

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ПРОВОДОВ GaAs

*Н.В.Гущина, В.С.Днепровский, Е.А.Жуков, О.В.Павлов, В.В.Поборчий, И.А.Саламатина*

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова  
19899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 3 февраля 1995 г.

Обнаруженное нелинейное изменение поглощения на дискретных частотах в образцах хризотил-асбеста, полые каналы которого диаметром  $\approx 6$  нм заполнены GaAs, объяснено явлением насыщения оптических переходов между уровнями размерного квантования в квантовых проводах GaAs при их возбуждении пикосекундными импульсами лазера.

В последние годы внимание исследователей привлекают необычные свойства полупроводниковых наноструктур, в которых движение носителей ограничено в двух направлениях, – квазиодномерных структур (квантовых проводов). Эффекты размерного квантования энергии в квазиодномерных системах становятся более существенными, чем в квазидвумерных. Увеличиваются энергетические зазоры между электронными состояниями, и плотность состояний из постоянной для двумерной наноструктуры становится дискретной (отдельные пики) для идеальной квазиодномерной структуры. Квазиодномерные структуры перспективны для использования в качестве активной среды лазеров, имеющих низкий порог генерации и работающих при высоких температурах, для создания новых типов транзисторов, для применения в оптоэлектронике и т.д.

Существует несколько способов получения полупроводниковых квантовых проводов из GaAs [1–5]. Однако в них, как правило используются сложные и дорогостоящие методы молекулярно-лучевой или жидкостной эпитаксии в комбинации с травлением, нанесением контактов или со скалыванием полученной квазидвумерной структуры под малым углом или перпендикулярно поверхности. В последнем случае процесс эпитаксии используется вторично для нанесения новых слоев полупроводников на поверхность скола (гладкую или в виде террасы со ступеньками атомных размеров).

К сожалению, перечисленные способы не позволяют получить содержащие квантовые провода образцы, размеры которых достаточны для изучения оптических и нелинейно-оптических свойств квазиодномерных структур.

Недавно был осуществлен новый способ получения квантовых проводов GaAs в прозрачной матрице [6]. При этом использовался метод [7] заполнения полых каналов нанометрового радиуса хризотил-асбестовой матрицы расплавом GaAs. Размеры полученных образцов позволили измерить линейное поглощение квантовых проводов GaAs, обнаружить оптические переходы между уровнями размерного квантования и существенную анизотропию поглощения света, поляризованного вдоль и перпендикулярно квантовым проводам.

В настоящей работе, обнаружено нелинейное поглощение квантовых проводов GaAs.

Для измерений использовались образцы, представляющие из себя матрицу хризотил-асбеста (состав  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ) в виде регулярного набора плотно упакованных нанотрубок, заполненных GaAs (см ниже вставку на рис.2). Внешний диаметр нанотрубок – около 30 нм. Измеренный с помощью электронного микроскопа внутренний диаметр (диаметр каналов, заполненных GaAs) – 6 нм. Характерная длина образующихся проводов GaAs – около 30 нм. Для исследования нелинейного поглощения и его динамических свойств образцы квантовых проводов GaAs (в дальнейшем 1D-GaAs) возбуждались ультракороткими импульсами (УКИ) второй гармоники Nd:YAG-лазера (длительность импульса генерации 30 пс, энергия фотона – 2,33 эВ) и зондировались с помощью УКИ пикосекундного континуума ("белого" света) в различные моменты времени после действия импульса накачки (использовалась оптическая линия задержки). При этом с помощью многоканальных оптических регистраторов определялись дифференциальные спектры пропускания [8]:

$$DT(\lambda) = \frac{T(\lambda) - T_0(\lambda)}{T_0(\lambda)}, \quad (1)$$

где  $T(\lambda)$  и  $T_0(\lambda)$  – спектры пропускания возбужденного и невозбужденного образца. Измерения проводились при комнатной температуре образцов. Для уменьшения рассеяния света образцы помещались в иммерсионную жидкость.

На рис.1 приведены линейный спектр поглощения и спектр  $DT(\lambda)$  образца 1D-GaAs. В линейном спектре поглощения видны полосы поглощения с максимумами в области 1,8 и 2,2 эВ (аналогичные полосы поглощения зарегистрированы в [6]) и "плечо" в области 1,7 эВ. В дифференциальном спектре пропускания отчетливо проявляются полосы просветления с максимумами 1,8 эВ и 2,2 эВ (рис.1) и для некоторых областей образца (совмещенные пучки зондирующего и возбуждающего излучений перемещались по образцу) появлялась дополнительная полоса просветления с максимумом в области 1,7 эВ (рис.2). Через 50 пс полосы просветления 1,8 эВ и 2,2 эВ практически полностью исчезали в спектрах дифференциального пропускания (рис.1). Полоса просветления 1,7 эВ релаксировала быстрее (временное разрешение установки не позволило измерить время ее релаксации).

Полосы просветления 1,8 эВ и 2,2 эВ можно объяснить насыщением оптических переходов между нижними уровнями размерного квантования электронов и дырок соответствующих валентных зон квантовых проводов GaAs (им соответствуют полосы поглощения в линейном спектре поглощения образца, полученном как в [6], так и в настоящей работе). Энергию первого оптического перехода между нижним уровнем размерного квантования зоны проводимости и верхним уровнем размерного квантования валентной зоны можно оценить в приближении эффективной массы по формуле [9]

$$E = E_g^i + X_{01}^2 \hbar^2 / 2\mu\rho^2, \quad (2)$$

где  $E_g^i$  – ширина запрещенной зоны ( $i$  – соответствующая валентная зона),  $X_{01} \cong 2,4$ ,  $\mu = m_e m_h^i / (m_e + m_h^i)$  – приведенная эффективная масса ( $m_e$  – эффективная масса электрона,  $m_h^i$  – приведенная масса дырки в соответствующей валентной зоне),  $\rho$  – радиус квантового волокна.

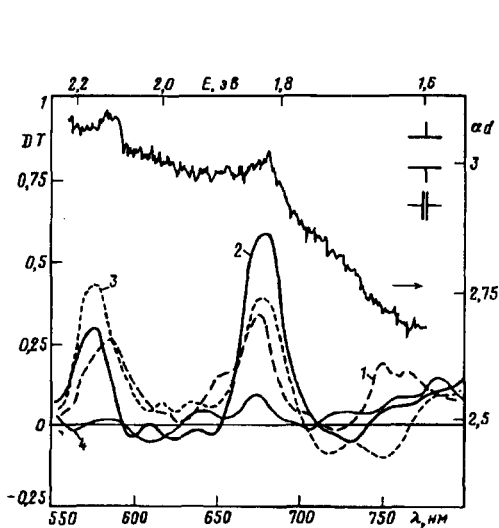


Рис.1

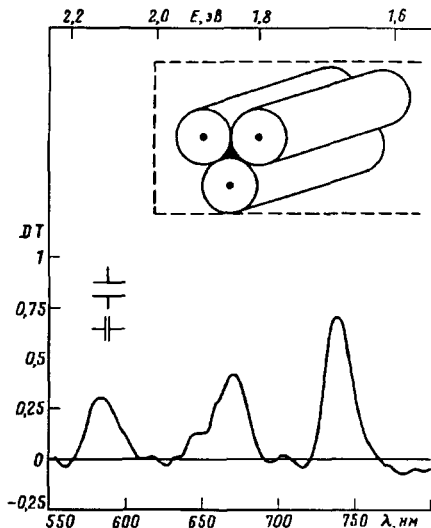


Рис.2

Рис.1. Спектры линейного поглощения и дифференциального пропускания, полученные при разных задержках между возбуждающим и зондирующим импульсами, квантовых проводов GaAs в хризотил-асбестовых нанотрубках: 1 – -15 пс (зондирующий импульс опережает возбуждающий); 2 – 0 пс; 3 – 20 пс; 4 – 50 пс

Рис.2. Спектр дифференциального пропускания для участка образца, содержащий полосу просветления с максимумом около 1,7 эВ, полученный при совпадении во времени возбуждающего и зондирующего импульсов. На вставке приведена схема хризотил-асбестовой матрицы с квантовыми проводами GaAs

Тогда полосу просветления 1,8 эВ в дифференциальном спектре пропускания можно идентифицировать с насыщением оптического перехода между верхним уровнем размерного квантования валентной зоны и нижним уровнем размерного квантования электронов в квантовых проводах GaAs диаметром 6 нм, а полосу 2,2 эВ насыщением перехода между верхним уровнем размерного квантования дырок спин-орбитально отщепленной валентной зоны и нижним уровнем размерного квантования квантовых проводов того же диаметра.

Можно предположить, что полоса просветления 1,7 эВ возникает за счет насыщения низшего оптического перехода между уровнями размерного квантования электронов и дырок в квантовых проводах, которые образуются за счет заполнения полупроводником пространства между трубками хризотил-асбеста (см. вставку на рис.2). Уменьшение времени релаксации полосы просветления 1,7 эВ по сравнению с полосами 1,8 эВ и 2,2 эВ, по-видимому, можно связать с большим влиянием безызлучательной поверхностной рекомбинации в квантовых проводах, обладающих большей удельной поверхностью.

Обнаруженная сильная (индуцированное просветление зарегистрировано при уровнях возбуждения  $\leq 100 \text{ МВт/см}^2$ ) и быстрая нелинейность в квантовых проводах GaAs позволяет сделать вывод о перспективности этого материала для эффективного оптического переключения.

Данное исследование стало возможным благодаря поддержке Международного научного фонда (грант Ph M5D00), Российского фонда фундаментальных

исследований, программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект 1-034) и гранту Физического общества Японии.

- 
1. M.Sundaram, S.A.Chalmers, P.F.Hopkins, and A.C.Gossard, *Science* **254**, 1326 (1991).
  2. W.Wegscheider, L.N.Pfeiffer, M.M.Dignam et al., *Phys. Rev. Lett.* **71**, 4071 (1993).
  3. Y.Arakawa, Y.Nagamune, M.Nishioka, and S.Tsukamoto, *Semicond. Sci. Technol.* **8**, 1082 (1993).
  4. T.Fukui, H.Saito, M.Kasu, and S.Ando, *J. of Crystal Growth* **124**, 493 (1992).
  5. Y.Arakawa and H.Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 939 (1982).
  6. V.V.Poborchii, M.S.Ivanova, and I.A.Salamatina, *Superlattices and Microstructures* **16**, 133 (1994).
  7. В.Н.Богомолов, *УФН* **124**, 171 (1978).
  8. V.S.Dneprovskii, V.I.Klimov, D.K.Okorokov, and Yu.V.Vandyshev, *Sol. St. Comm.* **81**, 227 (1992).
  9. H.Zarem, K.Vahala, and A.Yariv, *IEEE J. of QE* **35**, 705 (1989).