

05.2; 06.3; 07

© 1992

НЕЛИНЕЙНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В СВЕРХРЕШЕТКАХ  
 $AlGaAs/GaAs$ , ОБУСЛОВЛЕННОЕ МНОГЧАСТИЧНЫМ  
 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ В ЭКСИТОННОМ ГАЗЕ  
 БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

В.А. Г а й с л е р, А.М. Г и л и н с к и й,  
 А.А. К р а с н о в, Н.Т. М о ш е г о в,  
 А.С. Т е р е х о в, А.И. Т о р о п о в

Изучение оптических свойств сверхрешеток (СР) и многослойных структур с квантовыми ямами (МКЯ) представляет как фундаментальный, так и значительный практический интерес, связанный с возможностью реализации эффективных модуляторов света на экситонных переходах в СР и МКЯ. Настоящая работа посвящена исследованию нелинейно-оптических свойств экситонного газа в МКЯ в условиях интенсивной оптической накачки. Впервые эффект многочастичного взаимодействия в экситонном газе большой плотности, приводящий к коротковолновому („синему“) сдвигу линий экситонного поглощения МКЯ, наблюдался в [1, 2]. Величина сдвига существенно зависела от ширины квантовых ям  $L$  („степени двумерности“ экситонов) и оказалась значительной только при  $L \approx 50 \text{ \AA}$ . В работах [3, 4] сделан вывод, что при ширине ямы  $L = 100 \text{ \AA}$  сдвиг линий отсутствует. Отметим, однако, что данные работ [1, 2] получены в эксперименте с субпикосекундным временным разрешением, ограничивающим спектральное разрешение величиной в несколько миллизелектронвольт; результаты [3, 4], по-видимому, могут объясняться значительным уширением линий экситонного поглощения в исследовавшихся авторами структурах (ширина линии 1НН экситона по уровню  $1/2$  – около 6 мэВ. В настоящей работе мы сообщаем о наблюдении, в отличие от результатов [3, 4], значительного „синего“ сдвига линий экситонного поглощения при квазистационарной резонансной и межзонной оптической накачке экситонов в высококачественных  $AlGaAs/GaAs$  МКЯ-структурах с шириной квантовых ям  $L = 100 \text{ \AA}$  и обсуждаем причины обнаруженного различия в величине эффекта при различных способах генерации экситонов.

Исследовавшиеся образцы выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках полужолирующего арсенида галлия при температуре  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  и представляли собой 50-периодные МКЯ-структуры  $100 \text{ \AA } GaAs / 100 \text{ \AA } Al_{0.25}Ga_{0.75}As$  с фоновой концентрацией примесей не более  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , заключенные между разделительными короткопериодными сверхрешетками (20 периодов по  $25 \text{ \AA } GaAs / 50 \text{ \AA } Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ ). На рис. 1, а показан

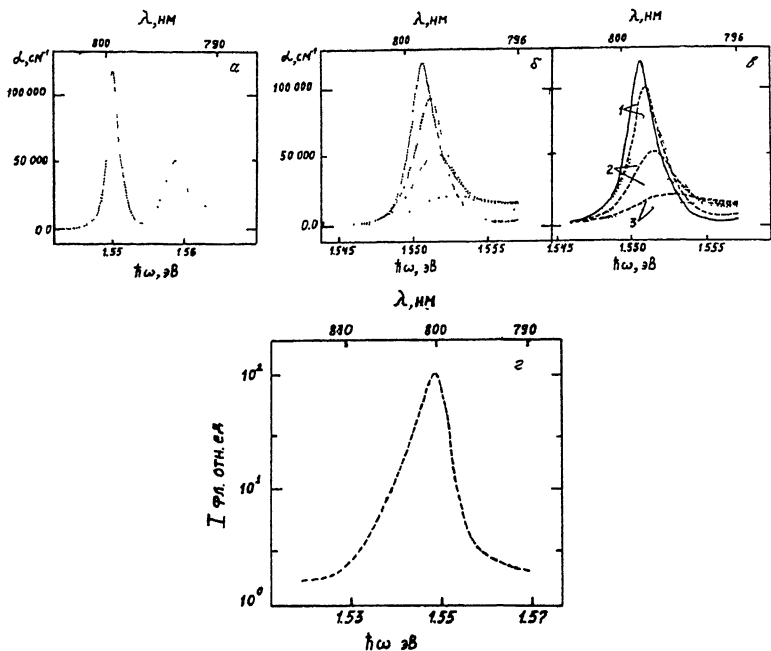


Рис. 1. Спектры поглощения (а, б, в) и фотолюминесценции (г) 50-периодной МКЯ-структуры при температуре 6 К. а - равновесный спектр поглощения; б - резонансная оптическая накачка с плотностью мощности, сверху вниз:  $0$ ,  $6 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$ ,  $6 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>; в - резонансная и межзонная накачка равных интенсивностей. Сплошная линия - равновесный спектр, пунктир - резонансная, точки - межзонная накачка. Плотность мощности: 1 -  $3.5 \cdot 10^2$ , 2 -  $2 \cdot 10^3$ ; 3 -  $6 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>. г - спектр фотолюминесценции при межзонной накачке с плотностью мощности  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

спектр поглощения структуры в области 1НН и 1ЛН экситонных резонансов, измеренный при температуре 6 К. В спектре полностью разрешены линии „тяжелого“ и „легкого“ экситонов, их ширины на полувысоте равны 1.9 и 3.2 мэВ соответственно. Ширина линии рекомбинации 1НН экситона в низкотемпературном спектре стационарной фотолюминесценции того же образца 1.8 мэВ.

Спектры пропускания МКЯ-структур при повышенных уровнях возбуждения измерялись по двухлучевой методике с использованием двух твердотельных перестраиваемых лазеров на  $Al_2O_3 : Ti$ , синхронно накачиваемых излучением второй гармоники (532 нм) импульсного  $Nd : YAG$  лазера ЛТИ-701. Длительность импульсов излучения перестраиваемых лазеров равнялась 35 нс, ширина линии генерации не превышала 1.2 Å. Измерение интенсивности про-

шедшего через образец света производилось в момент максимума импульсов накачки/тестирования строб-преобразователем В9-5. Была предусмотрена также возможность регистрации спектров интегрированной по времени фотолюминесценции исследуемого образца.

Измерение спектров пропускания проводилось при накачке в резонанс с линией экситонного поглощения, либо при межзонной генерации свободных электрон-дырочных пар с последующим связыванием их в экситоны. Отметим, что отсутствие в измеренном при интенсивной межзонной накачке спектре фотолюминесценции линии рекомбинации электрон-дырочной плазмы (рис. 1, г), свидетельствующее о большой вероятности связывания пар носителей в экситоны, и низкая в двумерном случае эффективность экранирования [5] позволяют исключить в дальнейшем из рассмотрения эффекты, связанные с наличием свободных носителей. При регистрации каждого спектра длина волны накачки устанавливалась исходя из постоянства во всех измерениях коэффициента поглощения излучения накачки, причем для обеспечения достаточной однородности возбуждения по толщине образца доля поглощаемых фотонов устанавливалась равной 1/2. Накачка при резонансном возбуждении производилась с высокоэнергетичной стороны линии поглощения. На рис. 1, б приведены спектры поглощения линии 1НН-экситонов, измеренные при различных плотностях резонансной оптической накачки. Повышение интенсивности накачки приводит к просветлению экситонной линии и, в отличие от результатов работ [3, 4], к ее значительному „си-нему” сдвигу. Величина сдвига приблизительно линейно зависит от плотности накачки и достигает 2 мэВ (четверти энергии связи 1НН экситона) при плотности мощности  $\approx 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. На рис. 1, в показаны спектры поглощения, измеренные при резонансной и межзонной накачке равных интенсивностей. Оказалось, что величина сдвига и степень просветления линии в случае межзонного возбуждения больше, чем при резонансной накачке. На рис. 2 показаны зависимости величины сдвига линии от плотности мощности для двух способов накачки. В диапазоне плотностей накачки  $3 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> отношение величин сдвига составляет  $\approx 1.6$ .

Мы полагаем, что причина наблюдаемой зависимости величины эффекта от способа накачки экситонного газа может состоять в следующем. Рассмотрим процесс генерации экситонов при межзонной накачке свободных электрон-дырочных пар в упрощенной модели, полагая волновые функции зоны тяжелых дырок в окрестности точки  $k=0$  ( $k$  - квазиимпульс в плоскости слоя) принадлежащими ветви  $J_z = \pm 3/2$  дырочного мультиплетта  $J = 3/2$  без примеси состояний ветви  $J_z = \pm 1/2$  ( $J, J_z$  - полный момент и проекция момента на  $k$ ); пренебрежем также влиянием зоны легких дырок. В этом случае межзонная генерация линейно поляризованным светом создает в образце равные концентрации электронов с проекциями момента  $+1/2$  и  $-1/2$  и дырок с проекциями  $+3/2$  и  $-3/2$ . При этом равновероятно связывание в экситон пар носителей как с разницей проекцией момента  $\Delta J_z = \pm 1$ , аналогично случаю резонансной накачки, так и с разницей проекций  $\Delta J_z = \pm 2$  с образованием

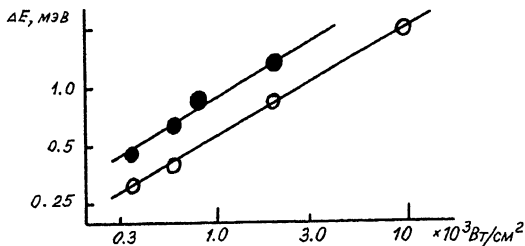


Рис. 2. Изменение энергии связи 1НН-экситонов в функции плотности мощности накачки. Нижний график – резонансная, верхний – межзонная накачка.

„оптически неактивного“ экситона, имеющего в дипольном приближении нулевую вероятность излучательной рекомбинации. Накопление за время действия межзонной накачки „неактивных“ экситонов приведет к увеличению плотности экситонного газа и, следовательно, к росту величины эффектов многочастичного взаимодействия по сравнению со случаем резонансной генерации „активных“ экситонов. Учет перемешивания в реальном случае состояний дырочных ветвей  $J_x = \pm 1/2$  и  $\pm 3/2$  [6] приведет к конечности времени жизни „неактивных“ экситонов, при этом степень увеличения эффектов взаимодействия будет зависеть от соотношения времен жизни „активных“ и „неактивных“ экситонов. Оценка в предположении независимости величины взаимодействия от типа экситонов дает в нашем случае двукратное отношение времен жизни „неактивного“ и „активного“ экситонов.

Таким образом, в настоящей работе обнаружен значительный „синий“ сдвиг линий экситонного поглощения, достигающий четверти энергии связи экситона, при оптической накачке неравновесных экситонов большой плотности в МКЯ-структурах с шириной квантовых ям  $L = 100 \text{ \AA}$ . Обнаружена зависимость величины эффекта от способа генерации экситонов. Предложена качественная модель, объясняющая наблюдаемую зависимость возможностью образования при межзонной накачке оптически неактивных экситонов, большее время жизни которых обуславливает большие концентрации экситонов.

Авторы приносят благодарность Э.Г. Батыеву и А.В. Ефанову за плодотворные и стимулирующие обсуждения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] P e y g h a m b a r i a n N., G i b b s H.M., J e w e l l J.L., A n t o n e t t i A., M i g u s A., H u l i n D., M y s y r o w i c z A. // Phys. Rev. Lett. 1984. V.53. P. 2433-2436.

- [2] Hulin D., Mysyrowicz A., Antonetti A., Migus A., Masselink W.T., Morkoc H., Gibbs H.M., Peyghambarian N. // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. P. 4389-4391.
- [3] Weber C., Klingshirn C., Chemla D.S., Miller D.A.B., Cunningham J.E., Ell C. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. P. 12748-12751..
- [4] Klingshirn C. // Semicond. Sci. Technol. 1990. V. 5. P. 457-469.
- [5] Schmitt-Rink S., Chemla D.S., Miller D.A.B. // Phys. Rev. B. 1985. V. 32. P. 6601-6609.
- [6] Schmitt-Rink S., Chemla D.S., Miller D.A.B. // Advances in Physics. 1989. V. 38. P. 188.

Институт физики  
полупроводников РАН,  
Новосибирск

Поступило в Редакцию  
6 января 1992 г.