

Дальняя инфракрасная электролюминесценция в каскадных гетероструктурах II рода

Ю. Б. Васильев¹⁾, В. А. Соловьев, Б. Я. Мельцер, А. Н. Семенов, С. В. Иванов, Ю. Л. Иванов, П. С. Копьев

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 14 марта 2002 г.

Сообщается о наблюдении дальнего ИК излучения в гетероструктурах II рода. Образцы представляют собой десятипериодные каскадные структуры, каждый период которых включает квантовые ямы InAs и AlGaAsSb, разделенные варизонным барьером. Результаты исследования вертикального транспорта и электролюминесценции свидетельствуют о том, что излучение обусловлено переходами между состояниями электронов и дырок, находящимися в соседних квантовых ямах.

PACS: 07.57.Hm, 78.60.Fi, 78.66.Fd

В последнее время одно из направлений, по которому развиваются исследования квантовых каскадных лазеров (ККЛ) [1], связано с получением длинноволнового излучения. Удалось создать ККЛ на межподзонных переходах с длиной волны вплоть до 24 мкм [2]. Однако попытки распространить идеи, используемые для коротковолновых каскадных лазеров, на терагерцовую область остаются безуспешными. Единственным достижением является получение очень маломощной спонтанной электролюминесценции с длиной волны вблизи 100 мкм [3–5]. Одной из модификаций ККЛ является биполярный каскадный лазер на основе гетероструктур II типа с разрывом зон [6], который объединяет достоинства инжекционных и униполярных каскадных лазеров. Активная область состоит из двух ям InAs и GaSb, содержащих электроны и дырки, соответственно, энергетические спектры которых перекрываются. При приложении к структуре электрического напряжения происходит инжекция электронов в яму InAs с последующей их рекомбинацией с дырками, что приводит к испусканию фотонов на переходах между уровнями электронов и дырок, расположенными в соседних ямах. Конструкция существующего каскадного биполярного лазера позволяет получить излучение на длине волны около 4 мкм.

В настоящей работе сообщается о создании биполярных каскадных структур II рода, в которых при приложении внешнего напряжения уменьшается расстояние между слоями двумерных электронов и дырок. В таких структурах при напряжениях, выше порогового, обнаружено сильное излучение. Приводятся результаты экспериментального исследова-

ния электрических и излучательных характеристик структур, которые свидетельствуют о том, что излучение связано с электронно-дырочной рекомбинацией между соседними ямами.

В качестве активной области предлагаемой конструкции излучателя используются квантовые ямы InAs и $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{AsSb}$, имеющие *n*- и *p*-тип проводимости, соответственно, разделенные барьером из варизонного полупроводникового соединения. В отличие от обычных ККЛ для функционирования структур с варизонными барьерами не требуется выполнения условия идентичности параметров всех периодов, поскольку “подстройка” уровней активных областей происходит автоматически за счет перераспределения напряжения при изменении туннельной проводимости барьеров [7].

Образцы выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на p^+ -GaSb (100) подложках в установке Riber 32, оборудованной стандартным источником мышьяка и крекинговым источником сурьмы. Активная область структур преднамеренно не легировалась. Каждый период состоит из варизонного барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$, согласованного в целом по параметру решетки с GaSb, квантовой ямы InAs, толщиной 17 нм, а также 10 нм- $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{AsSb}$ квантовой ямы постоянного состава. Активная область располагается между двумя p^+ -GaSb слоями, легированными бериллием до значения $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщина нижнего слоя – 0.1 мкм, а верхнего – 0.5 мкм. Образцы выкальвались в виде прямоугольников с размерами сторон, составляющими несколько сотен микрон. Для измерения излучения на образец подавались импульсы напряжения прямоугольной формы со скважностью 2 и с частотой повторения 1010 Гц (длительность одного импульса составля-

¹⁾e-mail: Yu.Vasilyev@pop.ioffe.rssi.ru

ла 910 мкс) при $T = 4.2$ К. Излучение, выходящее из структуры, регистрировалось с помощью германиевого фотоприемника, легированного медью. Область чувствительности такого фотоприемника находится в диапазоне от нескольких микрон до 30 мкм с максимумом чувствительности на длине волны 24 мкм. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись с помощью характериографа при различных температурах и в импульсном режиме одновременно с излучением.

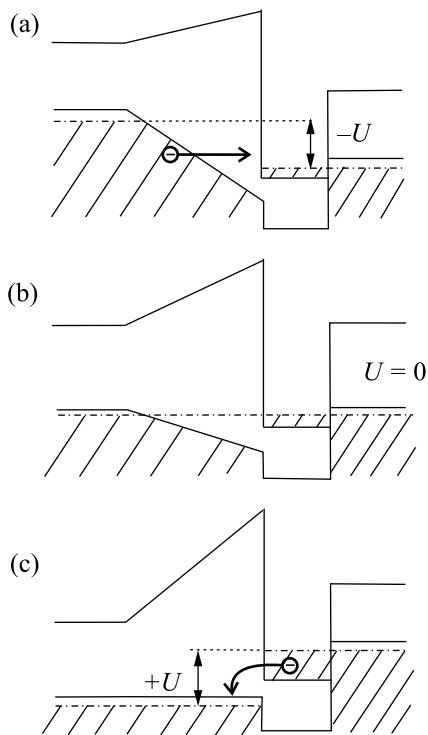


Рис.1. Схематическое изображение зонной диаграммы одного периода структуры при различных полярностях внешнего напряжения: (а) обратное, (б) нулевое, (с) прямое

На рис.1 представлена схематическая зонная диаграмма одного периода структуры при различных полярностях внешнего напряжения. Внешнее напряжение преимущественно падает на барьерах, поскольку туннельная проводимость барьеров значительно меньше проводимости слоев, содержащих носители. По аналогии с туннельным диодом обратное смещение соответствует случаю, когда отрицательный потенциал приложен к слою дырок (рис.1а). Типичные ВАХ, полученные при $T = 77$ К и 300 К, показаны на рис.2. При увеличении обратного смещения ток экспоненциально растет. Как видно из рис.1а, это можно объяснить тем, что с ростом обратного напряжения увеличивается наклон треугольного барье-

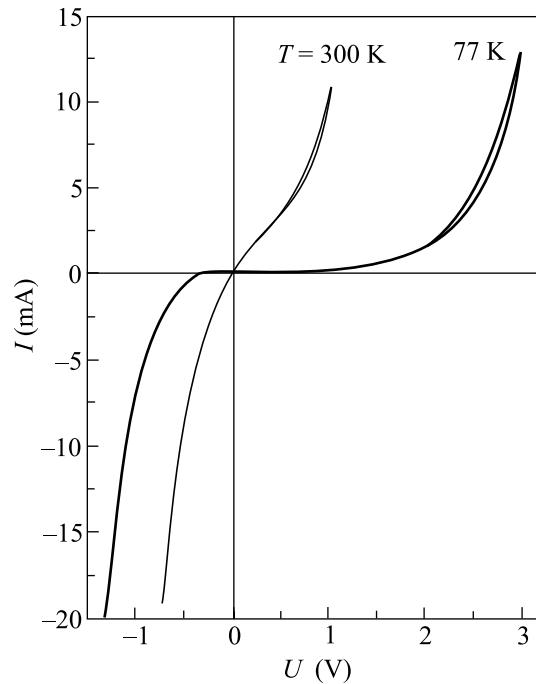


Рис.2. Вольт-амперные характеристики структуры при двух различных температурах – 77 К и 300 К

ра так, что “эффективная” толщина барьеров уменьшается и увеличивается число состояний, из которых возможно туннелирование носителей через барьеры в соседний слой. В то же время резкое увеличение тока с температурой свидетельствует о том, что при высоких температурах основной вклад в ток дает не туннельная, а термическая компонента. При приложении прямого напряжения, как следует из рис.1с, следует ожидать кардинально другого вида ВАХ. При малых положительных напряжениях никакого тока протекать через структуру не должно, поскольку нет разрешенных состояний в соседних ямах, через которые возможно прямое туннелирование. По мере увеличения напряжения происходит уменьшение наклона варизонного барьера и расстояние между слоями электронов и дырок уменьшается. При некотором пороговом напряжении, примерно равном первоначальной высоте барьера, умноженной на число периодов, валентная зона всех барьеров полностью выпрямляется и слой электронов и дырок разделяет только тонкий слой интерфейса. При этом, если перекрытие волновых функций электронов и дырок становится настолько сильным, что возникает электронно-дырочная рекомбинация между соседними ямами, должно наблюдаться резкое увеличение тока. Действительно, как видно из рис.2, при небольших положительных напряжениях ток практически отсутствует и значительное увеличение тока

наблюдается вблизи напряжения 2.3 В. Это напряжение несколько превышает расчетное значение, соответствующее произведению высоты барьера (оценки дают для нашей структуры 0,08 эВ) на число периодов. Такие ВАХ наблюдаются только при температурах $T = 77$ К и ниже, когда вклад термического тока незначительный.

Резкий рост тока при прямых напряжениях, выше пороговых, косвенно свидетельствует о возникновении электронно-дырочной рекомбинации. При этом можно ожидать, что рекомбинация является излучательной. Действительно, излучение было зарегистрировано с помощью Ge:Cu-фотоприемника при приложении к структуре импульсов напряжения. На рис.3 показаны измеренные при $T = 4.2$ К зависимости интенсивности излучения и величины силы тока как функции напряжения, приложенного в прямом направлении. Излучение и ток имеют одинаковый характер поведения от напряжения. Видно, что при превышении пороговых напряжений и ток, и излучение резко возрастают в очень узком диапазоне напряжений. Такое поведение свидетельствует в пользу того, что при приложении напряжения уменьшается расстояние между слоями электронов и дырок, и после перекрытия волновых функций электронов и дырок происходит резкий рост скорости излучательной рекомбинации между слоями. Прямая ветвь ВАХ аналогична измеренной при $T = 77$ К. Из этого следует, что ВАХ прибора не изменяются в интервале температур от 4.2 К до 77 К и можно ожидать, что и излучательные характеристики не сильно изменятся при повышении температуры до 77 К.

Зависимость излучения от силы тока (вставка на рис.3) имеет две характерные особенности. Во-первых, хорошо виден ток отсечки, для данного образца равный 2 мА (плотность тока ~ 2 А/см²), меньше которого никакого излучения из структуры зарегистрировать не удастся. По-видимому, термическая компонента тока, которая не дает вклада в излучение, не исчезает полностью и при $T = 4.2$ К. Во-вторых, интенсивность излучения линейно зависит от тока накачки. Это означает, что излучение не связано с разогревом, поскольку в этом случае наблюдалась бы квадратичная зависимость интенсивности от тока. С увеличением тока отношение сигнал/шум увеличивается и при максимальных исследованных токах (25 мА) превышает 100. Важно отметить, что при обратной полярности приложенного напряжения никакого сигнала при тех же значениях тока обнаружено не было. Можно грубо оценить длину волны излучения, поскольку известен диапазон чувствительнос-

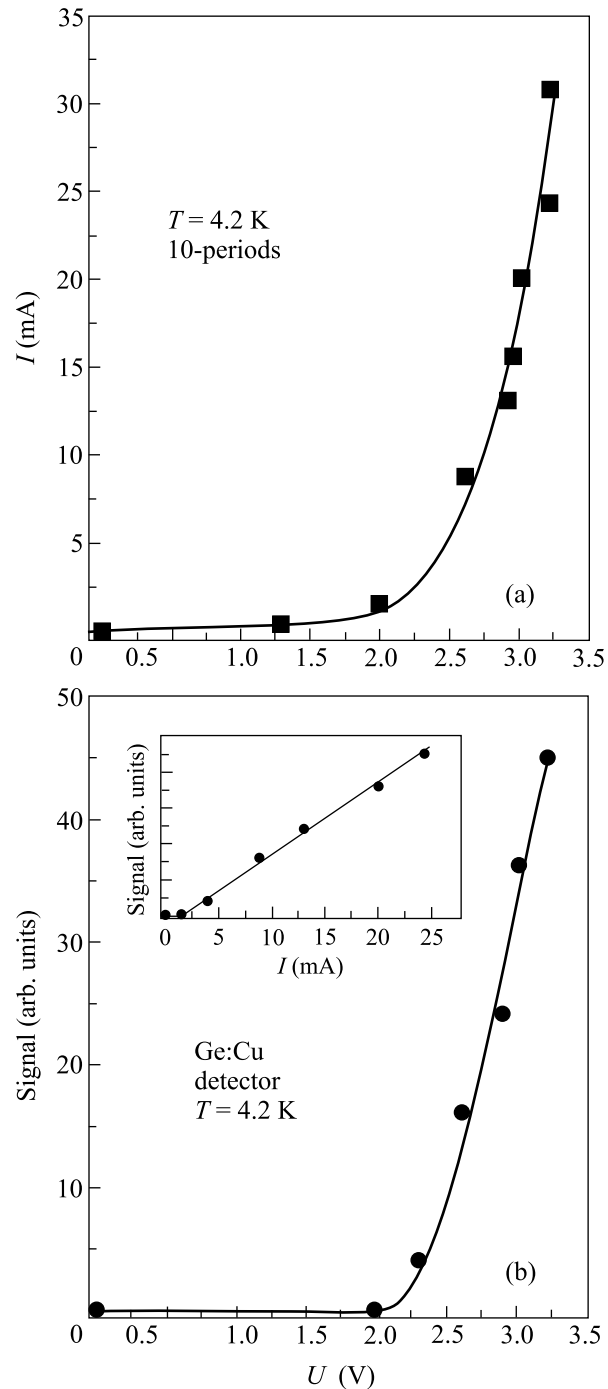


Рис.3. Зависимости тока (а) и интенсивности излучения (б) от напряжения при температуре 4.2 К. На вставке представлена зависимость интенсивности излучения от силы тока

ти фотоприемника. Эта оценка согласуется с нашим предположением о том, что излучение обусловлено оптическими переходами между состояниями электронов и дырок в соседних ямах. Действительно, в этом случае длина волны излучения должна

быть несколько больше высоты варизонного барьера с учетом квантования по энергии в квантовых ямах, что дает длину волны ~ 12 мкм. Поскольку точно не известна высота варизонного барьера, все приведенные оценки являются грубыми. Очевидно, что данные, необходимые для подтверждения нашей оценки, могут дать спектральные измерения, что является предметом отдельного исследования.

Таким образом, в настоящей работе сообщается о создании приборов на основе гетероструктур II рода с управляемым электрическим полем расстоянием между проводящими слоями. Изучены особенности вертикального транспорта при разных температурах и получено излучение в дальнем ИК диапазоне. Результаты свидетельствуют о том, что излучение обусловлено электронно-дырочной рекомбинацией носителей, находящихся в соседних ямах. Предложенная концепция в конструировании излучателей открывает возможности для создания нового типа лазеров в дальнем ИК диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант #00-02-17045), CRDF (#RP1-2270) и программы “Физика твердотельных наноструктур”. Авторы благодарны Р. А. Сурису за полезные обсуждения.

1. J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco et al., *Science* **264**, 553 (1994).
2. Colombelli, F. Capasso, C. Gmachl et al., *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2620 (2001).
3. M. Rochat, J. Faist, M. Beck et al., *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3724 (1998).
4. J. Ulrich, R. Zobl, V. Schrenk et al., *Appl. Phys. Lett.* **77**, 1928 (2000).
5. Н. Н. Зиновьев, А. В. Андрианов, В. Ю. Некрасов и др., *Письма ЖЭТФ* **74**, 105 (2001).
6. B. H. Yang, D. Zhang, R. Q. Yang et al., *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2220 (1998).
7. Yu. B. Vasilyev, S. D. Suchalkin, *Electron. Lett.* **35**, 1563 (1999).