

# Терагерцовая электролюминесценция сверхрешеток Фибоначчи

© К.В. Малышев<sup>†</sup>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005 Москва, Россия

(Получена 27 июня 2012 г. Принята к печати 22 октября 2012 г.)

Теоретически исследована электролюминесценция в терагерцовом диапазоне фибоначиевых AlGaAs-сверхрешеток. В электрических полях  $F = 11\text{--}13$  кВ/см в диапазоне частот  $f = 2\text{--}4$  ТГц обнаружено линейное поведение коэффициента оптического усиления  $G$  и многоцветное излучение с пиками  $G$  выше  $20$  1/см без сопутствующих пиков поглощения. Параметрами пиков удобно управлять с помощью электрического поля, а также меняя толщину слоев сверхрешетки. Такие излучатели на квазипериодических сверхрешетках перспективны для „терагерцовой технологии“.

## 1. Введение

Полупроводниковая сверхрешетка (СР) является основным элементом активной области квантового каскадного лазера (ККЛ). Последнее время ККЛ активно применяется как инструмент „терагерцовой технологии“ — бурно развивающегося направления прикладной радиофизики. Известны разнообразные применения ККЛ — от медицины и биологии до астрономии и техники связи (см., например, [1]).

Способы построения периодически повторяющихся ячеек СР для активной области терагерцового ККЛ развиваются по двум основным направлениям (см., например, [2], с. 265, а также [3]). Одно направление опирается на переходы электронов между малым числом резонансных уровней в СР малой длины (каждая ячейка содержит 2–4 барьерных слоя и имеет длину менее 50 нм). В таких ККЛ основную роль играет резонансное рассеяние электронов на продольных оптических фононах (resonant-LO-phonon design). Другое направление опирается на переходы электронов между большим числом близко расположенных резонансных уровней в СР большой длины (каждая ячейка длиной более 100 нм) (bound-to-continuum design). С другой стороны, известно, что квазипериодические СР, классическим представителем которых являются фибоначиевы СР (ФСР), отличаются большим разнообразием своих резонансно-туннельных свойств. Можно ожидать появления интересных электролюминесцентных свойств ККЛ, если в ячейках его активной области применить квазипериодические СР.

Основания для поисков в этом направлении дают исследования инфракрасных спектров аперидических структур в нанопотонике [4]. В частности, отмечается перспективность оптических фибоначиевых структур для создания многоцветных инфракрасных отражателей, у которых спектр отражения состоит из нескольких резонансных линий примерно одинаковой высоты. Кроме этого, известно [5] сочетание активной области обычного терагерцового ККЛ с квазипериодической оптической решеткой, в которой по закону Фибоначчи меняется

показатель преломления слоев оптического резонатора. С другой стороны, известны лазеры без оптической резонаторной части, построенные на основе полностью разупорядоченных активных сред. В таких лазерах случайное расположение характерно для элементов активной среды, обменивающихся электромагнитным излучением. Аперидичность в таких структурах, как и в фотонных квазикристаллах, присуща оптической части с характерным пространственным масштабом порядка длины электромагнитной волны 500 нм. В данной работе предлагается выполнить в виде ФСР саму активную излучающую область ККЛ, а не его оптическую часть. В таких структурах аперидичность свойственна электронной части с характерным пространственным масштабом 5 нм — порядка длины волны де-Бройля электрона проводимости.

Таким образом, исследование электролюминесценции ФСР актуально для разработки терагерцовых ККЛ с новыми свойствами, например, для создания многоцветного ККЛ, у которого спектр излучения состоит из нескольких резонансных линий примерно одинаковой высоты. При этом одинаковые интенсивности излучения на нескольких частотах могли бы получаться за счет инверсии заселенностей сразу на нескольких парах энергетических уровней, а не за счет оптических эффектов.

Разработка СР для ККЛ на резонансных ЛО фононах сводится к подбору таких параметров слоев СР, которые обеспечивают достаточно высокое значение коэффициента оптического усиления  $G(f)$  активной области, превышающее потери на поглощение в остальных слоях ККЛ (обычно требуется  $G > 20$  1/см) на заданной резонансной частоте  $f$  (для AlGaAs-структур обычно  $f = 2\text{--}4$  ТГц) в умеренном электрическом поле порядка 10 кВ/см.

## 2. Расчет коэффициента оптического усиления

Расчеты проводились по методике, описанной в работе [6]. Эта методика комбинирует несколько способов расчета коэффициента оптического усиления ККЛ, описанных, например, в [2, р. 249]. Уравнения для

<sup>†</sup> E-mail: malyshev@bmsstu.ru

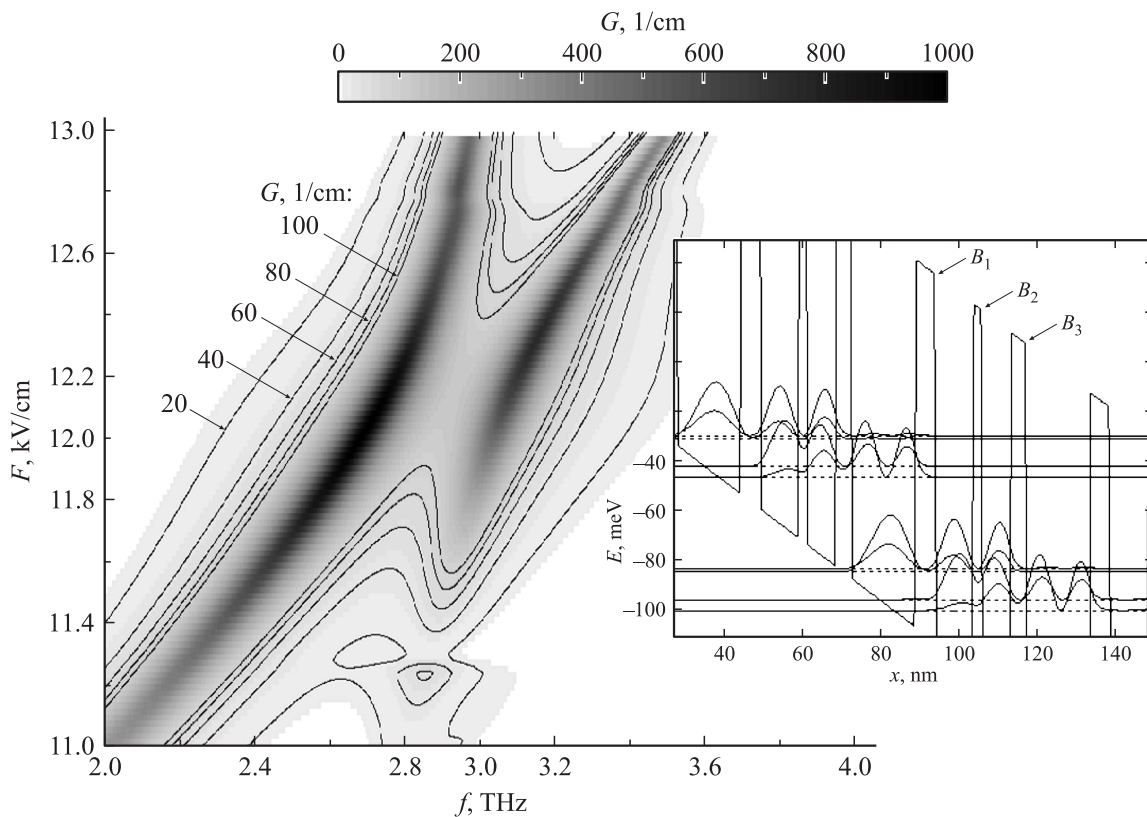


Рис. 1. Коэффициент усиления и зонная диаграмма эталонной структуры.

заселенностей резонансных уровней получали способом, описанным в [7]. Сами резонансные уровни и соответствующие им волновые функции находились по заданному потенциальному профилю энергии поперек слоев СР с помощью традиционного метода матриц переноса, как описано, например, в [8].

В качестве эталонной структуры, а также для проверки правильности расчетных процедур, как и в работе [6], взята классическая трехъямная AlGaAs-структура Luo et al. [9] с резонансом на продольных оптических фононах. Толщины слоев (последовательность слева направо), начиная с инжекторного барьера ( $B_1$  на вставке рис. 1), равнялись **9**, **17**, **4**, **13**, **7**, **29** монослоев GaAs (МС) по 0.565 нм. Жирным курсивом здесь выделены барьерные слои ( $b_1$ ,  $b_2$ ,  $B_3$  на вставке рис. 1), а подчеркиванием — легированный слой потенциальной ямы (слоевая концентрация донорной примеси  $3.6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/нм}^2$ ). Высоты  $V$  потенциальных барьеров (в эВ) и значения эффективной массы  $M$  (в единицах массы свободного электрона) находились из традиционных выражений  $V = 1.11x + 0.93x^2 + 0.85x^3$  и  $M = 0.067 + 0.083x$ , где  $x$  — доля алюминия в слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

На рис. 1 видно, что для эталонной структуры зависимость коэффициента оптического усиления  $G(f, F)$  от частоты  $f$  и напряженности  $F$  электрического поля заметно отклоняется от линейной. На вставке показан потенциальный профиль и распределение элект-

тронной плотности (квадрат модуля волновой функции электрона) в произвольных единицах на протяжении двух периодов ККЛ в характерном электрическом поле  $F = 12 \text{ кВ/см}$ .

### 3. Коэффициент оптического усиления сверхрешеток Фибоначчи

При выборе параметров слоев ФСР за основу брались средние параметры слоев эталонной структуры Luo et al. [9]. Основные принципы построения и разнообразные свойства ФСР и других квазипериодических полупроводниковых СР описаны, например, в [10, р. 154].

Каждый блок  $A$  и  $B$ , из которых строились ФСР, состоял из слоя  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  потенциального барьера высотой 0.15 эВ и толщиной 4–7 МС, за которым следовал слой потенциальной ямы GaAs толщиной 10–40 МС. Один период типичной ФСР

$$S_7 = BABBABABBA$$

в электрическом поле  $F = 12.7 \text{ кВ/см}$  показан на вставке рис. 2. Во всех ФСР последний слой потенциальной ямы легировался так же, как в эталонной структуре [9]. За этим слоем следовал слой потенциального барьера ( $B_1$  на вставке рис. 2) для инжекции электронов в следующий период ККЛ. Поэтому система кинетических уравнений для заселенностей уровней традиционно

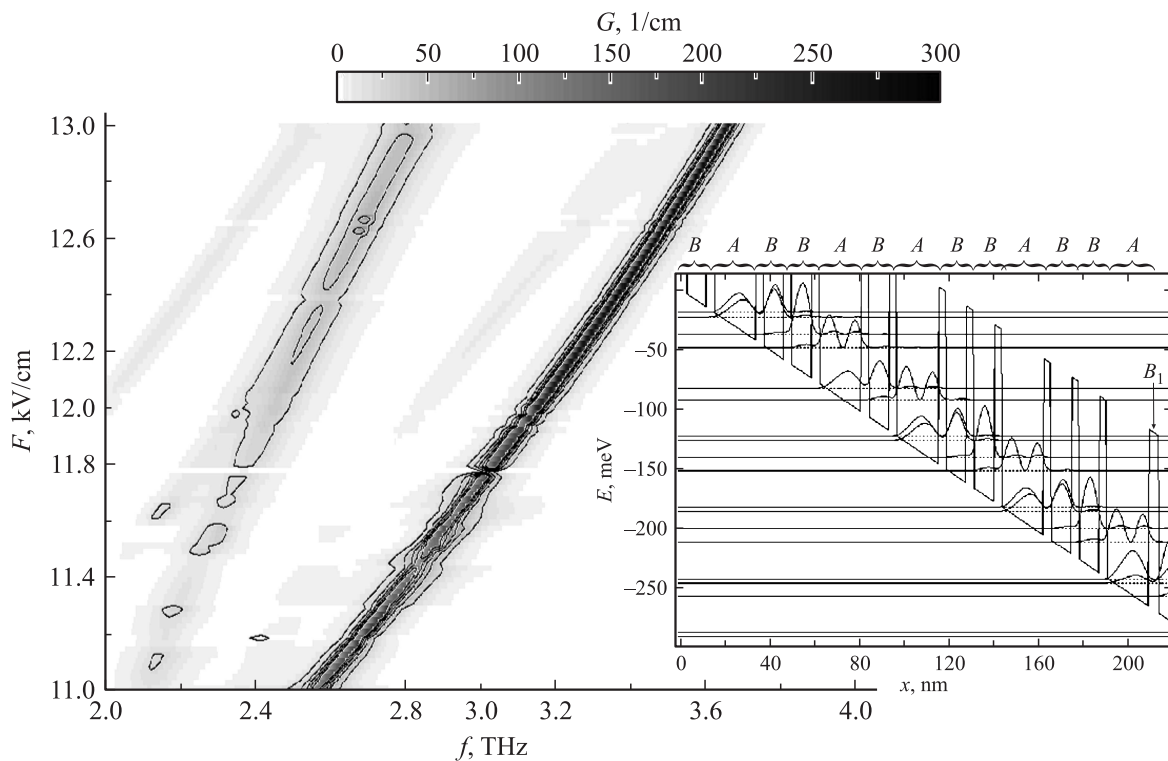


Рис. 2. Коэффициент усиления и зонная диаграмма структуры  $S_7$ .

предполагала наличие в каждой ячейке только одного равновесного резервуара электронов. Это нижний уровень в последней потенциальной яме, с которого в следующий период ККЛ туннелируют электроны через инжекторный потенциальный барьер.

В отличие от эталонной структуры у ФСР можно получить линейное поведение коэффициента оптического усиления в широком диапазоне частот и электрического поля (рис. 2), что сближает ФСР с периодическими СР. Но в отличие от периодических СР у ФСР нередко положительные и отрицательные пики коэффициента усиления далеко разнесены по частоте. Это должно облегчить экспериментальное наблюдение электролюминесценции и приборную реализацию ККЛ. У ФСР  $S_7$  на рис. 2 толщина барьерного слоя  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  составляла 6 МС, а толщина слоя GaAs-ямы составляла 16 МС для блока  $B$  и 33 МС для блока  $A$ .

С помощью ФСР можно получить дублет  $G(f)$ , сохраняющий свою форму в широком диапазоне напряжения и частоты. Параметрами дублета можно управлять, изменяя толщину слоя ямы в блоке  $A$  и толщину инжекторного барьера. Например, на рис. 3,  $a-d$  изображена зависимость коэффициента усиления  $G(f, F)$  для ФСР  $S_6 = BABBABAB$  при разных значениях параметров слоев структуры.

Увеличение толщины слоя инжекторного барьера приводит к расщеплению резонансного пика (рис. 3,  $b$ ). Расстояние  $D$  между пиками равно 0.2 ТГц (нижняя вставка на рис. 3,  $b$ ) при толщине  $L$  инжекторного барьера 8 МС

и прирастает примерно на 0.1 ТГц (верхняя вставка на рис. 3,  $b$ ) на каждый монослой, добавленный к барьеру. Высота пиков при этом падает и достигает нижнего порога  $G = 20$  1/см при  $L = 13$  МС.

Увеличение толщины слоя  $W$  потенциальной ямы в блоке  $A$  приводит к движению побочного дублета в сторону основного (рис. 3,  $c$ ). Зазор  $H$  между центрами дублетов равен 0.8 ТГц (рис. 3,  $d$ ) при толщине  $W$  ямы 33 МС и уменьшается примерно на 0.5 ТГц на каждый монослой, добавленный к слою ямы (см. вставку на рис. 3,  $d$ ). Высота пиков при этом остается неизменной.

Чем выше ранг  $N$ , тем больше резонансных уровней может иметь ФСР и тем больше шансов получить инверсную населенность сразу на многих уровнях, что необходимо для многоцветной электролюминесценции. Во всех ФСР легировался только последний слой потенциальной ямы. Поэтому с увеличением ранга  $N$  максимальное значение коэффициента усиления структур  $S_N$  падало, т.к. длина ФСР росла, а количество электронов оставалось неизменным. Чтобы при многоцветной электролюминесценции сохранить максимальные значения  $G$  выше порога 20 1/см, можно уменьшать толщину барьеров в блоках  $A$  и  $B$ . Например, многообещающе выглядят частотные спектры коэффициента усиления ФСР

$$S_8 = BABBABABBBABBBABBBABAB$$

в характерном поле  $F = 12$  кВ/см при толщине инжекторного барьера  $L = 7$  МС и толщине ямы  $W = 34$  МС в блоке  $A$ . Эти спектры содержат 3 пика выше порога

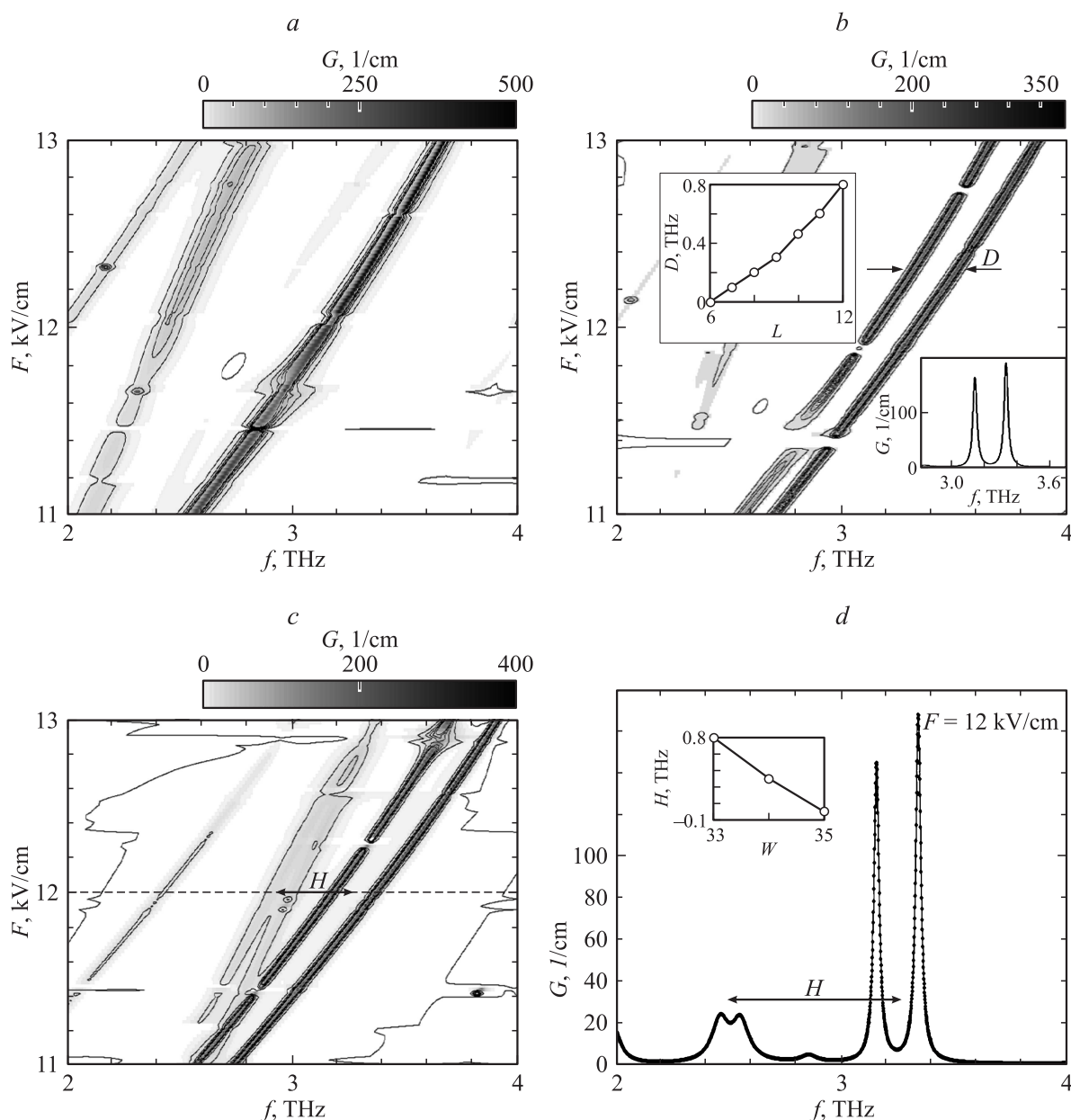


Рис. 3. Коэффициент усиления структуры  $S_6$ .

20 1/cm, причем двое из них имеют почти одинаковую высоту. Спектры получены при толщине барьеров 5 нм (6 нм) в обоих блоках *A* и *B* и при толщине ямы 17 нм (16 нм) в блоке *B*.

#### 4. Заключение

Теоретически исследована электролюминесценция полупроводниковой сверхрешетки Фибоначчи в терагерцовом диапазоне  $f = 2\text{--}4$  ТГц в электрических полях  $F = 11\text{--}13$  кВ/см, характерных для традиционных AlGaAs-структур квантового каскадного лазера на резонансных продольных оптических фононах. В отличие от традиционных структур у фибоначиевых сверхре-

шеток возможны: 1) линейное поведение коэффициента оптического усиления  $G$  в широком диапазоне частот и электрического поля и 2) многоцветное излучение с пиками  $G$  выше 20 1/cm. Многоцветное излучение имеет вид: а) пары дублетов, сохраняющих свою форму в широком диапазоне напряжения и частоты, и б) трех пиков, из которых двое имеют одинаковую высоту. Параметрами пиков и дублетов можно управлять с помощью электрического поля, а также меняя толщину слоев сверхрешетки. Это открывает перспективы создания на квазипериодических сверхрешетках многоцветного терагерцового излучателя для нужд бурно развивающейся „терагерцовой технологии“.

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-07-00007-а.

## Список литературы

- [1] A. Rostami, H. Rasooli, H. Baghban. *Terahertz Technology: Fundamentals and Applications* (N.Y., Springer, 2011) p. 2–16.
- [2] F. Rossi. *Theory of Semiconductor Quantum Devices. Microscopic Modeling and Simulation Strategies* (N.Y., Springer, 2011).
- [3] В.А. Кукушкин. ФТП, **44**, 1483 (2010).
- [4] E. Macia. Rep. Progr. Phys., **75**, 036 502 (2012).
- [5] L. Mahler, A. Tredicucci, F. Beltram et al. Nature Photon., **4** (3), 165 (2012).
- [6] L. Schrottke, M. Giehler, M. Wienold et al. Semicond. Sci. Technol., **25**, 045 025 (2010).
- [7] D. Indjin, P. Harrison, R.W. Kelsall, Z. Ikonic. J. Appl. Phys., **91**, 9019 (2002).
- [8] E. Cassan. J. Appl. Phys., **87**, 7931 (2000).
- [9] H. Luo, S.R. Laframboise, Z.R. Wasilewski et al. Appl. Phys. Lett., **90**, 041 112 (2007).
- [10] E. Macia. *Aperiodic Structures in Condensed Matter: Fundamentals and Applications* (N.Y., CRC Press, 2009).

Редактор Т.А. Полянская

## Terahertz electroluminescence of Fibonacci superlattice

K.V. Malyshev

Moscow State Technical Bauman University  
105005 Moscow, Russia

**Abstract** The electroluminescence of Fibonacci AlGaAs-superlattices in a THz-range has been theoretically investigated. The linear behavior of coefficient of photon amplification  $G$  and multi-color radiation with peaks  $G$  above 20 1/cm without accompanying peaks of uptake are revealed in electric fields  $F = 11–13$  kV/cm in a frequency band  $f = 2–4$  THz. Parameters of peaks can be drive by change of an electric field and thickness of superlattice layers. Such quasiperiodic superlattice emitters are perspective for „terahertz technology“.