

имеет разрушенного поверхностного слоя и может использоваться для работы в диапазоне частот 10—100 МГц. Перечисленные свойства кристалла позволяют рекомендовать его для изготовления акустических линий задержки на поверхностных волнах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Яновский В. К., Воронкова В. И., Александровский А. Л., Дьяков В. А. // ДАН СССР. 1975. 222, № 1. С. 94—96. [2] Яновский В. К., Воронкова В. И., Милютин В. А. // Кристаллография. 1983. 28, № 2. С. 316—318. [3] Яновский В. К., Воронкова В. И., Рогинская Ю. Е., Веневцев Ю. Н. // ФТТ. 1982. 24, № 9. С. 2829—2831. [4] Воронкова В. И., Яновский В. К. // Кристаллография. 1977. 22, № 2. С. 429—431. [5] Труэлл Р. и др. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М., 1972. С. 63. [6] Моор Р., Мак-Скимин Г. // Физическая акустика. М., 1973. Т. 6. С. 203. [7] Поверхностные акустические волны // Ред. А. Олинер. М., 1981.

Поступила в редакцию  
14.05.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 1

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

### ЭЛЕКТРОМОДУЛЯЦИОННЫЕ СПЕКТРЫ ВЫСОКООМНОГО GaAs(O)

В. А. Морозова, В. В. Остробородова

(кафедра физики полупроводников)

Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию GaAs, легированного кислородом, до сих пор нет полной ясности относительно спектра примесных состояний наиболее глубоких донорных (Д) уровней О, определяющих свойства высокоомного материала. С атомарным  $O_{As}$  (О на месте As) обычно связывают Д-уровень, отстоящий от зоны проводимости ( $\epsilon$ ) на величину энергии ионизации  $\mathcal{E}_{Дс} \approx 0,63—0,8$  эВ [1—5], теория предсказывает для него  $\mathcal{E}_{Дс} = 0,78$  эВ [6]. Вопрос о температурных изменениях  $\mathcal{E}_{Дс}$  рассматривался [3, 4], но окончательно не решен. Наблюдаемый разброс в значениях  $\mathcal{E}_{Дс}$  связан, по-видимому, с возможностями различных методов, которыми пользовались авторы. Метод примесного электропоглощения (ЭП), казалось бы, позволяет надежно определять энергии ионизации глубоких уровней [7], однако работы по исследованию ЭП GaAs(O) не увенчались успехом из-за пренебрежения [8] и неправильного учета эффекта Поккельса [9]. Цель настоящей работы — с помощью метода примесного ЭП определить энергию ионизации глубокого Д-уровня О в GaAs и ее изменение с температурой.

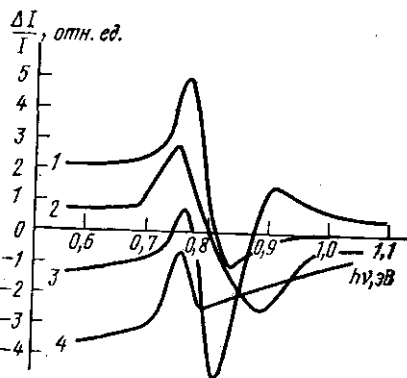
В нашем распоряжении имелись образцы GaAs, легированного кислородом, с темновыми удельными сопротивлениями  $\rho \approx 10^4—2 \cdot 10^9$  Ом·см при 300 К. Исследование эффектов Холла и фотохолла, оптического поглощения и фотопроводимости показало, что у предельно высокоомных (ПВ) образцов с  $\rho \approx 2 \cdot 10^9$  Ом·см Д-уровень кислорода существенно заполнен дырками ( $N(O^0)/N(O^+) \approx 0,3$ ). Это обстоятельство позволяет рассматривать в ПВ образцах фотоионизацию дырок с  $O^+$ -центров в валентную ( $\nu$ ) зону (фотопроводимость здесь  $p$ -типа). Мы не встречали в литературе сведений об исследовании подобного предельно высокоомного материала; обычно сообщается об исследовании высокоомного GaAs(O), с  $\rho \approx 10^6—10^8$  Ом·см [1] и отмечается аномальное поведение его фотоэлектрических характеристик (наши образцы с  $\rho \approx 10^6—10^8$  Ом·см вели себя аналогично [1]). У образцов с  $\rho < 10^6$  Ом·см фотопроводимость всегда была  $n$ -типа, а ее красная граница сдвигалась с температурой по закону изменения ширины запрещенной зоны —  $\mathcal{E}_g(T)$ , т. е. в данных образцах можно рассматривать фотоионизацию электронов с атомов  $O^0$  в  $\epsilon$ -зону [10].

Образцы формы параллелепипеда с размерами  $\sim (1—2) \times (2—3) \times (6—8)$  мм помещались в переменное электрическое поле конденсатора  $E$  (частота 200—700 Гц) и изолировались от его пластин диэлектрическими прокладками. Монохроматический свет ИКС-21, проходя через образец, падал на PbS-фотоприемник; для измерений использовалась обычная методика фазового детектирования. Измерения электромультипликативных (ЭМ) спектров проведены в области 80—300 К,  $h\nu \sim 0,5—1,5$  эВ,  $E \lesssim 3 \cdot 10^4$  В/см.

Оказалось, что изменения в пропускании  $\Delta I/I \geq 10^{-5}$  наблюдаются во всей области  $h\nu$ , при этом ЭМ спектры для образцов ПВ, с  $\rho \approx 10^7 - 10^8$  Ом·см и  $\rho \leq 10^6$  Ом·см заметно различаются. Анализ поляризационных, полевых и температурных зависимостей ЭМ спектров показал, что измеряемые сигналы представляют собой сумму сигналов электропоглощения и эффекта Поккельса. Поскольку анализатором служит сам образец [11], то полностью избавиться от эффекта Поккельса практически не удается, что необходимо учитывать при трактовке ЭМ спектров.

На рисунке представлены типичные ЭМ спектры для ПВ образцов при разных значениях  $E$  и  $T$ . Такие спектры удается получить, лишь максимально подавив сигналы от эффекта Поккельса (выбором направления распространения света и электрического поля

Электромультипликационные спектры GaAs(O) с  $\rho \approx 2 \cdot 10^9$  Ом·см для разных температур ( $T$ , К) и напряженностей поля ( $E$ , В/см): 1 — 170, 10<sup>4</sup>; 2 — 260, 2·10<sup>4</sup>; 3 — 90, 10<sup>4</sup>; 4 — 80, 3·10<sup>4</sup>



относительно кристаллографических осей кристалла, варьированием положения поляризатора либо поляризатора и анализатора [11]); в результате в области  $h\nu \sim 0,7 - 0,8$  эВ мы имеем дело с сигналом ЭП.

Характерная особенность спектров ЭП у ПВ образцов — наличие резонансного пика с максимумом (минимумом) при  $h\nu = 0,76 \pm 0,01$  эВ, положение которого не меняется с изменением  $E$  и  $T$ . Так как по положению максимального резонансного пика определяется энергия ионизации глубокого уровня [7], то полученную величину  $h\nu = \mathcal{E}_{Dv}$  можно считать характерной для фотоионизации дырки с  $O^+$ -центра в  $v$ -зону. Независимость положения максимума пика от  $T$  в области 80—260 К позволяет говорить о «привязке» D-уровня к  $v$ -зоне. Следует отметить, что из исследования спектров оптического поглощения и фотопроводимости ПВ образцов было определено значение  $\mathcal{E}_{Dv} \approx 0,76$  эВ, которое по величине и температурной привязке к  $v$ -зоне хорошо согласуется с данными ЭП [10].

ЭМ спектры GaAs(O) с  $\rho \approx 10^7 - 10^8$  Ом·см также определяются суммой эффектов Поккельса и ЭП; они имеют сложную, иногда осциллирующую форму, не всегда воспроизводимую. Подобные спектры описаны в [8, 9]. Резонансный пик ЭП при  $h\nu \approx 0,76$  эВ в этих спектрах практически не виден, однако часто наблюдается пик в области 0,8—0,9 эВ, положение его максимума зависит от  $E$ ,  $T$ , интенсивности освещения, направления записи спектра. По-видимому, здесь, как и в спектрах фотопроводимости [1], сказывается изменение типа проводимости образца с изменением  $h\nu$ , и получить информацию о примесных переходах, связанных с атомами O, не удается.

ЭМ спектры образцов с  $\rho \leq 10^6$  Ом·см определяются в основном эффектом Поккельса, часто имеют осциллирующую структуру. Нам не удалось надежно зарегистрировать в этих образцах резонансные пики ЭП, отражающие переходы электронов с нейтральных атомов  $O^0$  в  $s$ -зону.

Таким образом, использование метода модуляционной спектроскопии для исследования GaAs(O) позволило зарегистрировать резонансные пики ЭП, связанные с переходами дырок с  $O^+$ -центра в  $v$ -зону. Определено точное значение энергии ионизации D-уровня O:  $\mathcal{E}_{Dv} = 0,76 \pm 0,01$  эВ и не меняется с температурой в области 80—300 К, т. е. D-уровень привязан к  $v$ -зоне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Lin L., Omelianovski E., Bube R. H. // J. Appl. Phys. 1976. 47. P. 1852—1859. [2] Остробородова В. В., Симакин М. В., Москвская О. А. // Изв. вузов. Физика. 1976. № 2. С. 25—34. [3] Chantre A., Vincent G., Bois D. // Phys. Rev. 1981. B23. P. 5335—5359. [4] Yu P. W., Walters D. C. // Appl. Phys. Lett. 1982. 41. P. 863—865. [5] Бобылев Б. А. и др. ФТП. 1979. 13. С. 2053—2056. [6] Jaros M. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1975. 8. P. 2455—2461. [7] Виноградов В. С. // ФТТ. 1971. 13. С. 3266—3274. [8] Janath A. D., Vologonov E., Bube R. H. // J. Appl. Phys. 1975. 46. P. 1754—1766. [9] Симакин М. В., Остробородова В. В., Вавилов В. С. // ФТП.

УДК 539.172.3:537.622

## О РАЗНОВИДНОСТЯХ МЕССБАУЭРОВСКОГО ФАЗОВОГО АНАЛИЗА

А. В. Быков, В. И. Николаев, В. С. Русаков

*(кафедра общей физики для физического факультета)*

Мёссбауэровский фазовый анализ (МФА) — это, по определению, идентификация фаз, входящих в объект исследования, и изучение их индивидуальных свойств средствами мёссбауэровской спектроскопии.

Еще каких-нибудь десять—пятнадцать лет тому назад по аналогии с рентгено-структурным анализом было принято различать две основные разновидности МФА — качественный МФА и количественный МФА. Сейчас отчетливо видно, что такая классификация устарела. Произошло это сразу по трем причинам.

Во-первых, сказались особенности самой мёссбауэровской спектроскопии. Мёссбауэровский спектр содержит в себе информацию не только о кооперативных явлениях в кристалле, но также и о локальном окружении ядра, благодаря чему уже сразу после открытия эффекта Мёссбауэра возникло принципиально новое обстоятельство: появилась возможность получения большого объема разнородных данных об исследуемом веществе с помощью одного лишь экспериментального метода.

Во-вторых, существенно иным стало содержание понятия о самом «объекте исследования». Мёссбауэровская спектроскопия может дать богатейшую информацию об особенностях макро- и микроскопического строения вещества, не имеющего регулярной структуры, и вместе с тем это не будет ни качественным, ни количественным фазовым анализом в традиционном смысле слова. Отличительная черта дефектных, аморфных и аналогичных им систем состоит в том, что свойства всего исследуемого объема образца уже не могут быть описаны при помощи дискретного набора из нескольких значений соответствующей физической величины. В соответствии с этим целью МФА в таких случаях является получение качественной или количественной информации о функции распределения величины, характеризующей изучаемое свойство данного вещества.

В-третьих, в последние годы достигли высокого совершенства математические (в том числе вычислительные) средства извлечения физической информации из экспериментального мёссбауэровского спектра. Они дают возможность при наличии достаточной априорной информации об условиях эксперимента и некоторых (обычно немногих) свойствах объекта исследования получить новую информацию, качественную и количественную, о функции распределения параметров спектра — как результат решения задачи реставрации.

Изучение дефектных, аморфных и аналогичных им систем является, по существу, самостоятельным направлением в мёссбауэровской спектроскопии. Для него типичны задачи, которые сочетают в себе характерные особенности задач как качественного, так и количественного фазового анализа регулярных кристаллических структур — двух традиционных его разновидностей. Налицо, как видим, выполнение всех основных условий, в соответствии с которыми может быть выделена еще одна, третья разновидность МФА: наличие новых объектов исследования, наличие новых целей исследования, наличие физических и математических средств достижения этих целей, доказанная эффективность этих средств.

Сказанное выше приводит, таким образом, к необходимости дополнить традиционную классификацию разновидностей МФА, представив ее в следующем виде:

- 1) качественный МФА регулярных структур;
- 2) количественный МФА регулярных структур;
- 3) МФА дефектных, аморфных и аналогичных им систем.

Хотя эта классификация достаточно полно отражает состояние современных средств МФА, нельзя не сказать о некоторой ее условности, поскольку далеко не всегда можно конкретно и однозначно сформулировать задачу МФА, а тем более делать заключения о явной принадлежности объекта исследования к тому или иному классу веществ. Так, спиновые стекла аналогичны аморфным магнетикам с точки зрения их