

АНОМАЛЬНЫЙ ФОТОЭФФЕКТ НА СВЯЗАННЫХ ЭКСИТОНАХ В ФОСФИДЕ ГАЛЛИЯ

А.Н.Пихтин, В.А.Попов

В GaP *p-n*-переходах при температурах 40 — 80 К наблюдался фотоэффект на A_N , NN_3 , NN_4 ; NN_5 , и $A_{\text{Вi}}$ — линиях, связанных экситонов. Фотоответ в области A_N -линии превышал максимальное значение в собственной области спектра.

Принято считать, что связанный экситон представляет собой локализованное возбужденное состояние в кристалле и не может непосредственно участвовать в процессах переноса энергии (заряда). Наблюдавшийся ранее в фосфиде галлия фотоответ в области A_N -линии связанного на азоте экситона [1, 2] не вызывал удивления, поскольку в исследованном температурном интервале энергия связи экситона E_i была порядка kT , и фотоэффект мог быть объяснен обычным тепловым "довозбуждением" экситона с последующим образованием свободных носителей заряда.

Полученные нами экспериментальные данные не укладываются в рамки существующих представлений и указывают на возможность эффективной миграции связанных экситонов в кристалле.

Исследования проводились как на диффузионных, так и на эпитаксиальных GaP *p-n*-переходах. Возбуждение проводилось через *p*- или *n*-область. Концентрация азота, замещающего фосфор в фосфиде галлия и являющегося эффективной изоэлектронной ловушкой (изоэлектронным

акцептором), изменялась от $2 \cdot 10^{15}$ до $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Люкс-амперные характеристики диодов при исследуемых плотностях возбуждений были линейными.

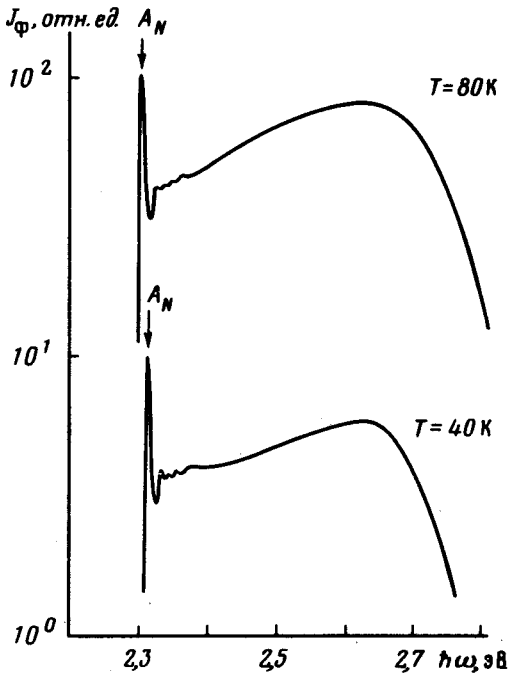


Рис.1. Спектры фототока короткого замыкания эпитаксиально-го GaP: N p-n-перехода

На рис.1. представлены спектры фототока короткого замыкания для одного из образцов полученного двойной жидкостной эпитаксией и легированного азотом до $N = 1,1 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Толщина p-области, через которую проводилось возбуждение, составляла 30 мкм, а ширина области объемного заряда по данным вольт-фарадных измерений $w = 0,3$ мкм. Обращает на себя внимание тот факт, что при низких температурах фототок в области A_N -линии связанных на единичных атомах азота экситонах имеет аномально большую величину и превосходит максимальное значение фототока в собственной области спектра. Температурные измерения показали, что отношения фототока в A_N -линии к максимальному значению фототока в области собственного поглощения монотонно растут при уменьшении температуры от 300 до 40 К. Эти факты указывают, что наблюдаемый фотоэффект на A_N -линии связанного экситона не может быть объяснен процессами термической диссоциации или распадом экситонов на дефектах в кристалле.¹⁾ Подтверждением этому

1) Возможная передача энергии возбуждения путем самопоглощения и переизлучения также должна быть исключена поскольку относительные величины фототока в A -линии (I_A / I_{max}), как и в NN_n -линиях не зависели от квантового выхода люминесценции p- и n-области. Кроме того, в отличие от экситонов, связанных на нейтральных донорах или акцепторах, электронная структура изоэлектронных центров практически исключает процесс эмиссии оже-электрона (дырки), что экспериментально было подтверждено на примере GaP: N и GaP: Bi в работе [6].

служит обнаруженный нами фотоэффект на NN_3 -, NN_4 - и NN_5 - линиях экситонов, связанных с парами атомов азота (рис.2). Положение максимумов в спектре фотоответа и ширина линии с точностью 1 мэВ совпадали с результатами исследований спектров поглощения и люминесценции [3], а энергии связи, равные 64, 39 и 31 мэВ на порядок превышали kT .

Отметим, что коэффициент поглощения в области NN_n -линий не превышал 1 см^{-1} , а концентрация NN_n -пар в образце, спектр которого представлен на рис.2, была порядка $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. A_N -линия в спектрах фотоответа проявлялась также довольно отчетливо в образцах с концентрацией азота на уровне 10^{15} см^{-3} .

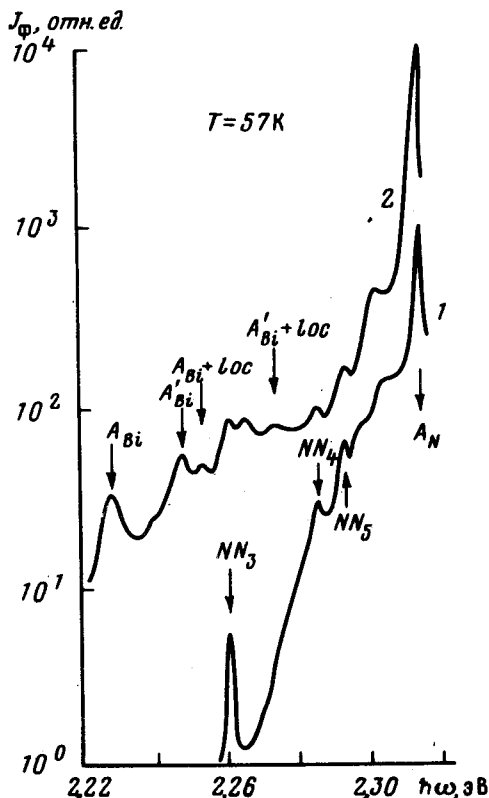


Рис.2. Структура спектров фототока короткого замыкания GaP p-n-переходов, легированных азотом (кривая 1. — $N = 1,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\omega = 0,3 \text{ мкм}$, $d = 30 \text{ мкм}$) и азотом и висмутом (кривая 2. — $N = 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\omega = 0,5 \text{ мкм}$, $d = 7 \text{ мкм}$). Стрелками указана интерпретация линий экситонов, связанных с одиночными атомами азота (A_N) и висмута (A_{Bi}) и с парами атомов азота (NN_n). Возбужденное состояние экситона, связанного с висмутом, обозначено A'_{Bi} , а $A_{Bi} + \text{loc}$ и $A'_{Bi} + \text{loc}$ обозначают фоновые повторения соответствующих линий с испусканием локального фона

Фотоэффект наблюдался на экситонах, связанных как с изоэлектронными акцепторами N - и NN_n -, так и с изоэлектронными донорами, свидетельством чего служит спектр, приведенный на рис.2 (кривая 2) для

образца фосфида галлия, легированного висмутом. Кроме наиболее глубокой A_{VI} -линии с энергией связи 117 мэВ, проявлялась тонкая структура, аналог которой наблюдался ранее лишь в спектрах люминесценции. Расшифровка этой структуры представлена на рис.2. Отметим, что в обычных и даже дифференциальных спектрах поглощения подобная структура не проявлялась и обнаруженные эффекты открывают возможность исследования слабого оптического поглощения на связанных экситонах в тонких слоях.

Возможным механизмом появления фототока в области линий поглощения на связанных экситонах при низких температурах, не противоречащим совокупности полученных в настоящей работе экспериментальных данных, является миграция связанных экситонов к $p-h$ -переходу и последующая их диссоциация в слое объемного заряда, где напряженность поля достигает величины 10^5 В/см и более¹⁾. Данные рис.1 показывают, что процесс переноса возбуждения связанными экситонами может быть весьма эффективен, а соответствующие "диффузионные длины" могут даже превышать L_n и L_p для свободных носителей и составлять по крайней мере единицы микрон.

На возможность передачи возбуждения связанными экситонами указывают также данные [5], где наблюдалась люминесценция NN_1 на NN_5 -линии при селективном возбуждении в NN_5 -линии.

Ленинградский
электротехнический институт
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию
18 марта 1980 г.
3 мая 1980 г.

Литература

- [1] H.Kressel, I.Ladany. Appl. Phys. Lett., 22, 224, 1973.
- [2] H.Gollnast, G.Richter, J.Herrmann. Phys. St. Sol., (a), 38, K83, 1976.
- [3] D.G.Thomas, J.J.Hopfield. Phys. Rev., 150, 680, 1966.
- [4] Г.Ф.Глинский, А.Н.Пихтин. ФТП, 9, 2139, 1975.
- [5] P.J.Wiesner, R.A.Street, H.D.Wolf. Phys. Rev. Lett., 35, 1366, 1975.
- [6] J.D.Cuthbert. J. Appl. Phys., 42, 739, 1971.

¹⁾ Экситоны, связанные на единичных атомах азота в GaP диссоциируют при напряженности поля порядка 10^5 В/см [4].