

УДК 621.315.59

Продольная ИК-фотопроводимость в структурах с InGaAs квантовыми точками

В. И. Шашкин, А. В. Антонов, Д. М. Гапонова, В. М. Данильцев,
М. Н. Дроздов, Ю. Н. Дроздов, А. Ю. Лукьянов, Л. Д. Молдавская,
А. В. Мурель, О. И. Хрыкин, А. Н. Яблонский
ИФМ РАН, Н. Новгород, Россия

В. С. Туловчиков
ННГУ, Н. Новгород, Россия

Исследована ИК-фоточувствительность в селективно легированных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми точками, изготовленных методом металлоорганической газовой эпитаксии. Условия роста оптимизировались с помощью методов атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции, фотолюминесценции и просвечивающей электронной микроскопии. Исследование спектральных характеристик фотопроводимости (ФП) проводилось на Фурье-спектрометре BOMEM. В режиме нормального падения наблюдалась фотопроводимость в области 16 мкм при $T = 4,2$ К и 6 мкм — при 77 К.

В последнее время область применения инфракрасной техники значительно расширяется, и наряду с традиционным использованием для обнаружения теплового излучения объектов появляются новые разнообразные приложения. Так, например, фотоприемники с быстрым откликом и высокой чувствительностью находят широкое применение в микро- и милливольтных модуляционных оптических коммуникационных системах. В этом же диапазоне длин волн находятся линии поглощения многих газов: O_3 , H_2O , CO_2 , CO , N_2O и др., поэтому ИК-системы изображения являются необходимыми устройствами для мониторинга профилей состава и температуры земной атмосферы, влияния на них человеческой деятельности, характеристик потоков воздушных масс. Все более широко ИК-техника применяется в медицине, интенсивно развивает-

ся ИК-спектроскопия. Все это требует высокочувствительных ИК-приемников, удобных для практического применения в самых разных условиях. Традиционные ИК-приемники основаны на использовании узкозонных полупроводников, в первую очередь HgCdTe, у которых ширина запрещенной зоны лежит в ИК-диапазоне энергий (поэтому межзонные переходы обеспечивают ИК-фотопроводимость), а также ряда широкозонных полупроводников, легированных мелкими примесями (с внутризонными переходами). Однако эти материалы имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений: неоднородность и быстрая деградация материала, высокая рассеиваемая мощность, сильный 1/f шум, сложный технологический процесс, необходимость глубокого охлаждения. В качестве альтернативы таким приемникам рассматрива-

ются полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми ямами, в которых при внутризонном поглощении оптические переходы лежат в ИК-диапазоне, однако они также требуют охлаждения до температуры жидкого азота и нечувствительны к нормально падающему излучению из-за отсутствия необходимой поляризации электрического поля.

В последние годы в технологии изготовления ИК-приемников наметилось новое направление, связанное с использованием новых полупроводниковых элементов — гетероструктур с массивами квантовых точек (КТ). Современная технология эпитаксиального роста полупроводников позволяет получать массивы КТ с высокой однородностью, регулируемой плотностью и размерами точек от десятков до сотен нанометров. Рис. 1 демонстрирует изображение квантовых точек InGaAs на поверхности GaAs, полученное методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Нуль-мерный характер электронного спектра КТ изменяет правила отбора для внутризонного оптического поглощения и позволяет принимать излучение любой поляризации при нормальном падении. Кроме того, благодаря снижению рассеяния на фонах кристаллической решетки в системах с КТ значительно возрастает время жизни фотовозбужденных электронов и уменьшается тепловой шум [1]. Это повышает квантовую эффективность ИК-приема [2] и дает возможность увеличить рабочие температуры, по последним сообщениям, вплоть до комнатных. Диапазон принимаемых длин волн может варьироваться путем изменения размеров КТ.

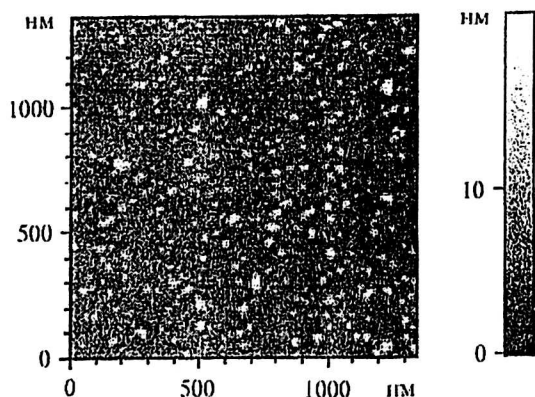


Рис. 1. АСМ изображения квантовых точек InGaAs

ИК ФП в структурах с КТ возникает при переходе возбужденных электронов из локализованных состояний в КТ в непрерывный спектр зоны проводимости окружающего полупроводника или в состояния в двумерном смачивающем слое, который является узкой квантовой ямой (рис. 2).

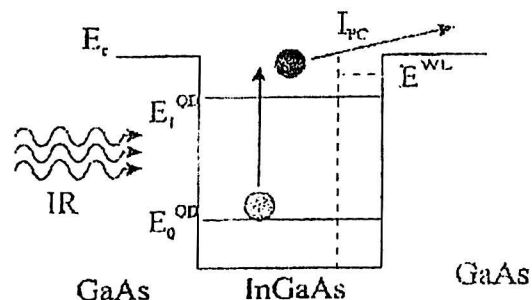


Рис. 2. Внутризонные переходы из состояния в КТ (QD) в смачивающий слой (WL) или континуум

В большинстве работ по исследованию ИК ФП структур с КТ используется вертикальная геометрия протекания тока [1—7], традиционная для структур с квантовыми ямами. В работах [2, 8—10] исследована продольная ИК-фотопроводимость структур с КТ. Для фотоприемников с легированными квантовыми ямами такой режим измерений, очевидно, невозможен. Вместе с тем в латеральной геометрии можно ожидать более высоких значений времени жизни фотовозбужденных электронов, следовательно, и квантовой эффективности, чем при вертикальной [8]. В этом случае транспорт носителей может происходить по смачивающим слоям. При расположении параллельно плоскостям с КТ слоев с высокой подвижностью электронов достигнута рекордная для КТ на сегодняшний день фоточувствительность — 11 А/Вт при 30 К [8].

В работе [11] было проведено предварительное исследование продольной внутризонной ИК-фотопроводимости многослойных селективно легированных гетероструктур InGaAs/GaAs с КТ. В данной работе более детально исследовалась зависимость ФП от температуры.

Результаты

Структуры с InGaAs КТ были выращены методом металлоорганической газовой эпитаксии (МОГФЭ) на установке EPIQUIP на полуизолирующей подложке (100) GaAs. Для исследования использовался комплекс методов, включающий атомно-силовую микроскопию, рентгеновскую дифракцию, фотолюминесценцию и просвечивающую электронную микроскопию. Электрофизические параметры определялись методом эффекта Холла.

Схематическое изображение структуры для исследования фотопроводимости приведено на рис. 3. Активная область состояла из 10 слоев КТ, разделенных промежуточными слоями легированного GaAs толщиной 80—90 нм. Слои КТ росли при 480 °С, после продувки реактора и прерывания роста они зарастивались тон-

ким слоем GaAs при этой же температуре. После повторной продувки растился промежуточный слой GaAs при более высокой температуре — 600 °С. Низкая температура зарастивания КТ оказывается оптимальной, поскольку при этом не происходит растворения квантовых точек и существенного изменения их размеров и плотности. Таким образом, были изготовлены структуры № 679 и № 682, отличающиеся только временем формирования слоя КТ (10 и 14 с, соответственно) при одинаковых параметрах потоков реагентов. Это обеспечивало изменение средних размеров и плотности КТ. Для легирования области КТ в данной работе использовался метод селективного δ -легирования. Слой δ :Si выращивался в слое GaAs на некотором удалении (“спейсер”) от слоя КТ InAs. Толщина спейсера (2,5 нм) обеспечивала возможность пространственного перераспределения свободных носителей тока — электронов из легирующего слоя с высокой концентрацией примеси и низкой подвижностью в область узкозонного материала. Концентрация кремния в слое δ :Si подбиралась таким образом, чтобы при рабочей температуре (77 К) обеспечить, с одной стороны, низкий темновой ток, а с другой — не слишком высокое сопротивление, чтобы избежать длительных релаксационных процессов, связанных с фотовозбуждением.

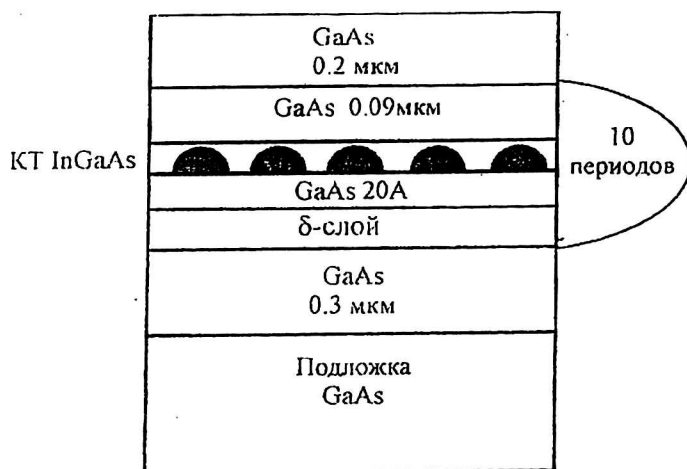


Рис. 3. Схематическое изображение структуры с 10 слоями селективно легированных КТ

В работе [11] приведены результаты исследования полученных структур методами фотолюминесценции, атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии.

Спектры продольной фотопроводимости в геометрии нормального падения ИК-излучения снимались на Фурье-спектрометре ВОМЕМ. При низких температурах на образце E679 наблюдался пик в области 16 мкм (100 мэВ). При повышении температуры до 77 К ФП отсутство-

вала (рис. 4). На рис. 5 показана зависимость ФП от температуры для образца E682, которая демонстрирует две линии ФП. При низких температурах (до 30 К) доминирует пик в области 16 мкм. При повышении температуры этот пик исчезает и появляется пик в области 5 мкм (250 мэВ), который уверенно регистрируется до 120 К.

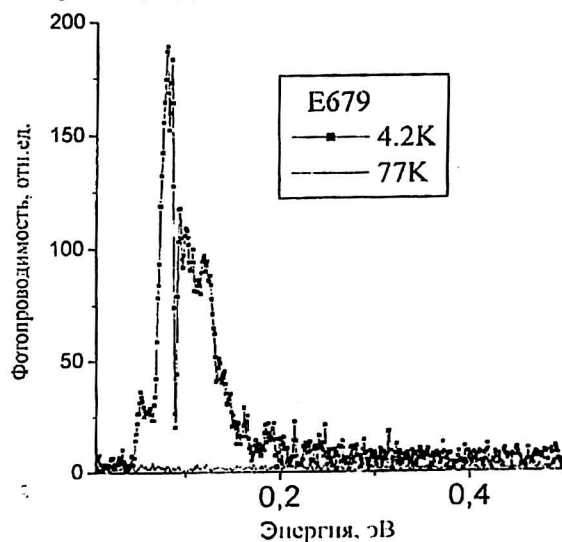


Рис. 4. Спектры ФП-структуры E679

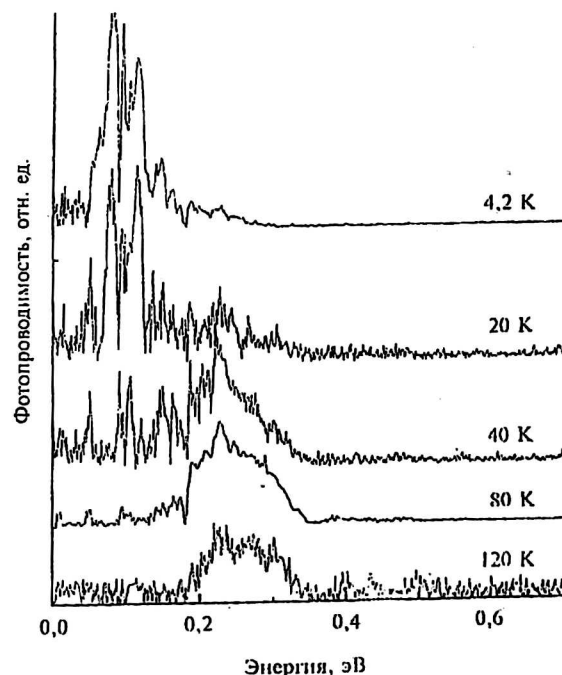


Рис. 5. Спектры ФП структуры E682 при разных температурах

Исчезновение длинноволновой фотопроводимости в обоих образцах связано с термическим опустошением относительно мелких уровней КТ с ростом температуры. Возникновение коротковолновой фотопроводимости в образце № 682 может быть связано с наличием КТ большего размера с глубоко залегающими уровнями. Дру-

гая возможность связана с генерацией при повышении плотности и размеров КТ каких-либо структурных дефектов, имеющих соответствующий энергетический спектр. В отличие от работ [2, 8–10], в наших исследованиях сигнал ФП, наблюдаемый при температуре выше 30 К, исчезает при уменьшении температуры. Это означает, что заселение глубоких состояний свободными электронами носит термоактивационный характер, препятствующий их заселению при низкой температуре. С увеличением температуры данный потенциальный барьер электроны легко преодолевают, заселяют глубокое состояние, что обеспечивает сигнал фотопроводимости вблизи 6 мкм в структуре № 682. Кроме того, наблюдаемая зависимость линии ФП от температуры может быть результатом конкуренции захвата электронов мелкими и крупными точками. Для точного определения механизма коротковолновой фотопроводимости нужны дополнительные электрографические и оптические исследования.

Заключение

Проведено исследование внутризонной ИК-фотопроводимости многослойных селективно легированных гетероструктур с КТ InGaAs/GaAs, изготовленных методом МОГФЭ. При нормальном падении ИК-излучения на поверхность образцов обнаружены два пика в спектрах латеральной фотопроводимости. При температуре ниже 30 К наблюдается широкий пик фотопроводимости с максимумом на длинах волн 12–16 мкм, обусловленный фотоионизацией электронов из КТ в делокализованные состояния смачивающего слоя и континуума зоны проводимости. При повышении температуры термиче-

ская генерация снижает эффективность этого механизма фотопроводимости в исследованных структурах. В образцах с КТ большего размера и плотности при температуре от 30 до 120 К наблюдается второй пик фотопроводимости вблизи длины волны 5 мкм. Его появление может быть связано с КТ (островками) большого размера или возникающими структурными дефектами.

Работа поддерживалась проектами
РФФИ 00-02-16141, 00-02-1686, 01-02-16451
и программой ФТНС.

Литература

1. Finkman E., Maimon S., Immer V., Bahir G., Schacham S. E., Fossard F., Julien F. H., Brault J., Gedry M. // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 045323.
2. Maimon S., Finkman E., Bahir G., Schacham S. E., Garcia J. M., Petroff P. M. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 2003.
3. Liu H. C., Gao M., Caffey J. Mc., Wasilewski Z. R., Fafard S. // Ibid. 2000. V. 78. P. 79.
4. Pan D., Towe E., Kennerly S. // Ibid. 1999. V. 75. P. 2719.
5. Pan D., Towe E., Kennerly S. // Ibid. 1998. V. 73. P. 1937.
6. Kim S., Mohseni H., Erdtmann M., Michel E., Jelen C., Razedhi M. // Ibid. P. 963.
7. Phillips J., Kamath K., Brattacharya P. // Ibid. V. 72. P. 2020.
8. Chu L., Zenner A., Bichter M., Absteiter G. // Ibid. 2001. V. 79. P. 2249.
9. Lee S.-W., Hirakawa K., Shimada Y. // Physica E. 2000. P. 499.
10. Chu L., Zrenner A., Bohm G., Absteiter G. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 1944.
11. Шапкин В. И., Андреев Б. А., Гапонова Д. М., Гусев С. А., Данильцев В. М., Дроздов М. Н., Дроздов Ю. Н., Лукьянов А. Ю., Молдавская Л. Д., Мурель А. В., Сидова Е. П., Хрыкин О. Н., Яблонский А. Н. Нанофотоника. — Н. Новгород, 11–14 марта 2002: Матер. совещ. 2002. С. 203.

Multicolor infrared lateral photoconductivity of InGaAs quantum dots

V. I. Shashkin, A. V. Antonov, V. M. Daniltsev, M. N. Drozdov,
Yu. N. Drozdov, D. M. Gaponova, A. Yu. Lukyanov, L. D. Moldavskaya,
A. V. Murel, O. I. Khrykin, A. N. Yablonsky

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

V. S. Tulovichikov
NNSU, Nizhny Novgorod, Russia

Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots multilayer structures were grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition for investigation of infrared photoconductivity (PC). Normal incidence lateral photoconductivity was observed in the temperature range from 4.2 K to 120 K. At low temperatures the PC peak near 16 μm was dominated, at higher temperatures the only peak near 5 μm was observed. The detector responsivity was increased by one hundred times with decreasing chopper IR radiation frequency from 1 kHz to 10 Hz.