

## НАБЛЮДЕНИЕ ПРИМЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ В ВЫСОКООМНОМ АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ МЕТОДОМ ФОТООТРАЖЕНИЯ

Пихтин А. Н., Айраксинен В.-М., Липсанен Х., Туоми Т.

Впервые в дифференциальных спектрах отражения, промодулированных лазерной подсветкой, при комнатной температуре отчетливо наблюдался сигнал, обусловленный примесными состояниями. В высокоомном арсениде галлия этот сигнал превышал сигнал в собственной области спектра.

После того как в [1] было показано, что фотоотражение (ФО) как один из методов модуляционной спектроскопии может успешно использоваться для изучения электронных состояний в гетероструктурах и квантово-размерных слоях, интерес к нему резко возрос. Как правило, в спектрах наблюдались собственные электронные состояния. Возможности фотоотражения как метода исследования и контроля примесных состояний оставались весьма неопределенными. Недавно в длинноволновой области спектра при  $\hbar\omega < E_g$  и низкой температуре в квантово-размерных слоях [2] и в эпитаксиальных слоях  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , выращенных молекулярной эпитаксией [3], наблюдались слабые осцилляции, которые предположительно связывались с наличием примесей. Фотоотражения, обусловленного примесными или другими дефектными состояниями, в арсениде галлия, как и в других полупроводниковых кристаллах, насколько нам известно, при комнатной температуре ранее не наблюдалось.

В настоящей работе сообщается о наблюдении фотоотражения в области  $\hbar\omega < E_g$  от поверхности (100) высокоомных монокристаллов арсенида галлия при комнатной температуре.

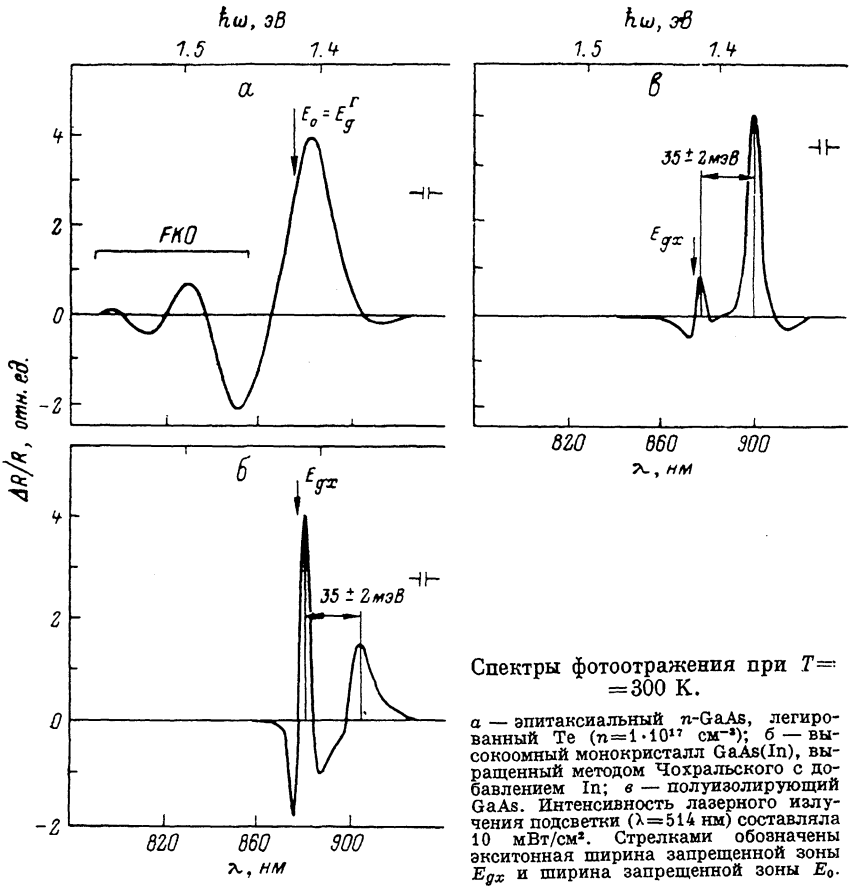
Техника измерения спектров ФО была аналогична приведенной в [4]. В качестве модулирующего использовалось излучение  $\text{Ar}^+$ -лазера ( $\lambda=514$  или  $488$  нм) с плотностью энергии от  $0.1$  до  $200$  мВт/см<sup>2</sup>. Зондирующее монохроматическое излучение от лампы накаливания, пропущенное через монохроматор, отражалось от поверхности образца и регистрировалось на частоте модуляции кремниевым фотодиодом с резонансным усилителем. Накопление сигнала, его обработка и управление разверткой длин волн монохроматора осуществлялись микрокомпьютером. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Нами были исследованы три группы образцов, типичные спектры ФО которых представлены на рисунке: а) толстые ( $d \geq 10$  мкм) эпитаксиальные слои  $n$ -GaAs, выращенные газофазной эпитаксией на (100) подложке GaAs и легированные теллуром до  $n=(0.5 \div 2) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>; б) высокоомные ( $\rho > 10^8$  Ом·см) монокристаллы арсенида галлия высокой степени кристаллического совершенства, выращенные методом Чохральского из раствора-расплава с добавлением индия; по данным микрорентгеноспектрального анализа, эти кристаллы содержали около 0.5 % In; в) пластины полужолирующего арсенида галлия, выращенного методом Чохральского.

Во всех случаях спектры ФО измерялись от оптически полированной поверхности (100).

Из рисунка, а видно, что в низкоомных образцах  $n$ -типа проявляются типичные осцилляции Франца—Келдыша в области  $\hbar\omega \geq E_g$ , подобно тому как

это неоднократно наблюдалось ранее. Спектры ФО высокоомных образцов значительно интереснее. В коротковолновой области проявляются узкие пики с полушириной около 6 мэВ вблизи экситонной ширины запрещенной зоны арсенида галлия  $E_{gx}(\text{GaAs})=1.42$  при комнатной температуре. В образце GaAs(In) спектр сдвинут примерно на 8 мэВ в длинноволновую область в соответствии с изменением ширины запрещенной зоны  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  [5]. Энергетическое положение, форма и ширина линий свидетельствуют о преобладании экситонных эффектов в формировании коротковолновой части спектров ФО этих образцов. Эта часть спектра похожа на спектры электроотражения (ЭО),



Спектры фотоотражения при  $T=300$  К.

а — эпитаксиальный n-GaAs, легированный Te ( $n=1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>); б — высокоомный монокристалл GaAs(In), выращенный методом Чохральского с добавлением In; в — полупроводящий GaAs. Интенсивность лазерного излучения подсветки ( $\lambda=514$  нм) составляла 10 мВт/см<sup>2</sup>. Стрелками обозначены экситонная ширина запрещенной зоны  $E_{gx}$  и ширина запрещенной зоны  $E_o$ .

полученные на нелегированном n-GaAs при малых напряжениях смещения [6], что может указывать на сравнительно малые напряженности электрического поля вблизи поверхности образцов б и в. Обратим внимание на то, что осцилляции Франца—Келдыша в этих образцах не наблюдались.

Особый интерес представляет длинноволновая часть спектров б и в. Интенсивный пик наблюдался при энергиях, на  $35 \div 40$  мэВ меньших экситонной ширины запрещенной зоны. Предварительный анализ этого пика по методике, применяемой для анализа спектров ЭО, показал, что он может быть связан с состоянием, находящимся в запрещенной зоне на  $35 \div 40$  мэВ выше валентной зоны или ниже зоны проводимости. По энергетическому положению эта величина очень хорошо согласуется с энергией ионизации Si-акцептора, замещающего атомы As в решетке GaAs ( $E_{Asi}=34.8$  мэВ [7]). Известно, что именно кремний является основной остаточной примесью в кристаллах арсенида галлия, выращенных методом Чохральского. Выступая как амфотерная примесь, кремний может замещать как Ga, так и As и тем самым при определенных условиях способствовать получению высокоомного материала.

При изменении интенсивности модулирующего лазерного излучения от 0.1 до 200 мВт/см<sup>2</sup> форма примесной и экситонной линий сохранялась, в то время как отношение их амплитуд изменялось более чем в 2 раза.

Качественные различия спектров ФО для низкоомного *n*-GaAs и высокоомных образцов, вероятно, обусловлены особенностями потенциального рельефа вблизи их поверхностей, а сам факт наблюдения интенсивных линий ФО в примесной области спектра указывает на то, что в формирование сигнала ФО существенный вклад вносит перезарядка примесных центров, осуществляемая модулирующим излучением подсветки. Отметим, что амплитуда «примесного» пика ФО (см. рисунок, *e*) в 5 раз (!) превышает амплитуду пика ФО в собственной области.

Отношение интенсивностей собственной экситонной и «примесной» линий ФО существенно (почти на порядок) изменялось при движении по поверхности образца. Это обстоятельство свидетельствует о том, что метод ФО может быть применен для получения топограмм распределения потенциального рельефа и примесных состояний вблизи поверхности или гетерограницы полупроводников.

#### Список литературы

- [1] Glembocki O. J., Shanabrook B. V., Bottka N., Beard W. T., Comas J. // *Appl. Phys. Lett.* 1985. V. 16. N 10. P. 970—972.
- [2] Shanabrook B. V., Glembocki O. J., Beard W. T. // *Phys. Rev. B.* 1987. V. 35. N 5. P. 2540—2560.
- [3] Huang D., Ji G., Reddy U. K., Morkoc H. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 63. N 11. P. 5447—5453.
- [4] Airaksinen V. M., Lipsanen H., Tuomi T. // *Proc. 13 Nordic Semicond. Meeting. Stockholm, Sweden, 1988.*
- [5] Пяхтин А. Н. // *ФТП.* 1977. Т. 11. В. 3. С. 425—455.
- [6] Silkerstein R. P., Pollak F. H. // *Sol. St. Commun.* 1980. V. 33. N 11. P. 1131—1133.
- [7] Landolt-Börnstein. *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology.* New Series. V. 17a. Berlin—Heidelberg, 1982.

Ленинградский  
электротехнический институт  
им. В. И. Ульянова (Ленина)  
Хельсинкский технологический  
университет  
Финляндия

Получена 2.03.1989  
Принята к печати 17.03.1989