

ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ ЛИНИИ $1s \rightarrow 2p_0$ ФОТОТЕРМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИИ ДОНОРОВ В GaAs ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

*С.Д. Барановский, Б.Л. Гельмонт, В.Г. Голубев,
В.И. Иванов-Омский, А.В. Осутин*

Наблюдалось изменение формы линии $1s \rightarrow 2p_0$ фотовозбуждения доноров в GaAs, связанное с переходом от коррелированного к полностью случайному распределению электронов на примесях при повышении температуры. Сравнение результатов эксперимента с численным моделированием на ЭВМ позволяет определять компенсацию и концентрацию примесей в сверхчистом GaAs.

Фотоэлектрическая магнитоспектроскопия является наиболее чувствительным и точным методом анализа химического состава примесей в сверхчистых полупроводниках. Качественный состав примесей определяется по положению линий в спектрах их фотовозбуждения (ФВ) в магнитном поле. Высокая чувствительность метода делает возможным регистрацию спектров ФВ вплоть до концентрации примесей $\sim 10^5 \text{ см}^{-3}$. В настоящей работе показано, что из сопоставления экспериментальной зависимости формы линии $1s \rightarrow 2p_0$ фотовозбуждения мелких доноров от температуры с расчетом, выполненным методом численного моделирования с учетом и без учета корреляции в распределении электронов по примесям, возможно определение компенсации и концентрации примесей в сверхчистом GaAs. Это существенно расширяет возможности фотоэлектрической магнитоспектроскопии.

Спектры ФВ регистрировались по методике, описанной в ². Исследованы особо чистые эпитаксиальные слои *n*-GaAs с концентрацией доноров $N_D \lesssim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, в спектрах ФВ которых отчетливо разрешаются линии доноров разной химической природы ³.

Обнаружено, что температурная зависимость полуширины линии $1s \rightarrow 2p_0$ на полувысоте имеет следующие особенности. При $T \lesssim 4 \text{ К}$ полуширина минимальна и приблизительно постоянна. С ростом T она увеличивается и снова достигает постоянного значения при $T \gtrsim 9 \text{ К}$ (рис. 1).

Для объяснения наблюдаемой температурной зависимости необходимо рассмотреть причины уширения линий ФВ примесей в GaAs. Основной причиной уширения является влияние электрических полей заряженных доноров и акцепторов. Форма линий вблизи максимума и на полувысоте определяется квадратичным эффектом Штарка и взаимодействием квадрупольных моментов примесей с градиентами электрических полей ⁴.

В исследованных особо чистых однородных слоях GaAs форма неперекрывающихся в спектрах линий $1s \rightarrow 2p_0$ химически различных доноров близка к симметричной. Следовательно, вклад квадратичного эффекта Штарка, приводящего к асимметричному уширению линий, мал по сравнению с квадрупольным ⁴. В этом случае форма линии описывается функцией распределения градиентов электрических полей $\epsilon_{zz} = \partial E_z / \partial z$ на нейтральных донорах, где E_z — компонента электрического поля вдоль направления магнитного поля. При низких температурах $T \ll e^2 N_D^{1/3} / k_B$ (e — заряд электрона, k_B — диэлектрическая проницаемость материала, k_B — постоянная Больцмана) эта функция распределения определяется корреляцией в расположении нейтраль-

ных и заряженных примесей, связанной с электрон-электронным взаимодействием⁴. При высоких температурах $T \gg e^2 N_D^{1/3} / k_B$ к расположение электронов на донорах близко к случайному.

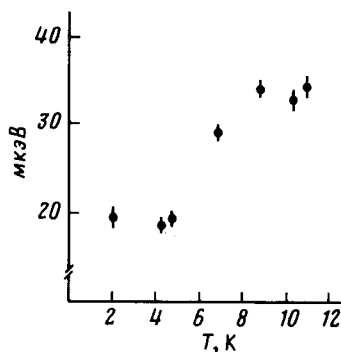
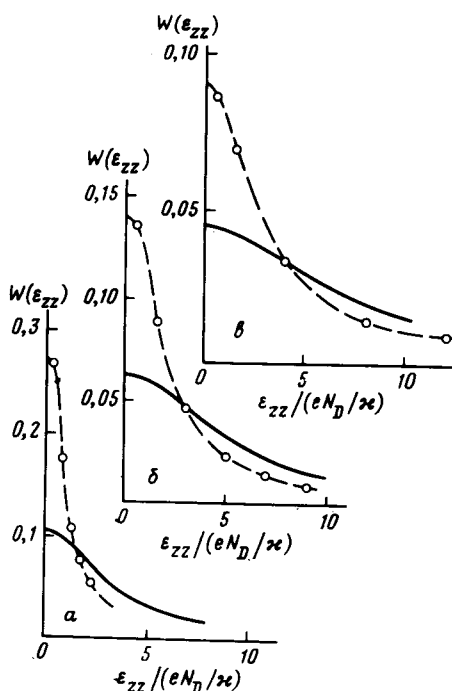


Рис. 1. Экспериментальная зависимость полуширины линии фотовозбуждения $1s \rightarrow 2p_0$ мелких доноров от температуры в образце GaAs ($\hbar\omega = 6,24$ мэВ, $H \approx 48$ кЭ)

Рис. 2. Функция распределения градиента поля (теоретическая форма спектральной линии). Степень компенсации K : а — $K=0,3$; б — $K=0,5$; в — $K=0,7$. Сплошные кривые — результат работы⁵. Точки — результат моделирования на ЭВМ. Пунктир проведен для наглядности.



Наличие в температурной зависимости двух участков с постоянной полушириной линии свидетельствует, что в GaAs в измеренном интервале температур распределение электронов по примесям изменяется от коррелированного до случайного. Отметим, что оценка температуры перехода от коррелированного распределения к полностью случайному $e^2 N_D^{1/3} / k_B$ к ~ 6 К для $N_D \sim 10^{14}$ см⁻³ согласуется с экспериментально наблюдаемыми скачками в ширинах линий.

Для анализа изменения ширины линии с ростом температуры необходимо рассчитать функцию распределения градиентов полей в этих двух случаях. Для случайного распределения электронов по донорам такой расчет был выполнен в работе⁵ аналитически и подтвержден моделированием на ЭВМ по методу Монте-Карло. При низких температурах, когда заполнение доноров электронами определяется электрон-электронным взаимодействием, мы предприняли моделирование системы на ЭВМ по методу Монте-Карло. Алгоритм моделирования аналогичен использованному в⁶. Кроме того, был проведен аналитический расчет в рамках дипольной модели⁷, согласно которому ширина линии пропорциональна $N_D \cdot K^{4/3}$. Аналитический расчет хорошо согласуется с результатами моделирования. Эти данные будут изложены в более подробной публикации, а здесь приведем только результаты моделирования на ЭВМ.

Рис. 2 иллюстрирует результаты расчета, справедливого при $T \ll e^2 N_D^{1/3} / k_B$ к, и данные работы⁵, которые следует применять к случаю $T \gg e^2 N_D^{1/3} / k_B$ к. Рассмотрены компенсации $K = 0,3; 0,5; 0,7$. Переход от одного типа распределения электронов на примесях к другому ведет к изменению ширины линии, величина которого зависит от компенсации. Уширение расчет с уменьшением компенсации.

Таким образом, сравнение ширин линий для двух распределений позволяет определить степень компенсации. При известной компенсации сопоставление экспериментальной формы линии с расчетной дает возможность находить концентрацию примесей в полупроводнике.

Литература

1. Kogan Sh.M., Lifshits T.M. Phys. St. Sol. (a), 1977, 39, 11.
2. Голубев В.Г., Иванов-Омский В.И., Минервин И.Г., Осутин А.В., Поляков Д.Г. ЖЭТФ, 1985, 88, 2052.
3. Голубев В.Г., Жилев Ю.В., Иванов-Омский В.И., Маркарян Г.Р., Осутин А.В., Челноков В.Е. ФТП, 1987, 21, 1771.
4. Коган Ш.М., Нгуен Ван Лиен. ФТП, 1981, 18, 44.
5. Larsen D.M. Phys. Rev. B., 1973, 8, 535.
6. Барановский С.Д., Узаков А.А. ФТП, 1982, 16, 1606.
7. Коган Ш.М., Нгуен Ван Лиен, Шкловский Б.И. ЖЭТФ, 1980, 78, 1933.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе АН СССР

Поступила в редакцию
23 сентября 1987 г.