

Электролюминесценция квантово-каскадных структур AlGaAs/GaAs в терагерцовом диапазоне

© Н.Н. Зиновьев⁺⁺, А.В. Андрианов⁺, В.Ю. Некрасов⁺, Л.В. Беляков⁺, О.М. Сресели^{†¶},
Г. Хилл[□], Дж.М. Чемберлен^{*}

⁺Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
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

(Получена 21 августа 2001 г. Принята к печати 29 августа 2001 г.)

Исследовалась электролюминесценция квантово-каскадной структуры, состоящей из 40 периодов туннельно-связанных квантовых ям GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As. При напряжении смещения свыше 1.5–2.0 В наблюдалась полоса терагерцового излучения в области 1.0–1.8 ТГц. Положение максимума полосы линейно сдвигается в высокочастотную область с ростом напряжения на структуре. Эффект объяснен пространственно непрямыми переходами электронов между состояниями в соседних квантовых ямах.

Введение

Последние годы отмечены возросшим интересом к изучению электромагнитных волн терагерцового (или дальнего инфракрасного) диапазона. Терагерцовое излучение находит применение в томографических системах, интроскопии, микроскопии, сканирующих системах изображения в медицине, биологии, средствах связи и контроля. Набор источников излучения в основном сводился к системам, основанным на излучении черного тела. Другие доступные источники терагерцового диапазона, такие как лазеры на свободных электронах, газовые лазеры с оптической накачкой от CO₂-лазера и полупроводниковые лазеры на p-Ge, страдают существенными недостатками, связанными с их большими габаритами, отсутствием плавной перестройки или необходимостью использования сверхнизких температур и сильных магнитных полей. Отсутствие компактных и широкополосных источников терагерцового диапазона привело к своеобразному феномену "терагерцовой щели" (области частот электромагнитных волн ≈ 0.1 –30 ТГц), доступ к которой весьма затруднен.

В последнее время, однако, возникла достаточно высокая вероятность создания источников терагерцового диапазона, основанных на использовании полупроводниковых многопериодных квантово-размерных систем с электрической монополярной инжекцией носителей заряда и межподзонными излучательными переходами. Оригинальная идея такого рода источников была выдвинута Казариновым и Сурисом в их пионерской работе [1] вскоре после открытия сверхрешеток Есаки и Тсу [2]. Концепция [1] представила новый принцип монополярного полупроводникового излучателя, впоследствии получившего название квантово-каскадного лазера. Система энергетических уровней и электронная кинетика в таком излучателе может быть выстроена в зависимости от

задачи путем соответствующего подбора толщин слоев и барьеров в квантово-каскадной структуре (ККС). Практическая реализация идей [1] стала возможной относительно недавно (в первой половине 90-х годов) и была осуществлена в области длин волн среднего инфракрасного (ИК) диапазона [3,4].

Подход, отработанный при создании квантово-каскадных лазеров и квантово-каскадных структур, излучающих в среднем ИК диапазоне, возможно, позволит создать приборы и для дальнего ИК диапазона. Получение излучения в дальней ИК области при излучательной релаксации квантово-размерных электронов в квантовых ямах осложняется конкурирующими процессами эмиссии фононов и электрон-электронного рассеяния [5]. Однако в ряде работ наблюдалась дальняя ИК электролюминесценция в параболических квантовых ямах [6,7]. Недавно и в ККС [8,9] наблюдалось THz-излучение в спонтанном режиме, возбуждаемое инжекционным током, в области температур 4–120 К. Эффективность излучения, достигнутая в настоящее время, остается низкой, позволяющей получить $\approx 10^{-12}$ при плотностях тока через структуру ≈ 10 А/см² [8]. Вследствие этого необходимо более подробное исследование подобных структур с вариацией параметров структуры для создания ККС с оптимальными условиями туннелирования.

В данной работе исследовалась электролюминесценция (ЭЛ) в квантово-каскадной структуре GaAs/AlGaAs на основе туннельно-связанных квантовых ям.

Эксперимент

Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке (100) GaAs в центре MBE EPSRC Университета Шеффилда (Великобритания). Структура состоит из 40 периодов, каждый из которых содержит четыре GaAs-квантовые ямы (КЯ), разделенные Al_{0.15}Ga_{0.85}As туннельными

[¶] E-mail: Olga. Sreseli@pop.ioffe.rssi.ru

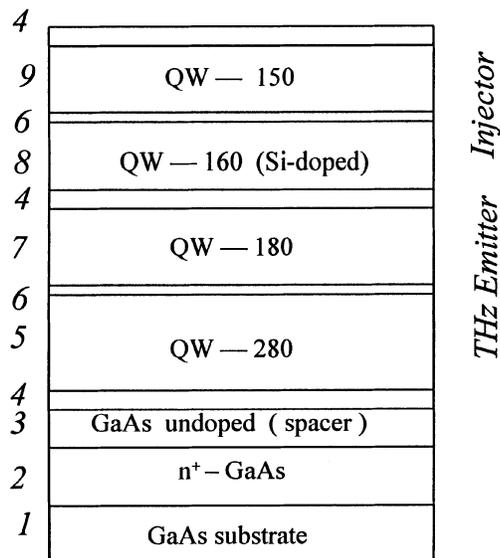


Рис. 1. Первый (нижний) из 40 каскадов излучающей структуры (схематическое изображение). 1 — подложка; 2 — слой низкоомного GaAs (толщина 2 мкм); 3 — спейсер GaAs; 4, 6 — барьеры $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$; 5, 7, 9 — квантовые ямы GaAs; 8 — квантовая яма GaAs:Si. Ширина квантовых ям (Å) указана на рисунке, ширина барьеров, Å: 4 — 40, 6 — 25.

барьерами. Параметры ям и барьеров даны на рис. 1. С обеих сторон структура заканчивается слоем n^+ -GaAs ($n \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и буферным слоем («spacer») легированного GaAs, которые обеспечивают двумерный (2D) инжекционный контакт (рис. 1). Квантовые ямы 280 и 180 Å, разделенные 25 Å туннельным барьером, образуют активную область структуры. Соседние квантовые ямы и барьеры выполняли соответственно роль эжектора неравновесных электронов, инжектируемых из контакта, и их инжектора в следующий активный период структуры. Для уменьшения влияния эффекта пространственного заряда при инжекции неравновесных электронов КЯ 150 Å были легированы кремнием до уровня $\approx 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

На образцах были сформированы меза-структуры диаметром $\approx 400 \text{ мкм}$. Для вывода излучения по нормали к поверхности структур (перпендикулярно плоскости КЯ) на верхний контактный слой наносилась металлическая (Cr/Au) решетка связи с периодом 20 мкм, которая одновременно служила верхним электрическим контактом.

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 регистрировалась с помощью Фурье-спектрометра, построенного на базе прибора Grubbs-Parsons (рис. 2). Излучение из образца собиралось внеосевым 90-градусным параболическим с относительным отверстием 1:2. На выходе спектрометра излучение фокусировалось на детектор также при помощи внеосевого 90-градусного параболического с относительным отверстием 1:6. Внутренний объем спектрометра и узлов параболических откатывался с целью предотвращения влияния на результаты измерений поглощения на парах воды. Детектором дальнего ИК излучения служил охлаждаемый жидким гелием кремниевый болометр (QMS Si-detector), на входе которого был установлен полосовой оптический фильтр, обеспечивающий работу детектора в спектральной области $2\text{--}400 \text{ см}^{-1}$. Сигнал детектора измерялся на частоте 80 Гц с помощью резонансного усилителя с синхронным детектором. Перемещение подвижного зеркала Фурье-спектрометра осуществлялось с помощью прецизионного шагового двигателя. Управление шаговым двигателем, измерение сигнала синхронного детектора, управление амплитудой импульсов электрического смещения на структурах, а также быстрое Фурье-преобразование интерферограмм осуществлялось с помощью компьютера.

Чувствительность используемой аппаратуры к измерениям в дальней ИК области была проверена при записи спектров электролюминесценции тестовых образцов, представляющих собой параболические квантовые ямы, детально исследованные, например, в [6]. На рис. 3 приведен спектр электролюминесценции параболической ямы шириной 140 нм. Можно видеть узкую одиночную линию с максимумом при 78.9 см^{-1} (2.368 ТГц), что

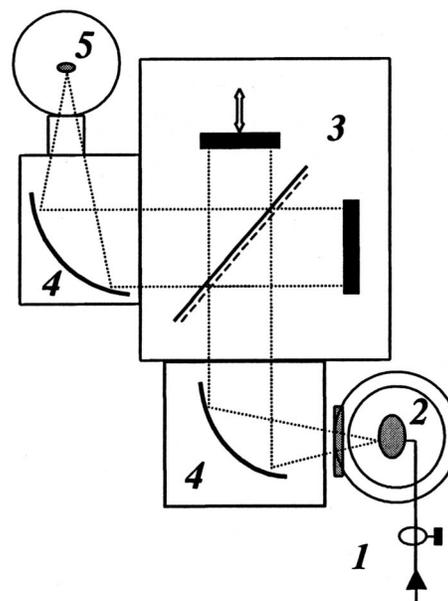


Рис. 2. Специализированный Фурье-спектрометр. 1 — вход электрических импульсов, 2 — гелиевый криостат с излучающей структурой, 3 — интерферометр Майкельсона, 4 — параболические зеркала, 5 — болометр.

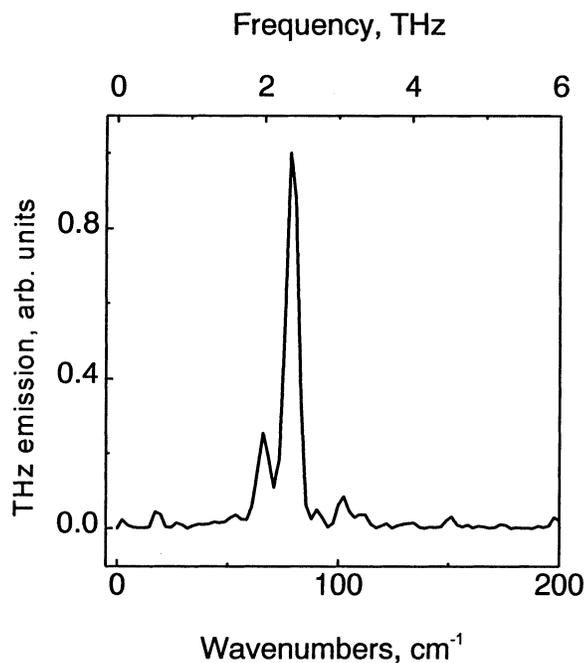


Рис. 3. Спектр излучения тестовой структуры с параболической квантовой ямой в структуре GaAs/AlGaAs.

близко к данным, опубликованным в [6]. Полуширина линии составляет величину порядка 5.6 см^{-1} и фактически соответствует разрешению спектрального прибора в данном эксперименте.

Результаты и обсуждение

При подаче прямого смещения на исследуемую ККС (плюс на верхнем контакте структуры, минус к подложке) и при нулевой разности хода в плечах интерферометра детектор регистрировал интегральное терагерцовое излучение, спектральная область которого ограничивалась фильтром на входе болометра ($2\text{--}400 \text{ см}^{-1}$). Сигнал детектора уменьшался до нуля при блокировании выходного окна криостата с помощью металлической пластины или соответствующих фильтров. На рис. 4 показана зависимость интегрального сигнала от приложенного напряжения смещения на структуре. При малых напряжениях смещения ($< 1 \text{ В}$) сигнал тонет в шумах. При повышении напряжения до $4\text{--}9 \text{ В}$ соотношение сигнал/шум существенно улучшается и достигает 10 и более (рис. 4).

Спектры терагерцового излучения при прямом и обратном смещениях, равных 5.5 В , представлены на рис. 5. Видно, что основной вклад в спектр электролюминесценции вносит полоса с максимумом при 48.8 см^{-1} (6.05 мэВ , или 1.46 ТГц) и полушириной порядка 30 см^{-1} . Такой характер спектра значительно отличается от данных работы [8], в которой исследовалась близкая по параметрам ККС, но была получена узкая линия излучения с

максимумом при 113.6 см^{-1} . Эту линию авторы [8] приписывают переходам между второй и первой подзонами размерного квантования в квантовой яме шириной 280 \AA .

В наших структурах с целью повышения эффективности инжекции толщина туннельных барьеров между периодами была уменьшена до 40 \AA (против 60 \AA в работе [8]). Уменьшение толщины инжекционного барьера должно было также позволить наблюдать не только

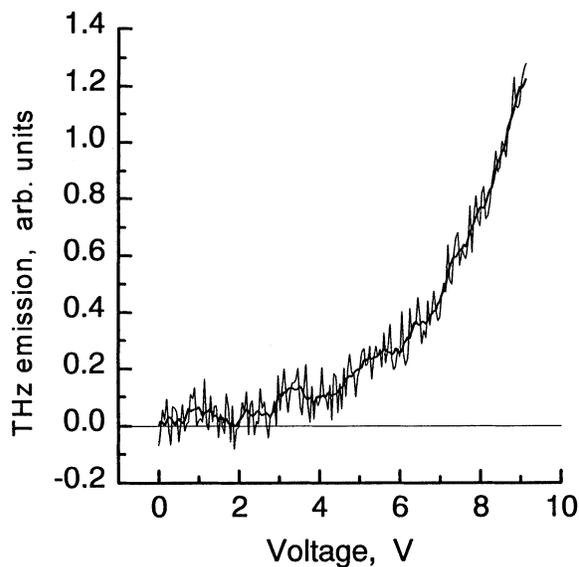


Рис. 4. Зависимость интенсивности терагерцового излучения от приложенного к структуре напряжения V , окно прозрачности входного фильтра $2\text{--}400 \text{ см}^{-1}$, $T = 7\text{--}13 \text{ К}$.

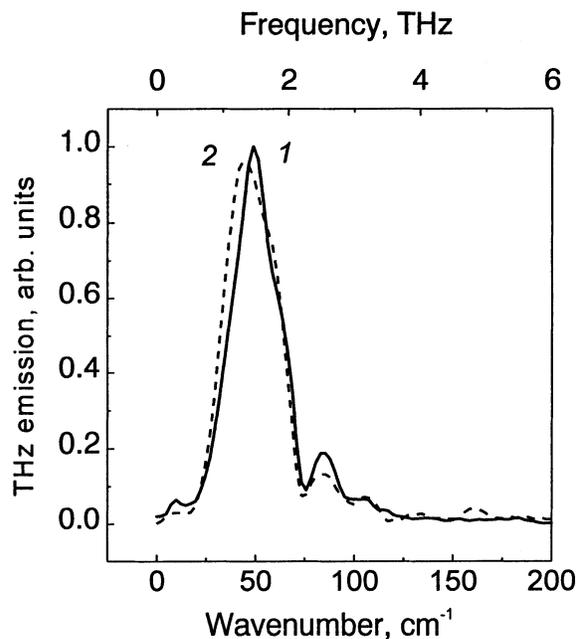


Рис. 5. Спектры терагерцового излучения квантово-каскадной структуры, $V = 5.5 \text{ В}$; $T = 7 \text{ К}$. 1 — прямое смещение (плюс на структуре), 2 — обратное смещение.

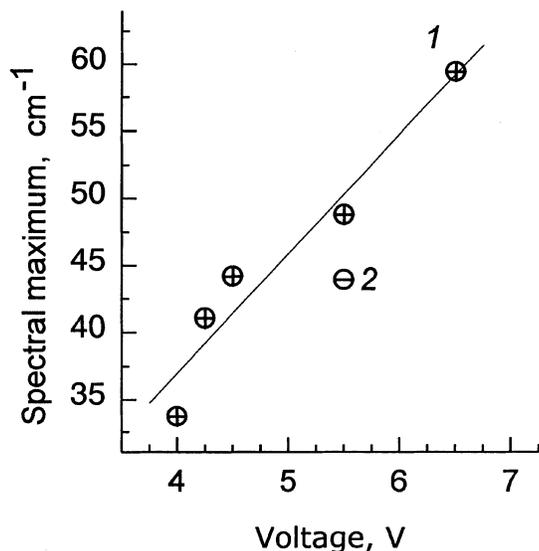


Рис. 6. Зависимость положения максимума терагерцового излучения ν_{\max} от приложенного напряжения V .

прямые, но и не прямые (в реальном пространстве) оптические переходы между нижними состояниями в соседних ямах.

С целью дискриминации типов переходов была изучена зависимость положения максимума излучения от приложенного напряжения смещения (рис. 6). Эта зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией со скоростью нарастания частоты максимума излучения $\sim 8.9 \text{ см}^{-1}/\text{В}$. Линейная зависимость положения максимума излучения от приложенного смещения свидетельствует в пользу того, что наблюдаемая полоса обусловлена излучением при не прямых (в реальном пространстве) переходах электронов в ККС. Такими переходами могли бы быть переходы электронов между основным состоянием в яме 280 \AA и основными состояниями в соседних ямах. Учитывая, что на контактах падает $0.5\text{--}1 \text{ В}$ напряжения, для выравнивания наимизших уровней в соседних квантовых ямах активной области ККС необходимо приложить к 40-каскадной структуре внешнее напряжение порядка $1.5\text{--}2 \text{ В}$. Отметим, что "разгорание" ЭЛ начинается при величинах смещения, близких к этому значению (рис. 4).

Оценки интегральной мощности терагерцового излучения с учетом эффективности сбора излучения дают для ККС, 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 излучения порядка $3 \cdot 10^{-9}$. Увеличение мощности излучения по сравнению с данными работы [8] может быть следствием использования двумерных инжекционных контактов к ККС и более тонких инжекционных барьеров.

Таким образом, в квантово-каскадных структурах, содержащих туннельно-связанные квантовые ямы GaAs/AlGaAs, при напряжении на структуре 5.5 В обнаружена полоса терагерцовой электрoluminesценции,

максимум спектра излучения которой приходится на 48.8 см^{-1} (1.46 ТГц) и сдвигается в высокочастотную область с ростом напряжения смещения по закону, близкому к линейному. Наблюдаемые эффекты объясняются пространственно непрямыми переходами электронов между основным состоянием в широкой яме и основными состояниями в соседних ямах.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда INTAS (N 97-0856), РФФИ "Научная школа" (00-15-96750) и программы "Квантово-размерные наноструктуры". Н.Н. Зиновьев благодарен EPSRC за поддержку визита в UK.

Список литературы

- [1] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис. ФТП, **5**, 797 (1971); ФТП, **6**, 148 (1972).
- [2] L. Esaki, R. Tsu. IBM J. Res. Dev., **14**, 61 (1970).
- [3] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho. Science, **264**, 553 (1994).
- [4] F. Capasso, J. Faist, S. Sirtori, A.Y. Cho. Sol. St. Commun., **102**, 231 (1997).
- [5] P. Hyldgaard, J.W. Wilkins. Phys. Rev. B, **53**, 6889 (1996).
- [6] K.D. Maranovski, A.C. Gossard, K. Unterrainer, E. Gornik. Appl. Phys. Lett., **69**, 3522 (1996).
- [7] J. Ulrich, R. Zobl, K. Unterrainer, G. Strasser, E. Gornik, K.D. Maranovski, A.C. Gossard. Appl. Phys. Lett., **74**, 3158 (1999).
- [8] M. Rochat, J. Faist, M. Beck, U. Oesterle, M. Illegems. Appl. Phys. Lett., **73**, 3724 (1998).
- [9] M. Rochat, J. Faist, M. Beck, U. Oesterle. Physica E, **7**, 44 (2000).

Редактор Л.В. Беляков

Electroluminescence of AlGaAs/GaAs quantum-cascade structures in the terahertz range

N.N. Zinov'ev⁺, A.V. Andrianov⁺, V.Yu. Nekrasov⁺, L.V. Belyakov⁺, O.M. Sreseli⁺, G. Hill[□], J.M. Chamberlain^{*}

⁺loffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St.Petersburg, Russia

[□]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

Abstract Electroluminescence in quantum-cascade structure consisting of 40 periods of GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As tunnelling bound quantum well has been investigated. A radiative band in the range $1.0\text{--}1.8 \text{ THz}$ is found under $1.5\text{--}2.0 \text{ V}$ bias. The maximum position moves to high frequencies as voltage increases. The effect can be explained by spatially indirect electron transitions between neighbour quantum wells.