

# Латеральная фотопроводимость структур AlGaAs/InGaAs с квантовыми ямами и самоорганизующимися квантовыми точками при межзонной подсветке

© О.А. Шегай<sup>¶</sup>, А.К. Бакаров, А.К. Калагин, А.И. Торопов

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 16 июня 2004 г.)

Представлены экспериментальные результаты по изучению особенностей зависимости латеральной фотопроводимости структур AlGaAs/InGaAs с квантовыми точками и квантовыми ямами от интенсивности межзонного света при низких температурах. Обнаружено, что рост фотопроводимости происходит пороговым образом. В области относительно больших тянущих полей наблюдались осцилляции фотопроводимости. Изучено влияние тянущего поля и температуры на фотопроводимость. Результаты анализируются в рамках теории протекания неравновесных носителей заряда по локализованным состояниям при учете релаксации механического напряжения вокруг квантовых точек.

## 1. Введение

Изучение механизмов латеральной межзонной фотопроводимости (ФП) в структурах AlGaAs/InGaAs с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ) InGaAs и с квантовыми ямами (КЯ) актуально в связи с возможностью получения новых приборов на их основе [1]. В этих структурах зонная диаграмма относится к типу 1, когда область внутри КТ (и КЯ) является ямой как для электронов, так и для дырок. На первый взгляд, при межзонном возбуждении неравновесные носители заряда должны захватываться на состояния в КТ (и КЯ) и в дальнейшем излучательно рекомбинировать, что не должно привести к появлению особенностей в межзонной ФП. Однако учет неоднородного распределения механического напряжения вокруг КТ, как это недавно показано для структур Si/Ge с КТ Ge, относящихся к структурам с зонной диаграммой типа 2 [2,3], может аналогичным образом проявиться в ФП данных структур.

В данной работе представлены экспериментальные результаты по изучению особенностей зависимости латеральной ФП структур AlGaAs/InGaAs с КТ и КЯ от интенсивности межзонного света при низких температурах. Обнаружены ступенчатый рост и осцилляции ФП в данных структурах. Изучено влияние тянущего поля на наблюдаемые особенности. Результаты анализируются в рамках теории протекания неравновесных носителей заряда по локализованным состояниям при учете релаксации механического напряжения вокруг КТ.

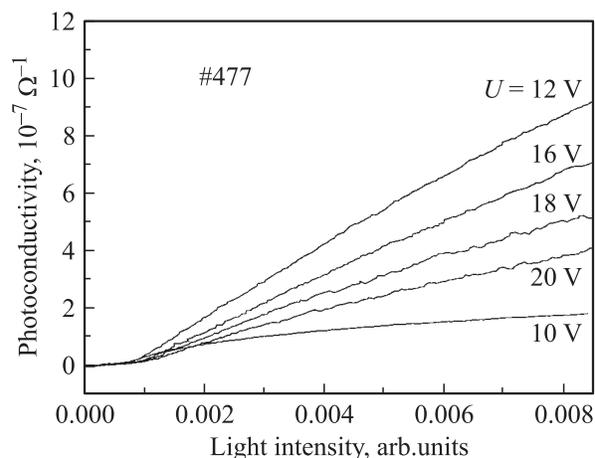
## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Структуры с КТ были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии по механизму самоорганизации Странского–Крастанова: сначала на подложке полупроводящего GaAs (001) выращивался буферный слой

AlGaAs, затем выращивался слой InGaAs с номинальной толщиной 2.5 монослоя (ML) при температуре 510°C, затем вновь выращивался слой AlGaAs, который закрывался поверхностным слоем GaAs толщиной 20 нм. Концентрация КТ составляла  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , латеральный размер КТ лежал в пределах 30–40 нм. В некоторых структурах с КТ были выращены и КЯ. В таких структурах размер КЯ GaAs составлял 8.5 и 5 нм, они разделялись слоем AlGaAs толщиной 25 нм.

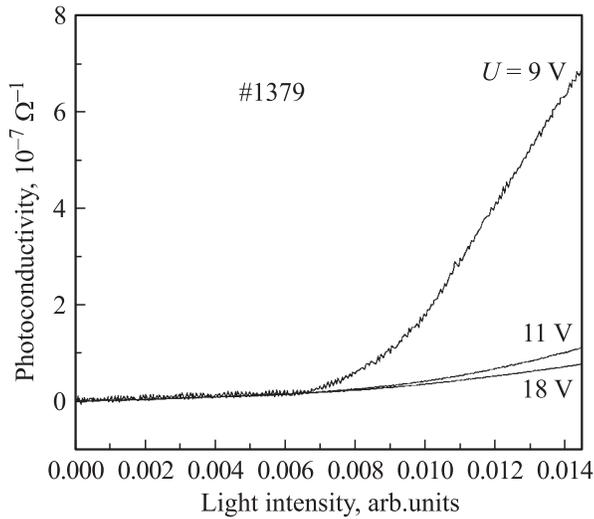
Исследуемые образцы размером  $2 \times 4 \text{ мм}^2$  имели область засветки  $\sim 2 \times 2 \text{ мм}^2$ , к структурам были изготовлены омические контакты из индия по стандартной методике. Измерения были выполнены при низких температурах с использованием красного светодиода в качестве источника межзонного фотозвозбуждения. Более подробно методика измерений приведена в [3].

На рис. 1 приведены зависимости латеральной ФП структуры 477 AlGaAs/GaAs с двумя КЯ толщиной 8.5

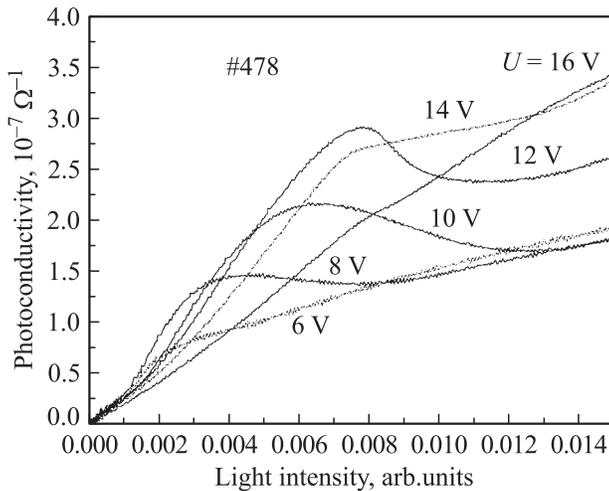


**Рис. 1.** Зависимость латеральной ФП от интенсивности межзонного света для структуры AlGaAs/GaAs с двумя КЯ толщиной 8.5 и 5 нм, разделенными слоем AlGaAs толщиной 25 нм, при  $T = 4.2 \text{ К}$  и различных значениях тянущего напряжения  $U$  в интервале 10–20 В.

<sup>¶</sup> E-mail: shegai@thermo.isp.nsc.ru



**Рис. 2.** Зависимость латеральной ФП от интенсивности межзонного света для структуры с одним слоем КТ InAs в матрице AlAs при  $T = 4.2\text{ К}$  и различных значениях тянущего поля  $U = 9\text{--}18\text{ В}$ .



**Рис. 3.** Зависимость латеральной ФП от интенсивности межзонного света для структуры с КТ InGaAs и с двумя КЯ GaAs в матрице AlGaAs при  $T = 4.2\text{ К}$  и различных значениях тянущего напряжения.

и 5 нм, разделенными слоем AlGaAs толщиной 25 нм, от интенсивности межзонного света  $I$  при температуре  $T = 4.2\text{ К}$  и различных значениях тянущего напряжения  $U$ . В области малых  $I$  начиная с некоторой пороговой интенсивности  $I_{th}$  наблюдается рост ФП. По мере роста  $U$  наклон кривых ФП становится более крутым и достигает максимума при  $U \approx 12\text{ В}$ , затем он уменьшается. При этом величина  $I_{th}$  слабо зависит от  $U$ , в отличие от случая КТ Ge [3].

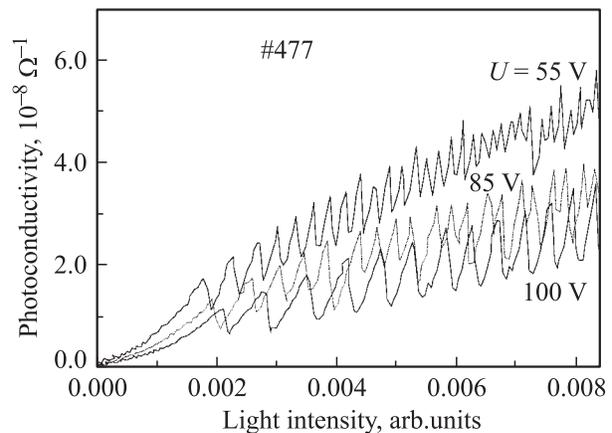
На рис. 2 приведены зависимости латеральной ФП структуры 1379 AlAs/InAs с одним слоем КТ InAs от интенсивности межзонного света  $I$  при  $T = 4.2\text{ К}$  и различных значениях тянущего напряжения  $U$ . Из

рисунка видно, что пороговый рост ФП происходит при  $I_{th}$ , существенно большем (примерно на порядок), чем для структуры с КЯ (рис. 1). С ростом  $U$  наклон кривых ФП уменьшается, величина  $I_{th}$  также почти не меняется с ростом  $U$ .

На рис. 3 представлены зависимости латеральной ФП структуры 478 AlGaAs/InGaAs с КТ InGaAs и с двумя КЯ GaAs в матрице AlGaAs от интенсивности межзонного света  $I$  при  $T = 4.2\text{ К}$  для  $U$ , изменяющегося в интервале 6–16 В. Как видно из рисунка, по мере роста  $U$  на кривой ФП появляется и увеличивается максимум, который постепенно сдвигается в область больших интенсивностей и затем исчезает при возрастании  $U$  до 16 В. Интересным здесь, на наш взгляд, является спадающий участок ФП. Отметим, что в измерениях, проведенных на объемном GaAs, наблюдается лишь монотонный рост ФП с ростом интенсивности межзонного света.

Для структуры 477 с ростом  $U$  сигнал ФП начинает вести себя неустойчиво, и начиная приблизительно с 50 В в зависимости ФП от  $I$  появляются осцилляции, показанные на рис. 4. Видно, что осцилляции появляются начиная с некоторой интенсивности света, период осцилляций растет с  $U$  и уменьшается с ростом  $I$ . При изменении скорости нарастания интенсивности света изменялся период осцилляций, они сохранялись и при некоторой фиксированной интенсивности подсветки структур. Это означает, что наблюдаемые осцилляции ФП происходят во времени. Аналогичные осцилляции ФП в области больших  $U$  наблюдались и для некоторых структур с КТ. Увеличение температуры измерений приводит к исчезновению порогового поведения ФП и к уменьшению периода осцилляций вплоть до их исчезновения.

Анализ представленных результатов проводился в рамках теории протекания [4]. В структурах с КЯ проявление ступенчатого роста мы связываем с флуктуацией толщины КЯ в плоскости структуры [5]. Следствием



**Рис. 4.** Зависимость латеральной ФП от интенсивности межзонного света для структуры с двумя КЯ GaAs толщиной 8.5 и 5 нм, разделенных слоем AlGaAs толщиной 25 нм, при  $T = 4.2\text{ К}$  и  $U = 55, 85$  и  $100\text{ В}$ .

этих флуктуаций является уширение уровней размерного квантования в КЯ и образование локализованных состояний в областях, где флуктуация толщины КЯ достигает максимума. По мере роста интенсивности света увеличивается заселенность этих локализованных состояний, и при  $I_{th}$  неравновесные носители заряда в этих состояниях достигают уровня протекания. Численный анализ для  $I > I_{th}$  показал, что рост сигнала ФП для структур с КЯ происходит по степенному закону  $(I - I_{th})^p$ , где показатель степени  $p = 0.5$  для  $U = 10$  В и с ростом  $U$  он монотонно возрастает.

Зависимость ФП от  $I$  вблизи  $I_{th}$  для структуры 1379 также имеет степенной вид, но с показателем степени больше 1 для  $U = 9$  В. Ранее для структур с КТ Ge показатель степени был равен  $\sim 1.4$  и был идентифицирован как критический индекс теории протекания ( $t$ ) [3].

Существенно большее значение пороговой интенсивности для структуры с КТ относительно структуры с КЯ говорит о том, что рельеф, индуцированный напряженными КТ, превосходит рельеф, создаваемый флуктуациями толщины КЯ. Отметим также, что для ряда структур с КЯ порогового поведения ФП не наблюдалось. Это свидетельствует о том, что в этих структурах флуктуации толщины малы.

Происхождение осцилляций ФП мы связываем с поведением локализованных носителей заряда вблизи порога протекания. Более детальное рассмотрение показало, что осцилляции ФП имеют асимметричный вид, т.е. сначала происходит монотонный рост сигнала ФП, а затем резкое его уменьшение. При малых  $U$  рекомбинация электронов и дырок в локализованных состояниях уменьшает их заполнение и осцилляции отсутствуют. Для больших значений  $U$  происходит разделение неравновесных носителей заряда различного знака в противоположные стороны и рекомбинация подавляется. При фиксированном значении  $I$  временной процесс накопления электронов и дырок в этих локализованных состояниях происходит до тех пор, пока они не начинают пересекаться и рекомбинация возобновляется, что проявляется в резком уменьшении ФП. Повторение этого циклического процесса приводит к наблюдаемым осцилляциям ФП. Увеличение периода осцилляций с ростом  $U$  следует из увеличения пространственного разделения электронов и дырок в локализованных состояниях. Уменьшение периода осцилляций с ростом интенсивности подсветки объясняется ростом концентрации неравновесных носителей заряда, что приводит к более быстрому заполнению локализованных состояний. Повышение температуры измерений приводит к росту частоты осцилляций ФП, и при некоторой температуре осцилляции исчезают полностью. Тепловая энергия электронов в локализованных состояниях при этом становится больше высоты барьеров, носители заряда не чувствуют рельефа, связанного с флуктуациями толщины КЯ в структурах с КЯ или связанного с релаксацией механического напряжения вокруг КТ в структурах с КТ, и осцилляции исчезают.

В структуре 478 содержится как КТ, так и КЯ. Пороговый рост ФП для данной структуры происходит при малой величине  $I_{th}$  (рис. 3), как и для структуры с КЯ 477 (рис. 1), что можно связать с флуктуациями толщины КЯ в данных структурах. Однако участок монотонного уменьшения ФП с ростом  $I$  связан, по-видимому, с уменьшением количества носителей заряда в локализованных состояниях за счет их туннелирования на уровни размерного квантования в КТ.

Таким образом, в структурах AlGaAs/GaAs с КЯ GaAs и структурах AlGaAs/InGaAs с самоорганизующимися КТ InGaAs обнаружено, что латеральная фотопроводимость имеет пороговый характер по отношению к интенсивности межзонного света. Обнаружены осцилляции межзонной ФП в области относительно больших тянущих полей. Эти наблюдаемые особенности объясняются в модели протекания неравновесных носителей заряда по локализованным состояниям.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-02-16466).

## Список литературы

- [1] V.A. Shchukin, D. Bimberg. Rev. Mod. Phys., **71**, 1125 (1999).
- [2] О.А. Шегай, К.С. Журавлев, В.А. Марков, А.И. Никифоров, О.П. Пчеляков. ФТП, **34**, 1363 (2000).
- [3] О.А. Shegai, V.A. Markov et al. Phys. Low-Dim. Structur., **1/2**, 261 (2002).
- [4] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979) с. 174.
- [5] В.А. Гайслер, Д.А. Тэннэ, Н.Т. Мошегов и др. ФТП, **38**, 2242 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

## Lateral photoconductivity of AlGaAs/InGaAs structures with quantum wells and quantum dots under interband illumination

O.A. Shegai, A.K. Bakarov, A.K. Kalagin, A.I. Toropov

The Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** The lateral interband photoconductivity of MBE grown AlGaAs/InGaAs structures with quantum wells (QW's) and quantum dots (QD's) as a function of light intensity has been investigated at low temperatures  $T$  and different lateral voltages  $U$ . As for QW's and QD's structures the threshold growth of photoconductivity was observed. At large  $U$  the PC of both types of structures oscillated and the period of oscillations decreased with the light intensity and increased with  $U$ . The increase in temperature resulted in disappearance of those features. Analysis of these data were based on the percolation theory.