

## Мощное дальнейшее инфракрасное излучение горячих дырок напряженной двумерной структуры InGaAs / AlGaAs

© Ю.Л. Ив́анов, С.А. Морозов, В.М. Устинов, А.Е. Жуков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 апреля 1998 г. Принята к печати 27 апреля 1998 г.)

На фоне насыщения вольт-амперной характеристики в сильном электрическом поле напряженной структуры InGaAs/AlGaAs обнаружено резкое возгорание дальнего инфракрасного излучения в полях около 1.5 кВ/см. При дальнейшем увеличении электрического поля интенсивность излучения изменяется немонотонно. Предполагается связь возгорания излучения с образованием доменов, являющихся причиной насыщения тока.

В настоящее время дальнему инфракрасному (ИК) излучению горячих двумерных дырок посвящено уже достаточно большое число работ (см., например, [1–4]). Интерес к этой проблеме обусловлен своеобразием энергетического спектра двумерных дырок, сильной непараболичностью дисперсионных кривых подзон размерного квантования и наличием точек антипересечения [5]. В этих условиях при разогреве дырок можно ожидать образования инверсной функции распределения подобно тому, как это предполагалось в случае одноосно сжатого германия [6] (туннелирование в точке антипересечения). Однако в работе [7] показано, что инверсия в одноосно сжатом германии по расщепленным подзонам не возникает. Причина заключается в том, что в объемном германии близкое расположение расщепленных подзон в точке антипересечения существует только в направлении сжатия (в кристаллографическом направлении [111]). Отклонение от этого направления "раздвигает" подзоны, туннелирование не возникает, и инверсия оказывается невозможной. В то же время в двумерных структурах одно направление инфинитного движения исключается и шансы образования инверсии по этой схеме повышаются.

Дальнее ИК излучение горячих двумерных дырок наблюдалось впервые из ненапряженных структур типа GaAs/AlGaAs в [1–3]. В этих работах делается вывод о межподзонном характере излучательных переходов. В работе [2] показано существование стриминга горячих дырок и продемонстрирована эволюция заполнения второй подзоны размерного квантования горячими дырками в узких (6.8 нм) квантовых ямах при изменении греющего поля, которая связана со стримингом, а в работе [3] измерен спектр излучения из широких (20 нм) квантовых ям. Никаких выводов относительно возможности получения инверсной функции распределения сделано не было. В работе [4] исследовалась напряженная структура на основе InGaAs/GaAs. Разогрев дырок в этой системе приводит к выбросу их из ямы в барьеры, где они эффективно охлаждаются, так как имеют значительно большую, чем в ямах, эффективную массу. На основе этого эффекта обсуждаются возможности инверсного распределения дырок.

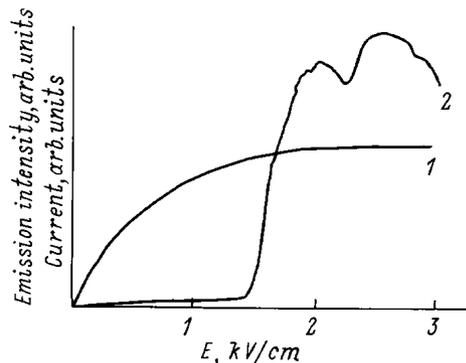
В настоящем сообщении приводятся результаты предварительного исследования дальнего ИК излучения и транспорта горячих дырок в напряженной структуре InGaAs/AlGaAs. Глубина дырочных квантовых ям в этой системе составляет более 200 мэВ. Разогрев дырок приложенным вдоль квантово-размерных слоев электрическим полем при такой глубине ямы вряд ли может привести к их выбросу из ямы в барьеры, и можно считать, что все описываемые далее процессы происходят в результате перераспределения дырок между подзонами размерного квантования.

Структура выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии в стандартной установке RIBER-32P с твердотельным источником мышьяка. На полуизолирующей подложке GaAs (100) выращивался буферный слой арсенида галлия толщиной 0.2 мкм, за которым следовала активная область, состоящая из десяти квантовых ям InGaAs толщиной 15 нм, разделенных барьерами AlGaAs толщиной 60 нм. Толщина квантовых ям не превосходила критическую толщину псевдоморфного роста для используемого состава твердого раствора. Структура с квантовыми ямами ограничивалась барьерами AlGaAs толщиной 100 нм.

Двумерный дырочный газ в квантовых ямах образовывался вследствие селективного легирования бериллием узких (2.5 нм) слоев барьеров, отделенных от ям спейсерами толщиной 6.0 нм. Концентрация атомов Be в слоях составляла  $1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Вся структура заканчивалась слоем GaAs толщиной 200 Å. Температура выращивания активной области составляла 510°C, что позволяло избежать переиспарения In в процессе осаждения.

Из структуры изготавливались образцы с контактами, получаемыми вжиганием золота с цинком на глубину, обеспечивающую надежное соединение с квантово-размерными слоями. Зазор между контактами в используемых образцах составлял 2 мм. Электрическое поле прикладывалось вдоль квантово-размерных слоев по кристаллографическому направлению [110] импульсами длительностью 1 мкс с частотой 10 Гц. Все эксперименты проводились при температуре жидкого гелия.

Модулированное легирование барьеров в структуре обеспечивает достаточно хорошую подвижность дырок.



Зависимость тока (1) и интенсивности дальнего ИК излучения (2) от электрического поля в образце  $E$ .

В настоящем случае подвижность в слабых полях при температуре жидкого гелия имеет величину порядка  $10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . При такой величине подвижности в структурах типа GaAs/AlGaAs наблюдается стриминг, при котором ток слабо зависит от электрического поля, а момент достижения стриминга при увеличении электрического поля характеризуется достаточно резким изломом вольт-амперной характеристики. При этом, чем больше подвижность, тем при меньших полях происходит выход на стриминг и тем резче переход (см. рис. 1 в [2]). Тем не менее полного насыщения вольт-амперной характеристики при стриминге не наблюдается, так как дырки при достижении в баллистическом полете энергии оптического фона имеют некоторое время на его испускание и проникают в активную область тем больше, чем больше электрическое поле, обуславливая слабое возрастание тока.

Иная картина наблюдается при приложении сильного поля вдоль квантово-размерных слоев напряженной структуры InGaAs/AlGaAs. Несмотря на достаточно хорошую подвижность дырок в слабых полях, в этом случае вольт-амперная зависимость не имеет характерного излома, который должен наблюдаться при выходе на стриминг, а плавно переходит в область действительного насыщения тока (см. рисунок, кривая 1). Подобное поведение вольт-амперной характеристики для напряженной структуры можно объяснить зарождением и развитием домена — области высокого, но фиксированного поля, который контролирует ток через образец. При увеличении разности потенциалов на контактах образца область домена растет, однако поле в нем и, следовательно, ток остаются постоянными.

Дальнее ИК излучение регистрировалось в области чувствительности фотоприемника из германия, легированного бором ( $50 \div 120 \text{ мкм}$ ). При малых полях наблюдается слабый рост интенсивности, сравнимой по величине с той, которая регистрировалась в работе [2]. При поле около  $1.5 \text{ кВ/см}$  интенсивность излучения резко возрастает, увеличиваясь в несколько десятков раз (см. рисунок, кривая 2). Никаких резких изменений тока при этом не наблюдается. Дальнейшее увеличение

поля в образце приводит к немонотонному изменению интенсивности излучения. Характер этого изменения при повторных проходах остается тем же, хотя амплитуда несколько варьируется. Во всех случаях резкий рост излучения происходит при одинаковом электрическом поле.

Немонотонный характер интенсивности мощного излучения в зависимости от электрического поля свидетельствует о том, что излучение связано не с тривиальными процессами в образце (например, электрическим пробоем). Возможно, что его резкий рост как-то связан с образованием доменов, что, в свою очередь, связано с перераспределением дырок по подзонам размерного квантования, при котором не последнюю роль играют процессы туннелирования в точках антипересечения. К сожалению, нам неизвестен спектр дырочных подзон настоящей структуры, который может сильно отличаться от соответствующего спектра ненапряженных GaAs-квантовых ям, характеризующегося далеким расположением подзон в точках антипересечения [5]. Вместе с тем, известны случаи напряженных структур с достаточно близким расположением дисперсионных кривых в точке антипересечения, где вполне возможно туннелирование, и обширной областью в зоне Бриллюэна с большой эффективной массой, которая должна обеспечить существование домена (см. Fig. 1, a в [8]).

В этих условиях возможно возникновение инверсии и генерации стимулированного излучения по механизму, описанному выше. Пороговый характер мощного излучения способствует такому пониманию происходящих процессов.

Настоящая работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 98-02-18403) и МНТП России "Физика твердотельных наноструктур" (грант № 97-1044).

Авторы также выражают благодарность М.С. Кагану за давние обсуждения возможности использования напряженных квантово-размерных структур для получения стимулированного дальнего ИК излучения, положительно повлиявших на постановку настоящих экспериментов.

## Список литературы

- [1] L.E. Vorobjev, D.V. Donetsky, A. Kastalsky. In: *Nanostructures: Physics and Technology* (St. Petersburg, 1995) p. 221.
- [2] Yu.L. Ivanov, G.V. Churakov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, D.V. Tarkhin. In: *Nanostructures: Physics and Technology* (St. Petersburg, 1995) p. 225.
- [3] L.E. Vorobjev, L.E. Golub, D.V. Donetsky. In: *Nanostructures: Physics and Technology* (St. Petersburg, 1996) p. 235.
- [4] V.Ya. Aleshkin et al. In: *Nanostructures: Physics and Technology* (St. Petersburg, 1996) p. 443.
- [5] L.G. Gerchikov, A.V. Subashiev. *Phys. St. Sol.* (b), **160**, 2 443 (1990).
- [6] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев, В.П. Синис. *ЖЭТФ*, **103**, вып. 5, 91 (1993).

- [7] E.V. Starikov, P.N. Shiktorov. Opt. Quant. Electron., **23**, S247 (1991).
- [8] A.M. Cohen. S.R. Aladim, G.E. Margues. Surf. Sci., **267**, 464 (1992).

*Редактор Л.В. Шаронова*

### **Intensive far-infrared emission of hot holes of a strained two-demensional InGaAs / AlGaAs structure**

Yu.L. Ivánov, S.A. Morozov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Against the background of the current-voltage dependence saturation in a strong electric field of a InGaAs / AlGaAs structure a dramatic enhancement of far-infrared emission has been observed in the field about 1.5 kV/cm. Further increasing the electric field shows a nonmonotonic character of the emission-voltage dependencies. The rise of emission is probably connected with domain formation and subsequent gain of current saturation.