

Терагерцовая инжекционная электролюминесценция в многопериодных квантово-каскадных структурах AlGaAs/GaAs

Н. Н. Зиновьев^{+*}, А. В. Андрианов⁺¹⁾, В. Ю. Некрасов⁺, В. А. Петровский⁺, Л. В. Беляков⁺, О. М. Сресели⁺, Г. Хилл^{□2)}, Дж. М. Чемберлен^{* 2)}

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

□ Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, Sheffield, S10 2TN, United Kingdom

* IMP, School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, United Kingdom

Поступила в редакцию 14 июня 2001 г.

Сообщается об обнаружении терагерцовой электролюминесценции в области ≈ 1.5 ТГц в квантово-каскадной структуре GaAs/AlGaAs, содержащей 40 периодов туннельно-связанных квантовых ям. Люминесценция обусловлена пространственно непрямыми оптическими переходами электронов между основными состояниями в соседних квантовых ямах.

PACS: 07.57.Hm, 78.60.Fi, 78.67.De

Область электромагнитных волн терагерцового диапазона (или дальнего инфракрасного (ИК) диапазона) является одной из наиболее труднодоступных и, как следствие, наименее изученной. В последнее время благодаря методам зонной инженерии возникли условия для создания источников терагерцового диапазона, основанных на использовании полупроводниковых многопериодных квантово-размерных систем с монополярной инжекцией носителей заряда и межподзонными излучательными переходами [1]. Практическая реализация идей [1] была осуществлена в области длин волн среднего ИК диапазона [2, 3]. Подход, отработанный при создании квантово-каскадных лазеров и квантово-каскадных структур (ККС), излучающих в среднем ИК диапазоне, возможно, позволит создать приборы для дальнего ИК диапазона, где компактные источники света вообще отсутствуют. Получение излучения в дальней ИК области при излучательной релаксации квантово-размерных электронов в квантовых ямах (КЯ) осложняется конкурирующими процессами эмиссии фононов и электрон-электронного рассеяния [4]. Недавно в ряде работ наблюдалась дальняя ИК электролюминесценция в параболических КЯ [5], а также в ККС [6, 7]. Однако достигнутая в настоящее время эффективность излучательной рекомбинации остается низкой. Дальнейшее применение методов зонной инженерии, среди которых создание ККС с оптимальными условиями туннелирования, а так-

же использование асимметричных КЯ [8, 9] и ККС, построенных на основе гетероструктур II типа, позволит повысить эффективность дальней ИК электролюминесценции в таких структурах и в дальнейшем получить стимулированное излучение.

Исследованные в настоящей работе структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в центре МВЕ EPSRC Университета Шеффилда (Великобритания). Структура выращивалась на полуизолирующей подложке (100) GaAs и содержала 40 периодов, каждый из которых состоит из четырех GaAs КЯ, разделенных $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ туннельными барьерами. Ширины ям и барьеров и их чередование следующие: КЯ 280 Å, барьер 25 Å, КЯ 180 Å, барьер 40 Å, КЯ 160 Å, барьер 25 Å, КЯ 150 Å, барьер 40 Å. Далее периоды повторяются. Квантово-каскадная структура была рассчитана так, чтобы достичь, как и в работе [6], терагерцового излучения при внутризонных оптических переходах электронов между наименьшими подзонами размерного квантования. Квантовые ямы шириной 280 и 180 Å, разделенные туннельным барьером толщиной 25 Å, образуют активную область структуры. Две следующие ямы шириной 160 и 150 Å, разделенные таким же барьером, образуют инжектор, который поставляет электроны в КЯ следующего периода. В отличие от ККС, исследованных в [6], где туннельные барьеры между соседними периодами структуры составляли 60 Å, в наших структурах с целью повышения эффективности инжекции и опустошения основного состояния толщина туннельных барьеров между периодами была доведена до 40 Å. Уменьшение толщины инжек-

¹⁾ e-mail: Alex.Andrianov@pop.ioffe.tssi.ru

²⁾ G. Hill, J. M. Chamberlain.

ционного барьера должно было позволить наблюдать и непрямые оптические переходы между нижними состояниями в активной области. Для уменьшения влияния пространственного заряда при инжекции КЯ толщиной 160 и 150 Å легированы кремнием до уровня $\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Слой n^+ -GaAs ($n \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 2 мкм со стороны подложки и “прокладка” (“spacer”) 100 нм нелегированного GaAs образовывали двумерный (2D) инжекционный контакт. Аналогичные два слоя: n^+ GaAs и нелегированного GaAs – выполняли роль верхнего 2D контакта.

На образцах для измерений были сформированы меза-структуры диаметром ≈ 400 мкм. Для вывода излучения по нормали к поверхности структур (перпендикулярно плоскости КЯ) на верхний контактный слой наносилась металлическая (Cr/Au) решетка с периодом 20 мкм для преобразования излучающей моды ККС в моду с направлением волнового вектора, нормальным к плоскости структуры. Исследуемые образцы были укреплены на медном хладопроводе гелиевого оптического криостата, “теплое” окно которого было выполнено из полиэтилена. На образцы подавалось смещение в виде прямоугольных импульсов частотой 500 кГц (скважность 2), модулированных прямоугольными импульсами низкой частоты (80 Гц, скважность 2, коэффициент модуляции 1). Такое смещение использовалось с целью минимизации нагрева образцов в процессе измерений.

Электролюминесценция (ЭЛ) регистрировалась с помощью фурье-спектрометра, построенного на базе прибора Grubbs–Parsons. Внутренний объем спектрометра откачивался с целью предотвращения влияния поглощения на парах воды на результаты измерений. Детектором дальнего ИК излучения служил охлаждаемый жидким гелием кремниевый болометр QMC Instruments, на входе которого был установлен полосовой оптический фильтр, обеспечивающий работу детектора в спектральной области 2–400 см^{-1} . Сигнал детектора на частоте токовой модуляции 80 Гц измерялся с помощью lock-in усилителя SR-530. Перемещение подвижного зеркала фурье-спектрометра осуществлялось посредством прецизионной возвратно-поступательной системы Newport с обратной связью, обеспечивающей точность позиционирования не хуже 0.25 мкм. Управление перемещением зеркала, измерение выходного сигнала lock-in усилителя, управление амплитудой импульсов электрического смещения на структурах, а также быстрое фурье-преобразование интерферограмм осуществлялись с помощью компьютера.

При подаче смещения на исследуемую структуру детектор регистрировал терагерцовое излучение.

Сигнал возрастал с ростом напряжения смещения на структуре (рис.1). При малых напряжениях смещения сигнал тонет в шумах. При повышении напряже-

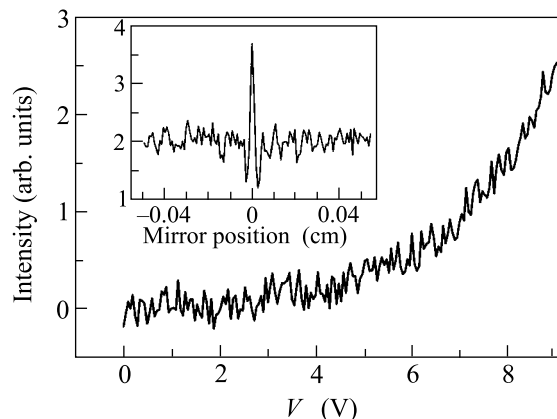


Рис.1. Зависимость интенсивности терагерцового излучения от приложенного к структуре напряжения V , на вставке – зависимость интенсивности сигнала от положения зеркала интерферометра; окно прозрачности входного фильтра 2–400 см^{-1} , $T = 7\text{--}13$ К

ния до 4–9 В соотношение сигнал/шум существенно улучшается и достигает 10 и более (рис.1). На вставке к рис.1 приведена характерная интерферограмма сигнала. Можно видеть ярко выраженный максимум в интерферограмме при прохождении подвижным зеркалом положения, соответствующего нулевой разности хода между плечами интерферометра.

На рис.2 представлен спектр терагерцового излучения при напряжении 5.5 В на квантово-каскадной

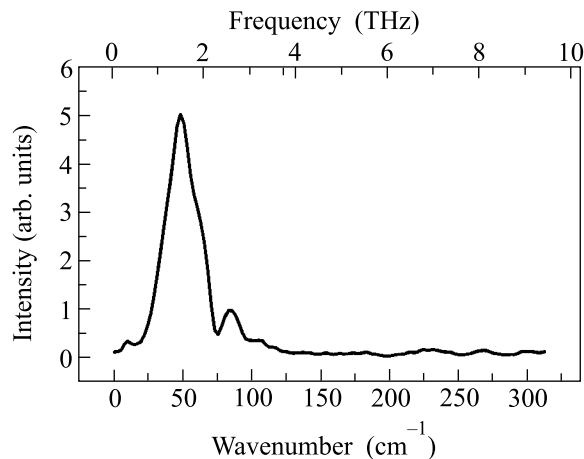


Рис.2. Спектр терагерцового излучения, $T = 7$ К, $V = 5.5$ В

структуре. Спектры измерялись с разрешением $\approx 10 \text{ см}^{-1}$. Такое разрешение было выбрано с целью

минимизации времени записи спектра. Видно, что основной вклад в спектр электролюминесценции вносит полоса с максимумом при 48.8 см^{-1} (605 мЭВ или 1.46 ТГц) и полушириной порядка 30 см^{-1} . Такой характер спектра значительно отличается от данных, полученных в работе [6], где была получена узкая линия излучения с максимумом при 113.6 см^{-1} , относящаяся к переходам между второй и первой подзонами размерного квантования в квантовой яме шириной 280 \AA – активной области ККС.

Частота, соответствующая максимуму излучения в нашем спектре, возрастает с ростом напряжения смещения. Эта зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией (рис.3) со скоростью нарастания порядка $8.9 \text{ см}^{-1}/\text{В}$. Линейная зави-

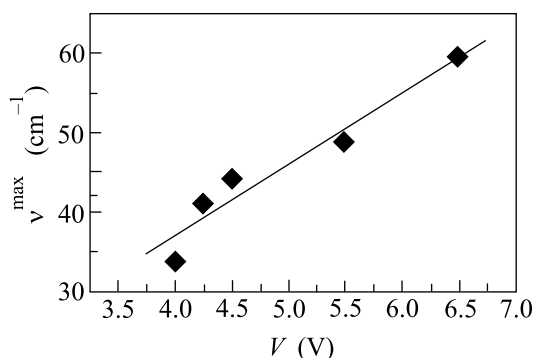


Рис.3. Зависимость положения максимума терагерцового излучения ν^{\max} от приложенного напряжения V

симость положения максимума излучения от приложенного смещения свидетельствует в пользу того, что наблюдаемая полоса обусловлена излучением при непрямым (в реальном пространстве) переходах электронов в ККС. Такими переходами могли бы быть переходы электронов между основным состоянием в яме 280 \AA и основным состоянием в соседней яме. Согласно нашим оценкам, при учете падения напряжения на контактах для выравнивания наименьших уровней в соседних КЯ активной области ККС необходимо приложить к структуре внешнее напряжение порядка $1.5\text{--}2 \text{ В}$. Отметим, что “разгорание” электролюминесценции начинается при величинах смещения, близких к этому значению (рис.1).

Оценки интегральной мощности терагерцового излучения с учетом поправок на эффективность сбо-

ра излучения дают для структур, созданных и исследованных в настоящей работе, величину порядка 2 нВт при напряжении на структуре 5.5 В и подводимой электрической мощности 700 мВт , что соответствует квантовой эффективности излучателя порядка $3 \cdot 10^{-9}$.

Таким образом, в настоящей работе обнаружена новая полоса терагерцовой электролюминесценции. В квантово-каскадных структурах, содержащих туннельно-связанные квантовые ямы $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$, при напряжении на структуре 5.5 В максимум спектра излучения приходится на 48.8 см^{-1} (1.46 ТГц) и сдвигается в высокочастотную область с ростом напряжения смещения по закону, близкому к линейному. Наблюдаемые закономерности в поведении ТГц электролюминесценции позволяют связать ее природу с пространственно непрямыми переходами электронов между основным состоянием в широкой яме и основным состоянием в соседней, “эжекторной”, яме.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда INTAS (# 97-0856), Российского фонда фундаментальных исследований “Научная школа” (# 00-15-96750) и программы “Квантово-размерные наноструктуры”. ННЗ благодарен EPSRC за поддержку визита в УК.

1. Р. Ф. Казаринов, Р. А. Сурис, ФТП **5**, 797 (1971); *ibid* **6**, 148 (1972).
2. J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco et al., **264**, 553 (1994).
3. F. Capasso, J. Faist, S. Sitori, and A. Y. Cho, *Solid State Commun.* **102**, 231 (1997).
4. P. Hyldgaard and J. W. Wilkins, *Phys. Rev.* **B53**, 6889 (1996).
5. K. D. Maranovski, A. C. Cossard, K. Unterrainer, and E. Gornik, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3522 (1996).
6. M. Rochat, J. Faist, M. Beck et al., *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3724 (1998).
7. J. Ulrich, R. Zobl, V. Schrenk et al., *Appl. Phys. Lett.* **77**, 1928 (2000).
8. P. Harrison, R. W. Kelsall, K. Donovan, and P. Kinsler, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technol.* **48**, 645 (2000).
9. P. Kinsler, P. Harrison, and R. W. Kelsall, *Phys. Rev.* **B58**, 4774 (1998).