/7$ от расстояния между объёмными рефлексами, указывают на поверхность периодичность, в 7 раз большую соответствующего периода в объёме.



энергиями 1—10 эВ имеют большие сечения рассеяния и глубина их проникновения в кристалл составляет 5—10 Å, т. е. 2—3 монослоя атомов. Схема электронограммы ДМЭ для чистой поверхности кремния (111) приведена на рис. 1. Она свидетельствует о наличии поверхностного периода, в 7 раз превышающего период кристаллич. решётки в объёме. На поверхности образуется сетка размерами (7 × 7). В общем случае говорят об образовании сетки ($n \times m$), где n и m — коэф. пропорциональности между поверхностными и объёмными векторами трансляций, θ — угол между поверхностными векторами трансляций. Р. п. наблюдалась также на поверхностях Ge, GaAs, GaSb, InSb, CdS, CdTe, Te и др. полупроводниковых материалов.

Теоретич. рассмотрение Р. п. основано на квантово-хим. расчётах. На свободной поверхности гомеополлярных кристаллов при сколе образуются оборванные ненасыщенные ковалентные связи. Установление новой равновесной конфигурации поверхностных атомов происходит путём таких их перемещений, к-рые приводят к замыканию оборванных связей и т. о. к понижению энергии системы. При вычислениях полной энергии кристалла размеры поверхностной элементарной ячейки берутся из эксперимента, а характер замыкания связей выбирается модельным способом. На рис. 2 рядом с идеальной вереконструированной поверх-

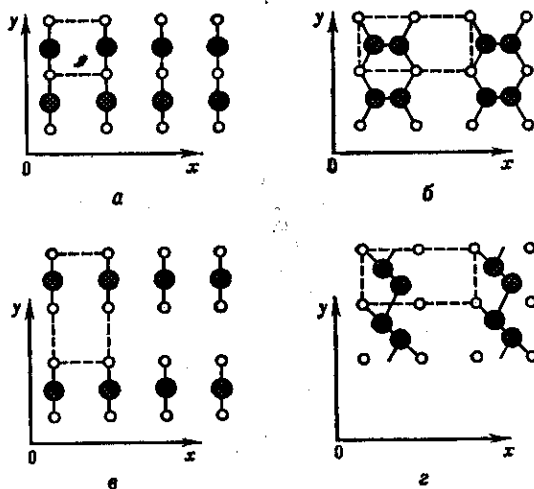


Рис. 2. Поверхностные элементарные ячейки для 3 моделей замыкания оборванных связей на поверхности (100) Si: а — вереконструированная поверхность; каждый атом верхнего слоя (большие кружки) связан 2 гибридизованными связями с атомами 2-го слоя (меньшие кружки) и имеет две оборванные свободные связи; элементарная ячейка показана пунктиром; б — модель двойных связей (удвоение поверхностной элементарной ячейки по оси $0x$); в — модель с поверхностными вакансиями; на поверхности отсутствуют ряды атомов, оставшиеся образуют двосвязные связи с атомами 2-го слоя; элементарная ячейка удвоена по $0y$; г — модель цепочек; каждый поверхностный атом имеет 2 одиночные связи с соседями в цепочке, ещё одну связь с атомами 2-го слоя, а оставшаяся 4-я связь даёт вклад в молекулярную орбиталь, охватывающую всю цепочку.

ностью (100) приведены 3 модели разл. замыкания оборванных связей. Сравнение с экспериментом не позволяет отдать предпочтение к.-л. из этих моделей, т. к. расположение дифракц. рефлексов отражает только трансляц. симметрию поверхности. Информация о взаимном расположении атомов в элементарной ячейке содержится в распределении интенсивности в дифракц. рефлексах. Анализ этого распределения является сложной матем. задачей.

Эксперимент показывает, что симметрия поверхности меняется при изменении темп-ры [3], т. е. на поверхности происходят структурные фазовые превращения. Если такое превращение идёт по типу фазового