

06.3;07

Фотопропускание на связанных экситонах в GaP(N) и GaAs_{1-x}P_x(N)

© А.Н. Ивкин, А.Н. Пихтин

С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 23 сентября 1997 г.

На экситонах, связанных на атомах азота в эпитаксиальных слоях GaP(N) и GaAs_{1-x}P_x(N), наблюдались дифференциальные спектры фотопропускания, вызванные эффектом Штарка в приповерхностном поле полупроводника.

Сущность методов фотоотражения (ФО) и фотопропускания (ФП) заключается в регистрации изменения отраженного или прошедшего зондового света вследствие периодической модуляции характеристик материала или границ раздела, вызванной вторым световым пучком. Обладая традиционной для модуляционной спектроскопии высокой чувствительностью, эти методы получили свое "второе рождение" после их применения для диагностики гетероструктур, квантово-размерных слоев и сверхрешеток [1]. В дальнейшем они были опробованы на многих материалах и структурах, однако сигналы ФО и ФП регистрировались лишь в области прямых межзонных (экситонных) переходов. Наблюдавшееся в прямозонных полупроводниках ФО при $\hbar\omega \leq E_g$ по существу также было связано с прямыми квазимежзонными переходами и их фононными повторениями [2].

В настоящей работе на примере экситонов, связанных на атомах азота в фосфиде галлия, впервые сообщается о возможности регистрации методом фотопропускания примесных состояний в полупроводниках, включая непрямозонные материалы.

Методика измерений была аналогична описанной в [2] за исключением того, что вместо отраженного зондирующего света регистрировался прошедший. В качестве источника накачки, осуществляющего возмущение, использовалось промодулированное на частоте $f = 38$ Hz излучение He-Cd лазера ($\lambda = 441.6$ nm), мощность которого изменялась при помощи фильтров от 0.1 до 50 mW. Прошедший сквозь образец зондирующий световой пучок регистрировался кремниевым фотодиодом

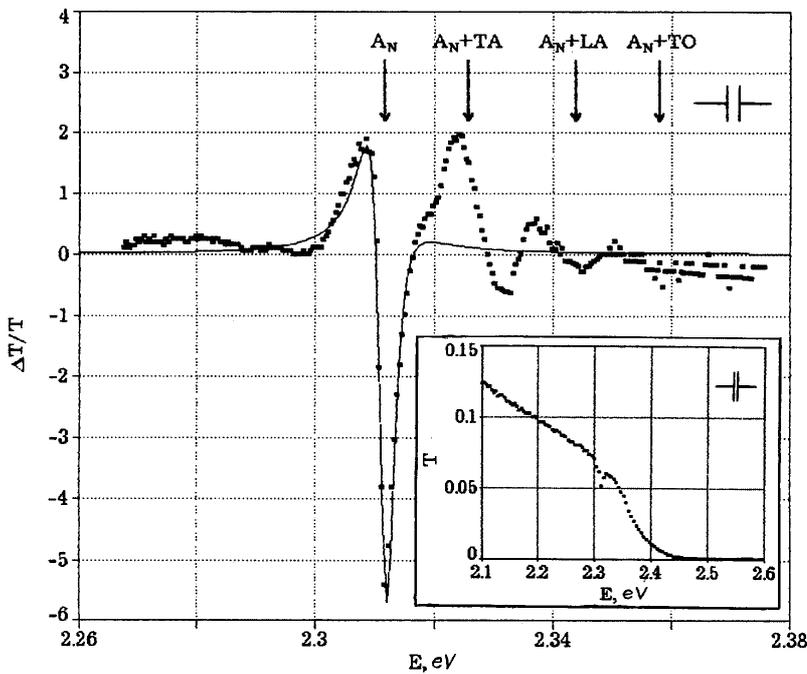


Рис. 1. Спектр фотопропускания GaP(N) в области A-линии связанного экситона (точки — эксперимент, сплошная линия — расчет). На вставке — спектр пропускания. $T = 89$ К.

с предусилителем по схеме резонансного усиления и синхронного детектирования.

Исследования проводились на эпитаксиальных слоях фосфида галлия и твердых растворах арсенида-фосфида галлия, выращенных методом газофазной эпитаксии и легированных азотом в процессе роста до концентрации $N \simeq 10^{16} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Применялись как однородные слои толщиной $10 - 30 \text{ }\mu\text{m}$ *n*-типа электропроводности, так и *p-n*-переходы.

Форма спектров ФП и амплитуды осцилляций зависели от концентрации свободных носителей заряда, что, по-видимому, связано с изменением величины и однородности электрического поля в слое объемного заряда. На рис. 1 приведен спектр ФП, измеренный на

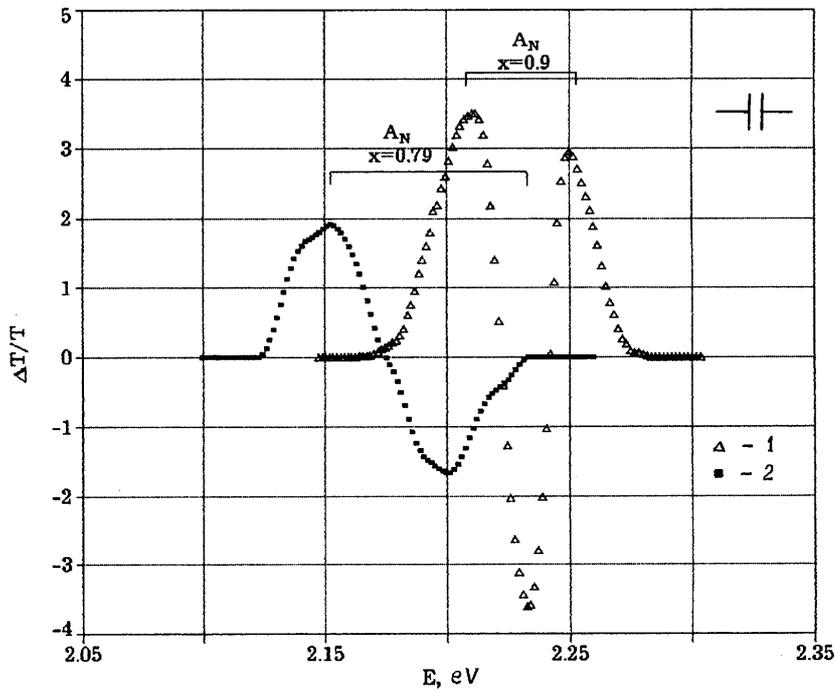


Рис. 2. Спектры ФП слоев твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x(\text{N})$: 1 — $x = 0.9$, 2 — $x = 0.79$. $T = 85 \text{ K}$.

однородном эпитаксиальном слое $\text{GaP}(\text{N})$ (без p - n -перехода) при температуре $T = 89 \text{ K}$, в сравнении со спектром оптического пропускания этого же образца. Отчетливо видна не только сильная резонансная A_N -линия связанного экситона с энергией перехода $E_0 = 2.311 \text{ eV}$, но и ее фоновые повторения с испусканием фононов. Энергии $TA = 13.1$; $LA = 31$ и $TO = 45 \text{ meV}$ фононов полностью согласуются с величинами, определенными из спектров люминесценции [3]. Форма бесфононной линии аналогична спектру дифференциального электропоглощения в области A -линии связанного экситона, наблюдавшемуся в объемных кристаллах GaP во внешних электрических полях [4]. Это показывает, что сигнал ФП обусловлен сдвигом и уширением линии связанного

экситона, вызванными квадратичным эффектом Штарка в приповерхностном поле полупроводника. Лазерная подсветка модулирует величину этого поля, изменяя оптическое пропускание активного слоя. Предварительный анализ формы спектра ФП показал, что в GaP(N) контур поглощения близок к Лоренцеву с полушириной $\Gamma \simeq 4 \text{ meV}$ для образцов с $N_{D,A} \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, как это показано сплошной линией на рис. 1. С увеличением концентрации примесей спектр уширяется и лучше описывается функцией Гаусса. По-видимому, это связано с неоднородностью электрического поля в слое, где формируется сигнал ФП.

Обратим внимание, что сигнал ФП формируется в тонком приповерхностном слое полупроводника, что открывает возможность определять характеристики этого слоя, в частности — напряженность электрического поля из анализа формы спектра. По проведенным нами оценкам (подробнее эти результаты будут опубликованы в журнале "Физика и техника полупроводников") в образце, спектр которого представлен на рис. 1, напряженность электрического поля вблизи поверхности составляла $\mathcal{E} \simeq 10^4 \text{ V/cm}$, а лазерная подсветка мощностью $100 \mu\text{W/mm}^2$ изменяла ее на величину $\Delta\mathcal{E} \simeq 5 \cdot 10^2 \text{ V/cm}$.

Спектры фотопропускания связанных экситонов были зарегистрированы нами также при исследовании эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x(\text{N})$. В качестве примера на рис. 2 приведены данные для двух образцов с составом $x = 0.9$ и $x = 0.79$. Наблюдается сильный сдвиг и уширение связанного экситона вследствие изменения энергетических зазоров с изменением x и наличия микроскопических флуктуаций состава в твердом растворе. Контур линии, как и следовало ожидать, в твердом растворе описывался функцией Гаусса. Для состава $x = 0.79$ внутри линии ФП наблюдалась характерная структура.

Список литературы

- [1] *Glembocki O.J., Shanabrook B.V., Bottka N.* // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 46. N 10. P. 970–972.
- [2] *Пухтин А.Н., Тодоров М.Т.* // ФТП. Т. 28. В. 6. С. 1068–1075.
- [3] *Landolt-Börnstein.* Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology / Ed. O. Madelung. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York, 1982. V. 17a. 348 p.
- [4] *Глинский Г.Ф., Пухтин А.Н.* // ФТП. 1975. Т. 9. В. 11. С. 2139–2145.