

Фотопроводимость структур InAs/GaAs с нанокластерами InAs в ближнем инфракрасном диапазоне

© А.В. Антонов, Н.В. Востоков, М.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская[¶],
В.И. Шашкин, О.И. Хрыкин, А.Н. Яблонский

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 8 апреля 2010 г.)

Методом металл-органической газофазной эпитаксии в реакторе атмосферного давления изготовлены многослойные гетероструктуры InAs/GaAs, содержащие плотные массивы слабodefekтных, частично релаксированных нанокластеров InAs, более крупных, чем бездефектные квантовые точки. Структуры имеют интенсивную фотопроводимость в диапазоне длин волн 1–2 мкм при комнатной температуре. Обнаружительная способность изготовленных макетов фотоприемников составляет $D^* = 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Время релаксации фотопроводимости на длине волны 1.5 мкм составляет менее 10 нс.

С конца 90-х годов ведутся активные исследования фотопроводимости гетероструктур InGaAs/GaAs с квантовыми точками (КТ) в инфракрасном (ИК) диапазоне. Наиболее привлекательной представляется возможность создания на их основе неохлаждаемых фоточувствительных элементов. Большое число работ посвящено исследованию детектирования излучения в среднем и дальнем ИК диапазоне, основанного на эффекте внутризонной фотопроводимости в КТ [1–4]. Нам известны лишь единичные работы, изучающие межзонную фотопроводимость квантовых точек InAs, которая соответствует ближнему ИК диапазону [5,6]. В работе [5] обнаружительная способность структур с квантовыми точками в ближнем ИК диапазоне при комнатной температуре составила $D^* = 3 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, что сравнимо с D^* таких детекторов, работающих при комнатной температуре, как DTGS-детектор и детектор на объемном кремнии. Длина волны детектирования, связанного с межзонными переходами в квантовых точках, в работах [5,6] не превышала 1 мкм. В то же время создание и усовершенствование фотодетекторов, работающих в области длин волн 1.3 и 1.5 мкм, соответствующих максимальной прозрачности кварцевого оптоволокна, является актуальным направлением развития оптоэлектроники. Наиболее распространенным способом формирования КТ InAs с линиями межзонных переходов, смещенных в длинноволновую область до 1.3–1.5 мкм, являются молекулярно-пучковая эпитаксия, использующая заращивание сформированных КТ слоем InGaAs [7]. Возможность реализации длинноволновых межзонных переходов в структурах InAs/GaAs за счет роста больших островков InAs в матрице GaAs остается неизученной. Это связано с тем, что межзонные переходы в КТ исследовались, как правило, в целях создания лазерных структур, где недопустимо появление структурных дефектов. Для фотодетекторов на межзонных переходах ограничения на дефектность менее жесткие, поэтому процессы роста, отработанные при изготовлении светоизлучающих структур, не являются здесь

оптимальными. Можно предположить, что, несмотря на появление дефектов, связанных с рассогласованностью решеток InAs и GaAs в таких структурах, увеличение размера кластеров InAs до некоторого предела позволит получить значительный фотоотклик в этом спектральном диапазоне. В работе [8] мы сообщали о наблюдении межзонной фотопроводимости в структурах InAs/GaAs с крупными КТ в диапазоне 1–2.6 мкм при комнатной температуре. Структуры были выращены методом металл-органической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) на установке Epiquip VP-502RP при пониженном давлении. Специфика их роста заключалась в использовании увеличенной толщины слоя InAs для самоорганизации массивов КТ и чередовании температуры роста барьерных слоев GaAs при заращивании КТ.

В данной работе структуры изготавливались на установке МОГФЭ атмосферного давления с вертикальным реактором. Как и в работе [8], использовался режим роста с повышенной толщиной осажденного слоя InAs. Были получены многослойные структуры, содержащие плотные массивы слабodefekтных, частично релаксированных нанокластеров InAs, более крупных, чем бездефектные квантовые точки. Слои нанокластеров разделены барьерными слоями GaAs толщиной 90 нм. Для исследования методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) были изготовлены образцы с незарощенными слоями нанокластеров. Полученное АСМ-изображение нанокластеров InAs приведено на рис. 1. Исследовались особенности оптических и электрических свойств структур в ближнем ИК диапазоне. Измерения спектров пропускания проводились на фурье-спектрометре „Bruker“ VERTEX 80v. Исследования межзонной фотопроводимости и фотолюминесценции структур с нанокластерами проводились как при непрерывном возбуждении, так и при использовании перестраиваемого импульсного источника излучения при различных мощностях возбуждения. Динамика фотопроводимости с наносекундным разрешением была исследована с помощью параметрического генератора света МОРО-SL („Spectra-Physics“) с длительностью импульса 5 нс и диапазоном перестройки длины вол-

[¶] E-mail: lmd@ipm.sci-nnov.ru

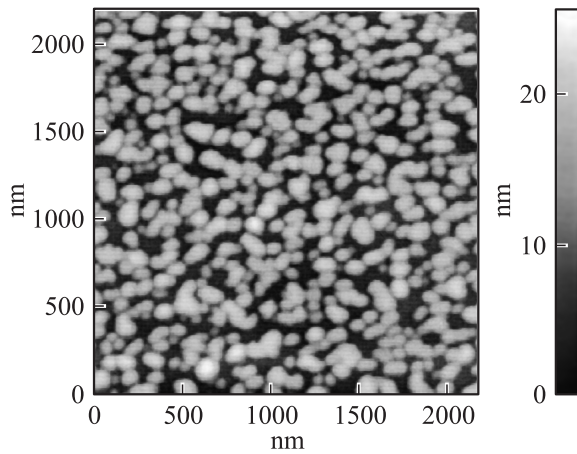


Рис. 1. АСМ-изображение нанокластеров InAs на поверхности.

ны излучения 0.4–2.2 мкм. Насколько нам известно, несмотря на широкое исследование динамики процессов фотолюминесценции и фотопоглощения, динамика фотопроводимости в структурах с квантовыми точками до настоящего времени не исследовалась. В структурах с нанокластерами с большим числом уровней квантования можно ожидать получения характерных времен релаксации фотопроводимости менее 1 нс, что является одним из ключевых параметров для фотоприемников в области 1.5 мкм. Для определения вольт-ваттной чувствительности и обнаружительной способности исследуемых структур использовался источник излучения „абсолютно черное тело“ с температурой 600°С.

Структуры с нанокластерами имеют интенсивное поглощение в диапазоне длин волн 1–2 мкм при комнатной температуре. В десятислойных структурах величина поглощения в области 1.5 мкм составляет более 10%. Для сравнения: в структурах с КТ, выращенных при пониженном давлении в реакторе, исследованных в работе [8], поглощение в этой области спектра, связанное с КТ, не превышало 2%.

На рис. 2 показаны спектры межзонной фотопроводимости, полученные с использованием фурье-спектрометра и широкополосного источника излучения (глобара). Фотопроводимость, связанная с межзонными переходами в GaAs (0.87 мкм) и смачивающем слое (0.91 мкм), на рисунке мала из-за падения интенсивности излучения глобара в этой области спектра. В спектре наблюдается ярко выраженный максимум в области 1.5 мкм, который мы связываем с межзонными переходами с нанокластерах. В то же время фотолюминесценцию в этом диапазоне длин волн удается наблюдать только при использовании импульсного возбуждения большой мощности. Мы провели анализ однородности распределения параметров структур по площади подложки. Этот вопрос является особенно важным для создания фотоприемников большой площади. Формирование квантовых точек является фазовым переходом от двумерного к трехмерному росту, очень

критичному к соотношению эффективной толщины осажденного слоя InAs и критической толщины самоорганизации квантовых точек. Поэтому даже при неоднородности роста по пластине, не превышающей нескольких процентов, что типично для современных установок МОГФЭ, разброс параметров квантовых точек может быть значительным. В исследованных структурах нанокластеры, дающие интенсивный фотоотклик в диапазоне 1–2 мкм, формируются по всей площади подложки. Неоднородность проявляется в различии формы спектра фотопроводимости (кривые 1 и 2 на рис. 2) и разбросе

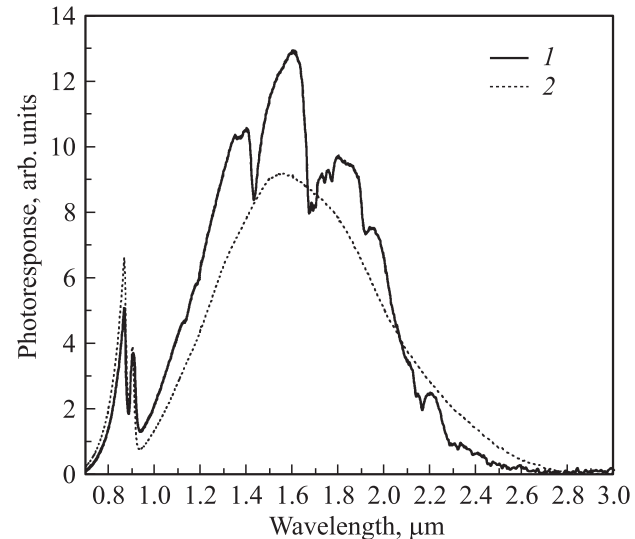


Рис. 2. Спектры фотопроводимости структур с нанокластерами InAs при температуре 300 К. 1 и 2 — образцы, изготовленные из разных областей пластины. Пики на длинах волн 0.87 и 0.91 мкм связаны с межзонными переходами в GaAs и смачивающем слое соответственно.

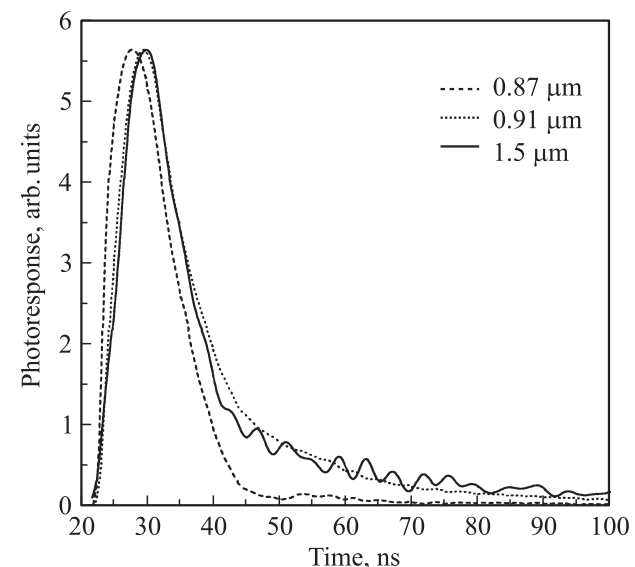


Рис. 3. Зависимость фотопроводимости структуры от времени на разных длинах волн (указаны) при температуре 300 К.

абсолютных характеристик фотопроводимости, который составляет 15–20%. Вольт-ваттная чувствительность лучших структур в спектральном диапазоне 1.2–2 мкм составляет $3 \cdot 10^3$ В/Вт, обнаружительная способность $D^* = 10^9$ см · Гц^{1/2} · Вт⁻¹.

На рис. 3 показана динамика фотопроводимости структуры для нескольких длин волн: вблизи края запрещенной зоны арсенида галлия (0.87 мкм), на длине волны, соответствующей межзонным переходам в смачивающем слое (0.91 мкм), и на длине волны 1.5 мкм, которая соответствует межзонным переходам в нанокластерах InAs. Время затухания фотопроводимости на длине волны 1.5 мкм составляет менее 10 нс. Это значение еще предстоит уточнить, поскольку оно определяется временным разрешением измерительной установки на данном этапе. В кинетике фотопроводимости присутствует также медленная компонента, с характерным временем ~ 1 мкс, которая может быть обусловлена захватом носителей на глубокие уровни, связанные с дефектами.

В данной работе методом МОГФЭ выражены многослойные структуры InAs/GaAs с нанокластерами InAs, имеющие при комнатной температуре интенсивный фототклик в области длин волн 1–2 мкм. Вольт-ваттная чувствительность в спектральном диапазоне 1.2–2 мкм составляет $3 \cdot 10^3$ В/Вт. Фототклик имеет двухкомпонентную временную зависимость. Быстрая компонента имеет характерное время менее 10 нс.

Работа поддерживалась РФФИ (проект № 09-02-97081-р_поволжье_a) и программами президиума РАН.

Список литературы

- [1] S. Krishna, D. Forman, S. Annamalai, P. Dowd, P. Varangis, T. Tumolillo, A. Gray, J. Zilko, K. Sun, M. Liu, J. Campbell, D. Carothers. *Phys. Status Solidi C*, **3** (3), 439 (2006).
- [2] H. Lim, S. Tsao, W. Zhang, M. Razeghi. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 131 112 (2007).
- [3] M.J. Meisner, J. Vaillancourt, X. Lu. *Semicond. Sci. Technol.*, **23** (9), 095 016 (2008).
- [4] Л.Д. Молдавская, Н.В. Востоков, Д.М. Гапонова, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, В.И. Шашкин. *ФТП*, **42** (1), 101 (2008).
- [5] Brandon S. Passmore, Jiang Wu, M.O. Manasreh, G.J. Salamo. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 233 508 (2007).
- [6] B.S. Passmore, J. Wu, M.O. Manasreh, V.P. Kunets, P.M. Lytvyn, G.J. Salamo. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **29** (3), 224 (2008).
- [7] А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, А.Ю. Егоров, В.А. Одноблюдов, Н.А. Малеев, Е.В. Никитина, Н.В. Кржижановская, А.Г. Гладышев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **37** (12), 1461 (2003).
- [8] М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Л.Д. Молдавская, В.И. Шашкин. *Письма ЖТФ*, **34** (1), 3 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoconductivity of InAs/GaAs structures with nanoclusters in near infrared range

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract By the method of metal-organic chemical vapor deposition we have grown multilayer InAs/GaAs structures containing dense array of low defect density and partly relaxed InAs nanoclusters. Nanocluster sizes are greater than sizes of defect-free quantum dots. The structures demonstrate photoresponse in the wavelength range 1–2 μm at 300 K. Detectivity has been determined: 10^9 cm · Hz^{1/2} · W⁻¹. The decay time of photoconductivity at the wavelength of 1.5 μm is less than 10 ns.