

В связи с тем, что изготовление малошумящих омич. контактов (особенно в тех случаях, когда ПП при низкой темп-ре обладает высоким электр. сопротивлением) представляет большие трудности, а также потому, что в процессе изготовления контактов возможно загрязнение образца (внесение дополнит. примесей), часто применяют бесконтактную схему Ф. с. (рис. 1, б). В этом случае ПП помещают между обкладками воздушного конденсатора 5, включённого в одно из плеч резонансного ВЧ-моста 6, питаемого генератором Г. Поток излучения, попадая на образец, изменяет ёмкость конденсатора и нарушает баланс моста; возникает спектрометрич. сигнал, пропорциональный числу возникших носителей заряда.

Метод Ф. с. обладает чрезвычайно высокой чувствительностью к обнаружению примесей в ПП. Она обусловлена тем, что величина регистрируемого напряжения U не зависит от концентрации примеси в широких пределах её изменений. Концентрация носителей заряда dn , образующихся при фототермоионизации, и концентрация свободных носителей заряда n , генерируемых тепловыми колебаниями и фоновым излучением, много меньше концентраций основных N и компенсирующих N_k примесей и одинаковым образом от них зависят. Т. к. $U \sim dn/n$, то значение U оказывается не зависящим от N и N_k . Расчёт показывает, что при обычных условиях измерений (чаще всего реализуемых при обычной интенсивности пучка спектрометра, интенсивности фонового излучения и темп-ре измерений) в Ge и Si значение U не зависит от концентраций примесей

вплоть до $N, N_k = 10^9 - 10^8 \text{ см}^{-3}$, а при дальнейшем уменьшении концентраций примесей уменьшается линейно. При ограничении мин. регистрируемого сигнала шумами, создаваемыми генерационно-рекомбинационными процессами, предел обнаружения примесей III и V групп периодич. системы элементов в этих ПП должен составлять $10^6 - 10^7$ атомов в 1 см^3 (или $10^{-16} - 10^{-15}$ атомных %).

В случаях, когда в ПП содержатся примеси неск. сортов, относит. концентрации разл. примесей пропорциональны отношениям их концентраций. Эти отношения измеряют по отношению интенсивностей соответствующих спектральных линий (отношению площадей под контурами линий) с учётом статистики заполнения уровней энергии и сил осцилляторов оптич. квантовых переходов. Определение абс. концентраций примесей требует дополнит. измерений концентраций электронов (или дырок) при более высокой темп-ре, когда все примеси ионизованы. Ф. с. позволяет установить хим. состав как основных, так и компенсирующих примесей. Для этого ПП облучают, наряду с монохроматич. излучением частоты ν , светом из полосы собственного (межзонного) поглощения; в результате ионизованные в равновесных условиях примесные атомы нейтрализуются и становятся оптически нейтральными и фотоэлектрически активными.

На рис. 2 приведены фототермоионизацион. спектры чистых образцов Ge и Si. Линии в спектрах относятся к технологически неконтролируемым остаточным кол-вам примесей и примесных комплексов. В образце Ge (рис. 2, а) суммарная концентрация акцепторов $N_A = 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, доноров $N_D = 9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, темп-ра образца $T = 6,5 \text{ К}$, разрешение $0,03 \text{ см}^{-1}$. В образце Si (рис. 2, б) $N_A = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T = 17 \text{ К}$, разрешение $0,25 \text{ см}^{-1}$. Кроме анализа чистоты Ge и Si Ф. с. используется также для исследования локализованных состояний и анализа примесей в арсениде галлия, фосфиде индия, теллуриде кадмия, ПП алмазе и др. Чистые полупроводники A_3B_5 содержат больше остаточных примесей, чем Ge и Si. Для устранения эффектов, связанных с перекрытием состояний близко расположенных атомов примеси, приводящих к сильному уширению и даже исчезновению линий в спектрах, исследуемые образцы помещают в магн. поле, к-рое «сжимает» основное и возбуждённое состояния, увеличивает энергию связи электронов и снимает перекрытие состояний.

В зависимости от способа возбуждения примеси существуют варианты Ф. с.: ЛОВ-фотоионизационная спектроскопия — возбуждение *лампой обратной волны*; лазерная магн. Ф. с. — возбуждение монохроматич. пучком излучения лазера и сканирование спектра примеси плавно изменяющимся магн. полем.

Лит.: Kogan S. M., Lifshits T. M., Photoelectric spectroscopy. A new method of analysis of impurities in semiconductors, «Physica status solidi» (A), 1977, v. 39, p. 11; Гершензон Е. М. [и др.], Применение субмиллиметровой ЛОВ спектроскопии для определения химической природы и концентрации примесей в чистых полупроводниках, «ФТП», 1983, т. 17, в. 8, с. 1430; Андреев Б. А., Лифшиц Т. М., Фототермоионизационная спектроскопия примесей в германии и кремнии, «Высокочистые вещества», 1990, № 5, с. 7; Лифшиц Т. М., Фототермоионизационная спектроскопия примесей в полупроводниках, «ПТЭ», 1993, № 1, с. 10. *Т. М. Лифшиц.*

ФОТОТРАНЗИСТОР — транзистор (обычно биполярный), в к-ром управление коллекторным током осуществляется на основе внутр. *фотозффекта*; служит для преобразования световых сигналов в электрические с усилением последних. Основу Ф. составляет монокристалл полупроводника со структурой $n-p-n$ - или $p-n-p$ -типа. Кристалл монтируется в защитный корпус с прозрачным входным окном. Включение Ф. во внеш. электр. цепь подобно включению биполярного транзистора, выполненному по схеме с общим эмиттером и оборванным базовым выводом (нулевым током базы). При попадании излучения на базу (или коллектор) в ней образуются парные носители зарядов (электроны и дырки), к-рые разделяются электр. полем коллекторного перехода. В результате в базовой области накапливаются осн. носители заряда, что приводит к снижению потенц. барьера эмиттерного перехода и увеличению тока через Ф. по сравнению с то-

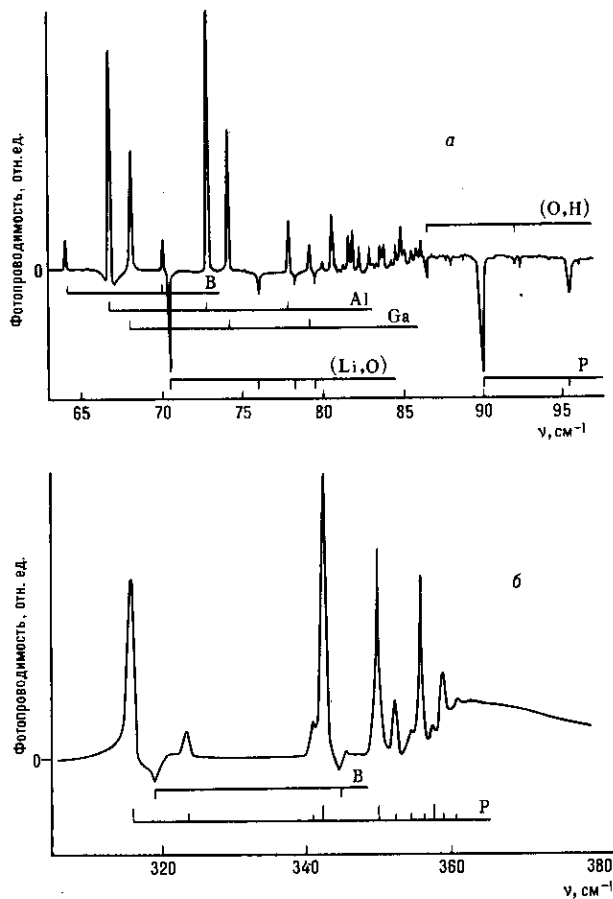


Рис. 2. Фототермоионизационные спектры примесей в высокочистых образцах германия (а) и кремния (б), зарегистрированные бесконтактным методом. Метки на горизонтальных отрезках указывают спектральные линии данной примеси. Метки, направленные вверх, соответствуют основным примесям, вниз — компенсирующим; ν — волновое число.